

Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen Regelung

Dissertation



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Begutachter:
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner

Vorgelegt von:
Dipl.-Ing. Gernot Druml

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / November – 2012



Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. techn. Lothar Fickert, der nie aufgegeben hat, mich zu ermutigen, diese Arbeit zu schreiben. So eine Arbeit wird nicht einfach geschrieben, sie entwickelt sich. Ausgangspunkt waren viele vorausgehende Publikationen und Patente, eine viele Jahre währende Beschäftigung mit diesem Thema und – vor allem – der rege Austausch mit "Gleichgesinnten".

Bedanken möchte ich mich auf diesem Wege bei Prof. Dr.-Ing. Hans Pundt (†), der mich bereits vor 20 Jahren mit seiner Bemerkung "Die KNOSPE ist die Kapitulation bei der Erdschlusssuche" dazu angeregt hat, im Bereich Erdschluss zu forschen und nach neuen Lösungen zu suchen.

Prof. Dr. techn. Kurt Schlacher danke ich für die ausführliche Vermittlung der Grundlagen der Theorie der Regelungstechnik und Prof. Dr. techn. Andreas Kugi für die sehr langen und manchmal emotionalen Diskussionen. In diesen Diskussionen lernte ich, die elektrische Energietechnik aus der Sicht der Regelungstechnik und Systemtheorie zu betrachten.

Im Bereich der elektrischen Anlagen erfolgt die Beschreibung der Netze meist transient im Originalsystem oder stationär mithilfe der symmetrischen Komponenten. Prof. Dr.-Ing. Gerhard Herold möchte ich für seine Darstellung der Raumzeiger danken. Für mich war diese Darstellung das "missing link" für die Entwicklung der neuen Erdschluss-Wischer-Algorithmen.

Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner und Prof. Matti Lehtonen, die unter anderem auch sehr viele neue Lösungen im Bereich des Erdschlusses entwickelt haben, danke ich für die vielen offenen Diskussionen und Anregungen.

Natürlich muss ich mich auch bei Dipl.-Ing. Olaf Seifert bedanken, mit dem ich einige Forschungsprojekte im Bereich Erdschluss erfolgreich gelöst habe.

Herrn Lothar Mayer danke ich dafür, dass er mir die Möglichkeit geschaffen hat, einige der Algorithmen in Produkte umzusetzen. Dadurch wurde einerseits die technische und wirtschaftliche Akzeptanz durch den Markt bestätigt und andererseits wurden viele weitere Entwicklungen erst durch die dabei entstehenden Fragestellungen initiiert.

Ich bedanke mich auch bei allen Kunden, die mich durch ihre immer neuen Anforderungen dazu angespornt haben, über neue Lösungen nachzudenken, recht herzlich.

Bei meiner Frau Ursula Brandnegger möchte ich mich ganz besonders bedanken. Sie hat es mir durch Schaffung einer entsprechenden Umgebung, viel Geduld, Verzicht auf viele gemeinsame Stunden und ständige Ermunterung erst ermöglicht, diese Arbeit zu schreiben.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich halte hiermit ausdrücklich fest, dass der Abschnitt 2-6 dieser Dissertation in seinen wesentlichen Teilen bereits als ETG Fachbericht 132 [49] vorliegt. Die betreffenden Abschnitte im ETG-Fachbericht (Abschnitt 3.1-3.5) wurden ausschließlich von mir konzipiert und verfasst; was diese Abschnitte betrifft, bestand der Beitrag der anderen Mitglieder des Arbeitskreises „Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV“ in ihrer Funktion als Co-Autoren nachweislich - nachzulesen in den Protokollen des oben angeführten Arbeitskreises – im Korrekturlesen und der Anpassung gewisser Textpassagen an das deutsche Normenwesen.

Graz, am 2.12.2012

Gernot Druml

Kurzfassung

In vielen Ländern der Europäischen Union ist die "Erdschlusslöschung" eine der wichtigsten Optionen bei der Planung von Elektrizitätsverteilungs-Netzen, um eine optimale Qualität der Energieversorgung zu erreichen. Die Statistik zeigt, dass Erdschlüsse einen großen Anteil der Netzfehler ausmachen. Der Hauptvorteil der Erdschlusslöschung besteht darin, dass auch während des Erdschlusses die Energieversorgung für den Verbraucher aufrecht erhalten bleibt. Weder das übergeordnete Netz noch das unterlagerte 0,4-kV-Netz sehen den Fehler auf der Mittelspannungsebene. Als Folge wird die Anzahl der Versorgungsunterbrechungen für den Kunden stark reduziert. Die Erdschlusskompensation ist die erste Maßnahme, Power-Quality nicht nur zu messen sondern aktiv umzusetzen.

Durch die Erdschlusskompensation wird auch der Strom über die Fehlerstelle reduziert, wodurch die Personen-Sicherheit in der Nähe der Fehlerstelle erhöht wird. In dieser Arbeit werden aktuelle und vom Autor neu entwickelte bzw. verbesserte Verfahren zur automatischen Abstimmung der Petersen-Spule kurz vorgestellt und deren wesentlichen Vor- und Nachteile aufgezeigt.

Durch den vermehrten und raschen Ausbau der Verkabelung und den, durch die Energiewende verursachten, sehr starken Anstieg der dezentralen Energieeinspeiser haben sich die Anforderungen an die Sternpunktbehandlung, die Erdschlussortung und die erforderlichen Maßnahmen während des Erdschlusses geändert. Es werden daher in dieser Arbeit bekannte und vom Autor neu entwickelte bzw. verbesserte Verfahren aufgezeigt, die eine schnellere Eingrenzung des Fehlerortes ermöglichen. Für die einzelnen Verfahren werden die wesentlichen Vor- und Nachteile kurz beschrieben.

Schlüsselwörter: Erdschluss, Erdschluss-Kompensation, Erdschluss-Regelung, Erdschluss-Ortung, Erdschluss-Entfernung, hochohmiger Erdschluss

Abstract

In many countries of the European Union the "resonant grounding" is one of the most important options in electrical network design, in order to obtain the optimal power supply quality. Statistics show, that a great percentage of grid faults are earthfaults. The main advantage of earthfault compensation is the continuing power supply for the customer, also during an earthfault. The fault in the medium voltage network is neither visible in the superordinate grid nor in the subordinate 0,4-kV net. As a consequence, the number of power supply interruptions for the customer is considerably reduced. The earthfault compensation is the first step for power quality not only to be measured, but to be improved.

Using earthfault compensation, the current via the fault location is reduced, which increases the personal safety around the fault location. In this work, the author presents newly developed or improved algorithms, including their pros and cons, for the automatically setting of the Petersen-coil.

Due to the increased and fast expansion of cable networks and the very strong increase of the number of distributed generation, caused by the "Energiewende", the requirements for the neutral-point treatment, the earthfault detection and the necessary measurements during an earthfault have changed. In this work the author presents newly developed or improved algorithms, which enable a faster localisation of the earthfault, including the advantages and disadvantages of the methods.

Keywords: earth fault, earth fault compensation, resonant grounding, earth fault compensation control, earth fault detection, earth fault localisation, high ohmic earth faults.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	15
2 Physik des Erdschlusses und grundsätzliche Betrachtungen	17
2.1 Der Erdschluss	19
2.2 Entladevorgang	20
2.3 Aufladevorgang	22
2.4 Stationärer Zustand	23
2.5 Wiederzündende / Intermittierende Erdschlüsse	28
2.6 Raumzeigerdarstellung	29
2.6.1 Grundsätzliches	29
2.6.2 Ausschwingvorgang des Erdschlusses.....	30
2.6.3 Berechnung der Netzparameter aus dem Ausschwingvorgang*	34
2.7 Ortskurve der Verlagerungsspannung und des Fehlerstromes	38
2.7.1 Unsymmetrie in Phase L1	38
2.7.2 Natürliche kapazitive Unsymmetrie in Phase L1 des gesunden Netzes.....	41
2.7.3 Niederohmiger Erdschluss in Phase L1	44
2.7.4 Natürliche Unsymmetrie in Phase L1, L2 und L3	44
2.8 Strom über die Fehlerstelle bei Beginn des Erdschlusses	47
2.9 Impedanz an der Fehlerstelle	52
3 Identifikation des erdschlussbehafteten Abganges	57
3.1 Allgemein	58
3.2 Transiente Verfahren	59
3.2.1 Auswertung von Wanderwellen	59
3.2.2 Standard-Wischerverfahren.....	59
3.2.3 Wischerverfahren mit dem qu-Algorithmus**	61
3.2.4 Wischerverfahren mit dem qu2-Algorithmus**	67
3.2.5 Gerichtete Erkennung des wiederzündenden Fehlers mit dem qui-Algorithmus**	72
3.3 Stationäre Verfahren	79
3.3.1 Blindleistungsrichtung 50-Hz- oder $\sin(\varphi)$ -Verfahren.....	79
3.3.2 Wirkleistungsrichtung oder $\cos(\varphi)$ -Verfahren	79
3.3.3 Oberschwingungsverfahren.....	81

* Vom Autor verbessertes Verfahren

** Vom Autor patentiertes Verfahren

3.3.4	Admittanz-Verfahren	84
3.3.4.1	Verwendung der aktuellen 50-Hz-Messwerte	84
3.3.4.2	Verwendung von 50-Hz-Differenz-Messwerten zu unterschiedlichen Zeitpunkten	84
3.3.4.3	Verwendung von Messwerten ungleich 50 Hz zum gleichen Zeitpunkt**	84
3.3.4.4	Admittanz-Verfahren zur hochohmigen Fehlererkennung: 50-Hz-Injektion**	85
3.3.4.5	Admittanz-Verfahren zur hochohmigen Fehlererkennung: \neq 50-Hz-Injektion**	88
3.4	Verfahren mit Strominjektion in das Nullsystem	90
3.4.1	Wattreststrom-Erhöhung	90
3.4.2	Pulsortung	91
3.4.3	Synchronisierte Pulsortung	97
3.4.4	Pulsortung mit Verwendung des komplexen Stromes*	98
3.4.5	Pulsortung mit Auswertung der drei Leiterströme**	99
3.4.6	Pulsortung mit Frequenzen \neq 50 Hz*	101
3.4.7	Schnelle Pulsortung*	104
3.5	Vergleichende Verfahren	104
3.5.1	Vergleich der Wattrestströme je Abgang	105
3.5.2	Vergleich der Admittanzen je Abgang	105
3.5.3	Vergleich der Wirkströme je Abgang	105
3.5.4	Vergleich der Oberschwingungsströme je Abgang	105
3.5.5	Détection Sélective par les Intensités Résiduelles (DESIR)	106
3.6	Priorisierung der Erdschluss-Richtungs-Verfahren*	107
4	Entfernungsbestimmung des Fehlers.....	109
4.1	Entfernungs-Abschätzung durch Messung an zwei Messstellen	109
4.1.1	Entfernungsmessung im Ring bei niederohmigen Erdschlüssen**	109
4.1.2	Genaue Entfernungsmessung **	110
4.1.3	Entfernungsmessung bei unsymmetrischen Leitungen	116
4.1.4	Andere Verfahren	116
4.2	Entfernungs-Abschätzung durch Messung an einer Messstelle	116
4.2.1	Entfernungsabschätzung mit stationären Messwerten	116
4.2.2	Entfernungsabschätzung mit stationären Messwerten**	118
4.2.3	Delta-Verfahren	123
4.2.4	Weitere Verfahren	124
5	Regelung der Erdschluss-Spule im gesunden Netz	125
5.1	Vereinfachte Ersatzschaltung mit Hilfe der Symmetrischen Komponenten ...	125
5.2	Betrachtungen zur Über- und Unterkompensation	134
5.3	Art der Kompensation: prozentual versus fix.....	136
5.4	Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem	136

5.5	Bekannte Berechnungs- und Regelungsverfahren	139
5.5.1	Suche nach dem Maximum des Betrages von U_0	140
5.5.2	Parameterschätzung aus der Resonanzkurve*	140
5.5.3	Parameterschätzung aus der Inversen der Resonanzkurve*	141
5.5.4	Parameterschätzung aus der Ortskurve in allgemeiner Lage*.....	142
5.5.5	Parameterschätzung aus der Inversen der Ortskurve in allgemeiner Lage*.....	143
5.5.6	Berechnung der Ortskurve durch stufige Änderung der Spulenstellung.....	144
5.5.7	Berechnung der Verstimmung mit einer 50-Hz-Stromeinspeisung.....	145
5.5.8	Auswertung des Ausgleichsvorganges nach einem Erdschluss.....	146
5.5.9	Berechnung der Verstimmung durch Einspeisung von zwei Frequenzen**	147
6	Sternpunktbehandlung während des Erdschlusses.....	155
6.1	Reststrom-Kompensation.....	155
6.2	Kompensation der Oberschwingungen im Reststrom	156
6.3	Erden des fehlerhaften Leiters.....	156
7	Beispiel für die Implementierung in moderne Hardware.....	159
7.1	Anforderungen an eine moderne Hardware für die Ortung	159
7.2	Implementierte Algorithmen	161
7.3	Hardware	162
7.4	Software	162
7.4.1	Software in the Loop.....	163
7.4.2	Prozessor in the Loop	164
7.4.3	Hardware in the Loop	165
8	Zusammenfassung.....	167
9	Anhang	171
9.1	Least-Square Methode für einen Kreis: Version 1.....	171
9.2	Least-Square Methode für einen Kreis: Version 2.....	172
10	Literaturverzeichnis.....	173
10.1	Normen D-A-CH	173
10.2	Patente und Patentanmeldungen	175
10.3	Veröffentlichungen des Autors	177
10.4	Literatur	181

Abkürzungsverzeichnis

B	Suszeptanz (Blindleitwert)
B_C	Suszeptanz der Kapazität (Blindleitwert)
B_L	Suszeptanz der Induktivität (Blindleitwert)
C_E	Erdkapazität pro Leiter
d	Dämpfung
f	Frequenz
G	Konduktanz (Wirkleitwert)
I_{CE}	Kapazitiver Strom des Netzes gegen Erde bei Erdschluss (I_C)
I_F	Strom über die Fehlerstelle
I_L	Strom durch die Petersen-Spule
I_{pos}	Spulenstellung der Petersen-Spule in A geeicht; Strom durch die E-Spule wenn die Nennspannung an die Petersen-Spule gelegt wird
I_{res}	Spulenstellung der Petersen-Spule für $v = 0$
I_W	Wirkanteil des Stromes
k	Unsymmetriefaktor des Netzes
N	Sternpunkt des Transformators
R	Resistanz (Wirkwiderstand)
U_0	Spannung des Nullsystems
U_1	Spannung des Mitsystems
U_{1N}	Phasenspannung zwischen Leiter 1 und Sternpunkt N
U_2	Spannung des Gegensystems
U_{EN}	Verlagerungsspannung
U_{res}	maximale Verlagerungsspannung bei $v = 0$
v	Verstimmung
X	Reaktanz (Blindwiderstand)
Y	Admittanz (komplexer Leitwert)
Z	Impedanz (komplexer Widerstand)
ω	Kreisfrequenz
BA	Binärer Ausgang des Gerätes; Relais-Ausgang
BAF	Binäre Ausgangs-Funktion; internes Ergebnis des Ortungs- bzw. Regelungsprozesses
BE	Binärer Eingang des Gerätes
BEF	Binäre Eingangs-Funktion; interner Eingang in den Ortungs- bzw. Regelungsprozess
CI	Current Injection bzw. Stromeinspeisung mit $f = 50$ Hz oder $f \neq 50$ Hz
CIF	Verfahren für "Control by Injection with Frequency $f \neq 50$ Hz"
CIREDD	Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution
D-A-CH	Deutschland – Österreich - Schweiz
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DIF	Verfahren für "Detection by Injection with Frequency $f \neq 50$ Hz"
EOR-3D	Erdschluss-Ortungs-Relais für einen Abgang mit vielen Zusatzfunktionen
EOR-D	Erdschluss-Ortungs-Relais für 4 Abgänge
ETG	<u>E</u> nergie <u>t</u> echnische <u>G</u> esellschaft im VDE

FFT	Fast Fourier Transformation
FNN	<u>F</u> orum zur Weiterentwicklung von <u>N</u> etztechnik und <u>N</u> etzbetrieb im VDE
HIL	<u>H</u> ardware <u>I</u> n the <u>L</u> oop
HPCI	High Power Current Injection bzw. Hochstrom-Stromeinspeisung
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
KNOPE	Kurzzeitige niederohmige Phasen-Erdung
KNOSPE	Kurzzeitige niederohmige Sternpunkt-Erdung
KÜK	Kurzzeitige Überkompensation
LHW	<u>L</u> eistungshilfsw <u>u</u> icklung der Petersen-Spule
LTI	Linear time invariantes System
MATLAB	Programmiersprache für numerische Berechnungen; die Bezeichnung ist abgeleitet von MATrix LABoratory
NOSPE	Niederohmige Sternpunkt-Erdung
OSPE	Ohne Sternpunkt-Erdung bzw. isoliertes Netz
OV	Oberschwingungs-Verfahren
PAM	Puls Amplituden Modulation
PCA	Principal Component Analysis
PIL	<u>P</u> rocessor <u>I</u> n the <u>L</u> oop
PRBS	Pseudo-Random-Binary-Signal
qu	Transientes Ortungsverfahren basierend auf der Auswertung der Ladung q und der Nullspannung u
qu2	Verbessertes qu-Verfahren für vermaschte Netze
qui	Transientes Ortungsverfahren basierend auf der Auswertung der Ladung q und der Nullspannung u im Falle eines <u>i</u> ntermittierenden Erdschlusses
REG-DP	Regler für die Petersen-Spule
RESPE	Resonanz-Sternpunkt-Erdung
RTDS	Realtime digital Simulator
SIL	<u>S</u> oftware <u>I</u> n the <u>L</u> oop
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDD	Test-Driven-Development
UW	<u>U</u> mspannwerk
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

1 Einleitung

Ein wesentlicher persönlicher Grund für die Verfassung dieser Arbeit war der Wunsch des Autors, seine wissenschaftlichen Beiträge der letzten 20 Jahre in geschlossener Form darzustellen. Die vorliegende Arbeit versucht, einen Überblick über die bisher bekannten Verfahren zu geben sowie deren Vor- und Nachteile darzustellen. Vom Autor entwickelte Verbesserungen und neue Verfahren werden ebenso beschrieben wie die Gründe, welche die neuen Lösungen notwendig machten sowie die Unterschiede zu den bereits bekannten Verfahren. Behandelt werden aber auch die Grenzen der heutigen Verfahren und es wird ein Ausblick auf zukünftige Anforderungen versucht.

Einige beschriebene Verfahren des Autors, wie z. B. der qu_2 -Algorithmus oder die Berechnung der Netzparameter mithilfe einer Stromeinspeisung mit Frequenzen ungleich 50 Hz, haben sich in der Zwischenzeit bereits als Industriestandard am Markt etabliert.

Die vorliegende Arbeit möchte aber auch Optimierungen der bekannten Verfahren aufzeigen, die zu besseren und robusteren Lösungen führen.

Durch den vermehrten und raschen Ausbau der Verkabelung und den, durch die Energiewende verursachten, sehr starken Anstieg der dezentralen Energieeinspeiser haben sich die Anforderungen an die Sternpunktbehandlung, die Erdschlussortung und die erforderlichen Maßnahmen während des Erdschlusses geändert. Es werden daher auch Verfahren aufgezeigt, die z. B. eine schnellere Eingrenzung des Fehlerortes ermöglichen.

In dieser Arbeit werden auch einige offene Punkte aufgezeigt, mit denen sich sowohl etliche Forschungsinstitute als auch der Autor beschäftigen.

In vielen Ländern der Europäischen Union ist die "Erdschlusslöschung" eine der wichtigsten Optionen bei der Planung von Elektrizitätsverteilungs-Netzen, um eine optimale Qualität der Energieversorgung zu erreichen. Die Statistik zeigt, dass Erdschlüsse einen großen Anteil der Netzfehler ausmachen. Eigentlich beginnt in den heutigen Netzen fast jeder Fehler mit einem Erdschluss. Der Hauptvorteil der Erdschlusslöschung besteht darin, dass auch während des Erdschlusses die Energieversorgung für den Verbraucher aufrecht erhalten bleibt. Weder das übergeordnete Netz noch das unterlagerte 0,4-kV-Netz sehen den Fehler auf der Mittelspannungsebene. Als Folge wird die Anzahl der Versorgungsunterbrechungen für den Kunden stark reduziert [67]. Die Erdschlusskompensation ist die erste Maßnahme, Power-Quality nicht nur zu messen sondern aktiv umzusetzen.

In Freileitungsnetzen verlöscht, wenn bestimmte Randbedingungen eingehalten werden, der Lichtbogen an der Fehlerstelle selbstständig und ohne Intervention durch den Schutz oder eine durch das Betriebspersonal veranlasste Schalthandlung. In Kabelnetzen erfolgt zwar kein Verlöschen des Lichtbogens, aber es wird der Strom an der Fehlerstelle stark reduziert und damit die Personensicherheit erhöht.

Weitere wesentliche Vorteile der Erdschlusslöschung sind:

- Reduzierung des Stromes über die Fehlerstelle
- Reduzierung der Zerstörung an der Fehlerstelle
- Reduzierung der Berühr- und Schrittspannung in der Umgebung der Fehlerstelle
- Langsamere Wiederkehr der Leiter-Erde Spannung nach dem Verlöschen des Lichtbogens
- Verlöschen des Lichtbogens in Freileitungsnetzen
- Verbesserung der Power Quality durch die Reduktion der Anzahl und Dauer der Versorgungsunterbrechungen
- Reduktion der Gefahr von Kippschwingungen

Die Erdschlusserfassung und -ortung stellt sich als eine der schwierigsten Aufgaben in der Schutztechnik dar.

Beim Leiter-Leiter Kurzschluss sind die Impedanzen von der Messstelle bis zur Fehlerstelle eindeutig definiert. Der wesentliche Unsicherheitsfaktor ist die Impedanz der Fehlerstelle, die von der Fehlerursache abhängig ist und unterschiedliche Werte annehmen kann. Beim metallischen Kurzschluss liegt die Impedanz im Bereich von 0Ω . Im Falle eines Lichtbogens wird die Impedanz größer und nicht-linear. Üblicherweise fließen über die Fehlerstelle im Mittelspannungsbereich Ströme im Bereich von kA.

Beim Erdschluss werden die Verhältnisse komplizierter, da nun einige Komponenten in der Fehler Schleife nicht mehr so leicht bestimmbar sind. Die Impedanz von der Messstelle bis zur Fehlerstelle ist noch relativ genau definiert. Die Impedanz an der Fehlerstelle ist wiederum von der Fehlerursache abhängig, kann aber nun im Bereich von 0Ω bis einige $M\Omega$ liegen. Teilweise ist es sehr schwer oder sogar unmöglich, messtechnisch zwischen einem gesunden System und einem erdschlussbehafteten System eindeutig zu unterscheiden. Die Ströme über die Fehlerstelle sind zusätzlich abhängig von der Art der Sternpunktbehandlung und können im Bereich von wenigen A bis einigen kA liegen. Eine Entfernungsmessung wird zusätzlich durch die unbekannte Erdimpedanz erschwert. Die Erdimpedanz ist von vielen Faktoren [125] abhängig wie z. B. von der Beschaffung des Bodens, der Schichtung des Bodens, dem Grundwasserpegel, unterirdischen Flüssen, unterirdisch verlegten, leitfähigen Materialien wie Rohre und Betonarmierungen, Witterung, Temperatur usw. Der im Erdreich zum Sternpunkt zurück fließende Strom nimmt dadurch unterschiedliche Wege, wodurch sich die Flussverteilung und somit auch die Längsinduktivität verändern. All diese Einflussfaktoren verhindern eine exakte Bestimmung der Null-Längsimpedanz und der Erdimpedanz.

Konventionelle Erdschlusssortungs-Relais sind nur für niederohmige Fehler unter stationären Bedingungen entwickelt worden. Sie sind weder für hochohmige Erdschlüsse, die besonders in ländlichen Netzen mit Freileitungen auftreten, noch für wiederzündende Erdschlüsse, die vor allem in kompensierten Kabelnetzen auftreten, geeignet. Als Folge wird bei der Verwendung konventioneller Relais der Erdschluss sehr oft gar nicht erkannt oder es wird ein falscher Abgang als der fehlerhafte erkannt. Dies erhöht die benötigte Zeit bis zur Lokalisierung des Erdschlusses beträchtlich. Auf der anderen Seite wird der effektive Schutz des Netzes im deregulierten Markt immer wichtiger

Die Erdschlusserfassung wird zusätzlich von der Sternpunktbehandlung, vom Netzaufbau, der Art der Betriebsführung des Netzes und durch die verfügbaren Messverfahren beeinflusst.

Die heutigen Anforderungen an die Sternpunktbehandlung sind einerseits die Erhöhung der Personensicherheit und andererseits die Erhöhung der Versorgungsqualität - dies natürlich unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Randbedingungen.

Wesentliche technische Faktoren sind dabei:

- Selbstverlöschen des Lichtbogens
- Reduktion des Stromes über die Fehlerstelle
- Reduktion des Wiederzündens
- Schnelles Eingrenzen der Fehlerstelle

2 Physik des Erdschlusses und grundsätzliche Betrachtungen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Sternpunktbehandlung und der Erdschlusssortung anhand eines dreiphasigen Netzmodelles dargestellt. Als Netzmodell wird ein Umspannwerk mit einer Sammelschiene und drei Abgängen (Abgang A, Abgang B und Abgang C) entsprechend Bild 2-1 betrachtet.

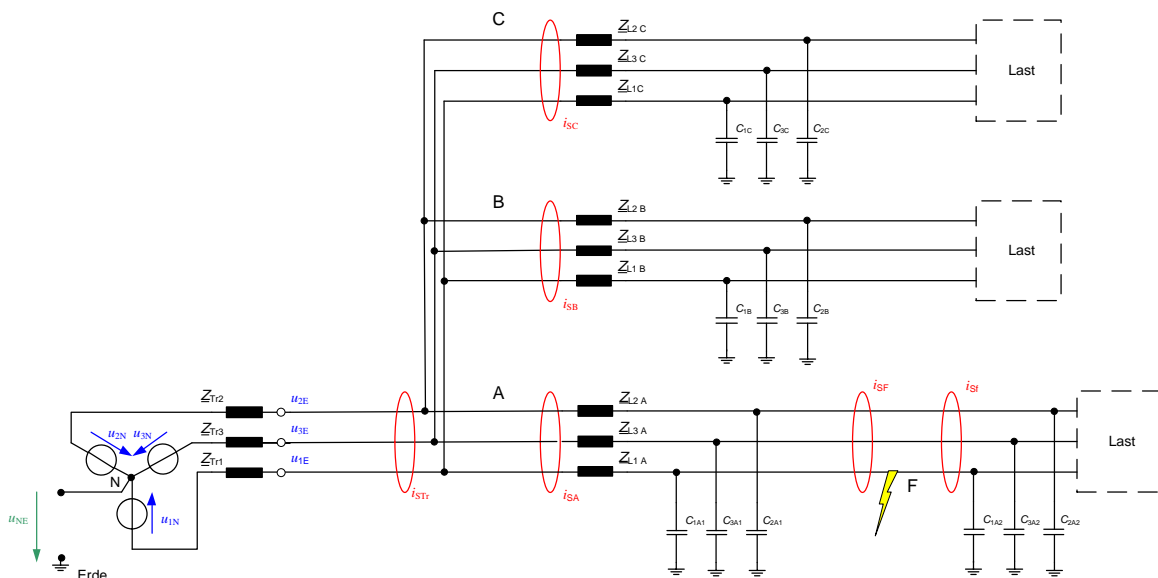


Bild 2-1: Umspannwerk mit drei Abgängen

Die Messung der drei Leiter-Erde Spannungen u_{1E} , u_{2E} , u_{3E} und der Verlagerungsspannung u_{NE} erfolgt im Umspannwerk an der Sammelschiene bzw. am Sternpunkt N des Einspeisetransformators. In den Abgängen wird jeweils der zugehörige Summenstrom $i_{s_x} = 3i_{0x}$ gemessen. Zu beachten ist, dass in diesem Abschnitt die Indizes der Spannungen und Ströme entsprechend den Primärgrößen verwendet werden. Am Abgang A wird an der Fehlerstelle F ein Erdschluss eingelegt. Unmittelbar vor der Fehlerstelle wird der Summenstrom i_{sF} und unmittelbar nach der Fehlerstelle der Summenstrom i_{sF} gemessen.

Die Beschreibung erfolgt zunächst anhand eines isolierten Netzes. Die zugehörigen Auswirkungen auf die Ströme an der Fehlerstelle und im Umspannwerk werden dabei genauer betrachtet. Danach wird für größere Netze untersucht, wie man den Strom über die Fehlerstelle durch eine Änderung der Sternpunktbehandlung reduzieren kann. Im Zuge dessen werden auch die Auswirkungen der geänderten Sternpunktbehandlung auf die Erdschlusssortung genauer betrachtet.

Im darauf folgenden Abschnitt werden für gelöschte Netze verschiedene Verfahren zur Abstimmung der Petersen-Spule vorgestellt. In vielen Ländern der EU ist die "Erdschlusslöschung" eine der wichtigsten Optionen bei der Planung von Elektrizitäts-Verteilnetzen, um eine optimale Qualität der Energieversorgung zu erreichen. Der Hauptvorteil dieser Art der Sternpunktbehandlung ist, dass auch während des Erdschlusses die Energieversorgung aufrechterhalten bleibt. Als Folge wird die Anzahl der Versorgungsunterbrechungen für den Kunden stark reduziert [72][67][68][148][190][144]. Die Abstimmung der Petersen-Spule ist eine Präventivmaßnahme, die bereits im gesunden Netz erfolgt, um die Schäden an der Fehlerstelle während des Erdschlusses zu reduzieren. Bei gelöschten Netzen

werden die meisten einpoligen Fehler beseitigt, ohne dass ein Eingriff durch den Schutz oder das Bedienpersonal erforderlich wird [148]. Dies ist im Vergleich zum "Schutz" eine völlig andere Philosophie. Der Schutz reagiert mit einer Abschaltung des Betriebsmittels erst nach Eintritt eines Fehlers.

Nach der Darstellung der unterschiedlichen Regelungs-Verfahren der Petersen-Spule werden im darauffolgenden Abschnitt die wesentlichsten Ortungsverfahren dargestellt.

Die Erdschlusserfassung und -ortung ist eine der schwierigsten Aufgaben in der Schutztechnik.

Beim Leiter-Leiter Kurzschluss, wie im Bild 2-2 dargestellt, sind die Impedanzen von der Messstelle bis zur Fehlerstelle eindeutig definiert.

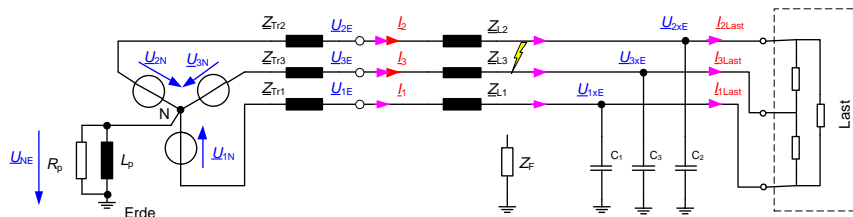


Bild 2-2: Leiter-Leiter Kurzschluss

Der wesentliche Unsicherheitsfaktor ist die Impedanz der Fehlerstelle, die von der Fehlerursache abhängig ist und unterschiedliche Werte annehmen kann. Beim metallischen Kurzschluss liegt die Impedanz im Bereich von 0Ω . Im Falle eines Lichtbogens wird die Impedanz größer und nichtlinear. Üblicherweise fließen über die Fehlerstelle im Mittelspannungsbereich Ströme im Bereich von kA.

Beim Erdschluss werden die Verhältnisse komplizierter, da nun einige Komponenten in der Fehler-schleife nicht mehr so leicht bestimmbar sind.

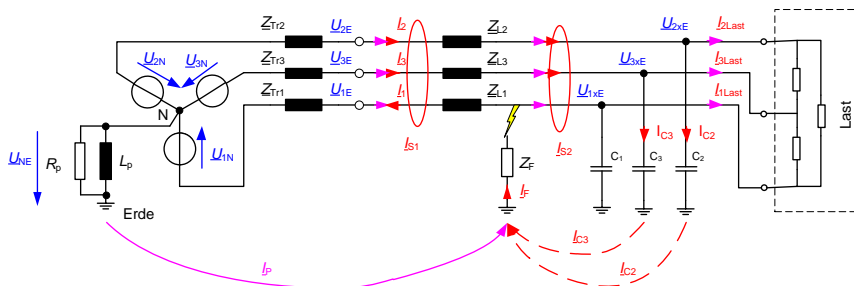


Bild 2-3: Erdschluss

Die Impedanz von der Messstelle bis zur Fehlerstelle ist noch relativ genau definiert. Die Impedanz an der Fehlerstelle ist wiederum von der Fehlerursache abhängig, kann aber nun im Bereich von 0Ω bis $M\Omega$ liegen. Teilweise ist es sehr schwer oder sogar unmöglich, messtechnisch zwischen einem gesunden System und einem erdschlussbehafteten System eindeutig zu unterscheiden. Die Ströme über die Fehlerstelle sind zusätzlich abhängig von der Art der Sternpunktbehandlung und können im Bereich von wenigen A bis kA liegen. Eine Entfernungsmessung wird zusätzlich durch die unbekannte Erdimpedanz erschwert. Die Erdimpedanz ist von vielen Faktoren [125] abhängig wie z. B. von der Beschaffenheit des Bodens, der Schichtung des Bodens, dem Grundwasserpegel, unterirdischen Flüssen, unterirdisch verlegten leitfähigen Materialien wie Rohre und Betonarmierungen, Witterung, Temperatur usw. All diese Einflussfaktoren verhindern eine exakte Bestimmung der Erdimpedanz.

Die Erdschlusserfassung wird zusätzlich von der Sternpunktbehandlung, vom Netzaufbau, von der Art der Betriebsführung des Netzes und durch die verfügbaren Messverfahren beeinflusst.

Im Folgenden wird die dreiphasige Darstellung gewählt, da in dieser einige Probleme und Effekte leichter nachvollziehbar sind.

2.1 Der Erdschluss

Im folgenden Bild wird der transiente Übergang beim Erdschlusseintritt vereinfacht als Zeiger dargestellt.

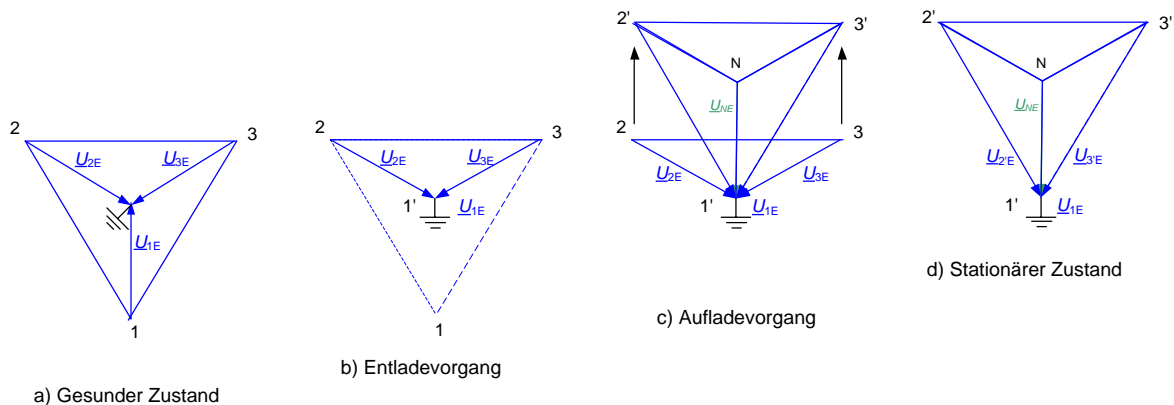


Bild 2-4: Transienter Vorgang als Zeigerdiagramm

Vereinfacht kann man den Erdschlusseintritt folgendermaßen beschreiben: Im gesunden Zustand haben alle drei Leiter die gleiche Spannung gegen Erde. Beim Erdschlusseintritt wird eine Phase gegen Erde kurzgeschlossen und der fehlerhafte Leiter entladen (Entladevorgang). Dadurch wird das Drehstromsystem unsymmetrisch.

In niederohmig und starr geerdeten Netzen bleibt dieser Zustand im gesamten Bezirk erhalten, bis der Fehler durch den Schutz abgeschaltet wird.

Die Einspeisung versucht, ein symmetrisches Dreieck wieder herzustellen. Bei niederohmig und starr geerdeten Netzen ist das nicht möglich. Es fließt bei einem satten Erdschluss ein großer Kurzschlussstrom im kA-Bereich über die Fehlerstelle. Die strombegrenzenden Komponenten sind:

- Sternpunkt-Impedanz
- Innenimpedanz des Trafos
- Impedanz der Leitung vom Trafo bis zur Fehlerstelle
- Übergangsimpedanz an der Fehlerstelle
- Erdungs-Impedanz von der Fehlerstelle bis zum Erdungspunkt des Trafos

Bei isolierten und gelöschten Netzen hingegen werden die beiden gesunden Leiter auf die verkettete Spannung angehoben. Dieser Zustand stellt dann den stationären Zustand bis zum Beseitigen des Erdschlusses dar.

Im Erdschlussfall ist die Summe der drei Leiter-Erde Spannungen nicht mehr Null. Diese Summen-spannung wird daher üblicherweise als Kriterium für die Erkennung eines Erdschlusses verwendet.

Im Folgenden wird die Betrachtung auf ein kleines Umspannwerk mit drei Abgängen angewendet.

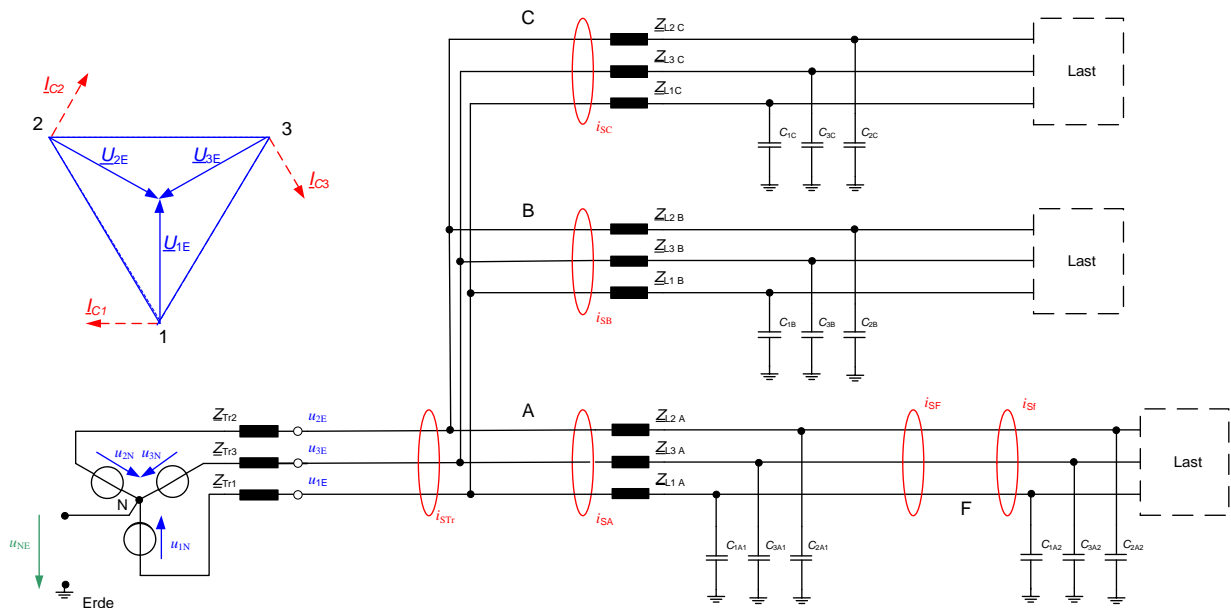


Bild 2-5: Umspannwerk mit drei Abgängen

Für die Darstellung wird zunächst ein sternpunktisoliertes Netz, im Folgenden vereinfacht als isoliertes Netz bezeichnet, verwendet. Die Darstellung der Auswirkungen der Sternpunktbehandlung erfolgt weiter unten.

Im gesunden Netz sind die kapazitiven Ladeströme der Leitungen ungefähr gleich groß und der jeweiligen Spannung um 90° voreilend. Dadurch sind auch die Spannungsabfälle an den Kapazitäten gleich groß. Die Einspeisung selbst wird als symmetrisch angenommen. Die resultierende Spannung \underline{U}_{NE} ist nun die Differenz zwischen dem Sternpunkt der symmetrischen Einspeisung und dem Sternpunkt der leicht unsymmetrischen Leiter-Erde-Kapazitäten und ist im gesunden Betrieb üblicherweise sehr klein.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Vorgänge beim Erdschlusseintritt genauer betrachtet.

2.2 Entladevorgang

Wenn die Leiter-Erde-Kapazitäten der einzelnen Leiter gleich groß sind, wird $\underline{U}_{NE} = 0$. Alle über die Leiter-Erde-Kapazitäten zur Erde fließenden Ströme heben sich auf.

Beim Erdschlusseintritt im Bild 2-6 wird zunächst der fehlerbehaftete Leiter entladen. Es ergibt sich ein Wanderwellenvorgang für den Strom und die L-E-Spannung, der sich von der Fehlerstelle in beide Richtungen des Leiters ausbreitet. Die Wanderwelle in Richtung Ende des Abganges A trifft auf den Verteiltransformator, der mit seiner Induktivität einen hochohmigen Abschluss darstellt. Die Welle wird an diesem hochohmigen Abschluss reflektiert. In Richtung Einspeisung erfolgt Ähnliches. Die Entladung setzt sich natürlich auch noch in die anderen Abgänge bis zu deren Enden fort, wo die Welle aus den gleichen Gründen reflektiert wird. Zusätzlich erfolgt eine Teilreflexion an jedem Verzweigungspunkt.

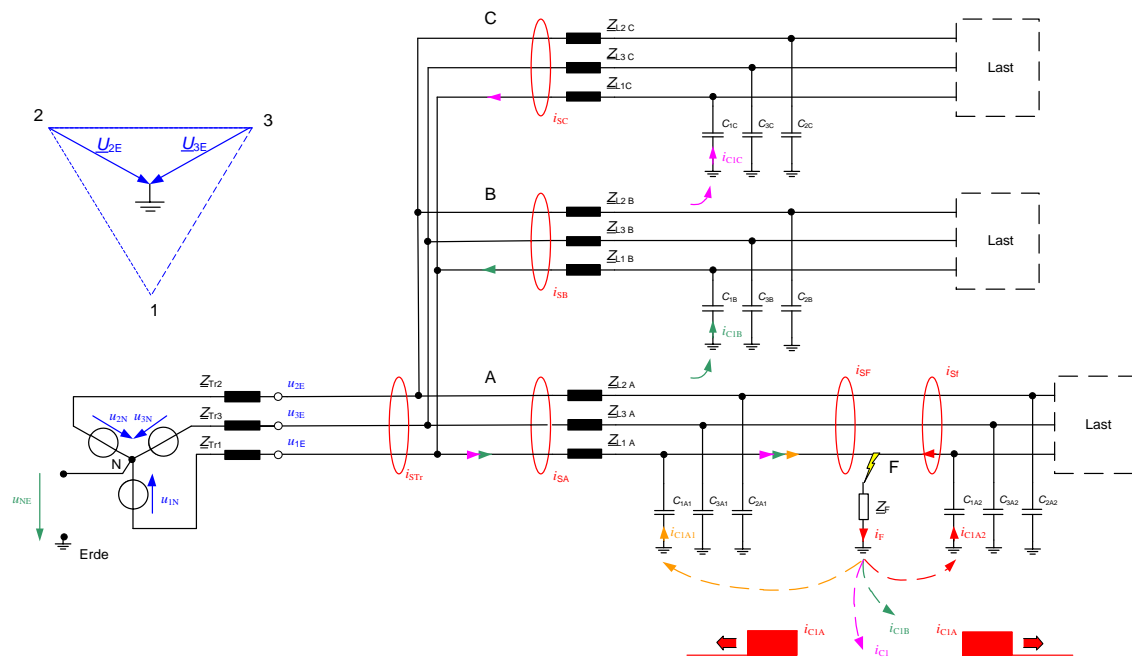


Bild 2-6: Erdschlusseintritt im Leiter 1

Die entstehenden Frequenzen durch diese Reflexionen sind durch die Netzausdehnung gegeben. Bei Industrienetzen, die meist nur eine kleine Ausdehnung haben, kann die Entladefrequenz im Bereich von einigen MHz liegen. Bei großen Überlandnetzen mit großer räumlicher Ausdehnung kann sie im Bereich von 10 kHz liegen. Beim größten gemeinsamen 110-kV-Netz der DB und ÖBB, das vom Norden Deutschlands bis in den Süden von Österreich reicht, liegt die Entladefrequenz sogar in der Größenordnung der Betriebsfrequenz des Netzes.

Zu beachten ist, dass für die Entladeschwingung die Sternpunktbehandlung keine Rolle spielt.

Außerdem bildet sich die Entladeschwingung nur in der fehlerhaften Phase aus und alle Ströme der Wanderwelle fließen über die Fehlerstelle.

Für eine genauere Betrachtung wird die Wellengleichung für einen einfachen Leiter verwendet [112][132]

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R' i(x,t) + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G' u(x,t) + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

Für den verlustlosen Leiter kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit wie folgt abgeschätzt werden.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.3)$$

Bei Freileitungen ist $\varepsilon_r \approx 1$ und bei Kabel ist $\varepsilon_r = 2,3 \dots 4 \dots 9$ [198]. Für eine genauere Modellierung müsste eine frequenzabhängige Modellierung der Leitungsparameter [143] verwendet werden.

Der Wellenwiderstand der verlustlosen Leitung kann nach der folgenden Formel berechnet werden.

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2.4)$$

Der Wellenwiderstand hat bei einer 20-kV-Freileitung einen Wert von ca. 335 Ω und bei einem 20-kV-Kabel (NA2XS2Y 150 mm² [110]) ca. 40 Ω . Diese Impedanz limitiert den Entladestrom über die Fehlerstelle im Falle eines satten Erdschlusses.

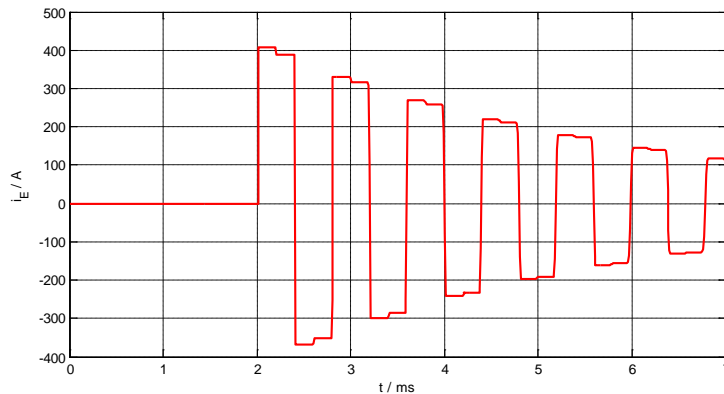


Bild 2-7: Entladeschwingung eines 20 km langen 20-kV-Netzes(Kabel NA2XS2Y 150 mm²)

In Bild 2-7 ist das Ergebnis einer Simulation mit verteilten Parametern dargestellt [20]. Der maximale Entladestrom in einem 20-kV-Kabel wird durch den Wellenwiderstand des Kabels auf einen Wert von ca. 400 A limitiert. Bei einer 20-kV-Freileitung ist die Entladeschwingung um den Faktor 10 kleiner.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Entladevorgang für die Erdschlussortungsverfahren "Erdschluss Wischer" nicht verwendet wird. Einer der Gründe dafür besteht in der Problematik, diese hohen Frequenzen mit Standard-Wandlern unverzerrt zu übertragen. In allen derzeit am Markt befindlichen Erdschlusswischerrelais sind daher Vorfilter im Bereich von 2,5 kHz bis 5 kHz eingebaut.

2.3 Aufladevorgang

In dieser Phase werden nun durch die Einspeisung die beiden gesunden Leiter aufgeladen.

Die Aufladung erfolgt über die Erde. Wie aus dem Bild 2-8 erkennbar ist, fließen beim isolierten Netz alle Aufladeströme über die Fehlerstelle. Die Aufladeströme in den gesunden Abgängen sind der zugehörigen Spannung um 90° voreilend.

Im erdschlussbehafteten Abgang existiert der Aufladestrom in den gesunden Leitern auch, fehlt aber in der Summenstrommessung im Umspannwerk, da dieser Aufladestrom des fehlerhaften Abganges über den fehlerbehafteten Leiter zurückfließt.

An der Messstelle A fließt über den erdschlussbehafteten Leiter zusätzlich die Summe aller Aufladeströme aller gesunden Abgänge. Dieser Summenstrom fließt in die umgekehrte Richtung im Vergleich zu den Aufladeströmen in den gesunden Abgängen. Der Strom ist in diesem Fall der Spannung um 90° nacheilend.

Dieser Aufladevorgang wird bei den Wischerrelais verwendet.

Es ist zu beachten, dass dieser Aufladevorgang im Drehstromnetz in isolierten und gelöschten Netzen immer existiert.

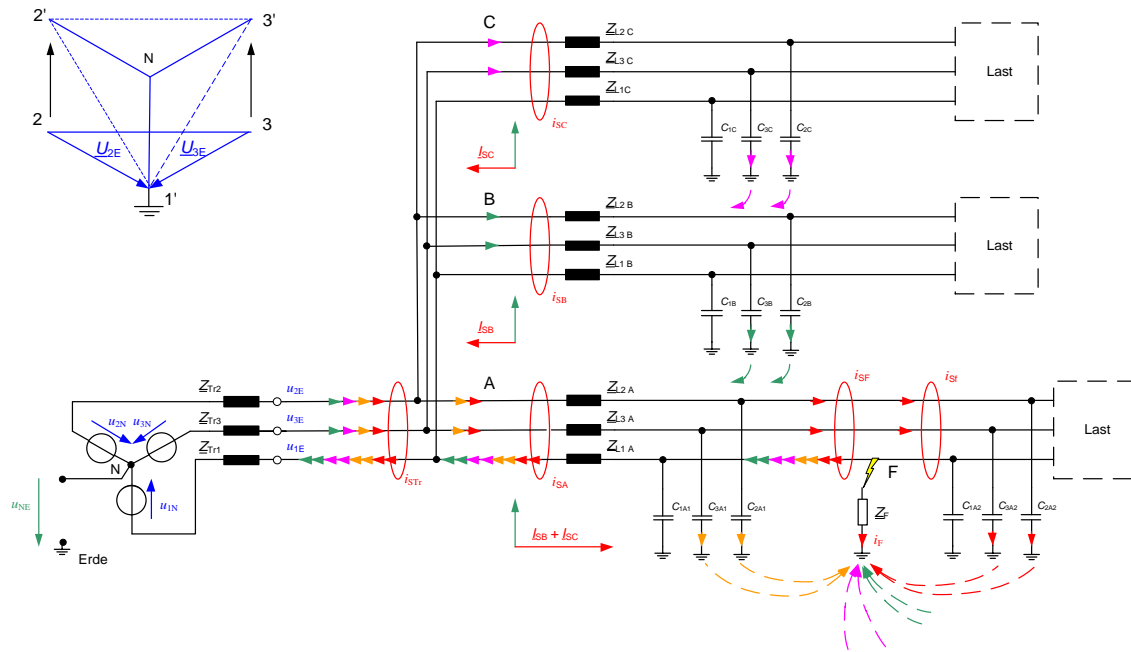


Bild 2-8: Aufladevorgang

Ebenfalls ist zu beachten, dass der Entladevorgang und der Aufladevorgang gleichzeitig beginnen. Üblicherweise ist der Entladevorgang nach einigen ms abgeschlossen. Der Aufladevorgang ist auch abhängig von der Impedanz an der Fehlerstelle und kann einige Perioden dauern [170][171].

In der Literatur wird sehr oft mit einem zweipoligen Ersatzschaltbild gearbeitet, was zur Diskussion führt, was passiert, wenn der Erdschluss genau im Nulldurchgang erfolgt. Für ein dreiphasiges System tritt der Aufladevorgang immer auf. Es ergibt sich nur die Frage, wie groß der Entladevorgang ist, der im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde. Die Entladeschwingung kann durchaus Null sein. Dies ist ein weiterer Grund, warum die Entladeschwingung für ein Wischerverfahren nicht geeignet ist.

2.4 Stationärer Zustand

Nach Abklingen der Entladeschwingung und Beendigung der Aufladeschwingung ist der stationäre Zustand des Erdschlusses im isolierten Netz erreicht.

Wie aus Bild 2-9 erkennbar ist, fließen alle kapazitiven Ladeströme der beiden gesunden Leiter über die Fehlerstelle. Es treten nun zwei Probleme auf, die voneinander entkoppelt sind

- Selbstständiges Verlöschen des Lichtbogens
- Berührungs- und Schrittspannung durch den über die Erdungsimpedanz fließenden Strom

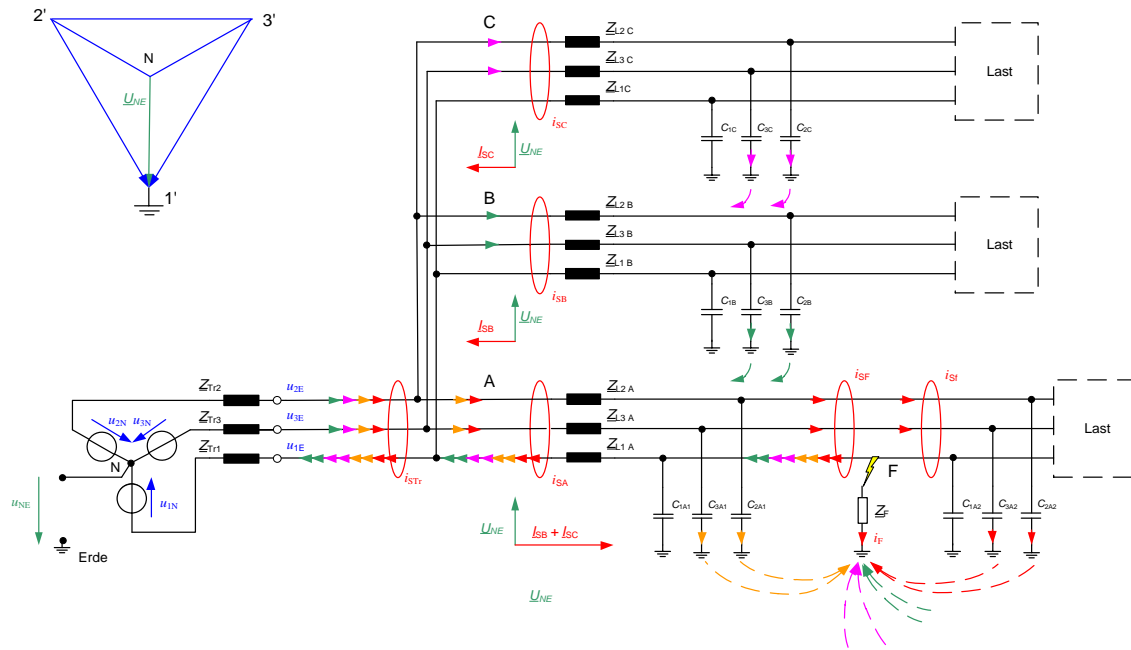


Bild 2-9: Stationärer Zustand im isolierten Netz

In VDE 0228-2:Dez. 1987 sind Kurven für den maximalen Reststrom über die Fehlerstelle angegeben, bei dem Lichtbogen im Freileitungsbereich abhängig von der Spannungsebene und der Sternpunktbehandlung selbstständig verlöschen. Diese Kurven wurden experimentell ermittelt [88].

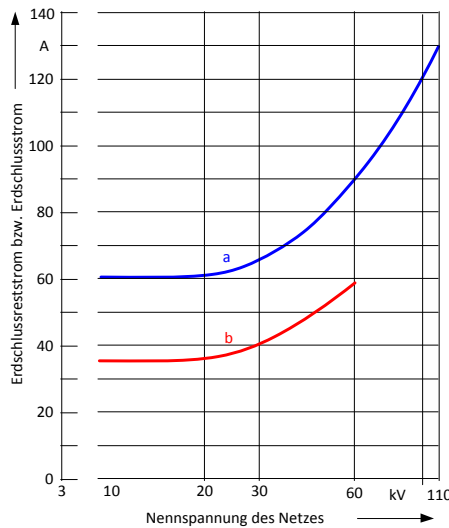


Bild 2-10: Löschgrenze nach VDE 0228 Teil2

- a) Netze mit Erdschlusskompensation,
- b) Isolierte Netze

Für ein 20-kV-Netz liegt dieser Wert bei ca. 30 A für ein isoliertes Netz und bei ca. 60 A bei gelöschten Netzen.

Wenn also der Strom über die Fehlerstelle kleiner ist als dieser maximale Strom, verlöscht der Lichtbogen an der Fehlerstelle mit sehr großer Wahrscheinlichkeit selbstständig und ohne Intervention durch den Schutz oder eine durch das Betriebspersonal veranlasste Schalthandlung.

Bei Netzen mit großer Leiter-Erde-Kapazität entstehen große Ströme über die Fehlerstelle. Dieser Strom über die Fehlerstelle kann durch die Zuschaltung einer Petersen-Spule im Sternpunkt wesentlich reduziert werden.

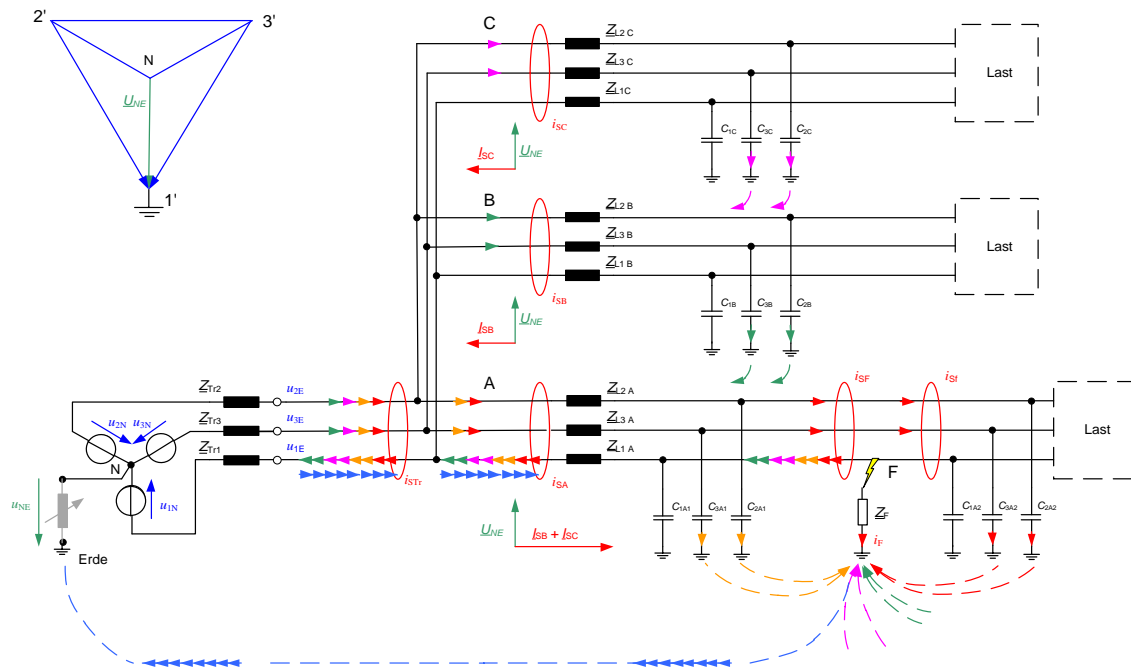


Bild 2-11: Erdschlusskompensation

Aus dem Bild 2-11 ist erkennbar, dass die Phasenspannung \underline{U}_{LIE} als treibende Spannung für den Strom über die Petersen-Spule dient. Dieser Strom ist der treibenden Spannung um 90° nacheilend und kann mithilfe einer verstellbaren Petersen-Spule beliebig eingestellt werden [39][42][41]. Durch geeignete Wahl kann der Strom so eingestellt werden, dass der Blindstrom über die Fehlerstelle null wird.

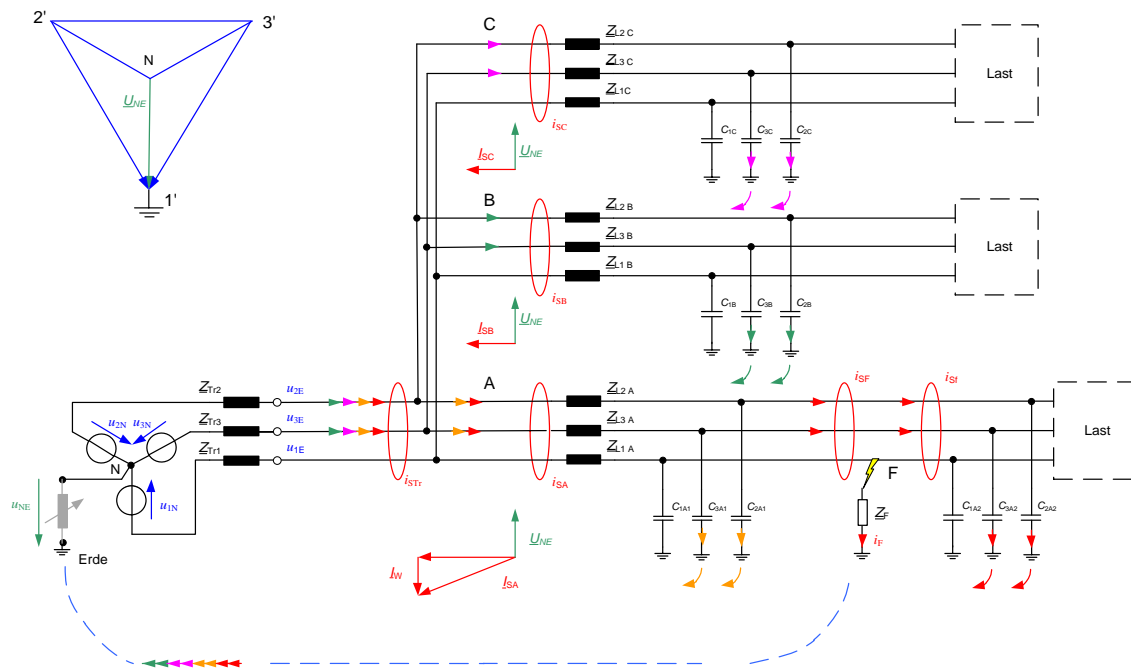


Bild 2-12: Ideal abgestimmte Erdschlusskompensation

Bei idealer Kompensation fließt nur mehr der Wirkstrom über die Fehlerstelle. Im erdschlussbehafteten Leiter ist der Strom auf den Laststrom reduziert und die beiden gesunden Leiter sind durch einen erhöhten kapazitiven Strom belastet. Die Summenstrommessung erfasst nun im fehlerhaften Abgang im Wesentlichen nur den kapazitiven Erdschlussstrom des Abganges. Der fehlerhafte Abgang sieht eigentlich, bis auf den Wirkstrom über die Fehlerstelle, gesund aus.

Durch die Erdschluss-Löschung wird der Strom an der Fehlerstelle wesentlich verringert, aber die Verhältnisse für die Erdschlussortung werden dadurch wesentlich erschwert. Im Abschnitt zur Erdschlussortung wird gezeigt, dass es sehr oft schwierig ist, diesen kleinen Wirkstrom eindeutig zu erkennen.

Wie bereits oben erwähnt existieren für die Begrenzung des Stromes über die Fehlerstelle zwei Grenzen. Durch umfangreiche Versuche hat man statistisch ermittelt, dass die Wahrscheinlichkeit sehr groß ist, dass der Lichtbogen abhängig von der Sternpunktbehandlung und von der Nennspannung des Netzes selbstständig verlöscht. Das Netz ist in diesem Fall selbstheilend. Bei gelöschten Netzen liegt der Grenzwert im 20-kV-Netz bei 60 A und im 110-kV-Netz bei ca. 130 A. Für isolierte Netze liegt der Wert bei 30 A. Diese Kurven wurden in die Norm DIN 0228-2 übernommen.

Die wesentlich wichtigere Einschränkung ergibt sich aber durch die Berührungsspannung von metallischen Objekten an der Fehlerstelle. Die Berührungsspannung ergibt sich aus dem Strom über die Impedanz der Fehlerstelle und darf laut der neuen Norm EN 50522 den geforderten Grenzwert von 80 V nicht überschreiten.

Dadurch stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung.

- a) Die erste Möglichkeit ist, alle Erdungsimpedanzen im Netz so zu verkleinern, dass auch große Ströme über die Fehlerstelle zu keiner Überschreitung der erlaubten Berührungsspannung führen z. B. wäre bei einer Erdungsimpedanz von $0,1 \Omega$ ein Strom von 800 A zulässig.
- b) Die zweite Möglichkeit ist, den Strom über die Fehlerstelle durch eine Petersen-Spule zu kompensieren, sodass auch übliche Anlagen-Erdungs-Impedanzen von 1Ω bis 2Ω zu keiner Überschreitung führen.
- c) Die dritte Möglichkeit ist, den Abgang in Schnellzeit abzuschalten. Der wesentliche Vorteil einer Versorgung des Kunden auch während eines einpoligen Fehlers geht damit allerdings verloren. Die erforderlichen Abschaltzeiten sind ebenfalls in der EN 50522 bzw. in der EN 50423 [104] dargestellt, siehe Bild 2-13.

Die EN50522 ist gültig für die "Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV". In der EN 50341 für "Freileitungen über 45 kV" sind ähnliche Kurven, wie in Bild 2-14 dargestellt, für die folgenden Fälle angegeben:

- Kurve U_{D1}
Orte wie Spielplätze, Schwimmbäder, Campingplätze, Erholungsgebiete und ähnliche Bereiche, wo sich Personen barfuß aufhalten können. Zum Körperwiderstand wird kein zusätzlicher Widerstand beachtet.
- Kurve U_{D2}
Orte, für die begründet angenommen wird, dass Personen Schuhe tragen, wie Gehsteige, öffentliche Straßen, Parkplätze usw. Ein zusätzlicher Widerstand von 1750Ω wird berücksichtigt.

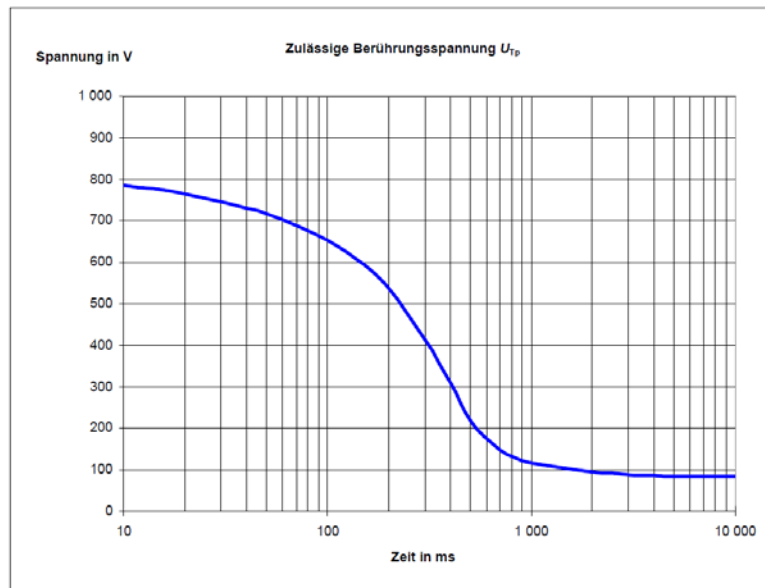


Bild 2-13: Notwendige maximale Abschaltzeit bei größeren Berührungsspannungen [EN 50522]

- Kurve U_{D3}
Orte, für die begründet angenommen werden kann, dass Personen Schuhe tragen und der spezifische Bodenwiderstand hoch ist, z. B. 2000 Ω m. Ein zusätzlicher Widerstand von 4000 Ω wird berücksichtigt
- Kurve U_{D4}
Orte, für die begründet angenommen werden kann, dass Personen Schuhe tragen und der spezifische Bodenwiderstand sehr hoch ist, z. B. 4000 Ω m. Ein zusätzlicher Widerstand von 7000 Ω wird berücksichtigt.

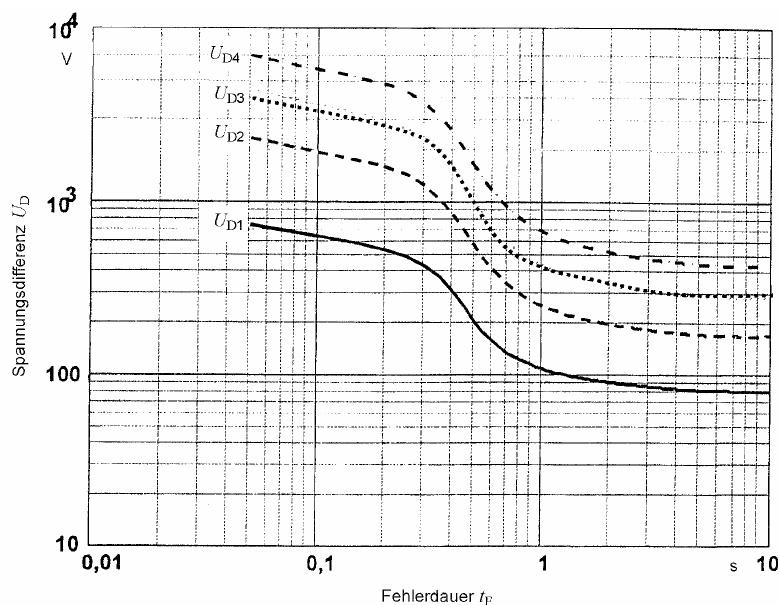


Bild 2-14: Beispiele für die Berührungsspannung in Abhängigkeit der Wirkungsdauer t_F des Fehlerstromes [EN 50341:2002]

2.5 Wiederzündende / Intermittierende Erdschlüsse

In diesem Kapitel wird zwischen intermittierenden Erdschlüssen in isolierten Freileitungen und wiederzündenden Erdschlüssen in Kabelnetzen unterschieden [23][25]. Der Begriff intermittierend wird gedanklich immer ganz automatisch mit sehr hohen Überspannungen assoziiert. Dies ist für isolierte Freileitungsnetze auch richtig, wo durch intermittierende Erdschlüsse Überspannungen bis 3,5 p.u. auftreten [159][178]. Hingegen sind in Kabelnetzen die wiederzündenden Erdschlüsse ohne hohe Überspannungen.

Um den Querschnitt des Kabels zu verkleinern, wird beim Kabel ein Dielektrikum mit einem ϵ_r von 2 bis 4 zwischen Innenleiter und Außenleiter verwendet [109][110][198]. Damit ist für den Normalbetrieb auch die entsprechende Spannungsfestigkeit gegeben.



Bild 2-15: Erdschlussbehaftetes Kabel

Tritt nun ein Fehler im Dielektrikum auf, z. B. Watereingang, mechanische Beschädigung etc., so ist das beschädigte Dielektrikum nicht mehr in der Lage, bis zur höchsten Betriebsspannung zu isolieren. Es kommt daher zu einem Durchschlag.

In einem gelöschten 20-kV-Netz ist der Strom an dieser Fehlerstelle im stationären Fall sehr gering, d. h. im Bereich von ca. 2 A bis 60 A. Die Brennspannung dieses Lichtbogens liegt im Bereich von 30 V bis 60 V [94], d. h., die umgesetzte Leistung an der Fehlerstelle im Falle einer gut abgestimmten Petersen-Spule kann sehr gering sein.

Es kann durchaus vorkommen, dass bei ideal abgestimmten Netzen der Kabelmantel nicht einmal beschädigt wird und die gesamte umgesetzte Energie über den Innenleiter und den Mantel abgeführt wird.

Jedenfalls ist die Festigkeit des beschädigten Dielektrikums für einen Dauerbetrieb nicht geeignet, und es kommt zu einer ständigen Wiederzündung des Lichtbogens, wie in Bild 2-16 dargestellt. Dieser Vorgang wiederholt sich entweder bis zum satten Kurzschluss oder bis zur Abschaltung des fehlerhaften Segmentes.

Die Zündspannung liegt dabei in 20-kV-Netzen bei ca. 2 kV bis 6 kV.

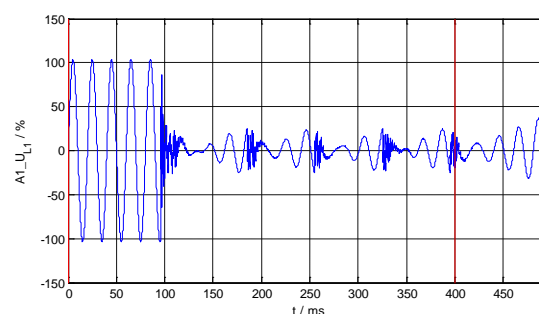


Bild 2-16: Spannungsverlauf der fehlerhaften Phase

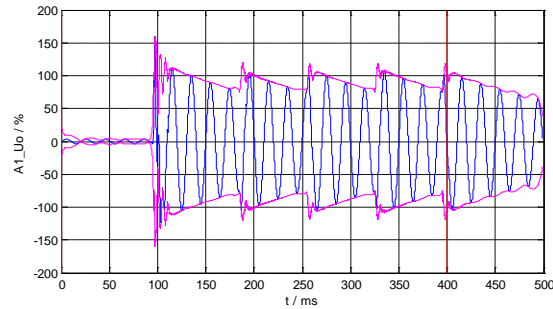


Bild 2-17: Spannungsverlauf und Einhüllende der Verlagerungsspannung u_{NE}

Aus Bild 2-16 und Bild 2-17 sind die folgenden Punkte erkennbar:

- Der Mittelwert der Verlagerungsspannung erreicht nicht 100 %
- Zwischen den Zündzeitpunkten ist das Netz "gesund" aber mit verlagertem Sternpunkt N
- Die Verlagerungsspannung unterschreitet zwischen den Zündspitzen nicht die Auslöseschwelle für die Erdschlusserkennung
- Zum Zeitpunkt der Zündung steigt die Verlagerungsspannung wieder an. Die Änderung ist aber wesentlich geringer als bei der ersten Zündung

Ausführlichere Beschreibungen zum wiederzündenden Fehler sind zu finden in [23][25][30]

Weiterführende Literatur zum Thema Erdschlusskompensation basierend auf symmetrischen Komponenten: [201][134][107][159][188][92]

2.6 Raumzeigerdarstellung

2.6.1 Grundsätzliches

Es ist zu beachten, dass die transienten Verfahren nicht mit den üblichen komplexen Zeigern beschrieben werden können. Die Darstellung in Bild 2-4 ist zwar anschaulich aber nicht exakt. Die Berechnung der Zeiger erfolgt über eine Periode; bei der Berechnung der Zeiger wird angenommen, dass sich die Spannung nur langsam ändert.

Für die Berechnung von transienten Vorgängen müssen Komponentensysteme verwendet werden, wie z. B. die $\alpha\beta_0$ von Edith Clarke [75] oder die von P. Kováčz eingeführten Raumzeiger [129]. Im Elektromaschinenbau ist diese Darstellung mit Raumzeigern üblich, hingegen im Bereich der Energieverteilung kaum anzutreffen.

Für die transiente Betrachtung und die Entwicklung neuer Algorithmen ist die Verwendung von Raumzeigern sehr vorteilhaft.

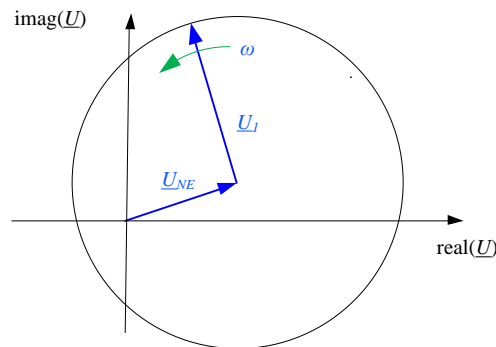


Bild 2-18: Stationärer hochohmiger Erdschluss in vereinfachter Raumzeiger-Darstellung

Im Bild 2-18 ist der eingeschwungene Zustand eines hochohmigen Fehlers dargestellt. Die Verlagerungsspannung ist ein Zeiger, der den Offset in der komplexen Ebene darstellt. Das Mitsystem der Spannung stellt dann einen mit ω rotierenden Zeiger dar. Diese Darstellung verdeutlicht, dass der Energietransport durch das Mitsystem in isolierten und gelöschten Netzen trotz Erdschluss ungehindert erfolgt. Die Nullspannung wird durch Verwendung von geeigneten Transformatoren nicht in die darüber liegende und darunter liegende Spannungsebene übertragen. Dadurch erkennt man in diesen beiden Ebenen den stationären einpoligen Erdschluss in der Mittelspannungsebene nicht.

Die transienten Vorgänge des Erdschlussbeginns und des Erdschlussendes sind allerdings in den darüber und den darunter liegenden Spannungsebenen auch als transiente Vorgänge erkennbar.

2.6.2 Ausschwingvorgang des Erdschlusses

Die folgenden Bilder zeigen den transienten Ausschwingvorgang des gelöschten Netzes als Störschrieb und als Trajektorie der auf 50 Hz synchronisierten Raumzeiger.

Für die Berechnung des analytischen Signals wird der Hilbert-Transformator verwendet [212]. Ein analytisches Signal ist ein komplexwertiges diskretes Signal, dessen Fourier-Transformierte null ist für den Bereich $-\pi \leq \Omega < 0$. Der Betrag des komplexen Signals stellt die Hüllkurve des Signals dar.

Der ideale digitale Hilbert-Transformator ist ein diskretes LTI-System mit dem Frequenzgang

$$H(e^{j\Omega}) = \begin{cases} j & : -\pi \leq \Omega < 0 \\ -j & : 0 \leq \Omega < \pi \end{cases} \quad (2.5)$$

und einem konstanten Amplitudengang mit dem Wert 1.

Üblicherweise wird die DFT über eine Periode zur Berechnung des analytischen Signals verwendet. Diese stimmt aber nur wenn einerseits die Änderung innerhalb der Periode klein ist und wenn die Abtastung frequenzsynchron erfolgt.

Die Berechnung des analytischen Signals mit Hilfe des Hilbert-Transformators liefert wesentlich bessere Ergebnisse. Die Hüllkurve wird auch bei nicht synchronen Abtastraten "glatt", wie weiter unten gezeigt wird.

Für die Untersuchung des Ausschwingvorganges werden die Raumzeiger in ein mit Betriebskreisfrequenz mathematisch positiv umlaufendes Koordinatensystem transformiert. In einem synchron mit der Betriebskreisfrequenz umlaufenden Koordinatensystem ist der Raumzeiger des Mitsystems ruhend.

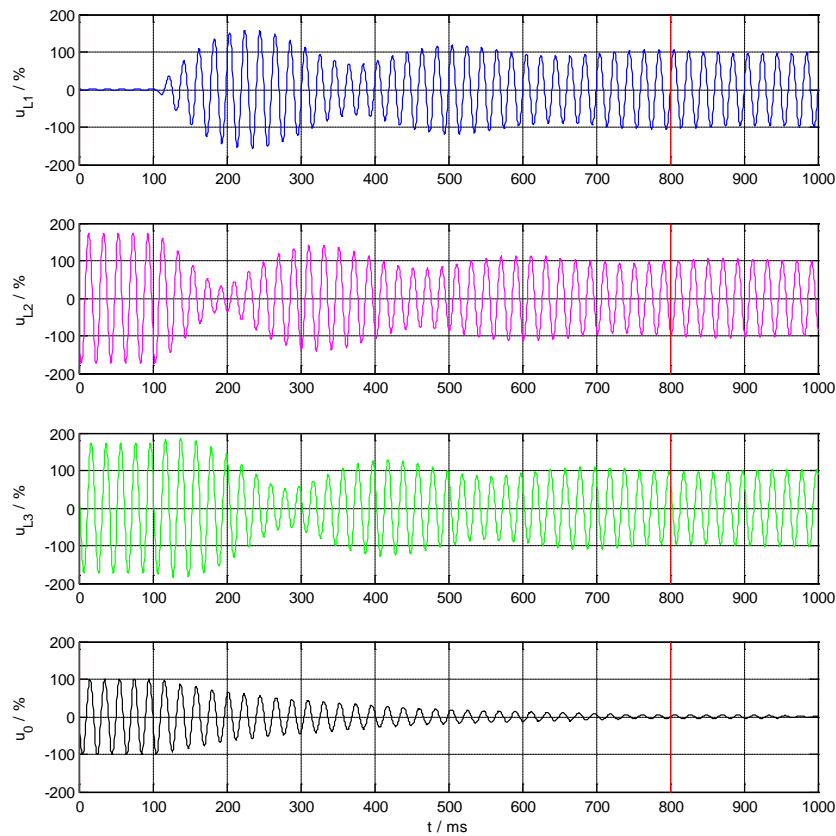


Bild 2-19: Ausschwingen des Erdschlusses – unterkompensiert: $u=f(t)$

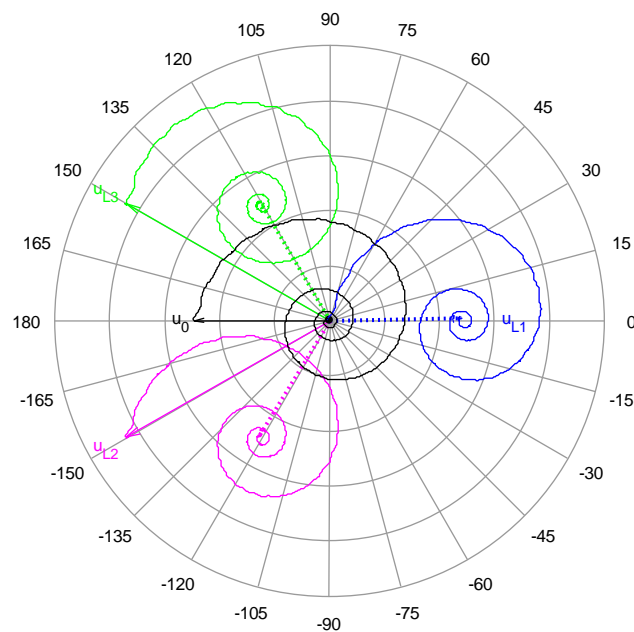


Bild 2-20: Ausschwingen des Erdschlusses – unterkompensiert: $u = \text{Raumzeiger}(t)$
 Zeiger ausgezogen ... Beginn des Ausschwingvorganges
 Zeiger gestrichelt ... Ende des Ausschwingvorganges

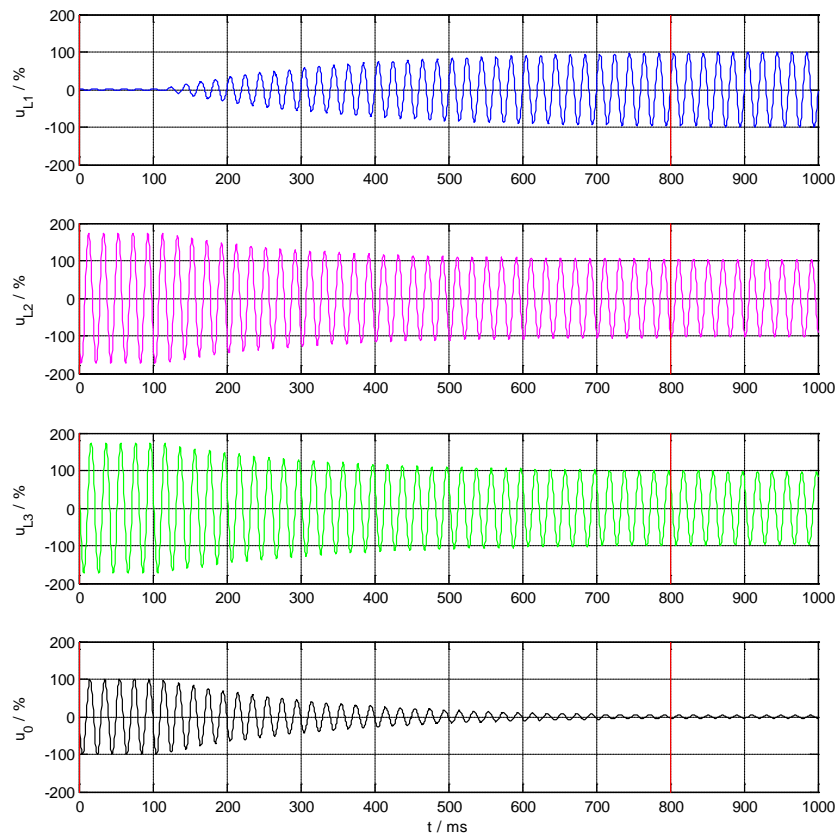


Bild 2-21: Ausschwingen des Erdschlusses – exakt kompensiert: $u=f(t)$

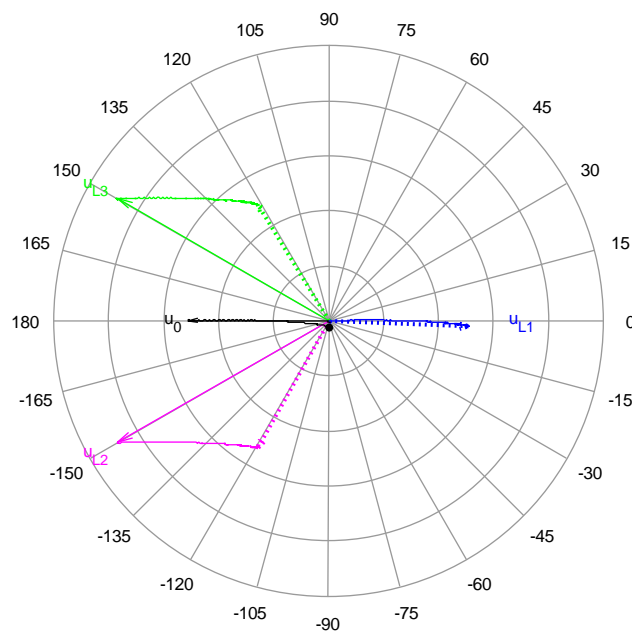


Bild 2-22: Ausschwingen des Erdschlusses – exakt kompensiert: $u = \text{Raumzeiger}(t)$
 Zeiger ausgezogen ... Beginn des Ausschwingvorganges
 Zeiger gestrichelt ... Ende des Ausschwingvorganges

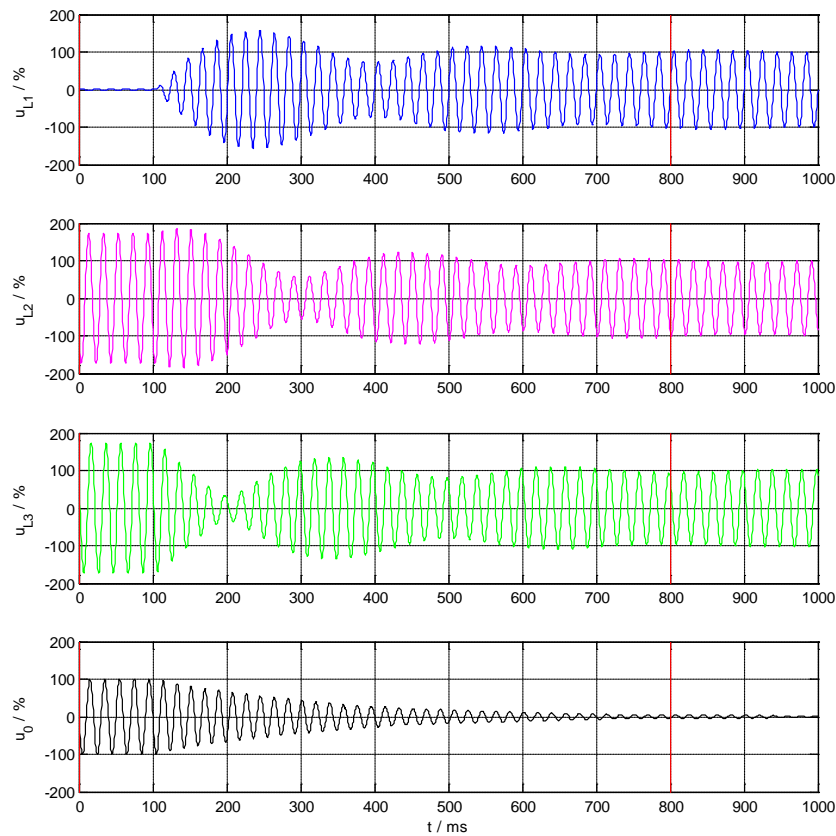


Bild 2-23: Ausschwingen des Erdschlusses – überkompensiert: $u=f(t)$

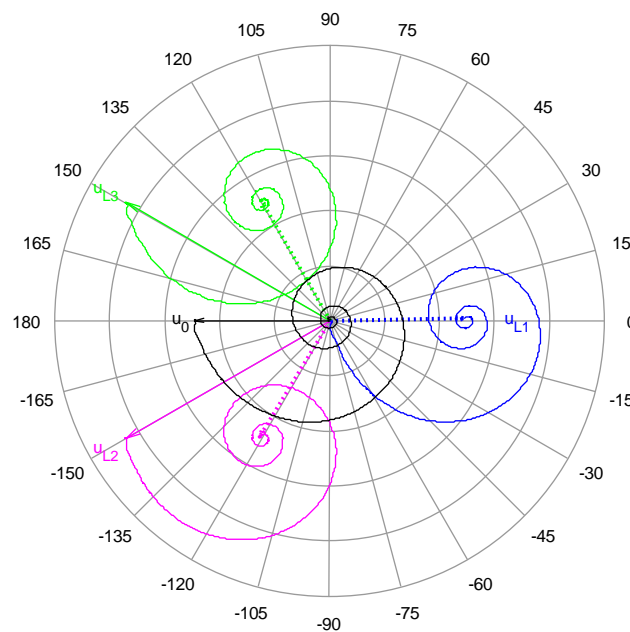


Bild 2-24: Ausschwingen des Erdschlusses – überkompensiert: $u = \text{Raumzeiger}(t)$
 Zeiger ausgezogen ... Beginn des Ausschwingvorganges
 Zeiger gestrichelt ... Ende des Ausschwingvorganges

2.6.3 Berechnung der Netzparameter aus dem Ausschwingvorgang*

Aus dem Verlauf der Trajektorie des Raumzeigers von u_0 können die wesentlichen Merkmale des kompensierten Netzes am Ende des Erdschlusses ermittelt werden:

- Verstimmung des Netzes:
kann aus der Frequenzabweichung der Trajektorie berechnet werden
- Wirkstrom des Netzes:
kann aus dem Verlauf der Amplitudenänderung der Trajektorie berechnet werden

Es ist zu beachten, dass nicht der gesamte Verlauf des Ausschwingvorganges verwendet wird, wenn die Trajektorie von u_0 nicht beim Wert Null endet, sondern bei der natürlichen Unsymmetrie des Netzes. Dieser Einfluss kann kompensiert bzw. reduziert werden, wenn die verbleibende Spannung der natürlichen Unsymmetrie über den Betrachtungszeitraum subtrahiert wird. Damit wird eine Linearisierung um den neuen Arbeitspunkt durchgeführt.

Die halblogarithmische Darstellung dieser linearisierten Spannung ist in Bild 2-25 dargestellt und ergibt ab dem Ende des Erdschlusses eine Gerade. Durch diese Darstellung kann sehr einfach eine Ausgleichsgerade für einen definierten Zeitbereich berechnet werden und in weiterer Folge die zugehörige Dämpfung des gelöschten Netzes.

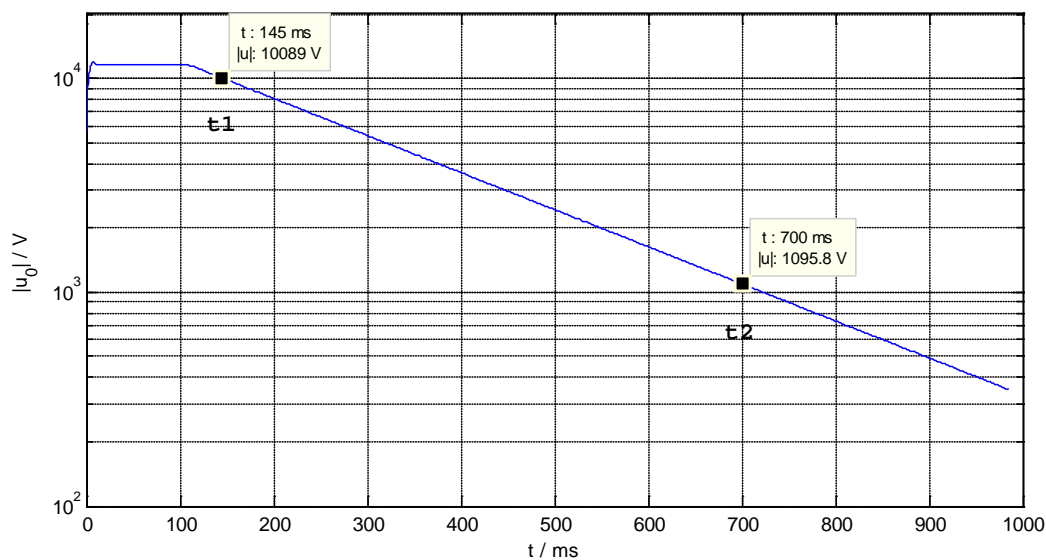


Bild 2-25: Betrag der Hüllkurve in halblogarithmischer Darstellung

Im Abschnitt 0 wird gezeigt, dass das Nullsystem vereinfacht als Parallelschwingkreis dargestellt werden kann. Beim Ausschwingvorgang ist der Lichtbogen verloschen und der Parallel-Schwingkreis ist entsprechend Bild 2-26 nicht mehr mit $u_{(1)}$ verbunden. Die im Resonanzkreis gespeicherte Energie wird über die ohmschen Verluste des Resonanzkreises abgebaut.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

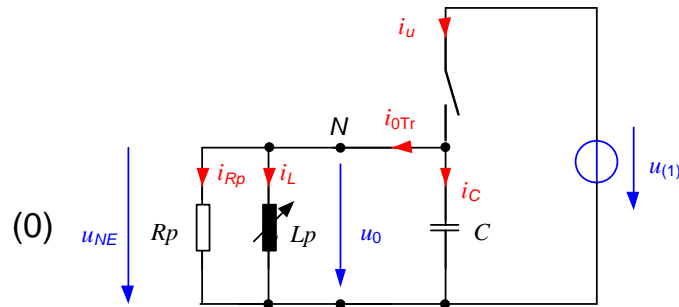


Bild 2-26: Vereinfachter Resonanzkreis für die Berechnung des Ausschwingvorganges

Für diesen Parallelschwingkreis gilt in Anlehnung zu [139][69][147]:

$$i_C + i_{Rp} + i_{Lp} = 0 \quad (2.6)$$

Mit

$$i_C = C \frac{du_0}{dt}, \quad i_{Rp} = \frac{u_0}{R_p} \quad \text{und} \quad i_L = \frac{1}{L_p} \int u_0 dt$$

wird (2.6)

$$C \frac{du_0}{dt} + \frac{u_0}{R_p} + \frac{1}{L_p} \int u_0 dt = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2 u_0}{dt^2} + \frac{1}{R_p C} \frac{du_0}{dt} + \frac{1}{L_p C} u_0 = 0 \quad (2.8)$$

Mit dem Ansatz

$$\begin{aligned} u_0 &= K e^{\lambda t} \\ \frac{du_0}{dt} &= \lambda K e^{\lambda t} \\ \frac{d^2 u_0}{dt^2} &= \lambda^2 K e^{\lambda t} \end{aligned}$$

erhält man

$$K e^{\lambda t} \left(\lambda^2 + \frac{1}{R_p C} \lambda + \frac{1}{L_p C} \right) = 0 \quad (2.9)$$

mit den Lösungen

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2 R_p C} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 R_p C} \right)^2 - \frac{1}{L_p C}} \quad \text{für} \quad \left(\frac{1}{2 R_p C} \right)^2 - \frac{1}{L_p C} \geq 0 \quad (2.10)$$

$$\lambda_{3,4} = -\frac{1}{2 R_p C} \pm j \sqrt{\frac{1}{L_p C} - \left(\frac{1}{2 R_p C} \right)^2} \quad \text{für} \quad \left(\frac{1}{2 R_p C} \right)^2 - \frac{1}{L_p C} < 0 \quad (2.11)$$

Zunächst interessiert der reale Anteil der Lösung von (2.11), um aus der Hüllkurve für zwei Zeitpunkte t_1 und t_2 die Dämpfung des Netzes zu ermitteln.

$$u_1 = K e^{-\frac{1}{2R_p C} t_1} = K e^{-\frac{t_1}{2\tau}} \quad \text{mit} \quad \tau = R_p C \quad (2.12)$$

$$u_2 = K e^{-\frac{1}{2R_p C} t_2} = K e^{-\frac{t_2}{2\tau}} \quad (2.13)$$

Die Division der beiden Gleichungen mit nachfolgendem Logarithmieren liefert

$$\ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right) = -\frac{1}{2R_p C}(t_2 - t_1) = -\frac{(t_2 - t_1)}{2\tau} \quad (2.14)$$

$$\tau = -\frac{(t_2 - t_1)}{2 \ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)} = R_p C \quad (2.15)$$

Mit der Definition für die Nennkreisfrequenz des Mitsystems ω_1

$$R_p = \frac{U_n}{I_W} \quad \text{und} \quad C = \frac{I_{CE}}{\omega_1 U_n} \quad (2.16)$$

$$\tau = R_p C = \frac{U_n}{I_W} \frac{I_{CE}}{\omega_1 U_n} \quad (2.17)$$

ergibt sich die folgende Gleichung:

$$I_W = \frac{1}{\tau \omega_1} I_{CE} \quad (2.18)$$

Untersucht man die Winkeländerung der linearisierten Trajektorie, so ergibt sich die Winkeländerung bei einer Abtastrate von 2 kHz für unterschiedliche Kompensationsart entsprechend dem Bild 2-27.

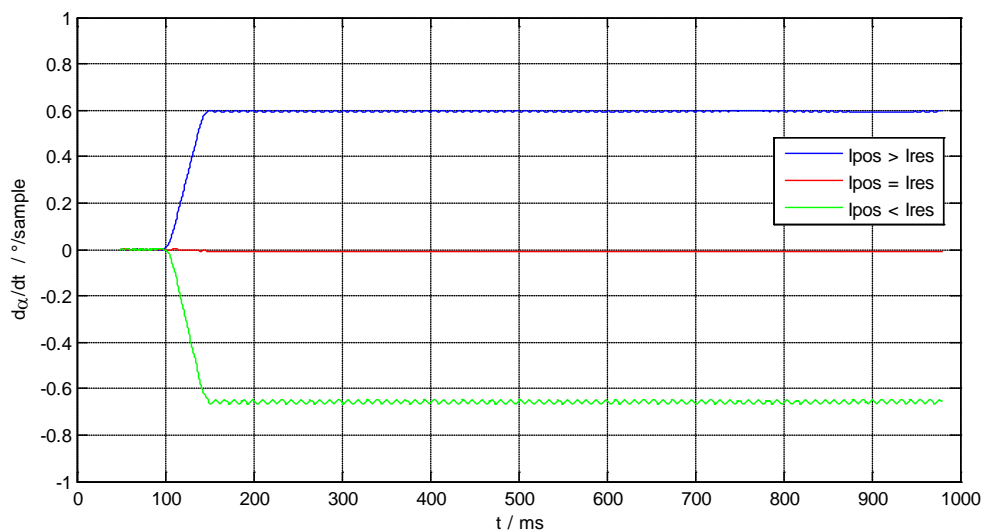


Bild 2-27: Winkeländerung je sample für unterschiedliche Kompensationsarten

Auch hier kann durch diese Darstellung wieder eine Ausgleichsgerade für einen selektierten Zeitbereich ermittelt werden. Aus der Winkeländerung kann die aktuelle Kreisfrequenz und somit die Verstimmung des kompensierten Netzes wie folgt ermittelt werden.

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_p C} - \left(\frac{1}{2 R_p C}\right)^2} = \sqrt{\omega_r^2 - \frac{1}{4 \tau^2}} \quad \text{mit} \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_p C}} \quad (2.19)$$

bzw. nach Umformung

$$\omega_r = \omega \sqrt{1 + \frac{1}{4 \omega^2 \tau^2}} \quad (2.20)$$

Mit der Nenn-Betriebskreisfrequenz ω_1 ist

$$C = \frac{I_{CE}}{U_n \omega_1} \quad \text{und} \quad L_p = \frac{U_n}{I_{pos} \omega_1} \quad (2.21)$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L_p C} = \frac{I_{pos} \omega_1 U_n \omega_1}{U_n I_{CE}} \quad (2.22)$$

$$I_{CE} = I_{pos} \left(\frac{\omega_1}{\omega_r}\right)^2 \quad (2.23)$$

Berechnung für unser Beispiel:

- Spulenstellung I_{pos} : 100 A
- Nennfrequenz: 50 Hz
- Abtastrate: 2 kHz => 40 Samples pro Periode
- Ermittelte Winkeländerung laut Bild 2-27: $+0,6^\circ$

Die Zeitkonstante τ kann nach Gleichung (2.15) durch Einsetzen der Messwerte zum Zeitpunkt t_1 und t_2 ermittelt werden:

$$\tau = -\frac{(t_2 - t_1)}{2 \ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)} = -\frac{0,7 - 0,145}{2 \ln\left(\frac{1096}{10089}\right)} = 0,1250 \text{ s} \quad (2.24)$$

In Bild 2-27 ist die Abweichung des Winkels je Sample vom synchronisierten Raumzeiger dargestellt. Diese Winkeländerung muss auf die aktuelle Kreisfrequenz ω umgerechnet werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass je Periode 40 Samples verwendet werden.

$$\omega = \omega_1 \left(\frac{360 + 0,60 \cdot 40}{360}\right) = \omega_1 \cdot 1,0667 \quad (2.25)$$

In Gleichung (2.20) eingesetzt ergibt

$$\omega_r = \omega_1 \cdot 1,0667 \sqrt{1 + \frac{1}{4 (\omega_1 \cdot 1,0667)^2 0,1250^2}} \approx \omega_1 \cdot 1,0667 \quad (2.26)$$

Nun sind alle Parameter des Netzes bekannt. Mit Gleichung (2.23) und (2.18) werden diese Parameter in die in der Praxis üblicherweise verwendeten Größen umgerechnet.

$$I_{CE} = 100,0 \left(\frac{1}{1,0667} \right)^2 = 87,9 A \quad (2.27)$$

$$I_W = \frac{1}{0,1250 \cdot 2\pi \cdot 50} 87,9 = 2,238 A \quad (2.28)$$

Bei diesem Verfahren erhält man die Information über den Abstimmungszustand des neuen Netzes nach der Beseitigung des Erdschlusses. Im Falle eines Erdschlusswischers beschreibt dies den Abstimmzustand des bestehenden Netzes. Wurde der Erdschluss durch Abschaltung eines Teilnetzes beseitigt, so beschreiben diese Parameter das Netz für den aktuellen Schaltzustand ohne den erdschlussbehafteten Anteil. Diese Information kann für die neue Abstimmung des Netzes verwendet werden. Man erhält durch diese Auswertung keine Information über den Abstimmungszustand kurz vor der Beseitigung des Erdschlusses.

Andere, alternative Auswertungen direkt aus dem Zeitverlauf von u_0 wurden bereits in [156] [141] und [208] präsentiert. Der wesentliche Unterschied zu den dort aufgeführten Verfahren besteht darin, dass hier die Frequenz und die Dämpfung aus der Raumzeigerdarstellung nach einer Linearisierung um den Arbeitspunkt gewonnen werden. Außerdem wird durch die Verwendung des Hilbert-Transformators die Bestimmung der Frequenz wesentlich genauer. Durch diese Maßnahmen wird die neue Auswertung wesentlich robuster.

2.7 Ortskurve der Verlagerungsspannung und des Fehlerstromes

2.7.1 Unsymmetrie in Phase L1

Einfache Ableitung für die Resonanzkurve nach [16]:

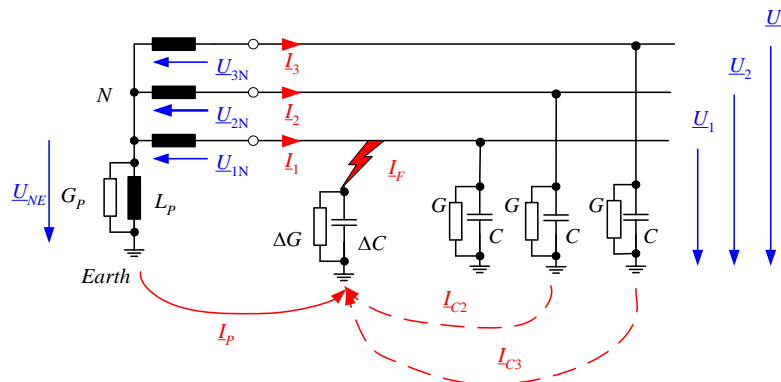


Bild 2-28: Vereinfachtes dreiphasiges Ersatzschaltbild

$$0 = \underline{I}_p + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{NE} \underline{Y}_P &= \underline{I}_P \\ (\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{NE}) \underline{Y}_1 &= \underline{I}_1 \\ (\underline{U}_{2N} + \underline{U}_{NE}) \underline{Y}_2 &= \underline{I}_2 \\ (\underline{U}_{3N} + \underline{U}_{NE}) \underline{Y}_3 &= \underline{I}_3\end{aligned}$$

Mit einer angenommenen Admittanz-Abweichung in Phase L1 können die Admittanzen wie folgt angeschrieben werden:

$$\underline{Y}_P = G_P + \frac{1}{j\omega L_P} \quad (2.30)$$

$$\underline{Y}_1 = (G + \Delta G) + j\omega(C + \Delta C) \quad (2.31)$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = G + j\omega C \quad (2.32)$$

Unter der Annahme einer symmetrischen dreiphasigen Einspeisung und dem Drehoperator $\underline{a} = e^{-j120^\circ}$

wird $\underline{U}_{2N} = \underline{a}^2 \underline{U}_{1N}$ und $\underline{U}_{3N} = \underline{a} \underline{U}_{1N}$.

Eingesetzt in Gleichung (2.29) ergibt

$$0 = \underline{U}_{NE} (\underline{Y}_P + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) + \underline{U}_{1N} (\underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \underline{Y}_2 + \underline{a} \underline{Y}_3)$$

bzw. ergibt sich für die Verlagerungsspannung die folgende Gleichung:

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \underline{Y}_2 + \underline{a} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_P + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} \underline{U}_{1N} \quad (2.33)$$

Werden die Admittanzen aus Gleichung (2.30) bis (2.32) in die folgenden Gleichungen eingesetzt

$$\begin{aligned}\underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \underline{Y}_2 + \underline{a} \underline{Y}_3 &= \Delta G + j\omega \Delta C \\ \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 &= (3G + \Delta G) + j\omega(3C + \Delta C)\end{aligned}$$

so ergibt sich für (2.33) der folgende Ausdruck:

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{Y}_U}{\underline{Y}_U + \underline{Y}_W + j(B_C - B_L)} \underline{U}_{1N} = - \frac{\underline{Y}_U}{\underline{Y}_U + \underline{Y}_O} \underline{U}_{1N} \quad (2.34)$$

mit

$$\begin{aligned}\underline{Y}_O &= \underline{Y}_W + j(B_C - B_L) && \text{Admittanz Darstellung eines Parallel-Schwingkreises} \\ \underline{Y}_U &= \Delta G + j\omega \Delta C && \text{Unsymmetrie des Netzes} \\ \underline{Y}_W &= 3G + G_P && \text{Wirkanteil von } \underline{Y}_O \\ B_C &= \omega 3C && \text{Kapazitiver Anteil von } \underline{Y}_O \\ B_L &= \frac{1}{\omega L_P} && \text{Induktiver Anteil von } \underline{Y}_O.\end{aligned} \quad (2.35)$$

Damit kann das vereinfachte Ersatzschaltbild eines komplexen Spannungsteilers nach Bild 2-29 gezeichnet werden:

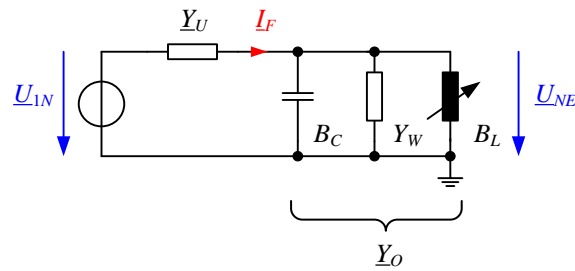


Bild 2-29: Admittanz-Ersatzschaltbild für ein Netz mit Unsymmetrie in Phase L_1

Dieses Ersatzschaltbild ist sowohl für den gesunden Netzbetrieb als auch für den Erdschlussfall gültig. In der Praxis wird üblicherweise mit Impedanzen gerechnet. Die äquivalente Schaltung des Spannungsteilers ist in Bild 2-30 dargestellt.

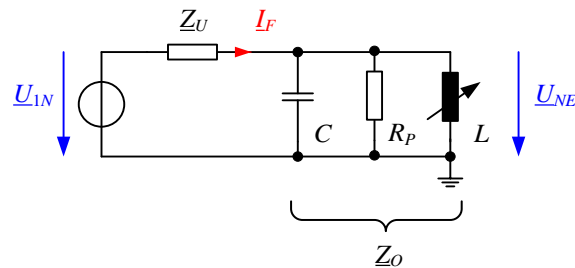


Bild 2-30: Impedanz-Ersatzschaltbild für ein Netz mit Unsymmetrie in Phase L_1

Im gesunden Fall stellt Z_u die kapazitive Unsymmetrie des Netzes dar. Im Erdschlussfall ist diese Impedanz wesentlich kleiner und sie ist sowohl vom Fehlerort als auch von der Fehlerart abhängig.

Bei einem Fehler im Umspannwerk liegt der Übergangswiderstand im Bereich von 0 ... 2 Ohm. Ein brennender Niedrigstrom-Lichtbogen kann mit einer Brennspannung von 30 ... 100 V angesetzt werden und kann ebenfalls vereinfacht als ohmscher Widerstand im Bereich von ca. 1 bis 10 Ohm nachgebildet werden.

Der Übergangswiderstand im Freigelände, z. B. nach einem Seilriss, hängt von vielen Faktoren ab, kann aber auch vereinfacht als ohmscher Widerstand dargestellt werden.

Bei diesen hochohmigen Erdschlüssen ist wesentlich, dass die Verlagerungsspannung nicht mehr unbedingt in Richtung der fehlerhaften Phase zeigen muss. Dies führt bei einigen Systemen und Fehlerzuständen zur falschen Auswahl der fehlerhaften Phase. Bei dem Verfahren zur Erdung der fehlerhaften Phase wird in einem solchen Fall eventuell nicht der fehlerhafte Leiter geerdet, sondern der gesunde. Anstelle einer Entlastung der Fehlerstelle wird dadurch ein Doppelerdschluss erzeugt.

Im Bild 2-31 ist die Abhängigkeit der Größe und Richtung der Verlagerungsspannung bei unterschiedlichem Fehlerwiderstand R_F in Ω genauer dargestellt. In diesem Bild wurde die Spannung \underline{U}_{IN} in Richtung der reellen Achse gelegt und die Ortskurve $\underline{U}_{NE} = f(R_F)$ bei vier unterschiedlichen Kompensationen aufgenommen. Wenn das Netz isoliert ist, eilt in diesem Beispiel bei einem Fehlerwiderstand von 100 Ω die Spannung \underline{U}_{NE} der Spannung \underline{U}_{IN} um 45° nach. Bei idealer Kompensation ist \underline{U}_{NE} in Richtung von \underline{U}_{IN} und wesentlich größer. Bei Überkompensation um 100 A ist \underline{U}_{NE} um 45° voreilend.

Es ist zu beachten dass der Kreis erst in der Nähe des Resonanzpunktes in Kreissegmente übergeht. Es sind aber keine Ellipsen.

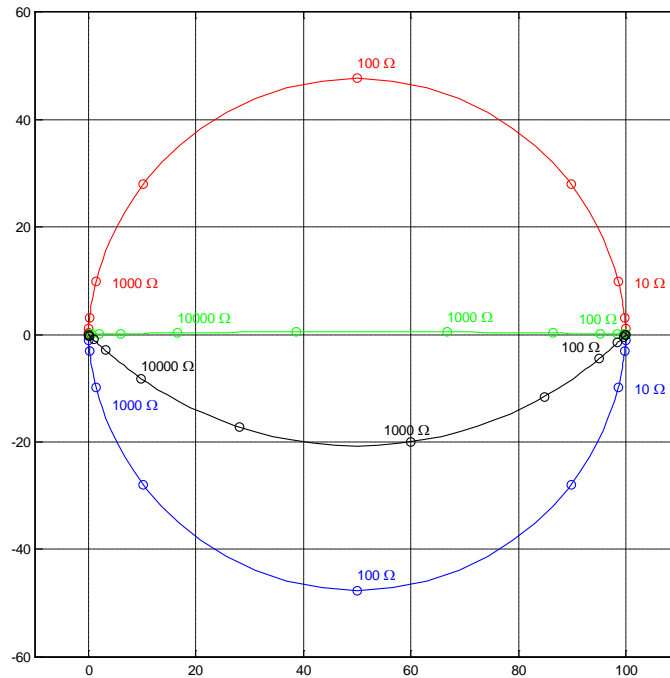


Bild 2-31: Ortskurve $\underline{U}_{NE} = f(R_F)$ für ein Netz mit $I_{CE} = 100 A$

blau	...	$I_L = 0$	
schwarz	...	$I_L = 95 A$	=> 5 A unterkompensiert
grün	...	$I_L = 100 A$	=> voll kompensiert
rot	...	$I_L = 200 A$	=> 100 A überkompensiert

Noch extremer wird die falsche Auswahl der fehlerhaften Phase im Falle eines "rückwärtigen Erdschlusses". In diesem Fall wird in jedem Fall die falsche Phase als erdschlussbehaftet gekennzeichnet [34]. Bei Systemen mit Entlastung der erdschlussbehafteten Phase führt dies zu einem Doppelerdschluss.

2.7.2 Natürliche kapazitive Unsymmetrie in Phase L1 des gesunden Netzes

In diesem Fall ist meist ΔG vernachlässigbar und $j\omega\Delta C$ sehr klein. Dies bedeutet, dass der Strom \underline{I}_F sehr klein und eingepreßt ist. Eine Änderung der Position der Petersen-Spule wirkt sich kaum auf den Strom \underline{I}_F aus. Außerdem ergibt sich daraus, dass die Resonanzkurve symmetrisch um den Resonanzpunkt ist.

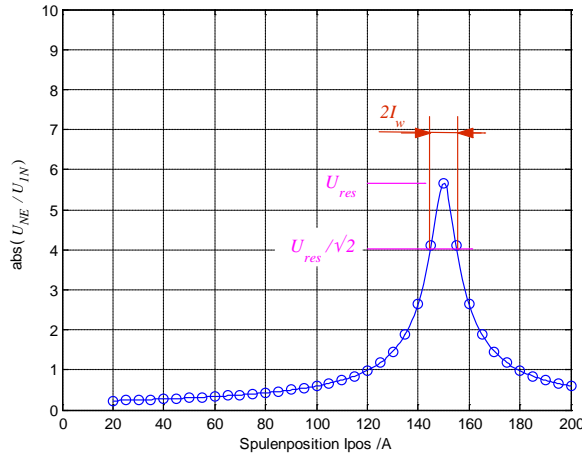


Bild 2-32: Betrag der Verlagerungsspannung bei Veränderung der Spulenposition: $|U_{NE}| = f(I_{pos})$

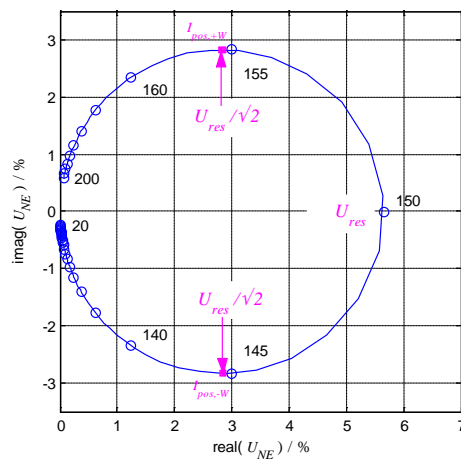


Bild 2-33: Ortskurve der Verlagerungsspannung bei Veränderung der Spulenposition: $U_{NE} = f(I_{pos})$

Die Resonanzkurve der vereinfachten Ersatzschaltung kann mit den folgenden Parametern vollständig beschrieben werden:

- U_{res} Maximale Spannung im Resonanzpunkt
- I_{res} Zugehörige Spulenstellung bei U_{res} ; der kapazitive Stromanteil ist völlig kompensiert
- I_w Wirkstrom über die Fehlerstelle im Falle eines niederohmigen Erdschlusses

Diese Parameter können aus einer Resonanzkurve mit der $\sqrt{2}$ -Methode einfach bestimmt werden.

Mithilfe der Gleichung (2.34) kann sehr einfach gezeigt werden, dass der Betrag der Verlagerungsspannung auf $1/\sqrt{2}$ im folgenden Punkt absinkt:

$$|j(B_C - B_{L,+W})| = Y_W$$

$$|(B_C - B_{L,+W})| U_{1N} = Y_W U_{1N}$$

$$|I_{res} - I_{pos,+W}| = I_W$$

Das Gleiche gilt für Unterkompensation bei $I_{pos,-W}$.

In den beiden Punkten $I_{pos.+W}$ und $I_{pos.-W}$ ist der verbleibende Blindstrom und der Wirkstrom durch den Resonanzkreis gleich groß. Die Phasenverschiebung zum Strom I_U durch die Unsymmetrie ist daher 45° . Eine genauere Ableitung ist zu finden in [16][41].

In unserem Beispiel ergeben sich aus Bild 2-32 bzw. Bild 2-33 für ein 20-kV-Netz mit $U_{1N} = 11550$ V und $f = 50$ Hz die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} U_{res} &= 5,65 \% \text{ bzw. umgerechnet auf die Primärspannung } 11550 \cdot 5,65/100 = 652,57 \text{ V} \\ I_{res} &= 150 \text{ A} \\ I_w &= 5,5 \text{ A} \end{aligned}$$

bzw. für die Parameter der Ersatzschaltung nach Bild 2-30

$$R_p = \frac{U_{N1}}{I_w} = \frac{11550}{5,5} = 2,1 \text{ k}\Omega \quad (2.36)$$

$$C = \frac{I_{res}}{\omega U_{N1}} = \frac{I_{res}}{2 \pi f U_{N1}} = \frac{150}{2 \pi 50 11550} = 41,34 \mu\text{F} \quad (2.37)$$

Im Resonanzpunkt gilt:

$$U_{res} = \frac{Z_U}{Z_U + R_p} U_{1N} \quad (2.38)$$

$$Z_U = \frac{U_{1N} - U_{res}}{U_{res}} R_p = \frac{11550 - 652,57}{652,57} 2100 = 35,68 \text{ k}\Omega \quad (2.39)$$

Die Interpretation von $Z_U = 1/Y_U$ kann entsprechend Gleichung (2.35) als rein ohmsche Unsymmetrie oder als rein kapazitive Unsymmetrie interpretiert werden.

Die Resonanzkurve kann alternativ durch die folgenden Parameter beschrieben werden:

I_{res}	Spulenstellung im Resonanzpunkt
k	Unsymmetrie des Resonanzkreises
d	Dämpfung des Resonanzkreises

mit
$$k = \frac{Y_U}{Y_U + Y_w} \approx \frac{Y_U}{Y_w} = \frac{I_U}{I_w} \quad (2.40)$$

$$d = \frac{I_w}{I_C} = \frac{I_w}{I_{res}} = \frac{Y_w}{B_C} \quad (2.41)$$

und der aktuellen relativen Verstimmung v

$$v = \frac{I_L - I_C}{I_C} = \frac{I_L - I_{res}}{I_{res}} = \frac{B_L - B_C}{B_C} \quad (2.42)$$

Anmerkung: Es wird hier die in der Praxis übliche Definition der Überkompensation verwendet. Nach dieser Definition ist das Netz überkompensiert, wenn die Petersen-Spule auf zu große Werte eingestellt wird. Es ist zu beachten, dass in der Literatur auch die Definition $v = (I_C - I_L)/I_C$ verwendet wird.

Mit der Definition (2.42) wird die absolute Verstimmung v

$$v = I_L - I_C = I_L - I_{res} = B_L - B_C \tag{2.43}$$

In der Zwischenzeit hat sich die Beschreibung mit U_{res} , I_{res} und I_w durchgesetzt, da einerseits U_{res} und I_{res} anschaulicher sind und I_w direkt für die Parametrierung des Schutzes verwendet werden kann.

2.7.3 Niederohmiger Erdschluss in Phase L1

Bei einem niederohmigen Erdschluss in Phase L1 ist $j\omega\Delta C$ vernachlässigbar und ΔG sehr groß gegenüber Y_0 . Die Spannung am Resonanzkreis ist eingepreßt. Bei Veränderung der Petersen-Spule ergibt sich die bekannte V-Kurve nach Bild 2-34, wenn nur der Betrag des Stromes aufgezeichnet wird. Hingegen ist der Strom in der komplexen Ebene eine Gerade, wie in Bild 2-35 dargestellt.

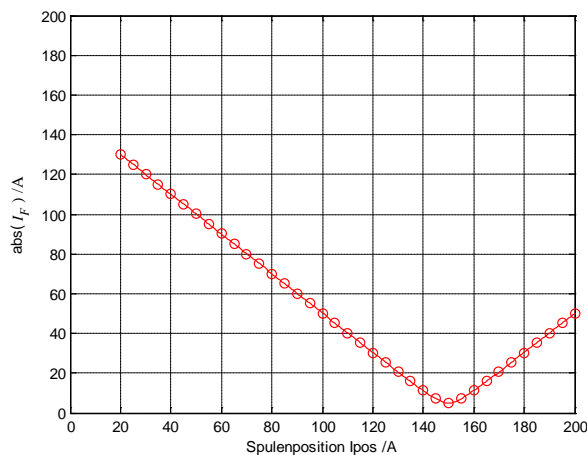


Bild 2-34: V-Kurve für den Strom über die Fehlerstelle

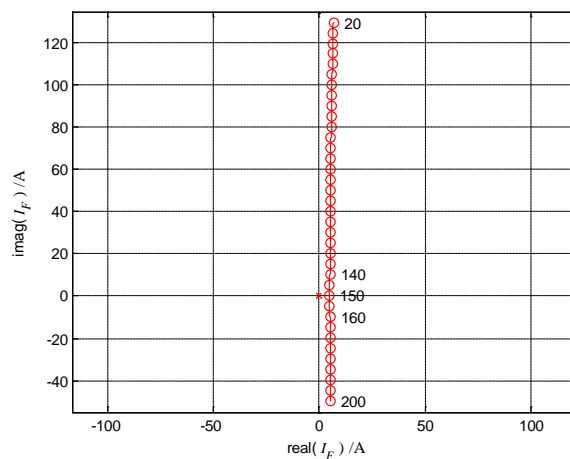


Bild 2-35: Strom über die Fehlerstelle in der komplexen Ebene

2.7.4 Natürliche Unsymmetrie in Phase L1, L2 und L3

Die bereits oben hergeleitete Gleichung (2.44) gilt ganz allgemein für alle Admittanzabweichungen und ist nicht beschränkt auf die Phase L1.

$$\underline{U}_{NE} = \frac{\underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \underline{Y}_2 + \underline{a} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_P + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} \underline{U}_{1N} \quad (2.44)$$

In den vorherigen Abschnitten wurde zur Vereinfachung die Unsymmetrie in die Phase L1 gelegt. Im Folgenden wird der allgemeine Fall noch einmal betrachtet, da dies speziell für die Interpretation des Admittanzverfahren relevant ist.

Für den allgemeinen Fall müssen die Gleichungen (2.31) bis (2.32) geändert werden auf:

$$\underline{Y}_1 = (G_m + \Delta G_1) + j\omega (C_m + \Delta C_1) \quad (2.45)$$

$$\underline{Y}_2 = (G_m + \Delta G_2) + j\omega (C_m + \Delta C_2) \quad (2.46)$$

$$\underline{Y}_3 = (G_m + \Delta G_3) + j\omega (C_m + \Delta C_3) \quad (2.47)$$

mit

$$G_m = (G_1 + G_2 + G_3) / 3 \quad (2.48)$$

$$C_m = (C_1 + C_2 + C_3) / 3 \quad (2.49)$$

wird der Zähler von Gleichung (2.44)

$$\underline{Y}_1 + \underline{a}^2 \underline{Y}_2 + \underline{a} \underline{Y}_3 = (\Delta G_1 + \underline{a}^2 \Delta G_2 + \underline{a} \Delta G_3) + j\omega (\Delta C_1 + \underline{a}^2 \Delta C_2 + \underline{a} \Delta C_3) = \underline{Y}_U \quad (2.50)$$

Wesentliche Aussagen der Gleichung (2.50):

- Die Unsymmetrie liegt nun in der komplexen Ebene
- Man kann die gleiche Unsymmetrie entweder durch eine geeignete ohmsche Unsymmetrie oder durch eine geeignete kapazitive Unsymmetrie erzeugen

Die Unsymmetrie kann nicht mehr nur einem Verursacher zugeschrieben werden!

Vor allem die letzte Aussage führt zu einigen Interpretations-Problemen bei der hochohmigen Fehlererkennung.

Der Nenner von Gleichung (2.44) wird zu

$$\begin{aligned} \underline{Y}_P + \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 &= \left(G_P - \frac{j}{\omega L_P} \right) + (3G_m + \Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3) + j\omega (3C_m + \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3) \\ &= [\Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3 + j\omega (\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3)] + [G_P + 3G_m] + j(B_C - B_L) \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$= [\Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3 + j\omega (\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3)] + Y_W + j(B_C - B_L) \quad (2.52)$$

Damit nimmt der Spannungsteiler die folgende Form an:

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{Y}_U}{[\Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3 + j\omega (\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3)] + Y_W + j(B_C - B_L)} \underline{U}_{1N} \quad (2.53)$$

bzw.

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{Y}_U}{[\Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3 + j\omega(\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3)] + \underline{Y}_O} \underline{U}_{1N} \quad (2.54)$$

mit

$$\underline{Y}_O = Y_W + j(B_C - B_L)$$

Admittanz-Darstellung eines Parallel-Schwingkreises

$$\underline{Y}_U = (\Delta G_1 + \underline{a}^2 \Delta G_2 + \underline{a} \Delta G_3) + j\omega(\Delta C_1 + \underline{a}^2 \Delta C_2 + \underline{a} \Delta C_3)$$

Unsymmetrie des Netzes

$$Y_W = 3 G_m + G_p$$

Wirkanteil von \underline{Y}_O

$$B_C = \omega 3 C$$

Kapazitiver Anteil von \underline{Y}_O

$$B_L = \frac{1}{\omega L_p}$$

Induktiver Anteil von \underline{Y}_O .

Es ist zu beachten, dass im Zähler die geometrische Summe der Admittanz-Abweichungen steht, hingegen im Nenner die arithmetische Summe.

Im gesunden Netz ist üblicherweise $\underline{Y}_U \ll \underline{Y}_O$, sodass die folgende Näherung gilt:

$$\underline{U}_{NE} \approx - \frac{\underline{Y}_U}{\underline{Y}_O} \underline{U}_{1N} = - \frac{\underline{I}_U}{\underline{Y}_O} = - \underline{I}_U \underline{Z}_O \quad (2.55)$$

mit dem komplexen Unsymmetriestrom

$$\underline{I}_U = \underline{Y}_U \underline{U}_{1N} \quad (2.56)$$

Beim Admittanzverfahren wird diese Gleichung verwendet, um den natürlichen Unsymmetriestrom je Abgang nachzubilden. Hierzu wird \underline{U}_{1N} in die reelle Achse gelegt. Dadurch stellt \underline{Y}_U bis auf den Multiplikationsfaktor \underline{U}_{1N} den Unsymmetriestrom des Abganges in der komplexen Ebene dar.

$$\underline{I}_U = \underline{Y}_U \underline{U}_{1N} \quad (2.57)$$

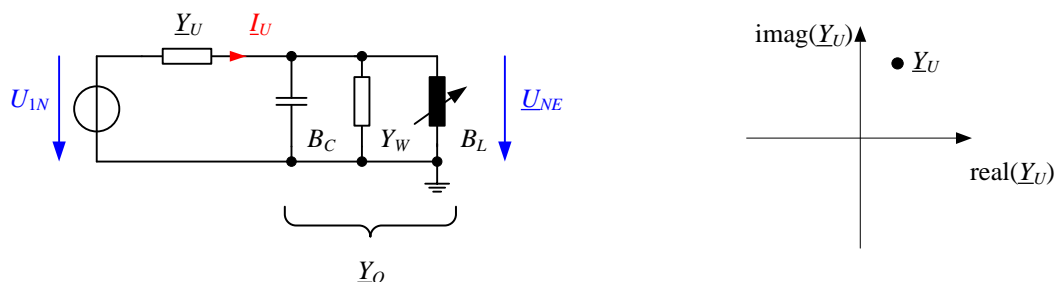


Bild 2-36: Admittanz-Ersatzschaltbild für ein Netz mit einer Unsymmetrie und Darstellung von \underline{Y}_U in der komplexen Ebene

Zur Veranschaulichung für mehrere Abgänge erfolgt in Bild 2-37 die Darstellung für zwei Abgänge mit jeweils unterschiedlicher Unsymmetrie. In der Darstellung ist die Leiter-Erde-Kapazität direkt den Abgängen zugeordnet. Außerdem ist in diesem Bild die Messung der Summenströme \underline{I}_{SA} und \underline{I}_{SB} je Abgang an der Sammelschiene dargestellt.

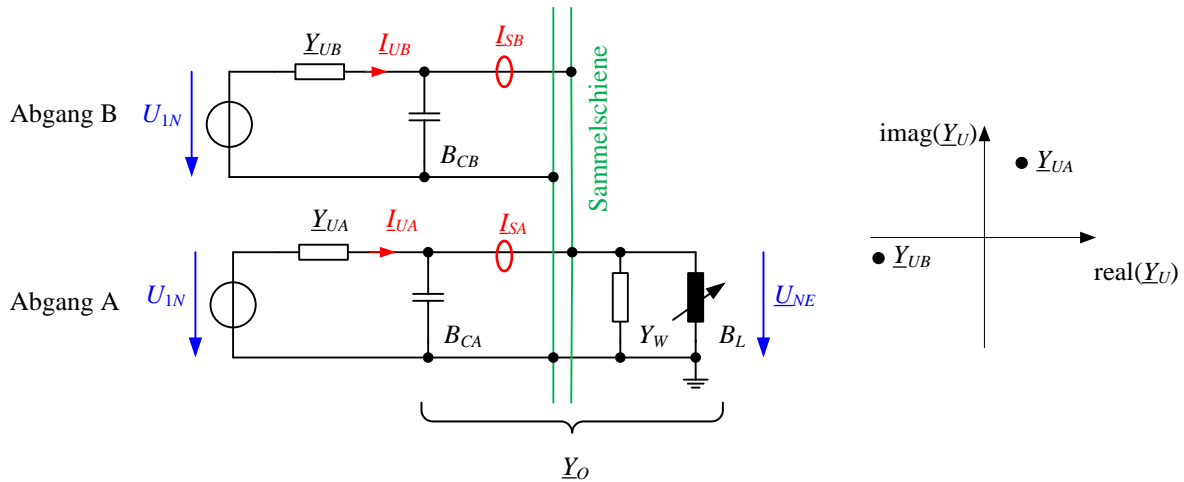


Bild 2-37: Admittanz-Ersatzschaltbild für ein Netz mit zwei Abgängen mit unterschiedlicher Unsymmetrie und der zugehörigen Darstellung von \underline{Y}_U in der komplexen Ebene

2.8 Strom über die Fehlerstelle bei Beginn des Erdschlusses

Im obigen Abschnitt haben wir gesehen, dass der hochfrequente Teil des Entladestromes des fehlerhaften Leiters vom Wellenwiderstand abhängig ist und im Kabelnetz auf Werte von ca. 400 A begrenzt wird. Bei Freileitungen ist dieser Anteil noch geringer.

Nun soll noch eine genauere Betrachtung des Aufladestromes bei den einzelnen Sternpunktbehandlungen erfolgen.

Diese Aufladeschwingung wird im Wesentlichen durch die Kurzschlussimpedanz des Trafos, durch die Längsimpedanz der Leitung und durch die Leiter-Erde Kapazität des Kabels bestimmt. Die Induktivität der Petersen-Spule ist wesentlich größer als die Kurzschlussimpedanz des Transformators und kann daher üblicherweise vernachlässigt werden. Bild 2-38 zeigt die resultierende Ersatzschaltung für die Aufladeschwingung.

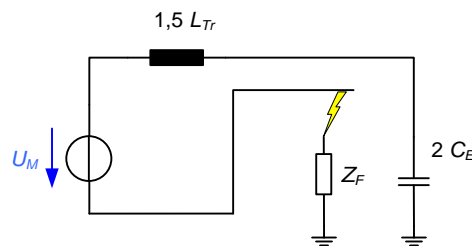


Bild 2-38: Zweiphasiges Ersatzschaltbild für die Aufladeschwingung

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_{eq}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{3 L_{Tr} C_E}} \quad (2.58)$$

Die genaue Herleitung für die Formel (2.58) ist in [170] bzw. [171] zu finden.

Im **isolierten Netz** ist der Aufladestrom der beiden gesunden Leiter, der über die Fehlerstelle fließt, von den folgenden Faktoren abhängig:

- Verkettete Spannung des Netzes
- Kurzschlussimpedanz des Trafos
- Leiter-Erde Kapazität des Netzes
- Längsimpedanz der Leitung; kann bei kleinen Netzen vernachlässigt werden
- Impedanz an der Fehlerstelle
- Zündzeitpunkt

Erfolgt die Zündung im Nulldurchgang der Leiter-Erde Spannung, so entfällt die Entladeschwingung gemäß Kapitel 2.2. In diesem Fall erfolgt nur die Aufladung der beiden Leiter auf die verkettete Spannung. Dieser Aufladevorgang erfolgt auch bei einem satten Erdschluss relativ sanft und über einen Zeitraum von 5 ms.

Erfolgt hingegen die Zündung im Spannungsmaximum der Leiter-Erde Spannung, so wird versucht, die beiden gesunden Leiter sofort um die Phasenspannung anzuheben. Dieser Aufladevorgang verläuft wesentlich kräftiger und der Aufladestrom wird im Wesentlichen nur durch die Kurzschlussimpedanz des Transformators und durch die Impedanz an der Fehlerstelle begrenzt.

Im **gelöschten Netz** sind die Verhältnisse zunächst sehr ähnlich.

Nach dem Aufladen der beiden gesunden Leiter fließt, wie bereits weiter oben gezeigt wurde, die geometrische Summe aus Wirkstrom und Verstimmungsstrom über die Fehlerstelle.

Für die hochfrequenten Anteile der Entladeschwingung gilt das gleiche wie beim isolierten Netz. Die Kurzschlussimpedanz des Transformators blockt die Wanderwelle und somit wird auch die wesentlich höhere Impedanz der Petersen-Spule für die Entladeschwingung nicht wirksam.

Der Einschaltstrom der Petersen-Spule ist vom Zündzeitpunkt des Erdschlusses abhängig. Die erstmalige Zündung erfolgt üblicherweise in der Nähe des Spannungsmaximums der Leiter-Erde Spannung. In diesem Fall bildet sich kein DC-Anteil im Spulenstrom aus.

Es wurden aber auch Zündungen im Bereich $\pm 60^\circ$ beobachtet [20], allerdings muss noch genauer untersucht werden, ob diese dargestellten Zündzeitpunkte nicht durch die Laufzeit von der Fehlerstelle bis zur Messstelle verursacht worden sind. In diesen Fällen tritt zusätzlich ein abklingender DC-Anteil durch die Petersen-Spule auf.

Die Petersen-Spule kann durch den großen Luftspalt als lineares Element betrachtet werden. Ein Inrush ähnlich zum Einschalten eines Transformators ist bei der Petersen-Spule nicht zu erwarten. Eigentlich ist die Petersen-Spule eine Luftspule mit einem geführten Feldverlauf. Die Nichtlinearität der Petersen-Spule ist in der EN 60289:2002 im Punkt 45.3 definiert und darf bei 10% Überspannung 5 % nicht überschreiten.

Im Folgenden sind zur Veranschaulichung die simulierten Spannungen und Ströme in einem gelöschten Netz bei unterschiedlichen Zündzeitpunkten dargestellt.

Netzdaten:

- Kabel mit $I_{CE} = 26 \text{ A}$
- Ideal kompensiert
- E-Spule ohne Verluste
- Simulation des Kabels mit verteilten Parametern

Zunächst wird eine Zündung im Spannungmaximum in Phase L1 am Ende der Leitung angenommen

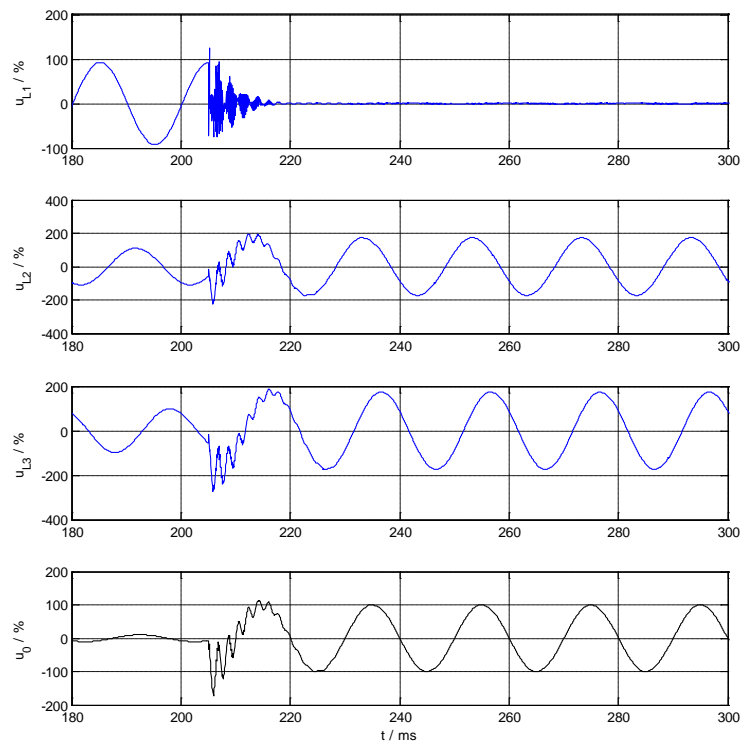


Bild 2-39: Erdschlusseintritt im Spannungmaximum der Leiter-Erde Spannung u_{L1}

Da der Fehler am Ende der Leitung eingelegt wird, die Spannung aber am Anfang der Leitung gemessen wird, entstehen durch Reflexionen entsprechende überlagerte hochfrequente Spannungen in der erdschlussbehafteten Phase (siehe Kapitel 2.2).

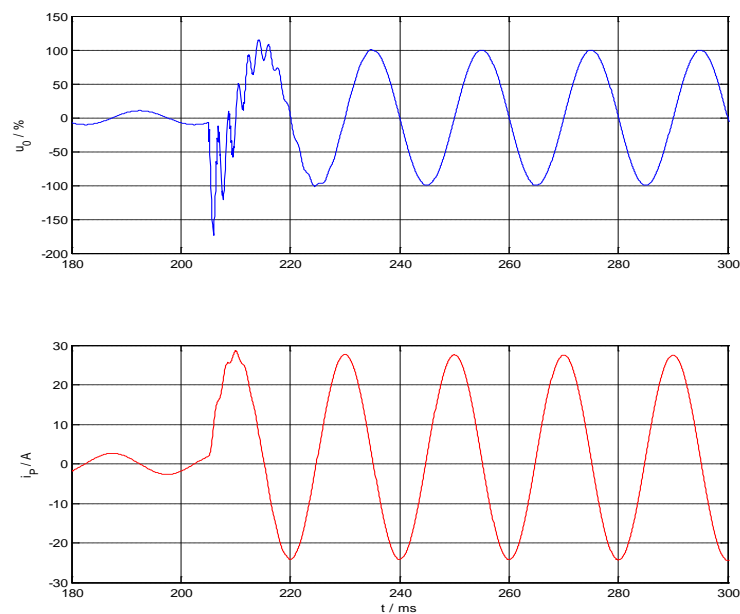


Bild 2-40: Nullspannung und Strom durch die Petersen-Spule

Aus Bild 2-40 ist zu erkennen, dass beim Zünden des Erdschlusses im Spannungsmaximum kein DC-Anteil im Spulenstrom vorhanden ist. Durch die Petersen-Spule fließt sofort der 50-Hz-Strom. Die Oberschwingungen am Beginn des Spulenstroms sind nur durch den Einschwingvorgang von u_0 beim Aufladen der beiden gesunden Phasen verursacht. Der Strom über die Fehlerstelle ist in Bezug auf 50 Hz sofort voll kompensiert.

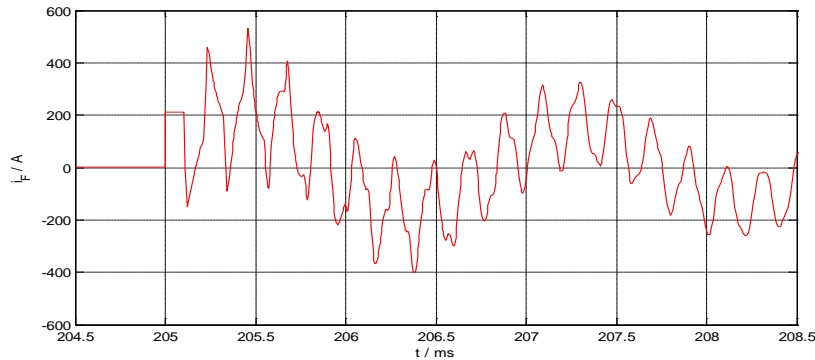


Bild 2-41: Strom über die Fehlerstelle bei Zündung im Spannungsmaximum der Leiter-Erde Spannung

Im Bild 2-41 ist der Strom über die Fehlerstelle gedehnt dargestellt. Aus dem konstanten Strom zum Zeitpunkt 205 ms ist erkennbar, dass hier der maximale Strom nur durch den Wellenwiderstand der Leitung verursacht wird. Dieser Strom wird reflektiert und ist innerhalb weniger ms abgeklungen,

In unserem Beispiel beträgt die Frequenz der Aufladeschwingung ca. 500 Hz.

Die nachfolgenden Bilder zeigen die Verhältnisse, wenn die Zündung beim Nulldurchgang der Leiter-Erde-Spannung u_{L1} erfolgt.

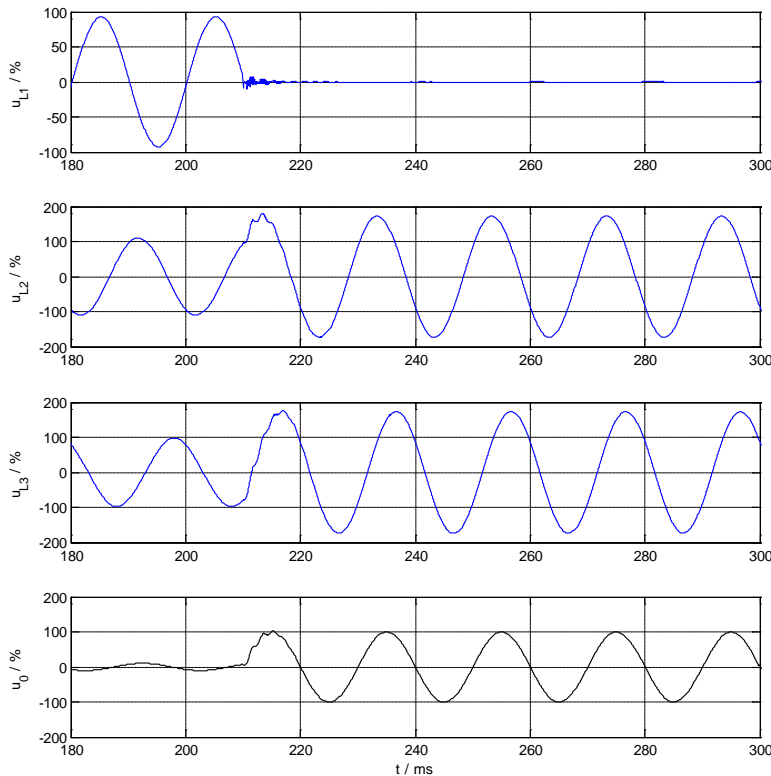


Bild 2-42: Erdschlusseintritt im Spannungsminimum der Leiter-Erde Spannung u_{L1}

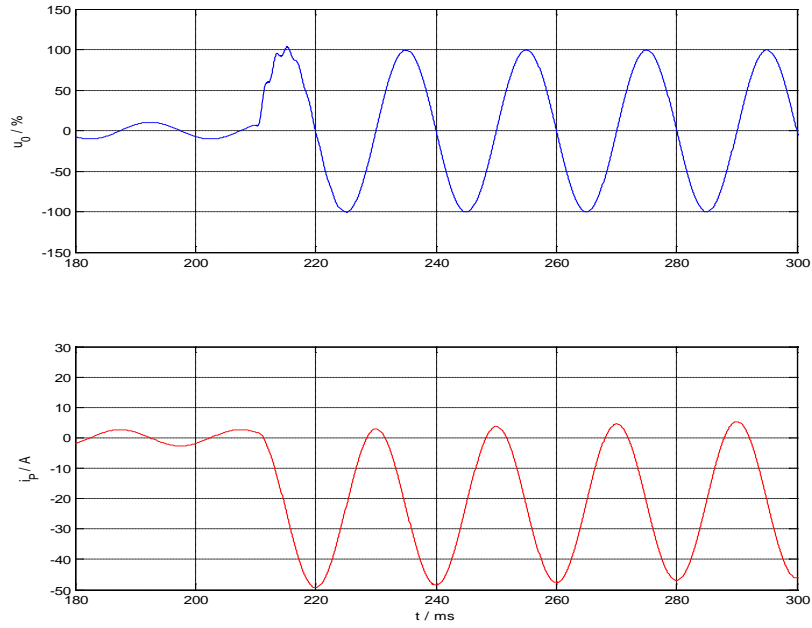


Bild 2-43: Nullspannung und Strom durch die Petersen-Spule

Beim Strom durch die Petersen-Spule ist zu beachten, dass nun ein DC-Anteil fließt

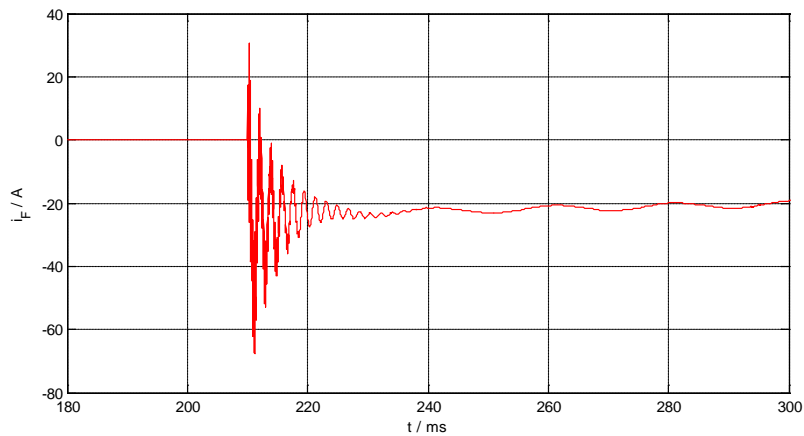


Bild 2-44: Strom über die Fehlerstelle bei Zündung im Spannungsminimum der Leiter-Erde Spannung

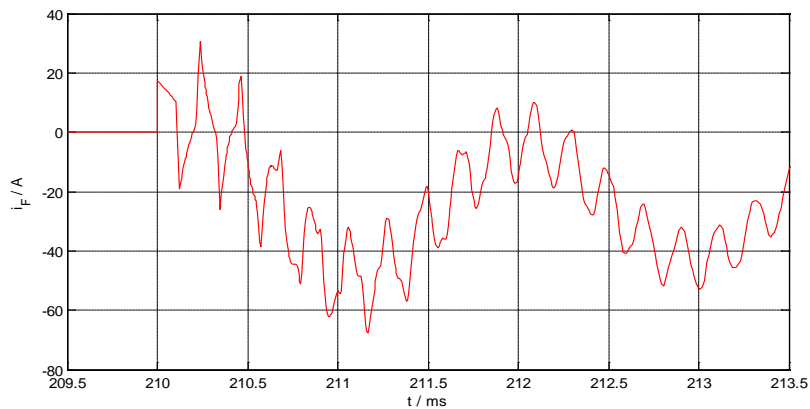


Bild 2-45: Detailansicht des Stromes über die Fehlerstelle bei Zündung im Spannungsminimum der Leiter-Erde Spannung

Aus den Bildern ist zu erkennen:

- Der Entladestrom ist wesentlich kleiner
- Der Strom über die Fehlerstelle hat einen abklingenden DC-Anteil. Die Größe des DC-Anteiles hängt nur von der Größe der Petersen-Spule ab
- Die Frequenz der Aufladeschwingung ist identisch mit der Frequenz beim Zünden im Spannungsmaximum
- Die Strom-Amplitude der Aufladeschwingung ist wesentlich geringer. Dieser Aufladevorgang erfolgt auch bei einem satten Erdschluss relativ sanft und über einen Zeitraum von 5 ms

In der Praxis erfolgt die Zündung in der Nähe des Spannungsmaximums.

Wesentlich ist dabei, dass der erste Entladestrom nicht beliebig groß wird, sondern dass dieser durch den Wellenwiderstand der Leitung begrenzt wird. Auch der Aufladestrom der beiden gesunden Leiter wird nicht beliebig groß und wird durch die 1,5 fache Kurzschlussimpedanz des Trafos begrenzt.

Im **Netz mit niederohmiger Sternpunktbehandlung** ist die hochfrequente Entladeschwingung im erdschlussbehafteten Leiter auch vorhanden.

Durch die niederohmige Erdung erfolgt keine Anhebung oder nur eine sehr geringe Anhebung der beiden gesunden Leiter. Der Aufladestrom für die beiden gesunden Leiter ist daher nicht vorhanden.

Es bildet sich aber ein einpoliger Kurzschlussstrom über die Fehlerstelle aus, der im Wesentlichen von den folgenden Faktoren abhängt:

- Leiter-Erde Spannung
- Kurzschlussimpedanz des Transformators
- Impedanz der Leitung vom Transformator bis zur Fehlerstelle
- Übergangswiderstand
- Erdimpedanz von der Fehlerstelle bis zum Erdungspunkt des Transformators
- Übergangswiderstand im Umspannwerk
- Impedanz der strombegrenzenden Erdungsimpedanz (R oder L)

In der fehlerhaften Phase wird die Spannung im Umspannwerk wesentlich kleiner, wodurch eine Nullspannung gemessen werden kann.

2.9 Impedanz an der Fehlerstelle

In den Modellrechnungen werden üblicherweise konstante ohmsche Widerstände angenommen.

Erdschlussversuche haben jedoch gezeigt, dass dies meist nicht zutreffend ist.

Auch die Abschätzung des Lichtbogens ist schwierig, da es sich beim Erdschluss um einen Niedrigstrom-Lichtbogen handelt. Es gibt sehr viele Untersuchungen über Kennlinien und Löscherhalten zum Kurzschluss-Lichtbogen mit Stromwerten im Bereich von kA, aber nur wenige über das Verhalten von Niedrigstrom-Lichtbögen.

Die ersten Auswertungen haben dennoch ergeben, dass durch entsprechende Anpassung der Parameter der Gleichungen die resultierenden Strom- und Spannungsverläufe recht gut mit den Messungen zur Deckung gebracht werden können [23][52].

Im Folgenden werden einige Randbedingungen und Beobachtungen aus Erdschlussversuchen qualitativ beschrieben.

Leiterseil auf Erde

- Einflussgrößen:
 - Länge des Leiterseiles mit Erdberührung; Anzahl der Kontaktstellen mit der Erde
 - Beschaffenheit des Untergrundes
- Zeitlicher Ablauf:
 - Zunächst zündet der Lichtbogen an einige Kontaktstellen
 - Der Übergangswiderstand ändert sich durch
 - Austrocknung des Bodens => hochohmig
 - Fritteffekt => niederohmig
 - Lichtbögen im Erdreich
 - Ionisierung des Erdreiches
 - Verglasung des Bodens an der Kontaktstelle => hochohmig
 - Durch die vorher beschriebenen Effekte verlischt der Lichtbogen manchmal an einer Kontaktstelle. Dadurch ist die Anzahl der parallel geschalteten Widerstände geringer und die Spannung an der Fehlerstelle steigt an, wodurch es zur Zündung an einer anderen Kontaktstelle kommt
 - Die Vorgänge sind stromabhängig und daher von der Größe der Kompensation abhängig. Die Annahme eines konstanten Übergangswiderstandes an der Fehlerstelle trifft nicht zu
- Offen:
 - Korrelation der Erdungsmessung mit dem Übergangswiderstand beim realen Erdschluss und dem Einfluss der Art und Größe der Kompensation
 - Auswirkung der Spannung auf die Impedanz an der Übergangsstelle.
 - Genaue Untersuchung der Vorgänge im Erdboden an der Übergangsstelle

Leiterseil auf einem Baum

- Einflussgrößen
 - Art der Rinde
 - Jahreszeit:
 - Der Baum ist im Winter sehr trocken. Es wurden Impedanzen im Bereich von 200 k Ω gemessen
 - Bäume im Frühling hingegen beinhalten mehr Flüssigkeiten in der Rinde und werden dadurch wesentlich niederohmiger. Es wurden Werte im Bereich von 10 k Ω bis 30 k Ω gemessen.,
- Zeitlicher Ablauf:
 - Hier erfolgt durch den Strom zunächst eine Trocknung der Rinde. Der Baum beginnt zu "schwitzen"
 - Danach beginnt eine Verkohlung und brennbare Gase werden erzeugt
 - Der Baum beginnt an der Oberfläche zu brennen. Die Impedanz sinkt von einigen zig k Ω in den Bereich von 1 k Ω
 - Nach der oberflächlichen Verkohlung steigt die Impedanz wieder an

- Offen:
 - o Definition eines Referenzbaumes
Bäume werden fast bei allen Erdschlussversuchen verwendet um einen realistischen Fall nachzustellen. Tatsächlich sind diese Messungen aber als Referenz nicht geeignet, da wie oben gezeigt keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden können. Die Definition eines Referenzbaumes, mit dem eindeutige und wiederholbare Messungen durchgeführt werden können, fehlt.

Fehler im selbstheilenden Kabel

- Offen:
 - o Genauer Vorgang bei der Selbstheilung

Fehler im Kabel

- Einflussgrößen
 - o Verhalten des Dielektrikums beim Durchschlag
 - o Art der Beschädigung
 - Überschlag durch Watertreeing
 - Leitendes Material wie z. B. Bohrer, Nagel ...
 - Abtrennen durch Bagger
 - Beschädigung bei Verlegung z. B. minimaler Krümmungsradius unterschritten
 - Alterung
 - o Art des Plasmas, das beim Lichtbogen entsteht
 - o Wird der Überdruck des Plasmas abgebaut oder wird das Dielektrikum durch Druck und Temperatur beeinflusst
 - o Abfuhr der entstehenden Wärmeenergie über den leitenden Kern bzw. den leitenden Kabelschirm
 - o Umgesetzte Leistung an der Fehlerstelle liegt bei guter Kompensation im Bereich von $5 \text{ A} * 30 \text{ V} = 150 \text{ W}$. Dies wurde bei Erdschlussversuchen auch bestätigt [23][52]
- Zeitlicher Ablauf:
 - o Bei größerer Fehlabbstimmung ist auch der Anstieg der wiederkehrenden Spannung größer. Die Wiederzündung erfolgt früher und es wird an der Fehlerstelle mehr Energie umgesetzt
 - o Die umgesetzte Energie an der Fehlerstelle ist abhängig von der Größe der Kompensation.
 - Bei konstantem Lichtbogen direkt erkennbar
 - Bei wiederzündenden Fehlern steigt die Häufigkeit des Wiederzündens

Fehler in Muffen

- wesentliche Einflussgrößen
 - o Dichtheit gegen Feuchtigkeit
 - o Sorgfältigkeit bei Montage
 - o Alterung
 - o Teilentladung

- Zeitlicher Ablauf:
 - o Wie beim Kabel

Fehler an Kabelendverschlüssen

- wesentliche Einflussgrößen
 - o Verschmutzung
 - o Eindringen von Feuchtigkeit
- Zeitlicher Ablauf:
 - o Wie beim Kabel

Zu Themenkreis "Impedanz an der Fehlerstelle" sind nach Ansicht des Autors derzeit folgende Forschungsfragen offen:

- Genaue Korrelation der Erdungsmessung bei kleiner Spannung mit dem Übergangswiderstand bei eingepägtem Strom und hoher Spannung
- Einfluss der Witterung auf den Übergangswiderstand
- Auswirkungen auf den fiktiven Erd-Rückleiter durch
 - o Bodenschichten mit unterschiedlichem ρ
 - o Höhe des Grundwasserpegels
- Reduktionsfaktoren durch leitende Elemente in der Erde
- Auswirkungen von Lichtbögen im Erdreich an der Fehlerstelle
- Auswirkungen der obigen Punkte auf Berühr- und Schrittspannungen
- Auswirkungen von Über- und Unterkompensation auf die Impedanz an der Fehlerstelle für die Fehlerfälle
 - o Leiterseil auf Erde
 - o Beschädigtes Kabel in der Erde
 - o Durch einen Bagger abgerissenes Kabel in der Luft
 - o Durch einen Bagger abgerissenes Kabel mit Erde bedeckt
- Auswirkungen von Oberschwingungsströmen
 - o Auf das Löschverhalten
 - Bei Kabel
 - Bei Freileitungen auf Erde
 - Bei unterschiedlicher 50-Hz-Kompensation
 - o Notwendigkeit der Kompensation von Oberschwingungsströmen
- Verhalten und Auswirkungen des Niedrigstrom- Lichtbogens im Kabel

3 Identifikation des erdschlussbehafteten Abganges

Die Erfassung des Erdschlusses ist im Vergleich zum Kurzschluss-Schutz eine komplexe Aufgabe.

In niederohmig und starr geerdeten Netzen wird der einpolige Kurzschlussstrom bei geringen Fehlerwiderständen erkannt und der entsprechende Schutzabschnitt in Schnellzeit abgeschaltet. Voraussetzung ist, dass über die Fehlerstelle ein entsprechend hoher Strom fließen kann.

Im üblichen Sprachgebrauch wird unter Erdschlussortung die Identifikation des erdschlussbehafteten Abganges verstanden. Man muss jedoch zwischen der eindeutigen Identifikation des fehlerhaften Abganges und der genauen Lokalisierung des Fehlerortes unterscheiden.

Bei der eindeutigen Identifikation des erdschlussbehafteten Abganges betrachtet man den ganzen Abgang als Schutzobjekt.

Wird aber nur ein Leitungsabschnitt als Schutzobjekt betrachtet, müssen andere Schutzprinzipien verwendet werden wie z. B.:

- Leitungsdifferenzialschutz
- Distanzschutz bei niederohmiger Sternpunktbehandlung
- Abschätzung der Fehlerentfernung durch zweiseitige Messung
- Abschätzung der Fehlerentfernung durch einseitige Messung
- Erzeugen von kurzen Hochstromimpulsen zum Ansprechen von Kurzschlussanzeigern (KNOSPE, KNOPE)

3.1 Allgemein

Das folgende Bild 3-1 zeigt eine kurze Übersicht der üblichen Verfahren in isolierten und gelöschten Netzen [53].

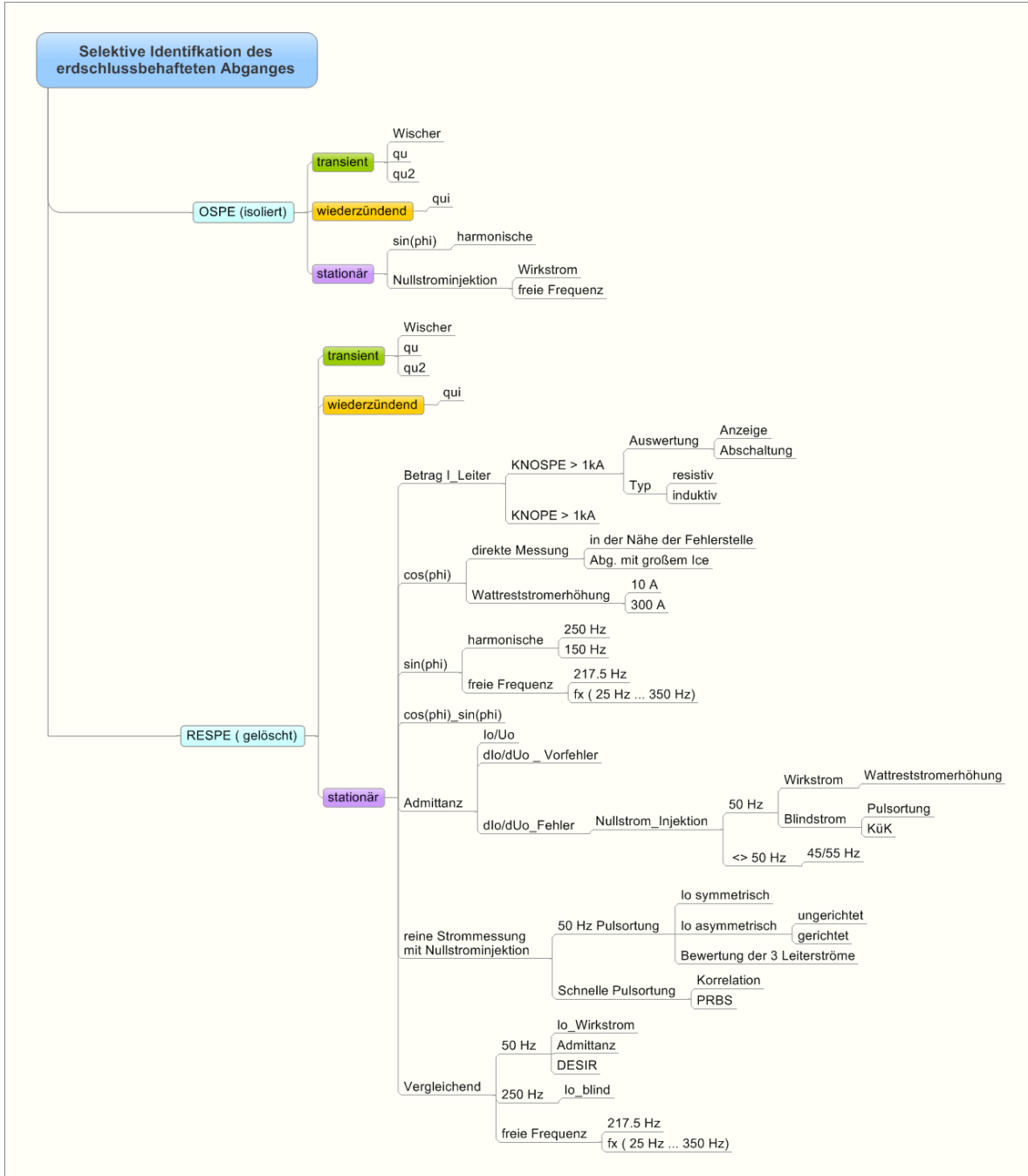


Bild 3-1: Erdschlusssortungsverfahren in gelöschten und isolierten Netzen

Zusätzlich gibt es natürlich noch die traditionelle "Dunkel-Hell-Methode", die nur die U_0 -Spannungsmessung an der Sammelschiene benötigt. Bei dieser Methode werden die einzelnen Abgänge der Sammelschiene abgeschaltet, bis das Netz erdschlussfrei ist.

Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren etwas ausführlicher behandelt. Die Beschreibung erfolgt wieder anhand des Netzes nach Bild 2-5 mit den drei Abgängen A, B und C.

3.2 Transiente Verfahren

Bei transienten Verfahren ist die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Erdschlussrichtungsanzeige sehr hoch.

In Kabelnetzen hat man meist relativ niederohmige Verhältnisse beim Erdschlusseintritt. Es werden dadurch fast alle Erdschlüsse richtig erkannt.

In Freileitungsnetzen werden die meisten Fehler durch atmosphärische Störungen und deren Folgewirkungen verursacht. Dabei ist zu beachten, dass wenn der Erdschluss z. B. im Winter durch einen sehr trockenen Ast mit einer Impedanz von $20\text{ k}\Omega \dots 200\text{ k}\Omega$ verursacht wird, keine schnelle vollständige Entladung des fehlerhaften Leiters im μs Bereich erfolgt. Auch die Aufladung der beiden gesunden Leiter benötigt mehrere Perioden. Ein transienter Vorgang ist dann schwer zu erkennen und die üblichen transienten Verfahren versagen hier.

Transiente Verfahren haben auch den Nachteil, dass sie nur bei Erdschlusseintritt eine Auswertung durchführen können und dass diese nicht wiederholt werden kann.

Etwas anders sieht es beim wiederzündenden und intermittierenden Erdschluss aus.

Es ist zu beachten, dass die transienten Verfahren nicht mit den üblichen komplexen Zeigern beschrieben werden können. Hingegen ist eine transiente Beschreibung unter Verwendung von Raumzeigern möglich [111][112][113][114]. Unter Anwendung dieser Theorie können neue Verfahren für die Ortung entwickelt werden.

Im Folgenden werden einige Verfahren zur Auswertung des transienten Vorganges vorgestellt.

3.2.1 Auswertung von Wanderwellen

Diese Verfahren haben sich bis heute im Mittelspannungsbereich als Betriebsmessung nicht durchgesetzt, da sie einerseits eine sehr hohe Zeitauflösung im μs -Bereich voraussetzen und andererseits die Transferkennlinie der heute üblichen Strom- und Spannungswandler meist auf wenige kHz beschränkt ist [120][18].

Darüber hinaus treten bei jedem Übergang von Kabel \Leftrightarrow Freileitung bzw. an jeder Verzweigungsstelle Reflexionen auf. Bei üblichen Mittelspannungs-Netzen ist dies sehr häufig, sodass eine Erdschlussortung während des Betriebes mit diesem Verfahren sehr schwierig ist.

Leicht abgewandelt kommt die Auswertung von Wanderwellen jedoch für die genaue Nachortung zur Anwendung. Für diese Messung wird dann allerdings nur mehr ein freigeschaltetes Segment verwendet.

3.2.2 Standard-Wischerverfahren

Beim Erdschlusswischerverfahren wird der Aufladevorgang der beiden gesunden Leiter ausgewertet.

Das Standard-Wischerverfahren beruht darauf, dass nach der Überschreitung des Schwellwertes der Nullspannung für ca. $100\text{ }\mu\text{s}$ ein Beobachtungsfenster geöffnet wird und die zur Nullspannung zugehörigen Nullströme bewertet werden.

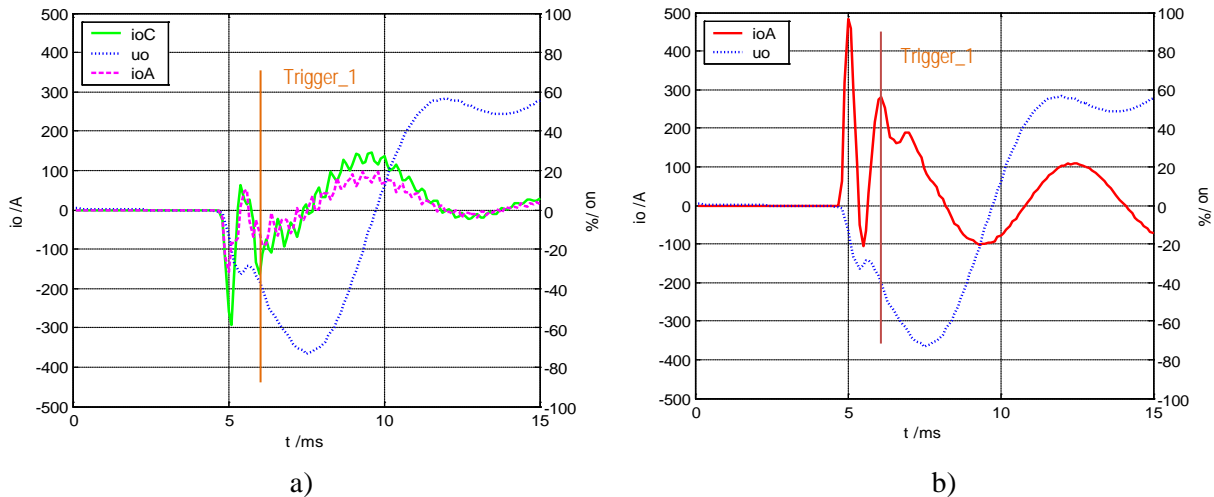


Bild 3-2: Transienter Vorgang:

- a) gesunde Abgänge B und C
- b) erdschlussbehafteter Abgang A

Im Bild 3-2 wurde angenommen, dass die Erdschluss-Schwelle bei 40 % liegt. Zu diesem Zeitpunkt wird das Beobachtungsfenster für den Strom geöffnet. Aus dem Bild 3-2 ist erkennbar, dass im fehlerhaften Abgang die Nullspannung und der Nullstrom während des Beobachtungsfensters entgegengesetzte Polarität haben. In den gesunden Abgängen haben hingegen die Nullspannung und die zugehörigen Nullströme die gleiche Polarität.

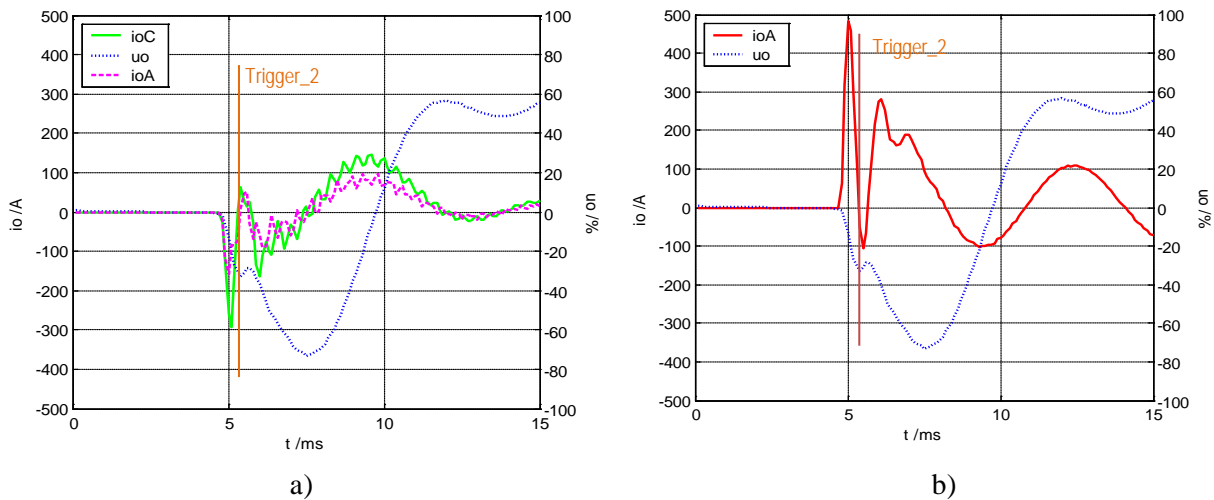


Bild 3-3: Transienter Vorgang:

- a) gesunde Abgänge B und C
- b) erdschlussbehafteter Abgang A

In Bild 3-3 wird gezeigt, dass durch die Einschwingvorgänge bei diesem Verfahren durchaus Fehlanzeigen entstehen können, wenn z. B. die Anregeschwelle auf 30 % eingestellt ist. Allgemein gilt, dass wenn der Schwellwert der Anregung so eingestellt wird, dass das Fenster für die Bewertung der Polarität des Nullstromes gerade in jenem Zeitpunkt geöffnet wird, in dem der Nullstrom des fehlerhaften Abganges durch Null geht, so wird durch das Relais keine oder eine falsche Richtung signalisiert.

Wie oben gezeigt wurde, sind die Ströme aber vom Einbauort der Relais abhängig. Dadurch kann es passieren, dass nur ein paar Relais die falsche Richtung anzeigen und der Rest die richtige Richtung.

Das Standard-Wischerverfahren funktioniert nur, wenn der Aufladevorgang kräftig ist. Bei üblichen Netzen bedeutet dies, dass der Übergangswiderstand an der Fehlerstelle kleiner 50Ω sein muss [170][171].

Vorteile:

- Auf Winkelfehler zwischen u_0 und i_0 nicht empfindlich
- Die Holmgreen-Schaltung ist normalerweise zur Erfassung von i_0 verwendbar
- Üblicherweise existiert eine parametrierbare Anzeige für:
 - Kabelnetze: Jeder Erdschluss wird gemeldet
 - Freileitungen: Es werden nur Erdschlüsse gemeldet, die in einen Dauererdschluss übergehen

Nachteile:

- Nur für niederohmige Fehler mit $Z_F < 50 \Omega$ geeignet
- Es wird nur der transiente Vorgang ausgewertet. Das Verfahren ist nicht wiederholbar
- Für den Anwender ist ein Umdenken erforderlich:
 - Energieflussrichtung entspricht nicht der Richtung des Auflade-Vorganges
 - bzw.: Polaritätsentscheid entspricht nicht schutztechnischen Festlegungen
- Empfindlich auf große Kreisströme
- Durch die Bewertung des Stromes in einem kleinen Fenster kann ein falscher Richtungsentscheid entstehen
- Schwierige Ermittlung und Verifikation der Ansprechschwelle

3.2.3 Wischerverfahren mit dem qu-Algorithmus**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Erkennung der Richtung eines Erdschlusses" [8]. Die wesentlichen Aussagen des Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

3.2.3.1 Grundlegende Betrachtung

Dieses Verfahren macht sich zunutze, dass die gesunden Leiter des Netzes auf die verkettete Spannung aufgeladen werden [17][38][21].

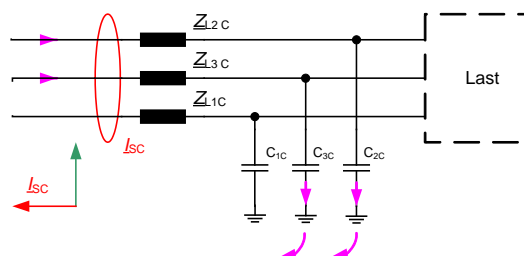


Bild 3-4: Gesunder Abgang

Der Verlauf der Nullspannung kann für diesen Abgang vereinfacht beschrieben werden durch die Gleichung (3.1):

** Vom Autor patentiertes Verfahren

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eqB}} \int_{t_0}^t i_{0B}(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

Aus diesem Modell ist erkennbar, dass sich erst eine Verlagerungsspannung aufbauen kann, wenn ein Strom auf die Leiter-Erde Kapazität geflossen ist. Die entstehende Spannung an der Kapazität ist dem Ladestrom um 90° nacheilend.

Andererseits entspricht das Integral des Stromes der aufgebrauchten Ladung q. In diesem Fall wird die Spannung u_0 proportional zur Ladung, unter der Annahme, dass $u_0(t_0) = 0$ ist.

Die heutigen digitalen Relais verfügen über genügend große Speicher, sodass man bei Überschreitung des Schwellwertes auch auf Daten aus der Vergangenheit zugreifen kann. Die geforderte Randbedingung $u_0(t_0) = 0$ kann somit gelöst werden. Auch eine Integration des Stromes über die Zeit ist leicht realisiert.

Wird nun in einem Diagramm die Ladung q über die Verlagerungsspannung aufgetragen, so entsteht eine Gerade. Die Steigung dieser Geraden entspricht laut Gleichung (3.1) dem Kehrwert der Leiter-Erde-Kapazität des gesunden Abganges. Das Verfahren wurde nach diesem Diagramm als qu-Verfahren benannt.

Durch die Umkehr des Stromes im fehlerhaften Abgang ist diese Modellbeschreibung nicht mehr richtig. Der fehlerhafte Abgang stellt im gelöschten Netz keine Gerade dar.

Das resultierende Diagramm ist im Bild 3-5 dargestellt.

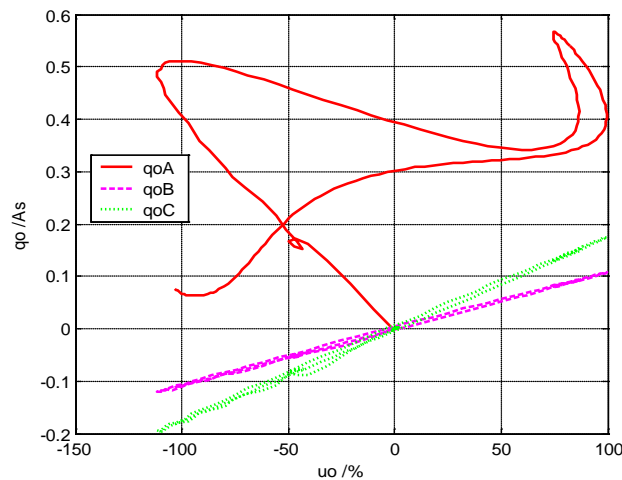


Bild 3-5: qu-Diagramm eines niederohmigen Fehlers

Durch die Auswertung der Vergangenheit sind bei diesem Verfahren Erdschlusswischer bis in den Bereich von einigen kΩ erkennbar.

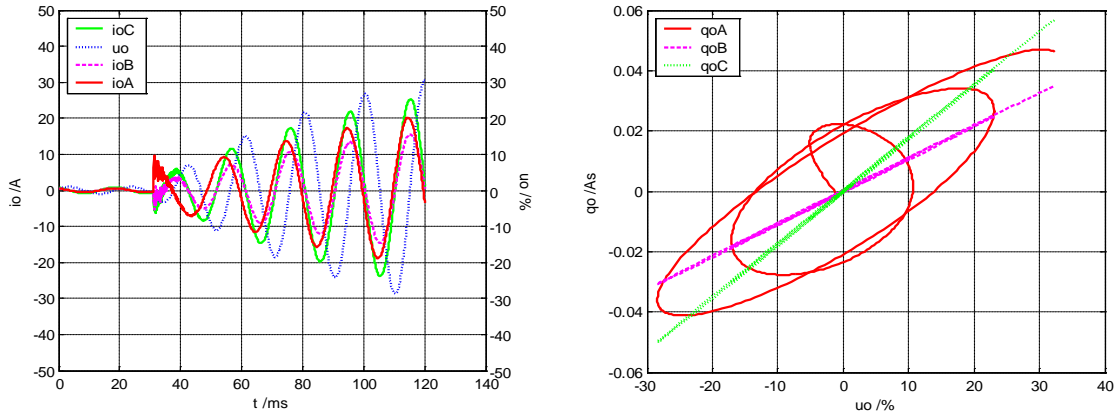


Bild 3-6: *qu*-Diagramm eines hochohmigen Fehlers

Dieses Verfahren erkennt auch eindeutig den fehlerhaften Abgang im Falle eines wiederzündenden Fehlers.

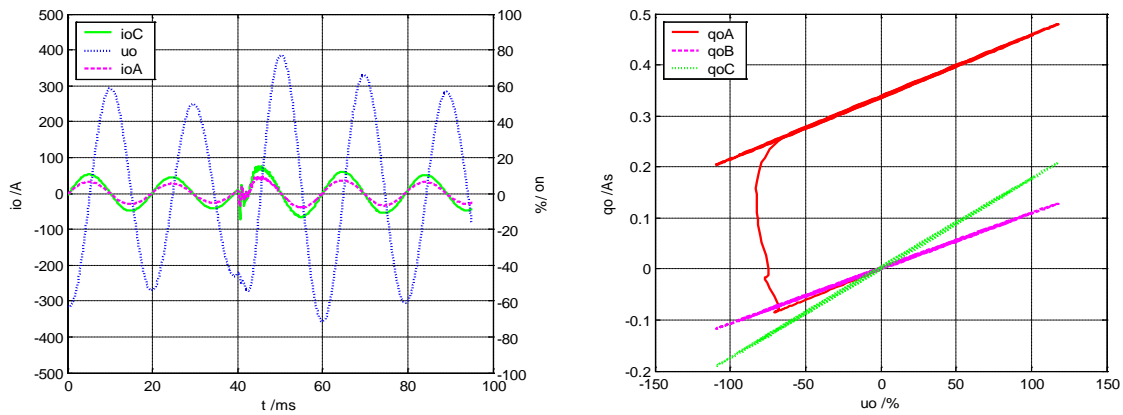


Bild 3-7: *qu*-Diagramm eines wiederzündenden Fehlers

Die meisten anderen Verfahren setzen stationäre Verhältnisse und eine Betriebsart im Stich voraus. Diese Randbedingungen sind für das *qu*-Verfahren nicht erforderlich.

3.2.3.2 Detailbetrachtung an Leitungsmodellen aus konzentrierten Elementen

Die folgenden Bilder zeigen den *qu*-Algorithmus, angewendet auf konzentrierte Bauelemente entsprechend der Ersatzschaltung in Bild 3-8.

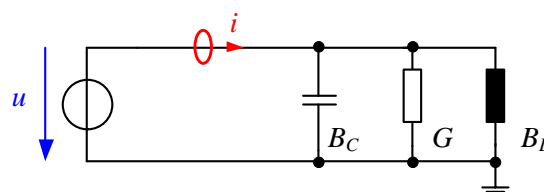


Bild 3-8: Vereinfachte Ersatzschaltung für die *qu*-Evaluierung

Es wird eine Spannungsquelle mit 100 V verwendet und der Strom der in eine RLC Kombination fließt gemessen. Aus dieser Messung wird unmittelbar der *qu*-Algorithmus ausgewertet. Im Zeitdiagramm sind die Spannungen blau und die Ströme rot dargestellt.

Darstellung im qu-Diagramm: Es wird in diesen Beispielen jeweils nur über 95% einer Periode integriert, um den Anfang und das Ende der Integration besser erkennbar zu machen. Der Beginn der Integration ist durch den blauen Kreis gekennzeichnet und das Ende der Integration durch die gefüllte Raute.

Um das Prinzip der Integration zu zeigen, wurden die Strom- und Spannungswerte vor dem Integrationsbeginn auf Null gesetzt.

Tabelle 1: qu-Algorithmus, wenn nur eine Komponente vorhanden ist

<p>R</p>		
<p>L</p>		
<p>C</p>		

Tabelle 2: qu-Algorithmus, wenn zwei Komponente vorhanden sind

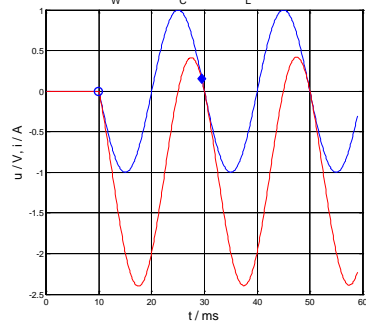
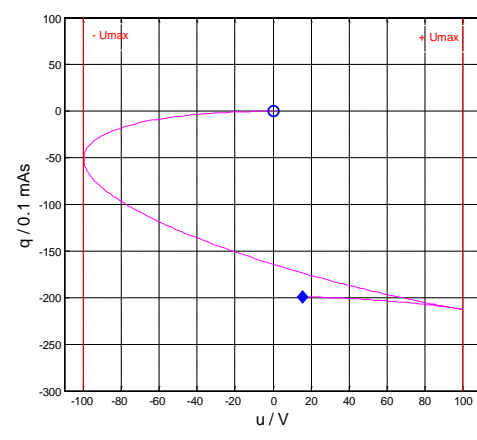
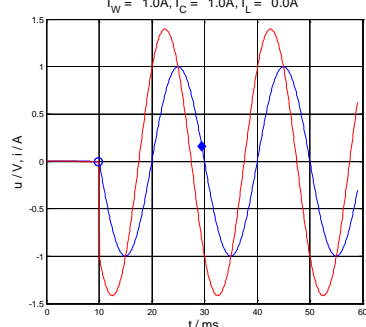
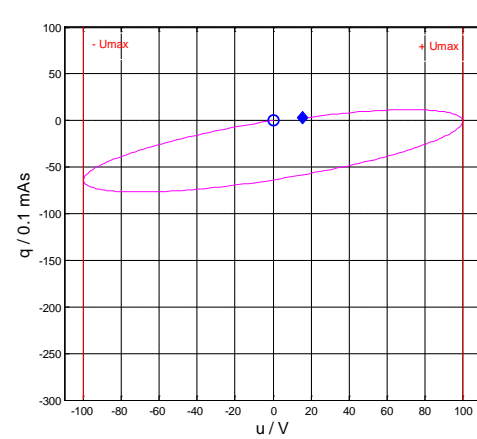
<p>RL</p>	<p>$I_W = 1.0A, I_C = 0.0A, I_L = 1.0A$</p> 	
<p>RC</p>	<p>$I_W = 1.0A, I_C = 1.0A, I_L = 0.0A$</p> 	

Tabelle 3: qu-Algorithmus, wenn drei Komponente vorhanden sind

<p>RLC, $I_C > I_L$</p> <p>Unterkompensiert</p>	<p>$I_W = 1.0A, I_C = 1.5A, I_L = 1.0A$</p>	
<p>RLC, $I_C = I_L$</p> <p>Abgestimmt</p>	<p>$I_W = 1.0A, I_C = 1.0A, I_L = 1.0A$</p>	
<p>RLC, $I_C < I_L$</p> <p>Überkompensiert</p>	<p>$I_W = 1.0A, I_C = 1.0A, I_L = 1.5A$</p>	

Erfolgt gleichzeitig ein Erdschluss, so gilt die Stromaufteilung weiterhin. Die Richtung von \underline{U}_0 ist aber abhängig davon, in welcher Phase der Erdschluss erfolgt. Im schlechtesten Fall ist dies in Richtung des scheinbaren Stromes. In diesem Fall wird der Kreisstrom voll als Wirkstrom bewertet. Dies bedeutet in unserem Beispiel: 16,6 A !!!

Eine Lösungsstrategie wäre es, die Informationen über den Schaltzustand des Netzes und alle notwendigen Nullströme der Abgänge dem Relais zuzuführen. Dies würde jedoch sehr hohen Aufwand sowohl an Rechnerleistung im Gerät als auch für die übergeordnete Leittechnik bedeuten.

Die alternative Lösungsstrategie beinhaltet nur geringe Vernachlässigungen, kommt aber alleine mit den am Gerät verfügbaren Messgrößen aus. Bei dieser Lösungsstrategie wird eine "Linearisierung um den Arbeitspunkt" und eine "adaptive Störunterdrückung" in den Eingangssignalen durchgeführt. Der eigentliche qu-Algorithmus wird dabei nicht verändert.

Der qu2-Algorithmus ist der qu-Algorithmus mit einer zusätzlichen Vorverarbeitung, bestehend aus der Linearisierung um den Arbeitspunkt mit einem nachfolgenden nichtlinearen Filter.

Mit diesem neuen Verfahren wird die richtige Erkennung sowohl in Ringen als auch in vermaschten Netzen wesentlich erhöht.

Als Beispiel werden Messungen aus dem stark vermaschten 110-kV-Netz der DB und ÖBB verwendet [126][20]. Dieses Netz wird mit 16,7 Hz betrieben, hat einen kapazitiven Strom I_{CE} von 1600 A und wird mit Hilfe von mehreren Petersen-Spulen kompensiert.



110 kV System
 D: 14.000 km
 A: 7.000 km
 => 1.600 A

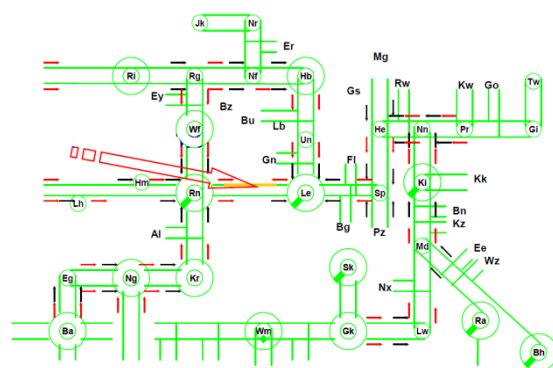
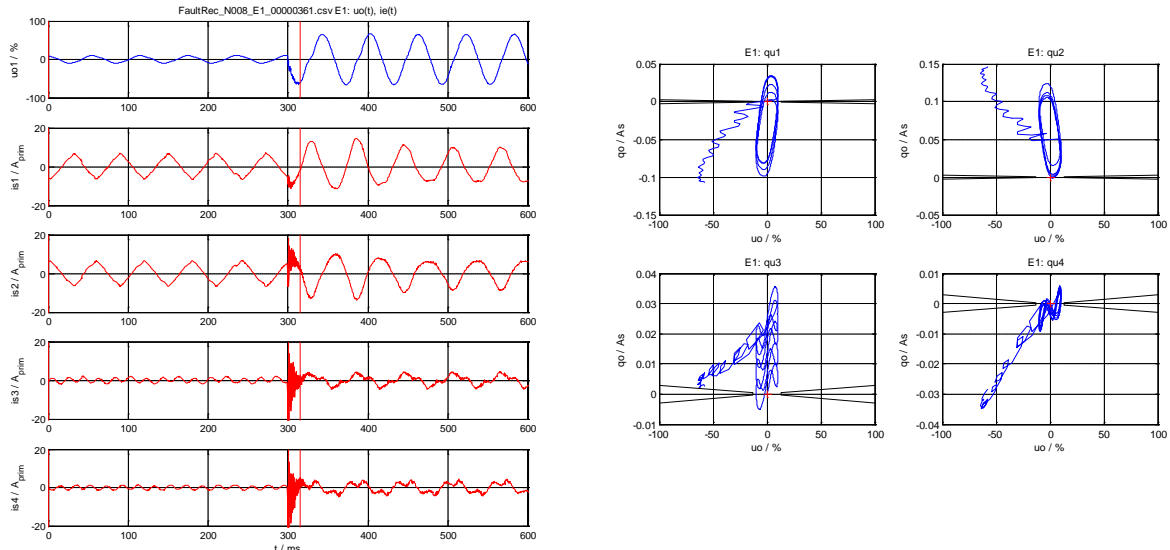


Bild 3-10: 110-kV-Netz der DB und ÖBB. Die Umspannwerke sind immer mit mindestens zwei parallelen Leitungen verbunden

In Bild 3-11a) und Bild 3-12 ist im ersten Kanal des Störschriebes die Nullspannung u_0 im Umspannwerk dargestellt. Die beiden nächsten Kanäle sind die Summenströme von zwei parallelen Leitungen.

Die Werte sind infolge des Phasensplittings bereits im gesunden Betrieb sehr groß. Bei genauer Betrachtung ist erkennbar, dass die Ströme im Wesentlichen entgegengesetzt sind. Diese Ströme inkludieren auch den tatsächlichen aber wesentlich kleineren Nullstrom, der durch die natürliche Nullspannung verursacht wird. Die beiden letzten Kanäle sind zwei parallele Leitungen zu einer Station am Rande des Netzes mit geringer Last und geringen Kreisströmen.



a) u_0 und i_0 der vier Abgänge

b) qu -Diagramm der vier Abgänge

Bild 3-11: a) Nullspannung und Nullströme von vier Abgängen mit Phasensplitting im Abgang 1 und Abgang 2

b) Standard qu -Diagramm der vier Abgänge; keine richtige Abgangserkennung möglich

Bild 3-11 a) zeigt, dass sich die Nullströme in den Abgängen 1 und 2 durch den Erdschluss kaum ändern.

Bild 3-11 b) zeigt die zugehörige Auswertung nach dem Standard- qu -Verfahren. Wenn man die Bilder mit dem qu -Verfahren in Bild 3-5 und Bild 3-6 vergleicht, ist hier keine eindeutige Identifizierung des fehlerhaften Abganges möglich.

Die Ellipsen in den Abgängen E1:qu1 und E1:qu2 entstehen durch den Kreisstrom. Es gibt sehr viele Möglichkeiten eine Ausgleichsgerade hineinzulegen. Die entstehende Ausgleichsgerade hängt außerdem sehr stark vom gewählten Zeitsegment ab. Eine eindeutige Aussage ist hier nicht mehr möglich.

Lösungsstrategien zur Kompensation von Kreisströmen wurde bereits im vorherigen Kapitel kurz angesprochen. Technisch am leichtesten lässt sich die folgenden Vorgangsweise realisieren, wenn angenommen wird, dass sich der Kreisstrom während der Vorgeschichte bis zum ersten Spannungsmaximum nach dem Triggerzeitpunkt nicht wesentlich ändert, das heißt die Lastverhältnisse in etwa konstant bleiben.

Das qu_2 -Verfahren verwendet die Daten der ersten Periode des aufgezeichneten Null-Stromes und erzeugt daraus ein neues Signal durch mehrmaliges Aneinanderreihen dieser Periode. Bei der nachfolgenden Subtraktion des Signals von den Originalmesswerten wird in der ersten Periode der Null-Strom vollständig ausgelöscht. Unter der Annahme, dass der Laststrom sich während des Beobachtungszeitraumes nicht verändert, wird der Strom auch in den folgenden Perioden inklusive dem Ober-

schwingungsanteil kompensiert. Übrig bleibt, wie in Bild 3-12 zu sehen ist, der Aufladestrom der beiden gesunden Leiter. Der wesentliche Vorteil dieses qu2-Algorithmus ist, dass automatisch auch für die Oberschwingungen und Zwischenharmonischen eine Kompensation erfolgt. In der Systemtheorie entspricht dieses Verfahren einer Linearisierung um den Arbeitspunkt, denn es werden nur die Abweichungen von einem Grundstrom, in diesem Fall dem Kreisstrom, betrachtet.

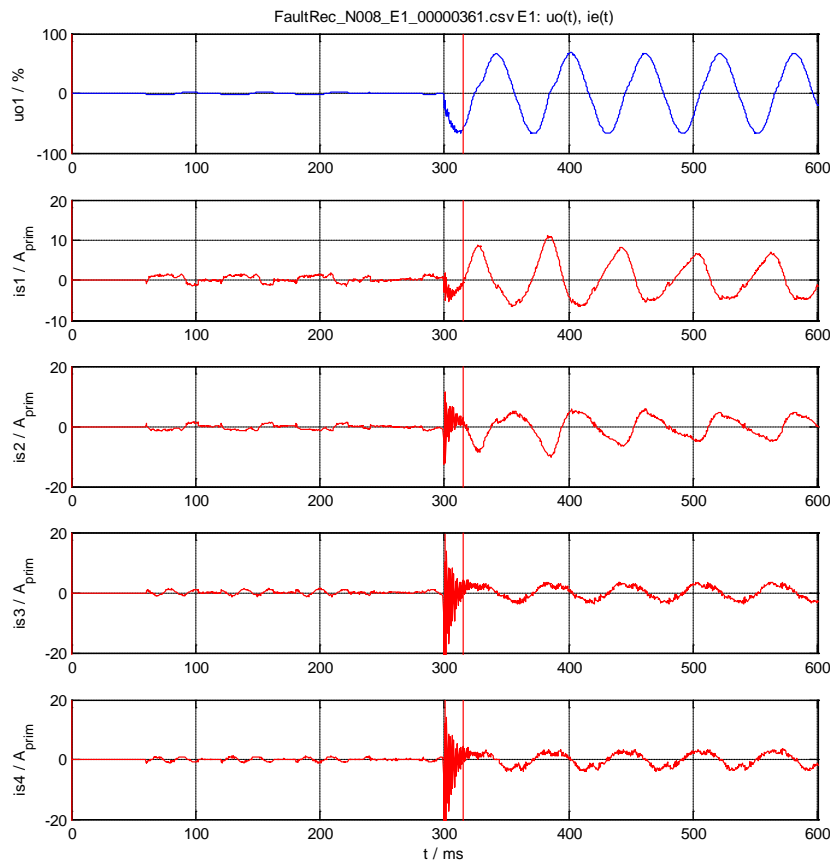


Bild 3-12: Nullspannung und Nullströme nach der Linearisierung um den Arbeitspunkt führen zu starker Reduktion des Phasensplittings

Wie aus Bild 3-12 zu erkennen ist, erfolgt eine vollständige Auslöschung nur in der ersten Periode. In den anderen Perioden ist durch kleine Laständerungen die Differenz nicht mehr exakt Null.

Eine weitere Verbesserung kann erreicht werden, indem kleine Ströme, abhängig von den zu erwartenden maximalen Strömen im Beobachtungszeitraum, durch ein nichtlineares adaptives Filter vollkommen unterdrückt werden. Durch dieses nichtlineare Filter wird das "Rauschen" der ersten Perioden vollständig unterdrückt, wie aus Bild 3-13 zu erkennen ist. Dies eliminiert in den ersten Perioden auch das Übersprechen vom Laststrom auf das Nullsystem, verursacht durch kleinere Änderungen des Laststromes.

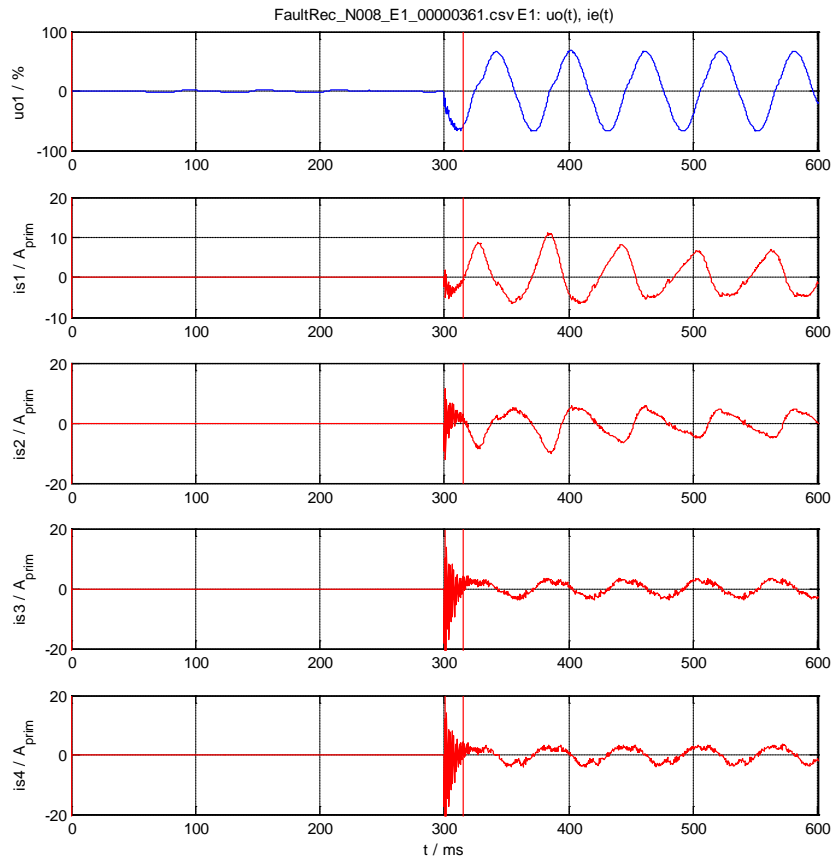


Bild 3-13: Nullspannung und Nullstrom nach der adaptiven nichtlinearen Filterung

Bild 3-14 zeigt nun das Ergebnis des qu-Algorithmus, angewendet auf die linearisierten und gefilterten Signale. Nun ist eine eindeutige Identifizierung des fehlerhaften Abganges möglich.

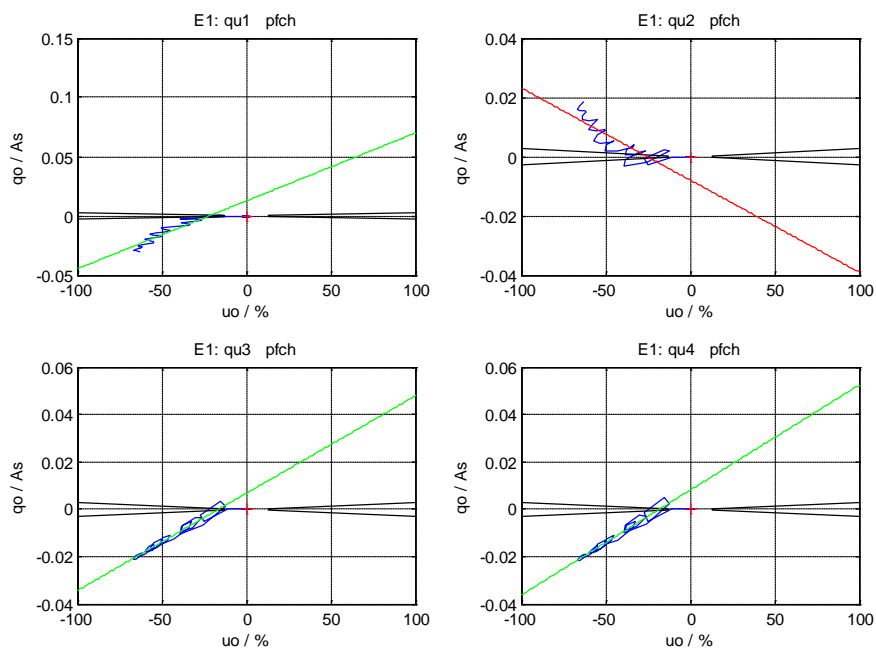


Bild 3-14: qu-Diagramm mit richtiger Identifikation des erdschlussbehafteten Abganges

Grüne Ausgleichsgeraden: gesunder Abgang
 Rote Ausgleichsgerade: erdschlussbehafteter Abgang

Vorteile:

- Funktioniert auch bei parallelen Leitungen und vermaschten Netzen durch
 - Kompensation des Phasensplittings
 - Linearisierung um den Arbeitspunkt
 - Adaptive nichtlineare Filterung
- Hochohmige Fehler bis in den Bereich von einigen kΩ erkennbar
- Durch die integrale Bewertung des Algorithmus ist die Beeinflussung durch hochfrequente Störungen stark reduziert
- Leichte Ermittlung und Verifikation der Ansprechschwellen [27]
- Auf Winkelfehler zwischen u_0 und i_0 nicht empfindlich
- Die Holmgreen-Schaltung ist normalerweise zur Erfassung von i_0 verwendbar
- Üblicherweise existiert eine parametrierbare Anzeige für:
 - Kabelnetze: Jeder Erdschluss wird gemeldet
 - Freileitungen: Es werden nur Erdschlüsse gemeldet, die in einen Dauererdschluss übergehen

Nachteile:

- Es wird nur der transiente Vorgang ausgewertet. Das Verfahren ist nicht wiederholbar
- Für den Anwender ist ein Umdenken erforderlich:
 - Energieflussrichtung entspricht nicht der Richtung des Auflade-Vorganges.

3.2.5 Gerichtete Erkennung des wiederzündenden Fehlers mit dem qui-Algorithmus**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Erkennung der Richtung eines Erdschlusses" [9]. Die wesentlichen Aussagen des Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Bei diesem Verfahren wird der transiente Vorgang bei der Wiederzündung ausgewertet.

Das Verfahren beruht auf dem qu-Verfahren. Beim qui-Verfahren (qu-intermittierend) wird der qu-Algorithmus mit modifizierten Parametern und Auslöseschwellen während des wiederzündenden Fehlers kontinuierlich angewendet. Das Verfahren ist natürlich auch im isolierten Netz anwendbar.

Erfolgt in einem Kabel ein Überschlag, wie bereits oben beschrieben, so bildet sich ein "Luftkanal" aus, der nun nicht mehr die erforderliche Isolationsfestigkeit besitzt. Im gelöschten Netz verlischt der Lichtbogen auch in diesem "Luftkanal". Sobald jedoch die wiederkehrende Spannung einen Schwellwert von 2 kV bis 6 kV überschreitet, erfolgt eine Wiederzündung. Die Spannung bricht wieder zusammen. Dieser Vorgang wiederholt sich entweder bis zum satten Erdschluss, Kurzschluss oder bis zur Abschaltung des fehlerhaften Segmentes.

Wesentlich ist, dass die Verlagerungsspannung entsprechend Bild 3-15 nicht mehr die Auslöseschwelle, z. B. 30 %, unterschreitet, der Hub der Verlagerungsspannung durch die Zündung nur einen Bruchteil der maximalen Verlagerungsspannung ausmacht und dass der Zündstrom vom aktuellen Wert der fehlerhaften Leiterspannung abhängt [25].

** Vom Autor patentiertes Verfahren

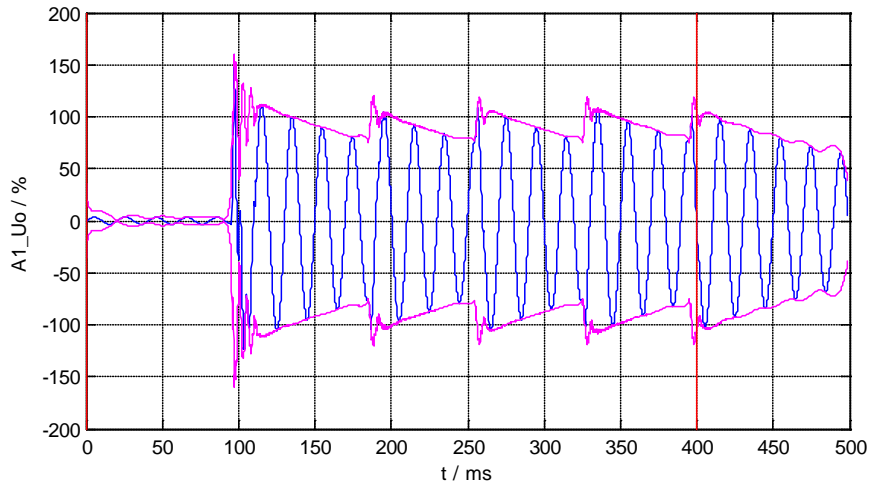


Bild 3-15: Spannungsverlauf und Einhüllende der Verlagerungsspannung u_{NE} nach Bild 2-17

Die Einhüllende der Verlagerungsspannung, kann wie bereits oben erwähnt, sehr einfach mit Hilfe eines Hilbert-Transformators berechnet werden. Mit dieser Variante gelingt es auch, mit relativ hoher Empfindlichkeit Wiederzündungen zu erkennen. Als neuer Parameter wird hierzu die mindestens notwendige Anhebung der Einhüllenden der Verlagerungsspannung definiert.

Wird eine Zündung erkannt, so wird für die nähere Umgebung um diesen Zündimpuls der qu2-Algorithmus, wie bereits oben beschrieben, angewendet.

Zusätzlich erfolgt eine Mittelwertbildung aller Vorwärts- und Rückwärts-Richtungsentscheide über einen parametrierbaren Zeitraum. Das Ergebnis der Mittelwertbildung wird signalisiert.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass eine korrekte Richtungsanzeige des wiederzündenden Erdschlusses erfolgt, auch wenn es während des wiederzündenden Erdschlusses zu Netzumschaltungen kommt. Die Erdschlussanzeige ist fehlerbegleitend.

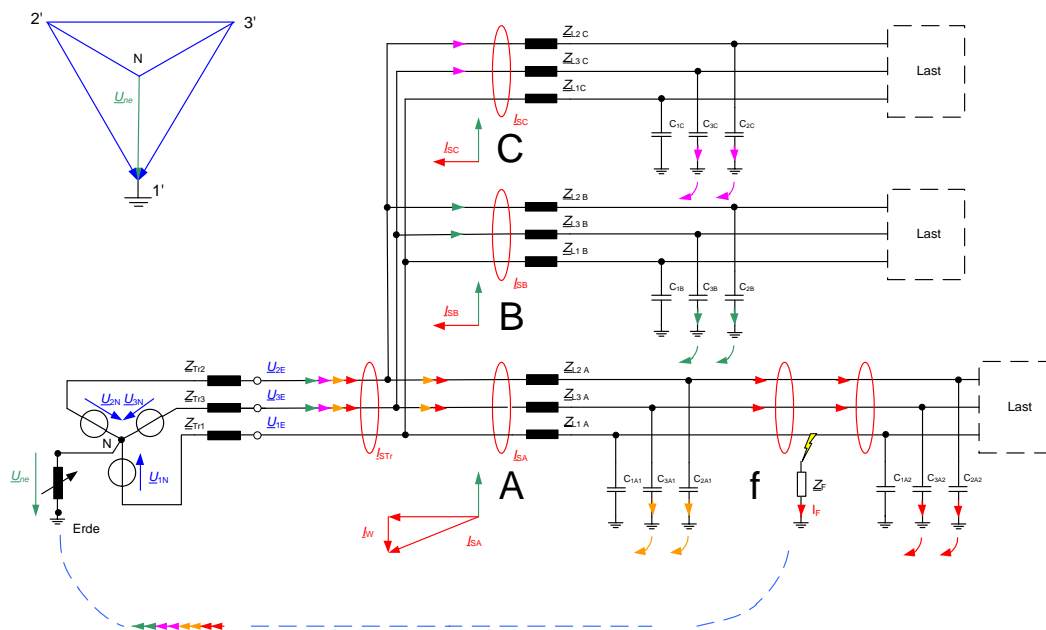


Bild 3-16: Untersuchtes gelöschtes Netz

Im folgenden Beispiel wird gezeigt, dass während des wiederzündenden Fehlers die Anzeige des stationären Verfahrens $\cos(\varphi)$ (Wirkleistungsrichtung) rein zufällig ist [25]

Die folgenden Diagramme zeigen einen wiederzündenden Fehler eines auf Resonanz abgestimmten Kabelnetzes nach Bild 3-16 mit den folgenden Daten:

Resonanzpunkt $I_{CEres} = 90 \text{ A}$

Wirkstrom $I_w = 2,5 \text{ A}$

3 Abgänge A,B,C

Erdschluss im Abgang A im Leiter L1

Die Messung erfolgt an der Fehlerstelle (f), im Umspannwerk am Abgang A (A) und Abgang B (B). Die Scheitelwerte der Spannungen wurden auf 100 % normiert.

Aus Bild 3-17 ist erkennbar, dass die Leiter-Erde Spannung des fehlerhaften Leiters L1 nicht null bleibt, sondern langsam ansteigt, bis die Zündspannung überschritten ist. Bei Zündung geht die Spannung kurzfristig wieder auf Null, bis der Strom über die Fehlerstelle bei seinem Nulldurchgang unterbrochen wird. Eine Wiederzündung erfolgt erst, wenn die Zündspannung U_z überschritten wird, dies liegt im Bereich von 2 kV bis 6 kV in einem 20-kV-Kabelnetz.

Ein zusätzliches Problem ergibt sich in der Praxis dadurch, dass über die Leittechnik nur ein 200-ms-Mittelwert der Messwerte, z. B. der Leiter-Erde Spannung bzw. der Nullspannung, übertragen wird. Als Folge wird in der Warte dieser Erdschluss nur als hochohmiger Fehler interpretiert, bei dem die Leiter-Erde-Spannung der fehlerhaften Phase nicht ganz auf Null geht und die Nullspannung nicht ganz 100 % erreicht. Auch die Leiter-Erde-Spannungen der beiden gesunden Leiter erreichen nicht die volle verkettete Spannung.

Dadurch wird mit der Fehlersuche im Freileitungsteil des Netzes begonnen, obwohl der Fehler im Bereich eines Kabels liegt. Erschwerend kommt hinzu, dass stationäre Verfahren während des intermittierenden Erdschlusses die Richtung nicht richtig anzeigen, wie auf den folgenden Seiten gezeigt wird.

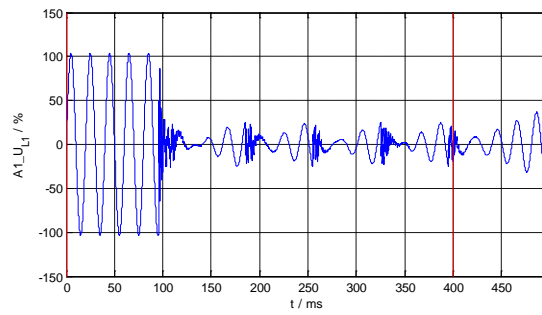


Bild 3-17: Spannung u_{L1}

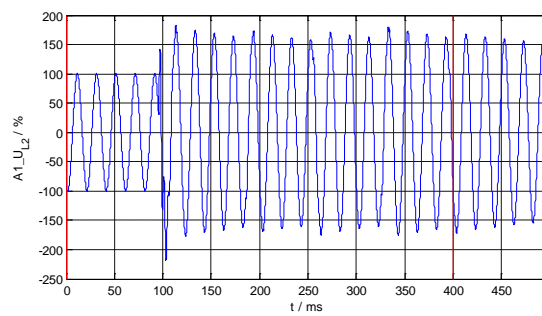


Bild 3-18: Spannung u_{L2}

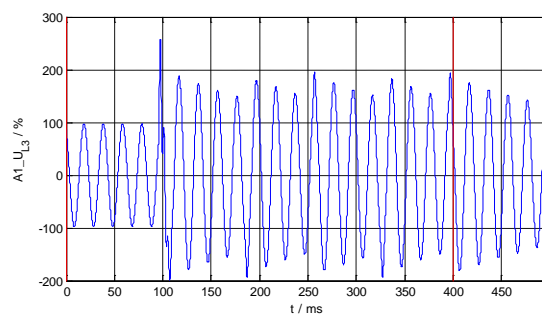


Bild 3-19: Spannung u_{L3}

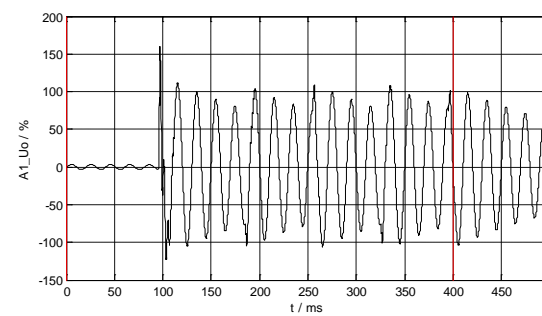


Bild 3-20: Spannung u_o

Die folgenden Diagramme zeigen die Ströme an der Fehlerstelle und im Abgang A bzw. B.:

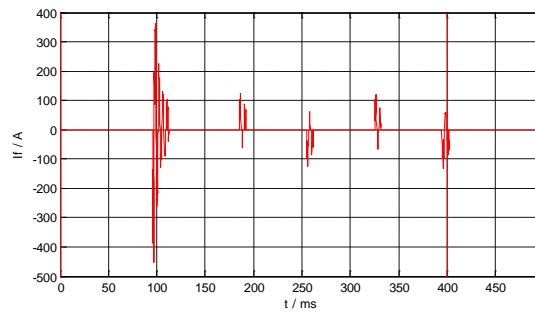


Bild 3-21: Strom über die Fehlerstelle i_F

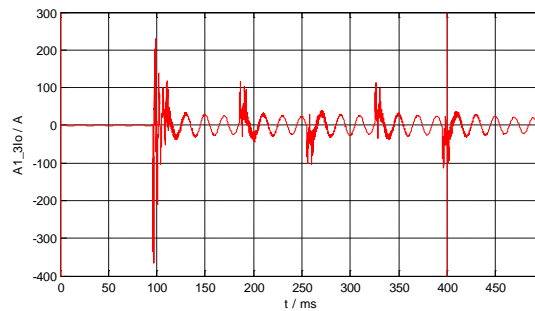


Bild 3-22: Strom im UW am fehlerbehafteten Abgang A: i_A

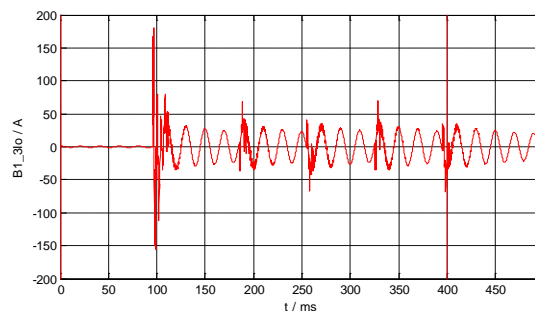


Bild 3-23: Strom im UW am gesunden Abgang B: i_B

Aus Bild 3-21 ist erkennbar, dass die Richtung des Zündstromes davon abhängt, wann die zugehörige Zündspannung überschritten wird. Aus den Bildern für i_A und i_B ist erkennbar, dass sich diese Zündströme den kapazitiven Strömen überlagern. Zwischen den Zündzeitpunkten ist das Netz „gesund“ und die Nullspannung sowie die zugehörigen Nullströme werden kleiner. Das Ausklingen wird durch die Verluste im Nullsystem und durch die gewählte Resonanzabstimmung des Netzes bestimmt. Dabei ist die Frequenz des Abklingvorganges von der eingestellten Verstimmung, also von der Resonanzfrequenz des nun abgekoppelten Systems abhängig und ist üblicherweise ungleich 50 Hz.

Bild 3-24 und Bild 3-25 zeigen die Hüllkurven für die fehlerbehaftete Leiterspannung und für die Nullspannung.

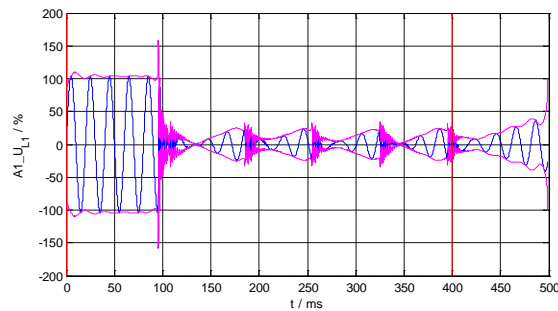


Bild 3-24: Hüllkurve von u_{L1}

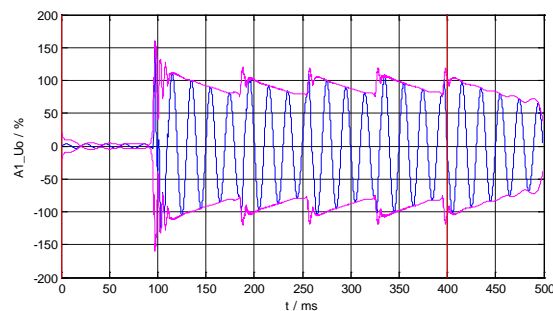


Bild 3-25: Hüllkurve der Nullspannung u_0

Hier ist erkennbar, dass die Nullspannung nicht mehr die eingestellte Erdschluss-Schwelle unterschreitet.

Andererseits ist auch erkennbar, dass hier keine Spannungsüberhöhungen auftreten, wie sie vom intermittierenden Fehler im isolierten Freileitungsnetz bekannt sind. Eine Überspannung bis zum Faktor 3.5 kann hier nicht auftreten.

Die wattmetrischen Ortungsverfahren beruhen üblicherweise auf einer Transformation (DFT bzw. FFT), um einerseits den DC-Anteil zu entfernen und andererseits um nur den 50-Hz-Grundschwingungsanteil zu bewerten. Diese Transformationen sind für stationäre Vorgänge definiert und dürften hier eigentlich nicht angewendet werden.

In den folgenden Auswertungen wurde eine gleitende DFT über jeweils 20 ms durchgeführt.

Die folgenden Bilder, Bild 3-26 bis Bild 3-28, zeigen den auf U_0 projizierten Nullstrom I_{0x} an den unterschiedlichen Messstellen für das obige Netz, aber nun mit 10 A überkompensiert.

Bei einem Netz mit einem Gesamt-Wirkreststrom von 2,5 A wird in der Praxis im Relais vermutlich der Schwellwert für den Wirkstrom auf ca. 1 A eingestellt werden. Aus den obigen Bildern ist erkennbar, dass bei einem Schwellwert von 1 A keine eindeutige Richtungsentscheidung möglich ist. Sowohl im erdschlussbehafteten Abgang als auch im gesunden Abgang wird der Schwellwert von 1 A wesentlich überschritten.

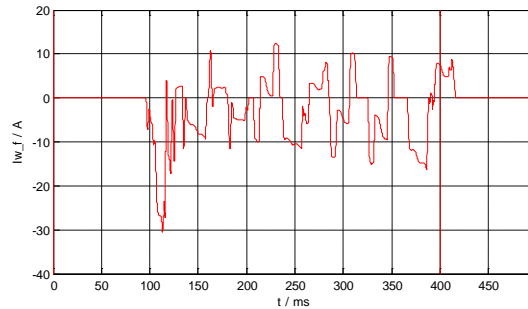


Bild 3-26: 50-Hz-Wirkstrom an der Fehlerstelle

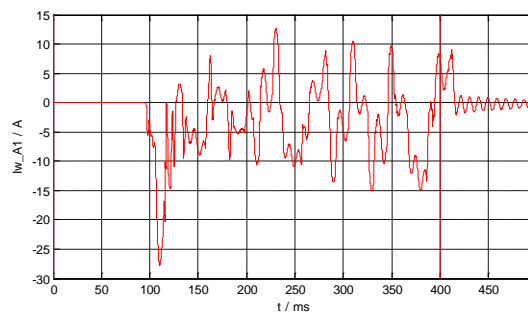


Bild 3-27: 50-Hz-Wirkstrom im UW im erdschlussbehafteten Abgang A

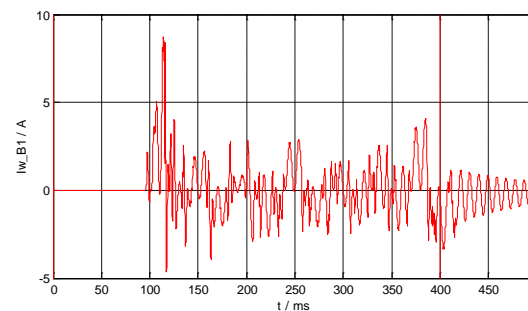


Bild 3-28: 50-Hz-Wirkstrom im UW im gesunden Abgang B

Vorteile:

- Das qui Verfahren ist das während des Erdschlusses kontinuierlich angewendete qu2-Verfahren
- Die Richtungs-Anzeige ist fehlerbegleitend, das heißt bei Fehlereingrenzung durch Verlagerung der Trennstelle wechselt auch die Richtungsanzeige, wenn die Fehlerstelle auf den zweiten Abgang wechselt
- Funktioniert auch im Ring bzw. bei vermaschten Netzen
- Liefert während des intermittierenden und wiederzündenden Erdschlusses eine korrekte Richtungsanzeige. Hingegen versagen während dieser Zeit alle üblichen stationären Verfahren

Nachteile:

- Ein Mindesthub der Verlagerungsspannung von ca. 5 bis 10 % ist erforderlich
- Aufwendiges Rechenverfahren

3.3 Stationäre Verfahren

Stationäre Verfahren werten den Nullstrom und die Nullspannung im eingeschwungenen Zustand des Erdschlusses aus.

Die stationären Ortungsverfahren beruhen üblicherweise auf einer Transformation (DFT bzw. FFT), um einerseits den DC-Anteil zu entfernen und andererseits um nur den 50-Hz-Grundschwingungsanteil oder den gewünschten Oberschwingungsanteil zu bewerten [79][76][80][121][189]. Diese Transformationen sind nur für stationäre Vorgänge definiert. Konventionelle Verfahren beruhen auf der direkten Berechnung der Grundschwingungs-Leistung.

3.3.1 Blindleistungsrichtung 50-Hz- oder $\sin(\varphi)$ -Verfahren

Im isolierten Netz sind die messbaren Ströme beim stationären Erdschluss, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, groß und relativ einfach messbar.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Anforderungen an die Winkelgenauigkeit der Strom- und Spannungswandler gering sind. Es wird nur ein 90° Entscheid getroffen. Ob ein Winkel von 80° oder 100° bewertet wird, spielt keine Rolle.

Die Begrenzung des erlaubten Stromes erfolgt im Wesentlichen durch die erlaubte Berührungsspannung an der Fehlerstelle. Wird die Berührungsspannung, wie bereits oben gezeigt wurde, überschritten, so kann das Netz zwar weiterhin isoliert betrieben werden, allerdings muss der fehlerhafte Abgang entsprechend der Kurve in Bild 2-13 in Schnellzeit abgeschaltet werden.

Bei kleinen Industrienetzen sind die Blindströme manchmal sehr klein und das Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem um Größenordnungen größer als der maximal erreichbare Blindstrom. In solchen Netzen ist das Blindleistungsverfahren nicht einsetzbar.

Vorteile:

- Reduzierte Anforderungen an die Winkeltreue zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 Messung
- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 nicht empfindlich

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird vorausgesetzt (50-Hz-Filter)
- Bei Netzen mit einem I_{CE} über ca. 30 A verlischt der Lichtbogen in 20-kV-Freileitungsnetzen nicht mehr
- Überschreitet die Berührungsspannung die erlaubten Grenzwerte, so ist in Schnellzeit der fehlerhafte Abgang abzuschalten
- Ein gesundes Restnetz ist für die gerichtete Erkennung erforderlich

3.3.2 Wirkleistungsrichtung oder $\cos(\varphi)$ -Verfahren

Durch Einführung der Erdschlusskompensation kann der Strom über die Fehlerstelle von einigen 100 A auf wenige A reduziert werden. Dadurch kann eine Versorgung der Kunden auch während des einpoligen Fehlers erfolgen. Eine Abschaltung ist nicht erforderlich, wenn die Berührungsspannung nicht überschritten wird. In Freileitungsnetzen wird durch die Erdschlusskompensation zusätzlich ein selbstständiges Verlöschen der meisten einpoligen Erdschlüsse erreicht, ohne dass ein automatischer Eingriff durch den Schutz oder ein manueller Eingriff durch das Personal notwendig wird.

Diese Vorteile werden aber mit einer erschwerten Ortungsmöglichkeit des fehlerhaften Abganges erkauft. Beim wattmetrischen Verfahren muss der relativ kleine Wirkstrom erfasst werden. Hierzu sind winkelgetreue Strom- und Spannungswandler erforderlich. In Kabelnetzen muss oft ein Wirkstrom von wenigen A aus einem Summenstrom im Bereich von 100 A erkannt werden. Durch die Winkelfehler der Strom- und Spannungswandler [66] [18] entstehen scheinbare Wirkströme, die zu einer Über- oder Unterfunktion der Relais führen. Die Ursachen werden in den folgenden Bildern veranschaulicht:

Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0

Beim $\cos(\varphi)$ -Verfahren wird der gemessene Nullstrom auf die Verlagerungsspannung projiziert, um den Wirkanteil zu berechnen. Die Richtung dieses Wirkstromes ist entscheidend für die Meldung des Erdschlusses in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung.

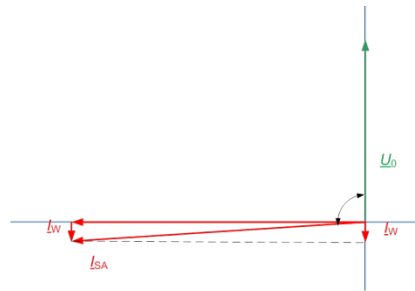


Bild 3-29: Ermittlung des Wirkanteiles I_W

Durch einen Winkelfehler bei der Messung von \underline{U}_0 kann es zu falschen Aussagen kommen. Im Beispiel nach Bild 3-30 wird aus dem fehlerhaften Abgang ein gesunder Abgang.

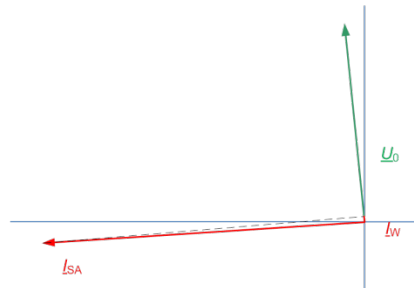


Bild 3-30: Wirkanteil I_W bei positivem Winkelfehler von U_0

Im Bild 3-31 wird der Wirkanteil noch verstärkt, bzw. wenn dieser Abgang ein gesunder Abgang ohne Wirkanteil gewesen wäre, würde dieser Abgang nun durch den scheinbaren Wirkanteil als erdschluss-behafteter Abgang gemeldet werden.

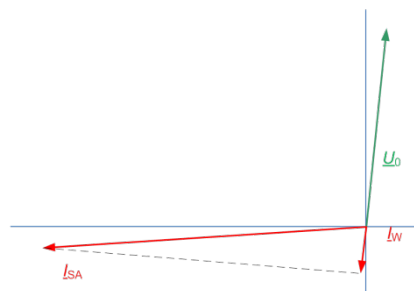


Bild 3-31: Wirkanteil I_W bei negativem Winkelfehler von U_0

Beim $\cos(\varphi)$ -Verfahren ist es daher wichtig, dass nicht nur der Winkel von \underline{I}_0 genau gemessen wird, sondern auch der Winkel von \underline{U}_0 . Es kommt auf die Genauigkeit des Winkels zwischen \underline{I}_0 und \underline{U}_0 an. Die Fehler in der Betragsmessung spielen eine untergeordnete Rolle.

Zur Veranschaulichung: In einem 50-Hz-Netz liegt der Wirkstrom der Grundschiwingung üblicherweise im Bereich von 2 % bis 3 % des I_{CE} . Bei einer Netzgröße von 100 A sind das 2 A bis 3 A, die erkannt werden müssen. Ein Winkelfehler von 1° entspricht einem Strom von 1,75 A und ein Winkelfehler von 2° (entspricht 120°) bereits einem Strom von 3,5 A.

Dies bedeutet, dass Abgänge mit einem großen kapazitiven Anteil bei stationären Fehlern durch den Winkelfehler von \underline{U}_0 zu Fehlanzeigen führen können.

Der Winkelfehler der Spannungswandler muss besonders beachtet werden, da in einigen Netzen die Spannungswandler zusätzlich mit einem Widerstand bebürdet sind, um für bestimmte Schaltzustände eine Ferroresonanz zu verhindern. Die Genauigkeit der Spannungswandler wird damit aber meist verschlechtert.

Die Wattreststromerhöhung wird weiter unten beschrieben.

Vorteile:

- Einfach realisierbar

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird vorausgesetzt
- Funktioniert durch das Phasensplitting nicht in Ringen
- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 sehr empfindlich
Es ist zu beachten, dass bei der Messung von \underline{U}_0 mit Hilfe der offenen Dreieckswicklung bzw. bei der Messung von \underline{I}_0 mit Hilfe der Holmgreen-Schaltung auch die Genauigkeit der Betragsmessung der einzelnen Wandler notwendig ist
- Zusätzliche Probleme bei hochohmigen Fehlern:
Es erfolgt eine Zunahme des Winkelfehlers
Durch die reduzierte Verlagerungsspannung wird auch der Wirkstrom verringert
- Dezentrale Petersen-Spulen und bei vermaschten Netzen:
Es erfolgt eine Aufteilung des Wirkstromes
Die Energieflussrichtung entspricht nicht immer der Fehlerrichtung

3.3.3 Oberschwingungsverfahren

Das Oberschwingungsverfahren wertet üblicherweise die 5. Oberschwingung der Nullspannung und des Nullstromes aus. Es werden auch bei diesem Verfahren stationäre Verhältnisse vorausgesetzt.

Bei Betrachtung der 5. Oberschwingung kann ein gelöschtes Netz vereinfacht als isoliertes Netz betrachtet werden. Die Petersen-Spule wird für die 5. Oberschwingung hochohmiger (ωL_p) und kann vernachlässigt werden. Die Leiter-Erd-Kapazitäten werden hingegen niederohmiger ($1/\omega C_E$), das heißt besser leitend; oder anders ausgedrückt: bei einer Verstimmung $v = 0$ bei 50 Hz ändert sich die Verstimmung bei 250 Hz auf $|v| = 96\%$.

Dadurch kann für die Erdschlussortung ein Blindleistungs-Richtungsrelais verwendet werden, wenn ein 250-Hz-Filter vorgeschaltet wird. Durch die Bewertung der Oberschwingung erhält man ähnliche Verhältnisse wie in einem isolierten Netz.

Nachteilig ist, dass die 250-Hz-Verlagerungsspannung nicht den Wert von 100 % hat, wie im isolierten und erdschlusskompensierten Netz. Sie hat einen (veränderlichen) Wert im %-Bereich. Entsprechend sind die Nullströme auch wesentlich kleiner und sie sind zusätzlich noch von der tageszeitlichen Lastschwankung abhängig. Die Filter müssen die 50-Hz-Komponenten gut unterdrücken.

Der Mindeststrom, der bei einem Erdschluss erreicht wird, kann aus dem Oberschwingungsgehalt der verketteten Spannung mit der folgenden Formel [35] bereits im gesunden Netz abgeschätzt werden.

$$I_{f_x} = I_{CE} \frac{f_{f_x}}{f_{50Hz}} \frac{U_{LL-f_x}}{100} \quad (3.2)$$

I_{CE} kapazitiver Nullstrom des Netzes bei 50 Hz

f_{f_x} Frequenz der Oberschwingung in Hz

U_{LL-f_x} Oberschwingungsspannung Leiter-Leiter in %

Die genaue Größe des Fehlerstromes ist schwierig abzuschätzen. Für genaue Berechnungen müssen bekannt sein:

- die Größe und der Ort der einspeisenden "Strom-Quellen"
- die Übertragungs- und Lastimpedanzen des Netzes als Funktion der Frequenz

In reinen Kabelnetzen und in reinen Freileitungsnetzen funktioniert das Verfahren relativ zuverlässig. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Strom- und Spannungswandler sind gering, da nur ein 90° Entscheid getroffen werden muss. Ob der Winkel letztendlich 80° oder 100° beträgt, spielt keine Rolle.

In gemischten Netzen treten aber größere Probleme durch Serienresonanzen auf.

Bild 3-32 zeigt die Relaisanzeigen in einem gelöschten Netz mit kurzen Abgängen.

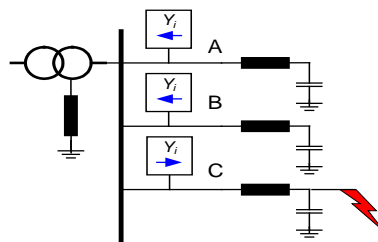


Bild 3-32: Oberschwingungsverfahren (OV)

Bisher wurden die Längsinduktivitäten der Leitungen vernachlässigt. Freileitungen haben im Vergleich zu Kabelleitungen eine relativ große Längsinduktivität. In Abgängen bestehend aus Freileitungen in Kombination mit nachfolgend großen Kabelstrecken (Bild 3-33) wird der Resonanzpunkt des Serienschwingkreises rasch überschritten und es erfolgt eine Stromumkehr an der Fehlerstelle.

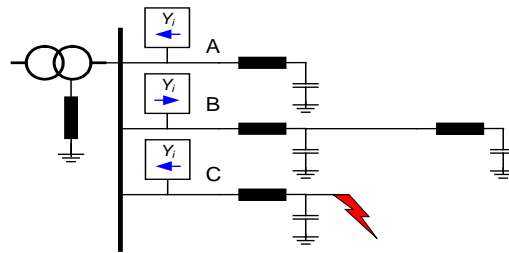


Bild 3-33: OV bei Überschreitung der Resonanzfrequenz

Im Bild 3-34 ist der Serien-Resonanzpunkt für die 5. Oberschwingung für ein 20-kV-Netz dargestellt. Vertikal ist die Länge der 20-kV-Freileitung und horizontal der zugehörige kapazitive Nullstrom I_{CE} aufgetragen. Solange man sich links der Kurve bewegt, funktioniert das Oberschwingungsverfahren.

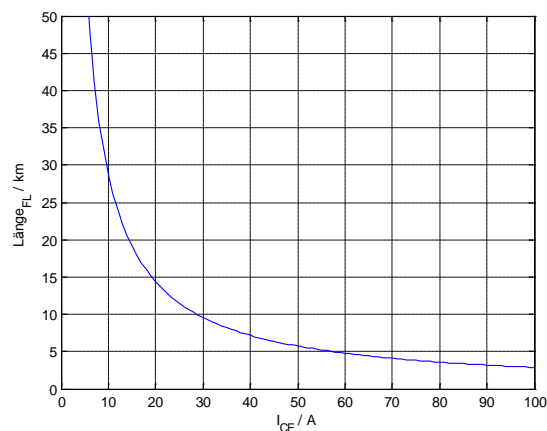


Bild 3-34: Resonanzfrequenz 250 Hz

Durch die Serien-Resonanzerscheinungen ergeben sich dadurch für das Oberschwingungsverfahren zusätzliche Einschränkungen der Verwendbarkeit. Ein Ausweichen auf höhere Frequenzen verschlechtert sogar die Anwendbarkeit.

Eine vergleichende Bewertung der Oberschwingungsströme ohne Messung der Verlagerungsspannung erfordert mindestens 3 Abgänge, wobei der kleinste Abgang mindestens 5 % des Netzes betragen muss. Außerdem müssen bei diesem Verfahren alle Abgänge überwacht werden, da sonst ein Erdschluss an der Sammelschiene zu einer Fehlanzeige führt.

Vorteile:

- Aus dem gelöschten Netz wird für die Ortung ein isoliertes Netz. Damit ergeben sich wesentlich reduzierte Anforderungen an die Winkeltreue zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0
- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 nicht empfindlich
- Einfaches, relativ robustes Verfahren

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird vorausgesetzt (50-Hz-Filter)
- Nicht geeignet bei Ringen:
Phasensplitting des Laststromes mit großen Oberschwingungsanteilen bewirkt eine Über- oder Unterfunktion. Ein Betrieb des fehlerhaften Abganges als Stichleitung ist für dieses Ortungsverfahren erforderlich

- Bei nicht exakt abgestimmten Holmgreen-Schaltungen erfolgt ein Übersprechen der normalerweise großen Oberschwingungen des Laststromes auf den Nullstrom und kann damit zu Über- oder Unterfunktionen der Anregung führen
- Oberschwingungsanteil in der verketteten Spannung muss vorhanden sein
- Ein gesundes Restnetz ist erforderlich
- Serien-Resonanzerscheinungen in gemischten Netzen → Eine detailliertere Überprüfung der Konfiguration ist erforderlich

3.3.4 Admittanz-Verfahren

Unter diesem Begriff werden mehrere Verfahren zusammengefasst, wie z. B.:

3.3.4.1 Verwendung der aktuellen 50-Hz-Messwerte

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_0} = G + jB$$

Bei der einfachsten Variante werden lediglich die stationär gemessenen Größen dividiert.

Bei diesem Verfahren wirken sich die Wandlerfehler sehr stark aus, besonders bei hochohmigen Fehlern. Im Prinzip entspricht dieses Verfahren dem üblichen Wirk- und Blindleistungs-Richtungs-Relais [199][136].

3.3.4.2 Verwendung von 50-Hz-Differenz-Messwerten zu unterschiedlichen Zeitpunkten

$$\Delta \underline{Y} = \frac{\Delta \underline{I}_0}{\Delta \underline{U}_0} = \Delta G + j\Delta B$$

Bei diesem Verfahren werden die Messfehler, verursacht durch die Summenbildung von drei großen Strömen und drei großen Spannungen, eliminiert. Allerdings erfolgen die Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und es wird vorausgesetzt, dass das Netz und das Übersprechen des Laststromes während der Messung konstant bleiben. Dies trifft aber sehr oft nicht zu.

Genau genommen erfolgt die erste Messung für die Differenzbildung vor dem Erdschluss und die zweite Messung während des Erdschlusses. Die Berechnung funktioniert daher nur, solange keine Änderung im Netz vorgenommen wird.

Beide Messungen während eines "satten" Erdschlusses durchzuführen liefert keine richtigen Ergebnisse, da die Verlagerungsspannung bei einem satten Erdschluss eingepreßt ist, wie weiter unten im Abschnitt "Regelung von E-Spulen" gezeigt wird.

3.3.4.3 Verwendung von Messwerten ungleich 50 Hz zum gleichen Zeitpunkt**

Im gesunden Netz wird diese Variante zur Berechnung der notwendigen Abstimmung verwendet. Details siehe weiter unten.

** Vom Autor patentiertes Verfahren

Im Erdschlussfall kann diese Messung sowohl zur Identifikation des fehlerhaften Abganges als auch zur Entfernungsabschätzung verwendet werden.

3.3.4.4 Admittanz-Verfahren zur hochohmigen Fehlererkennung: 50-Hz-Injektion**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Erkennung eines einpoligen Erdschlusses in einem Drehstromnetz" [2]. Die wesentlichen Aussagen des Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Die Messung erfolgt mit Hilfe einer 50-Hz-Strominjektion in das Nullsystem. Die Strominjektion kann z. B. durch Verstellen der Petersen-Spule, durch einen Frequenzumrichter oder durch eine andere Maßnahme erfolgen, durch die sich der Strom über die Fehlerstelle ändert.

Dieses Verfahren ermöglicht die Erkennung von sehr hochohmigen Erdschlüssen bis in den Bereich von 20 kΩ und höher [37].

Die Wirkungsweise dieses Verfahrens wird anhand der Ersatzschaltung in Bild 3-35 bzw. Bild 3-37 und Kapitel 2.7.4 erläutert.

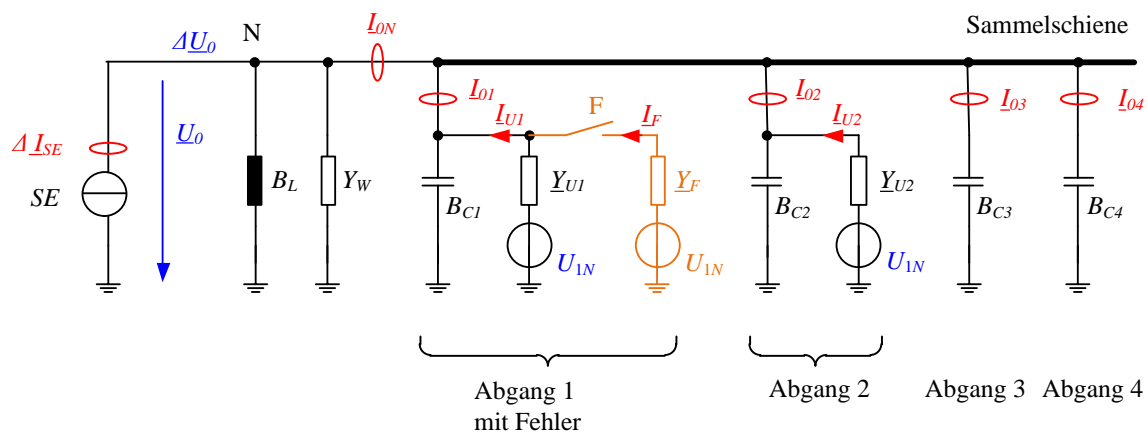


Bild 3-35: Vereinfachte Ersatzschaltung des Nullsystems des "gesunden" Netzes

U_{iN}	Betrag der Phasenspannung, in Richtung der reellen Achse
\underline{U}_0	Nullspannung
\underline{Y}_{Ui}	unsymmetrische Anteile der Nulladmittanzen der Leitungsabgänge
\underline{Y}_F	Admittanz des Fehlers
B_{Ci}	Suszeptanz der Erdkapazitäten der Leitungsabgänge 1 ... 4
B_L	Suszeptanz der Erdschlusslöschspule
Y_W	Ersatz-Konduktanz des Löscherbezirkes
\underline{I}_{0i}	Nullströme der Leitungsabgänge
\underline{I}_{Ui}	komplexer Unsymmetriestrom des Abganges
\underline{I}_{0N}	Nullstrom im Sternpunkt des Sternpunktbildners bzw. Transformators
\underline{I}_{SE}	Einspeisestrom in das Nullsystem zur Erzeugung einer Änderung von \underline{U}_0
F	Fehlerstelle

Das Ersatzschaltbild stellt das Nullsystem eines Netzes mit vier Leitungsabgängen dar. In den Abgängen 1 und 2 mit den Suszeptanzen B_{C1} bzw. B_{C2} der Erdkapazitäten wird eine natürliche

Unsymmetrie des Netzes angenommen. Die Abgänge 3 und 4 sind völlig symmetrisch aufgebaut und besitzen dadurch keine natürliche Unsymmetrie. Der komplexe Unsymmetriestrom \underline{I}_{Ui} wird entsprechend Kapitel 2.7.4 als Serienschaltung von einer komplexen Unsymmetrie-Admittanz und der Phasenspannung dargestellt.

Mit dem Admittanzverfahren werden die Komponenten B_C und \underline{Y}_U für jeden Abgang bestimmt. In einem weiteren Schritt wird beim Admittanzverfahren angenommen, dass eine Unsymmetrie im gesunden Netz durch ungleiche Erdkapazitäten in den einzelnen Phasen und bei einem hochohmigen Erdschluss durch einen ohmschen Widerstand verursacht wird. Damit erfolgt eine detailliertere Interpretation was den Strom \underline{I}_{Ui} eigentlich verursacht hat.

Zur erstmaligen Bestimmung der Komponenten B_{Ci} und \underline{Y}_{Ui} des i-ten Abganges stehen der Summenstrom \underline{I}_{0i} und die Nullspannung \underline{U}_0 zur Verfügung. Durch eine kurzzeitige Veränderung von \underline{U}_0 um $d\underline{U}_0$ erfolgt eine entsprechende Änderung des Nullstromes in den einzelnen Abgängen. Durch die komplexe Messung der Nullströme und Spannungen ist eine Bestimmung der Suszeptanz der Erdkapazität B_{Ci} und der komplexen Unsymmetrie-Admittanz \underline{Y}_{Ui} je Abgang möglich.

Der Betrag von \underline{Y}_{Ui} in μS gibt unmittelbar die Größe der natürlichen Unsymmetrie des jeweiligen Abganges an.

Diese Werte von \underline{Y}_{Ui} werden für die Erkennung von sehr hochohmigen Erdschlüssen als Referenzwerte \underline{Y}_{Ui_ref} gespeichert. Für ein gesundes Netz müssen alle natürlichen Unsymmetrien \underline{Y}_{Ui_ref} innerhalb eines maximalen Kreises von Y_{U_max} liegen. Die Kreisscheibe mit dem Radius Y_{U_max} deckt natürliche Unsymmetrien $> 10 \text{ k}\Omega$ ab.

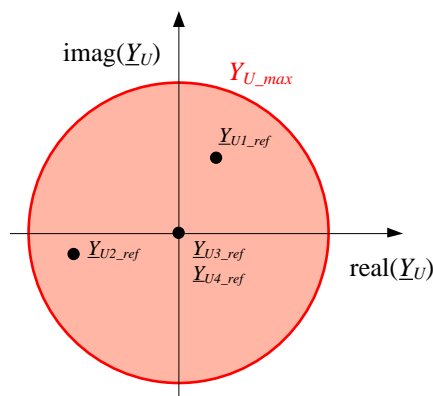


Bild 3-36: Referenzwerte der Nulladmittanzen der Abgänge

Tritt ein hochohmiger Erdschluss z. B. in Abgang 1 ein, so entspricht dies einer zusätzlichen Unsymmetrie \underline{Y}_F in diesem Abgang. Durch diese zusätzliche Unsymmetrie entsteht ein zusätzlicher Unsymmetriestrom \underline{I}_F , der in weiterer Folge entsprechend Kapitel 2.7.4 die Nullspannung \underline{U}_0 an der Sammelschiene verändert.

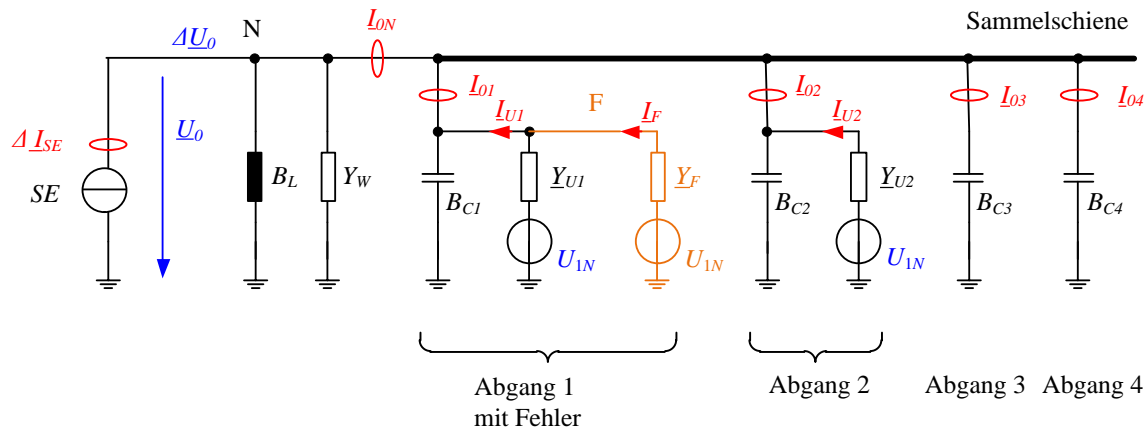


Bild 3-37: Vereinfachte Ersatzschaltung des Nullsystems bei Erdschluss

Durch die veränderte Verlagerungsspannung ändern sich auch die Nullströme in den einzelnen Abgängen. In den gesunden Abgängen entspricht die Änderung den Nulladmittanzen B_{Ci} und Y_{Ui} des jeweiligen Abganges. Nur im fehlerhaften Abgang ist die Änderung nicht proportional zur Nulladmittanz des Abganges. Der Betrag und die Richtung des zugehörigen Y_F werden beim Admittanz-Verfahren ermittelt und bewertet. Unter Annahme einer zusätzlichen ohmschen Unsymmetrie zeigt die Richtung von Y_F in die Richtung der erdschlussbehafteten Phase. Der Kreisradius dY_{F_max} definiert, welche Änderung der Admittanz als Erdschluss erkannt wird.

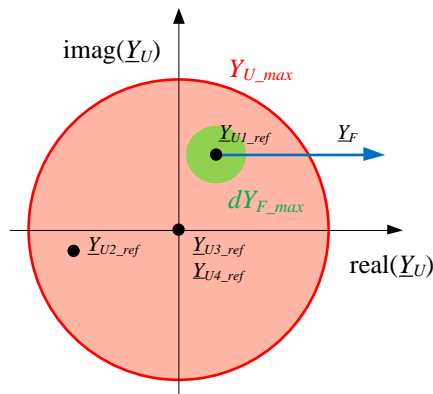


Bild 3-38: Nulladmittanzen der Abgänge bei Erdschluss

Diese Überwachung von Y_F erfolgt kontinuierlich. Die Stromeinspeisung dient nur zur Ermittlung der Referenzwerte bzw. zur Überprüfung, ob die Änderung von Y_{Ui} durch eine Schalthandlung verursacht wurde.

Vereinfacht dargestellt: Es werden zuerst die Admittanzen aller Abgänge während des gesunden Betriebes mit Hilfe der Differenzmethode gemessen und berechnet. Danach erfolgt ohne Stromeinspeisung eine kontinuierliche Überwachung der Admittanzen der Abgänge als Reaktion auf Änderungen der Verlagerungsspannung U_0 . In allen gesunden Abgängen ist die Änderung des zugehörigen Nullstromes proportional zu dessen Nulladmittanzen B_{Ci} und Y_{Ui} . Nur im fehlerhaften Abgang ist die Änderung nicht proportional.

Bei Netzumschaltungen müssen die Nulladmittanzen der einzelnen Abgänge neu ermittelt werden. Ein Problem besteht nun darin, zwischen einer Unsymmetrie und einer Änderung der Leitungslänge zu unterscheiden.

Ein weiteres Problem ist die wesentlich höhere Empfindlichkeit bezüglich Phasensplitting und Übersprechen des Laststroms auf das Nullsystem. Durch Überwachung der Summen-Nulladmittanz des gesamten Netzes können Überreaktionen des Relais stark reduziert werden [185].

Vorteile:

- Erdschlüsse bis in den Bereich von 50 kΩ erkennbar

Nachteile:

- Sehr empfindlich auf Phasensplitting
- Sehr empfindlich auf Übersprechen des Laststroms auf das Nullsystem
- Neigt zu Überfunktion
- Aufwendige Unterscheidung zwischen hochohmigen Fehlern und Zu- bzw. Abschaltung von Leitungssegmenten
- Aufwendige Erkennung von Netzkupplungen
- Stationäres Verfahren
- Während der Bestimmung der natürlichen Unsymmetrien mit Hilfe der 50-Hz-Einspeisung muss das Netz konstant sein. Dies kann bis zu 30 s erforderlich sein

3.3.4.5 Admittanz-Verfahren zur hochohmigen Fehlererkennung: ≠ 50-Hz-Injektion**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Erkennung und Ortung eines Erdschlusses" [11]. Die wesentlichen Aussagen des Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt. .

Bei diesem Verfahren erfolgt die Messung frequenzselektiv bei Frequenzen ungleich 50 Hz, wodurch das Übersprechen vom Laststrom im Messsignal unterdrückt werden kann. Dies bedeutet, dass die Bestimmung der Admittanzen je Abgang wesentlich genauer wird. Außerdem erfolgt die Messung mit den beiden Frequenzen zum gleichen Zeitpunkt, wodurch wesentlich schneller Ergebnisse zur Verfügung stehen. Die Anforderung an ein konstantes Netz während der Messung wird dadurch stark reduziert.

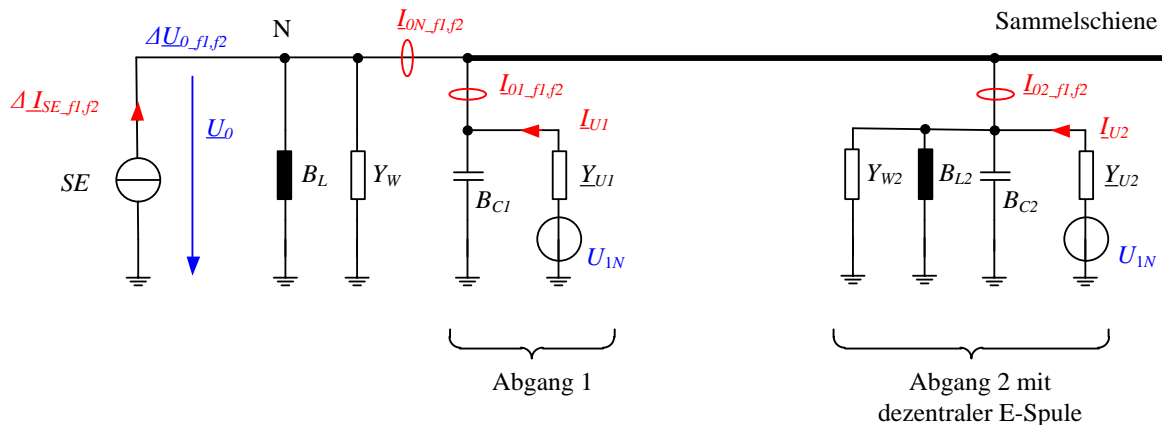


Bild 3-39: Admittanzverfahren mit $f \neq 50$ Hz

** Vom Autor patentiertes Verfahren

Als zusätzliches Ergebnis dieser Berechnung erhält man im gesunden Netz die Leitungskapazität des Abganges und die Induktivität von verteilt installierten Petersen-Spulen auf diesem Abgang. Diese Informationen können zusätzlich für die Regelung verwendet werden, wenn eine prozentuelle Kompensation ausgewählt wurde.

Auch hier gilt, dass einige wesentliche Nachteile bezüglich der Überfunktion durch eine Summenüberwachung der gesamten Null-Admittanz des Netzes stark reduziert werden können.

Vorteile:

- Wesentlich schneller, da beide Frequenzen gleichzeitig eingespeist werden können
- Genauer, da das Übersprechen der 50-Hz-Komponenten durch Filter entfernt wird
- Wandlerfehler, die bei der Summenbildung von 50-Hz-Komponenten zu scheinbaren Strömen und Spannungen führen und dadurch sehr störend sind, wirken sich nun nicht mehr aus, da die 50-Hz-Komponenten durch Filter entfernt werden
- Erdschlüsse bis in den Bereich von 50 k Ω erkennbar

Nachteile:

- Neigt zu Überfunktion
- Aufwendige Unterscheidung zwischen hochohmigen Fehlern und Zu- bzw. Abschaltungen von Leitungssegmenten
- Aufwendige Erkennung von Netzkupplungen
- Stationäres Verfahren
- Während der Bestimmung der natürlichen Unsymmetrien mit Hilfe der \neq 50-Hz-Einspeisung muss das Netz konstant sein, allerdings in diesem Fall weniger als 1 s.

3.4 Verfahren mit Strominjektion in das Nullsystem

3.4.1 Wattreststrom-Erhöhung

Eine Alternative zur Verbesserung der Ortungssicherheit ist die Erhöhung des Wirkstromes, wie in Bild 3-40 dargestellt. Hier existieren in der Realisierung unterschiedliche Ausprägungen:

- a) Dauernde Wattreststrom-Erhöhung um 5 bis 10 A
- b) Wattreststrom-Erhöhung von 5 bis 20 A während des gesunden Betriebes bis einige Sekunden nach dem Erdschlusseintritt
- c) Kurzzeitige Wattreststrom-Erhöhung im Bereich von 300 A
- d) Kurzzeitige Wattreststrom-Erhöhung im Bereich von 1200 - 2000 A (KNOSPE).

Zu beachten ist, dass die Impedanz an der Fehlerstelle, die Leitungslängsimpedanz und die Trafoimpedanz des Nullsystems Einfluss auf den sich ergebenden Strom haben. Dies wirkt sich vor allem bei der KNOSPE aus.

Durch die Umsetzung von Wirkleistung in diesem Zusatzwiderstand ist die Einschaltzeit des Widerstandes begrenzt. Wird z. B. der Primärstrom um 10 A erhöht, so wird in einem 20-kV-Netz eine Leistung von 115 kW umgesetzt. Entsprechend groß sind die Zusatzwiderstände.

Wird der Widerstand nur kurzzeitig zugeschaltet, dann müssen die Ortungsgeräte speichernde Richtungsanzeigen mit Rücksetzeingängen bzw. eine automatische Rücksetzung nach einer definierten Zeit besitzen.

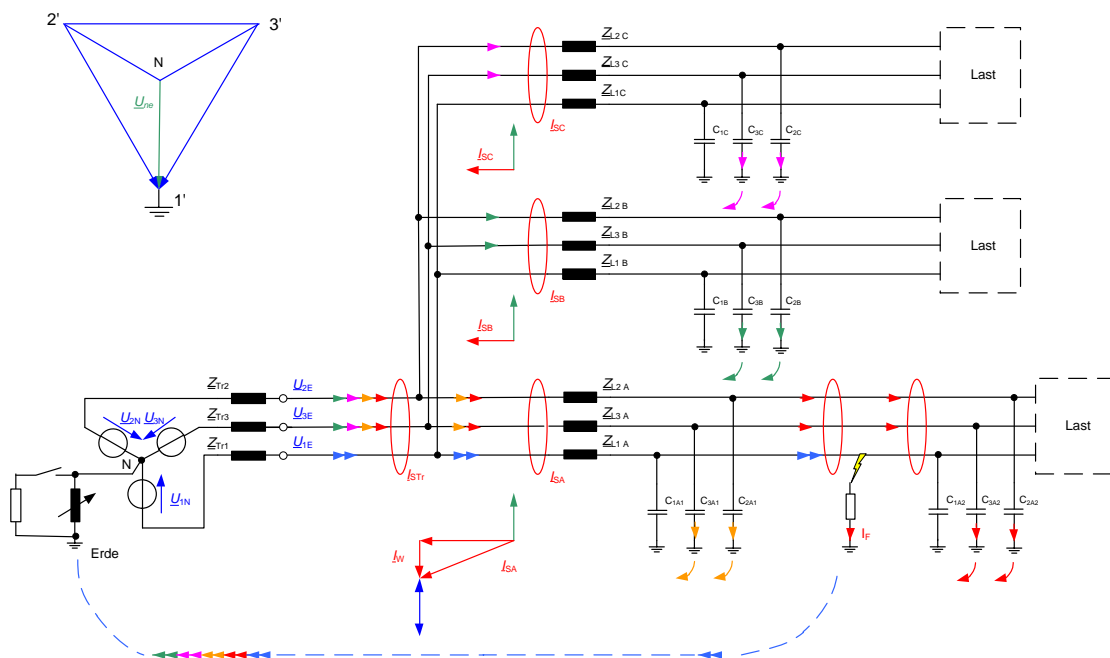


Bild 3-40: Wattreststrom-Erhöhung

Vorteile:

- Reduzierte Anforderung an die Winkelgenauigkeit zwischen \underline{U}_0 und I_0
- Tiefenortung in Verbindung mit Kurzschlussanzeigern bei Verwendung von entsprechend großen Stromimpulsen
- Kann zur Abschaltung des fehlerhaften Segmentes bzw. Abganges verwendet werden

Nachteile:

- Aufwendige Schaltung zur Erzeugung des zusätzliche Wirkstromes
- Durch die Umsetzung in Wärme ist die Zuschaltung nur für eine begrenzte Zeit möglich
- Bei größeren Strömen muss die erlaubte Berühr- und Schrittspannung an der Fehlerstelle beachtet werden
- Die Impedanz an der Fehlerstelle geht in die Strombegrenzung mit ein. Eventuell werden bei langen Leitungen oder hochohmigen Fehlerimpedanzen nicht die geforderten Ströme erreicht
- Speichernde Anzeige mit Rücksetz-Möglichkeit erforderlich

3.4.2 Pulsortung

Eine Variante zur Verbesserung der Erkennung des fehlerhaften Abganges ist die in [38] [30] gezeigte Pulsortung. Durch Variation der Petersen-Spule, z. B. durch zyklisches Zuschalten eines parallel geschalteten Kondensators, wird der Blindstrom über die Fehlerstelle verändert. Aus dem Bild 3-41 ist erkennbar, dass diese Änderung nur vom Taktgenerator bis zur Fehlerstelle messbar ist. Durch eine einfache Erkennung einer Nullstrom-Modulation ist der fehlerhafte Abgang in einem Strahlennetz erkennbar. Durch Verwendung von einfachen Relais ist sogar eine einfache Tiefenortung möglich. Die notwendige Stromänderung liegt üblicherweise im Bereich von 2-3 % der Leiter-Erde-Kapazität des Netzes in A. Damit die Pulsung auch bis zur Fehlerstelle eindeutig erkennbar bleibt, muss das Netz bei den heute verfügbaren Anzeigern auf Überkompensation eingestellt sein.

Bei höherohmigen Widerständen an der Fehlerstelle erfolgt eine Rückkopplung der Stromänderung über die Fehlerstelle auf die Verlagerungsspannung. Diese Änderungen der Verlagerungsspannung führen in der Folge auch zu wesentlichen Nullstrom-Änderungen in den gesunden Abgängen. Durch eine asymmetrische Taktung [33] kann dieser Einfluss bei der Erkennung des Pulsmusters berücksichtigt und kompensiert werden. Das Pulsortungs-Verfahren arbeitet bis zu Übergangswiderständen von ca. 300 Ω .

Es werden aus historischen Gründen Pulsmuster von {1s, 1s} bei symmetrischer Taktung und {1s, 1,5s} bei unsymmetrischer Taktung verwendet. Um eindeutigere Anzeigen zu erhalten müssen üblicherweise 5 Pulse von 7 Pulsen richtig erkannt werden. Während der gesamten Pulszeit sollte sich das Nullsystem nicht ändern und das erste Ergebnis ist erst nach ca. 25 s nach Start des Pulsmusters zu erwarten.

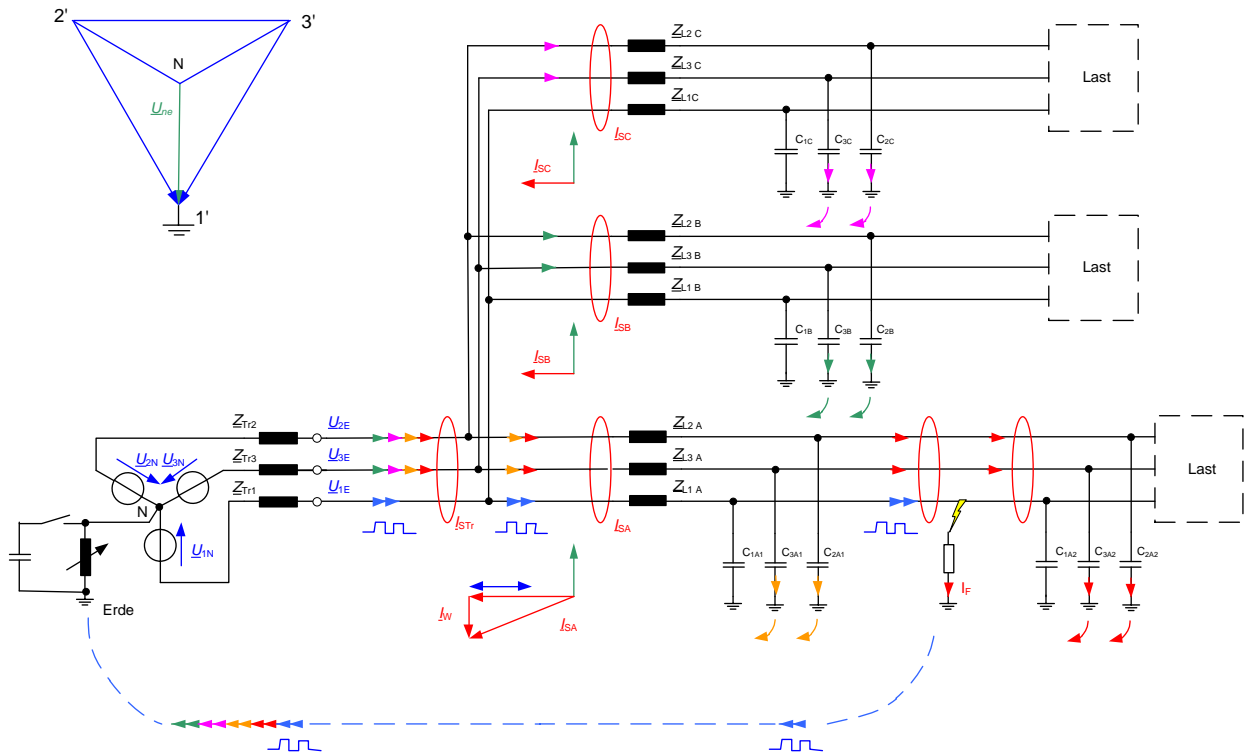


Bild 3-41: Pulsortung

Durch die Verkabelung steigt der kapazitive Strom sehr stark an. Aus diesem Grunde sollen kurz die Randbedingungen für eine eindeutige Pulsortung betrachtet werden.

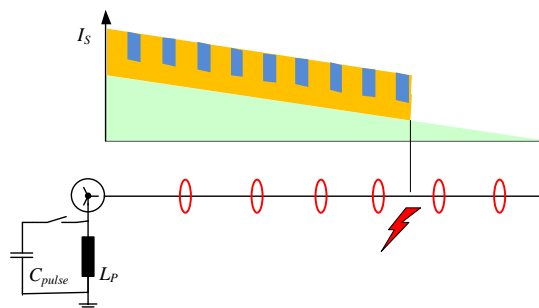


Bild 3-42: Prinzip der Pulsortung

Anforderungen an die Pulsortung:

- Der Puls soll vom Taktgenerator bis zur Fehlerstelle erkennbar sein. Die Suchstrategie ist deshalb so ausgelegt, dass man, vom Pulsgenerator ausgehend, jene Stelle sucht, an der kein Puls mehr erkannt wird. Der Fehler befindet sich in dem Segment zwischen dem letzten erkannten Puls und dem ersten nicht erkannten Puls, wie in Bild 3-42 dargestellt.
- Die Messung des Pulses soll mit einfachen Mitteln möglich sein.
- Auch bei Rückwirkungen durch Impedanzen an der Fehlerstelle soll zwischen fehlerhaftem Abgang und gesundem Abgang unterschieden werden können.

- Der Puls muss einfach und oft wiederholbar erzeugt werden können. Aus diesem Grunde wird meist ein Kondensator pulsartig parallel zur Petersen-Spule geschaltet. Dies kann auf der Hochspannungsseite oder über die Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule erfolgen. Der Vorteil dieser Pulserzeugung besteht darin, dass hier keine Leistung im Kondensator umgesetzt wird. Es sind aber auch andere Puls-Generatoren in Verwendung (kurzzeitige Überkompensation (KÜK), High-Power-Current-Injection (HPCI), ...).

Derzeit ist in der Praxis eine zunehmende Beliebtheit dieses Verfahrens erkennbar. Durch die verbesserten Informationsübertragungsmöglichkeiten, die bei einem Erdschluss ja weiterhin funktionieren, können die Erdschlussmeldung heute wesentlich leichter übertragen werden. Eine schnellere Eingrenzung der Fehlerstelle wird dadurch ermöglicht. Die Forderung nach Eindeutigkeit der Anzeigen geht damit einher.

Bisher wurde der Puls nur an wenigen Stellen gemessen. Der erste Ansatz, um eine bessere Segmentierung zu erhalten, ist, eine wesentlich größere Anzahl von Pulsortungsrelais im Netz zu installieren Bild 3-42. Dies führt aber nur dann zum gewünschten Ergebnis, wenn bestimmte Randbedingungen eingehalten werden.

Für die Darstellung im Bild 3-43 wird angenommen, dass der Summenstrom direkt vor der Fehlerstelle gemessen wird. In der Darstellung wird gezeigt, wie sich die gemessene Pulsform des Taktsignales bei unterschiedlicher Kompensationsart ändert.

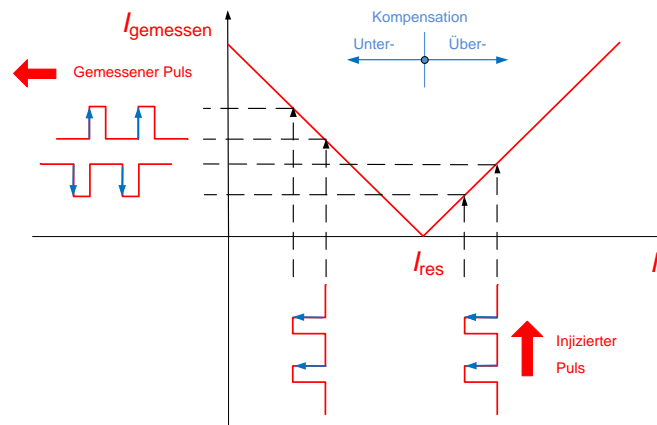


Bild 3-43: Ideale V-Kurve an der Fehlerstelle bei Betrieb mit unterschiedlicher Kompensation

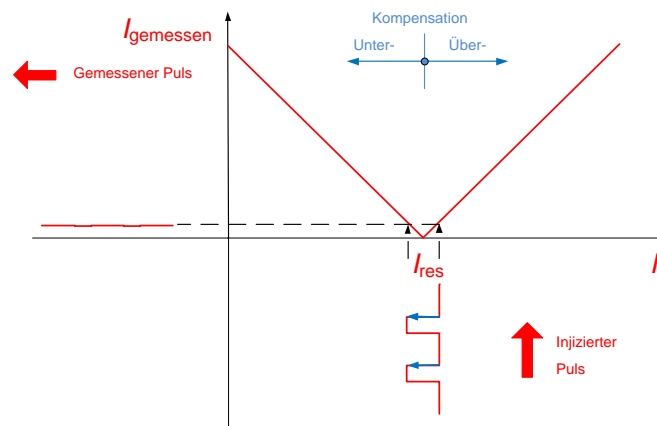


Bild 3-44: Auslöschten des gemessenen Pulssignales, bei zu kleiner Überkompensation

Aus Bild 3-44: Auslösen des gemessenen Pulssignales, bei zu kleiner Überkompensation ist erkennbar, dass der Puls kleiner wird und in der Folge nicht mehr erkannt wird, wenn die Überkompensation kleiner als der gewählte Pulsstrom ist.

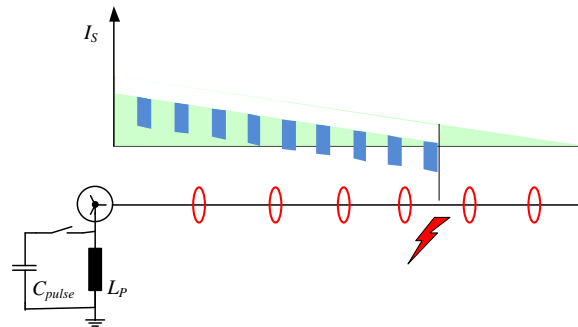


Bild 3-45: Auswirkung einer zu kleinen Überkompensation

Vor allem bei erhöhter Anzahl von Pulsortungsrelais ist dieses Verhalten wichtig, da sonst ein falsches Segment als fehlerhaft selektiert wird. Um die erste Anforderung zu erfüllen, muss daher das Netz mit Überkompensation betrieben werden und zwar überkompensiert mit mindestens der Höhe des verwendeten Pulsstromes.

Verluste im Nullsystem: Wirkströme

Bisher wurde das ideale verlustlose Netz betrachtet. Berücksichtigt man noch den Wirkstrom, der über die Fehlerstelle fließt, dann wird aus der linearen Transferkennlinie eine Hyperbel.

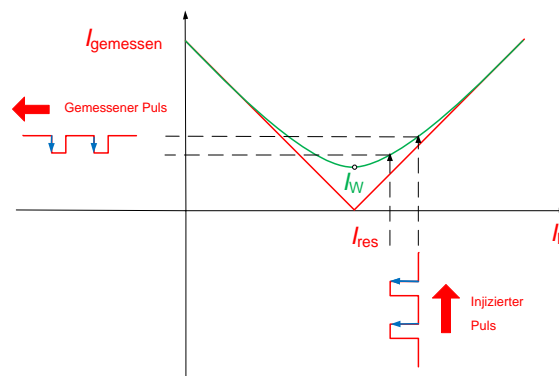


Bild 3-46: Transferkennlinie für die Pulsortung mit Berücksichtigung des Wirkstromes

Durch die Hyperbelform der Transferkennlinie wird eine wesentlich größere Überkompensation erforderlich. Als Richtlinie kann der folgende Wert für die Überkompensation verwendet werden.

$$I_{\text{überkompensation}} = \frac{I_W}{2} + I_{\text{puls}} \quad (3.3)$$

Oberschwingungen

Die derzeitigen Pulsortungsgeräte basieren auf einer Effektivwertmessung des Summenstromes. Dadurch wird auch der Oberschwingungsstrom bewertet. Derzeit sind die Oberschwingungsströme sehr oft wesentlich höher als der Wirkstrom.

In Bild 3-47 ist der Strom über die Fehlerstelle dargestellt. Es wurde die V-Kurve aufgenommen und gleichzeitig die Taktung durchgeführt. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass nicht nur der Puls kleiner wird, sondern der 50-Hz-Strom durch den Oberschwingungsanteil im Strom über die Fehlerstelle in der Nähe des Resonanzpunktes komplett überdeckt wird.

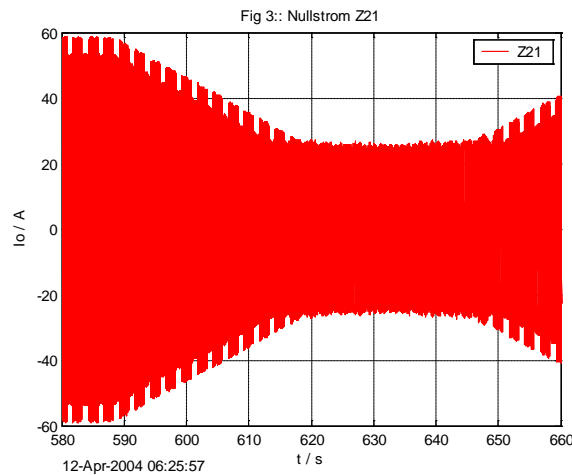


Bild 3-47: Strom über die Fehlerstelle bei Aufnahme der V-Kurve bei gleichzeitiger Pulsortung

In Bild 3-48 ist diese Überdeckung des Pulsstromes durch die Oberschwingungsströme in der V-Kurvendarstellung noch einmal dargestellt. Durch diese Überdeckung wird die notwendige Überkompensation noch wesentlich größer.

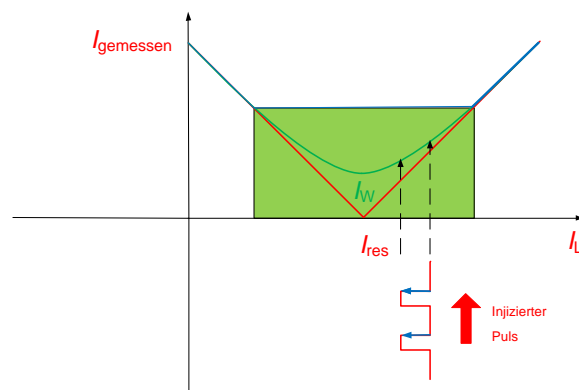


Bild 3-48: Transferkennlinie für die Pulsortung mit Berücksichtigung des Oberschwingungsstroms

Dezentrale Petersen-Spulen

Dezentrale Petersen-Spulen müssen so eingestellt werden, dass sie keine Kompensationsleistung in das Netz liefern.

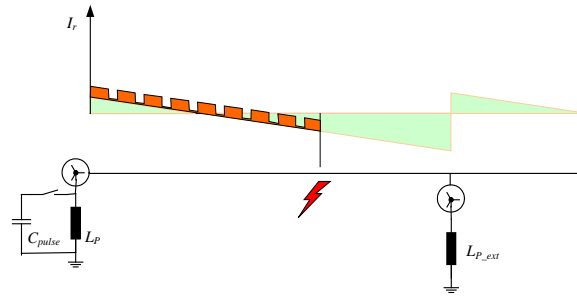


Bild 3-49: Dezentrale Löschspule liefert zu viel Löschleistung ins Netz

Wird dies nicht beachtet, so wird das Relais in der Nähe des Nulldurchganges des kapazitiven Stromes keinen Puls mehr anzeigen. Unter Anwendung der oben genannten Regel für die Erkennung des fehlerhaften Segmentes wird in diesem Fall ein falsches Segment identifiziert. Der tatsächliche Fehler liegt wesentlich weiter hinten.

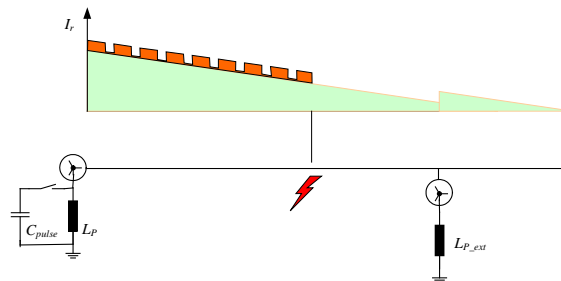


Bild 3-50: Dezentrale Petersen-Spule richtig eingestellt

Die dezentrale E-Spule darf nur das eigene dahinter liegende Netz kompensieren.

Pulsortung in Ringen

In Ringen funktioniert die Pulsortung nicht wie gewünscht, da sich die Pulsströme verkleinern. Der Pulsstrom fließt von beiden Seiten zur Fehlerstelle. Wenn der Pulsstrom groß genug ist erfolgt eine Anzeige am gesamten Ring. Eine Identifizierung des Segmentes ist nicht möglich. Im Effektivwert des Pulsstromes ist auch keine Richtungsinformation enthalten.

Liegt der Fehler in der Mitte des elektrischen Ringes, so halbieren sich die Pulsströme. Die Aufteilung des Nullstromes ist abhängig von den Nullimpedanzen vom Fehlerort bis zur Fehlerstelle. Diese Information wird bei anderen Verfahren zur Abschätzung der Fehlerentfernung von der Sammelschiene verwendet [1][51][177].

Resümee zur derzeitigen Pulsortung

Vorteile:

- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 nicht empfindlich, da nur der Strom bewertet wird
- Holmgreen-Schaltung üblicherweise verwendbar
- Einfache Tiefenortung ist durch eine reine Summenstrom-Messung realisierbar

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird für ca. 30 s vorausgesetzt
- Für den Anwender ist eventuell ein Umdenken erforderlich:
Das Pulssignal ist vom Taktgeber bis zur Fehlerstelle messbar, wobei der Taktgeber nicht zwangsweise dem Energie-Einspeisepunkt entsprechen muss
- Überkompensation des Netzes ist erforderlich. Die erforderliche Überkompensation wird mit den heutigen Netzgrößen immer schwerer erreichbar, ohne andere Randbedingungen wie die Grenzen der Berühr- und Schrittspannungen zu überschreiten.
- Ortung und Tiefenortung mit Pulsortungsrelais ist an Ringen nicht möglich
- Das ursprüngliche Verfahren der Pulsortung, basierend auf Messung des Effektivwertes des Summenstromes, ist sehr empfindlich bezüglich Oberschwingungsanteilen im Summenstrom
- Rückwirkung der Fehlerimpedanz auf die Verlagerungsspannung führt zu nicht vernachlässigbaren Pulsströmen in Abgängen mit großem I_{CE} . Die symmetrische Taktung ist daher nur für niederohmige Fehler geeignet. Die unsymmetrische Taktung hingegen funktioniert üblicherweise bis zu einem Übergangswiderstand von $<300 \Omega$
- Funktioniert nicht bei wiederzündenden und intermittierenden Fehlern
- Die Größe der erforderlichen Überkompensation ist vom Wirkanteil im Netz abhängig
- Die Lösleistung von dezentralen Spulen muss beachtet werden.
- Funktioniert nicht bei Unterkompensation. Es entsteht ein "blinder Abschnitt" in der Leitung, der als Fehlerort interpretiert wird

Ein weiterer Vorteil des Prinzips der Pulsortung ist, dass die Relais auch in der "Tiefe" des Netzes installiert werden können und keine zusätzliche Verbindung z. B. Leittechnik, Modem usw. mit der Takteinrichtung benötigen.

3.4.3 Synchronisierte Pulsortung

Alternativ zur unsymmetrischen Taktung kann zur Erhöhung der Empfindlichkeit eine Synchronisierung zwischen dem Zuschalten des Kondensators an der Leistungs-Hilfswicklung der Petersen-Spule und der Auswertung im Relais durchgeführt werden [184].

Im Umspannwerk ist die Synchronisation mit dem Taktschrank relativ einfach lösbar. Für die Pulsortungs-Relais im Feld ist leider ein sehr hoher Kommunikations-Aufwand für die Synchronisation erforderlich.

3.4.4 Pulsortung mit Verwendung des komplexen Stromes*

Bisher wurde immer nur der Effektivwert des Stromes verwendet. Wird der Nullstrom nach Betrag und Richtung ermittelt, dann wird aus der geknickten Transferkennlinie eine Gerade, wie in Bild 3-51 dargestellt.

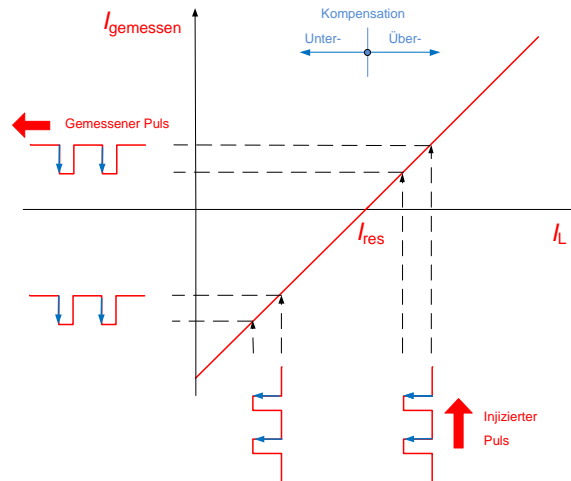


Bild 3-51: Transferkennlinie bei komplexer Strommessung

Berücksichtigt man zusätzlich den Wirkanteil, so kann dieser in der obigen Darstellung in der z-Achse aufgetragen werden. Die Transferkennlinie ist weiterhin eine Gerade. Die Pulsung kann daher unabhängig von der aktuellen Kompensation ermittelt werden.

Durch die Filterung und Darstellung als 50-Hz-Zeiger ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Kein Einfluss der Oberschwingungsanteile
- Aus der geknickten Transferkennlinie wird eine Gerade, die im Abstand I_w über der komplexen Ebene liegt

Durch diese Auswertung des Nullstromes entfallen wesentliche Anforderungen der heute üblichen Pulsortung wie z. B.:

- Überkompensation erforderlich
- I_w blendet das Pulsmuster in der Nähe des Kompensationspunktes aus
- Erforderliche höhere Überkompensation durch Oberschwingungsströme
- Pulsmuster im Sekunden-Raster
- Keine Pulsortung auf Ringen

Für die Messung des Winkels kann entweder eine Spannungsreferenz oder ein über eine PLL erzeugtes Referenzsignal verwendet werden. Die PLL wird dabei direkt auf den Summenstrom angewendet.

Damit können die Pulse als Stromänderung in der komplexen Ebene dargestellt und ausgewertet werden. Die oben beschriebenen Nachteile fallen dadurch weg.

Auch die Pulsortung mit Verwendung des komplexen Stromes ist aber ein stationäres Verfahren, welches bei wiederzündenden Erdschlüssen nicht verwendet werden kann.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

Bei genauer Betrachtung ist die Transferkennlinie keine Gerade, da hierfür angenommen wird, dass die Verluste in der Petersen-Spule konstant und unabhängig von der Spulenposition sind. Dies trifft leider nicht zu [36]. Aber durch die Auswertung mithilfe eines Pulses wird nur ein kleiner Teil der Transferkennlinie betrachtet. Durch die Pulsung erfolgt eine Linearisierung um den Arbeitspunkt. Der tatsächliche Wirkstrom wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

3.4.5 Pulsortung mit Auswertung der drei Leiterströme**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren und Vorrichtung zur Ortung von Erdschlüssen in Drehstromnetzen durch Messung der Leiterströme" [5]. Die wesentlichen Aussagen des Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Die Aufgabe dieser Erfindung ist es, die Pulsortung so zu verbessern, dass diese auch für höherohmige Fehlerwiderstände geeignet ist. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass bei Installationen der Relais in der Tiefe trotz Erkennung von hochohmigen Erdschlüssen keine Spannungswandler benötigt werden. Im Mittelspannungsnetz ist eine Nachrüstung von Spannungswandlern sehr kostenintensiv. Stromwandler sind meist vorhanden oder können vor allem in Kabelnetzen relativ günstig als Niederspannungskabelumbauwandler nachgerüstet werden, da die Isolationsfestigkeit durch das Kabel selbst gegeben ist.

Die Funktionalität der Erdschlussortung ist durch dieses Verfahren über den ganzen Verstellbereich der Erdschlusslöschspule gegeben und ist sogar für isolierte Netze anwendbar, wenn im Nullsystem eine Veränderung der Nullimpedanz gegen Erde durchgeführt werden kann.

Prinzip:

- Berechnung des Nullstromes aus den drei Leiterströmen $i_{0n} = (i_{1n} + i_{2n} + i_{3n})/3$ und kontinuierliche Ermittlung des Betrages und des Winkels der Ströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 und \underline{I}_0 . Als Referenzsignal für die Winkelmessung dient ein Synchronisationssignal, das entweder von extern zugeführt wird oder z. B. intern mithilfe eines internen langsamen PLL (Phase Locked Loop) direkt aus dem Nullstrom \underline{I}_0 gewonnen wird.
- Kreuzkorrelation des Nullstromes \underline{I}_0 und der Leiterströme \underline{I}_1 , \underline{I}_2 und \underline{I}_3 mit einem vorgegebenen Pulsmuster.
- Wird über die Kreuzkorrelation eine Taktung erkannt, so wird der folgende Auswertalgorithmus gestartet.
- Aus dem Pulsmuster werden die Stromänderungen $\underline{\Delta I}_0$, $\underline{\Delta I}_1$, $\underline{\Delta I}_2$ und $\underline{\Delta I}_3$ in den Leitern nach Betrag und Winkel ermittelt. Die Richtung der Impedanzänderung des Nullsystems wird aus dem Pulsmuster abgeleitet.
- In den gesunden Abgängen ist nach Betrag und Winkel: $\underline{\Delta I}_0 = \underline{\Delta I}_1 = \underline{\Delta I}_2 = \underline{\Delta I}_3$
- In erdschlussbehafteten Abgängen sind die Stromänderungen in zwei Außenleitern nach Betrag und Winkel gleich groß. Die Stromänderung im erdschlussbehafteten Leiter ist zusammengesetzt aus der gleichen Stromänderung wie in den beiden gesunden Leitern plus der Stromänderung, die über die Fehlerstelle fließt.

** Vom Autor patentiertes Verfahren

Wie bereits oben kurz erwähnt, prägt der Pulsstrom bei einem höherohmigen Erdschluss durch den Spannungsabfall am Fehlerwiderstand R_F auch der Verlagerungsspannung ein Pulsmuster auf. Die Größe nach Betrag und Richtung ist abhängig von der aktuellen Abstimmung der Petersen-Spule. Durch die komplexe Änderung der Verlagerungsspannung \underline{U}_{NE} um $\underline{\Delta U}_{NE}$ ändert sich in allen drei Leitern die Spannung gegen Erde auch um diesen komplexen Zeiger $\underline{\Delta U}_{NE}$. In den gesunden Leitern bewirkt dies eine Stromänderung von

$$\underline{\Delta I}_{0_gesund} = j\omega C_x \underline{\Delta U}_{NE} \quad (3.4)$$

$$\underline{\Delta I}_{0_gesund} = j\omega C_x R_F \underline{\Delta I}_{NE} \quad (3.5)$$

Im erdschlussbehafteten Leiter hingegen wird durch das Pulsmuster die Stromänderung wie folgt:

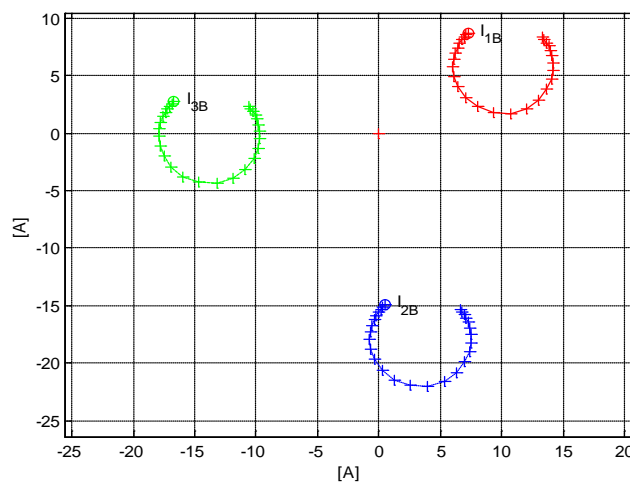
$$\underline{\Delta I}_{0_fehler} = j\omega C_x \underline{\Delta U}_{NE} + \frac{\underline{\Delta U}_{NE}}{R_F} \quad (3.6)$$

$$\underline{\Delta I}_{0_fehler} = j\omega C_x R_F \underline{\Delta I}_{NE} + \underline{\Delta I}_{NE} \quad (3.7)$$

In einem gesunden Abgang sind die Stromänderungen in allen drei Leitern sowie im Nullstrom nach Betrag und Winkel gleich groß.

Die Gleichungen sind auch für einen Fehlerwiderstand von 0 Ohm gültig.

Im Bild 3-52 sind die drei Leiterströme I_{1B} , I_{2B} und I_{3B} des gesunden Abganges B dargestellt. Der Fehlerwiderstand R_F ist konstant und die Petersen-Spule wird von unterkompensiert bis überkompensiert verändert. Die Leiterströme beschreiben in der komplexen Ebene einen rechtsdrehenden Kreis.



*Bild 3-52: Leiterströme im gesunden Abgang bei Verstellung der Petersen-Spule
Annahme: Konstante Last und konstanter Fehlerwiderstand*

Im Bild 3-53 sind die zugehörigen Ströme im erdschlussbehafteten Abgang B dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich der Strom im erdschlussbehafteten Leiter 1 anders verhält.

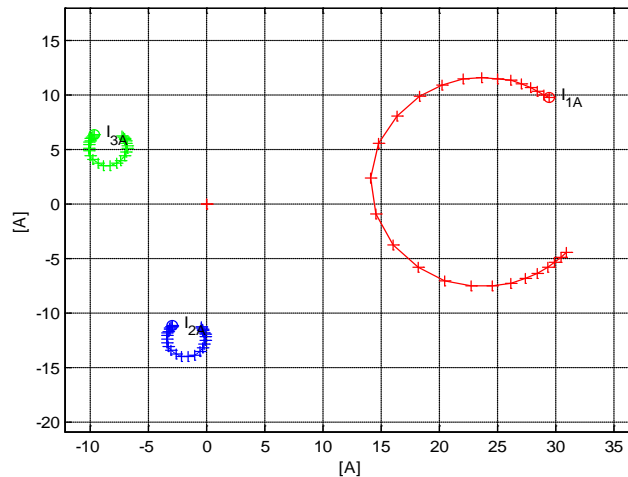


Bild 3-53: Leiterströme im erdschlussbehafteten Abgang bei Verstellung der Petersen-Spule
Annahme: Konstante Last und konstanter Fehlerwiderstand

Durch die differenzielle Messung der Pulsung wird das System um den aktuellen Arbeitspunkt linearisiert. Die folgenden Einflüsse werden dadurch eliminiert bzw. stark reduziert:

- Übersprechen des Laststromes durch Wandlerfehler
- Übersprechen des Laststromes durch Phasensplitting
- Einfluss der Kreisströme bei Ringschaltungen

Durch die Anwendung einer FFT erfolgt automatisch auch eine Filterung der Oberschwingungsanteile.

3.4.6 Pulsortung mit Frequenzen $\neq 50$ Hz*

Bei den oben beschriebenen Verfahren wurden 50-Hz-Komponenten in das Nullsystem eingespeist. Damit werden diese Verfahren auch abhängig vom Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem für 50 Hz. Wenn keine 50-Hz Filter verwendet werden, ist die Ortung zusätzlich von den vorhandenen Oberschwingungsströmen abhängig.

Eine Verbesserung kann erreicht werden, wenn Frequenzen ungleich 50 Hz eingespeist werden. Dadurch können einige der erwähnten Effekte unterdrückt werden. Es sind dann auch richtungsabhängige Verfahren möglich, da diese Frequenzen von keinem Verbraucher bzw. Einspeiser natürlich erzeugt werden. Die Ausbreitung dieser Frequenzen erfolgt immer vom Einspeisepunkt zur Fehlerstelle.

Die folgenden Verfahren sind derzeit bereits in Verwendung:

- **Injektion mit 217 Hz in das Nullsystem**

Durch die Verwendung einer Rundsteueranlage kann ein definierter Spannungspegel in der verketteten Spannung erzeugt werden.

Bei Erdschlusseintritt wird für 6 s ein Dauersignal eingespeist. Durch die entstehenden Oberschwingungsspannungen in der verketteten Spannung steht ein definierter Pegel für die Pulsortung zur Verfügung.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

Im Prinzip erreicht man für diese Oberschwingung von 217 Hz ähnliche Verhältnisse wie im isolierten Netz. Die bereits weiter oben beschriebenen Prinzipien des Oberschwingungsverfahrens werden während dieser Einspeisezeit von 6 s gültig.

Andererseits entstehen durch die kurze Einspeisedauer von 6 s ähnliche Zeit-Verhältnisse wie bei einer Wattreststrom-Erhöhung. Die ermittelte Richtungsanzeige muss daher gespeichert und nach der Auswertung zurückgesetzt werden.

Vorteile:

- Auf Winkelfehler zwischen u_0 und i_0 nicht empfindlich
- Holmgreen-Schaltung üblicherweise verwendbar, besonders durch die zentrale Einspeisung
- Einfache Tiefenortung ist möglich
- Überkompensation des Netzes ist nicht erforderlich
- Anforderungen an Strom und Spannungswandler ähnlich zum Oberschwingungsverfahren
- Ortung und Tiefenortung ist an Ringen möglich, wenn die Blindleistungsrichtung ausgewertet wird.

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird für ca. 6 s vorausgesetzt
- Für den Anwender ist eventuell ein Umdenken erforderlich:
Das Pulssignal ist vom Taktgeber bis zur Fehlerstelle messbar, wobei der Taktgeber nicht zwangsweise dem Energie-Einspeisepunkt entsprechen muss
- Funktioniert nicht bei wiederzündenden und intermittierenden Fehlern
- Bei 217 Hz können bereits Serien-Resonanzerscheinungen in einigen gemischten Netzen auftreten

- **Injektion mit 11/12 bzw. 13/12 von 50 Hz in das Nullsystem***

Durch die Verwendung einer Hochstromeinspeisung während des Erdschlusses können diese Frequenzen ausgewertet werden.

Die Frequenzen von $11/12 * 50 \text{ Hz} = 45,833 \text{ Hz}$ bzw. $13/12 * 50 \text{ Hz} = 54,167 \text{ Hz}$ können sehr einfach als **Puls-Amplituden-Modulation (PAM)** erzeugt werden, die weiter unten in Kapitel 5.5.9 detaillierter beschrieben wird.

Das Prinzip der Mustererzeugung bleibt gleich. Allerdings ist es nicht notwendig, die Energie für das Pulsmuster aus dem 400-V-Netz zu beziehen. Das Pulsmuster kann durch eine spezielle Schaltungsvariante direkt durch Belastung der Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule während des Erdschlusses erzeugt werden, wie in Bild 3-54 dargestellt.

Die Hochstromeinspeisung HPCI (High Power Current Injection), kann während des gesunden Betriebes in Verbindung mit einem dazu geeigneten Petersen-Spulen Regler zur Abstimmung der Petersen-Spule verwendet werden. Dabei erfolgt die Einspeisung über den Thyristor Th3. Diese Berechnung der aktuellen Abstimmung benötigt keine Verstellung der Petersen-Spule und funktioniert auch bei sehr symmetrischen Netzen.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

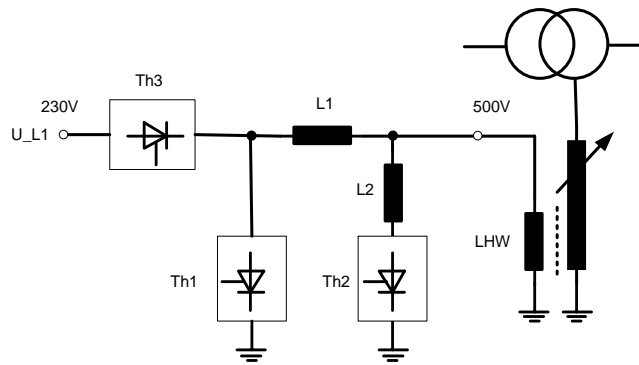


Bild 3-54: Prinzipschaltbild der HPCI (High Power Current Injection)

Während des Erdschlusses wird im HPCI die Einspeisung aus dem 400-V-Niederspannungsnetz über den Thyristor Th3 unterbrochen und eine zusätzliche induktive Belastung auf die Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule über die Thyristoren Th1 und Th2 geschaltet. Durch die Verwendung von Thyristoren sind Standard-Pulsmuster (1 s – 1,5 s) oder schnellere Pulsmuster realisierbar.

Abhängig von verwendeten Relais und Algorithmen muss eventuell das Netz so umgeschaltet werden, dass der Fehler auf einer Stickleitung liegt. Bei Verwendung von Relais mit Richtungsauswertung ist eine Ortung auch in Ringen möglich.

Mit der HPCI können aber auch schnellere Pulsmuster verwendet werden, sodass das Ortungsergebnis innerhalb weniger Sekunden zur Verfügung steht.

Die neuen, auf der Strominjektion basierenden Auswerteverfahren verwenden für die Auswertung die Strom- und Spannungsmessung und können dadurch eine gerichtete Information auch am Ring erzeugen.

Eine Überkompensation ist bei den neuen Verfahren nicht mehr erforderlich.

Durch die Nähe zu 50 Hz fallen die Einschränkungen des Oberschwingungsverfahrens bezüglich Serien-Resonanz-Erscheinungen weg.

Vorteile:

- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 nicht empfindlich
- Holmgreen-Schaltung üblicherweise verwendbar, besonders durch die zentrale Einspeisung
- Einfache Tiefenortung ist möglich
- Überkompensation des Netzes ist nicht erforderlich
- Anforderungen an Strom und Spannungswandler ähnlich zum Oberschwingungsverfahren
- Ortung und Tiefenortung ist an Ringen möglich, wenn die Blindleistungsrichtung ausgewertet wird
- Die Erzeugung von schnellen Pulsmustern ist möglich (240 ms)

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird für ca. 1 s vorausgesetzt
- Für den Anwender ist eventuell ein Umdenken erforderlich:
Das Pulssignal ist vom Taktgeber bis zur Fehlerstelle messbar, wobei der Taktgeber nicht zwangsweise dem Energie-Einspeisepunkt entsprechen muss
- Funktioniert nicht bei wiederzündenden und intermittierenden Fehlern

3.4.7 Schnelle Pulsortung*

Durch die Erzeugung der Pulsmuster mit Hilfe von Thyristoren wurde im vorherigen Abschnitt das Pulsmuster so gewählt, dass die beiden Frequenzen 11/12 und 13/12 von 50 Hz entstanden sind. Es sind aber andere Pulsmuster wie z. B. Muster basierend auf Pseudo-Random-Binary-Signale (PRBS) [221] wählbar.

Die Vor- und Nachteile entsprechen den Punkten aus dem Abschnitt "Injektion mit 11/12 bzw. 13/12 von 50 Hz in das Nullsystem" mit den folgenden Ergänzungen:

Vorteile:

- Reduktion der Wahrscheinlichkeit, dass zufällig eine Frequenz mit dem Messsignal übereinstimmt
- Die Kreuzkorrelation mit dem definierten PRBS liefert nur bei genauer Übereinstimmung ein sehr großes Signal

Nachteile:

- Größerer Rechenaufwand erforderlich

3.5 Vergleichende Verfahren

Bei den bisher aufgezählten stationären Verfahren stehen nur die Informationen eines Abganges zur Verfügung. Die Anregewerte der Ortung müssen daher auf einen Wert fest eingestellt werden.

Hingegen kann durch den Vergleich von Messwerten oder abgeleiteten Größen von mehreren Abgängen eine relative Bewertung der Erdschluss-Richtungs-Kriterien durchführen werden. Dadurch kann sehr einfach eine adaptive Empfindlichkeitseinstellung erreicht werden, die es ermöglicht, wesentlich höherohmige Fehler zu erkennen.

Bei den vergleichenden Verfahren wird der Abgang mit dem relativ größten Wert als erdschlussbehaftet identifiziert.

Fehler bis in den Bereich von 10 k Ω bis 20 k Ω sind erkennbar.

Wesentliches Problem bei diesen Verfahren ist die notwendige Synchronität und Kommunikation mit den Nachbargeräten. Alternativ zu den Einzelgeräten kann die Auswertungen direkt in einem zentralen Gerät erfolgen [29]. In diesem Fall müssen alle relevanten Ströme und Spannungen diesem Gerät zugeführt werden, was zu einem erheblichen Verdrahtungsaufwand führen kann.

Außerdem müssen bei diesem Verfahren alle Abgänge überwacht werden, da sonst ein Erdschluss an der Sammelschiene oder an einem nicht überwachten Abgang zu einer Fehlanzeige führen kann. Durch die adaptive Anpassung der Anregeschwelle wird der größte Wert gerichtet oder ungerichtet bewertet und angezeigt.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

3.5.1 Vergleich der Wattrestströme je Abgang

Bereits der reine Vergleich der Wirkströme je Abgang bewirkt eine Erhöhung der Empfindlichkeit.

Vorteile:

- Relativ einfach realisierbar
- Wesentlich empfindlicher im Vergleich zum reinen wattmetrischen Verfahren
- Funktioniert bereits ab 2 Abgängen (sonst mutiert das Verfahren zum reinen $\cos(\varphi)$ -Verfahren).

Nachteile:

- Stationärer Erdschluss wird vorausgesetzt
- Funktioniert durch das Phasensplitting nicht in Ringen
- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 sehr empfindlich
- Kommunikation und Synchronisation mit benachbarten Geräten erforderlich
- Eine richtige Zuordnung zum gleichen erdschlussbehafteten Bezirk ist erforderlich

3.5.2 Vergleich der Admittanzen je Abgang

Abhängig von dem verwendeten Berechnungsverfahren der Admittanz nach Kapitel 3.3.4 können kleinere Winkelfehler kompensiert werden. Dadurch ergeben sich höhere Empfindlichkeiten.

Die Vor- und Nachteile entsprechen im Wesentlichen dem "Vergleich von Wattrestströmen je Abgang" aus dem vorherigen Kapitel.

Es ist zu beachten, dass eventuell für einige Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Admittanz zusätzliche aktive Komponenten zur Strominjektion erforderlich sind.

3.5.3 Vergleich der Wirkströme je Abgang

Wie bereits weiter oben gezeigt, ist eine wiederholbare Messung der Admittanz des Abganges bei einem "satten" Erdschluss nicht möglich. Die Nullspannung ist eingepreist.

Wenn man allerdings die Wirkströme verwendet, dann kann durch den Vergleich der aktuell gemessenen Wirkströme die Empfindlichkeit der Relais gesteigert werden.

Die zentralen Geräte, welche auf dem Admittanzverfahren basieren, schalten derzeit bei sehr hoher Verlagerungsspannung auf das $\cos(\varphi)$ -Verfahren um und führen einen Vergleich der einzelnen Abgänge durch. Nur der Abgang mit dem größten relativen Wirkstrom wird gemeldet.

3.5.4 Vergleich der Oberschwingungsströme je Abgang

Durch das bereits in den obigen Abschnitten beschriebene Ausweichen auf Oberschwingungen bzw. auf betriebsfremde Frequenzen, können die Vorteile dieser Verfahren ausgenutzt werden.

Kombiniert mit der vergleichenden Auswertung wird auch hier eine höhere Empfindlichkeit in Bezug auf höherohmige Fehler erreicht [14][89].

Auch hier gilt, dass diese Verfahren nur für stationäre Erdschlüsse anwendbar sind.

In Ringnetzen und vermaschten Netzen ist dieses Verfahren aufgrund des Effektes des Phasensplittings nicht verwendbar. Für das Oberschwingungsverfahren ist die Nullimpedanz des Transformators

mators die Koppelimpedanz. Die Oberschwingungsströme werden erst durch diese Koppelimpedanz in der verketteten Spannung sichtbar. Es sind relativ große Oberschwingungsströme erforderlich, um die entsprechenden Oberschwingungsanteile in der verketteten Spannung zu erzeugen. Im Erdschlussfall sind die Oberschwingungsströme über die Fehlerstelle wesentlich geringer. Ein Phasensplitting während des Betriebes der Abgänge im Ring wirkt sich daher sehr schnell negativ auf die Ortung aus.

Vorteile:

- Relativ einfach realisierbar
- Adaptive Empfindlichkeitseinstellung
- Auf Winkelfehler zwischen \underline{U}_0 und \underline{I}_0 nicht empfindlich

Nachteile:

- Alle Abgänge müssen erfasst werden
- Stationärer Erdschluss wird vorausgesetzt
- Funktioniert durch das Phasensplitting nicht in Ringen
- Eine richtige Zuordnung zum gleichen erdschlussbehafteten Bezirk ist erforderlich

3.5.5 Détection Sélective par les Intensités Résiduelles (DESIR)

Steht die Nullspannung \underline{U}_0 zur Messung nicht zur Verfügung, so kann das von der Electricité de France entwickelte Prinzip DESIR (Détection Sélective par les Intensités Résiduelles) für die Erkennung hochohmiger Fehler verwendet werden [37].

Bei diesem Verfahren wird die vektorielle Summe $\underline{I}_{0\Sigma}$ aller Nullströme $\underline{I}_{01} \dots \underline{I}_{0n}$ gebildet. Da $\underline{I}_{0\Sigma}$ im Wesentlichen durch die Erdkapazität bestimmt wird, ist $\underline{I}_{0\Sigma}$ näherungsweise um 90° gegenüber \underline{U}_0 voreilend. Die vektorielle Summe $\underline{I}_{0\Sigma}$ wird bei diesem Verfahren als Ersatzgröße für die Abschätzung der Wirkanteile verwendet und \underline{U}_0 nicht gemessen. Werden die Nullströme \underline{I}_{0i} der Abgänge auf die Senkrechte zu $\underline{I}_{0\Sigma}$ projiziert, so entsprechen diese Werte näherungsweise den Wirkanteilen der zugehörigen Nullströme \underline{I}_{0i} .

Im Falle eines Erdschlusses ist der erdschlussbehaftete Abgang dadurch gekennzeichnet, dass die Projektion des Nullstromes in die entgegengesetzte Richtung zur Projektion der gesunden Abgänge zeigt bzw. gegenüber dem Summenstrom $\underline{I}_{0\Sigma}$ 90° nacheilend ist. In erster Näherung entspricht dieses Verfahren dem $\cos(\varphi)$ Verfahren ohne Messung der Nullspannung \underline{U}_0 .

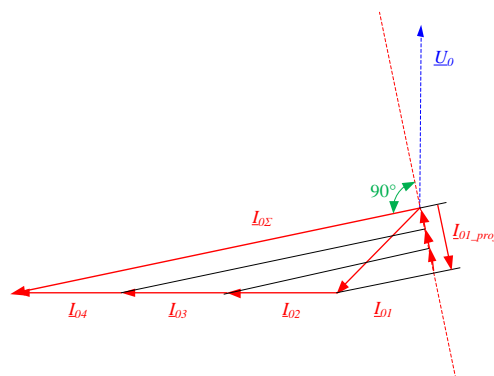


Bild 3-55: DESIR- Methode mit Erdschluss im Abgang 1

Vorteile:

- Messung von \underline{U}_0 wird nicht benötigt

Nachteile:

- Stationäres Verfahren
- Mindestens drei Abgänge werden benötigt
- Funktioniert nicht in Ringen: Empfindlich auf Phasensplitting
- Empfindlich auf Übersprechen von Lastströmen bei Holmgreen-Schaltungen
- Gruppenzuordnung bei Mehrsammelschienenbetrieb erforderlich
- Alle Abgänge in der Gruppe müssen erfasst werden
- U_0 ist nicht mehr das Anregekriterium für den Erdschluss
- Bei kleiner Verlagerungsspannung sind auch die Nullströme sehr klein. In diesem Bereich wirken sich die Winkelfehler der Stromwandler sehr stark aus

3.6 Priorisierung der Erdschluss-Richtungs-Verfahren*

Sinnvoll ist es, mehrere Verfahren gleichzeitig zu verwenden, um die Ortungssicherheit zu erhöhen. Um dennoch eine Reduktion der Signalisierung zu erreichen, werden die einzelnen Verfahren priorisiert. Wählt man z.B. die folgende Priorisierung, mit 1 als höchste Priorität,

Priorität	Verfahren
1	Wischerverfahren (qu_2)
2	Intermittierendes Verfahren (qui)
3	Bevorzugtes stationäres Verfahren <ul style="list-style-type: none"> • $\cos(\phi)$ • $\sin(\phi)$ • Oberschwingungsverfahren 250 Hz •

dann wird erreicht, dass z. B. für die ersten Sekunden das Wischerverfahren ausgewertet und dessen Ergebnis angezeigt wird. Danach erfolgt die Anzeige des intermittierenden Erdschlusses. Sollte kein wiederzündender Fehler vorliegen, so erfolgt das Umschalten der Anzeige auf das stationäre Verfahren. Dies kann auch als State-Transition-Diagramm entsprechend Bild 3-56 dargestellt werden.

Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass zumindest die transiente Ausgabe getrennt von qui und der gewählten stationären Anzeige in der Warte dargestellt werden sollte.

Die Praxis hat gezeigt, dass mit den neuen Verfahren der Wischer im Kabelnetz zu 99% und im Freileitungsnetz zu 95% den korrekten Richtungsentscheid liefert. Wird die Anzeige auf ein Summensignal reduziert, geht eventuell die relativ zuverlässige Wischerinformation verloren.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

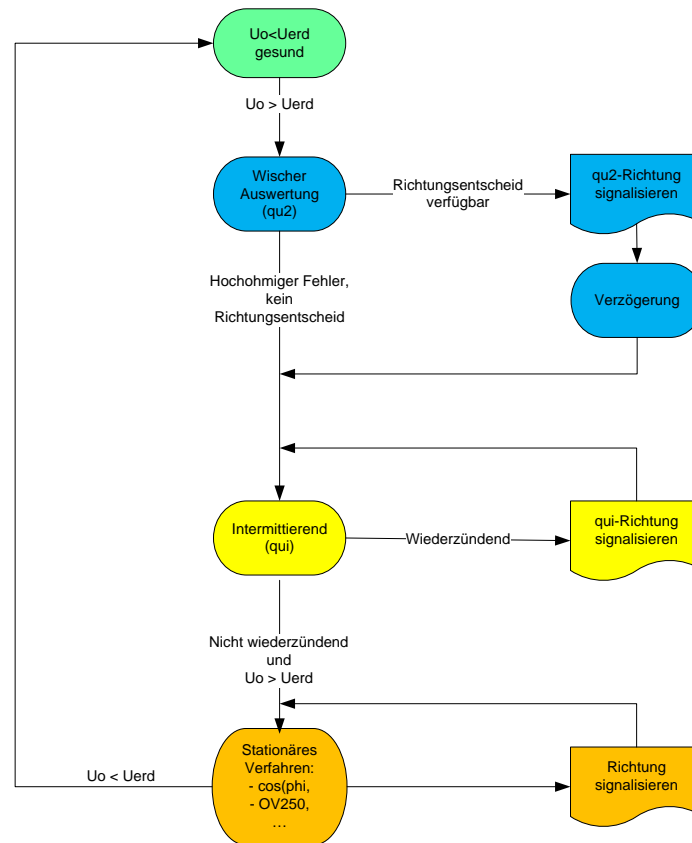


Bild 3-56: State-Transition Diagramm mit Priorisierung entsprechend dem angeführten Beispiel

Sinnvoll ist auch die Variante, den Wischer in der Warte nur anzuzeigen, wenn $U_o > U_{erd}$ über eine längere Zeit ansteht. Die der Wischeranzeige nachfolgenden Verfahren werden in der Warte erst nach Quittierung der ersten zuverlässigen Wischeranzeige aktiv. In diesem Fall erfolgt eine zusätzliche Bewertung durch die Leittechnik.

Die Pulsortung wird üblicherweise mit einer höheren Priorität als die stationären Verfahren versehen. Die Pulsortung kann automatisch bei Erdschlusseintritt nach einer kurzen Verzögerung gestartet werden. Eine zusätzliche manuelle Auslösung der Pulsortung kann bei Bedarf z.B. nach einer Netzumschaltung erfolgen. Allerdings funktioniert die Pulsortung nicht beim wiederzündenden Erdschluss.

Beim Pulsortungsverfahren sind Verfahren mit einer Frequenz ungleich 50 Hz und möglichst in der Nähe von 50 Hz zu bevorzugen. Dadurch können die störenden Einflüsse des 50-Hz-Wirkstromes und der Einfluss von Oberschwingungs-Resonanzen stark reduziert werden.

Durch die neuen Verfahren für die Pulsortung ist auch eine Überkompensation nicht mehr erforderlich. Dadurch wird der Strom an der Fehlerstelle auch während der Pulsung klein gehalten.

4 Entfernungsbestimmung des Fehlers

4.1 Entfernungs-Abschätzung durch Messung an zwei Messstellen

4.1.1 Entfernungsmessung im Ring bei niederohmigen Erdschlüssen**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Resonanzabstimmung von Erdschlusslöschspulen" [1]. Die wesentlichen Aussagen dieses Patents werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Bei diesem Verfahren wird während eines Erdschlusses eine Stromänderung ins Nullsystem injiziert. Dies kann z. B. durch Verstärken der Petersen-Spule, Wattreststromerhöhung, Zuschalten eines Kondensators parallel zur Petersen-Spule, aktive Einspeisung oder ähnliche Verfahren erreicht werden.

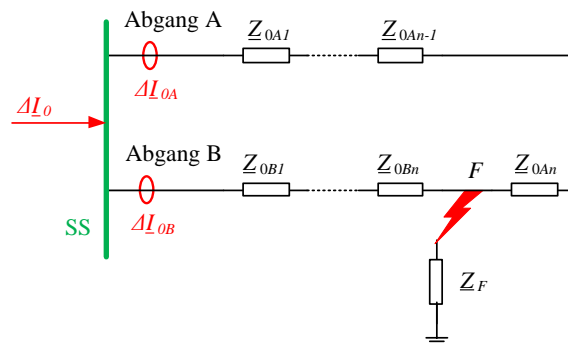


Bild 4-1: Vereinfachte Darstellung der Polygon-Methode

Wenn der Fehler niederohmig ist, können im ersten Ansatz die Querleitwerte der Kapazitäten vernachlässigt werden und es entsteht das vereinfachte Bild 4-1.

Bei diesem Verfahren wird an der Sammelschiene die Änderung des injizierten Stromes in den beiden zu einem Ring geschalteten Abgängen gemessen.

Mit

$$\underline{Z}_{0A} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_{0Ak} \quad (4.1)$$

und

$$\underline{Z}_{0B} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_{0Bk} \quad (4.2)$$

teilt sich der injizierte Strom wie folgt auf:

$$\frac{\Delta I_{0A}}{\Delta I_{0B}} = \frac{\underline{Z}_{0B}}{\underline{Z}_{0A}} \quad (4.3)$$

** Vom Autor patentiertes Verfahren

Damit ist bei niederohmigen Erdschlüssen eine Abschätzung der Fehlerentfernung sehr einfach durchführbar.

Dieses Verfahren kann auch in gemischten Netzen angewendet werden; dazu ist es lediglich notwendig, die entsprechenden Nullimpedanzen aufzusummieren.

Die größte Unsicherheit ist die genaue Kenntnis der Nullimpedanzen, die ja von verschiedensten Faktoren, wie z. B. Bodenfeuchte, Schichtung des Bodens, aktueller Grundwasserspiegel, zusätzliche leitende Verbindungen in der Erde usw. abhängen.

Bei niederohmigen Erdschlüssen wirken sich die zusätzlichen am Ring liegenden Leiter-Erde-Kapazitäten von Stickleitungen noch nicht wesentlich aus.

Die Umsetzung dieses Verfahrens ist nur in der Leittechnik sinnvoll, da der aktuelle Netzzustand bekannt sein muss und zur Fehlereingrenzung ein einfacher Ring gebildet werden sollte. Fehlerfreie Maschen müssen nicht geändert werden.

Dieses Verfahren wird nach den positiven Erfahrungen [51][177][176] sehr oft eingesetzt.

Vorteile:

- Sehr einfach realisierbar
- Abschätzungen am Ring mit ca. 5% Genauigkeit möglich
- Messung ist wiederholbar

Nachteile:

- Stationäres Verfahren
- Änderung des Nullstromes notwendig
- Messung an der gleichen Sammelschiene
- Nullimpedanzen der Leitungen nicht genau bekannt, bzw. ändern sich diese
- Für Mehrfachringe wird die Auswertung komplex
- Realisierung in der Leittechnik notwendig, da aktuelle Schaltzustände bekannt sein müssen

4.1.2 Genaue Entfernungsmessung **

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Fehlerortung in Drehstromnetzen" [4]. Die wesentlichen Aussagen dieses Patents werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Bei diesem Verfahren werden nun in Erweiterung zu den Verfahren aus Kapitel 4.1.1 auch die Quer-Komponenten und der Einfluss von Stickleitungen genauer berücksichtigt. Außerdem entfällt die Einschränkung, dass die Messung an einer Sammelschiene erfolgen muss.

Die ausführliche Ableitung ist in [48][4] zu finden.

** Vom Autor patentiertes Verfahren

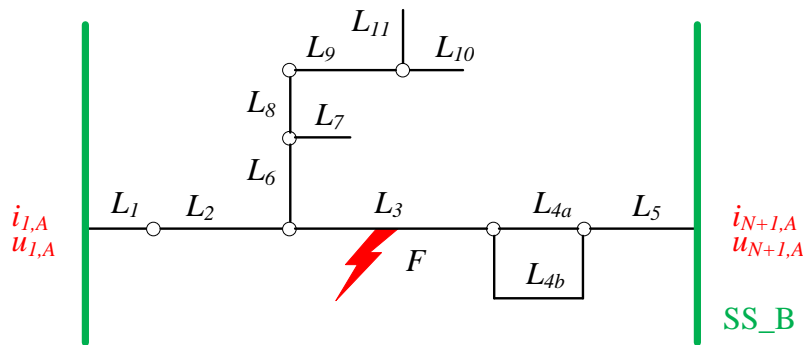


Bild 4-2: Genaue Entfernungsmessung durch Messung an zwei Messstellen

Bei diesem Verfahren wird vorausgesetzt, dass die Modellierung der Leitungsgleichungen für das Nullsystem richtig ist und dass der Schaltzustand des Netzes bekannt ist. Die Wellengleichungen der Leitungen werden hierzu in entsprechende A-Matrizen umgeformt.

Für einen Abschnitt der Leitung kann der Verlauf der Nullspannung $u(x,t)$ und des Nullstromes $i(x,t)$ an der Stelle x und zum Zeitpunkt t im Laplace-Bereich mithilfe der inversen Kettenmatrix \mathbf{A}^{-1} durch die Gleichung (4.4) beschrieben werden [127].

$$\begin{bmatrix} u(x,s) \\ i(x,s) \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u(0,s) \\ i(0,s) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

mit [223]

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(s) x) & -Z_w(s) \sinh(\gamma(s) x) \\ -Z_w(s) \sinh(\gamma(s) x) & \cosh(\gamma(s) x) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$Z_w(s) = \sqrt{\frac{r+sl}{g+sc}}, \quad \gamma(s) = \sqrt{(r+sl)(g+sc)} \quad (4.6)$$

- r Widerstand / km
- g Konduktanz / km
- c Kapazität / km
- l Induktivität / km

Durch die Verwendung der Kettenmatrizen kann das Netz nun entsprechend Bild 4-3 dargestellt werden.

Zur Berechnung erfolgt die Strom- und Spannungsmessung nach Betrag und Winkel in den beiden Messstellen A und B. Bei diesem Verfahren ist es nicht mehr notwendig, dass die beiden Messstellen an der gleichen Sammelschiene liegen.

Im nächsten Schritt wird der Verlauf der Ströme und Spannungen für das zu untersuchende Netz unter Berücksichtigung der Stiche berechnet. Die Stiche werden dabei rekursiv auf die Verbindung zwischen den beiden Messstellen reduziert und ergeben in unserem Beispiel die neue Matrix $\mathbf{A}_{2,3}$. Ebenso werden Maschen auf eine Ersatzleitung reduziert und ergeben in unserem Beispiel die neue Matrix \mathbf{A}_4 . Diese Umformungen führen zu dem in Bild 4-4 dargestellten reduzierten Netz.

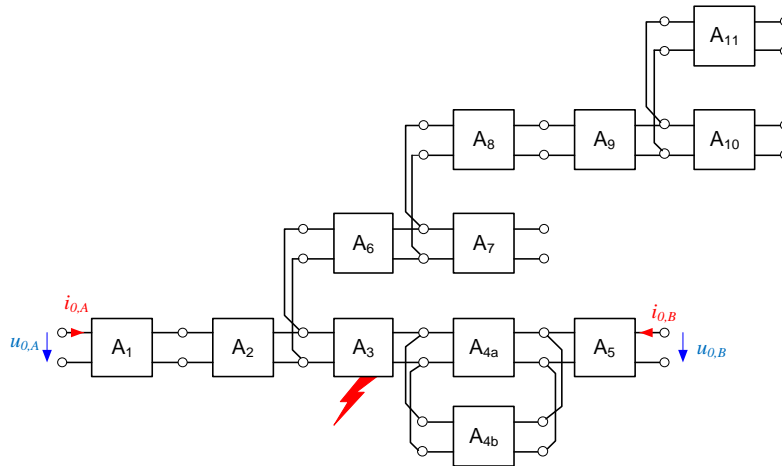


Bild 4-3: Kettenmatrix-Darstellung des Netzes von Bild 4-2

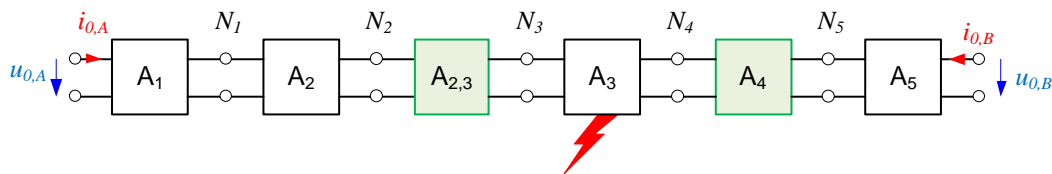


Bild 4-4: Reduziertes Netz in der Kettenmatrix-Darstellung

Im nächsten Schritt werden die Nullströme und Nullspannungen für alle Knoten N_i von $i = 0, \dots, M$ einmal von links nach rechts

$$\begin{bmatrix} u_{i,A} \\ i_{i,A} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{i-1}^{-1} \dots \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \begin{bmatrix} u_{0,A} \\ i_{0,A} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

und dann von rechts nach links berechnet

$$\begin{bmatrix} u_{i,B} \\ i_{i,B} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i^{-1} \dots \mathbf{A}_{M-1}^{-1} \mathbf{A}_M^{-1} \begin{bmatrix} u_{0,B} \\ i_{0,B} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Das Verfahren beruht auf dem Ansatz, dass die durch die Kettenmatrizen errechneten Ströme und Spannungen in den einzelnen Knoten N_i bis zur Fehlerstelle mit der Realität übereinstimmen. Ab der Fehlerstelle stimmt die Berechnung nicht mehr, da ein Teil des Stromes über die Fehlerstelle abfließt. Der Fehler wird am größten, wenn die zweite Messstelle erreicht wird. Die Berechnung der Nullströme und Nullspannungen für jeden Knoten, ausgehend vom anderen Ende der Leitung, ergibt dasselbe Bild, d. h. eine Übereinstimmung mit der Realität bis zur Fehlerstelle und eine zunehmende Abweichung darüber hinaus. Die Differenz der beiden Folgen hat daher genau am fehlerhaften Knoten bzw. im Bereich des fehlerhaften Leitungsabschnitts ein Minimum.

Ist der Fehler nicht in einem Knoten, sondern innerhalb eines Leitungssegmentes, so kann in einem weiteren Schritt die Entfernung des Fehlers entsprechend Bild 4-5 innerhalb des Leitungssegmentes berechnet werden.

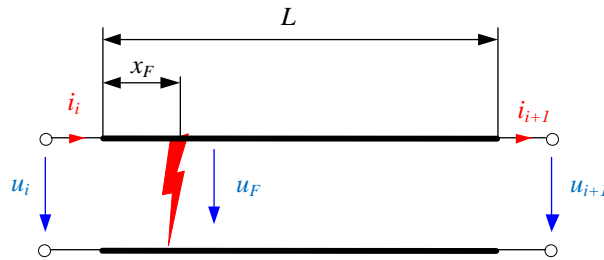


Bild 4-5: Reduziertes Netz in der Kettenmatrix-Darstellung

Die zugehörige Lösung ist in Gleichung (4.9) dargestellt

$$x_F = L - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\pm \frac{\sqrt{-k_1 e^{\gamma L} (k_2 e^{\gamma L} - k_3)}}{k_1} \right) \quad (4.9)$$

mit

$$\begin{aligned} k_1 &= (u_i + Z_W i_i) - (u_{i+1} + Z_W i_{i+1}) e^{\gamma L} \\ k_2 &= (u_i - Z_W i_i) \\ k_3 &= (u_{i+1} - Z_W i_{i+1}) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Eine Näherungslösung kann mit Hilfe der linearen Interpolation zwischen den beiden Knoten berechnet werden.

Das Verfahren funktioniert auch bei hochohmigen Erdschlüssen.

Der Erdschlusswiderstand darf sich sogar während der Messung quasistationär ändern, sofern an beiden Messstellen gleichzeitig gemessen wird.

Das Verfahren lässt sich auch für gemischte Netze anwenden.

Durch Verwendung von Differenzmessungen von u_0 und i_0 in den beiden Stationen können Wandlerfehler kompensiert werden. Dies erfordert, dass ein anderer Arbeitspunkt des Netzes, mit geänderter Nullspannung und geändertem Nullstrom, eingenommen wird. Dies kann z. B. durch Injektion eines Stromes in das Nullsystem oder Verstellung der Petersen-Spule während des Erdschlusses erreicht werden.

Bild 4-6 zeigt ein gemischtes 20-kV-Netz mit einem I_{CE} von 126,6 A, mit einem Ring von 26,2 km Länge ($I_{CE} = 81,4$ A) und einer langen Stichleitung von 13,9 km ($I_{CE} = 45,2$ A) [48].

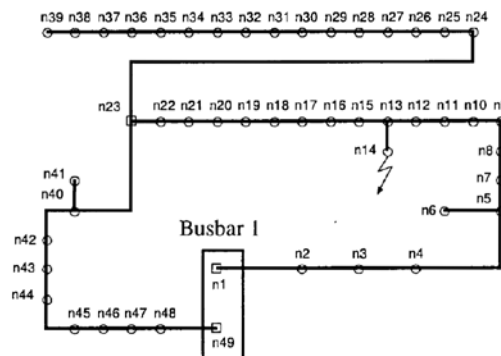


Bild 4-6: Realer Erdschlussversuch in einem Testnetz mit 39 Knoten [48]

Nach der Durchführung der Reduktion des Netzes auf einen Ring, wie oben beschrieben, bleiben 34 Knoten am Ring übrig. Zur Vereinfachung wurden die Knoten aus Bild 4-6 umbenannt. Alle Erdschlüsse wurden nach Bild 4-6 im Knoten 14 auf einer kurzen Stichleitung eingelegt.

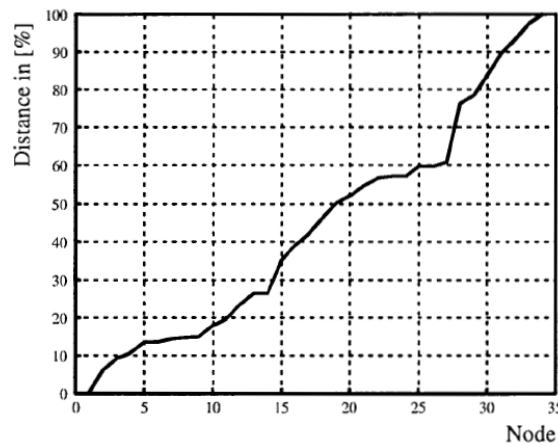


Bild 4-7: Distanzen am Ring nach Reduktion und Umbenennung der Knoten [48]

In der neuen reduzierten Form, die nur mehr den Ring beschreibt, entspricht dies den neuen Knoten 13-14 in Bild 4-7. Die Knoten 1 bis 4 sind identisch. Die anderen Knoten werden teilweise durch die Auflösung der Stiche und durch Einfügen von Zusatzknoten anders bezeichnet. In den folgenden Betrachtungen wird nur mehr auf diese reduzierte Version nach Bild 4-7 Bezug genommen. Im Bild 4-7 sind zugleich die realen Entfernungen zwischen den einzelnen Knoten dargestellt.

In Bild 4-8 ist die Differenzspannung in den einzelnen Knoten dargestellt. Die gestrichelte Linie entspricht der direkten Auswertung der stationären Messung. Die Winkelfehler der Messwandler haben einen relativ hohen Einfluss auf die Genauigkeit der Fehlerortung.

Die durchgezogene Linie ist das Ergebnis der Differenzmessung, in diesem Fall nach einer kleinen Verstimmung der Petersen-Spule. Die Stromänderung kann aber auch durch eine andere Maßnahme erfolgen, wie z. B. durch eine Hochstromeinspeisung.

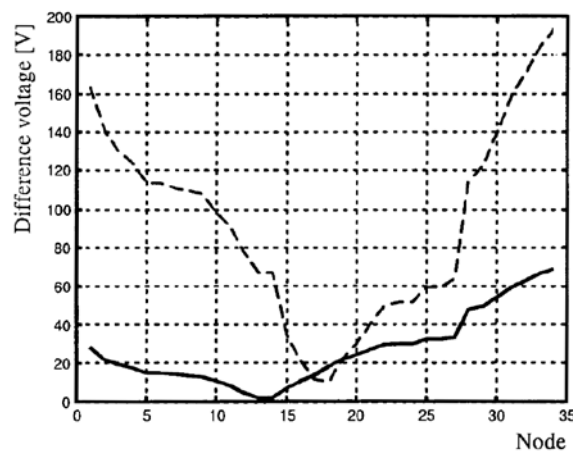


Bild 4-8: Differenzspannungen in den einzelnen Knoten bei $R_F = 0 \Omega$ [48]

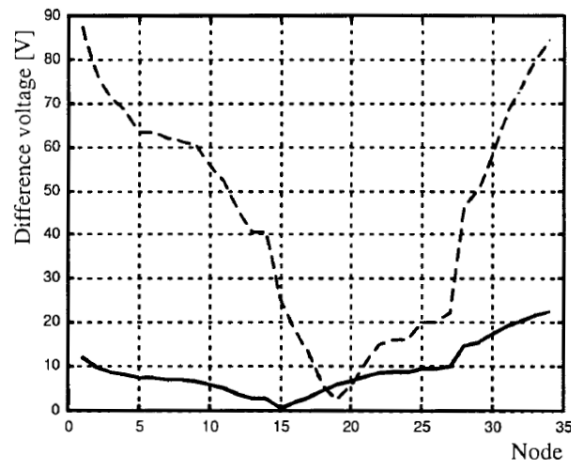


Bild 4-9: Differenzspannungen in den einzelnen Knoten bei $R_F = 5 \text{ k}\Omega$ [48]

Bild 4-9 zeigt, dass selbst ein Fehlerwiderstand von $5 \text{ k}\Omega$ zu ausgezeichneten Lösungen führt. Simulationen haben gezeigt, dass sich bei diesem Fehlerfall die Genauigkeit der Messung der kleinen Nullströme stärker auswirkt.

Es muss noch darauf hingewiesen werden, dass die Daten der Leitungen nicht genau bekannt waren.

In der Vergangenheit war die Bestimmung der Leitungsparameter recht schwierig, bzw. man wusste nicht genau, welches Kabel wo und wie verlegt wurde. In der Zwischenzeit sind die Daten durch die heutigen GIS wesentlich genauer verfügbar. Eine Umsetzung des Algorithmus in ein GIS-System in Kombination mit der Leittechnik könnte nun eine wesentliche Beschleunigung der Fehlereingrenzung bewirken.

Vorteile:

- Wesentlich genauer
- Messung an zwei Messstellen.
Messung kann, aber muss nicht an der gleichen Sammelschiene erfolgen
- Funktioniert auch bei höherohmigen Erdschlüssen
- Einflüsse von Stichleitungen werden bei höherohmigen Fehlern berücksichtigt
- Messung ist wiederholbar
- Bei Injizierung eines Nullstromes und Messung zu unterschiedlichen Zeitpunkten können statische Fehler kompensiert werden

Nachteile:

- Stationäres Verfahren
- Änderung des Nullstromes notwendig, um die Genauigkeit zu erhöhen
- Nullimpedanzen der Leitungen nicht genau bekannt, bzw. ändern sich
- Realisierung in der Leittechnik notwendig, da aktuelle Schaltzustände bekannt sein müssen
- Fehler im Stich wird nur als Fehler am Anschlusspunkt erkannt

4.1.3 Entfernungsmessung bei unsymmetrischen Leitungen

In [193][192] wird ein Verfahren, basierend auf synchronisierten Störschrieben, für sehr unsymmetrische Leitungen, wie sie z. B. im 110-kV-Netz anzutreffen sind, vorgestellt.

Es wird dort sowohl eine Lösung für die Berechnung im Zeitbereich als auch für die Berechnung im Frequenzbereich gezeigt.

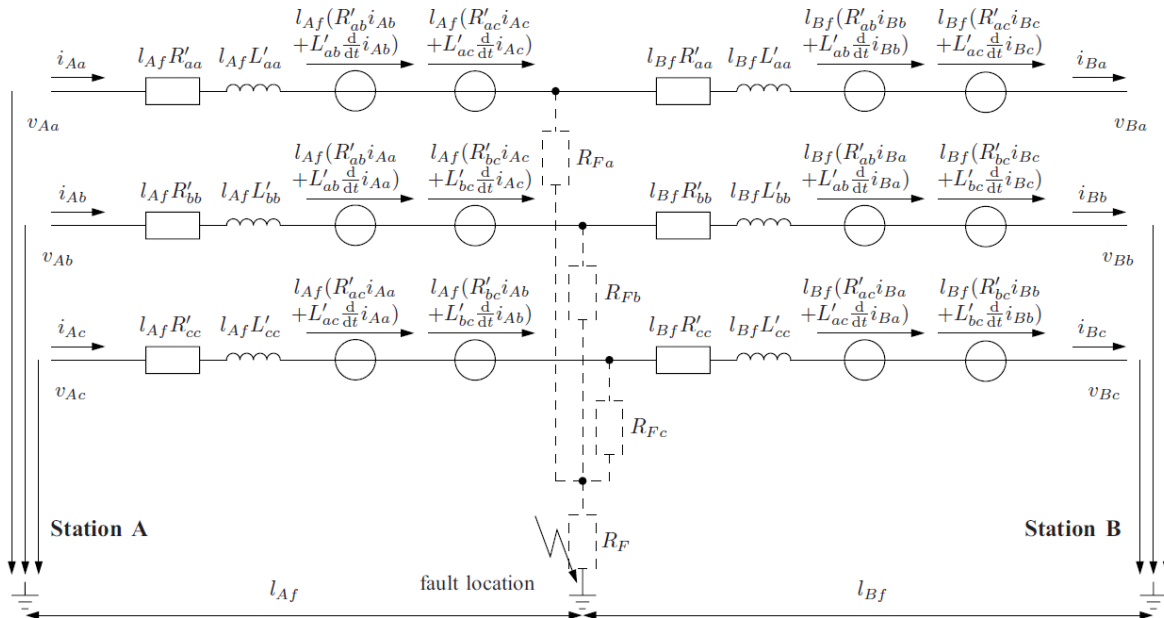


Bild 4-10: Zugrunde liegende Ersatzschaltung für die Entfernungsberechnung [193]

4.1.4 Andere Verfahren

In [181] findet man eine gute Übersicht anderer bekannter Verfahren.

4.2 Entfernungs-Abschätzung durch Messung an einer Messstelle

In vielen Netzen besteht leider nicht die Möglichkeit, Ringe für die Erdschlusseingrenzung zu bilden. Für solche Netze muss nach anderen Lösungen gesucht werden.

Einfach den Abgang abzuschalten ist nicht die richtige Lösung, denn falls der Fehler nicht auf diesem Stich liegt, wird bei überkompensiert betriebenen Netzen der Strom über die Fehlerstelle größer und zwar genau um den I_{CE} des abgeschalteten Abganges. Dies kann zu Personengefährdung führen. Bei Unterkompensation wird der Strom über die Fehlerstelle zunächst kleiner und steigt danach an.

4.2.1 Entfernungsabschätzung mit stationären Messwerten

Dieses Verfahren ist in [58][59][60][61][62] beschrieben.

Es beruht auf einer stationären Messung, basierend auf den symmetrischen Komponenten. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wird der Strom über die Fehlerstelle kurzzeitig erhöht. Die folgende Darstellung wurde aus [61] entnommen.

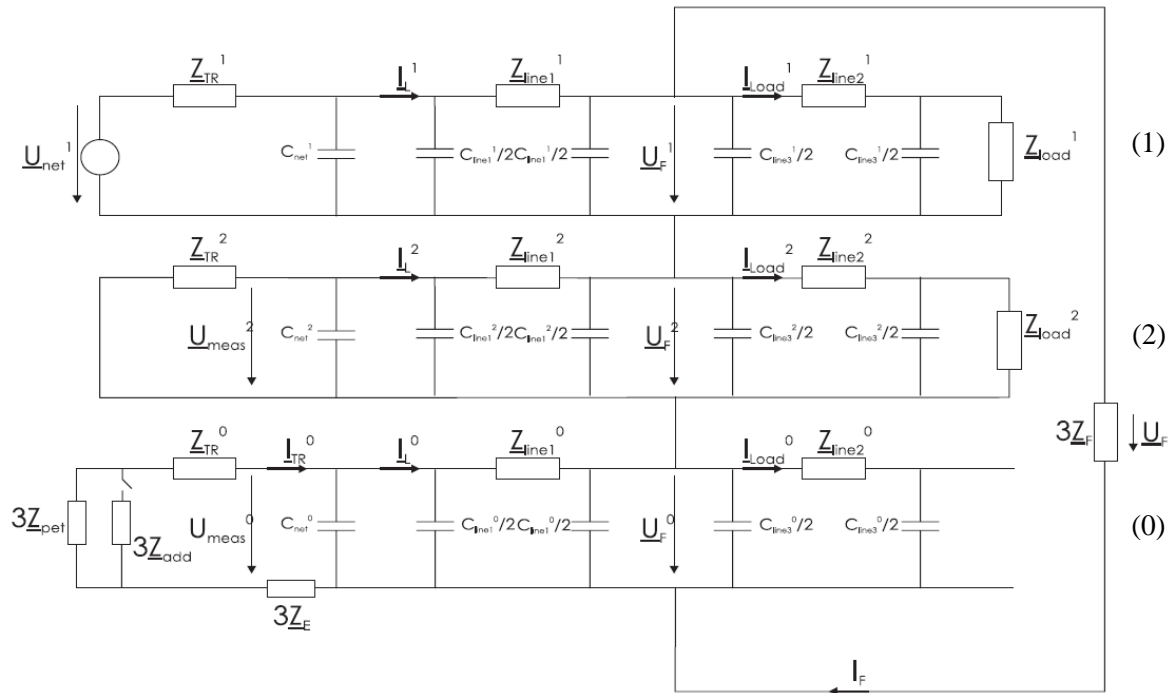


Bild 4-11: Netzmodell mit Symmetrischen Komponenten mit:

- \underline{Z}_{Line}^1 Gemessene Mitimpedanz bis zur Fehlerstelle
- \underline{Z}_{Line}^1 Bezogene Mitimpedanz der Leitung
- \underline{Z}_E Erdimpedanz
- \underline{U}_{L1E} Gemessene Leiter-Erde-Spannung am Relais-Einbauort
- \underline{I}_{L1} Gemessener Leiterstrom am Relais-Einbauort
- \underline{I}_{Tr} Gemessener Reststrom am Sternpunkt des Transformators
- \underline{I}_{Σ} Gemessener Summenstrom am Relais-Einbauort
- l Distanz bis zur Fehlerstelle

$$\underline{U}_F^1 + \underline{U}_F^2 + \underline{U}_F^0 = \underline{U}_F \tag{4.11}$$

$$\underline{U}_{meas}^1 - \underline{I}_L^1 \cdot \underline{Z}_{Line}^1 + \underline{U}_{meas}^2 - \underline{I}_L^2 \cdot \underline{Z}_{Line}^2 + \underline{U}_{meas}^0 - \underline{I}_L^0 \cdot \underline{Z}_{Line}^0 - 3\underline{I}_{Tr}^0 \cdot \underline{Z}_E = 3\underline{I}_F^0 \cdot \underline{Z}_F \tag{4.12}$$

mit

$$\underline{Z}_{Line}^1 = \underline{Z}_{Line}^2$$

$$\underline{U}_{meas}^1 + \underline{U}_{meas}^2 + \underline{U}_{meas}^0 = \underline{U}_{L1E}$$

$$\underline{I}_L^1 + \underline{I}_L^2 + \underline{I}_L^0 = \underline{I}_{L1}$$

wird Gleichung (4.12)

$$\frac{\underline{U}_{L1E}}{\underline{Z}_{Line}^1} = \underline{I}_{L1} - \underline{I}_L^0 + \underline{I}_L^0 \cdot \frac{\underline{Z}_{Line}^0}{\underline{Z}_{Line}^1} + 3\underline{I}_F^0 \cdot \frac{\underline{Z}_F}{\underline{Z}_{Line}^1} + 3\underline{I}_{Tr}^0 \cdot \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_{Line}^1}$$

Mit der Definition

$$\underline{k}_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{\underline{Z}_{Line}^0}{\underline{Z}_{Line}^1} - 1 \right)$$

$$3 \cdot \underline{I}_L^0 = \underline{I}_\Sigma$$

erhält man

$$\frac{U_{LIE}}{\underline{Z}_{Line}^1} = \underline{I}_{L1} + \underline{I}_\Sigma \cdot \underline{k}_0 + \underline{I}_F^0 \cdot \frac{\underline{Z}_F}{\underline{Z}_{Line}^1} \underline{I}_{Tr}^0 \cdot \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_{Line}^1}$$

Nach einer weiteren Umformung erhält man die folgende Lösung

$$\underline{Z}_{Line}^1 = \frac{U_{LIE} - \underline{I}_F^0 \cdot \underline{Z}_F - \underline{I}_{Tr}^0 \cdot \underline{Z}_E}{\underline{I}_{L1} + \underline{I}_\Sigma \cdot \underline{k}_0} = \underline{Z}_{Line}^1 \cdot l \quad (4.13)$$

Vorteile:

- Sehr einfach
- Bekannte Größen aus der Parametrierung von Schutzgeräten können direkt verwendet werden

Nachteile:

- Zur Erhöhung der Genauigkeit ist ein großer Strom über die Fehlerstelle erforderlich

4.2.2 Entfernungsabschätzung mit stationären Messwerten**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Entfernungsbestimmung eines einpoligen Erdschlusses auf einer Stichleitung" [7]. Die wesentlichen Aussagen dieses Patents werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Eines der größten Probleme bei der Suche des Fehlers am Stich ist, dass die Bestimmung des Übergangswiderstandes an der Fehlerstelle kaum oder nicht möglich ist. Außerdem ist der Leitungswiderstand von der Messstelle bis zur Fehlerstelle üblicherweise um eine Größenordnung kleiner als der Übergangswiderstand.

Die meisten bekannten Verfahren benötigen für die Bestimmung der Entfernung die Information vor Eintritt des Erdschlusses. Dadurch ist eine Wiederholung der Messung während des Erdschlusses nicht mehr möglich. Vor allem ist eine Wiederholung der Messung nicht möglich, wenn zur genaueren Eingrenzung der Fehlerstelle eine Umschaltung des Netzes erfolgt, da dann die Referenzwerte vor Eintritt des Erdschlusses nicht mehr zutreffend sind. Auch eine Änderung des Belastungszustandes bewirkt, dass die Referenzwerte nicht mehr gültig sind.

Die bekannten Verfahren zur Bestimmung der Fehlerentfernung von einer Messstelle aus setzen einerseits niederohmige Übergangswiderstände von einigen Ohm und andererseits symmetrische

** Vom Autor patentiertes Verfahren

Belastungen voraus, damit die Einflüsse des Gegensystems vernachlässigbar werden. Beide Situationen sind aber in der Praxis kaum anzutreffen.

Die Aufgabe dieses Verfahrens ist es, eine jederzeit wiederholbare Messung der Entfernung von der Messstelle bis zum Erdschluss zu ermöglichen. Die Messung soll auch für hochohmige Fehler im Bereich von $k\Omega$ mit etwas reduzierter Genauigkeit möglich sein

Durch die differenzielle Messung wird das System um den aktuellen Arbeitspunkt linearisiert. Übersprechen des Laststromes durch Wandlerfehler wird stark reduziert. Der Einfluss der Kreisströme im Gegensystem durch die übliche unsymmetrische Belastung wird durch die Differenzmessung eliminiert.

Das Verfahren soll anhand des Netzes in Bild 4-12 kurz beschrieben werden (Auszug aus der Patentschrift).

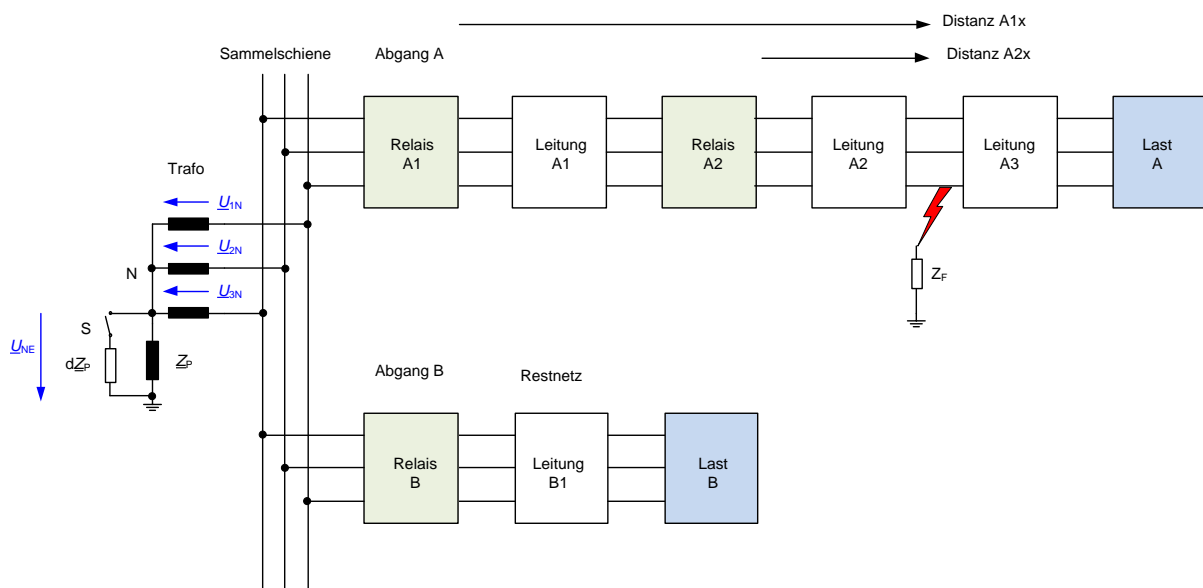


Bild 4-12: Dreiphasiges Netz mit Erdschluss

Die zugehörige Ersatzschaltung mit symmetrischen Komponenten ist in Bild 4-13 dargestellt.

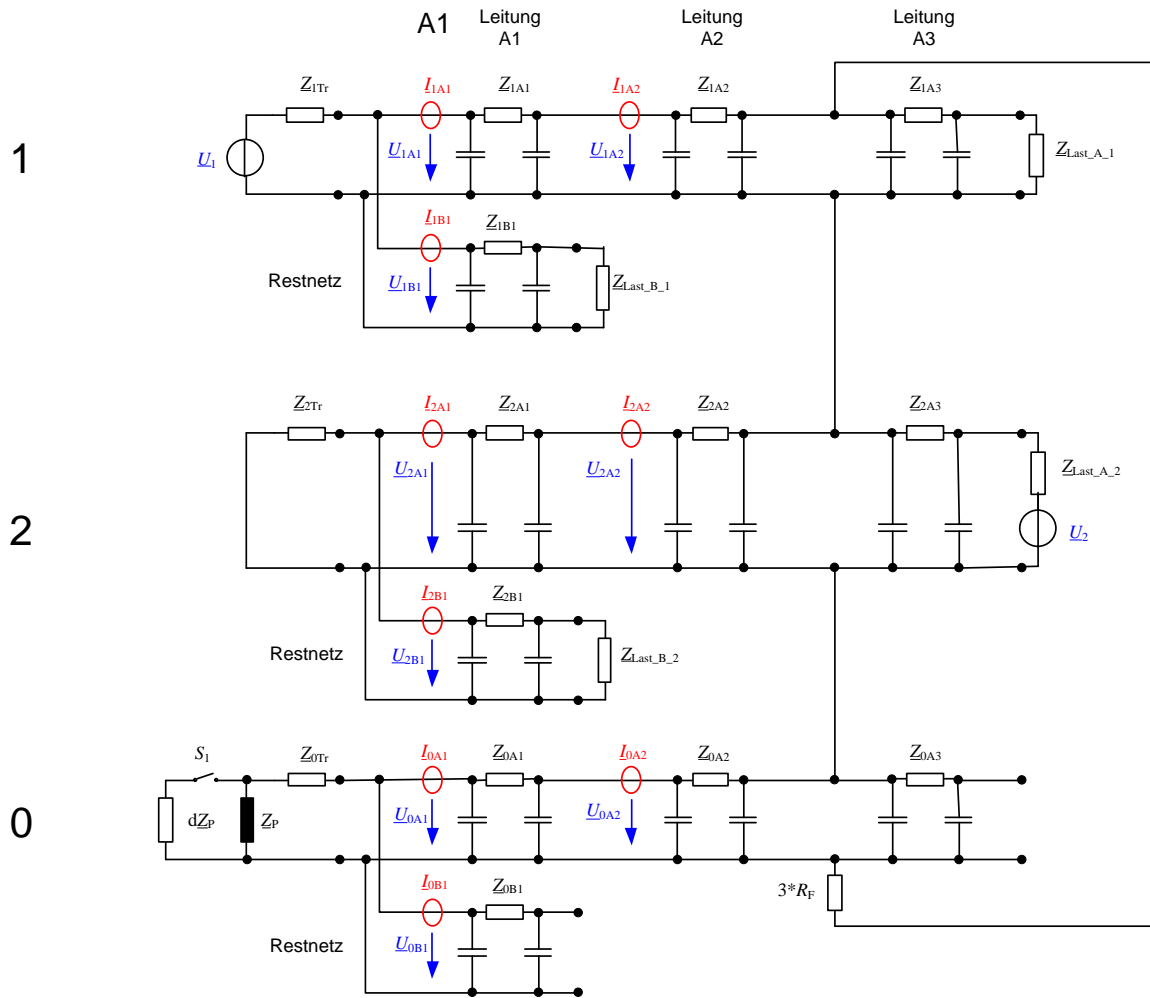


Bild 4-13: Ersatzschaltung des Netzes mit symmetrischen Komponenten

Für die weiteren Betrachtungen wird die Fehlerentfernung vom Umspannwerk aus betrachtet. Hierzu werden die Leitungsabschnitte A1 und A2 zusammengefasst. Außerdem werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Im Abgang werden die Kapazitäten gegen Erde im Mit- und Gegensystem vernachlässigt, da für die Entfernungsbestimmung die Längsimpedanzen der Leitungen wesentlich sind
- Die Entfernung vom Relais bis zur Fehlerstelle ist die Unbekannte x . Die Längsimpedanzen werden mit Hilfe der Leitungsbeträge \underline{Z}'_1 und \underline{Z}'_0 berücksichtigt
- Durch die übliche Symmetrie der Leitungen sind die Längsimpedanzen \underline{Z}'_1 im Mit- und \underline{Z}'_2 im Gegensystem identisch angenommen
- Das Restnetz wird als Kapazität vor der Messung berücksichtigt
- Die verteilten Nullkapazitäten werden zu einer Kapazität C_0 zusammengefasst
- Die Impedanz der Last wird als größer als die Kurzschlussimpedanz des Transformators angenommen. Üblicherweise wird von der Erzeugung \underline{U}_1 bis zum Verbraucher nur ein Spannungsabfall in der Größenordnung von 10 % zugelassen. Die Impedanz der Last ist dann mindestens um den Faktor 10 größer als die Kurzschlussimpedanz des Transformators.

Mit diesen Annahmen ergibt sich das folgende vereinfachte Ersatzschaltbild nach Bild 4-14:

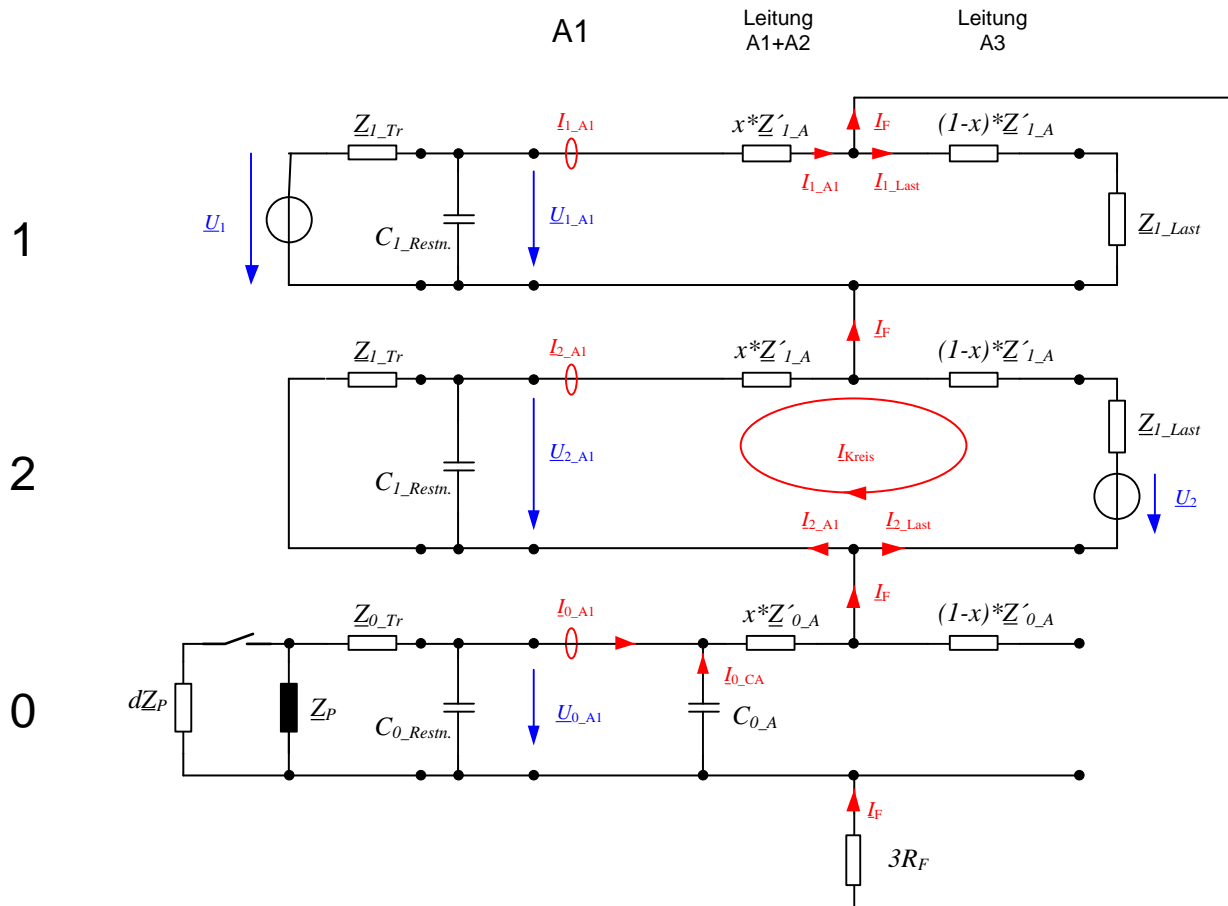


Bild 4-14: Ersatzschaltung des Netzes mit symmetrischen Komponenten

Durch eine unsymmetrische Belastung entstehen im Gegensystem Kreisströme. Diese wirken sich bei einer stationären Auswertung störend aus. Durch eine Linearisierung um den Arbeitspunkt kann man den Einfluss der Kreisströme eliminieren.

Für die weitere Berechnung wird die zuschaltbare Impedanz dZ_P durch eine äquivalente Stromquelle dI_{SE} ersetzt und es werden nur mehr die Strom und Spannungsverläufe als Reaktion des Netzes auf die Stromänderung dI_{SE} betrachtet. Das zugehörige Ersatzschaltbild ist in Bild 4-15 dargestellt.

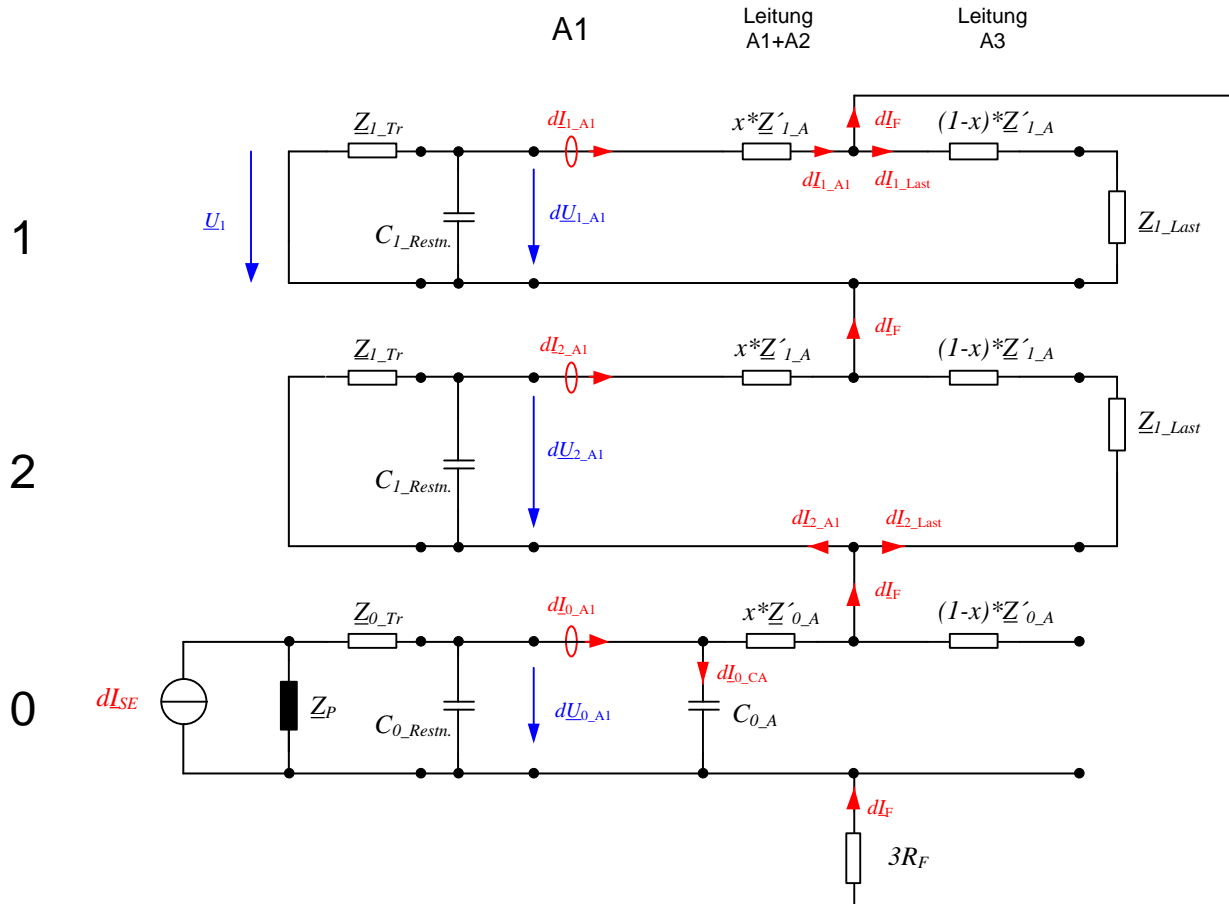


Bild 4-15: Ersatzschaltung des Netzes als Reaktion auf die Stromänderung dI_{SE}

Für den Messpunkt A1 kann die folgende Maschengleichung aufgestellt werden, wobei zusätzlich angenommen wird, dass $dI_{0_CA} \ll dI_F$ ist:

$$-(dU_{0_A1} + dU_{2_A1} + dU_{1_A1}) + (dI_{1_A1} + dI_{2_A1}) x Z'_{1_A} + x Z'_{0_A} dI_F + 3R_F dI_F = 0 \quad (4.14)$$

Wenn man das Gegensystem betrachtet ist erkennbar, dass $dI_{2_A1} \approx dI_F$, da $Z_{l_Last} \gg Z_{l_Tr}$ ist.

$$dU_{0_A1} + dU_{2_A1} + dU_{1_A1} = (dI_{1_A1} + dI_{2_A1}) x Z'_{1_A} + x Z'_{0_A} dI_{2_A1} + 3R_F dI_{2_A1} \quad (4.15)$$

Unter der Annahme, dass der Übergangswiderstand durch einen ohmschen Widerstand nachgebildet wird, kann die Entfernung x von der Messstelle bis zur Fehlerstelle aus dem Imaginärteil der Gleichung (4.15) berechnet werden:

$$x = \frac{\text{imag} \left(\frac{dU_{0_A1} + dU_{1_A1} + dU_{2_A1}}{dI_{2_A1}} \right)}{\text{imag} \left(\frac{dI_{1_A1} + dI_{2_A1}}{dI_{2_A1}} Z'_{1_A} + Z'_{0_A} \right)} \quad (4.16)$$

Da nun die Entfernung x bekannt ist, kann zusätzlich mit Gleichung (4.15) der Fehlerwiderstand abgeschätzt werden:

$$3R_F = \text{real} \left(\frac{(d\underline{U}_{0-A1} + d\underline{U}_{-2-A1} + d\underline{U}_{-1-A1}) - (d\underline{I}_{-1-A1} + d\underline{I}_{-2-A1}) \times \underline{Z}'_{1-A} + x \underline{Z}'_{0-A} d\underline{I}_{-2-A1}}{d\underline{I}_{-2-A1}} \right) \quad (4.17)$$

Vorteile:

- Messung an einer Messstelle ausreichend
- Relativ genau, da eine Differenzmessung verwendet wird
- Funktioniert auch bei höherohmigen Erdschlüssen
- Messung ist wiederholbar

Nachteile:

- Stationäres Verfahren
- Übergangswiderstand wird während der Messung als konstant angenommen

4.2.3 Delta-Verfahren

Ein ähnliches Konzept wird mit dem Delta-Verfahren verfolgt [85][86]

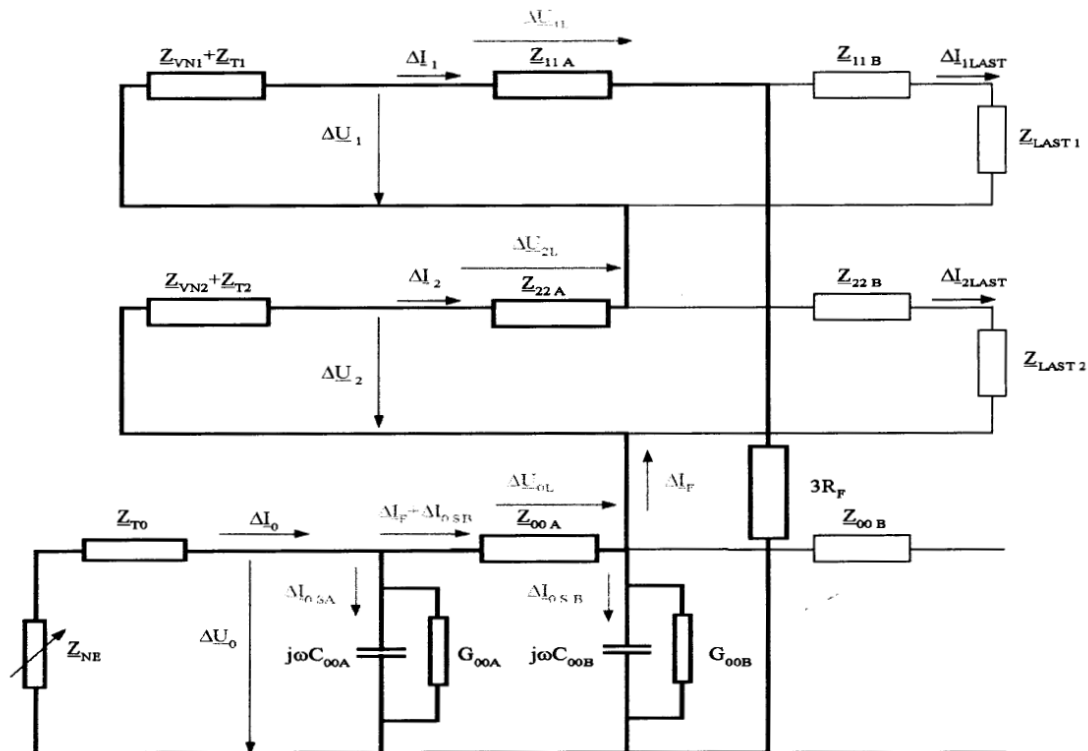


Bild 4-16: Ersatzschaltung des Netzes mit symmetrischen Komponenten

Für die Verkopplung der Komponentensysteme wird nach Bild 4-16 die folgende Gleichung verwendet

$$0 = \Delta\underline{U}_{-1} - \Delta\underline{U}_{-1L} + \Delta\underline{U}_{-2} - \Delta\underline{U}_{-2L} + \Delta\underline{U}_{-0} - \Delta\underline{U}_{-0L} - \Delta\underline{U}_{-R_F} \quad (4.18)$$

Die Spannungsabfälle stehen als Messwerte zur Verfügung. Die Stromkomponenten des Mit-, Gegen – und Nullsystems werden jeweils am Leitungsanfang gemessen. Mit ihrer Hilfe können die Längsspannungsabfälle in (4.18) ersetzt werden und es ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\Delta \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_0 = \Delta \underline{I}_1 \underline{Z}'_{11} l + \Delta \underline{I}_2 \underline{Z}'_{11} l + \left(\Delta \underline{I}_F + \frac{1}{2} \Delta \underline{I}_{0S} \right) \underline{Z}'_{00} l + 3 \Delta \underline{I}_F R_F \quad (4.19)$$

Für die Berechnung von $\Delta \underline{I}_{0S}$ muss die Nulladmittanz der Leitung bekannt sein.

Vorteile:

- Messung an einer Messstelle ausreichend
- Relativ genau, da eine Differenzmessung verwendet wird
- Funktioniert auch bei höherohmigen Erdschlüssen
- Messung ist wiederholbar
- Messung ist im Mittel genauer, da hier der kapazitive Nullstrom des Abganges als Korrekturfaktor verwendet wird.

Nachteile:

- Stationäres Verfahren
- Übergangswiderstand wird während der Messung als konstant angenommen

4.2.4 Weitere Verfahren

Andere wesentliche Verfahren sind zu finden in [181][84]

5 Regelung der Erdschluss-Spule im gesunden Netz

Die Abstimmung der Petersen-Spule muss als Präventivmaßnahme bereits im gesunden Netz erfolgen. Eine Bestimmung der Parameter in einem Netz mit einem niederohmigen Erdschluss ist nicht mehr möglich. Es sind der Ort des Fehlers und der Übergangswiderstand an der Fehlerstelle unbekannt und einer Messung nicht zugänglich. Im Falle eines niederohmigen Fehlers ist die Verlagerungsspannung eingepreßt und die Messung des Nullstromes ist nur an der Sammelschiene möglich.

In der Vergangenheit haben sich die in diesem Abschnitt beschriebenen Regelungsverfahren entwickelt. Den meisten Verfahren ist gemeinsam, dass eine Verstellung der Petersen-Spule notwendig ist.

Mit der Zunahme der Verkabelung in den Verteilnetzen werden einerseits die Maximalwerte der Resonanzkurven immer kleiner und andererseits wird die Kurvenform immer steiler. Die Ursachen für die kleiner werdenden Resonanzmaxima sind in dem wesentlich symmetrischeren Aufbau der Kabelnetze im Vergleich zu Freileitungen zu finden. Durch die Verkabelung ist die mögliche Wärmeabfuhr über das umgebende Erdreich reduziert, sodass die Kabelnetze so ausgelegt werden, dass sie wesentlich kleinere Verluste haben. Dies führt zu den relativ steileren Resonanzkurven.

Durch die immer besser werdende Symmetrie des Netzes werden die Nutzschnalle immer kleiner. Das Übersprechen des Mitsystems auf das Nullsystem im gesunden Netz ist in etwa gleich geblieben. Allerdings wird dieses Übersprechen bei kleinerer Verlagerungsspannung nicht mehr vernachlässigbar. Ein Übersprechen von z. B. 0,2 % ist bei einer Verlagerungsspannung von 10 % vernachlässigbar, aber nicht mehr, wenn die Verlagerungsspannung nur mehr 0,4 % beträgt. Die Laststromänderungen, die das Übersprechen bewirken, führen daher zum Auslösen eines Suchvorganges. Durch das Übersprechen wird einerseits die Bestimmung der Parameter erschwert und andererseits teilweise eine korrekte Abstimmung verhindert. Durch die kleinere Verlagerungsspannung und das Übersprechen werden immer häufigere und größere Verstellungen der Petersen-Spule notwendig. Die Auslegung der Motor-Antriebe der Petersen-Spulen ist aber nicht für derart häufige Regelvorgänge vorgesehen. Angestrebt werden maximal 10 Regelungen pro Tag.

5.1 Vereinfachte Ersatzschaltung mit Hilfe der Symmetrischen Komponenten

In diesem Abschnitt wird kurz veranschaulicht, welche Vereinfachungen erforderlich sind, um zu der bekannten einfachen Ersatzschaltung zu gelangen. Es wird dabei aber erkennbar, dass einige Vernachlässigungen bei kleiner Verlagerungsspannung problematisch sind und genauer betrachtet werden müssen.

Die Ersatzschaltung für die Petersen-Spulenregelung wird anhand des folgenden einfachen Netzes abgeleitet [42]:

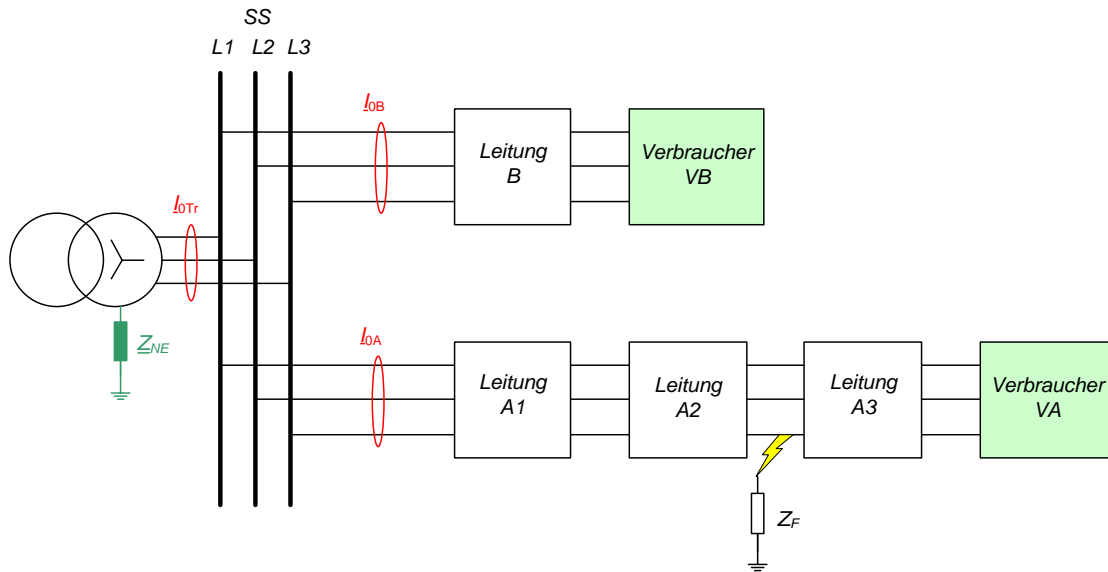


Bild 5-1: Erdschluss in einem einfachen gelöschten Netz

Im folgenden Bild 5-2 ist für einen Leitungsabschnitt aus Bild 5-1 das dreiphasige Ersatzschaltbild dargestellt.

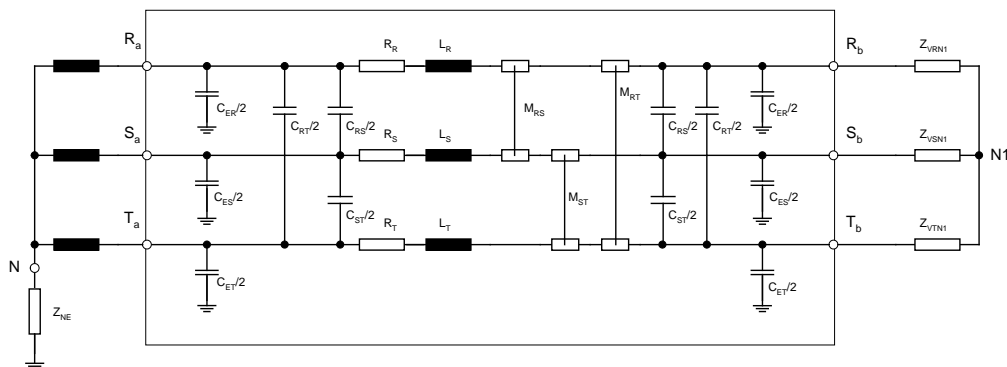


Bild 5-2: Ersatzschaltung des Teilnetzes Petersen-Spule, Trafo, Leitung B und Verbraucher B aus Bild 5-1

Die Anwendung der kompletten Ersatzschaltung der Leitung zur Beschreibung und Berechnung eines ausgedehnten Netzes wird schnell sehr komplex. Durch Transformation auf "Symmetrische Komponenten" [116][127][159][167][95] erhält man für den gesunden Betrieb für den stationären Zustand das in Bild 5-3 dargestellte entkoppelte Netzwerk.

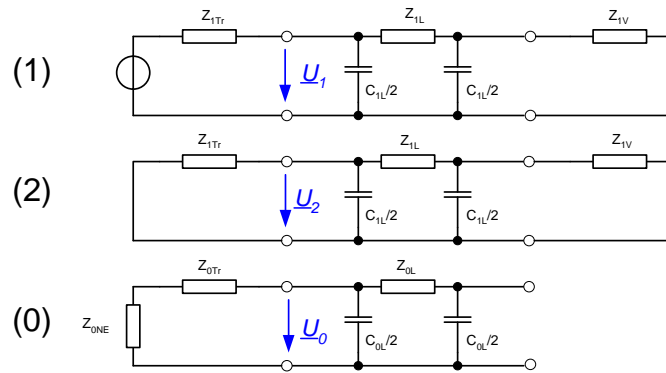


Bild 5-3: Darstellung des gesunden Netzes mit Symmetrischen Komponenten

Wird im Netz nach Bild 5-1 ein Erdschluss eingelegt, so kann das Netz entsprechend Bild 5-4 an der Fehlerstelle erweitert werden [111].

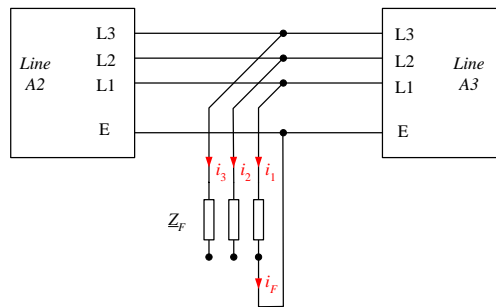


Bild 5-4: Netz mit Erdschluss

Nach Bild 5-4 ergeben sich die folgenden Randbedingungen:

$$u_1 = 0$$

$$i_1 = i_F$$

$$i_2 = i_3 = 0$$

Die Transformation dieser zusätzlichen Schaltung in Symmetrische Komponenten führt zu den folgenden Gleichungen:

$$\underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = \underline{U}_1 = 0 \tag{5.1}$$

$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \underline{I}_1 \tag{5.2}$$

Die Gleichung (5.1) wird erfüllt, wenn an der Fehlerstelle alle drei Komponenten in Serie geschaltet werden. Die Gleichung (5.2) wird erfüllt, indem die Fehlerimpedanz \underline{Z}_F mit dem Faktor 3 multipliziert wird

Im folgenden Bild 5-5 wird das erdschlussbehaftete Netz von Bild 5-1 durch eine Kopplung der drei Systeme an der Fehlerstelle dargestellt.

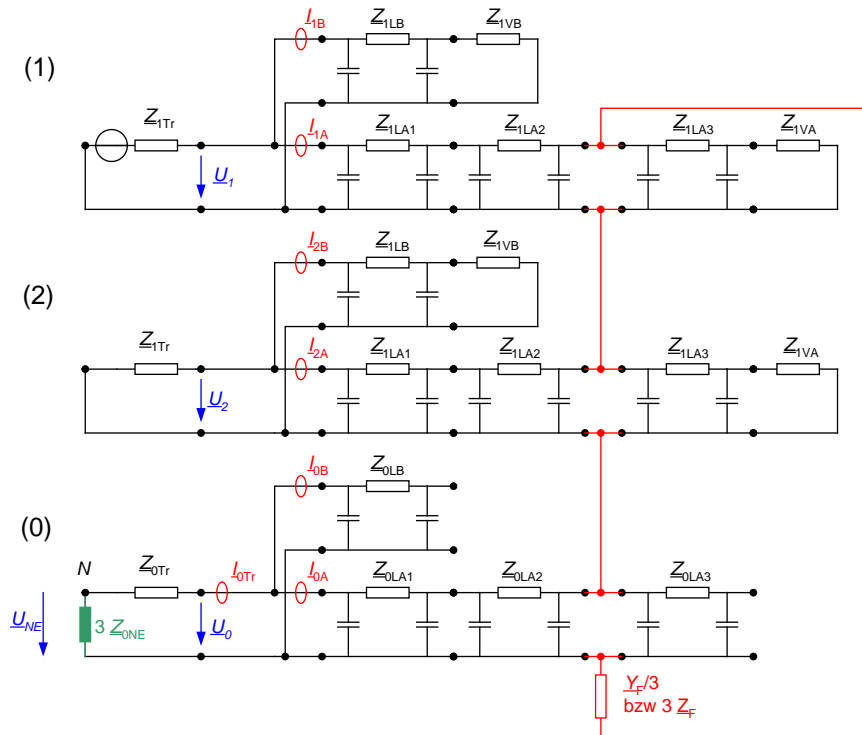


Bild 5-5: Darstellung des erdschlussbehafteten Netzes vom Bild 5-1 mit symmetrischen Komponenten

Für die Betrachtung des Erdschlusses können nun weitere Vereinfachungen getroffen werden. Die Impedanz der Last ist wesentlich größer als die Summe der Mitimpedanz des Trafos und der Leitungsimpedanz vom Umspannwerk bis zur Fehlerstelle. Entlang der Leitung ist bei Nennbetrieb ein Spannungsabfall von 10 % erlaubt. Dies bedeutet, dass die Impedanz der Last mindestens den zehnfachen Wert der Impedanz des Trafos und der Leitungslängsimpedanz hat. Die folgenden Impedanzen können daher zur Impedanz Z_i zusammengefasst werden:

- Mitimpedanz des Trafos
- Längsimpedanzen des Mitsystems der Leitung vom Trafo bis zur Fehlerstelle
- Gegenimpedanz des Trafos
- Längsimpedanz des Gegensystems der Leitung vom Trafo bis zur Fehlerstelle

Dies führt zu dem in Bild 5-6 dargestellten vereinfachten Ersatzschaltbild.

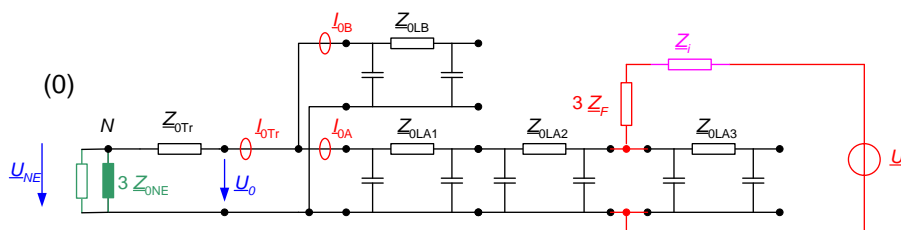


Bild 5-6: Reduktion des Mit- und Gegensystems

Im Bild 5-7 wurde zusätzlich die Leitungslängsimpedanz des Nullsystems der gesunden Abgänge vernachlässigt, wodurch die Kapazitäten der gesunden Abgänge zusammengefasst werden können.

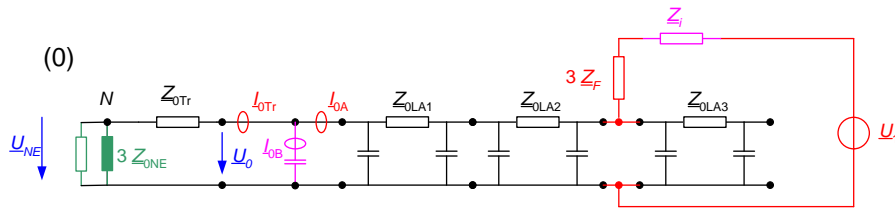


Bild 5-7: Reduktion der gesunden Abgänge

Für die weiteren Betrachtungen werden nun auch die Längs-Nullimpedanzen der Leitung im erdschlussbehafteten Abgang vernachlässigt. Die ohmschen Verluste in den Längsimpedanzen und die des Trafos werden über den Verlustwiderstand parallel zur Petersen-Spule berücksichtigt. Dies ist auch aus Bild 5-5 ersichtlich. Dies führt zu der sehr einfachen Ersatzschaltung von Bild 5-8.

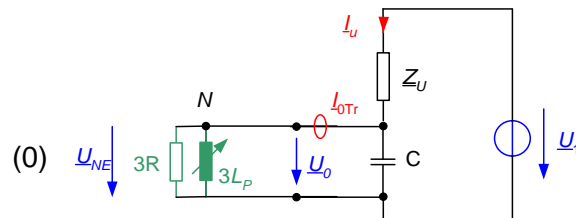


Bild 5-8: Resultierendes Ersatzschaltbild

Die Praxis hat gezeigt, dass die Verluste der Petersen-Spule nur ca. 30 %...45 % ausmachen, der Rest ist, wie oben erwähnt, auf die Verluste im Trafo und auf die Verluste in der Leitung zurückzuführen.

Diese vereinfachte Schaltung ist ein einfacher Spannungsteiler mit einer komplexen Impedanz, an der die Verlagerungsspannung abgegriffen wird. Die Versorgungsspannung des Spannungsteilers ist die Leiter-Erde-Spannung U_1 des gesunden Netzes. Das Ergebnis dieser Ableitung auf Basis der symmetrischen Komponenten deckt sich mit der direkten Ableitung aus dem dreiphasigen Netz im Kapitel 2.7.

Bei einem sehr niederohmigen Erdschluss ist die Spannung am Resonanzkreis mehr oder weniger eingepreßt. Der Strom I_u über die Fehlerstelle ist abhängig von der Art der Kompensation. Bei exakter Abstimmung des Resonanzkreises verbleibt an der Fehlerstelle nur der Wirkstrom. In Bild 5-9 ist rechts das Zeigerdiagramm für den Strom an der Fehlerstelle dargestellt. Im linken Bild ist der Verlauf des Betrages des Stromes über die Fehlerstelle dargestellt, wenn der Wert der Petersen-Spule bei einem satten Erdschluss geändert wird. Auf Grund der Kurvenform wird diese Kurve in der Praxis sehr oft als "V-Kurve" bezeichnet.

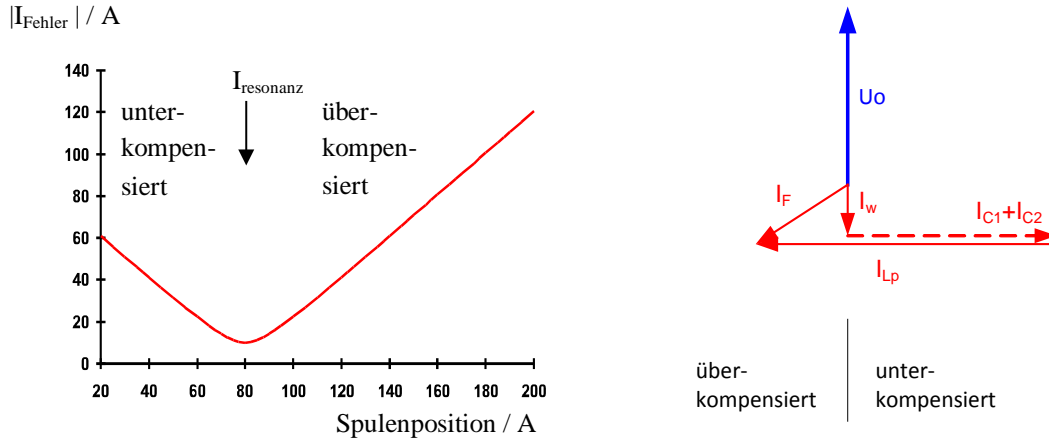


Bild 5-9: Stromverlauf über die Fehlerstelle bei niederohmigem Erdschluss

Der Vorteil dieser Ersatzschaltung ist, dass diese sowohl für den Erdschlussfall als auch für den gesunden Netzbetrieb gültig ist. Im gesunden Betrieb ist \underline{Z}_U durch die kapazitive Unsymmetrie des Netzes gegeben. Bei sehr symmetrischen Netzen wird \underline{Z}_U sehr groß. Der Resonanzkreis wird vom Mitsystem entkoppelt. Eine Bestimmung des Resonanzkreises durch Messen der Verlagerungsspannung ist dann nicht mehr möglich.

Wird der Wert der Spule verändert und nur der Betrag der Verlagerungsspannung aufgetragen, so erhält man die symmetrische "Resonanzkurve", wie in Bild 5-10a) dargestellt. Wird zusätzlich die Phasenverschiebung zwischen \underline{I}_U und \underline{U}_0 berücksichtigt, so erhält man die Ortskurven-Darstellung nach Bild 5-10b). Die ausführliche Ableitung erfolgte in Kapitel 2.7.

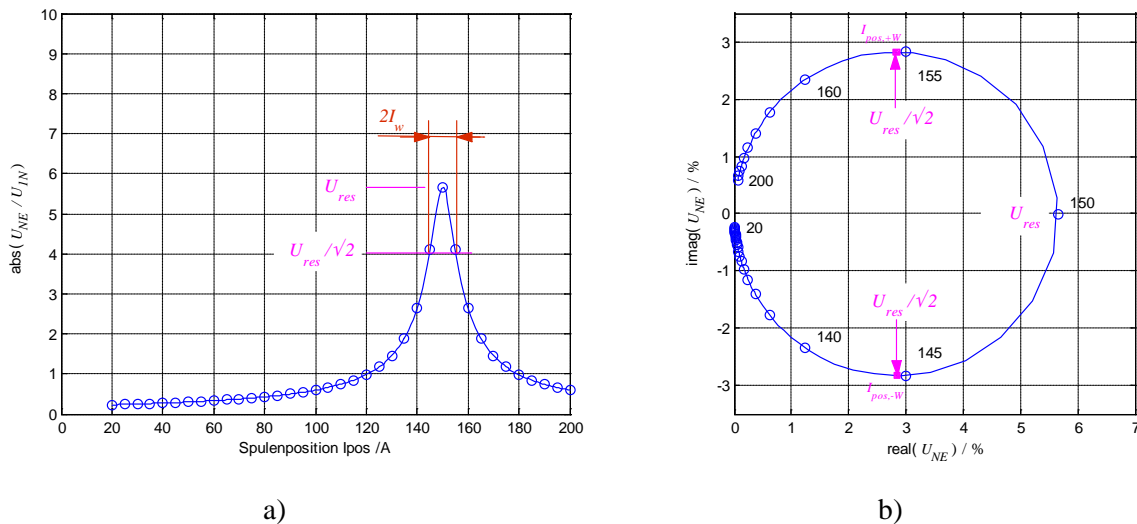


Bild 5-10: Resonanz- und Ortskurve des gesunden Netzes

Die Inverse der Gleichung (2.34) ist in Gleichung (5.3) dargestellt.

$$\frac{1}{\underline{U}_{NE}} = - \frac{\underline{Y}_U + Y_W + j(B_C - B_L)}{\underline{Y}_U \underline{U}_{N1}} \quad (5.3)$$

Interessant für neue Regelalgorithmen ist, dass die Betragsdarstellung der Inversen von \underline{U}_{NE} für ein gesundes Netz auch eine V-Kurve liefert. Dies ist in Bild 5-12 dargestellt.

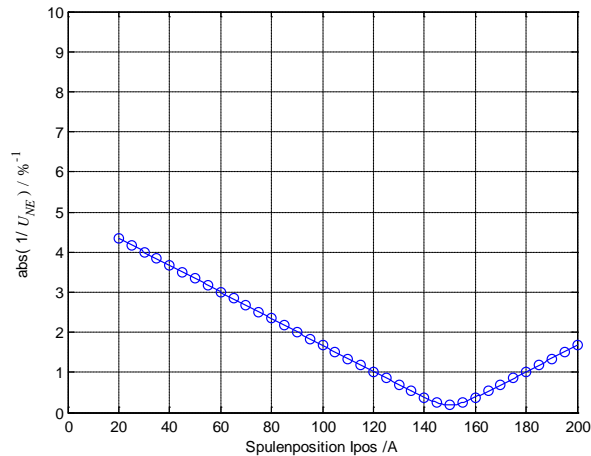


Bild 5-11: V-Kurve des Betrages der Inversen der Verlagerungsspannung

Die Darstellung der Inversen der Verlagerungsspannung liefert in der komplexen Ebene eine Gerade.

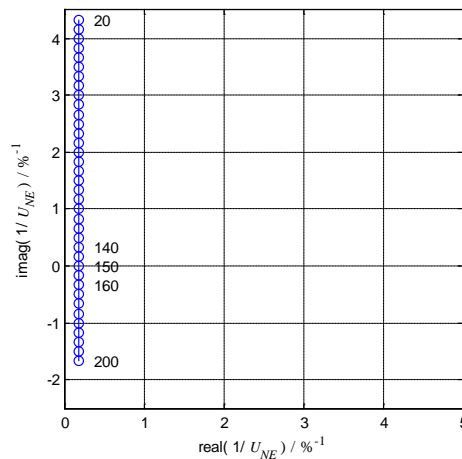


Bild 5-12: Ortskurve der Inversen der Verlagerungsspannung

Das Interessante an diesen beiden inversen Darstellungen der Verlagerungsspannung des gesunden Netzes ist die Ähnlichkeit mit den zugehörigen Darstellungen des Stromes über die Fehlerstelle im Falle eines satten Erdschlusses, siehe Kapitel 2.7.3.

Ein Vorteil dieser Darstellung ist, dass wesentlich leichter und robuster eine Parameterschätzung für den Resonanzkreis [16][41] durchgeführt werden kann.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde angenommen, dass die Spannung \underline{U}_0 oder deren Betrag genau gemessen werden können. Meist ist aber eine genaue Spannungsmessung an der Petersen-Spule nicht möglich. In diesen Fällen wird dann üblicherweise die Spannungsmessung der offenen Dreieckswicklung U_{en} verwendet.

Da die Leistungstransformatoren bzw. die Sternpunktbildner aus Kostengründen nicht für eine genaue Messung ausgelegt sind, unterscheiden sich die gemessene Spannung am Sternpunkt des Trafos, am Sternpunkt des Sternpunktbildners und die gemessene Spannung an der offenen Dreieckswicklung bis zu 5% vom Nennwert. Dies hat damit leider Auswirkungen auf die Regelung der Petersen-Spule, wenn die Berechnung durch "Verstellen der Petersen-Spule" erfolgt.

Der Unterschied der Messungen kann als Offset-Zeiger \underline{U}_x des Ortskurven-Ursprunges in der komplexen Ebene dargestellt werden, wie in Bild 5-13 gezeigt [36].

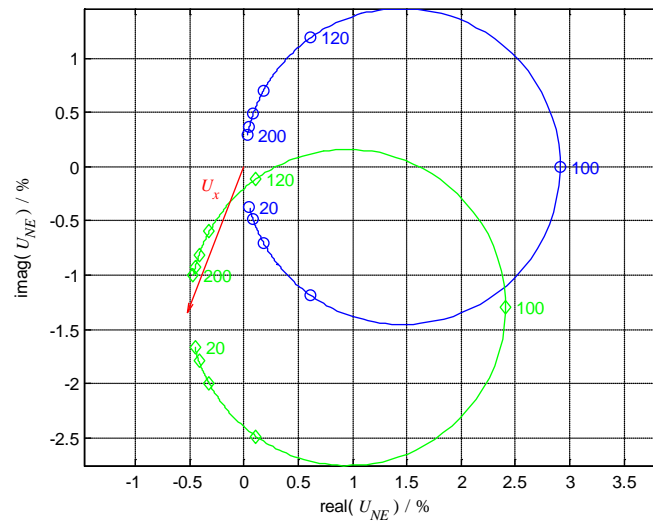


Bild 5-13: Offset des Resonanzkreises durch die Messung von \underline{U}_0 mit der offenen Dreieckswicklung
 blau: Messung an der Petersen-Spule
 grün: Messung an der offenen Dreieckswicklung

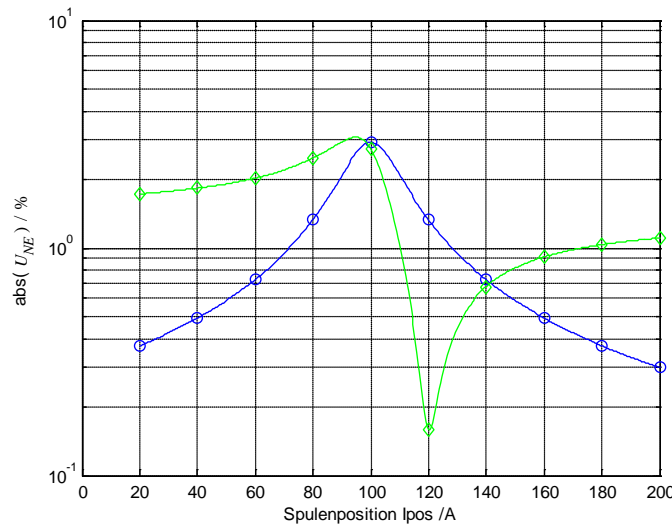


Bild 5-14: Auswirkung des Offsets auf die Resonanzkurve
 blau: Messung an der Petersen-Spule
 grün: Messung an der offenen Dreieckswicklung

Wie aus Bild 5-14 erkennbar ist, bleibt der Regler in der oberen Endstellung hängen, wenn der Startpunkt für die Suche des Resonanzpunktes oberhalb von 125 A liegt. Außerdem stimmen die ermittelten Werte für die Resonanzkurve nicht. Der Regler kann dies leider selbst nicht erkennen. Diese obere Endstellung kann durch den Regler erst verlassen werden, wenn eine größere Umschaltung im Netz erfolgt.

Abhilfe für die Probleme mit den Messungen an der offenen Dreieckswicklung kann mit dem folgenden Algorithmus erreicht werden, der unter anderem auch den Offset des Kreises bestimmt.

Neuer Algorithmus zur Bestimmung des Ortskreis-Offsets*

- Verstellen der Petersen-Spule und Aufnahmen der Messwertepaare für \underline{U}_0 und I_{pos}
- Darstellung der Messpunkte in der komplexen Ebene
- Least-Square Kreis in die Messpunkte einpassen, siehe Anhang
 - Bestimmung des Kreisradius
 - Bestimmung des Kreismittelpunktes
- Projektion der Messwert-Paare auf diesen Kreis in Richtung Kreis-Mittelpunkt
- Ermitteln der folgenden Punkte am Kreis:
 - Resonanzpunkt \underline{U}_{res} und
 - Ursprung der Ortskurve \underline{z}_∞

Die Inverse des Kreises ist eine Gerade. Die Parameter der Messpunkte in Form der Spulenstellung sind auch bekannt. Die Berechnung des Punktes \underline{z}_∞ für unendliche Verstimmung kann aus den drei Punkten $\underline{z}_1, \underline{z}_2, \underline{z}_3$ am Kreis durch den folgenden Ansatz nach Gleichung (5.4) erfolgen.

$$\frac{1}{\underline{z}_2 - \underline{z}_\infty} - \frac{1}{\underline{z}_1 - \underline{z}_\infty} = k \left(\frac{1}{\underline{z}_3 - \underline{z}_\infty} - \frac{1}{\underline{z}_1 - \underline{z}_\infty} \right) \quad (5.4)$$

Mit dem Verhältnis

$$k = \frac{I_{pos2} - I_{pos1}}{I_{pos3} - I_{pos1}} \quad (5.5)$$

ergibt sich die folgende Lösung

$$\underline{z}_\infty = \frac{\underline{z}_3(\underline{z}_2 - \underline{z}_1) - k \underline{z}_2(\underline{z}_3 - \underline{z}_1)}{\underline{z}_2 - \underline{z}_1 - k(\underline{z}_3 - \underline{z}_1)} \quad (5.6)$$

Der Punkt \underline{z}_∞ stellt den Fehler-Zeiger \underline{U}_x in Bild 5-13 dar.

\underline{U}_{res} ist am Ortskreis gegenüber dem Punkt \underline{z}_∞ zu finden. Zusätzlich muss die Verbindungsgerade $\overline{\underline{z}_\infty \underline{U}_{res}}$ senkrecht zur Geraden nach Gleichung (5.4) sein.

Erneute Berechnung des Resonanzpunktes durch Auswertung der Zeigerlängen für die einzelnen Spulenstellungen unter Berücksichtigung des neuen Punktes \underline{z}_∞ .

Durch diese Maßnahme kann der Offset der Resonanzkurve kompensiert werden.

Ein ähnliches Problem entsteht, wenn im 110-kV-Netz mit mehreren E-Spulen die Kompensation an unterschiedlichen Stellen gemessen wird. Durch die Ungenauigkeit der Leistungstransformatoren erfolgt jeweils eine unterschiedliche Berechnung der Verlagerungsspannung. Auch in diesen Fällen lieferte dieses neue Verfahren korrekte Ergebnisse.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

5.2 Betrachtungen zur Über- und Unterkompensation

Aus historischen Gründen wird üblicherweise die Überkompensation verwendet.

Die reinen Freileitungsnetze besitzen durch die Anordnung der drei Leiter gegenüber Erde immer eine Unsymmetrie. Die Verlagerungsspannung erreicht in diesen reinen Freileitungsnetzen oft Werte über 30 %.

Die Erdschlussschwelle wird sehr oft auf 25 % eingestellt. Dies bedeutet, dass bei Abstimmung in der Nähe des Resonanzpunktes bei diesen Netzen eine Erdschlussmeldung erzeugt wird, obwohl kein Erdschluss im Netz vorhanden ist. Um diese Erdschlussmeldung zu beseitigen, besteht nun die Möglichkeit, das Netz mit entsprechender Über- oder Unterkompensation zu betreiben, sodass die Verlagerungsspannung kleiner als die eingestellte Erdschluss-Schwelle wird. Bei Überkompensation liefert die Petersen-Spule zu viel induktiven Strom über die Fehlerstelle, d. h., es wird entsprechend Bild 2-11 der kapazitive Strom zu viel kompensiert.

Betrachtet man nun das Verhalten bei Erdschluss, so können entsprechend Bild 5-15 die folgenden Fälle unterschieden werden:

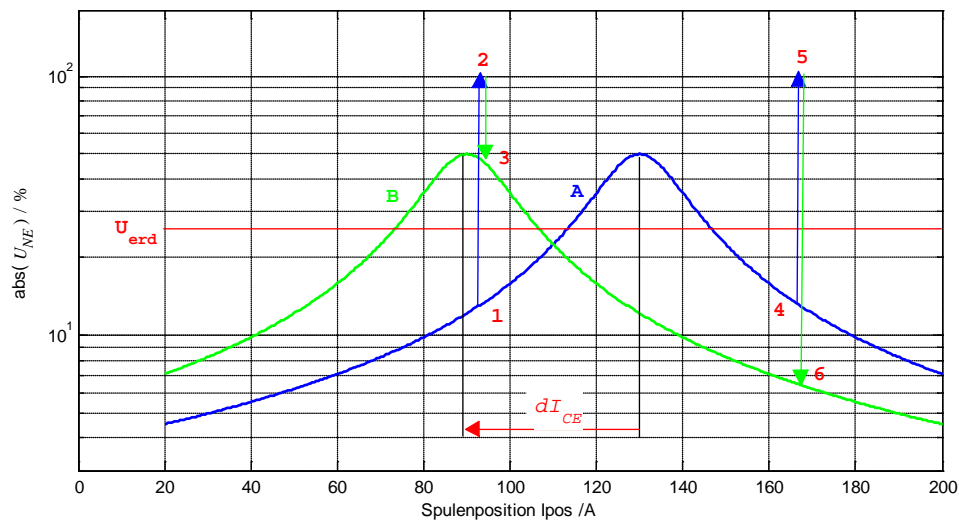


Bild 5-15: Verhalten der Erdschlussmeldung abhängig von der Kompensation bei stark unsymmetrischen Netzen

Unterkompensation:

Während des gesunden Betriebes im Punkt 1 der blauen Resonanzkurve A erfolgt durch die Unterkompensation keine Erdschlussmeldung. Bei Erdschlusseintritt steigt die Verlagerungsspannung auf den Wert von ca. 100 % (Punkt 2).

Bei der Eingrenzung des Fehlers wird ein Leitungssegment mit der Größe dI_{CE} abgeschaltet. Durch die Abschaltung verschiebt sich die Resonanzkurve des gesunden Netzes nach links und ergibt die grüne Resonanzkurve B. Wurde das richtige Segment abgeschaltet, dann vermindert sich die Verlagerungsspannung vom Erdschluss auf den Wert der neuen Resonanzkurve B (Punkt 3). Es kann nun passieren, dass durch die Abschaltung der Bereich erreicht wird, in dem die Verlagerungsspannung im gesunden Netz B größer als die Erdschlussschwelle ist. Die Erdschlussmeldung wird also nicht beseitigt, obwohl das richtige Segment abgeschaltet wurde.

Als Folge wird weitergesucht und es werden nun auch gesunde Segmente abgeschaltet.

Überkompensation

Während des gesunden Betriebes (Punkt 4) erfolgt auch hier keine Erdschlussmeldung.

Während des Erdschlusses steigt die Verlagerungsspannung wieder auf einen Wert von ca 100% (Punkt 5).

Wie bereits oben erwähnt, werden während der Suche Leitungssegmente abgeschaltet und die ursprüngliche Resonanzkurve A verschiebt sich nach links und ergibt die grüne Resonanzkurve B.

Sobald das fehlerhafte Segment abgeschaltet wird, sinkt die Verlagerungsspannung unter die Erdschluss-Schwelle (Punkt 6). Der Punkt 6 bewegt sich durch die Abschaltungen auf der neuen Resonanzkurve B immer vom Resonanzmaximum weg. Die Erdschlussmeldung wird also sofort beseitigt, wenn das fehlerhafte Segment abgeschaltet wird.

Schlussfolgerung:

In der Vergangenheit hat man die Netze wegen der hohen Verlagerungsspannung vorzugsweise mit Überkompensation betrieben.

Die heutigen Netze sind durch die Verkabelung wesentlich symmetrischer. Man kämpft eher mit dem Problem, dass die Verlagerungsspannung für die Regelung zu gering ist. Sehr oft werden Werte unter 0,3 % erreicht [47].

Hier wird einerseits bei sehr großen Netzen die Strategie verfolgt, den Strom an der Fehlerstelle zu minimieren, d. h. direkt auf Resonanz abzustimmen. In diesem Fall verbleibt nur der durch passive Kompensation nicht zu beseitigende Wirkanteil I_W in der Größenordnung von 3 % bis 4 % des Stromes I_{CE} .



Bild 5-16: Abschaltbarer kapazitiver Strom abhängig von der Art der Kompensation

Links: Überkompensation; Rechts: Unterkompensation

Um die Gefährdung an der Fehlerstelle entsprechend der zulässigen Berührungsspannung nicht zu überschreiten, darf während der Fehlersuche der erlaubte Reststrom nicht überschritten werden. Durch jede Abschaltung eines Segmentes bewegt sich der Strom an der Fehlerstelle in Richtung Überkompensation.

Wenn ein 20-kV-Netz bereits mit 20 A Überkompensation betrieben wird, können bei einem erlaubten Reststrom von 60 A ca. 40 A an Leitungssegmenten (dI_{CE} in Bild 5-16 links) abgeschaltet werden. Wird hingegen das Netz mit 20 A Unterkompensation betrieben, so kann im gleichen Netz ca. 80 A kapazitiver Strom (dI_{CE} in Bild 5-16 rechts) abgeschaltet werden, ehe der erlaubte Reststrom überschritten wird.

Heute erfolgt in einigen Ländern, wie z. B. in Italien, eine automatische Abschaltung von Leitungsegmenten auf Stickleitungen mit Hilfe von Reclosern. In diesen Fällen ist es wesentlich, möglichst viel abschalten zu können, bevor die erlaubten Grenzwerte überschritten werden. In diesen Fällen werden die Netze daher unterkompensiert betrieben.

5.3 Art der Kompensation: prozentual versus fix

Aus historischen Gründen wird üblicherweise die prozentuelle Überkompensation verwendet.

Es hat sich gezeigt, dass die Absenkung bei Freileitungen bei kleinen und bei großen Netzen in etwa identisch ist, wenn man mit prozentueller Kompensation arbeitet. Bei den Netzen in der Vergangenheit mit sehr großer Verlagerungsspannung war dies eine wesentliche Anforderung.

Zusätzliche Probleme treten sofort auf, wenn verteilte Petersen-Spulen vorhanden sind. In diesem Fall müssen dann die aktuellen Einstellwerte der verteilten Petersen-Spulen dem Regler mitgeteilt werden. Dies kann eine sehr große Herausforderung an die Messwertübertragung darstellen.

Es ist auch schwer, den richtigen Einstellwert zu finden, wenn sich die Netzgrößen sehr stark ändern. Eine Überkompensation von 10 % in einem Netz von 100 A liefert an der Fehlerstelle nur einen Blindanteil von 10 A. Hingegen liefert die gleiche Einstellung bei einem Netz von 800 A einen Blindstrom von 80 A, was üblicherweise weit über dem erlaubten Reststrom liegt.

Bei den heutigen Netzen ist die hohe Verlagerungsspannung im gesunden Netz keine Herausforderung mehr. Vielmehr ist die definierte Größe des Blindstromes an der Fehlerstelle wesentlich. Durch eine fixe Überkompensation von z. B. 10 A wird gewährleistet, dass der Regler, unabhängig von der Netzgröße und den verteilten Petersen-Spulen, die Abstimmung so durchführt, dass im Erdschlussfall nur ein Blindstrom von 10 A fließt. Der Wirkstrom ist durch eine passive Kompensation nicht beeinflussbar. Es ist aber gewährleistet, dass der 50-Hz-Anteil des Reststromes die gewünschten Werte nicht überschreitet.

5.4 Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem

In den folgenden Bildern ist die Auswirkung des Übersprechens des Laststromes auf das Nullsystem dargestellt. Im Bild 5-17 ist oben der Verlauf der Verlagerungsspannung über eine Woche dargestellt. Leicht sind die arbeitsfreien Tage Samstag und Sonntag zu identifizieren.

Aus der zugehörigen Spulenposition ist erkennbar, dass diese mehr oder weniger während des gesamten Zeitraumes konstant war.

Es wurden in diesem Netz auch sonst keine Schalthandlungen durchgeführt.

Es sind in der Nullspannung erkennbar:

- Beginn der Arbeit
- Vormittags - Pause
- Mittags - Pause
- Ende der Arbeit
- Ende TV

In der Nacht ist die Verlagerungsspannung so klein, dass eventuell im gesamten Verstellbereich der Petersen-Spule nach einer ausreichenden Verlagerungsspannung gesucht werden muss. Für dieses Beispiel wird eine Stromeinspeisung für die Regelung empfohlen, da die Anzahl der Suchzyklen während des Tages zu groß ist.

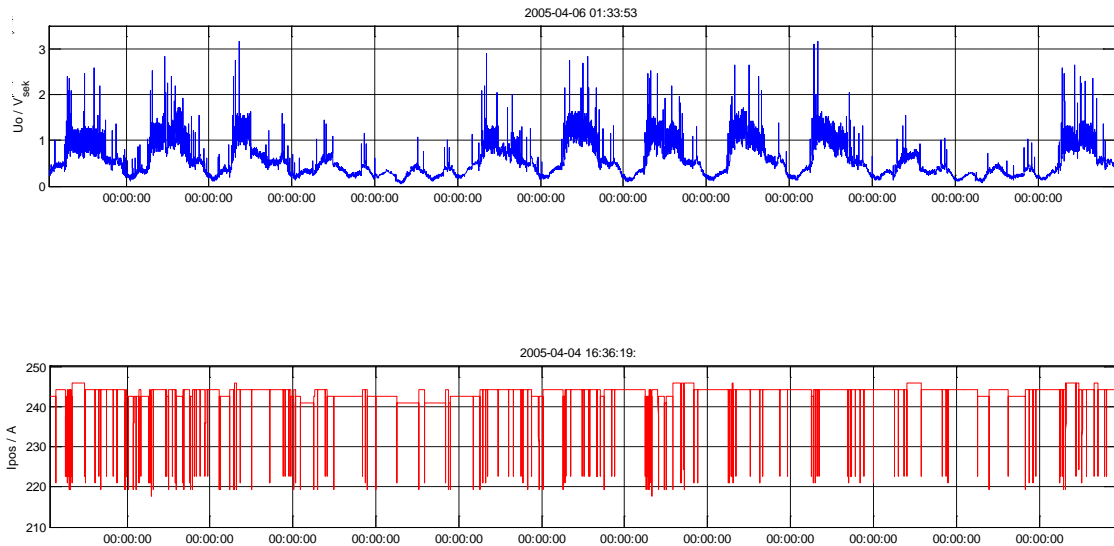


Bild 5-17: Übersprechen des Laststromes auf die Nullspannung: 1 Woche

Im Bild 5-18 ist der Verlauf während eines Tages dargestellt.

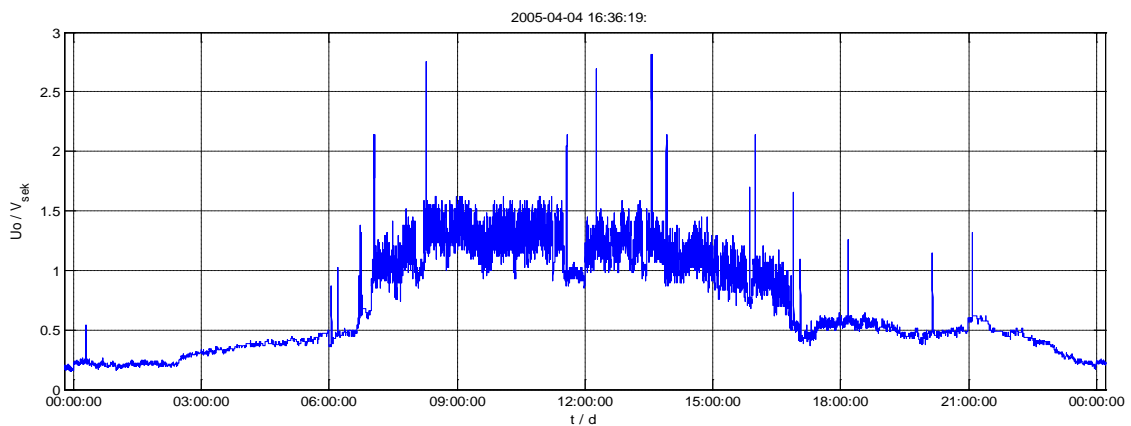


Bild 5-18: Übersprechen des Laststromes auf die Nullspannung: 1 Tag

In [16] wurden die Ursachen für das Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem anhand von Bild 5-19 genauer untersucht.

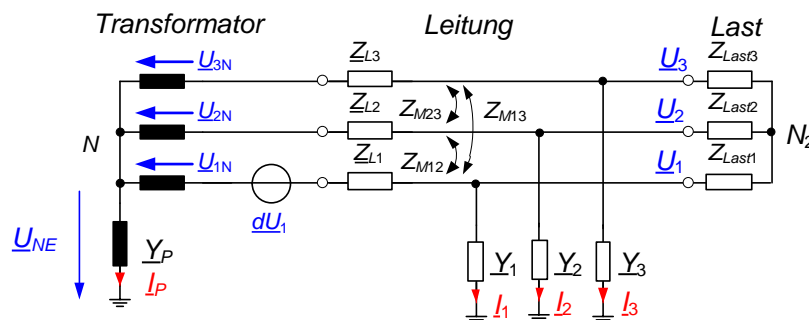


Bild 5-19: Einfaches Ersatzschaltbild für die Untersuchung des Übersprechens durch den Laststrom

Die folgenden Varianten wurden genauer betrachtet:

- a) Spannungsunsymmetrie dU_1 in einer Phase z. B. durch den Transformator; alle anderen Komponenten sind symmetrisch aufgebaut

Die Unsymmetrie liefert bei Verstellung der Petersen-Spule die übliche Resonanzkurve

- b) Natürliche Unsymmetrie in der Nähe der Last, symmetrische Leitung und symmetrische Last

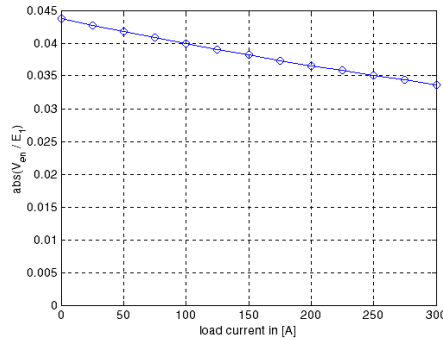


Bild 5-20: Verlagerungsspannung infolge einer kapazitiven Unsymmetrie und nicht vernachlässigbarer Serienimpedanz der Leitung

Durch den symmetrischen Laststrom erfolgt ein zusätzlicher Spannungsabfall entlang der symmetrischen Leitung. Die Verlagerungsspannung wird dadurch kleiner. Der erlaubte Spannungsabfall entlang der Leitung liegt in der Größenordnung bis zu 10%. Dieser Spannungsabfall ist auch aus dem Bild 5-3 zu erkennen. Wesentlich ist die Spannung am Kopplungspunkt der drei Systeme.

- c) Natürliche Unsymmetrie in der Nähe der Last, symmetrische Leitung und symmetrische Last

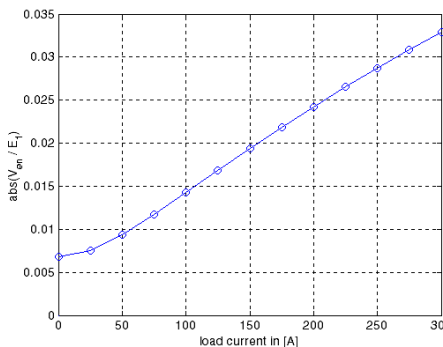


Bild 5-21: Verlagerungsspannung infolge unsymmetrischer Serienimpedanz der Leitung

In diesem Fall ist die Verlagerungsspannung ohne Laststrom klein. Bei zunehmendem Laststrom steigt der unsymmetrische Spannungsabfall entlang der Leitung. Dadurch entsteht eine zusätzliche Unsymmetriespannung am Kopplungspunkt. Dies passiert auch wenn die Last selbst völlig symmetrisch ist.

Ursache für die unsymmetrische Längsimpedanz sind die unterschiedlichen magnetischen Kopplungen (d. h. die Koppelimpedanzen zwischen Mit-/Gegensystem und Nullsystem Z_{10} und Z_{20}) bei der Verlegung der Kabel bzw. der Freileitungen [16].

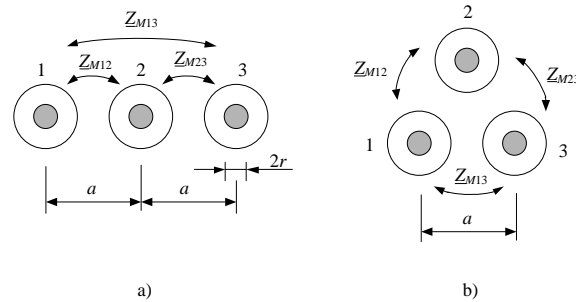


Bild 5-22: Beispiel für die magnetische Kopplung in Kabel bzw. Freileitungen abhängig von der Verlegungsart

Für die Übertragung der elektrischen Energie sind aufgezählten Einflüsse vernachlässigbar. Für die Regelung der Petersen-Spule sind diese aber nicht mehr vernachlässigbar.

In der Ableitung des vereinfachten Resonanzkreises aus Bild 5-5 sind auch einige Vernachlässigungen getroffen worden. Die Auswirkung des zusätzlichen Spannungsabfalles von der Einspeisung bis zum Ort der natürlichen Unsymmetrie durch den Laststrom wurde als konstant angenommen.

Fazit: Für die genaue Betrachtung des Nullsystems während des gesunden Betriebes ist es wesentlich zu wissen, welche Vernachlässigungen getroffen wurden.

Detailliertere Informationen und zusätzliche Beispiele zum Thema "Übersprechen" sind zu finden in [16][41][47].

5.5 Bekannte Berechnungs- und Regelungsverfahren

Basierend auf den obigen Darstellungen sind unterschiedliche Algorithmen zur Abstimmung der Petersen-Spule entwickelt worden

- Einlegen eines definierten Erdschlusses im Umspannwerk
(Wird nur mehr für Prüfungen der Regelung und des tatsächlichen Reststromes eingesetzt)
- Suche nach dem Maximum des Betrages von U_0
- Parameterschätzung aus der Resonanzkurve
- Parameterschätzung aus dem Betrag der Inversen der Resonanzkurve
- Berechnung der Ortskurve ohne Stromeinspeisung
- Berechnung der Verstimmung mit einer 50-Hz-Stromeinspeisung
- Auswertung des Ausgleichsvorganges nach einem Erdschluss*

Neue Verfahren sind:

- Parameterschätzung aus der Inversen der Ortskurve in der komplexen Ebene*
- Berechnung der Verstimmung mit Frequenzgenerator mit fixen Frequenzanteilen **

In diesem Kapitel wird auch die Reststrom-Kompensation behandelt.

Auf den folgenden Seiten erfolgen eine kurze Beschreibung der Verfahren sowie eine Gegenüberstellung deren Vor- und Nachteile.

* Vom Autor verbessertes Verfahren

** Vom Autor patentiertes Verfahren

5.5.1 Suche nach dem Maximum des Betrages von U_0

Mit den ersten analogen Reglern wurden durch Verstellen der Petersen-Spule zuerst eine positive Steigung und danach das Maximum der Resonanzkurve in Bild 5-23 gesucht. Im Resonanzmaximum wurde dann eine zeitabhängige Verstellung in Richtung der gewünschten Kompensation durchgeführt.

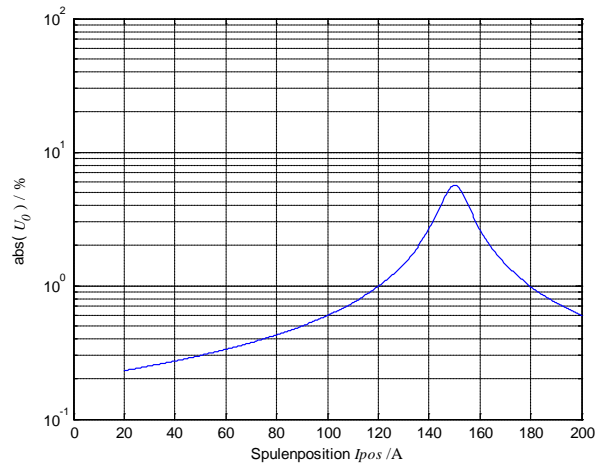


Bild 5-23: Resonanz des gesunden Netzes

Vorteile:

- Einfaches Verfahren
- Analogspeicher und einfache Zeitglieder sind für die Abstimmung ausreichend
- Ein konstantes Übersetzungsverhältnis über den gesamten Verstellbereich der Spule ist nicht erforderlich

Nachteile:

- Eine ausreichende Verlagerungsspannung ist notwendig
- Störanfällig bei kleinen Verlagerungsspannungen
- Probleme bei der Erkennung von Schalthandlungen während der Regelung → mehrmaliger Suchvorgang ist erforderlich
- Erkennt nicht alle Schalthandlungen im abgestimmten Zustand

5.5.2 Parameterschätzung aus der Resonanzkurve*

Die Resonanzkurve ist prinzipiell durch drei Punkte festgelegt. Allerdings ist eine exakte Erfassung der Spulenstellung und der Verlagerungsspannung erforderlich. Bei diesem Verfahren wird angenommen, dass die Petersen-Spule ein konstantes Übersetzungsverhältnis über den gesamten Verstellbereich der Spule hat.

Vorteile:

- Schalthandlungen werden bereits während der Abstimmung erkannt

* Vom Autor verbessertes Verfahren

Nachteile:

- Schwierigkeiten in der Umgebung des Wendepunktes der Resonanzkurve
- Empfindlichkeit auf Störsignale
- Aufwendige Schätzalgorithmen, die Lösung von nichtlinearen Gleichungen ist erforderlich

5.5.3 Parameterschätzung aus der Inversen der Resonanzkurve*

Um einfachere und robustere Algorithmen zur Parameterschätzung verwenden zu können, wird die Inverse der Verlagerungsspannung verwendet. Dieses Verfahren [16] ist wesentlich robuster als die Parameterschätzung mit der Resonanzkurve. Derzeit stellt diese Methode den Industriestandard für Produkte mit Regelung unter Verwendung der Resonanzkurve dar. Die genaue Abschätzung der Parameter erfolgt dabei weiterhin nach der $\sqrt{2}$ -Methode.

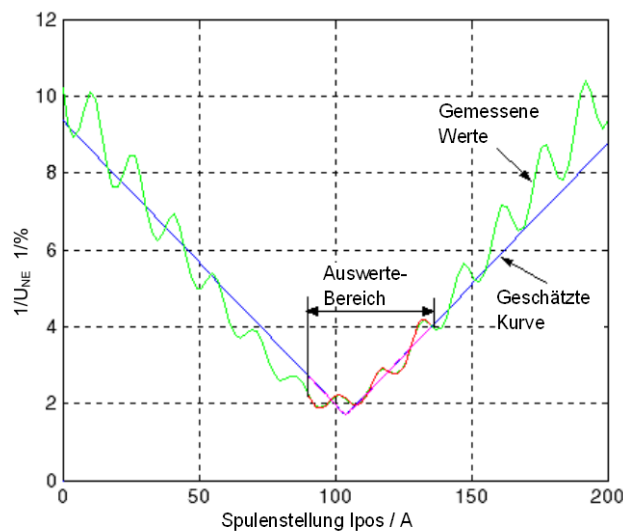


Bild 5-24: Inverse der Verlagerungsspannung mit Störungen

In den Bereichen weit entfernt vom Resonanzpunkt kann die Parameterschätzung mit einem Ausgleichspolynom 1. Ordnung (Gerade) und in der Nähe des Resonanzpunktes mit einem Ausgleichspolynom 2. Ordnung (Hyperbel) erfolgen.

Vorteile:

- Geringerer Rechenaufwand
- Robuster gegen Störsignale

Nachteile:

- Eine ausreichende Verlagerungsspannung ist notwendig
- Bei kleiner natürlicher Unsymmetrie empfindlich auf Übersprechen durch Lastströme

* Vom Autor verbessertes Verfahren

5.5.4 Parameterschätzung aus der Ortskurve in allgemeiner Lage*

Bei diesem Verfahren wird die Verlagerungsspannung nach Betrag und Winkel gemessen. Abhängig von der natürlichen Unsymmetrie erhält man einen Ortskreis in allgemeiner Lage in der komplexen Ebene, wie in Bild 5-25 dargestellt.

Erfolgt die Messung der Verlagerungsspannung an der E-Spule, so erhält man einen Kreis, der durch den Nullpunkt geht. Erfolgt hingegen die Messung durch die offene Dreieckswicklung, so ist der Ortskreis zusätzlich um den Offset \underline{U}_X verschoben.

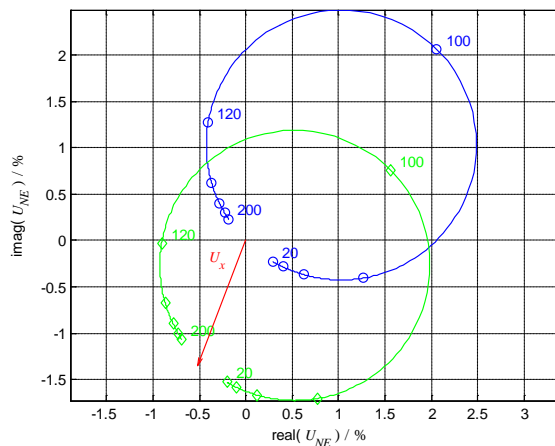


Bild 5-25: Ortskreis in allgemeiner Lage.

blau: gemessen an der Messwicklung der Petersen-Spule

grün: gemessen an der offenen Dreieckswicklung

Variante zur Berechnung der Parameter:

- Messen von \underline{U}_0 nach Betrag und Winkel für unterschiedliche Spulenstellungen I_{pos}
- Schätzung eines Least-Square-Kreises nach einer der Methoden, die im Anhang aufgeführt sind
- Bestimmung des Kreismittelpunktes, des Resonanzpunktes und des Punktes für $I_{pos} = 0A$
- Projektion der gemessenen I_{pos} auf diesen Kreis. Die Projektion erfolgt in Richtung des Kreismittelpunktes
- Bestimmung der I_{pos} , bei dem die Spannung den Wert $U_{res}/\sqrt{2}$ annimmt $\Rightarrow I_W$
- Aus dem Kreisdurchmesser und I_W wird die Unsymmetrie bestimmt.
- I_{CE} kann aus dem I_{pos} im Resonanzpunkt abgelesen werden.
- Berechnung der aktuellen Verstimmung aus der aktuellen Spulenposition

Vorteile:

- Funktioniert für Messung von \underline{U}_0 sowohl an der Petersen-Spule als auch bei Messung über die offene Dreieckswicklung
- Durch die Ausgleichsrechnung robuster gegen Störsignale

* Vom Autor verbessertes Verfahren

Nachteile:

- Eine ausreichende Verlagerungsspannung ist notwendig
- Rechenaufwendig
- Messung von \underline{U}_0 nach Betrag und Winkel erforderlich
- Bei kleiner natürlicher Unsymmetrie empfindlich auf Übersprechen durch Lastströme

5.5.5 Parameterschätzung aus der Inversen der Ortskurve in allgemeiner Lage*

In Bild 5-26 ist die Inverse der Ortskurve in allgemeiner Lage dargestellt.

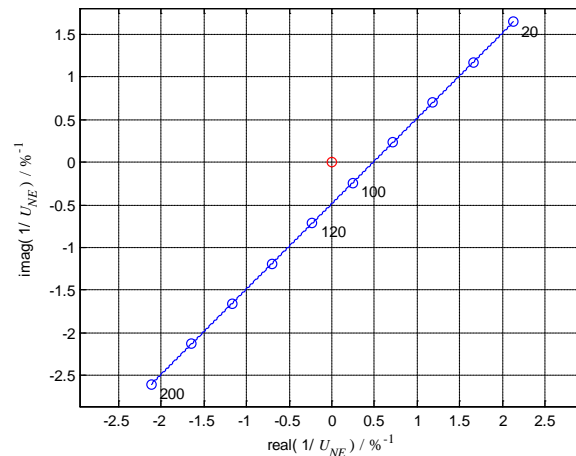


Bild 5-26: Inverse der Ortskurve

Wenn der Ortskreis durch den Nullpunkt geht, dann stellt die Inverse der Ortskurve eine Gerade dar.

Für diese Geraden in allgemeiner Lage sind entsprechende Ausgleichsgerade relativ einfach zu berechnen.

Der Normalen-Abstand der Geraden vom Ursprung entspricht dem Wirkanteil.

Für das Berechnen der Ausgleichsgeraden darf auf Grund der allgemeinen Lage der Geraden in der komplexen Ebene keine einfache Least-Square-Methode verwendet werden.

Möglichkeiten zur Berechnen der Ausgleichsgeraden:

- Methode 1
 - Berechnung des Winkels mithilfe der Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis – PCA) [238]
 - Ermittlung des Winkels
 - Drehen aller Punkte in Richtung der reellen Achse
 - Berechnung der Geraden mit Hilfe der Least-Square Methode
 - Berechnung des Wirkstromes I_W
 - Projektion der Messpunkte auf die reelle Achse
 - Skalierung der Geraden entsprechend der Spulenposition
 - Berechnung der aktuellen Verstimmung

* Vom Autor verbessertes Verfahren

- Methode 2
 - Direkte Berechnung der Parameter durch Verwendung des "Totalen-Least-Squares"
 - Bestimmung des Abstandes der Geraden vom Nullpunkt
 - Skalierung der Geraden entsprechend der Spulenposition
 - Berechnung der aktuellen Verstimmung

Die Methode 2 ist mit einem wesentlich geringeren Rechenaufwand verbunden.

Vorteile:

- Durch die Ausgleichsrechnung robuster gegen Störsignale
- Ausgleichsgerade leichter zu berechnen
- Einfache Prüfung, ob ein Offset vorhanden ist.

Nachteile:

- Eine ausreichende Verlagerungsspannung ist notwendig
- Rechenaufwendig
- Messung von \underline{U}_0 nach Betrag und Winkel erforderlich
- Bei kleiner natürlicher Unsymmetrie empfindlich auf Übersprechen durch Lastströme
- Kompensation des Offsets der offenen Dreieckswicklung ist komplizierter

5.5.6 Berechnung der Ortskurve durch stufige Änderung der Spulenstellung

Eine kurzzeitige Verstimmung des Resonanzkreises ist z. B. mit Hilfe eines zusätzlichen Kondensators am Sternpunkt möglich. Durch die definierte Verstimmung erhält man einen zweiten Punkt auf der Ortskurve. Der dritte Punkt der Ortskurve wird im Koordinatenursprung angenommen. Es wird in diesem Fall direkt an der Petersen-Spule gemessen. Der mögliche Offset \underline{U}_x der offenen Dreieckswicklung wird ignoriert und kann auch durch eine Messung mit nur zwei Punkten nicht kompensiert werden.

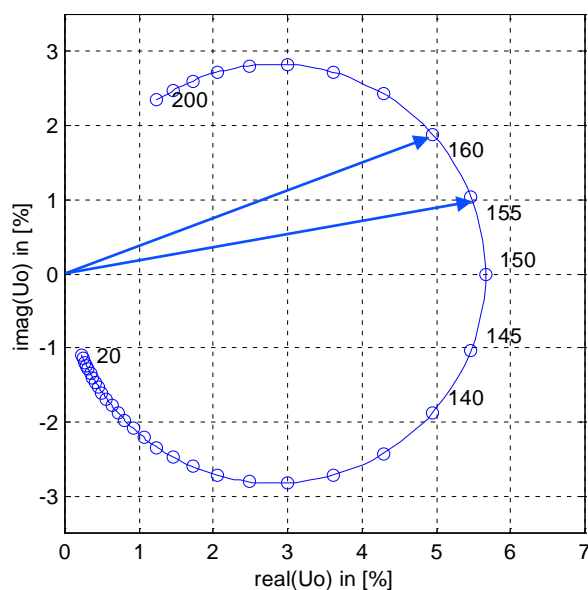


Bild 5-27: Bestimmung der Ortskurve mit Verstimmungskondensator

Vorteile:

- Schnelles Verfahren zur Berechnung

Nachteile:

- Eine ausreichend große Verlagerungsspannung ist notwendig
- Exakte Betrags- und Winkelmessung bei kleinen Spannungen ist erforderlich
Funktioniert also nur gut in der Nähe des Resonanzpunktes
- Es erfolgt eine kurzzeitige Verstimmung durch Verstellen der Petersen-Spule oder durch Zuschalten eines Kondensators
- Eine große Kapazität ist erforderlich
- Bei Verstimmung mit Hilfe einer stufigen Petersen-Spule ist zu beachten, dass die ohmschen Anteile abhängig von der Spulenstellung sind
- Es werden konstante Verhältnisse für die Unsymmetrie, die Einstreuung und die Abstimmung während der Berechnung vorausgesetzt. Das Einschwingen der Verlagerungsspannung muss abgewartet werden

5.5.7 Berechnung der Verstimmung mit einer 50-Hz-Stromeinspeisung

Bei sehr symmetrischen Netzen kann die notwendige Verlagerungsspannung mit Hilfe einer Stromeinspeisung direkt in den Sternpunkt des Netzes erzeugt werden. Zusätzlich kann durch zwei unterschiedliche Arbeitspunkte der Stromeinspeisung die aktuelle Verstimmung des Netzes ermittelt werden. Dazu ist eine komplexe Messung des Einspeisestromes vor und während einer Stromeinspeisung erforderlich.

Die Petersen-Spule kann dabei als Einphasentransformator verwendet werden.

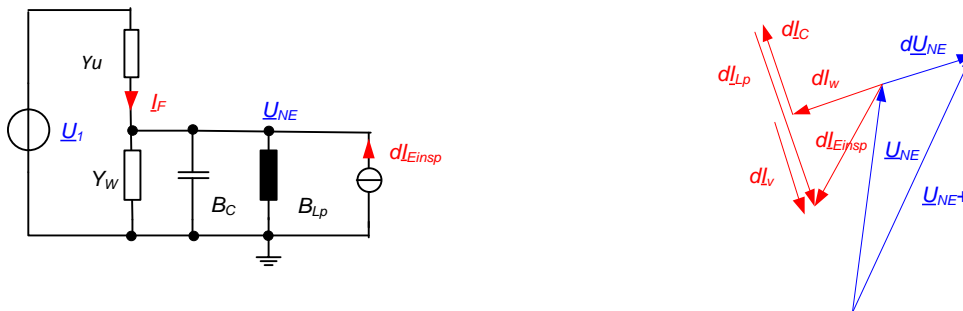


Bild 5-28: Berechnung der Abstimmung mit Hilfe der 50-Hz-Stromeinspeisung

$$\underline{Y}_0 = \frac{d\underline{I}_{Einsp}}{d\underline{U}_{NE}} = Y_W + j(B_C - B_{Lp}) \quad (5.7)$$

Vorteile:

- Schnelles Verfahren zur Berechnung der Verstimmung
- Für sehr symmetrische Netze geeignet

Nachteile:

- Es werden konstante Verhältnisse für die Unsymmetrie, das Übersprechen des Laststromes auf das Nullsystem und die Abstimmung während der Berechnung angenommen. Das Einschwingen der Verlagerungsspannung muss abgewartet werden
- Bei großer Verstimmung wird eine variable Stromeinspeisung erforderlich
- Die Stromeinspeisung sollte der Netzgröße angepasst werden. Der gleiche eingespeiste Strom, der bei großen Netzen gut funktioniert, kann nach einer Netz-Umschaltung im kleinen Netz unzulässige Spannungsänderungen erzeugen, sodass eine Erdschlussmeldung entsteht
- Sehr große Probleme bei schwankendem \underline{U}_{NE} , verursacht durch Übersprechen aus dem Mitsystem

5.5.8 Auswertung des Ausgleichsvorganges nach einem Erdschluss

Wenn der Lichtbogen an der Fehlerstelle verlöscht, schwingt der Resonanzkreis des Nullsystems mit seiner Eigenfrequenz aus. Aus dem Verlauf der Verlagerungsspannung ist eine Parameterschätzung möglich. Als Grundlage können die Störschriebe aus Schutzgeräten oder Transienten-Rekordern verwendet werden [156][142][120].

Der wesentliche Nachteil liegt darin, dass die Berechnung der Abstimmung erst nach dem Ende des Erdschlusses erfolgt. Die richtige Einstellung der Petersen-Spule ist jedoch eine Präventivmaßnahme für einen möglichen Erdschluss. Dieses Verfahren ist daher in üblichen Netzen nur für eine nachträgliche Analyse des Abstimmungszustandes am Ende des Erdschlusses bzw. kurz vor Ende des Erdschlusses geeignet. In Netzen mit vielen Erdschlusswischern kann dieses Verfahren zur zusätzlichen Überwachung der aktuellen Abstimmung verwendet werden

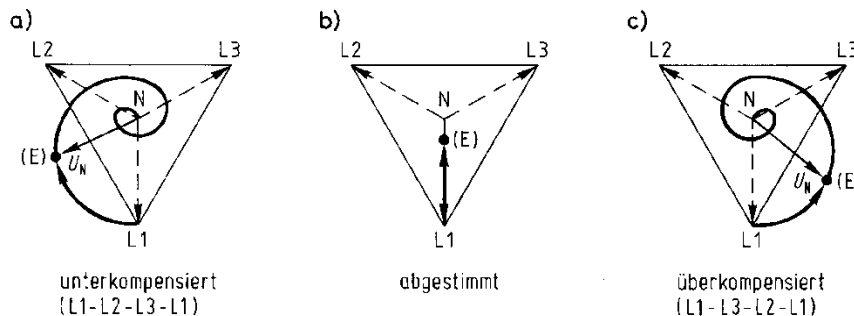


Bild 5-29: Ausgleichsvorgang der Verlagerungsspannung am Ende des Erdschlusses bei unterschiedlicher Verstimmung nach [120]

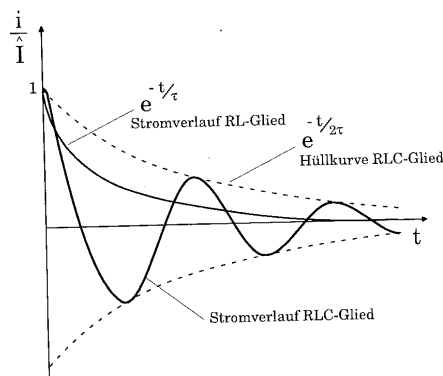


Bild 5-30: Ausgleichsvorgang der Verlagerungsspannung am Ende des Erdschlusses nach [120]

Vorteile:

- Analyse des Schaltzustandes am Ende des Erdschlusses möglich. Auswirkungen von Schalt-handlungen im Netz sind nachvollziehbar

Nachteile:

- Erst am Ende des Erdschlusses durchführbar; eventuell wurde bereits ein Teil des Netzes abgeschaltet
- Transiente Aufzeichnung ist erforderlich
- Frequenz schwer bestimmbar
- Empfindlich auf Störsignale, bzw. Unsymmetrie des gesunden Netzes

Durch die Verwendung von Raumzeiger und eine Linearisierung um den Arbeitspunkt können einige Nachteile der Berechnungsproblematik bezüglich Frequenz und Dämpfung beseitigt bzw. stark reduziert werden. Dies wurde bereits im Abschnitt 2.6 gezeigt.

5.5.9 Berechnung der Verstimmung durch Einspeisung von zwei Frequenzen**

Der Inhalt dieses Abschnittes stammt zu 100 % vom Autor und basiert auf seinem Patent "Verfahren zur Bestimmung der Parameter eines gelöschten Netzes" [10]. Die wesentlichen Aussagen dieses Patentes werden in diesem Abschnitt in Kurzform dargestellt.

Aus den bisherigen Verfahren ist erkennbar, dass die Verlagerungsspannung durch die Unsymmetrie des Netzes hervorgerufen wird. Es wird bei den einzelnen Verfahren angenommen, dass das Übersprechen aus dem Mitsystem während der Messung konstant ist. Es gibt aber in der Realität einige Situationen wie z. B. im Einflussbereich von Schwerindustrie, wo einerseits sehr symmetrische Netze und andererseits starke Lastschwankungen vorliegen. In [16][39][42] wurden mehrere Beispiele gezeigt, dass auch bei sehr symmetrischen kapazitiven Leitungen durch induktive Kopplungen ein nicht vernachlässigbares Übersprechen des Laststromes bzw. von benachbarten galvanisch getrennten Systemen erfolgt. Zu berücksichtigen ist auch die kapazitive Kopplung galvanisch getrennter Netze unterschiedlicher Frequenz (z. B.: 50 Hz und 16,7 Hz).

Diese Probleme können umgangen werden, wenn die Messung bei einer von 50 Hz abweichenden Frequenz erfolgt und die 50-Hz-Komponenten bei der Messung unterdrückt werden.

Bei diesem Verfahren erfolgt die Parameterschätzung des Resonanzkreises durch Bestimmung der Admittanzen bei zwei von 50 Hz unterschiedlichen Frequenzen. Für diese Frequenzen bildet das Mitsystem, wie in Bild 5-31 dargestellt, einen Kurzschluss, sodass die Unsymmetrieadmittanz zum Resonanzkreis parallel geschaltet wird. Der dadurch verursachte Fehler ist vernachlässigbar.

Durch das Ausweichen auf andere Frequenzen ist auch eine Unterdrückung der schwankenden Unsymmetrie bzw. des Übersprechens des Laststromes möglich.

** Vom Autor patentiertes Verfahren

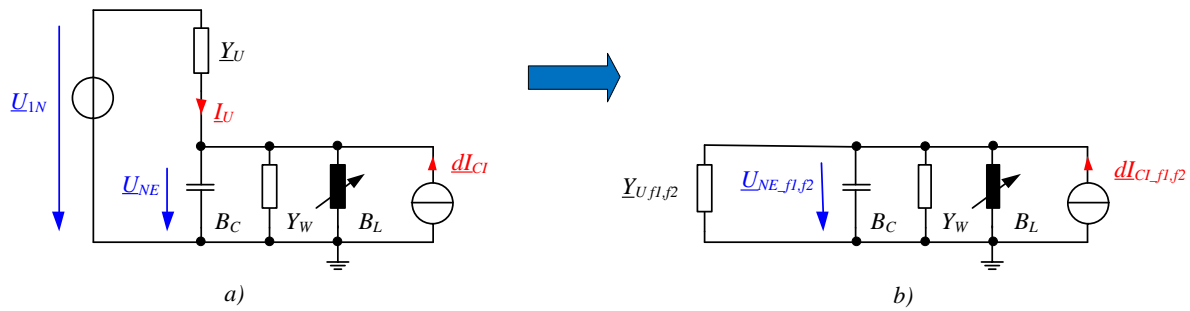


Bild 5-31: Ersatzschaltung für das gesunde Netz

a) für Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$

b) für Frequenzen $f \neq 50 \text{ Hz}$

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass mit einer einstellbaren Stromamplitude die notwendige bzw. maximale Änderung der Verlagerungsspannung, verursacht durch die Stromeinspeisung, überwacht und gesteuert werden kann. Gewünschte bzw. geforderte Randbedingungen können eingehalten werden. Eine Anpassung an unterschiedlichste Netzgrößen und Resonanzkurven ist leicht möglich.

Durch die gleichzeitige Einspeisung und Messung von zwei Frequenzen erfolgt eine Berechnung zum gleichen Zeitpunkt. Ein stationärer Zustand wird nur über den Zeitraum von 240 ms gefordert, im Vergleich zu den 5 bis 20 Sekunden der bisher bekannten Verfahren.

Die Berechnung der Abstimmung erfolgt mit Hilfe der folgenden Gleichung.

$$\underline{Y}_{CI_fx} = \frac{\underline{I}_{CI_fx}}{\underline{U}_{NE_fx}} = \underline{Y}_U + Y_W + j(\omega_x C - \frac{1}{\omega_x L}) \quad (5.8)$$

Wenn das Netz symmetrisch ist, ist \underline{Y}_U vernachlässigbar, wie bereits oben erwähnt. Diese Vernachlässigung führt zu der folgenden Gleichung

$$\underline{Y}_{CI_fx} = \frac{\underline{I}_{CI_fx}}{\underline{U}_{NE_fx}} \approx Y_W + j(\omega_x C - \frac{1}{\omega_x L}) \quad (5.9)$$

Werden zwei unterschiedliche Frequenzen f_1 und f_2 verwendet, dann erhält man zwei komplexe Gleichungen mit drei Variablen. Die Lösung führt zu den folgenden Gleichungen:

$$Y_W = \text{real} \left\{ \frac{\underline{I}_{f1}}{\underline{U}_{NE_f1}} \right\} \quad (5.10)$$

$$C = \frac{\text{imag}(\underline{Y}_{CI_f1}) \omega_1 - \text{imag}(\underline{Y}_{CI_f2}) \omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (5.11)$$

$$L = \frac{1}{\omega_1(-\text{imag}(\underline{Y}_{CI_f1}) + \omega_1 C)} \quad (5.12)$$

Die Admittanzen werden bei zwei unterschiedlichen Frequenzen bestimmt. Durch Auswertung der Real- und Imaginärteile können die einzelnen Parameter des Modells bestimmt werden. Durch Beobachtung über einen längeren Zeitraum können mit Hilfe von Least-Square Verfahren die zeitlichen Schwankungen minimiert werden.

Die einzuspeisenden Frequenzen können einfach mithilfe einer Phasenanschnittsteuerung nach Bild 5-32 realisiert werden.

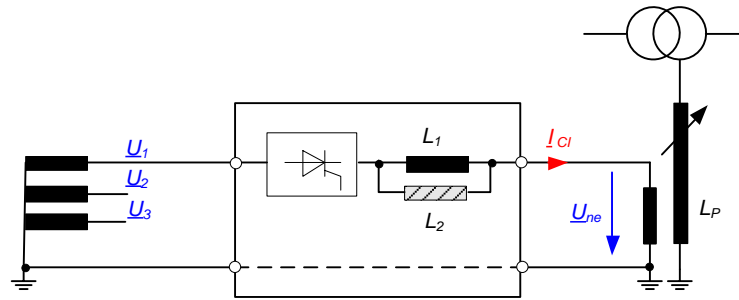


Bild 5-32: Phasenanschnittsteuerung zur Erzeugung von drei Einspeisefrequenzen

Durch eine einfache PAM (**P**uls-**A**mplituden-**M**odulation) kann erreicht werden, dass wesentlichen Spektralanteile des eingespeisten Stromes in der Nähe von 50 Hz liegen. Bei einer Periodenlänge von 12 Perioden entstehen Frequenzen von $11/12 \cdot 50$ Hz und $13/12 \cdot 50$ Hz, wenn der Strom über 6 Perioden ein und über 6 Perioden ausgeschaltet wird. In Bild 5-33 sind die Verhältnisse für eine verkürzte Summen-Periodenlänge von 6 Perioden dargestellt.

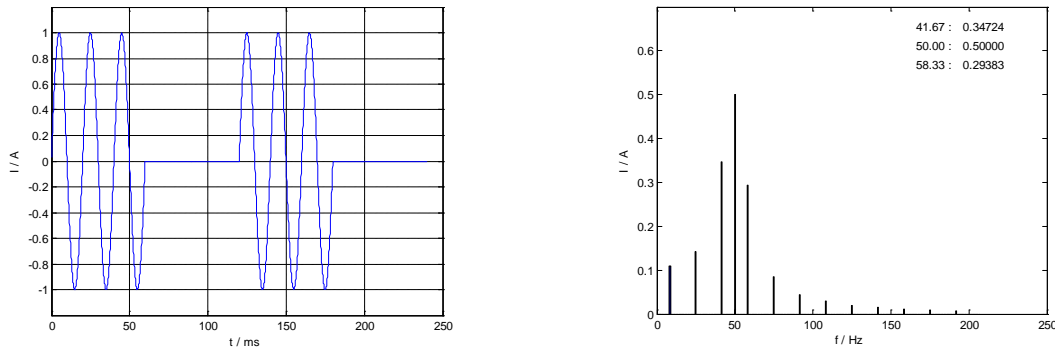


Bild 5-33: Puls-Amplituden-Modulation

links: Puls-Diagramm des Einspeisestromes für ein Pulsmuster über 6 Perioden

rechts: zugehörige FFT über 6 Perioden

Vorteile:

- Sehr einfach
- Durch die Verwendung einer Drossel als Strombegrenzung wird der Einspeisestrom während der Einschaltzeit des Thyristors sinusförmig
- Die Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule kann geerdet bleiben

Nachteile:

- Es wird auch eine 50 Hz Komponente erzeugt
- Seitenbänder sind kleiner als in der folgenden Schaltung
- Der über die LHW zurückfließende Strom kann auch über die Erde zurückfließen. Dies wirkt sich auf die Schutzmaßnahmen im 0,4-kV-Netz aus

Eine "PAM mit unterdrücktem Träger" kann mithilfe der Schaltung in Bild 5-34 erzeugt werden. Für diese Variante wird der Thyristor-Block so erweitert, dass die Stromrichtung durch die Leistungshilfswicklung umgedreht werden kann.

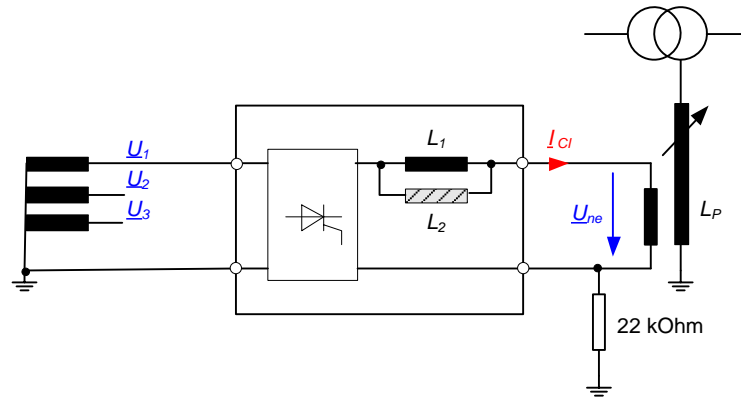


Bild 5-34: Phasenanschnittsteuerung zur Erzeugung von zwei Einspeisefrequenzen

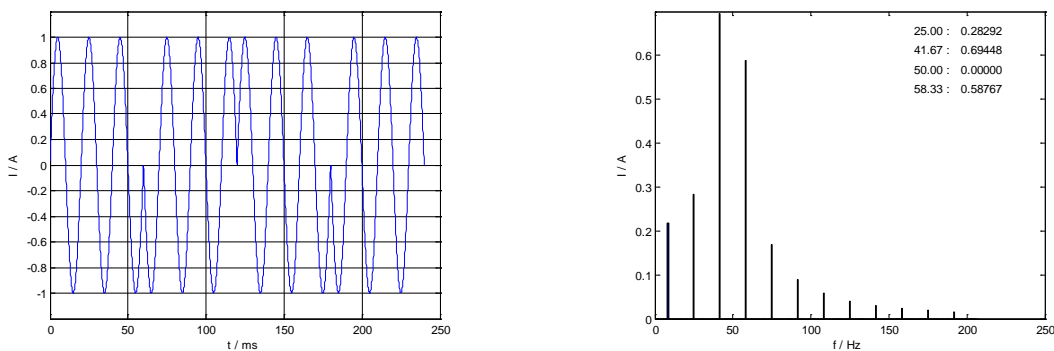


Bild 5-35: Puls-Amplituden-Modulation mit unterdrücktem Träger
links: Puls-Diagramm des Einspeisestromes für ein Pulsmuster über 6 Perioden
rechts: zugehörige FFT über 6 Perioden

Vorteile:

- Sehr einfach
- Durch die Verwendung einer Drossel als Strombegrenzung wird der Einspeisestrom während der Einschaltzeit des Thyristors sinusförmig
- Seitenbänder sind doppelt so groß wie die Seitenbänder der vorhergehenden Schaltung

Nachteile:

- Die Leistungshilfswicklung der Petersen-Spule darf nur sehr hochohmig geerdet werden. Die Erdung ist notwendig, um ein Aufladen der Leistungshilfswicklung über parasitäre Koppel-Kapazitäten zu verhindern.

Durch eine Phasenanschnittsteuerung, wie in Bild 5-36 dargestellt, ist eine einfache Anpassung des einzuspeisenden Stromes möglich. Dadurch kann die Einspeiseleistung für kleine Netze sehr einfach reduziert werden.

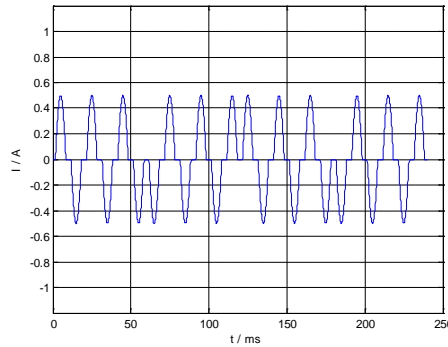


Bild 5-36: Steuerung der Amplitude des Einspeisestromes

Weitere Details über die Art der Erzeugung der Frequenzen sind ausführlich in [39][41][66] beschrieben.

Wesentlich bei diesem Verfahren ist, dass die Messung der Verlagerungsspannung die Reaktion des Netzes auf die Einspeisung wiedergibt. Die Messung muss daher von der Einspeisung entkoppelt sein

Vergleich des Abstimmvorganges ohne und mit Stromeinspeisung:

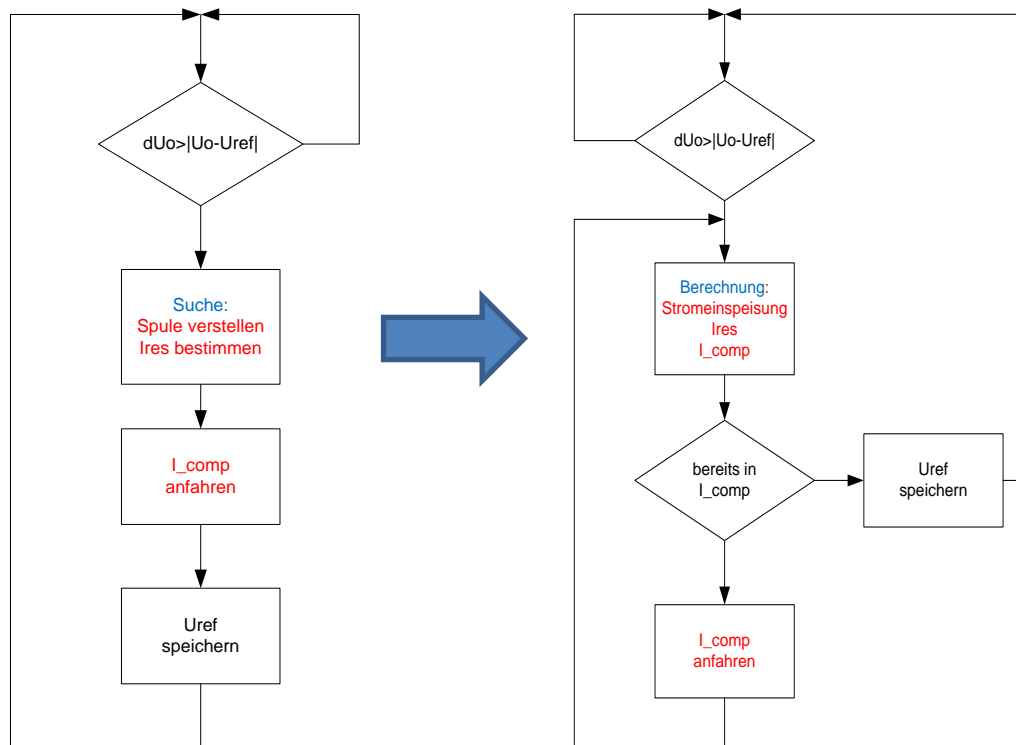


Bild 5-37: Abstimmvorgang einer Petersen-Spule ohne und mit Stromeinspeisung

Im linken Teil von Bild 5-37 ist der Abstimmvorgang einer kontinuierlichen Petersen-Spule ohne Stromeinspeisung dargestellt. Wenn eine Änderung der Verlagerungsspannung erkannt wird, erfolgt die Suche des Resonanzmaximums. Während der Suche werden zugleich die Netzparameter des Nullsystems ermittelt. Diese Parameter werden für die Simulation der Nullspannung benötigt. Sobald das Resonanzmaximum gefunden wurde und die Netzparameter bestimmt sind, wird die gewünschte "Endposition" berechnet und angefahren. Zur Überprüfung, ob eine Schalthandlung während der Verstimmung erfolgte, wird die gemessene Spannung in der "Endposition" mit der berechneten Spannung

aus der internen Netzsimulation verglichen. Liegt diese innerhalb eines definierten Toleranzbereiches, ist die Suche abgeschlossen.

Auf jeden Fall ist bei jeder Suche eine Verstellung der Petersen-Spule erforderlich.

Bei sehr niedriger Verlagerungsspannung ist es eventuell notwendig, den gesamten Verstellbereich abzufahren.

Im rechten Teil von Bild 5-37 ist der Abstimmvorgang mithilfe einer Stromeinspeisung dargestellt.

Wenn eine Änderung der Verlagerungsspannung erkannt wird, erfolgt mit Hilfe der Stromeinspeisung eine Berechnung der Netzparameter bzw. des Resonanzpunktes. Hierfür ist eine Verstellung der Petersen-Spule nicht erforderlich.

Unter Berücksichtigung der parametrisierten Über- oder Unterkompensation erfolgt nun die Berechnung der gewünschten "Endposition". Diese wird mit der aktuellen Position der Petersen-Spule verglichen. Liegt diese innerhalb eines definierten Toleranzbereiches erfolgt keine Verstellung der Petersen-Spule und der Abstimmvorgang ist beendet. Die aktuelle Nullspannung wird als neue Referenz übernommen.

Wenn die aktuelle Spulenstellung außerhalb des Toleranzbereiches liegt, wird die Petersen-Spule auf die neue gewünschte "Endposition" verstellt. Mit Hilfe der Stromeinspeisung wird die Gültigkeit der gewünschten Endposition nochmals überprüft. Gründe für die nochmalige Berechnung sind einerseits die Tatsache, dass die Genauigkeit der Berechnung in der Nähe der Endposition größer ist und dass andererseits während der Positionierung der E-Spule eine Schalthandlung im Netz erfolgt sein könnte. Entspricht die aktuelle Position der gewünschten "Endposition" aus der Berechnung, so wird die aktuelle Verlagerungsspannung als neue Referenz übernommen und auf die nächste Schalthandlung gewartet

Durch die Stromeinspeisung wird die Anzahl der Spulenbewegungen stark reduziert [45]. Es erfolgt immer zuerst eine Berechnung durch Einspeisung eines Stromes. Die Spule wird erst dann bewegt, wenn die Abweichung von der Sollposition einen Grenzwert überschreitet. Hingegen wird beim Regelverfahren mit der Suche des Resonanzmaximums jedes Mal die Spule bewegt – bei sehr kleinen Verlagerungsspannungen sogar über den gesamten Verstellbereich der Petersen-Spule. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Erdschluss eintritt, wenn die Spule nicht richtig abgestimmt ist, steigt. Durch die Stromeinspeisung ist diese Wahrscheinlichkeit stark reduziert.

Vorteile:

- Reduziert die Anzahl der Verstellbefehle an die E-Spule
- Wahrscheinlichkeit, dass ein Erdschluss in einer nicht abgestimmten Position während der Resonanzsuche erfolgt, ist stark reduziert
- Sehr schnelle Messung
- Verwendbar auch für vollkommen symmetrische Netze
- Unempfindlich gegenüber dem Messfehler der offenen Dreieckswicklung
- Unterdrückung des 50-Hz-Übersprechens durch den Laststrom
- Einfache Anpassung des Einspeisestromes an Netzgegebenheiten
- Einfach nachrüstbar

Nachteile:

- Zusätzliche Einspeisung wird benötigt
- Spule mit Leistungshilfswicklung erforderlich (die alternative Einspeisung über einen einphasigen Transformator ist kostenintensiv)
- Bei einigen Petersen-Spulen muss eine zusätzliche Messung der Verlagerungsspannung aufgebaut werden

Mit diesem Verfahren ist auch die Nullimpedanz des Verteiltransformators während des Betriebes messbar. Hierzu muss die Ersatzschaltung erweitert werden und es müssen die entsprechenden komplexeren Gleichungen gelöst werden. Dieses Verfahren wurde vom Autor für die ENEL entwickelt und eingesetzt [29].

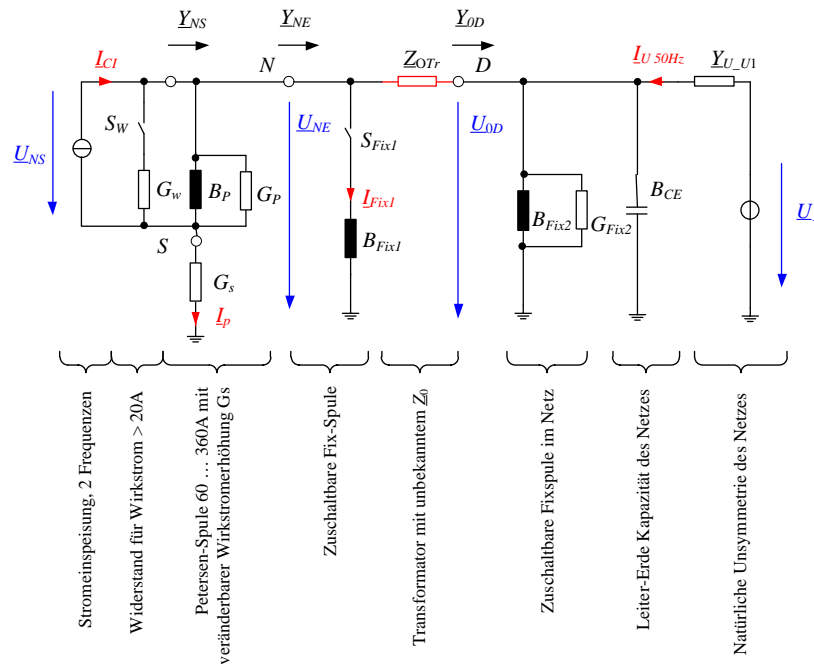


Bild 5-38: Detaillierteres Ersatzschaltbild des Netzes

Für diese Konfiguration musste das Ersatzschaltbild wesentlich erweitert und es mussten zusätzliche Messungen eingeführt werden.

Kurze Beschreibung der Komponenten:

- Die Stromeinspeisung erfolgt entsprechend der Schaltung nach Bild 5-34
- Für die Wattreststromerhöhung ist die Konduktanz G_W ständig zugeschaltet. Beim Parallelbetrieb von zwei Petersen-Spulen wird jedoch G_W bei einer Spule abgeschaltet
- Die Petersen-Spule ist nicht direkt geerdet sondern über die Konduktanz G_S , um die Verluste zu erhöhen, bzw. um sicherzustellen, dass in jeder Spulenposition genügend Wirkstrom für die Erdschlussortung zur Verfügung steht. Abhängig von der Spulenstellung wird der Wert von G_S verändert, um den maximalen Wirkstrom von 30 A nicht zu überschreiten
- Es erfolgt eine Umstellung des Netzes von isoliert auf gelöscht. Im isolierten Netz war die Nullimpedanz des Trafos nicht interessant. Im gelöschten Netz reduziert aber die Nullimpedanz des Trafos die Wirksamkeit der Löschung. Eine Kontrolle der Nullimpedanz des Trafos wurde dadurch erforderlich

- Durch Kopplung mit anderen Netzen können externe Fixspulen zugeschaltet werden. Der Schaltzustand wird nicht immer übermittelt. Die Information der tatsächlichen Netzgröße ist interessant für die Betriebsführung
- Durch die ständige Zuschaltung der Konduktanz bleibt die Verlagerungsspannung unter 4%. Eine Verlagerungsspannung von größer 6% wird bereits als Erdschluss definiert

Die folgenden zusätzlichen Aufgabenstellungen wie

- Online-Messung von \underline{Z}_0 während des normalen Betriebes
- Kompensation des Einflusses von \underline{Z}_0 auf die Berechnung des I_{CE}
- Erkennen von externe Petersen-Spulen
- Berechnung des gesamten I_{CE} des Löschbezirkes

konnten durch die zusätzliche Messung von \underline{U}_{0D} an der offenen Dreieckswicklung und durch Messung des Stromes durch die Petersen-Spule erfolgreich gelöst werden [29][13].

6 Sternpunktbehandlung während des Erdschlusses

6.1 Reststrom-Kompensation

Während des Erdschlusses müssen alle Wirk- und Blindverluste des Nullsystems über die Fehlerstelle abgedeckt werden [201][202][203][204][172]. Wie aus dem Bild 5-5 erkennbar sind dies:

- Wirkverluste der Petersen-Spule
- Wirkverluste der Nullimpedanz des Trafos
- Wirkverluste der Leitung von der Einspeisung bis zur Fehlerstelle
- Entsprechende Wirkverluste im Gegensystem
- Teilweise Verluste im Mitsystem
- Blindverluste verursacht durch die Verstimmung

Um den Strom an der Fehlerstelle zu reduzieren bzw. vollständig zu beseitigen, muss der entsprechende Wirkstrom und der verbleibende Verstimmungsstrom im Umspannwerk eingespeist werden [47]. Dadurch kann der Lichtbogen an der Fehlerstelle verlöschen.

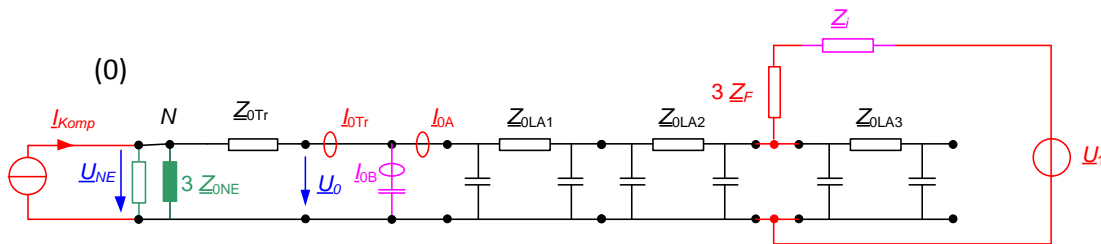


Bild 6-1: Reststrom-Kompensation

Das Problem für die Regelung besteht darin, dass man den Strom an der Fehlerstelle nicht messen kann. Wäre dies möglich, wäre die Regelung recht einfach. Andererseits wüsste man dann, wo der Fehler ist und man könnte das fehlerhafte Segment auch sofort abschalten.

Derzeit werden während des gesunden Betriebes die Admittanzen des Netzes gemessen und während des Erdschlusses der Strom so geregelt, dass wieder die gleiche Admittanz hergestellt wird. Ein Abschalten von Leitungsstücken bewirkt ein Wiederzünden des Fehlers. Die während des gesunden Betriebes gemessene Admittanz ist nicht mehr gültig und es muss auf andere Regelalgorithmen umgeschaltet werden. Ein Regeln auf eine vollständige Kompensation bei hochohmigen Fehlern in Freileitungen ist sehr schwierig.

Im 20-kV-Netz wird für die Kompensation eines Reststromes von 30 A eine Scheinleistung von ca. $1150 \text{ kV} * 1,07 * 30 \text{ A} = 371 \text{ kVA}$ benötigt.

Da der Lichtbogen verlöschen ist, ist auch eine Eingrenzung der Fehlerstelle nicht möglich. Hierzu muss die Reststrom-Kompensation kurzzeitig abgeschaltet werden.

Vorteile:

- Vollständige Entlastung an der Fehlerstelle ist möglich

Nachteile:

- Aktive Stromeinspeisung im Bereich von einigen hundert kVA wird benötigt
- Der Eigenbedarfs-Trafo muss entsprechend ausgelegt werden
- Stabiler Parallelbetrieb von mehreren Reststrom-Kompensationen im galvanisch gekoppelten Netz muss für alle möglichen Schaltkombinationen nachgewiesen werden.
- Nicht geerdete Leistungshilfswicklung (LHW) bzw. Anpassungs-Trafo für 500 V erforderlich
- Komplizierte nichtlineare Regelung erforderlich
- Spannungsabfall von der Messstelle bis zum Fehlerort
- Abschaltung der Reststrom-Kompensation für die Erdschlusseingrenzung notwendig
- Nachregelung bei Abschaltung von Leitungsstücken ist schwierig

6.2 Kompensation der Oberschwingungen im Reststrom

Durch die Petersen-Spule wird im stationären Zustand nur der 50-Hz-Anteil an der Fehlerstelle kompensiert.

Durch die Zunahme der Oberschwingungsanteile in der verketteten Spannung steigen auch die Oberschwingungsströme über die Fehlerstelle während des Erdschlusses. Teilweise sind diese Ströme bereits wesentlich größer als die 50-Hz-Komponenten und nicht mehr immer vernachlässigbar.

Die Oberschwingungsquellen können als verteilt einspeisende Stromquellen betrachtet werden. Die Rückwirkung auf die verkettete Spannung erfolgt im Wesentlichen durch die Kurzschlussimpedanz des Einspeise-Trafos im Umspannwerk.

Zur Reduktion der Oberschwingungsanteile werden derzeit mehrere Ansätze verfolgt:

- a) Zusätzlicher passiver Filter parallel zum 50-Hz-Filter, der durch die Petersen-Spule gebildet wird [13]
- b) Dezentrale Kompensation von Oberschwingungsströmen verursacht durch Abnehmer oder Einspeiser
- c) Zentrale Kompensation der Oberschwingungs-Spannung in der Spannung am Einspeisepunkt von Mittelspannungsnetzen [196][172]
- d) Zentrale Kompensation des Oberschwingungsstromes im Nullsystem

6.3 Erden des fehlerhaften Leiters

Eine weitere Variante, die Fehlerstelle zu entlasten ist die gezielte Erdung des fehlerhaften Leiters im Umspannwerk [68].

In den üblichen Darstellungen wird die Längsimpedanz der Leitung vernachlässigt und der Laststrom mit Null angenommen. Die Netze sind aber so ausgelegt, dass von der Einspeisung bis zum Verbraucher im Mittelspannungsbereich ein Spannungsabfall von 10 % erlaubt ist. Um dies zu optimieren, werden entsprechende Trafo-Regler eingesetzt.

Im Erdschlussfall entsteht aber ein paralleler Weg zwischen Umspannwerk und Fehlerstelle. Die treibende Spannung entlang dieses Weges kann durchaus 10 % von 11,5 kV in einem 20-kV-Netz sein, also ca. 1 kV.

Die Erdimpedanz ist niederohmig, sodass nun der Laststrom nicht mehr nur über die Leitung fließt, sondern zusätzlich parallel über die Erde. Der Strom an der Fehlerstelle wird also in vielen Fällen nicht entlastet, sondern muss zusätzlich Teile des Laststromes führen.

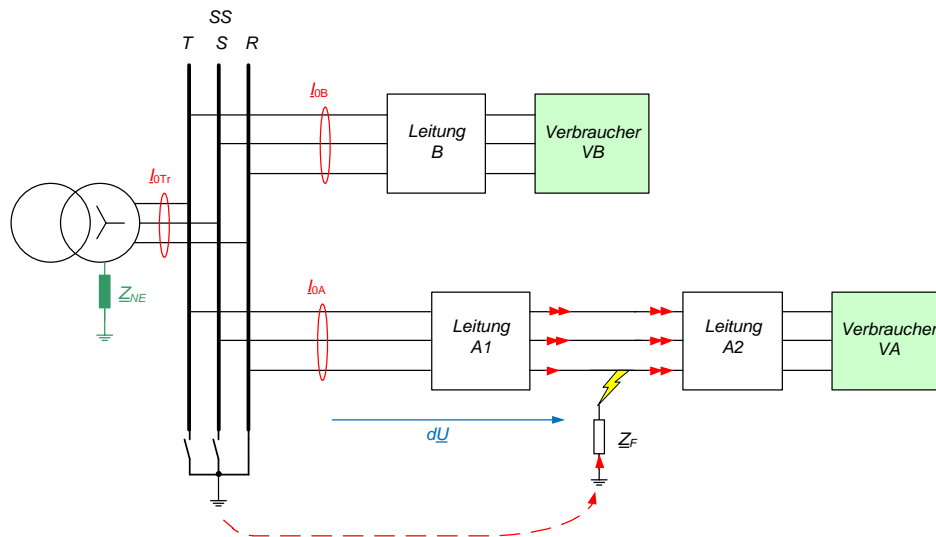


Bild 6-2: Erden der fehlerhaften Phase im Umspannwerk

Vorteile:

- Ohne Frequenzumrichter realisierbar

Nachteile:

- Auswahlschaltung für den fehlerhaften Leiter erforderlich
- Einpolige Leistungsschalter mit Vorwahllogik oder drei einzeln schaltbare Leistungsschalter erforderlich
- Sehr oft keine Entlastung der Fehlerstelle, da ein zusätzlicher Teil des Laststromes über die Fehlerstelle fließen kann → Berührungs- und Schrittspannung wird erhöht statt reduziert

7 Beispiel für die Implementierung in moderne Hardware

Im Zuge dieser Arbeit wurden ausgewählte Ortungs-Algorithmen in eine neue moderne Hardware implementiert. Um die Qualität der Software zu erhöhen, wurde zusätzlich ein Test-Driven-Development Framework (TDD-Framework [241]) eingeführt.

7.1 Anforderungen an eine moderne Hardware für die Ortung

Durch die starke Zunahme der dezentralen Einspeiser ändert sich die Netzstruktur.

Außerdem sind in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte in den folgenden Bereichen erzielt worden:

- Mikroprozessortechnik
- Leistungselektronik
- Drahtgebundene und drahtlose Kommunikation
- Netzwerktechnik

Beim Design einer neuen Architektur für ein Ortungsgerät können somit Eigenschaften gefordert werden, von denen man vor Jahren nur geträumt hat. Es müssen aber gleichzeitig auch Sicherheitsaspekte beachtet werden, um z. B. die Betätigung eines Leistungsschalters durch nicht autorisierte Personen via WLAN oder Internet zu unterbinden.

Auf unsere Thematik bezogen ergeben sich die folgenden wesentlichen Einflussfaktoren:

- Neue Netzstrukturen durch dezentrale Einspeisungen, die neue Funktionen erfordern
 - o Gerichtete Kurzschlussanzeiger
 - o Strom- und Spannungssensoren für die Messwerverfassung in Trafostationen
- Einfluss der Leistungselektronik auf die Sternpunktbehandlung, die neue Möglichkeiten bietet, wie z. B.
 - o Reststromkompensation
 - o Aktive Filterung von Oberschwingungsanteilen im Nullsystem
 - o Aktive Signaleinspeisung für Ortung mit traditionellen oder kürzeren Pulsmustern
- Einfluss der neuen Prozessortechnologien
 - o Bessere Möglichkeiten zur Signalverarbeitung
 - o Neue und größere Speichermedien
- Neue Kommunikationsmöglichkeiten und Standards, z. B.
 - o USB
 - o Ethernet
 - o IEC 61850
 - o GSM
 - o Zigbee

Unter Verwendung der neuen Technologien können folgende Eigenschaften realisiert werden:

- Schnellere Prozessoren mit 32 bit Datenbreite:
 - o Gleichzeitige Berechnung mehrere Algorithmen
 - o Die Algorithmen dürfen wesentlich komplexer sein
 - o Schnellere Abstraten im Bereich von 2 kHz bis 10 kHz sind einfach realisierbar
 - o Priorisierte Bewertung der Algorithmen
 - o Bei Verwendung von Standardbetriebssystemen wie z. B. Embedded Linux können sehr viele sehr gut getestete Module verwendet werden, ohne diese neu zu schreiben, wie z. B. TCP/IP-Stack

- Ethernet Schnittstelle mit 100 Mbit/s:
 - o Wesentlich schnellere Parametrierung der Geräte
 - o Schnelle und einfache Übertragung des Anzeigebildschirmes z. B. mit VNC
 - o Schnelle Übertragung von Logbüchern und Störschrieben
 - o Einfache Implementierung von TCP/IP basierenden Leittechnik-Protokollen wie z. B.
 - Modbus RTU - TCP/IP
 - IEC 60870-5-104
 - IEC 61850

- Micro-SD Karten:
 - o Speichertiefen im Bereich von 2 GB sind kein Problem mehr. Dementsprechend können wesentlich längere Störschriebe mit mehr Informationen aufgezeichnet werden
 - o Wesentlich längere Logbücher

- USB 2.0 FS Host-Schnittstelle
 - o Automatisches Auslesen von Logbuch und Störschrieben durch Anstecken eines USB-Sticks
 - o Wenn z. B. ein Embedded Linux verwendet wird, können auch die meisten USB-Sticks verwendet werden wie z. B.
 - USB ⇔ WLAN
 - USB ⇔ Ethernet
 - USB ⇔ Bluetooth
 - USB ⇔ GSM/GPRS/UMTS

- Zusätzliche RS232 und RS485 Schnittstellen
 - o Einfache Implementierung von Leittechnikprotokollen wie z. B.
 - Modbus RTU (RS232, RS485)
 - IEC 60870-5-103 inklusive Störschriebentsorgung
 - IEC 60870-5-101
 - o Interne Funkadapter im 2400 MHz Bereich mit einer Reichweite von ca. 30m. Meldungen können zyklisch im Sekundenbereich versendet werden. Eine Begehung der Station während der Fehlereingrenzung ist dann eventuell nicht mehr notwendig

- Auf den meisten Prozessoren ist ein CAN-Controller vorhanden
 - o Einfache Vernetzung von mehreren Ortungsgeräten via proprietäre Protokolle, wenn z. B. eine Ethernet-Verdrahtung nicht erwünscht ist

- Die neuen Sigma-Delta Analog-Digital Wandler sind kostengünstig mit einer Auflösung von 24 bit bei einer Samplerate von 2 bis 10 kHz erhältlich. Durch geeignete Dimensionierung der Eingangskreise können sehr große Bereiche abgedeckt werden. Eine Umschaltung zwischen 1 A und 5 A ist nicht mehr erforderlich
- Abnehmbare Bedieneinheit bestehend aus Tastatur und Display. Wenn das Display in der Fronttüre eingebaut wird, müssen alle Signale im Kabelbaum zum Gerät geführt werden. Durch die abgesetzte Bedieneinheit muss nur mehr ein handelsübliches DVI Kabel zur Bedieneinheit geführt werden.
- Abnehmbare Stromwandler mit Bebürdung und Überspannungsschutz. Dadurch ist die Anforderung des 100-fachen Nennstromes für 1s kein Problem mehr.

7.2 Implementierte Algorithmen

Um die Vorteile der einzelnen Erdschlussortungsverfahren in unterschiedlichen Fehlersituationen ausnützen zu können, wurden im kombinierten Erdschlussrichtungs- und Kurzschlussanzeiger EOR-3D die folgenden Verfahren implementiert. Die Verfahren können einzeln aktiviert, kombiniert und priorisiert werden.

- **Erdschlusswischerverfahren** nach dem **qu2 und qui** Verfahren für
 - o einmalige Fehler
 - o intermittierende und wiederzündende Fehler
 - o Erkennung von Fehlern in Ringen mit großen Kreisströmen
- **Blindleistungsrichtung** bzw. $\sin(\varphi)$ Verfahren
- **Wirkleistungsrichtung** bzw. $\cos(\varphi)$, wenn geeignete Wandler zur Verfügung stehen
- **Oberschwingungsverfahren** mit Bewertung der zugehörigen Leistungsrichtung für eine frei wählbare Frequenz
- **Pulsortung**: traditionell und für die neue Leistungs-Stromeinspeisung (HPCI). Beim EOR-3D ist eine Überkompensation nicht mehr zwingend notwendig
- **Ungerichteter Kurzschlussanzeiger** mit einstellbarer Rückstellzeit

Außerdem ist die Implementierung der folgenden Verfahren vorbereitet:

- **Gerichteter Kurzschlussanzeiger** mit Unterdrückung der Meldungen, die durch atmosphärische Störungen verursacht werden
- **Kurzschlusserkennung** mit adaptiven Auslöseschwellen
- **Leiterbruchererkennung** durch Überwachung der Strom-Unsymmetrie
- **Ferroresonanz-Erkennung**

7.3 Hardware

Für die Realisierung wurden zwei unterschiedliche Hardwareplattformen entwickelt, die in den folgenden Bildern dargestellt sind.



Bild 7-1: EOR-3D als Hutschienen-Variante



Bild 7-2: EOR-3D im Industriegehäuse 96 x 48 mm

7.4 Software

Bei diesem Projekt wurde ein Embedded-Linux verwendet, wodurch die Neuentwicklung von Treibern entfallen ist. Allerdings mussten einige Treiber angepasst werden, um den geforderten Geschwindigkeitsanforderungen zu entsprechen.

Bisher ist die Softwareentwicklung wie folgt durchgeführt worden:

- Modellbasierte Entwicklung des Algorithmus mit Matlab / Simulink
- Umsetzung der Algorithmen in C; leider sehr fehleranfällig.
- Implementierung des C-Codes direkt auf der Zielhardware mit den folgenden erforderlichen Schritten
 - o Crosscompilieren am PC
 - o Download des compilierten Codes über eine langsame seriellen Schnittstelle
 - o Debuggen auf der Zielhardware über die serielle Schnittstelle
- Die Erzeugung von Testsignalen musste meist mit Analog-Simulatoren realisiert werden
- Der Test des Gesamtsystems mit all seinen Funktionen war sehr zeitaufwendig und wurde deshalb nur kurz vor der Freigabe durchgeführt

Um die Entwicklungszeit zu reduzieren, wurde vom Autor bei diesem Projekt ein Test-Driven-Development Framework (TDD-Framework) unter Matlab eingeführt.

Die Algorithmen wurden weiterhin mit Matlab und Simulink modellbasierend erforscht und entwickelt.

Durch das TDD-Framework wird aber die Vorgangsweise bei der Implementierung des Algorithmus völlig geändert.

Die ungefähren Möglichkeiten des Algorithmus sind durch die oben erwähnte modellbasierte Algorithmen-Entwicklung bekannt und abschätzbar.

Bei der TDD-Softwareentwicklung werden immer die folgenden drei Schritte durchlaufen [241]:

- 1) Schreiben eines Test für eine neue Funktionalität
- 2) Schreiben des Programmcodes mit möglichst wenig Aufwand bis die Funktionalität erfüllt wird
- 3) Aufräumen des Codes sowie Wiederholung des Tests

Durch diese Vorgangsweise erfolgt eine Änderung des Codes nur, wenn ein Test nicht bestanden wird. Diese Vorgangsweise führt zu stärker modularisiertem Programmcode, der leichter erweiterbar ist.

Für die Testfälle werden bei dieser Entwicklung jeweils definiert:

- Art der Störung (einpolig, zweipolig, hochohmig, Dauer, Zündzeitpunkt ...)
- Zusätzliche binäre Eingangssignale (BE)
- Erwartete Ergebnisse des Ortungsprozesses
 - o Binäre Ausgangs Funktionen (BAF)
 - o Gemeldete binäre Ausgangssignale (BA)
 - o Meldungen im Logbuch
 - o Störschriebe
 - o Zugehörige Zeiten als Vielfaches der Abtastfrequenz

In Anlehnung an xUnit [242] wurde vom Autor ein TDD-Framework in Matlab entwickelt. Durch das TDD-Framework sind die Definitionen des Störfalles und die erwarteten bzw. geforderten Ergebnisse sowie deren Zeitverhalten sehr einfach definierbar [13].

Unter Verwendung des TDD-Frameworks erfolgt die Implementierung der Algorithmen in den folgenden drei Phasen.

7.4.1 Software in the Loop

Zunächst erfolgt die Beschreibung des Tests, wie oben beschrieben.

Danach erfolgt eine Umsetzung des entwickelten Algorithmus in einen Sample- oder Frame- basierenden Algorithmus.

Durch das TDD-Framework wird die Parametrierung für den Algorithmus generiert bzw. alle Vorgaben für die notwendigen Spannungs- und Stromsignale. Diese Signale sowie die binären Eingangssignale (BE) an die Ortung werden nach Bedarf entweder durch einen simulierten Funktionsgenerator oder durch eine komplette dreiphasige Netzsimulation erzeugt und in eine Datei geschrieben.

Der Algorithmus liest beim Start zuerst die Parametrierung ein und danach die Samples aus der Datei und arbeitet diese ab. Der Algorithmus führt Filterungen, Berechnungen, Bewertungen usw. durch und trifft Entscheidungen bezüglich der Ortung. Diese Entscheidungen werden als Binäre-Ausgangs-Funktionen (BAF) ausgegeben. Teile davon werden als Binäre-Ausgänge (BA) zur direkten Signalisierung verwendet.

Zusätzlich werden Ereignisse in ein Logbuch eingetragen bzw. wird bei Bedarf ein Störschrieb erzeugt. Im Störschrieb sind neben den analogen Spuren auch sämtliche BE, BAFs und BA als digitale Spuren enthalten.

Das TDD-Framework liest das Logbuch und den Störschrieb ein und vergleicht dies mit den geforderten Ergebnissen. Das Ergebnis eines jeden Tests wird in einer Test-Log-Datei mitgeschrieben.

Die Entwicklung und Modifikation des Software - Moduls erfolgt solange, bis keine Fehlermeldung für den Testfall ausgegeben wird.

Diese Entwicklung erfolgt vollständig unter Matlab / Simulink am PC. Es ist für diese Entwicklung keine Hardware notwendig.

Die Testfälle können entweder einzeln oder als Gruppe aufgerufen werden. Dadurch ist es möglich, sehr schnell und oft die verschiedensten Testfälle ablaufen zu lassen und Fehler durch Seiteneffekte rechtzeitig zu erkennen und zu beseitigen.

In der Matlab/ Simulink Umgebung bestehen ausgezeichnete Möglichkeiten zum Debuggen. Während des Debuggens kann man fast vollständig auf die mächtige Bibliothek von Matlab / Simulink zugreifen. Zusätzliche Auswertungen von Zwischenergebnissen oder intern gespeicherten Vektoren sind damit überhaupt kein Problem.

Ein Single-Step-Debuggen ist zu jedem Zeitpunkt möglich.

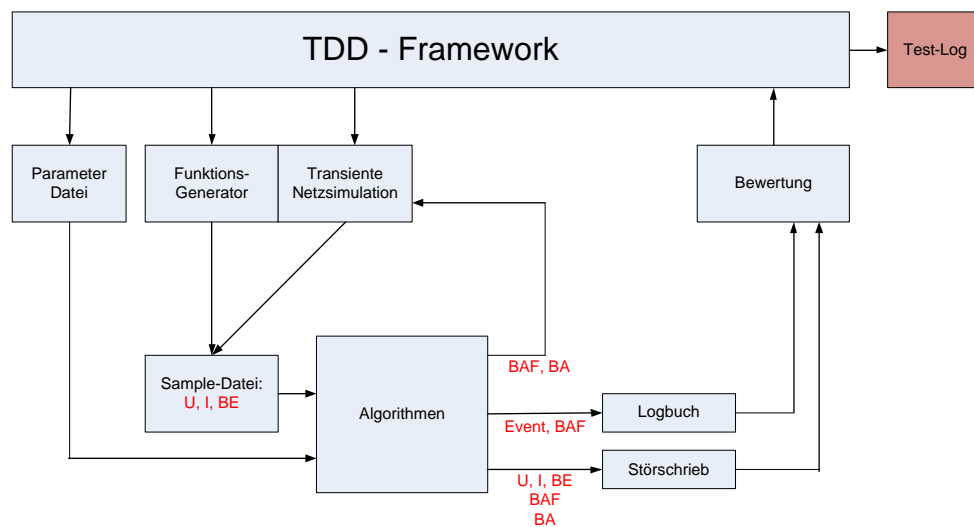


Bild 7-3: Software in the Loop

7.4.2 Prozessor in the Loop

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe des Real-Time-Workshop (RTW) von Mathworks der C-Code automatisch für den Prozessor generiert. Die fehleranfällige Umsetzung auf C-Code entfällt.

Der C-Code wird durch den Crosscompiler in die entsprechende Maschinsprache der Zielhardware umgesetzt.

Durch die gewählte Konfiguration und die Verwendung von Embedded-Linux ist es sehr einfach, zunächst die Parameter-Datei, den Störschrieb und den lauffähigen Code in das Zielsystem mit Hilfe von FTP zu laden und zu starten

Der Algorithmus in der Zielhardware lädt wiederum zuerst die Parameter und liest danach die Samples aus der Datei. Da der Prozessor nicht auf den Interrupt für den nächsten Sample warten muss, kann der

Prozessor mit der größten Geschwindigkeit arbeiten. Die Abarbeitung erfolgt dadurch mit einer wesentlichen höheren Geschwindigkeit als später im realen System.

Vom Algorithmus werden wieder die identischen Signale und Dateien erzeugt, die dann wiederum per FTP zum PC übertragen und durch das TDD-Framework analysiert und bewertet werden.

Durch dieses Verfahren können Fehler bei der Konvertierung von Matlab-Code in C bzw. Fehler bei der Crosscompilierung erfasst werden.

Auch hier besteht die Möglichkeit, das Programm im Single-Step abzuarbeiten, aber es ist wesentlich umständlicher. Für Auswertungen von Zwischenergebnissen stehen nun die mächtigen Tools von Matlab nur mehr über große Umwege zur Verfügung.

In dieser Phase sind die Messhardware und die physikalische Ausgabe der Meldungen nicht erforderlich. Dadurch kann diese Entwicklung komplett auf einem Demo-Board erfolgen.

Ein eventuell notwendiger Umstieg auf einen anderen Prozessor wird in dieser Phase relativ einfach.

Im folgenden Bild ist die Schnittstelle für *Prozessor in the Loop* eingezeichnet.

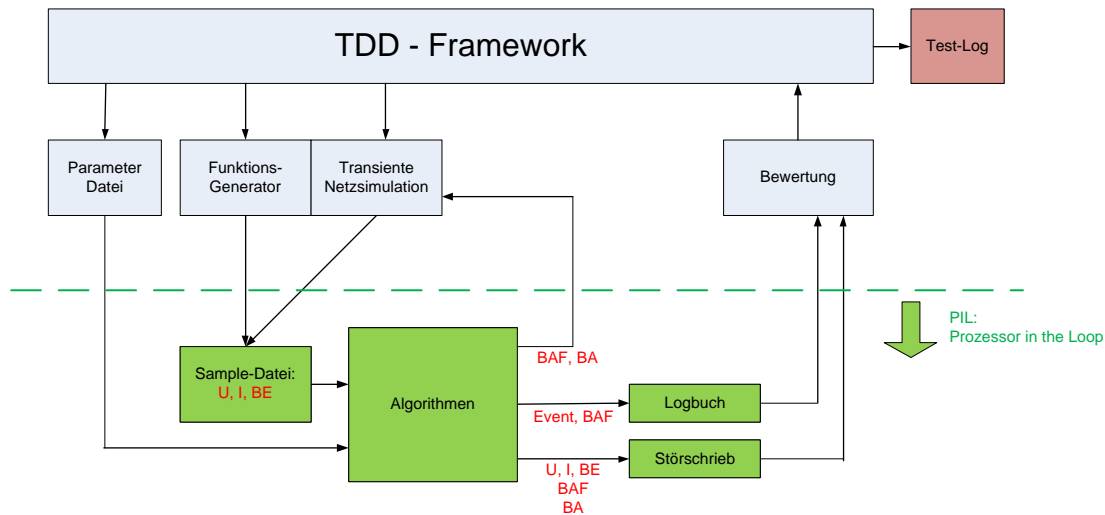


Bild 7-4: *Prozessor in the Loop*

7.4.3 Hardware in the Loop

Im letzten Schritt erfolgt die Simulation auf einem Realtime-Digital-Simulator (RTDS) mit einer Samplerate von 20 kHz (50 μ s) und nachgeschalteten analogen Verstärkern [13]. Bei dieser Konfiguration werden nur mehr die Binären Ausgänge (BA) mit Hilfe von Relais an den RTDS zurück gemeldet.

In diesem Fall ist die prinzipielle Struktur identisch zu den vorherigen Phasen. Auch die bisher verwendeten Simulationsmodelle für das Netz können bei der gewählten Konfiguration ohne Modifikation direkt in den RTDS geladen werden. Es ist keine Neuentwicklung erforderlich.

In dieser Phase wird nun das gesamte System in Echtzeit überprüft. Zu diesem Zeitpunkt muss dann auch die vollständige Hardware verfügbar sein.

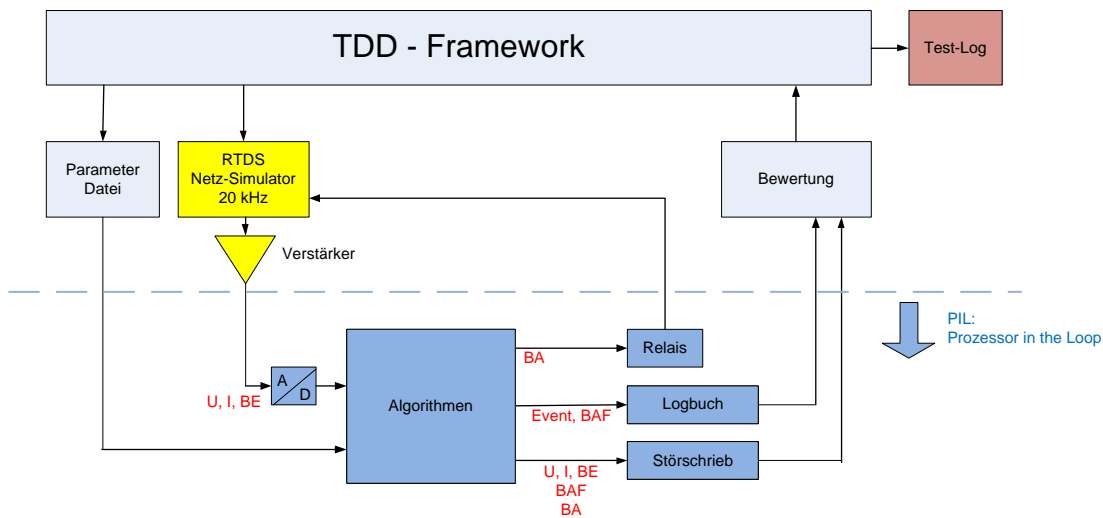


Bild 7-5: Prozessor in the Loop

Nun können Beeinflussungen durch anderer Module und Funktionen, wie z. B. die gleichzeitige Störschreibentsorgung einer großen Datei via TCP/IP während eines Erdschlusses, genauer untersucht werden.

Die Bibliothek an Testfällen wird im Zuge dieser Untersuchungen um diese neuen Anforderungen erweitert.

Wie bereits oben beschrieben, können hier alle Testfälle sehr schnell und in einem Ablauf durchgeführt werden und auf Richtigkeit überprüft werden.

Die Debug-Möglichkeiten sind hier nicht mehr so gut verfügbar, da nun der RTDS und der Algorithmus entkoppelt sind. Wenn der Algorithmus angehalten wird, läuft der RTDS als entkoppeltes System weiter.

Es hat sich in diesem Projekt bereits gezeigt, dass die *Qualität der Software* durch dieses TDD-Framework und durch den Real-Time-Workshop von Mathworks wesentlich angestiegen ist. Die Entwicklung des Algorithmus erfolgt mit einer 4GL-Sprache und es erfolgt eine direkte Umsetzung des Matlab - Codes in den C-Code der Zielhardware. Es werden dabei viele automatische Prüfungen der 4GL-Sprache automatisch in den C-Code eingebaut, wie z. B. Bereichsüberschreitungen des Index bei Vektoren, Überlauf von Integer-Operationen usw.

Vollständige Tests bzw. Gruppen von Tests aus der Test-Bibliothek lassen sich innerhalb weniger Minuten durchführen und werden dadurch täglich durchgeführt.

Es hat sich bei diesem Projekt bestätigt, dass durch die TDD-Methode der Code schlanker wird, da, wie bereits oben beschrieben wurde, einerseits eine Änderung des Codes nur dann erfolgt, wenn ein Test nicht bestanden wird und andererseits nach jeder Codeänderung mit einem funktionierenden Test eine Optimierung des Codes erfolgt.

Ein vollständiger Test aller Funktionen ist nun innerhalb von wenigen Minuten durchführbar. Zum Vergleich: ein ähnlicher Test dauert nach der bisherigen Methode Wochen.

8 Zusammenfassung

Die folgenden Bilder zeigen die Verteilung der Sternpunktbehandlung in Deutschland, Österreich und in der Schweiz [49]. Es ist zu erkennen, dass aus den in dieser Arbeit ausgeführten Gründen die Erdschlusslöschung in diesen Ländern dominiert.

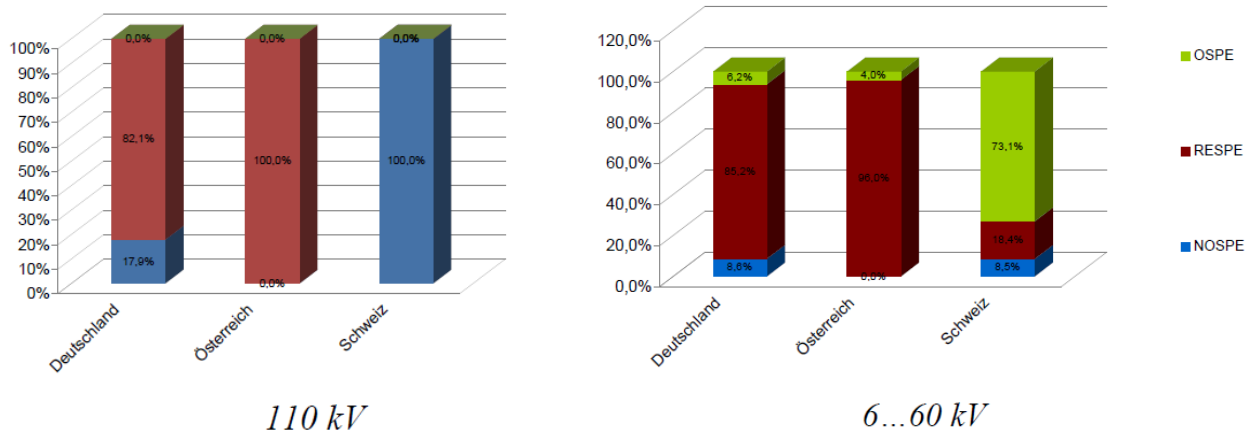


Bild 8-1: Sternpunktbehandlung in D-A-CH

OSPE ... Ohne Sternpunkterdung => Isolierte Netze

RESPE ... Resonanzsternpunkterdung => Gelöschte Netze

NOSPE ... Niederohmige Sternpunkterdung

Es taucht immer wieder die Frage auf, welche Sternpunktbehandlung die Beste sei. Eine eindeutige Antwort kann man hier nicht geben. Eigentlich muss man sagen: " It depends ...".

Für eine genaue Untersuchung muss eine technische und wirtschaftliche Bewertung erfolgen, die aber den Rahmen dieses Werkes sprengen würde. Aber als Beispiel soll hier das Ergebnis einer italienischen Studie aus 2005 kurz präsentiert werden. In Italien wurden zwei Netze über einen längeren Zeitraum im Hinblick auf Versorgungsunterbrechungen beobachtet. In einem Netz wurde dann eine Umstellung auf Erdschlusslöschung und eine Automatisierung zur Fehlereingrenzung innerhalb von 2 Minuten durchgeführt [72][64][71][73]. In der Darstellung in Bild 8-2 wurde der Einfluss der Automatisierung herausgerechnet, somit ist nur mehr der Einfluss der Petersen-Spule auf die Anzahl der Versorgungsunterbrechungen dargestellt.

Als Folge dieser Untersuchung wurde beschlossen, sämtliche Netze der ENEL mit einem kapazitiven Erdschlussstrom größer 30 A auf Erdschlusslöschung mit einer Recloser-Funktionalität im Abgang umzustellen. In der Zwischenzeit wurden ca. 3.000 Petersen-Spulen eingebaut. Aus dem Bild 8-3 ist erkennbar, dass in einzelnen Jahren bis zu 200 Spulen / Jahr eingebaut wurden – nicht zuletzt eine logistische Herausforderung. Der Großteil der eingesetzten Regler und Ortungsgeräte basieren auf den vom Autor entwickelten Regelungs- und Ortungsverfahren.

PERIOD	M		TT	TS	TL	TPE	SPE	LPE		
gen-97	dic-00	48	Ante	792	148	44	629	95	26	SUBSTATION DATA
gen-01	dic-04	48	Post	199	161	65	56	58	27	
			Var%	-75%	9%	48%	-91%	-39%	4%	
			Ante	2420	744	222	1726	420	125	AREA DATA WITHOUT PETERSEN COILS
			Post	3752	1459	534	2613	646	314	
			Var%	55%	96%	141%	51%	54%	151%	
Net results										
			Var%	-130%	-87%	-93%	-142%	-93%	-147%	

TT: total transient int.
 TS: total short int.
 TL: total long int.
 TPE: phase to earth transient int.
 SPE: phase to earth short int.
 LPE: phase to earth long int.

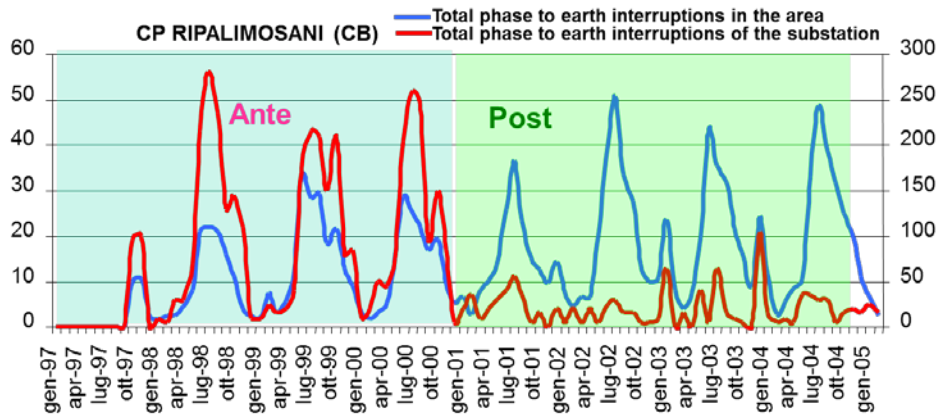


Bild 8-2: Voruntersuchung für die Netzumstellung: Vergleich der Versorgungsunterbrechungen in zwei Netzen, bereinigt um die Autorecloser-Funktionen:
 blau: Netz ohne Umstellung auf Löschung
 rot: Netz mit Umstellung auf Löschung
 [Cerretti: CIRED 2005 round table 3a]

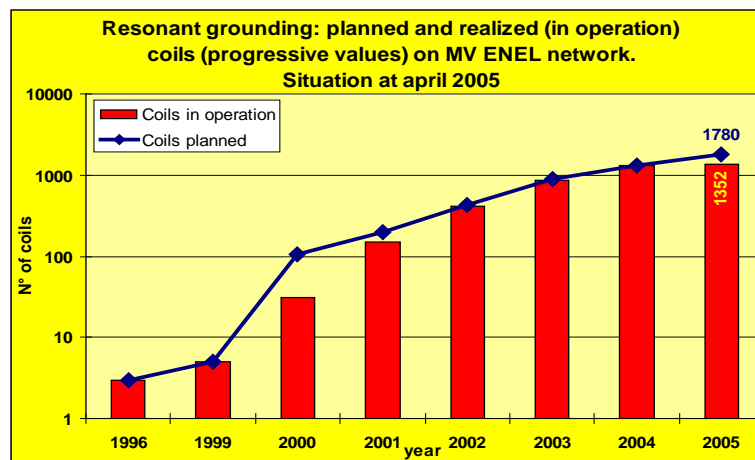


Bild 8-3: Umstellung der Sternpunktbehandlung in Italien [Cerretti, CIRED 2005 round table3a]

Ähnliche Untersuchungen wurden bzw. werden auch in anderen Ländern durchgeführt. In der Zwischenzeit werden auch in Ländern, die bisher nur auf die niederohmige Erdung gesetzt hatten, in verstärktem Maß Petersen-Spulen eingesetzt. Und dies, obwohl der Umstieg von starren bzw. niederohmig geerdeten Netzen auf ein gelöschtes Netz eine Änderung der Isolationskoordination mit erheblichem Aufwand erfordert.

Die heutigen Anforderungen an die Sternpunktbehandlung sind einerseits die Erhöhung der Personensicherheit und andererseits die Erhöhung der Versorgungsqualität - dies natürlich unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Randbedingungen.

In dieser Arbeit wurden die Vorteile der Petersen-Spule für eine unterbrechungsfreie Versorgung der Kunden aufgezeigt. Durch die vorgestellten neuen Regelungsverfahren kann erreicht werden, dass auch bei den heutigen Netzen, die meistens sehr symmetrisch bzw. durch Übersprechen vom Laststrom auf das Nullsystem gestört sind, die Anzahl der Abstimmversuche stark reduziert wird. Dadurch sind die Petersen-Spulen immer optimal auf die aktuelle Netzsituation abgestimmt und die Wahrscheinlichkeit eines Erdschlusses während einer Fehlabbstimmung, z. B. während eines Abstimmvorganges, sehr stark reduziert.

In dieser Arbeit wurde auch gezeigt, dass die selektive Erkennung eines Erdschlusses wesentlich schwerer ist als die Erkennung eines Kurzschlusses. In der Vergangenheit wurden Fehler mit einem Übergangswiderstand von $100\ \Omega$ als sehr hochohmige Fehler bezeichnet. Durch die neuen hier vorgestellten Erdschlusssortungs-Verfahren hat sich die Erkennung und Identifikation des fehlerhaften Abganges in den Bereich von $1\ \text{k}\Omega$ bis $20\ \text{k}\Omega$ verschoben. Die wesentliche Herausforderung bei der hochohmigen Fehlererkennung ist das Verhindern von Überfunktionen der Erdschluss-Signalisierung.

In dieser Arbeit wurden auch neue Verfahren für eine wesentlich schnellere Eingrenzung der Fehlerstelle vorgestellt. Durch Kombination mit GIS-Systemen der heutigen Warten, bei denen die Leitungsdaten und der Schaltzustand hinterlegt sind, ist in Zukunft eine sehr schnelle und genaue Fehlereingrenzung zu erwarten. Eine große Herausforderung ist aber noch immer die Entfernungsabschätzung auf einer Stickleitung mit nur einer einseitigen Messmöglichkeit.

Es wurden auch Ansätze zur Unterdrückung des Wiederzündens präsentiert, die vor allem für Kabelnetze interessant sind. Dadurch werden weitere Spannungsspitzen während des Erdschlusses verhindert und reduzieren dadurch die Wahrscheinlichkeit eines Doppelerdschlusses. Allerdings ergeben sich dadurch wieder neue Herausforderungen an die Erdschlusssortung.

9 Anhang

9.1 Least-Square Methode für einen Kreis: Version 1

Kreisgleichung:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (9.1)$$

$$x^2 + y^2 - 2x_0x - 2y_0y + x_0^2 + y_0^2 - r^2 = 0 \quad (9.2)$$

Multiplikation mit dem Faktor k führt zu

$$kx^2 + ky^2 - 2x_0kx - 2y_0ky + k(x_0^2 + y_0^2 - r^2) = 0$$

$$-2x_0kx - 2y_0ky + k(x^2 + y^2) = k(r^2 - x_0^2 - y_0^2)$$

Wenn man die folgenden Faktoren einführt

$$k = \frac{1}{(r^2 - x_0^2 - y_0^2)}$$

$$k_1 = -2x_0k$$

$$k_2 = -2y_0k$$

$$k_3 = k$$

erhält man:

$$k_1x + k_2y + k_3(x^2 + y^2) = 1 \quad (9.3)$$

Für ein überbestimmtes System gilt die folgende Least-Square Formulierung:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & x_1^2 + y_1^2 \\ x_2 & y_2 & x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & x_n^2 + y_n^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9.4)$$

Mit der einfachen Lösung

$$\mathbf{k} = \mathbf{A}^+ \mathbf{b} \quad \text{mit der Pseudoinversen: } \mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \quad (9.5)$$

Die Parameter des Kreises können damit aus \mathbf{k} wie folgt berechnet werden:

$$x_0 = -\frac{k_1}{2k_3}$$

$$y_0 = -\frac{k_2}{2k_3} \quad (9.6)$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{k_3} + \left(\frac{k_1}{2k_3}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{2k_3}\right)^2}$$

9.2 Least-Square Methode für einen Kreis: Version 2

Wird die Gleichung (9.2) wie folgt umgeformt

$$-2x_0x - 2y_0y + (x_0^2 + y_0^2 - r^2) = -(x^2 + y^2)$$

und die folgenden Konstanten gewählt

$$k_1 = -2x_0$$

$$k_2 = -2y_0$$

$$k_3 = \frac{1}{(x_0^2 + y_0^2 - r^2)}$$

so erhält man:

$$k_1x + k_2y + k_3 = -(x^2 + y^2) \quad (9.7)$$

Das zugehörige überbestimmte System lautet

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ \vdots \\ -(x_n^2 + y_n^2) \end{pmatrix} \quad (9.8)$$

Mit der Lösung

$$\mathbf{k} = \mathbf{A}^+ \mathbf{b} \quad \text{mit der Pseudoinversen: } \mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A} \quad (9.9)$$

können die Parameter des Kreises aus \mathbf{k} wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned} x_0 &= -\frac{k_1}{2} \\ y_0 &= -\frac{k_2}{2} \\ r &= \sqrt{\left(\frac{k_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{k_2}{2}\right)^2} - \frac{1}{k_3} \end{aligned} \quad (9.10)$$

Diese Version liefert wesentlich bessere Ergebnisse.

10 Literaturverzeichnis

Sofern Verweise in der gegenständlichen technischen Studie nicht referenziert sind, stellen die angeführten Quellen weiterführende Literatur dar.

Zur Ausarbeitung der Studie wurden folgende Normen und Literatur herangezogen:

10.1 Normen D-A-CH

EN 50522	Earthing of power installations exceeding 1 kV a. c., November 2010
EN 50341:2002	Freileitungen über AC 45 kV
EN 60289:1994 + A11:2002	Drosselspulen
EN 61936-1	Power installations exceeding 1 kV a. c. – Part 1: Common rules, November 2010
EN 60071-1	Isolationskoordination – Teil1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen, 2010
EN 60071-2	Isolationskoordination – Teil2: Anwendungsrichtlinie, 1997
HD 637 S1	Power installations exceeding 1 kV a. c., May 1999
IEC 61936-1	Power installations exceeding 1 kV a. c. Part 1: Common rules, Edition 2.0, August 2010
prEN 50522:2008	Deutsche Fassung DIN EN 50522, Entwurf, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV
VDE 0101-1: Nov. 2011	Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil1: Allgemeine Bestimmungen
VDE 0101-2: Nov. 2011	Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV
VDE 0111-1: Sept. 2010	Isolationskoordination
VDE 0141: Jan. 2010	Erdungen für spezielle Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
VDE 0210-1: Apr. 2010	Freileitungen über AC 45 kV
VDE 0210-10: Mai 2005	Freileitungen über AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV
VDE 0228-2: Dez. 1987	Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen
VDE 0276	Starkstromkabel
VDE 0670	Wechselstromschaltgeräte
VDE 0675-1: Aug. 2000	Überspannungsableiter
VDE 0845-6: Feb. 2010	Entwurf Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen

VDE V 0140-479-1: Mai 2007	Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere
ÖVE B1/1976:	Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
ÖVE/ÖNORM E 8383:	Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV
ÖVE/ÖNORM E 8384:	Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
ÖVE EN 50110-1:	Betrieb von elektrischen Anlagen
ÖVE/ÖNORM EN 50423:	Freileitungen über AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV
ÖVE/ÖNORM EN 50341:	Freileitungen über AC 45 kV
ÖVE/ÖNORM E8001-1:	Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)
Nullungsverordnung	Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Jahrgang 1998, 322. Verordnung, ausgegeben am 16. September 1998
ÖVE EN 50160:	Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

10.2 Patente und Patentanmeldungen

Im Folgenden sind nur die Erstanmeldungen aufgelistet. Die zugehörigen Patente in den einzelnen Staaten sind nicht aufgeführt.

- [1] WO 95/14322 Verfahren zur Resonanzabstimmung von Erdschlusslöschspulen {Entfernung 1}
- [2] WO 96/27138 Verfahren zur Erkennung eines einpoligen Erdschlusses in einem Drehstromnetz {Admittanz}
- [3] WO 96/34293 Verfahren zum Überwachen eines Drehstromnetzes auf eine Abstimmungsänderung der Erdschlusslöschspule {dU}
- [4] EP 0 933 643 Verfahren zur Fehlerortung in Drehstromnetzen {Entfernung 2}
- [5] DE 101 51 160 Verfahren und Vorrichtung zur Ortung von Erdschlüssen in Drehstromnetzen durch Messung der Leiterströme {Puls}
- [6] DE 101 46 295 Abstimmung einer Erdschlusslöschspule auch während des Erdschlusses {Regelung_Erdschluss}
- [7] DE 101 43 595 Entfernungsbestimmung eines einpoligen Erdschlusses auf einer Stickleitung {Entfernung_Stickleitung}
- [8] DE 102 25 058 Verfahren zur selektiven Ortung von Erdschluss-Wischern in Drehstromnetzen {qu}
- [9] DE 103 02 451 Verfahren zur Erkennung der Richtung eines Erdschlusses {qu_qui}
- [10] DE 103 07 668 Verfahren zur Bestimmung der Parameter eines gelöschten Netzes {CIF}
- [11] DE 103 07 972 Verfahren zur Erkennung und Ortung eines Erdschlusses {DIF}
- [12] DE 102009020908 Erweitertes Verfahren zur Erkennung der Richtung eines Erdschlusses {qu2}

10.3 Veröffentlichungen des Autors

- [13] Druml G., Calone R., Fickert L.: *New hardware in the loop tests for earthfault control and protection systems*, CIRED 2011, paper 607
- [14] Druml G., Fickert L., Fridrich W., Haubenhofer R., Pailer G.: *Neuartige Erdschlussortungsverfahren - Versuche in einem 20-kV-Netz*. VEÖ Journal Bd 6, 1997
- [15] Druml G., *Frankenreiter M.: Schnelles Abstimmen gelöschter Netze*, Bulletin SEV/VSE, Fehraltorf, Schweiz, 2009
- [16] Druml G., Kugi A., Parr B.: *Control of Petersen Coils*, Proceedings XI. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, ISTET 2001, Linz
- [17] Druml G., Kugi A., Seifert O.: *A new directional transient relay for high ohmic earth faults*, Proceedings CIRED 2003, vol 3, paper 3.50
- [18] Druml G., Luxenburger R., Meyer J., Schegner P.: *Moderne einfache Sensoren für die Kurzschluss- und Erdschlussortung*, Beitrag zum FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 in Ulm, 2010
- [19] Druml G., Raunig C., Schegner P., Fickert L.: *Earth fault localization with the help of the fast-pulse-detection-method using the new high-power-current-injection (HPCI)*, PQ2012 Conference in Tartu, Estonia
- [20] Druml G., Seifert O., Fickert L.: *New Improvements for Transient Relays*, Seminar: Methods and techniques for earth fault detection, indication and location, Aalto University Espoo, Finland, 2010
- [21] Druml G., Seifert O., Marketz M.: *Directional Detection of Restriking Earthfaults in Compensated Networks*, CIRED 2011, paper 612
- [22] Druml G., Seifert O., Raunig C., Fickert L.: *Schnelle Pulsortung*, Beitrag zum FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2012 in Mainz, 2012
- [23] Druml G., Seifert O., Zickler U., Roser M., Fickert L.: *Auswertung von nichtlinearen Erdschlüssen*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [24] Druml G., Seifert O.: *A new algorithm for transient, highohmic and restriking earthfaults*, European EMTP-ATP Conference 2003, Graz
- [25] Druml G., Seifert O.: *Gerichtete Erkennung von wiederzündenden Erdschlüssen in gelöschten Netzen*, Beitrag zum FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 in Ulm, 2010
- [26] Druml G., Seifert O.: *New method for the state evaluation of the zero-sequence system*, Power System Computation Conference PSCC-2005, Liege
- [27] Druml G., Skrbinjek O., Baume M.: *Neue Möglichkeiten zur Prüfung von Erdschluss-Schutz Komponenten*.OMICRON Anwendertagung 2006; Weimar
- [28] Druml G.: *Détection de défauts à la terre très résistants sur les réseaux compensés*, REE (Revue de l'électricité et de l'électronique), 1996
- [29] Druml G.: *Earthfault Detection and Control System- EDCSys*, A.Eberle GmbH, Nürnberg, 2007
- [30] Druml G.: *Entscheidungshilfen zur Auswahl geeigneter Verfahren zur gerichteten Erdschluss- erfassung*, Beitrag zurOMICRON Anwendertagung in Darmstadt,OMICRON, Klaus, 2011

- [31] Druml G.: *EOR-3D Hutschiene - Datenblatt*, A. Eberle GmbH, Nürnberg 2012
- [32] Druml G.: *EOR-3D Industriegehäuse - Datenblatt*, A. Eberle GmbH, Nürnberg 2012
- [33] Druml G.: *Erdschlusserfassung und -ortung*, Beitrag im FGH-Seminar "Grundlagen der Netzschutztechnik", Mannheim, 2011
- [34] Druml G.: *Erdschlussortung*, Seminarunterlagen, A.Eberle, Nürnberg 2012
- [35] Druml G.: *Erdschlussortungsrelais EOR-D, Betriebsanleitung*, A. Eberle GmbH, Nürnberg, 2010
- [36] Druml G.: *Erdschlussregelung*, Seminarunterlagen, A.Eberle, Nürnberg 2002
- [37] Druml G.: *Erkennung von hochohmigen Erdschlüssen in gelöschten Netzen*, Internationales Symposium NMT zum Thema „Sternpunktbehandlung in Verteilungsnetzen – Zukunftsaussichten in Mulhouse, Frankreich, 1995
- [38] Druml G.: *Neue Methoden zur Erdschlusseingrenzung*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [39] Druml G.: *Neue Methoden zur Regelung von Petersen Spulen: Theorie und Betriebserfahrung*, Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung der TU Graz, 2007
- [40] Druml G.: *New Methods for the Earthfault-Localisation in isolated and compensated networks*, CIDEL Argentina 2010, Buenos Aires, Argentinien, 2010
- [41] Druml G.: *Petersen - Coil Controller REG-DP with optional Current Injection*, Operation Manual, A. Eberle GmbH, Nürnberg 2007
- [42] Druml G.: *Regelung von Petersen Spulen*, Steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung der TU Graz, 2003
- [43] Druml G.: *Sekundärtechnik und Komponenten im Bereich der Erdschlussbehandlung isolierter und gelöschter Netze*, ETG Fachtagung in Olten, Schweiz, 2006
- [44] Druml G.: *Zeitoptimale Fehlersuche in IT-Netzen bzw. Netzen mit Erdschlusslöschspulen*, TÜV: 10. Fachtagung Elektrotechnik, Hattingen, Deutschland, 2009
- [45] Druml, G, Steger, S., Seifert, O., Kugi, A.: *Operational experiences with the new method to control Petersen- coils by injection of two frequencies*, CIRED Wien 2007
- [46] Grimme R., Klettner J., Schinköthe B., Druml G.: *Transportable Erdschlusslöschspule*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [47] Kaufmann G., Druml G.: *Neue Methoden der Resonanzabstimmung*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [48] Kugi A., Druml G.: *A new method for the localisation of low- and high-resistance earth faults*, PSP'98 in Bled, Jugoslawien, 1998
- [49] **Melzer H. et al:** *Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)*, ETG-Fachbericht 132, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2012
- [50] Melzer H., Druml G.: *Erdschlusserfassung und dezentrale Erzeugungsanlagen*, Beitrag zum FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2010 in Ulm, 2010

- [51] Roman H., Druml G.: *Distance location of earthfaults in compensated medium voltage networks*, CIRED 1999,
- [52] Seifert O., Zickler U., Druml G., Roser M., Fickert L.: *Lichtbogenmodell für wiederzündende Fehler*, Beitrag zum FNN/ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2012 in Mainz, 2012
- [53] Tengg Ch., Schoaß K., Schmaranz R., Marketz M., Druml G.: *Neue Erdschluss-Ortungsverfahren im Praxistest*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011

Weiterführend zum Thema IEC 61850

- [54] Druml G.: *IEC 61850- Status und zukünftige Entwicklung bei A.Eberle*, FGH Fachtagung Kommunikation in der Schutz- und Stationsleittechnik- 61850 in der Praxis: Anwendungen und Erfahrungen, Heidelberg, 2005
- [55] Druml G.: *Flexible Modellierung der IEC 61850 für Schutz- und Leittechnikgeräte*, Omicron Anwendertagung in Kassel, 2007
- [56] Druml G.: *Gerätefunktionalität nach Anwenderwunsch*, FGH-Fachtagung zum Thema IEC61850 in der Praxis: Anwendung, Erfahrungen und Ausblick, Heidelberg, 2008
- [57] Krings H. et al: *IEC-61850-Geräte im FGH-InterOp-Test*, ETZ, 2010

10.4 Literatur

- [58] Achleitner G.: Earth fault distance protection, Dissertation am Institut für elektrische Anlagen in Graz, 2008
- [59] Achleitner, G., Fickert L., Obkircher C., Sakulin M.: *Earth fault distance protection*, CIRED 2009, paper 305
- [60] Achleitner, G., Obkircher, C., Fickert, L., Sakulin, M., Raunig, C.: *An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current*, PQ 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, 2008
- [61] Achleitner, G., Obkircher, C., Fickert, L., Sakulin, M., Raunig, C.: *A new approach for an earth fault distance localization algorithm in compensated networks*, PSCC 2008, paper 449
- [62] Achleitner, Obkircher C., G., Fickert L., Sakulin M.: *A new approach for earth fault localization in compensated networks*, PSP 2006, Bled, Slowenien
- [63] Amezua A., Pazos F.J., Santamaria G., Garcia J., Buigues G.: *Active earthing system to optimise power quality in MV networks*, Conference: Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona 2007
- [64] Bargigia A., Cerretti A., et al: *Telecontrol and automation on ENEL distribution network: strategy and results*, CIRED 2003, paper 33
- [65] Bartholomäus K., Eichhorn K. Fr., Zimmermann I.: *Passive Sternpunktbehandlung zur Reduzierung von Oberschwingungserdschlussströmen*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [66] Bauer R.: *Die Messwandler, Grundlagen, Anwendung und Prüfung*, Springer-Verlag, Berlin, 1953
- [67] Bergeal J., Berthet L., Grob O., Bertrand P., Lacroix B.: *Single-phase faults on compensated neutral medium voltage networks*, Proceedings CIRED 1993, vol. 2, 2.9.1–2.9.5., 1993
- [68] Berthet L., Meunier R.: *Aufrechterhaltung der Stromversorgung während eines MS-Erdschlusses, Die Erfahrungen im Umspannwerk Geubwiller*, Beitrag zur NMT-Fachtagung in Mulhouse, 1995
- [69] Böning W.: *Einführung in die Berechnung elektrischer Schaltvorgänge*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1992
- [70] Böning Walter: *Einführung in die Berechnung elektrischer Schaltvorgänge*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1992
- [71] Cerretti A. et al: *Automatic fault clearing on mv networks with neutral point connected to ground through impedance*, CIRED 2003, paper 6
- [72] Cerretti A. et al: *Improvement in the continuity of supply due to a large introduction of Petersen coils in HV/MV substations*, 18th International Conference on Electricity Distribution, CIRED Turin 2005, paper 168
- [73] Cerretti A., Lembo G., Valtorta G.: *Improvement in the continuity of supply due to a large introduction of Petersen coils in HV/MV substations*, CIRED 2005
- [74] CIRED WG03: *Fault management in electrical distribution systems*, CIRED 1999

- [75] Clarke Edith: *Circuit Analysis of A-C Power Systems*, Volume 1, 4.Aufl, John Wiley & Sons, Inc, 1950
- [76] Clemens H., Rothe K.: *Schutztechnik in Elektroenergiesystemen*, 3. Auflage, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1991
- [77] Clemens H., Rothe K.: *Schutztechnik in Elektroenergiesystemen*, 3. Aufl., VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1991
- [78] Connor Th.: *Sternpunktbehandlung – Ein Oberbegriff im Dickicht der Vorschriften*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [79] Crastan V.: *Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 2006
- [80] Doemeland W.: *Handbuch Schutztechnik, Grundlagen, Schutzsysteme, Inbetriebsetzung*, 9. Auflage, VDE-Verlag, Berlin, 2010
- [81] Dolník B., Kurimský J.: *Contribution to earth fault current compensation in middle voltage distribution networks*, Przegľad Elektrotechniczny (Electrical Review), Technical University of Košice, Slovakia, 2011
- [82] Dorsch H.: *Überspannungen und Isolationsbemessung bei Drehstrom-Hochspannungsanlagen*, Siemens, Berlin München, 1981
- [83] Dzienis, C., Kereit, M., Stucker, A.: *Fault localization in medium voltage networks with compensated and isolated star-point grounding*, 2010 Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010
- [84] Eberl G., Schegner P.: *Earth fault location based on short time low ohmic neutral earthing in cabled MV networks of the DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH*, Seminar: Methods and techniques for earth fault detection, indication and location, Aalto University Espoo, Finland, 2010
- [85] Eberl G.: *Einsatz eines Deltaverfahrens zur Berechnung der Erdschlussdistanz in kompensiert betriebenen Energienetzen*, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2004
- [86] Eberl G.: *Ermittlung der Erdschlusssentfernung durch Auswertung stationärer Strom – und Spannungskomponenten (Differenzmethode)*, ETG-Kongress 2001 in Nürnberg: Energietechnik für die Zukunft, ETG Fachbericht 85, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [87] Elkalashy N.I.: *Modeling and detection of high impedance arcing fault in medium voltage networks*, Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, 2007
- [88] Erich M., Heinze H.: *Löschung von Erdschlusslichtbögen in Mittelspannungsnetzen*, ETZ-A, Band 84, Heft 5, 1963
- [89] Fickert L.: *Oberschwingungs-Relativmessung: Vorstellung eines neuartigen Erdschlusssortungsverfahrens für gelöschte Strahlennetze*. VEÖ Journal, Bd. 12, 1996
- [90] Fickert L., Achleitner G., Obkircher C.: *Innovative neutral point treatment in compensated networks*, CIRED 2007, paper 699
- [91] Fickert L., Achleitner G., Schmutzger E., Obkircher C., Raunig C.: *Resonant grounded grids – quo vadis!?*, CIRED 2009, paper 307
- [92] Fickert L.: *Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme*, TU-Graz IEA, Graz, 2008

- [93] Fickert L.: *110-kV-Kabel, -Freileitung: Eine technische Gegenüberstellung* ; Studie im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung, Verlag der Technischen Universität, Graz, 2004
- [94] Fiedler H.: *Anwendungsschranken der Resonanzsternpunktterdung in Kabelnetzen*, ELEKTRIE, Berlin 45, 1991, Berlin
- [95] Flosdorff R., Hilgarth G.: *Elektrische Energieverteilung*, 8. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 2003
- [96] Flosdorff R., Hilgarth G.: *Elektrische Energieverteilung*, 8. Aufl., Teubner, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2003.
- [97] FNN: *Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen*, Ausgabe September 2009, VDE-Verlag, Berlin, 2009
- [98] FNN: *Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik – Berichtsjahr 2007*, VDE-Verlag, Berlin, 2007
- [99] Frei J.: *Leitungssysteme mit dominantem Stromfluss über Erde, Messungen, Modellierung und Verifizierung*, Dissertation am Institut für elektrische Anlagen in Graz, 2007
- [100] Fuchs, E., Achleitner, G., Obkircher, C., Fickert, L., Sakulin, M.: *New Ways In Determining The Earth Fault Duration*, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010
- [101] Glover J. D., Sarma M. S.: *Power system analysis and design*, 2. Aufl., PWS Pub., Boston, 1994
- [102] Gönen T.: *Electric power transmission system engineering: Analysis and design*, J. Wiley, New York, 1988
- [103] Grambow I., Braun A.: *Messwandler für Mittel- und Hochspannungsnetze: Mit 30 Tabellen*, Expert-Verl., Renningen-Malmsheim, 2000
- [104] Grohs A.: *Freileitungsnorm EN 50423 Auslegung der Erdung, Mittelspannungs-Freileitungen nach der neuen Norm EN 50423 (VDE 0210)*, ETG-Fachbericht 101, VDE-Verlag, Berlin
- [105] Guldbrand A.: *Earth faults in extensive cable networks, Dissertation*, Lund University, Lund, Sweden, 2009
- [106] Hänninen S., Lethonen M.: *Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay*, VTT, Espoo, 2002
- [107] Hänninen S.: *Single phase earth faults in high impedance grounded networks*, Dissertation, VTT Publication 453, Finland, 2001
- [108] Hase Y.: *Handbook of power system engineering*, John Wiley & Sons, Chichester Hoboken, NJ, 2007
- [109] Heinhold L.: *Kabel und Leitungen für Starkstrom, Teil 1*, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 5. Aufl., 1999
- [110] Heinhold L.: *Kabel und Leitungen für Starkstrom, Teil 2*, Siemens, Berlin-München, 4. Aufl., 1987
- [111] Herold G.: *Elektrische Energieversorgung I*, J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2002
- [112] Herold G.: *Elektrische Energieversorgung II*, 2. Aufl., J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2008
- [113] Herold G.: *Elektrische Energieversorgung III*, 2. Aufl., J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2008

- [114] Herold G.: *Elektrische Energieversorgung IV*, J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2003
- [115] Herrmann H.-J.: *Digitale Schutztechnik: Grundlagen, Software, Ausführungsbeispiele*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1997
- [116] Heuck K., Dettmann K.-D., Schulz D.: *Elektrische Energieversorgung*, 8. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [117] Hochrainer, A.: *Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen*, Springer Verlag, Berlin, 1957
- [118] Höne S., Seifert O.: *Überblick über die Arten der Sternpunktbehandlung in Europa*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [119] Höpfner S., Schegner P.: *Verfahren zur Korrektur von gemessenen Resonanzkurven und Ortskreisen*, ew Jg.105(2006), Heft26, EW Medien und Kongress GmbH, Frankfurt a.M., 2006
- [120] Hubensteiner H.: *Schutztechnik in elektrischen Netzen 1, Grundlagen und Ausführungsbeispiele*, 2. Auflage, VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [121] Hubensteiner H.: *Schutztechnik in elektrischen Netzen 2, Planung und Betrieb*, 2. Auflage, VDE-Verlag, Berlin, 1993
- [122] Igel M.: *Neuartige Verfahren für den Erdschlussdistanzschutz in isolierten und kompensiert betriebenen Netzen*, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1989
- [123] Imriš P., Lehtonen M.: *Transient based earth fault location in 110 kV subtransmission networks*, PSCC 2005, Liege, 2005
- [124] Imriš P.: *Transient based earth fault location in 110 kV subtransmission networks*, Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, 2006
- [125] Kiefer G.: *VDE 0100 und die Praxis*, 14. Auflage, VDE-Verlag, Berlin, 2012
- [126] Klein R.W.: *Erdschlusseingrenzung im 16,7 Hz Bahnstromleitungsnetz der DB Energie*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [127] Koettnitz H., Pundt H.: *Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze: Mathematische Grundlagen und Netzparameter*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
- [128] Koettnitz H., Winkler, G., Wessnig, K.-D.: *Grundlagen elektrischer Betriebsvorgänge in Elektroenergiesystemen*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
- [129] Kovács K.P., Raács I.: *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*, Band 1, Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest, 1959
- [130] Küchler A.: *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, 3. Aufl., Springer, Dordrecht New York, 2009
- [131] Kuhnert E., Wiznerowicz F.: *Eigenschaften von Energiekabeln und deren Messung*, 3. Aufl., EW Medien und Kongresse, Frankfurt a.M., 2012
- [132] Küpfmüller, Mathis, Reibiger : *Theoretische Elektrotechnik*, Springer, Berlin, 2005
- [133] Lakervi E., Holmes E. J.: *Electricity distribution network design*, 2. Aufl., P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, 1995

- [134] Lehtonen M., Hakola T.: *Neutral Earthing and Power System Protection - Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks*, Vaasa, Finland: ABB Transmit Oy, 1996.
- [135] Lehtonen M.: *Transient analysis for ground fault distance estimation in electrical distribution networks*, Dissertation, VTT, Espoo, 1992
- [136] Lorenc J., Marszatkiewicz K., Andruszkiewicz J.: *Admittance criteria for earth fault detection in substation automation systems in polish distribution power networks*, CIRED 1997
- [137] Louro M. et al: *Effects on the quality of service of changing the neutral grounding of MV networks*, CIRED 2011
- [138] Lüke, E.: *Langzeitbetrachtung der Erdschlussströme in gelöschten Netzen*. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997) Heft 19. S.1011-1015
- [139] Lunze K.: *Berechnung elektrischer Stromkreise*, 7.Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin, 1972
- [140] Marino E., Rocca F., Valtorta G., Ceresoli B.: *Change of neutral earthing of MV networks from isolated to connected to ground through impedance: operation results and transition management*, CIRED 2003, paper 7
- [141] Märkel P., Radtke H.-J., Schegner P., Seifert O.: *Results of earth fault measurements in an earth fault compensated 110-kV-system*, CIRED 2001, paper 482
- [142] Märkel P., Schulze L., Schegner P., Seifert O.: *Betriebserfahrungen in erdschlusskompensierten 110-kV-Netzen mit großem kapazitiven Erdschlußstrom*, ETG-Kongress 2001, Nürnberg, 2001.
- [143] Martinez-Velasco, J. A.: *Power system transients: Parameter determination*, CRC Press, Broken Sound Parkway, Florida USA, 2010
- [144] Melzer H.: *Auswirkung der Sternpunktbehandlung in Verteilnetzen*, Beitrag zum ETG/BDEW-Tutorial Schutz- und Leittechnik 2008 in Dortmund, ETG-Fachbericht 115, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2008
- [145] Merschel F.: *Kabelhandbuch*, 8. Aufl., EW Medien und Kongresse, Frankfurt, M, Berlin, 2012
- [146] Minović M., Schulze P.: *Hochspannungstechnik*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1992
- [147] Miri A.-M.: *Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen: Mathematische Einführung, elektromagnetische und elektrochemische Vorgänge*, Springer, Berlin Heidelberg, 2000
- [148] Moos T., Schuhmacher T.: *Erfahrung mit kompensierten 20-kV-Mittelspannungs-Netzen*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [149] Neier T.: *Cable fault location in LV, MV and HV Underground Cable Networks*, Baur Prüf- und Messtechnik GmbH, Sulz, 2009
- [150] Nelles D., Opperskalski H.: *Digitaler Distanzschutz: Verhalten der Algorithmen bei nichtidealen Eingangssignalen*, Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden, 1991
- [151] Niemand T., Kunz H.: *Erdungsanlagen*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1996
- [152] Niemeyer P., Grohs A.: *Freileitung*, 2. Aufl., VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2008
- [153] Nikander A., Lakervi E.: *A philosophy and algorithms for extinguishing earth fault arcs in suppressed medium voltage networks*, CIRED 1997

- [154] Nikander, A., Jarventausta, P.: *Methods for earth fault identification and distance estimation in a compensated medium voltage distribution network*, Proceedings of EMPD '98. International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998
- [155] Northcote-Green J., Wilson R.: *Control and automation of electrical power distribution systems*, Taylor & Francis, Boca Raton, 2007
- [156] Obkircher C.: *Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze*, Dissertation am Institut für elektrische Anlagen in Graz, 2008
- [157] Obkircher, C., Achleitner, G., Fickert, L., Sakulin, M.: *Cable Installation Limits in Earth Fault Compensated 110-kV-Networks*, PSCE '06. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006
- [158] Oeding D., Oswald B. R.: *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 7. Aufl., Springer, Heidelberg, 2011
- [159] Oeding D., Oswald B.R.: *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [160] Ong C.-M.: *Dynamic simulation of electric machinery: Using Matlab/Simulink*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, op. 1998
- [161] Oswald B. R.: *Berechnung transients Vorgänge in Elektroenergieversorgungsnetzen*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1996
- [162] Oswald B. R.: *Berechnung von Drehstromnetzen: Berechnung stationärer und nichtstationärer Vorgänge mit symmetrischen Komponenten und Raumzeigern*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [163] Oswald B.: *Berechnung stationärer und quasistationärer Betriebszustände in Elektroenergieversorgungsnetzen*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 1992
- [164] Pack S., Podesser J.: *Transiente Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel*, Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Graz, 2011
- [165] Peschke E.: *Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung: Entwicklung, Herstellung, Prüfung, Montage und Betrieb von Kabeln und deren Garnituren*, Publicis MCD Vlg., Erlangen, 1998
- [166] Phadke A. G.: *Computer relaying for power systems*, 2. Aufl., John Wiley & Sons; Research Studies Press, Chichester, West Sussex Hoboken, NJ, Baldock, Hertfordshire, 2009
- [167] Philippow: *Grundlagen der Elektrotechnik*, 10.Auflage, Verlag Technik Berlin, Berlin, 2000
- [168] Pucher, W.: *Beiträge zur Theorie des Schaltlichtbogens*, Electrical Engineering 83, Springer Verlag, 2001
- [169] Pundt H.: *Grundlagen der Sternpunktbehandlung*, Seminarunterlagen bei A.Eberle, Technische Universität Dresden, 2002
- [170] Pundt H.: *Untersuchung der Ausgleichsvorgänge bei Erdschluß in Energieversorgungsnetzen*, Energietechnik, 15. Jg. Heft 10, 1965
- [171] Pundt H.: *Untersuchung zu Ausgleichsvorgängen bei Erdschluss in Hochspannungsnetzen mit isolierter und induktiver Sternpunkterdung als Grundlage zur selektiven Erdschlusserfassung*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 1969

- [172] Raisz D., Dán A.: *Innovative Lösung für die Fehlerortung und Reststromkompensation in gelöschten Netzen*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [173] Raunig, C., Fickert, L., Obkircher, C., Achleitner, G.: *Mobile earth fault localization by tracing current injection*, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010
- [174] Raunig, C., Obkircher, C., Achleitner, G., Schmutzger, E., Fickert, L.: *Calculation of neutral to earth voltage levels in compensated high voltage networks influenced by cross coupling*, PQ 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, 2008.
- [175] Ritz: *Fachwörterbuch Messwandler*, Ritz Instrument Transformers GmbH, Ottendorf-Okrilla, Deutschland, 2009
- [176] Roman H., Hylla H.: *Experiences on localisation of earth faults and short circuits in rural MV networks*, CIRED 2003, paper 9
- [177] Roman H., Hylla H.: *Fast fault location in rural MV distribution networks*, CIRED 2001, paper 3.6
- [178] Rüdénberg R., Dorsch ., Jacottet P.: *Elektrische Schaltvorgänge*, 5. Auflage, Springer-Verlag, 1974
- [179] Saadat H.: *Power system analysis*, WCB/McGraw-Hill, Boston, 1999
- [180] Schegner P., Eberl G.: *Computation of the earth fault distance in compensated MV-networks by evaluating steady state values*, PSCC 2005, paper 8.05
- [181] Schegner P., Eberl G.: *Overview of methods for earth fault distance calculations*, Seminar: Methods and techniques for earth fault detection, indication and location, Aalto Univeristy Espoo, Finnland, 2010
- [182] Schegner P., Pilz G., Seifert O.: *Methods for automatic parameter estimation of resonant-earthed systems*, MEPS 2002
- [183] Schegner P.: *Digitaler Erdschlußuniversalschutz, Konzept und Realisierung*, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1989
- [184] Schegner P.: *Erdschlussortung in elektrischen Netzen mit einer Erdschlussspule*, EP 0696830, Europäische Patentanmeldung, 1996
- [185] Schinerl T.: *A new sensitive detection algorithm for low and high impedance earth faults in compensated MV networks based on the admittance method*, CIRED 2005
- [186] Schlabbach J., Metz D.: *Netzsystemtechnik: Planung und Projektierung von Netzen und Anlagen der Elektroenergieversorgung*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2005
- [187] Schlabbach J.: *Elektroenergieversorgung: Betriebsmittel, Netze, Kennzahlen und Auswirkungen der elektrischen Energieversorgung*, 2. Aufl., VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2003
- [188] Schlabbach J.: *Sternpunktbehandlung*, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2002
- [189] Schossig W.: *Netzschutztechnik*, 3. Auflage, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2007
- [190] Schubert S.: *Einfluss der Sternpunktbehandlung auf die Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2009 in Dresden, ETG-Fachbericht 116, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2009
- [191] Schufft W., Backes J.: *Taschenbuch der elektrischen Energietechnik: Mit 102 Tabellen*, Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 2007

- [192] Schulze R., Schegner P.: *A new fault location method for transmission lines taking the places of transposing into account*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011
- [193] Schulze R., Schegner P.: *Two-terminal fault location on unsymmetrical transmission lines*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010
- [194] Schwab A.: *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*, Springer, Berlin, 2006
- [195] Speck D.: *Energiekabel im EVU: Entwicklung, Technik, Anwendung, Prüfung und Betriebserfahrung der Energiekabel vom Niederspannungs- bis zum Höchstspannungsnetz*, Expert-Verl., Renningen-Malmsheim, 1994
- [196] Ulrich P., Groß G.: *Begrenzung der Erdschlussrestströme mittels aktiver Filterung*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [197] Vennegeerts H.: *Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das Störungsgeschehen*, FGH-Seminar „Sternpunktbehandlung“
- [198] VWEW: *Kabelhandbuch*, 7. Auflage, VWEW Energieverlag, Frankfurt, 2007
- [199] Wahlroos A., Altonen J.: *Compensated networks and admittance based earth-fault protection*, Seminar: Methods and techniques for earth fault detection, indication and location, Aalto University Espoo, Finland, 2010
- [200] Watson N. R., Arrillaga J.: *Power systems electromagnetic transients simulation*, Institution of Electrical Engineers, London, 2003
- [201] Willheim R., Waters M.: *Neutral Grounding in High-Voltage Transmission*, Elsevier Publishing Company, London, 1956
- [202] Willheim R.: *Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen*, Springer Verlag, Berlin, 1936
- [203] Winter K.: *Die Reststromkompensation – ein neues Verfahren für den Erdschluss-Schutz von Kabel- und Freileitungsnetzen*, Beitrag zur NMT-Fachtagung in Mulhouse, 1995
- [204] Winter K.: *Die sichere und schnelle Entsorgung des Kabelfehlers in gelöscht betriebenen Netzen*, Beitrag zur ETG Fachtagung STE 2011 in Erfurt, ETG-Fachbericht 129, VDE-Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2011
- [205] Wurm M., Haidvogel H., Bratoev Z.: *Lösungen zur Verbesserung der Versorgungsqualität am Beispiel des bulgarischen Stromverteilungsnetzes*, e&i, 124. Jahrgang, 2007, Heft 12
- [206] Zickler U.: *Untersuchung zum Einfluss der Harmonischen im Erdschlussreststrom auf die Löschfähigkeit in kompensiert betriebenen Energieversorgungsnetzen*, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 2002
- [207] Ziegler G.: *Digitaler Distanzschutz: Grundlagen und Anwendung*, Publicis-MCD-Verl., München Erlangen, 1999.
- [208] Živanović R., Schegner P., Seifert O., Pilz G.: *Identification of the Resonant-Grounded System Parameters by Evaluating Fault Measurement Records*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.19, 2004

Signalverarbeitung und Systemtheorie

- [209] Angermann A.: *MATLAB - Simulink - Stateflow: Grundlagen, Toolboxen, Beispiele*, 7. Aufl., Oldenbourg, München, 2011
- [210] Cristi R.: *Modern digital signal processing*, Thomson/Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, 2004
- [211] Gerdson P., Kröger P.: *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung: Elemente, Bausteine, Systeme und ihre Algorithmen*, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [212] Grünigen D. C. v.: *Digitale Signalverarbeitung: Bausteine, Systeme, Anwendungen*, FO Print & Media, Egg bei Zürich, 2008
- [213] Grünigen D. C. v.: *Digitale Signalverarbeitung*, 3. Aufl., Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, München, 2004
- [214] Hanselman, D. C., Littlefield, B.: *Mastering MATLAB*, Pearson, Upper Saddle River, 2012
- [215] Hoffmann J., Quint F.: *Signalverarbeitung mit MATLAB und Simulink: Anwendungsorientierte Simulationen*, Oldenbourg, München Wien, 2007
- [216] Hoffmann J.: *Spektrale Analyse mit MATLAB und Simulink: Anwendungsorientierte Computer-Experimente*, Oldenbourg, München, 2011
- [217] Hoffmann J.: *MATLAB- und SIMULINK in Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik*, Addison-Wesley Longman, München, 1999
- [218] Horn M., Dourdoumas N.: *Regelungstechnik: Rechnerunterstützter Entwurf zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Regelkreise*, 2. Aufl., Pearson Studium, München Boston, 2004
- [219] Isermann R.: *Identifikation dynamischer Systeme 1*, Springer-Verlag, Berlin New York, 1992
- [220] Isermann R.: *Identifikation dynamischer Systeme 2*, Springer-Verlag, Berlin New York, 1992
- [221] Isermann R., Münchhof M.: *Identification of Dynamic Systems*, Springer-Verlag, Berlin New York, 2011
- [222] Kiencke U., Eger R.: *Messtechnik: Systemtheorie für Elektrotechniker*, 7. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg, 2008
- [223] Klein W.: *Vierpoltheorie*, Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1972
- [224] Kroschel K.: *Statistische Informationstechnik: Signal- und Mustererkennung, Parameter- und Signalschätzung*, 4. Aufl., Springer, Berlin, 2004
- [225] Leis J.: *Digital signal processing using MATLAB for students and researchers*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2011
- [226] Lerch R.: *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*, 5. Aufl., Springer Berlin, Berlin, 2010
- [227] Ljung L.: *System identification: Theory for the user*, 2. Aufl., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009
- [228] Lutz H., Wendt W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik: Mit MATLAB und Simulink*, 8. Aufl., Deutscher, Frankfurt, M, 2010
- [229] Meffert B., Hochmuth O.: *Werkzeuge der Signalverarbeitung: Grundlagen, Anwendungsbeispiele, Übungsaufgaben*, Pearson Studium, München Boston, 2004

- [230] Niemeier W.: *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden*, 2. Aufl., De Gruyter, Berlin, 2008
- [231] Oppenheim A. V., Schäfer R. W., Buck J. R.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, 2. Aufl., Pearson Studium, München Boston, 2004
- [232] Oppenheim A. V., Schafer R. W.: *Discrete-time signal processing*, 3. Aufl., Pearson, Upper Saddle River, N.J, 2010
- [233] Pietruszka W. D.: *MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis*, 2. Aufl., Teubner, Wiesbaden, 2006
- [234] Proakis J. G., Manolakis D. G.: *Digital signal processing*, 4. Aufl., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, 2007
- [235] Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A.: *Digital signal processing in power system protection and control*, Springer, London, 2011
- [236] Roderer H., Pecher A.: *Digitale Signalverarbeitung*, Vogel, Würzburg, 2010
- [237] Schrufer E.: *Signalverarbeitung: Numerische Verarbeitung digitaler Signale*, 2. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [238] Tönnies K. D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*, Pearson Studium, München Boston, 2005
- [239] Vaseghi S. V.: *Multimedia signal processing: Theory and applications in speech, music and communications*, J. Wiley, Chichester, England Hoboken, NJ, 2007
- [240] Werner M.: *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB*, 5. Aufl., Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2011

Software-Entwicklung

- [241] Beck K.: *Test-Driven Development By Example*, Addison Wesley Professional, 2002
- [242] Meszaros G.: *xUnit test patterns: Refactoring test code*, Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2007