



Walter Rischawy, BSc

**Technische Anwendbarkeit und wirtschaftliche
Bewertungsfaktoren von Erdschlussortungsverfahren in
städtischen Mittelspannungsnetzen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Dipl.-Ing. Elisabeth Hufnagl

Institut für Elektrische Anlagen

Graz, Dezember 2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

DANKSAGUNG

Ich möchte diesen Platz nutzen um mich bei allen Menschen zu bedanken, die mich fachlich und persönlich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Einen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer, Univ.-Prof. Lothar Fickert, und meiner Zweitbetreuerin, Dipl.-Ing. Elisabeth Hufnagl, sowie dem gesamten Team des Instituts für Elektrische Anlagen aussprechen.

Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeitern der Netzbetreiber bedanken, die mir bei mehreren Gelegenheiten Einblicke in die Netzpraxis gegeben haben.

Außerdem möchte ich meinen Freunden und Studienkollegen für die vielen interessanten und lustigen Erlebnisse im Laufe des Studiums danken.

Abschließend möchte ich von ganzem Herzen ein großes Dankeschön an meine Familie und meine liebe Freundin richten. Danke, dass ihr immer für mich da seid!

KURZFASSUNG

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Methoden zur Erdschlusssortung untersucht. Dabei werden zunächst die theoretischen Hintergründe der einzelnen Verfahren erklärt und daraus folgend die substanziellen Vor- und Nachteile beschrieben. Der Betrachtung werden städtische Mittelspannungsnetze zugrunde gelegt, welche in Österreich hauptsächlich kompensiert betrieben werden und zu einem hohen Prozentsatz als reine Kabelnetze ausgeführt sind. Aufgrund dieser Gegebenheiten wird für die Analyse ein repräsentatives Musternetz konzipiert, an dem die verschiedenen Erdschlusssortungsverfahren auf ihre technische Anwendbarkeit überprüft werden.

Den Schwerpunkt der Untersuchung bilden stationäre Verfahren, da diese, im Unterschied zu den transienten Methoden, eine selektive Ortung des fehlerbehafteten Netzabschnitts durch nachfolgende Schalthandlungen ermöglichen. Im Zuge der Überprüfung liegt der Fokus vor allem auf der Dimensionierung und der Betrachtung der Grenzen hinsichtlich der Empfindlichkeit und der Selektivität dieser schutztechnischen Verfahren. Außerdem werden für die behandelten Ortungsverfahren die wesentlichen wirtschaftlichen Bewertungsfaktoren angeführt. Als Ergebnis werden abschließend wichtige Kriterien zur Entscheidungsfindung bezüglich eines Erdschlusssortungssystems angegeben.

Schlüsselwörter: *städtisches Mittelspannungsnetz, Resonanzsternpunktterdung, Erdschlusssortung, Oberschwingungsverfahren, wattmetrisches Verfahren, KNOSPE, Wattreststromerhöhung, KNOPE, Pulsortung, wirtschaftliche Bewertungsfaktoren für Erdschlusssortungssysteme*

ABSTRACT

In the context of this master thesis different earth fault detection principles are investigated. Initially the theoretical background of the individual procedures is explained. Consequently the essential advantages and disadvantages are described. The examination has a strong focus on urban medium voltage networks. In Austria, these grids are mainly operated as resonant grounded networks and a high percentage of them are realized as underground cable systems. Therefore a representative model network is designed on which the technical applicability of the different earth fault detection methods is examined.

The priority of the analysis lies on steady state procedures, which, in contrast to transient methods, make a selective location of the faulty grid section by consecutive network switching operations possible. A special emphasis of the investigation is given on the dimensioning and the observation of the technical limits regarding the protection selectivity and sensitivity. Furthermore, the economic assessment factors of each method are provided. As a result, concrete suggestions for a decision support regarding an earth fault detection system are submitted.

Keywords: *urban medium voltage network, resonant grounding, earth fault detection, harmonics method, wattmetric method, low ohmic earthing of the neutral point, current injection method, healthy phase earthing, economic assessment factors of earth fault detection systems*

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Grundlegendes zur Erdschlussbetrachtung	2
2.1 Sternpunktbehandlung - Das gelöschte Netz	2
2.2 Physikalische Betrachtung.....	4
2.2.1 Entladeschwingungen der erdschlussbehafteten Phase	4
2.2.2 Aufladeschwingungen der nicht-erdschlussbehafteten Phasen	5
2.2.3 Stationärer Zustand.....	6
2.2.4 Dynamischer Übergang in den gesunden Zustand	6
2.3 Symmetrische Komponenten.....	7
3 Beschreibung der untersuchten Netzgebiete.....	8
3.1 Typus: Innenstadt.....	10
3.2 Typus: Wohngebiet	10
3.3 Typus: Gewerbegebiet	10
3.4 Typus: Ländliches Gebiet.....	10
3.5 Konzeption des Musternetzes	11
3.5.1 Parameterbestimmung für das Musternetz	12
4 Theorie der Erdschlussortungsverfahren	15
4.1 Natürliches Oberschwingungsverfahren	16
4.1.1 Amperemetrische Auswertung	16
4.1.2 Sin(φ) - Auswertung	17
4.1.3 Amperemetrisches Relativverfahren	18
4.2 OS-Verfahren mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen.....	19
4.3 Natürliches Wattreststromverfahren	19
4.4 Wattreststromerhöhung.....	20

4.4.1	Grundsätzliches.....	20
4.4.2	Klassische Wattreststromerhöhung.....	21
4.4.3	Wattmetrische KNOSPE.....	22
4.4.4	Wirkungsweise der Wattreststromerhöhung.....	23
4.5	Amperemetrische KNOSPE	23
4.5.1	Allgemeines	23
4.5.2	Mittelstrom-KNOSPE	25
4.5.3	Hochstrom-KNOSPE	25
4.6	KNOPE.....	26
4.7	Pulsortung.....	31
4.7.1	Einflussfaktoren	33
4.7.2	Alternative Formen	37
5	Technische Anwendbarkeit im Musternetz	38
5.1	Natürliches Oberschwingungsverfahren	38
5.1.1	Amperemetrische Auswertung	38
5.1.2	Sin(φ) - Auswertung	46
5.1.3	Amperemetrisches Relativverfahren	48
5.1.4	Resonanzkritische Leitungslänge.....	49
5.2	OS-Verfahren mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen.....	51
5.3	Natürliches Wattreststromverfahren	52
5.3.1	Berücksichtigung der Kapazität des kranken Abganges	55
5.3.2	Einfluss durch Schaltzustandsänderungen	58
5.3.3	Auswirkungen von Fehlschaltungen.....	59
5.4	Wattreststromerhöhung.....	60
5.4.1	Klassische Wattreststromerhöhung.....	60
5.4.2	Wattmetrische KNOSPE.....	63
5.5	Amperemetrische KNOSPE	64
5.5.1	Dimensionierung.....	64
5.5.2	Überstromverhalten der Stromwandler.....	68
5.6	KNOPE.....	70
5.6.1	Dimensionierung.....	70
5.6.2	Überstromverhalten der Stromwandler.....	73

5.7	Pulsortung.....	73
6	Wirtschaftliche Bewertungsfaktoren.....	76
6.1	Natürliches Oberschwingungsverfahren	76
6.2	OS-Verfahren mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen.....	77
6.3	Natürliches Wattreststromverfahren	77
6.4	Wattreststromerhöhung.....	77
6.4.1	Klassische Wattreststromerhöhung.....	77
6.4.2	Wattmetrische KNOSPE.....	78
6.5	Amperemetrische KNOSPE	78
6.6	KNOPE.....	79
6.7	Pulsortung.....	80
7	Zusammenfassung	81
	Literaturverzeichnis.....	83
	Abbildungsverzeichnis	84

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Sofern nicht anders angegeben, sind die Ströme und Spannungen Effektivwerte.
Die Systeme der Symmetrischen Komponenten sind durch die folgenden Hochzahlen dargestellt:

- 0 Nullsystem
- 1 Mitsystem
- 2 Gegensystem

Bei den **fett gedruckten Variablen** handelt es sich um komplexe Größen.
Für die Oberschwingungsverfahren ist die jeweilige Frequenz im Index angefügt.

- C_E Leiter-Erde-Kapazitäten
- C_E' Kapazitätsbelag der Leitung
- C_{Puls} Kapazität des Pulscondensators
- f Frequenz
- k_0 Faktor zur Berücksichtigung des Erdrückleitungspfad
- l_F Länge der fehlerbehafteten Leitung
- l_{LiBo} Lichtbogenlänge
- $l_{Ltg.}$ Leitungslänge
- L_{Pet} Induktivität der Petersen-Spule
- l_{Res} resonanzkritische Leitungslänge
- n Ordnungszahl der Harmonischen
- $I_{Abg.-ES}$ Strom des erdschlussbehafteten Abganges
- $I_{Abg.-gesund}$ Strom der nicht-erdschlussbehafteten Abgänge
- I_{An} Ansprechstrom der Schutzeinrichtung
- I_{B-Diff} Differenzblindstrom
- I_{CE} kapazitiver Erdschlussstrom
- I_{CE}' kapazitiver Erdschlussstrombelag der Leitung
- I_{Cpuls} Strom durch den Pulscondensator
- I_F Strom an der Fehlerstelle
- I_{F-} geschätzter Orientierungswert des Fehlerstromes
- I_{KNOSPE} maximaler Fehlerstrom bei der KNOSPE
- I_{Lade}' Ladestrombelag der Leitung
- I_{Pet} induktiver Löschstrom
- $I_{W, erh}$ erhöhter Wattreststrom
- $I_{W, nat}$ natürlicher Wattreststrom
- $I_{W-zus.}$ zusätzlicher Wirkstrom bei der Wattreststromerhöhung
- n_N Nennüberstromziffer des Stromwandlers

P_{Verl}	Verlustleistung der Löschspule
$P_{W, \text{erh}}$	Zur Wattreststromerhöhung benötigte Wirkleistung
p_{250}	Oberschwingungsspannungspegel (Zahl entspricht Frequenz in Hz)
Q_{Puls}	Blindleistung am Pulscondensator
R_B	Bürdenwiderstand (Innenwiderstand des Erdschlussortungsrelais)
R_{HW}	für die Wattreststromerhöhung benötigter Widerstand in der Hilfswicklung
R_{KNOPE}	Strombegrenzungswiderstand bei der KNOPE (KNOSPE analog)
r_L'	ohm'scher Widerstandsbelag der Leitung
R_{Pet}	ohm'scher Ersatzwiderstand der Löschspule
$R_{\text{Ü}}$	Erdübergangswiderstand
R_2	ohm'scher Widerstand der Stromwandlersekundärseite
S_N	Nennscheinleistung des Stromwandlers
$S_{K''}$	Kurzschlusscheinleistung des übergeordneten Netzes
S_T	Transformatorscheinleistung
U_{KN}	Nennsättigungsspannung des Stromwandlers
U_m	Spannung an der Hauptinduktivität des Stromwandlers
U_N	Nennspannung des Netzes
U_{NE}	Sternpunktverlagerungsspannung
U_{Ph}	Phasenspannung (Leiter-Erde-Spannung)
U_{HW}	Spannung an der Hilfswicklung
U_{250}	Oberschwingungsstrangspannung (Zahl entspricht Frequenz in Hz)
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis zwischen Petersen-Spule und Hilfswicklung
u_k	relative Transformator Kurzschlussspannung
\ddot{u}_N	Nennübersetzungsverhältnis des Stromwandlers
v	Verstimmung
$x_{\text{CE}'}$	kapazitiver Reaktanzbelag der Leitung
X_{Cpuls}	Reaktanz des Pulscondensators
x_L'	induktiver Reaktanzbelag der Leitung
X_{Pet}	Reaktanz der Löschspule
Z_{BN}	Nennimpedanz der Stromwandlerbürde
Z_E	Erdimpedanz
Z_{ges}	Gesamtimpedanz
Z_L	Leitungsimpedanz
Z_{Par}	Parallelimpedanz
Z_T	Transformatorimpedanz
$Z_{\text{ÜN}}$	Impedanz des übergeordneten Netzes
$\#_{\text{Abg. korr}}$	korrigierte Anzahl der Abgänge
φ	Winkel zwischen tatsächlichem Relaissummenstrom und einem Blindstrom
φ_{erh}	Winkel φ nach Wattreststromerhöhung
ω	Kreisfrequenz

1 EINLEITUNG

Die bedarfsgerechte Verfügbarkeit der elektrischen Energie ist ein essentielles Gut für unsere Gesellschaft und die Geringhaltung bzw. Reduzierung der Ausfallsdauer ist von wesentlicher Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der österreichischen Wirtschaft. Um dies zu realisieren ist es wichtig auftretende Fehlerzustände so schnell wie möglich zu erkennen und die Fehlerursache zu beseitigen. In diesem Zusammenhang stellt der einpolige Kurzschluss gegen Erde einen häufigen Fehler in Netzen der elektrischen Energieversorgung dar.

Die technische Maßnahme der Erdschlusskompensation gewährleistet zwar kurzfristig Resilienz hinsichtlich einpoliger Fehler gegen Erde, jedoch sind ein Auffinden und eine schnellstmögliche Reparatur des Fehlers aus zwei Gründen unbedingt notwendig. Zum einen kann es durch den Erdschluss in Verbindung mit bereits vorhandenen Schwachstellen im System innerhalb kurzer Zeit zu einem mehrpoligen Fehler mit sehr großen Schäden und einer starken Gefährdung des Netzbetriebes kommen, da bei den in alternden Kabelnetzen immer häufiger auftretenden Doppelerdschlüssen das $(n-1)$ -Prinzip verletzt wird. Zum anderen können gewisse Erdkabel des „gesunden“ Netzes durch die Spannungsanhebung im Erdschlussfall vorzeitig altern, was zu einer Verkürzung ihrer Lebensdauer und damit zu hohen Kosten aufgrund von vorzeitigem Austausch führt.

In dieser Arbeit wird die Thematik der Erdschlussortung vor allem in Hinblick auf städtische Mittelspannungsnetze behandelt. Im Zuge einer Grundlagenbetrachtung wird zunächst auf die Sternpunktbehandlung und die physikalischen Vorgänge während eines Erdschlusses eingegangen. In Kapitel 3 wird basierend auf einem realen Mittelspannungsnetz ein Musternetz parametrisiert, welches als Referenz für die Anwendung der einzelnen Erdschlussortungsverfahren dient. Kapitel 4 behandelt die theoretischen Hintergründe der Ortungsmethoden, dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Art der Auswertung und die daraus resultierenden Besonderheiten, sowie Vor- und Nachteile gelegt.

Im darauf folgenden Kapitel 5 erfolgt eine Untersuchung der technischen Anwendbarkeit der verschiedenen Erdschlussortungsverfahren im dafür konzipierten Musternetz. Hierbei liegen die Schwerpunkte vor allem in der Dimensionierung und der Grenzbetrachtung. In Kapitel 6 werden die für eine Implementierung der jeweiligen Methoden wesentlichen wirtschaftlichen Bewertungsfaktoren aufgezeigt. Abschließend wird in Kapitel 7 eine Zusammenfassung über die wesentlichen Punkte dieser Arbeit erstellt.

2 GRUNDLEGENDES ZUR ERDSCHLUSSBETRACHTUNG

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die physikalischen Hintergründe von Mittelspannungsnetzen. Speziell für das Verhalten im Erdschlussfall spielt die Sternpunktbehandlung des Netzes eine wesentliche Rolle.

2.1 STERNPUNKTBEHANDLUNG - DAS GELÖSCHTE NETZ

Abgesehen von Mittelspannungsnetzen kleiner Ausdehnung (z.B. Industrienetze, Eigenbedarfsnetze von Kraftwerken), welche mit isoliertem Sternpunkt betrieben werden, ist die Erdschlusskompensation die dominierende Sternpunktbehandlung in österreichischen Mittelspannungsnetzen [1]. Wie Abbildung 1 in einem vereinfachten Schema zeigt, verbindet dabei die nach ihrem Erfinder benannte Petersen-Spule den Transformatorsternpunkt mit dem Erdpotential.

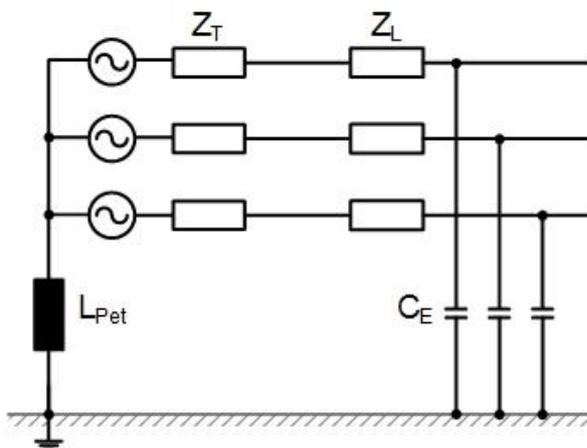


Abbildung 1: Grundprinzip eines kompensierten Netzes (nach [2], eigene Darstellung)

Der große Vorteil dieser Sternpunktbehandlung ist, dass der Netzbetrieb bei einpoligen Fehlern gegen Erde aufrechterhalten werden kann. Zumal Erdschlüsse einen erheblichen Teil der Netzfehler darstellen bringt das eine wesentliche Verbesserung der Versorgungszuverlässigkeit. [3]

Ermöglicht wird dies, indem im Erdschlussfall die über die Leiter-Erde-Kapazitäten (C_E) abfließenden, kapazitiven Ströme durch den induktiven Strom der Petersen-Spule (L_{Pet}) kompensiert werden. Für die folgende Bedingung aus [1] ist die Summe der induktiven und kapazitiven Grundschwingungsströme Null; man spricht hier von einer Vollkompensation.

$$\omega \cdot L_{Pet} = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_E} \quad (1)$$

Resultierend wird der Summenstrom über die Erdschlussstelle stark verringert und besteht nur noch aus vergleichsweise kleinen Anteilen, die in Kapitel 4 noch genauer erklärt werden. Der geringe Fehlerstrom bringt das Problem mit sich, dass die Fehlerstelle sehr schwer zu orten ist. Da viele in der Statistik als mehrpolige Fehler geführte Störungen ursprünglich als einpoliger Fehler gegen Erde entstanden sind [3], ist es von großer Bedeutung auftretende Erdschlüsse so schnell wie möglich zu finden und den betroffenen Abschnitt herauszuschalten.

Bei Freileitungen wird durch die mit der Resonanzsternpunktterdung einhergehende Stromreduktion in vielen Fällen ein Verlöschen des Lichtbogens im Erdschlussfall erreicht. Dies ist in Kabelnetzen nicht möglich [3]. Nachfolgend wird dieser Umstand näher erläutert.

Würde der Lichtbogen ausgehen, so müsste sich (sofern nicht abgeschaltet wurde) wieder die Strangspannung zwischen dem Innenleiter und der geerdeten Schirmung des Kabels einstellen. Der Lichtbogen hat jedoch die Spannungsfestigkeit der Isolierung herabgesetzt, sodass die Fehlerstelle einer derart hohen Potentialdifferenz nicht mehr standhalten kann. Aus diesem Grund brennt der Lichtbogen in einem Kabel auch bei einem niedrigen Strom weiter. Allerdings können bis zum Erreichen der Wiederzündspannung wegen des langsamen Anstiegs der Spannung in der fehlerbehafteten Phase kurze stromlose Pausen entstehen.

Wie in Kapitel 2.2 noch näher erklärt wird, erfolgt in den beiden vom Erdschluss nicht betroffenen Phasen eine Anhebung der Spannung. Dieser Umstand stellt für das Kabel eine stärkere Belastung dar, wodurch sich dessen Lebensdauer verkürzen kann. Eine rasche Ortung und anschließende Freischaltung des Erdschlusses bringt dadurch auch wirtschaftliche Vorteile, da die Investitionen für einen Kabelaustausch hinausgezögert werden können. [4]

Gelöschte Netze werden im Allgemeinen überkompensiert betrieben, d.h. der induktive Löschsulenstrom ist größer als der kapazitive Erdschlussstrom. Dabei ist die Verstimmung, gemäß ihrer Definition in Formel (2), negativ. Der Hintergrund dieser Betriebsart ist, dass eine Resonanz und damit eine hohe Verlagerungsspannung^a im Erdschlussfall ungeachtet der Schaltzustände im Netz verhindert werden soll. [1]

$$v = \frac{I_{CE} - I_{Pet}}{I_{CE}} = \frac{\omega \cdot \sum C_E - \frac{1}{\omega \cdot L_{Pet}}}{\omega \cdot \sum C_E} = 1 - \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{Pet} \cdot \sum C_E} \quad (2)$$

^a Die Verlagerungsspannung wird durch die Addition der Phasenspannungen gewonnen und so skaliert, dass sie im Falle eines satten Erdschlusses den Wert 1 p.u. annimmt. Damit ist sie der Nullspannung gleichzuhalten.

2.2 PHYSIKALISCHE BETRACHTUNG

Der einpolige Fehler gegen Erde entspricht, elektrisch gesehen, einer Zustandsänderung im Energiesystem. Die Größen des Drehstromsystems reagieren auf diese Dynamik mit Ausgleichsvorgängen. Abbildung 2 zeigt den Verlauf von Strom und Spannung bei einem Erdschluss in Phase 1 in einem gelöschten Netz. Der gesamte Vorgang verläuft in vier Abschnitten, welche im Folgenden kurz erklärt werden. [2]

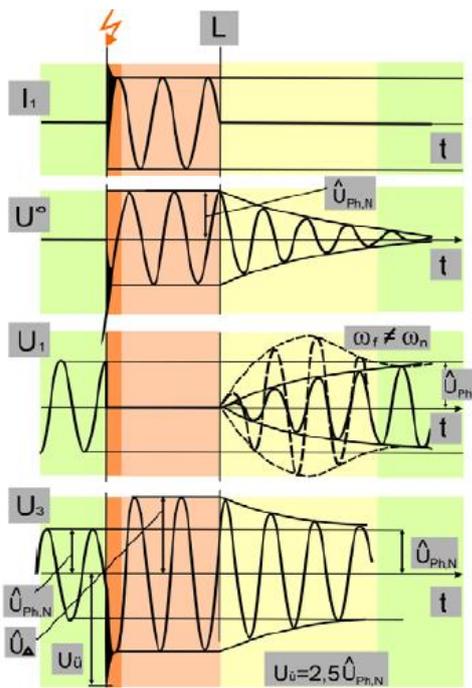


Abbildung 2: Physikalische Vorgänge bei einem Erdschluss [2]

2.2.1 ENTLADESCHWINGUNGEN DER ERDSCHLUSSBEHAFTETEN PHASE

Wie Abbildung 1 veranschaulicht, existieren für jeden Außenleiter Kapazitäten gegen Erde, welche aufgrund des normalen Netzbetriebs aufgeladen sind. Tritt ein Erdschluss auf, so wird die Kapazität der betreffenden Phase kurzgeschlossen und damit entladen. Abbildung 3 zeigt das Verhalten der Spannungszeiger bei diesem Vorgang.

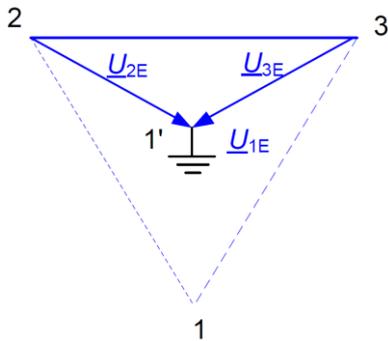


Abbildung 3: Zeigerdiagramm des Entladevorgangs der erdschlussbehafteten Phase [3]

Infolgedessen breiten sich Wanderwellen in beide Richtungen entlang der Leitung aus. Die Induktivitäten an den Leitungsenden verursachen Reflexionen, wobei die Wanderwellen relativ schnell (ca. 1 ms) gedämpft werden. Aufgrund ihrer hohen Frequenzen (100 kHz - 1 MHz) ist die Verwendung von Wanderwellen zur Erdschlussortung nicht üblich. [2]

2.2.2 AUFLADESCHWINGUNGEN DER NICHT-ERDSCHLUSSBEHAFTETEN PHASEN

In diesem Abschnitt wird die Spannung der beiden „gesunden“ Außenleiter gegen Erde auf bis zu $\sqrt{3} \cdot U_{Ph}$ angehoben. Abbildung 4 veranschaulicht das Verhalten der Spannungszeiger im Zuge der Aufladung. Die Dauer dieses Vorgangs beträgt ca. 50 ms. Aufgrund der Umladung treten Ströme auf, die von transienten Verfahren zur Erdschlussortung genutzt werden können. [2]

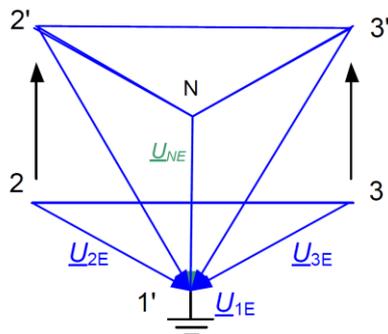


Abbildung 4: Zeigerdiagramm des Aufladevorgangs der nicht-fehlerbehafteten Phasen [3]

2.2.3 STATIONÄRER ZUSTAND

Nachdem die Auf- und Entladeschwingungen abgeklungen sind, stellt sich der stationäre Zustand ein. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, haben sich die Spannungszeiger der Leiter-Erde-Spannungen der fehlerfreien Phasen im Vergleich zur Situation vor dem Erdschluss auf den verketteten Wert vergrößert. Außerdem hat sich eine Verlagerungsspannung in der Höhe der Strangspannung ausgebildet. Diesen Zustand nutzen stationäre Verfahren zur Erdschlusssortung.

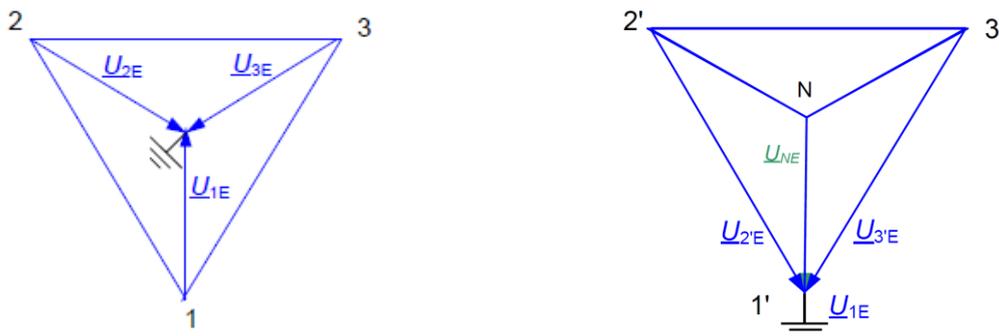


Abbildung 5: Zeiger im „gesunden“ Netz (links) und beim stationären Erdschluss (rechts) [3]

2.2.4 DYNAMISCHER ÜBERGANG IN DEN GESUNDEN ZUSTAND

Gelingt es den Lichtbogen zu löschen und den Netzbetrieb fortzuführen, so nehmen die Ströme und Spannungen wieder ihre ursprünglichen Werte an. Im Vergleich zum isolierten Netz geschieht dies im kompensierten Netz aufgrund der Induktivität der Petersen-Spule langsamer. Das bedeutet, dass die Spannungen der gesunden Phasen nicht sofort den vollen Wert annehmen, sondern langsam ansteigen, wodurch die fehlerhafte Stelle nicht sofort mit der vollen Spannung belastet wird. [2]

2.3 SYMMETRISCHE KOMPONENTEN

Die Ausführungen dieses Kapitels entsprechen einer inhaltlichen Zusammenfassung aus [5] und [6].

Der einpolige Kurzschluss gegen Erde entspricht einem unsymmetrischen Fehler im dreiphasigen Drehstromsystem. Dies erschwert die Berechnung mit Phasengrößen, weshalb die unsymmetrischen Größen mithilfe einer Matrixtransformation in die Symmetrischen Komponenten übergeführt werden können. Als vorteilhaft erweist sich, dass diese Komponenten autonom voneinander ermittelt werden können, da sie voneinander vollständig entkoppelt sind. Sie bestehen aus den folgenden drei Systemen:

- Mitsystem (Phasenfolge wie im symmetrischen Drehstromnetz)
- Gegensystem (Umgekehrte Phasenfolge im Vergleich zum Drehstromnetz)
- Nullsystem (Gleichphasiges System)

Wie sich in dieser Arbeit noch zeigen wird, ist bei der Erdschlussbetrachtung vor allem das Nullsystem von Interesse, da dort alle Elemente zusammengefasst sind, die den Strom gegen Erde ableiten.

3 BESCHREIBUNG DER UNTERSUCHTEN NETZGEBIETE

Bei dem zugrundeliegenden Netz handelt es sich um ein gelöscht betriebenes Mittelspannungsnetz mit einer Nennspannung von 10 kV. Es wird annahmegemäß über Transformatoren mit der Schaltgruppe Yd5 vom übergeordneten 110 kV-Hochspannungsnetz gespeist. Aus diesem Grund ist zur Einbindung der Petersen-Spule auf der Mittelspannungsseite ein Sternpunktbildner notwendig (siehe Abbildung 7 in Kapitel 3.5). In Summe ist die Mittelspannungsebene auf 13 Netzgruppen aufgeteilt. Abbildung 6 zeigt das Anschlussschema für ein typisches Umspannwerk mit zwei Netzgruppen, wobei der dritte Transformator als Sicherheitsreserve dient.

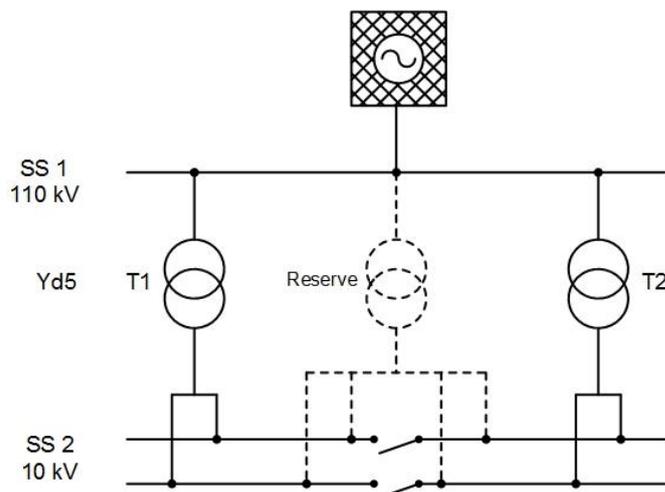


Abbildung 6: Anschlussschema für ein Umspannwerk mit zwei Netzgruppen

Die Umspannwerke sind untereinander mit einer Mittelspannungsringleitung, welche ebenfalls gelöscht betrieben wird, direkt verbunden. Das Netz ist gänzlich verkabelt, wobei alle verlegten Kabel über einen Schirm verfügen und zusätzlich zu diesem noch Begleiterder erdfühlig mitverlegt sind. Zur Kopplung zwischen Mittelspannungs- und Niederspannungsebene dienen 718 Ortsnetztransformatoren. Die Stationserden dieser Ortsnetzstationen sind in das globale Erdungssystem eingebunden.

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristiken können urbane Mittelspannungsnetze im Allgemeinen in die folgenden vier Netzgebiete unterteilt werden:

- Innenstadt
- Wohngebiet
- Gewerbegebiet
- ländliches Gebiet

Tabelle 1 bietet eine Übersicht bezüglich der Kenndaten der einzelnen Netzgebiete eines exemplarischen Netzes. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3.5 ein Musternetz konzipiert, bei dem die einzelnen Untersuchungen in größerer Detailtiefe durchgeführt werden.

<i>Kennzahl</i>	<i>Netzgebiete</i>			
	<i>Innenstadt</i>	<i>Wohngebiet</i>	<i>Gewerbegebiet</i>	<i>Ländliches Gebiet</i>
Netz-Topologie	Ausschließlich Stickleitungen, keine Parallelanspeisungen			
Minimallast	10 MW	4 MW	5 MW	1 MW
Maximallast	30 MW	10 MW	15 MW	5 MW
Fläche	10 km ²	7,5 km ²	5 km ²	40 km ²
Abgänge pro UW	30	12	12	12
Kabel pro UW	22 (17 aktiv ^b)	6	6	8
Transformator	31,5 MVA 15,5 %	20 MVA 10 %	15 MVA 10 %	7,5 MVA 8 %
mittlere Kabellänge	1,4 km	5,3 km	3,7 km	4,5 km
Max. Kabellänge ^b	4 km	6 km	7 km	10 km
Verlegte Kabellänge gesamt	30,5 km	32 km	22 km	36 km
Einstellwert Löschspule	80 A	80 A	55 A	90 A

Tabelle 1: Kenndaten verschiedener Netzgebiete eines exemplarischen urbanen Mittelspannungsnetzes

Nachfolgend werden die Charakteristiken der Netzgebiete kurz beschrieben.

^b Im normalen Schaltzustand

3.1 TYPUS: INNENSTADT

Die Innenstadt zeichnet sich vor allem durch eine hohe Dichte an Zählpunkten pro Fläche aus. Weiters verfügt der Stadtkern, verglichen mit den anderen Netzgebieten, über relativ kurze Kabellängen, eine große Anzahl von Abgängen im Umspannwerk sowie hohe Minimal- und Maximallasten.

3.2 TYPUS: WOHNGEBIET

Die, im Vergleich zur Innenstadt, kleinere Anzahl und Dichte an Verbrauchern im Wohngebiet äußert sich in der geringeren Anzahl an Abgängen im Umspannwerk, sowie in der geringeren Anzahl der Zählpunkte, bei annähernd gleicher Fläche des Versorgungsgebietes.

3.3 TYPUS: GEWERBEGEBIET

Aufgrund der größeren Verbraucherleistungen stellt sich im Gewerbegebiet, verglichen mit dem Wohngebiet, bei geringerer Fläche und Anzahl der Zählpunkte, sowie verlegter Kabelgesamtlänge eine höhere Minimal- und Maximalleistung ein.

3.4 TYPUS: LÄNDLICHES GEBIET

Das ländliche Gebiet fällt, gegenüber den anderen Netzgebieten, vor allem durch eine erheblich größere Ausdehnung bei deutlich geringerer Minimal- und Maximalleistung auf. Neben diesen Kenndaten deutet die kleinere Anzahl der Zählpunkte auf eine geringere Besiedelungsdichte hin.

3.5 KONZEPTION DES MUSTERNETZES

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen, verschiedenen Typen von Netzgebieten treten in ähnlicher Form in nahezu jedem städtischen Mittelspannungsnetz auf. Aus diesem Grund wird für diese Arbeit ein Musternetz konzipiert, welches einen guten Mittelweg darstellt. Anhand dieses Musternetzes werden die einzelnen Erdschlussortungsverfahren exemplarisch untersucht. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass eine Analyse der technischen Machbarkeit in den unterschiedlichen Netzgebieten bzw. auch in anderen Netzen nach Änderung der betreffenden Kenndaten analog durchgeführt werden kann. Die technischen Annahmen in dieser Arbeit stammen aus allgemeinen Erfahrungen und Gesprächen mit Netzbetreibern. Sie sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Kenndaten											
Musternetz				Transformator		Löschspule		Stromwandler			
#Abg.	l _{Abg.}	l _{ges.}	c _E '/Phase	S _T	u _k	P _{Verl}	v	S _N	ü _N	n _N	R ₂
	km	km	$\frac{\mu F}{km}$	MVA	%	kW	%	VA			Ω
15	5	75	0,45	25	15	5,62	-5	5	60:1	5	2

Tabelle 2: Gegebene Kenndaten des Musternetzes

Abbildung 7 zeigt den Aufbau des Musternetzes. Aufgrund des Yd5-Transformators ist die zentrale Löschspule über einen Sternpunktbildner angeschlossen. Wie anhand der Verstimmung in Tabelle 2 zu sehen ist, wird das Netz mit einer Überkompensation von 5% betrieben. Jedes abgehende 10 kV-Kabel ist mit Kabelumbauwandlern ausgestattet und versorgt durchschnittlich sieben Ortsnetzstationen.

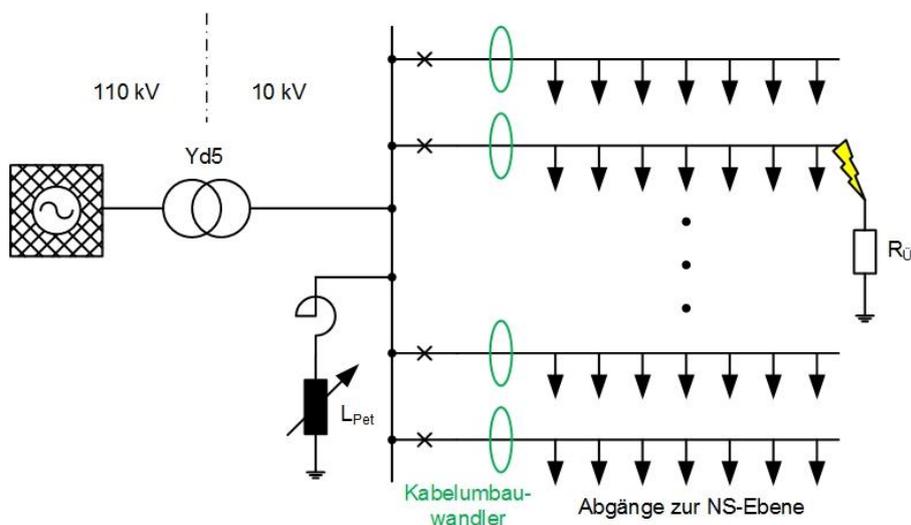


Abbildung 7: Aufbau des Musternetzes

3.5.1 PARAMETERBESTIMMUNG FÜR DAS MUSTERNETZ

Nachfolgend werden die für die Berechnungen der verschiedenen Ortungsverfahren benötigten Parameter ermittelt. Die Ergebnisse der Berechnungen in diesem Kapitel werden, wie die der gesamten Arbeit, auf sinnvolle Werte gerundet.

Der kapazitive Reaktanzbelag des Kabels (x_{CE}') wurde mithilfe einer repräsentativen Kapazität pro Längeneinheit (c_E') eines realen Netzgebietes berechnet. Danach kann auch der Lade- bzw. Erdschlussstrom pro Längeneinheit berechnet werden.

$$x_{CE}' = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c_E'} = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,45 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}} = -7074 \Omega \text{ km} \quad (3)$$

$$I'_{Lade} = \frac{U_{Ph}}{j x_{CE}'} = \frac{5774 \text{ V}}{-j 7074 \Omega \text{ km}} = j 0,8 \frac{\text{A}}{\text{km}} \quad (4)$$

$$I'_{CE} = 3 \cdot I'_{Lade} = 3 \cdot j 0,8 \frac{\text{A}}{\text{km}} = j 2,4 \frac{\text{A}}{\text{km}} \quad (5)$$

Für den ohmschen Widerstandsbelag (r_L') und den induktiven Reaktanzbelag (x_L') werden mittlere Werte für ein typisches Mittelspannungskabel festgelegt. Bezüglich der Kenndaten für den Transformator und die Petersen-Spule werden ebenfalls allgemein übliche Werte für städtische Mittelspannungsnetze angenommen, wobei besonders die Verlustleistung der Petersen-Spule je nach deren Größe stark variieren kann.

Das Ersatzschaltbild der Petersen-Spule kann als Parallelschaltung einer Induktivität und eines ohmschen Widerstandes dargestellt werden. Die Berechnung der Resistanz und der induktiven Reaktanz erfolgt über die Verlustleistung bzw. dem eingestellten Löschspulenstrom. Dabei kann, wie es sich noch herausstellen wird, für die anliegende 50 Hz-Nullspannung in guter Näherung die Strangspannung angenommen werden. Da in weiterer Folge mit dem Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten gerechnet wird, werden die Widerstände des Nullsystems (Faktor 3) ermittelt.

$$R_{Pet}^0 = 3 \cdot \frac{(U_{Ph})^2}{P_{Verl}} = 3 \cdot \frac{(5774 \text{ V})^2}{5,62 \text{ kW}} = 17,8 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

$$X_{Pet}^0 = \frac{U_{Ph}}{I_{Pet}^0} = 3 \cdot \frac{U_{Ph}}{I_{Pet}} = 3 \cdot \frac{5774 \text{ V}}{189 \text{ A}} = 91,7 \Omega \quad (7)$$

Anmerkung: Im Ersatzwiderstand für die Verluste im Nullsystem (R_{Pet}^0) sind neben den dominanten Verlusten der Petersen-Spule (Wirbelstrom-, Hysterese- und Kupferverluste) auch die sonstigen im Nullsystem auftretenden Verluste (Kabelschirme, Erdreich) berücksichtigt. Ein Schätzwert für die Gesamtverluste kann aus der Dämpfung (d) mit nachfolgender Formel ermittelt werden.

$$P_{Verl} = d \cdot I_{CE} \cdot U_{Ph} \quad (8)$$

Das übergeordnete Hochspannungsnetz kann als rein induktiv angenommen werden. Es weist eine Kurzschlussleistung von $S_K'' = 3 \text{ GVA}$ auf. Die auf der Mittelspannungsebene wirkende Impedanz kann wie folgt berechnet werden.

$$\mathbf{z}_{\ddot{U}N}^1 = \mathbf{z}_{\ddot{U}N}^2 = j \frac{(U_N)^2}{S_K''} = j \frac{(10 \text{ kV})^2}{3 \text{ GVA}} = j 0,03 \Omega \quad (9)$$

Die Berechnung der Transformatorimpedanz erfolgt mithilfe der Kennwerte aus Tabelle 2.

$$\mathbf{z}_T^1 = \mathbf{z}_T^2 = j u_k \cdot \frac{(U_N)^2}{S_T} = j 0,15 \cdot \frac{(10 \text{ kV})^2}{25 \text{ MVA}} = j 0,6 \Omega \quad (10)$$

Der ohmsche Widerstand eines, bei einem Erdschluss in einem Kabel auftretenden, Lichtbogens kann näherungsweise mit der Formel nach Warrington [5] bestimmt werden. Da es sich bei dieser Formel um eine Näherung handelt und der Strom des Lichtbogens von Fall zu Fall variiert, ist nur die Größenordnung des Übergangswiderstandes von Bedeutung. Aus diesem Grund wird ein praxiserprobter Wert für die weitere Berechnung gewählt. Erfolgt die Berechnung des Erdschlusses mithilfe der Symmetrischen Komponenten, so ist der Erdübergangswiderstand dem Nullsystem zuzuordnen und muss daher mit dem Faktor 3 multipliziert werden.

$$R_{\ddot{U}} = \frac{8750 \cdot l_{LiBo}}{I^{1,4} \cdot 0,305} = \frac{8750 \cdot 0,01 \text{ m}}{(11 \text{ A})^{1,4} \cdot 0,305} = 10 \Omega \quad (11)$$

$$R_{\ddot{U}}^0 = 3 \cdot R_{\ddot{U}} = 3 \cdot 10 \Omega = 30 \Omega \quad (12)$$

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Parameter des Musternetzes.

<i>Parameter</i>								
<i>Leitung</i>				<i>Löschspule</i>		<i>Transformator</i>	<i>Übergeordnetes Netz</i>	<i>Übergangswiderstand</i>
r'_L	x'_L	x'_{CE}	I'_{CE}	R_{Pet}^0	X_{Pet}^0	Z_T^1	$Z_{ÜN}^1$	$R_{Ü}^0$
$\frac{\Omega}{km}$	$\frac{\Omega}{km}$	Ωkm	$\frac{A}{km}$	$k\Omega$	Ω	Ω	Ω	Ω
0,21	0,13	7074	2,4	17,8	91,7	0,6	0,03	30

Tabelle 3: Ermittelte Parameter des Musternetzes

4 THEORIE DER ERDSCHLUSSORTUNGSVERFAHREN

In niederohmig oder starr geerdeten Netzen fließt bei mehrpoligen Kurzschlüssen bzw. dem einpoligen Erdschluss ein für das Ansprechen des Erdschlussschutzes ausreichend hoher Strom über die Fehlerstelle. Im Vergleich dazu ist die Ortung des Erdschlusses im kompensierten Netz aufgrund der in Kapitel 2.1 dargelegten Eigenschaften eine kompliziertere Angelegenheit. Unter der einfachen Ortung wird die Bestimmung des fehlerbehafteten Abgangs verstanden. Dies könnte, auch ohne die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren, mit der historisch gesehen ältesten Methode realisiert werden. Dazu wird an der Sammelschiene die Verlagerungsspannung gemessen und die Abgänge der Reihe nach abgeschaltet, bis der erdschlussbehaftete Abgang gefunden wird. [3]

Aufgrund der offensichtlichen Verschlechterung der Versorgungssicherheit, dem Beanspruchen der Betriebsmittel und den auftretenden transienten Vorgängen durch die Schalthandlungen, die diese Vorgehensweise mit sich bringt, ist sie nach Möglichkeit zu vermeiden. Wunsch für den Stand der Technik wäre aus heutiger Sicht die Tiefenabschnittsortung (oft auch als Tiefenortung bezeichnet), die den Erdschluss „abschnittsgenau“, d.h. zwischen zwei Trennstellen, feststellt. Eine weitere Steigerung würde die Punktortung darstellen, unter welcher die Determination des Fehlerortes innerhalb eines gewissen Distanzintervalls verstanden wird.

Eine mögliche Unterteilung der Methoden zur Erdschlussortung kann in stationäre und transiente Verfahren erfolgen. Transiente Verfahren sind für die Nachortung nicht geeignet, da die Auswertung ausschließlich während des Moments, in welchem der Erdschluss eintritt, möglich ist. Im vorliegenden Fall ist eine Tiefenortung mit der Möglichkeit einer Nachortung erforderlich, weshalb in dieser Arbeit lediglich stationäre Ortungsverfahren untersucht werden. Die stationären Verfahren basieren auf dem Prinzip der Auswertung von Erdschlussstrom bzw. Summenstrom und Verlagerungsspannung im eingeschwungenen Zustand. [7]

Nachfolgend wird die prinzipielle Funktionsweise der für diese Arbeit relevanten Erdschlussortungsmethoden in einem gelöschten Netz erläutert.

4.1 NATÜRLICHES OBERSCHWINGUNGSVERFAHREN

Wird eine vollständige Symmetrie (Leitungslängsimpedanzen, Leiterkopplungen und Leiter-Erde-Kapazitäten) im fehlerfreien Fall angenommen, so werden Oberschwingungen in Netzen der elektrischen Energietechnik vor allem durch Stromrichter, nichtsinusförmige Einspeisungen und nichtlineare Lasten verursacht. Aufgrund der Annahme ergibt sich über die Löschspule bzw. Erde kein Oberschwingungsstrom, obwohl die Phasenströme und die verketteten Spannungen möglicherweise mit Oberschwingungen behaftet sind. Diese Oberschwingungen sind aus Sicht der Spannungsqualität natürlich unerwünscht, können aber für die Erdschlussortung einen positiven Nutzen haben. [8] [9]

Tritt ein Erdschluss auf, so haben die Oberschwingungen der Spannung einen Oberschwingungsstrom über die Fehlerstelle zur Folge. Während die Reaktanzen der Leiter-Erde-Kapazitäten mit steigender Frequenz linear sinken ($X_C = \frac{1}{2\pi f C}$), nimmt die Reaktanz der Petersenspule mit steigender Frequenz linear zu ($X_L = 2\pi f L$). Aus diesem Grund kann das kompenzierte Netz für Oberschwingungen näherungsweise als isoliertes Netz angesehen werden. [9]

In der Praxis wird für das natürliche Oberschwingungsverfahren die fünfte Harmonische (250 Hz) verwendet, da diese im Netz am stärksten vorkommt [2]. Allgemein kann die Auswertung eines Oberschwingungsverfahrens grundsätzlich auf die folgenden drei Arten realisiert werden:

- Amperemetrische Auswertung
- Sin(φ) - Auswertung
- Amperemetrisches Relativverfahren

4.1.1 AMPEREMETRISCHE AUSWERTUNG

Für die erste Option kann die Tatsache ausgenutzt werden, dass im Erdschlussfall auf dem betroffenen Abgang der Summenstrom der übrigen Abgänge (siehe Abbildung 8) fließt. Die messtechnische Erfassung kann in diesem Fall mithilfe von amperemetrischen Relais durchgeführt werden; eine Messung der Verlagerungsspannung ist also nicht erforderlich. Allerdings müssen, um eine Fehlalarme bei einem Sammelschienenerdschluss zu vermeiden, alle Abgänge überwacht werden. Ein Nachteil dieser Art der Auswertung ist, dass die Zuverlässigkeit bei einer geringen Anzahl von Abgängen nicht gegeben ist, da der Unterschied zwischen den Erdschlussströmen in den „gesunden“ Abgängen verglichen mit dem erdschlussbehafteten Abgang zu klein ausfallen kann. [3] [2]

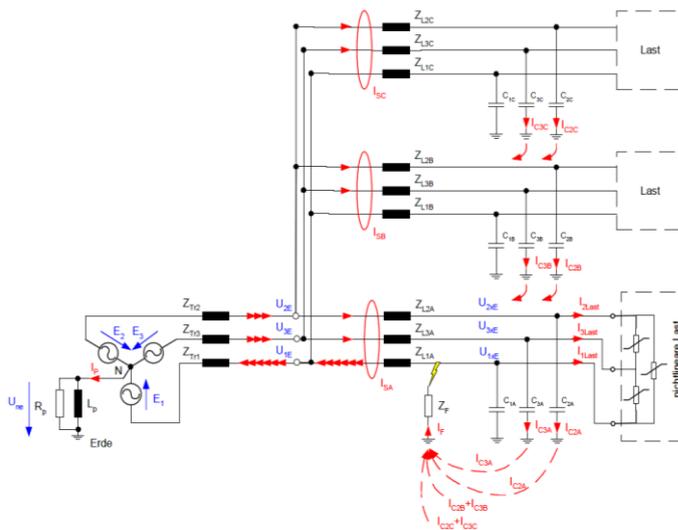


Abbildung 8: Verhalten der Oberschwingungsströme im Erdschlussfall [9]

4.1.2 SIN(Φ) - AUSWERTUNG

Eine Alternative zum amperemetricen Relais stellt die Auswertung mittels frequenzselektivem Richtungsrelais ($\sin(\phi)$ -Relais) dar. Dieses kann auf die entsprechende Frequenz abgestimmt werden und ortet den Erdschluss durch Richtungsentscheid anhand der gemessenen Größen Erdschlussstrom und Verlagerungsspannung. Der Strom in den nicht-erdschlussbehafteten Abgängen verhält sich gegenüber der Verlagerungsspannung kapazitiv, der im fehlerhaften Abgang induktiv (vgl. Abbildung 9). Ein Vorteil dieser Art der Auswertung ist die geringe Auswirkung von Winkelfehlern der verwendeten Wandler. Der genaue Winkelwert ist nicht von Interesse, sondern lediglich ob der Strom prinzipiell vor- oder nacheilt. Außerdem funktioniert die Methode auch bei wenigen Abgängen. Als Nachteil ist der zusätzlich benötigte Spannungswandler-Satz zur Messung der Verlagerungsspannung anzuführen. [3] [9] [2]

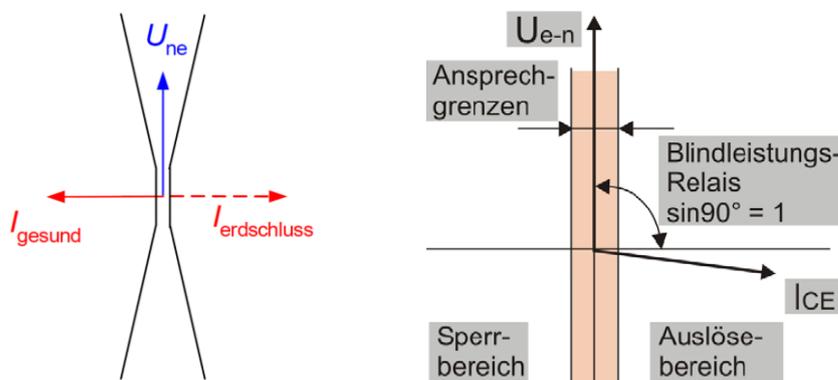


Abbildung 9: Richtungsentscheid beim Oberschwingungsverfahren [9] [2]

Unabhängig von der Art der Auswertung können sich beim Oberschwingungsverfahren weitere Probleme ergeben. Es funktioniert wegen der entfernungsabhängigen Stromverteilung nicht bei Ringen und ist für hochohmige Erdübergangswiderstände nicht geeignet. Außerdem kann es bei gemischten Netzen durch ungünstig verteilte Induktivitäten und Kapazitäten im Nullsystem zu Schwierigkeiten in Form von Serienresonanzen kommen. Dies betrifft besonders Netze, bei denen schwerpunktmäßige Kabelnetze auf Freileitungen folgen und kann zu falschen Richtungsentscheiden führen. Aufgrund der, am Beginn dieses Kapitels erläuterten, Entstehung von Oberschwingungen ist der Oberschwingungsgehalt im Netz tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Das ist insofern kritisch, als dass ein Erdschluss zu jeder Zeit auftreten kann und eine Ortungsmethode dementsprechend immer einsatzbereit sein sollte. In so einem Fall kann das in Kapitel 4.2 erklärte Verfahren Abhilfe schaffen. [3] [2]

4.1.3 AMPEROMETRISCHES RELATIVVERFAHREN

Die nachfolgende Beschreibung dieser Methode ist inhaltlich aus [10], sowie aus Gesprächen mit dem Erfinder zusammengefasst.

Dieses Verfahren beruht auf der Überlegung, dass die Summe der Oberschwingungsströme der einzelnen „gesunden“ Abgänge (bei Vernachlässigung des Oberschwingungsstromes der Petersen-Spule) gleich dem Oberschwingungsstrom des „kranken“ Abganges ist. Dadurch ist der erdschlussbehaftete Abgang eindeutig identifizierbar, da dieser den größten Oberschwingungsstrom führt. Es genügt eine Relativmessung der Stromgrößen. Ein Kontrollkriterium für die Validierung der Abgangsentscheidung ist die Erfüllung von Gleichung (13). Um eine eindeutige Entscheidung zu gewährleisten, muss Bedingung (14) mit ausreichender Reserve erfüllt sein.

$$I_{OS,krank} = \sum_{i=1}^n I_{OS_i} \quad (13)$$

$$I_{OS,krank} > \max(I_{OS_i}) \quad (14)$$

Hierbei steht „n“ für die Anzahl der „gesunden“ Abgänge.

4.2 OS-VERFAHREN MIT TONFREQUENZ-RUNDSTEUERANLAGEN

Ist der Pegel der natürlichen Oberschwingung im Netz nicht immer in ausreichender Höhe sichergestellt, so kann das Oberschwingungsverfahren durch gezielte Einspeisung eines Signals definierter Amplitude und Frequenz eingesetzt werden. In vielen Netzen ist eine Tonfrequenz-Rundsteueranlage (TRA) vorhanden, die zu diesem Zweck verwendet werden kann. Für dieses Verfahren gelten ebenfalls die in Kapitel 4.1 beschriebenen Eigenschaften. Wie bereits beim natürlichen Oberschwingungsverfahren erwähnt, ist auch hier der Resonanzproblematik eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen. In Kapitel 5 wird dieses Problem für beide Verfahren anhand eines Beispiels behandelt.

4.3 NATÜRLICHES WATTRESTSTROMVERFAHREN

Die folgenden Erkenntnisse sind inhaltlich aus [2] zusammengefasst.

Obwohl im Falle eines Erdschlusses in einem gelöschten Netz bei Betrieb in Vollkompensation der induktive 50 Hz-Petersen-Spulenstrom und der kapazitive 50 Hz-Erdschlussstrom einander aufheben, fließt über die Fehlerstelle ein Strom. Es handelt sich dabei um den nicht-kompensierbaren Strom, der sich aus einem Blind- und einem Wirkanteil zusammensetzt. Die Blindstromkomponente umfasst vor allem Oberschwingungsströme, da die Auslegung der Löschspule auf die Grundschwingung erfolgt. Die Wirkstromkomponente, welche auch als „Wattreststrom“ bezeichnet wird, bildet sich aufgrund der ohmschen Verluste der Petersenspule, des Transformators und der Leitungen im Netz.

Die Erdschlusssortung bei diesem Verfahren erfolgt, wie in Abbildung 10 dargestellt, durch die Auswertung des Wattreststromes und der Verlagerungsspannung mithilfe von wattmetrischen Relais ($\cos(\varphi)$ -Relais). Um den betragsmäßig kleinen natürlichen Wattreststrom korrekt zu erfassen, werden bei diesem Verfahren an Strom- und Spannungswandler oft netzauslegungsbedingt sehr hohe Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit und der Winkeltreue gestellt.

Abbildung 10 verdeutlicht, dass der Wirkstrom durch Wandlerfehler bei der Auswertung zu klein erscheinen oder gar mit einem falschen Vorzeichen auftreten und dadurch zu falschem oder keinem Ansprechen des wattmetrischen Relais führen kann. Außerdem werden die Wandler im Allgemeinen nicht für die Erdschlusssortung ausgelegt, vielmehr orientiert sich deren Dimensionierung bezüglich Primärnennstrom meist an der Netzlast, also den Nennströmen der Abgänge. Aufgrund der, im Vergleich zu den Lastströmen, verhältnismäßig kleinen Erdschlussströme in gelöschten Netzen ergibt sich für den Stromwandler das Problem der Übertragung eines sehr kleinen Nutzsignales im Vollastbetrieb.

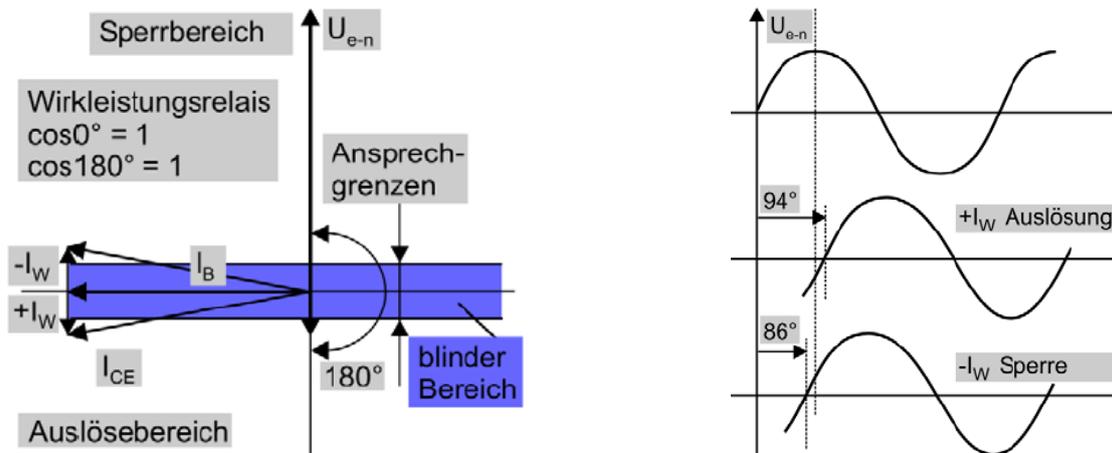


Abbildung 10: Auswertungsprinzip des wattmetrischen Relais [2]

Ein weiteres Problem stellen die Verlustleistung der Löserspule sowie die Nullstromwirkverluste im Fehlerfall als bestimmende Parameter dar. Die Petersen-Spule ist nicht für den Zweck der Erdschlussortung ausgelegt worden. Meist ist deren Verlustleistung sogar unbekannt und zudem noch abhängig von der Stufenstellung der regelbaren Petersen-Spule. Die in diesem Verfahren als Ortungskriterium verwendete Größe ist also nicht eindeutig festgelegt.

Die in diesem Abschnitt geschilderten Probleme des natürlichen Wattreststromverfahrens können durch die im folgenden Kapitel beschriebene Maßnahme zur Erhöhung des Wattreststroms verringert bzw. gelöst werden.

4.4 WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zu den Möglichkeiten eine Wattreststromerhöhung zu realisieren.

4.4.1 GRUNDSÄTZLICHES

Zur Verbesserung der Erdschlussortung mit dem wattmetrischen Verfahren kann der Wattreststrom, technologisch gesehen, auf zwei Arten erhöht werden. Dadurch werden die Auswirkungen von eventuell auftretenden Winkelfehlern verringert bzw. vermieden. [2]

Abhängig vom Betrag des angehobenen Wirkstroms kann die Wattreststromerhöhung in Anlehnung an [3] in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Klassische Wattreststromerhöhung: Erhöhung des Wirkstromes im Erdschlussfall durch Parallelschalten eines ohmschen Widerstandes über die Hilfswicklung der Löschspule (bis ca. 10 A).
- Wattmetrische KNOSPE: Erhöhung des Wattreststromes im Erdschlussfall durch direktes Parallelschalten eines höherohmigen Widerstandes zur Petersen-Spule (z.B. 60 A).

Hinweis: Demgegenüber steht die klassische amperemetrische KNOSPE mit Stromstärken in der Größenordnung von 300 A. Bei dieser Methode wird durch direktes Parallelschalten eines niederohmigen Widerstandes, oder einer strombegrenzenden Drossel, zur Petersen-Spule für eine starke Stromerhöhung im Erdschlussfall gesorgt. Im Unterschied zu den beiden oben erwähnten Verfahren wird hierbei mittels amperemetrischer Auswertung lediglich der Summenstrom genutzt, um den Fehlerabschnitt zu bestimmen (siehe Kapitel 4.5).

4.4.2 KLASSISCHE WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Die erste Variante kann funktionell durch den Anschluss eines Widerstands an die Hilfswicklung der Petersen-Spule realisiert werden. Da das Verfahren sehr oft auf diese Art ausgeführt wird, kann diese Methode als klassische Wattreststromerhöhung bezeichnet werden. Sie wird für geplante Stromerhöhungen bis ca. 10 A angewendet. Die Grenze dieses Verfahrens stellt die maximale Belastbarkeit der Hilfswicklung dar.

Abbildung 11 zeigt das Prinzip der klassischen Wattreststromerhöhung. Die Zuschaltung im Erdschlussfall erfolgt durch eine Logik, die beispielsweise auf das Vorhandensein einer Verlagerungsspannung oder anhand der auf den verketteten Wert gestiegenen Leiter-Erde-Spannungen reagiert. Der tatsächliche Einsatz des Verfahrens erfolgt in der Erwartung auf ein selbstständiges Erlöschen des Lichtbogens aufgrund der Resonanzsternpunkterdung erst eine gewisse Zeitspanne nach Eintritt des Erdschlusses. [2]

4.4.4 WIRKUNGSWEISE DER WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Abbildung 13 veranschaulicht die verbesserte Ortung durch die Wattreststromerhöhung im Vergleich zum natürlichen Verfahren. Durch die Erhöhung wird eine Ansprechbarkeit gewonnen, welche eine eindeutigere Interpretation des Messergebnisses zulässt.

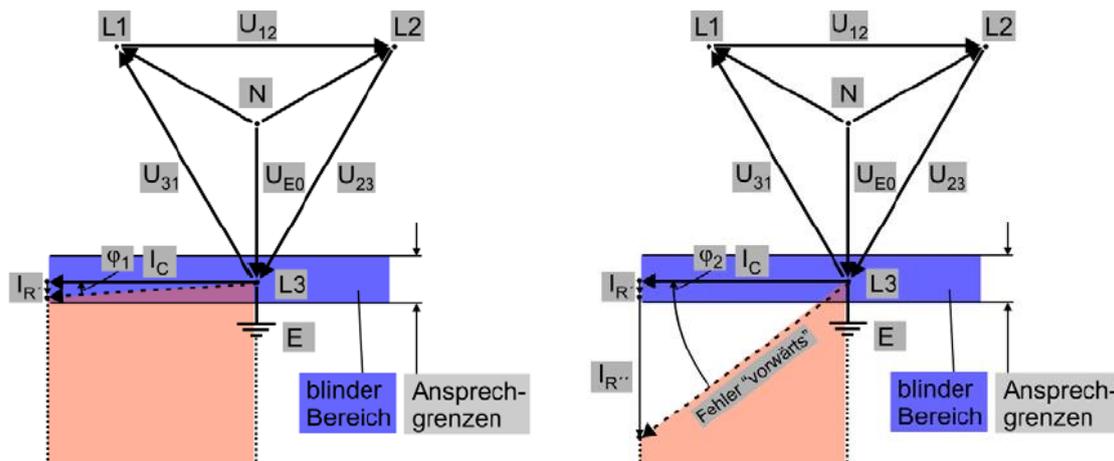


Abbildung 13: Auswertung ohne (links) und mit (rechts) Wattreststromerhöhung [2]

Ein Beispiel für die Dimensionierung wird in Kapitel 5.4 angeführt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der resultierende Strom und seine Komponenten im Erdschlussfall variieren, da sie von verschiedenen Parametern, wie z.B. der Nullsystemimpedanz des Transformators, der Leitungslängsimpedanz, sowie der Übergangsimpedanz an der Fehlerstelle abhängig sind. [3]

4.5 AMPEREMETRISCHE KNOSPE

Die folgenden Erkenntnisse zur klassischen amperemetrischen KNOSPE im gesamten Kapitel 4.5 sind inhaltlich aus [3] und [2] zusammengefasst.

4.5.1 ALLGEMEINES

Bei der amperemetrischen KNOSPE erfolgt eine starke Erhöhung des Reststromes, indem im Erdschlussfall ein niederohmiger Widerstand direkt parallel zur Löschspule geschaltet wird (Abbildung 14).

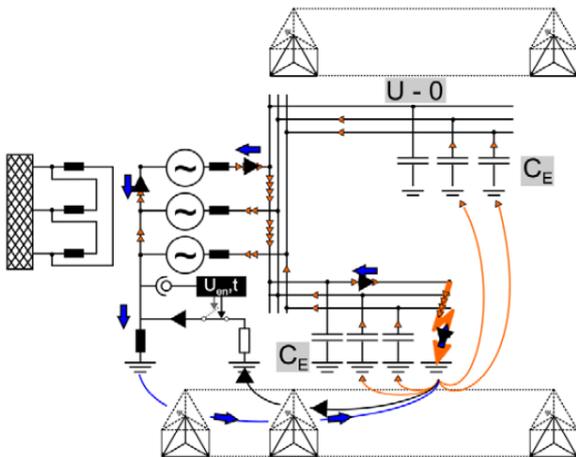


Abbildung 14: Prinzip der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktterdung [2]

Aus demselben Grund wie bei der, in Kapitel 4.4 beschriebenen, Wattreststromerhöhung ist auch in diesem Fall zwischen dem Erdschlusseintritt und dem Einsatz des Verfahrens eine kleine Verzögerung vorgesehen. Aufgrund des größeren Stromes und da durch diese Maßnahme am Strombegrenzungswiderstand im Erdschlussfall eine Verlagerungsspannung in der Größenordnung der Strangspannung anliegen kann, ergeben sich große Anforderungen hinsichtlich der Belastbarkeit des Widerstandes^c. Die Zuschaltzeit des Parallelwiderstandes ist demzufolge abhängig vom Betrag der geplanten Stromerhöhung, da sich dieser aufgrund der umgesetzten Wirkleistung erwärmt. Dieser Umstand wirkt sich auch auf die Größe des Widerstandes aus.

Die Zuschaltung des Widerstands durch die Logik im Erdschlussfall wird nach dem bereits in Kapitel 4.4 beschriebenen Prinzip realisiert. Die Auswertung bei der klassischen KNOSPE erfolgt grundsätzlich durch den Summenstrom entsprechend einem amperemetrischen Verfahren. Abhängig von der Stromstärke können zwei Varianten unterschieden werden:

- Realisierung mit mittlerem Strom (ca. 300 A)
- Ausführung mit hohem Strom (kA-Bereich)

^c Siehe Beispiel in Kapitel 5.5.

4.5.2 MITTELSTROM-KNOSPE

Bei der ersten Variante wird der Fehlerstrom mithilfe von Stromwandlern und Erdschlussortungsrelais ausgewertet. Die typischen Ströme für dieses Verfahren liegen im Bereich von 300 A. Der Vorteil dieser Art der Auswertung liegt in der Robustheit der Messung, da im Normalbetrieb kein nennenswerter Nullstrom auftritt. Für eine Tiefenortung sind in diesem Fall Aufteilungen der Kabelstrecke in schutztechnische Abschnitte mit jeweils eigenem Stromwandler notwendig.

4.5.3 HOCHSTROM-KNOSPE

Die zweite Variante nutzt den Kurzschlussschutz des Netzes zur Erdschlussortung. Aus diesem Grund sind zur Anregung bzw. Auslösung des Schutzsystems stärkere Ströme in der Größenordnung von 1 kA erforderlich. Der Vorteil dieser Methode ist, dass kein gesonderter Erdschlussschutz notwendig ist. Ein gravierender Nachteil ist die Problematik der hohen Berührungs- und Schrittspannungen, die bei großen Strömen in Verbindung mit zu großen Erdungswiderständen auftreten können. Dies stellt in der Praxis oft eine große Herausforderung bei der Umsetzung der zweiten Methode dar.

Über die Zuschaltzeit des Strombegrenzungswiderstands kann gesteuert werden, ob im Erdschlussfall lediglich eine Anregung der Schutzeinrichtung oder eine sofortige Abschaltung der Schutzstrecke durchgeführt werden soll. Erfolgt die Zuschaltung kurzzeitig ist es wichtig, dass die Richtungsanzeigen der Ortungsrelais speicher- und rücksetzbar sind.

Zusammenfassend ergeben sich die Vorteile der klassischen KNOSPE in den geringeren Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit und Winkeltreue der Wandler und der guten Einsetzbarkeit zur Tiefenortung bei Verwendung von Überstromeinrichtungen unter der Voraussetzung ausreichend großer Ströme.

Nachteilig wirken sich vor allem die durch den hohen Strom auftretenden Berührungs- und Schrittspannungen aus. Außerdem ergibt sich für den Strombegrenzungswiderstand durch die umgesetzte Leistung eine Einschränkung der Einsatzdauer. Hinsichtlich der Ausrüstung sind eine Logik für die Zuschaltung des Widerstandes und speicherfähige Ortungsrelais nötig. Weiters wirkt sich der Erdübergangswiderstand, wie in Kapitel 5.5 noch gezeigt wird, sehr stark auf den Summenstrom im Fehlerfall aus.

4.6 KNOPE

Eine andere Methode einen kräftigen Ortungshilfsstrom in der fehlerbehafteten Phase zu erzeugen, um diesen amperemetratisch auszuwerten, stellt die KNOPE dar. Ein Großteil der in dieser Arbeit behandelten Erdschlussortungsverfahren verfolgt die Strategie den Erdschlussort so schnell wie möglich zu finden, um einen Doppelerdschluss und damit die sofortige Abschaltung zu verhindern. Bei der Methode KNOPE wird im Erdschlussfall ein bewusst herbeigeführter Doppelerdschluss mit Strombegrenzung dazu benutzt den Fehlerort zu finden.

In einem Fachartikel über die ersten praktischen Erfahrungen mit dem neuen Verfahren zur Erdschluss-Ortung wird die **K**urzzeitige **n**iederohmige **P**hasen-**E**rdung (KNOPE) wie folgt definiert:

*„Mit KNOPE wird ein schutztechnisches Verfahren bezeichnet, bei dem im Erdschlussfall eine weitere, gesunde Phase geerdet wird. Es gibt dafür auch die Bezeichnung KUDE (**K**urzzeitiger **D**oppel-**E**rdschluss) oder HPE (**H**ealthy **P**hase **E**-arthing).“ [4]*

Die folgenden theoretischen Ausführungen zur KNOPE in diesem Kapitel entsprechen einer inhaltlichen Zusammenfassung aus [4].

Durch die Erdung eines nicht-erdschlussbehafteten Außenleiters über einen niederohmigen Widerstand im Erdschlussfall handelt es sich bei der KNOPE um ein stromstarkes Erdschlussortungsverfahren. Wie in Abbildung 15 dargestellt, ergibt sich ein zusätzlicher Strom über die Erdschlussstelle.

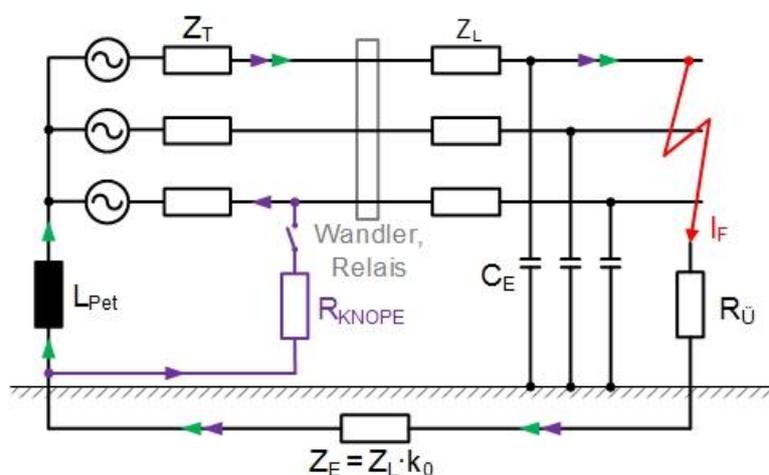


Abbildung 15: Dreiphasiges Prinzipschaltbild der KNOPE (nach [4], eigene Darstellung)

Die Zuschaltlogik hierfür arbeitet nach dem bereits in Kapitel 4.4 beschriebenen Prinzip. Die dabei auftretenden Ströme sind, je nach Dimensionierung, deutlich größer als bei der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktterdung (KNOSPE). Sie bewegen sich in der Größenordnung von mehr als 1 kA. Wie bereits bei den Verfahren Wattreststromerhöhung (Kapitel 4.4) und KNOSPE (Kapitel 4.5) beschrieben, erfolgt auch der Einsatz der KNOPE, aufgrund der Möglichkeit eines selbstständigen Erlöschens des Lichtbogens, erst nach einer gewissen Verzögerungszeit.

Im Vergleich zur KNOSPE, bei der am Strombegrenzungswiderstand bereits große Leistungen auftreten, ist der Widerstand bei der KNOPE einer um noch eine Größenordnung höheren thermischen Belastung ausgesetzt. Dies hat zum einen mit dem größeren Strom bei diesem Verfahren zu tun. Zum anderen liegt bei der KNOPE am Widerstand die um den Faktor $\sqrt{3}$ höhere, verkettete Spannung an. Das Beispiel in Kapitel 5.6 gibt eine gute Übersicht bezüglich der umgesetzten Wirkleistung. Entsprechend dieser Tatsache ist die Zuschaltzeit begrenzt. Aus diesem Grund muss die thermische Auslegung des Widerstandes für die geplante Einsatzart berücksichtigt werden. Abhilfe könnte hier der Ersatz des Widerstandes durch eine Drossel schaffen. Bei weiterer Verwendung des Widerstands empfiehlt es sich aus Sicherheitsgründen bereits implementierte Erdschlussortungsverfahren als Backup weiterhin zu behalten.

Eine weitere Folge der umgesetzten Wirkleistung ist die Größe des Widerstandes. Abbildung 16 zeigt die Ausmaße der Zuschaltlogik und des Strombegrenzungswiderstandes bei einem realisierten KNOPE-Verfahren.



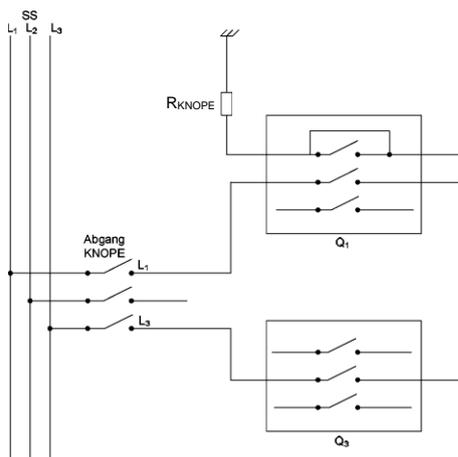
Abbildung 16: Gehäuse der KNOPE-Zuschaltlogik (links) und des Widerstands (rechts) [4]

Im Unterschied zu den Verfahren Wattreststromerhöhung und KNOSPE wird bei der KNOPE die Behandlung des Sternpunkts nicht verändert. Aus schutztechnischer Sicht kann das Verfahren als „Doppelerdschluss mit verteilten Fußpunkten und unterschiedlichen Übergangswiderständen“ [4] eingestuft werden.

Allerdings bestehen wesentliche Unterschiede zu einem realen Doppelerdschluss im Netz: Erstens ist der Ortungshilfsstrom der KNOPE, und damit auch die auftretenden Berührung- und Schrittspannungen, um eine Größenordnung von Faktor 6 bis 10 kleiner als bei einem wirklichen Doppelerdschluss. Zweitens tritt, hinsichtlich potentieller Berührungs- und Schrittspannungen, lediglich ein einziger relevanter Fußpunkt, nämlich die Erdschlussstelle, auf. Der andere Fußpunkt wird durch die KNOPE kontrolliert und gefahrlos für die Allgemeinbevölkerung im Umspannwerk hergestellt. Drittens liegt der Doppelerdschluss durch die KNOPE nur für eine definierte, kurze Zeit vor.

Aufgrund der Berührungsspannungs-Problematik ist für das KNOPE-Verfahren angesichts der großen Ortungsströme ein sogenanntes globales Erdungssystem zweckmäßig. Dabei handelt es sich laut Norm um „ein durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestelltes Erdungssystem, das sicherstellt, dass durch den geringen gegenseitigen Abstand dieser Erdungsanlagen keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten“ [11]. Mit anderen Worten soll dem Strom ein gut leitender Rückpfad in der Erde geboten werden. In Kabelnetzen des städtischen Mittelspannungsbereiches kann dies beispielsweise durch erdfühlig mitverlegte Kupferseile realisiert werden. Laut verschiedenen Untersuchungen können dicht besiedelte Gebiete als globale Erdungssysteme eingestuft werden, wobei kritische Punkte einer genaueren Untersuchung bezüglich Einhaltung der erlaubten Berührungsspannungen unterzogen werden müssen.

Abbildung 17 zeigt das Prinzip der Auswahl des nicht-erdschlussbehafteten Außenleiters, der im Erdschlussfall geerdet wird.



Fehlerphase	Auswahlphase für Widerstand
L1	L3
L2	L3
L3	L1

Abbildung 17: Prinzip der KNOPE-Zuschaltlogik (links) und Phasenauswahl (rechts) [4]

Die Auswertung der bisher behandelten Verfahren basiert auf einer Nullstrommessung. Diese ist empfindlicher, da im Normalbetrieb kein nennenswerter Nullstrom fließt und der Fehlerfall dadurch gut festgestellt werden kann. Im Gegensatz dazu beruht die Auswertung des KNOPE-Verfahrens auf einer Phasenstrommessung. Da Phasenströme im Normalbetrieb vorliegen,

muss der Ortungshilfsstrom im Fehlerfall deutlich größer sein, um eine eindeutige Erkennung des Erdschlusses zu gewährleisten.

Ein großer Vorteil der KNOPE liegt also darin, dass das Verfahren nicht mehr auf das Nullsystem des Netzes zurückgreift. Daher spielen Transformatorschaltgruppen, Verluste in der Petersen-Spule, usw. keine Rolle mehr. Der Ortungshilfsstrom kann durch die nachfolgende Formel im Sinne einer ersten Abschätzung bestimmt werden. Dazu ist kein Nullsystem zu berechnen.

$$I_{KNOPE} \approx \frac{U_N}{R_{KNOPE}} \quad (15)$$

Außerdem ist kein separates Erdschlussortungsequipment notwendig, da der große Strom die Nutzung der bestehenden Kurzschlusschutzsysteme (z.B. in Form von Überstromanzeigern) zur Erdschlussortung ermöglicht.

Je nach bestehender schutztechnischer Ausrüstung des Netzes ist dadurch eine Tiefenabschnittsortung oder, in gewissen Grenzen, sogar eine Punktortung erreichbar. Die kabelabschnittsgenaue Ortung kann beispielsweise durch Überstromanzeiger realisiert werden. Die Entfernung der Fehlerstelle kann durch Distanzrelais, optimalerweise in Verbindung mit SCADA-Systemen bestimmt werden.

Der hohe Strom des KNOPE-Verfahrens bewirkt eine Erwärmung, welche eine Erhöhung des Widerstands der Fehlerschleife zur Folge hat. Wie Abbildung 18 zeigt, sinkt dadurch der Ortungsstrom mit fortlaufender Zeit. Soll die KNOPE im Erdschlussfall nur für eine Anregung der Schutzsysteme sorgen, stellt dieses Verhalten im Allgemeinen kein Problem dar. Die Anregezeit ist zumeist sehr kurz eingestellt, wodurch sich der Stromwert für eine Anregung ausreichend lange über der dafür erforderlichen Schwelle befindet. Ist allerdings eine sofortige Abschaltung der Schutzstrecke im einpoligen Fehlerfall erwünscht, so muss gewährleistet sein, dass der Strom über die maximale Schutzauslösezeit hinaus den Auslösewert übersteigt.

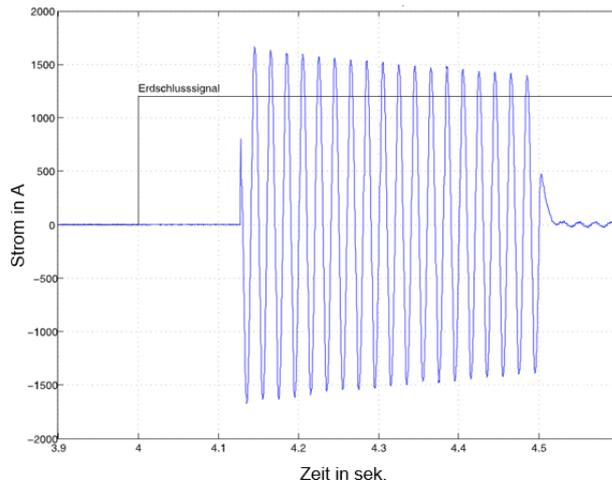


Abbildung 18: Sinkender Ortungshilfsstrom durch die Erwärmung [4]

Die Betriebserfahrungen eines österreichischen Netzbetreibers haben gezeigt, dass die Implementierung der KNOPE in einem kleinstädtischen Mittelspannungsnetz mit hohem Verkabelungsgrad grundsätzlich möglich ist und das Auftreten der gefürchteten Doppelerdschlüsse verhindert hat. Hinsichtlich der Einhaltung der erlaubten Berührungsspannung bedürfen dabei einzelne kritische Punkte im Netz einer Adaptierung, wie beispielsweise einer Standortisolierung oder einer verbesserten Anbindung an das globale Erdungssystem.

Durch die schnellen KNOPE-Abschaltungen war, laut Erfahrungsbericht des Netzbetreibers, für die Reparatur der bisher infolge eines Erdschlusses aufgetretenen mechanischen Schäden jeweils nur eine Kabelmuffe erforderlich. Demgegenüber musste für, in der Vergangenheit aufgetretene, reale Doppelerdschlüsse in der Regel ein Kabelteilstück mit zwei Muffen ersetzt werden.

Zusammenfassend kann die KNOPE als ein begrenzter, stromkontrollierter und künstlich hervorgerufener Doppelerdschluss gesehen werden, welcher eine Tiefenortung durch das vorhandene Kurzschlusschutzsystem ermöglicht und dank der schnellen Abschaltung des einfachen Erdschlusses dessen mögliche Ausbreitung zu einem realen Doppelerdschluss und damit größere Schäden verhindert.

4.7 PULSORTUNG

Voraussetzung für das klassische Pulsortungsverfahren ist der überkompensierte Betrieb des Netzes. Es basiert auf einer zyklischen Änderung der Verstimmung. Der Taktgenerator wird in der klassischen Variante durch wiederholtes Zuschalten eines Kondensators zur Petersen-Spule realisiert. Im Falle einer Unterkompensation des Netzes ist die Ansprechempfindlichkeit herabgesetzt. Wird die Kapazität, wie in Abbildung 19 gezeigt, direkt parallel zur Löschspule geschaltet, so werden an sie hohe Anforderungen hinsichtlich der Spannungsfestigkeit gestellt. Aus diesem Grund ist es in vielen Fällen üblich den Puls-kondensator über die Hilfswicklung der Kompensationsspule anzuschließen. [3]

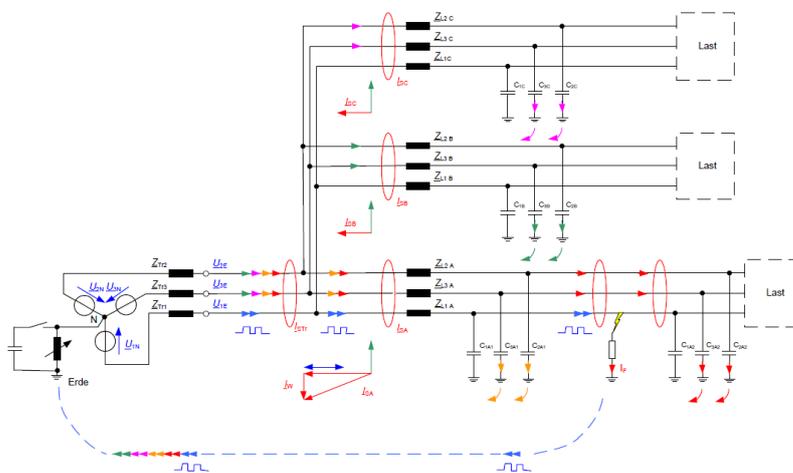


Abbildung 19: Pulsortung mit Kondensator auf der Hochspannungsseite [3]

Die Kapazität des Puls-kondensators kann beispielsweise derart dimensioniert werden, dass bei Zuschalten im Erdschlussfall für die Grundwelle im normalen Schaltzustand des Netzes näherungsweise eine Vollkompensation erreicht wird. Durch die Anordnung ergibt sich ein mit der Schaltfrequenz des Puls-kondensators variierender Wechsel zwischen Überkompensation und Vollkompensation des Netzes. Resultierend stellt sich an der Fehlerstelle ein pulsierender Summenstrom ein. [2]

Allerdings muss in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass für Änderungen der Netzgröße (z.B. durch Ausbau oder Schalthandlungen) die Vollkompensation durch Zuschalten des Puls-kondensators nicht mehr erreichbar ist. Wird die Petersen-Spule beispielsweise im Falle einer vorübergehenden Schaltzustandsänderung nicht nachgeführt, so ergibt sich ein neuer Kompensationsgrad, für den der Kondensator nicht ausgelegt ist. Ein Netzausbau hat im Allgemeinen eine Nachstellung der Petersen-Spule zur Folge, wodurch sich deren Nullimpedanz und somit auch der für eine Vollkompensation erforderliche Puls-kondensator ändern. In beiden Fällen muss also die Kapazität angepasst werden, um eine zuverlässige Pulsortung im Erdschlussfall zu gewährleisten. [2]

Bei der klassischen Pulsortung ergeben sich Probleme für Erdschlüsse mit hochohmigen Erdübergangswiderständen. Der veränderliche Strom verursacht in diesem Fall am Nullsystem eine pulsierende Spannung, die nicht mehr zu vernachlässigen ist. Aufgrund des Spannungsteilers, bestehend aus Erdübergangswiderstand und der Nullimpedanz (siehe Abbildung 44 in Kapitel 5.7), stellt sich nun auch eine pulsformige Änderung der Nullspannung ein. Diese hat veränderliche Nullströme in den „gesunden“ Abgängen zur Folge. Ist das Verfahren mit symmetrischer Taktung realisiert, d.h. der Kondensator ist für gleich lange Zeitintervalle (z. B. jeweils 1 s) zu- und weggeschaltet, so ist das Kriterium der Pulsortung nicht mehr anwendbar und der erdschlussbehaftete Abgang kann nicht identifiziert werden. [12]

Eine Lösung für diese Problematik stellt die asymmetrische Taktung dar, bei welcher die Zeitintervalle unterschiedlich lang ausfallen (z.B. 1 s und 1,5 s). Dadurch können die Pulse von Summenstrom und Verlagerungsspannung in Relation zueinander gesetzt werden. Bezüglich Ansteigen bzw. Absinken verhalten sich die Flanken der Pulse von U_{NE} und I_F bei „gesunden“ Abgängen gleich und beim fehlerbehafteten Abgang gegensätzlich, wodurch der erdschlussbehaftete Abgang gefunden werden kann. Das Verfahren funktioniert bis zu einem Erdübergangswiderstand von etwa 300Ω zuverlässig. Für höhere Werte gestaltet sich die korrekte Auswertung der Pulse als schwierig, da der Takthub zu klein ausfallen kann. [12]

Unter der Annahme eines Strahlennetzes sind für die reine Abgangserfassung Pulsortungsrelais an jedem Abgang zur Detektion der Modulation des Fehlerstromes ausreichend. Jedoch ist auch eine Tiefenabschnittsortung mit relativ geringem Aufwand realisierbar. Dazu müssen lediglich Pulsortungsrelais entsprechend der gewünschten schutztechnischen Segmentierung im Netz installiert werden. [3]

Für eine eindeutige Aussage empfiehlt es sich bei der Einstellung des Relais eine gewisse Mindestanzahl an erkannten Pulsen festzulegen. Ausgehend von einer asymmetrischen Taktung und mindestens zehn ausgewerteten Pulsen bedeutet dies aber auch eine relativ lange Ortungszeit, die bis in den Minutenbereich gehen kann. Eventuell auftretende Änderungen des Nullsystems in dieser Zeit können sich negativ auf den Ortungserfolg auswirken. Im Falle einer realisierten Tiefenortung kann die Identifikation des erdschlussbehafteten Abschnitts erfolgen, indem die installierten Relais ausgehend vom Puls-kondensator nacheinander auf Pulserkennung abgesucht werden. Wie in Abbildung 19 gut zu sehen ist, liegt der Fehler im Abschnitt zwischen dem letzten Ortungsrelais, das die Pulse noch erkannt und dem ersten, welches nichts mehr detektiert hat. [12]

4.7.1 EINFLUSSFAKTOREN

Um zu verhindern, dass das Pulsmuster von anderen Einflüssen als dem Erdschluss zu sehr verzerrt oder gedämpft wird und dadurch eine verfälschte Ortung auftritt, müssen bestimmte Faktoren berücksichtigt werden.

Als Erstes sei in diesem Zusammenhang auf die Problematik des, bereits oben behandelten, hochohmigen Erdübergangswiderstands verwiesen. Dies kann in Grenzen, wie dargelegt, durch eine asymmetrische Taktung gelöst werden.

Einen wichtigen Faktor für die korrekte Auswertung stellt eine ausreichend große Überkompensation des Netzes dar. Abbildung 20 zeigt einen Idealfall (Vernachlässigung aller Dämpfungen), bei dem die Strommessung direkt an der Erdschlussstelle, sowie eine perfekte V-Kurve angenommen wurden. Anhand der Orientierung der blauen Pfeile wird das unterschiedliche Verhalten der klassischen Pulsortung bei Über- bzw. Unterkompensation deutlich. [3]

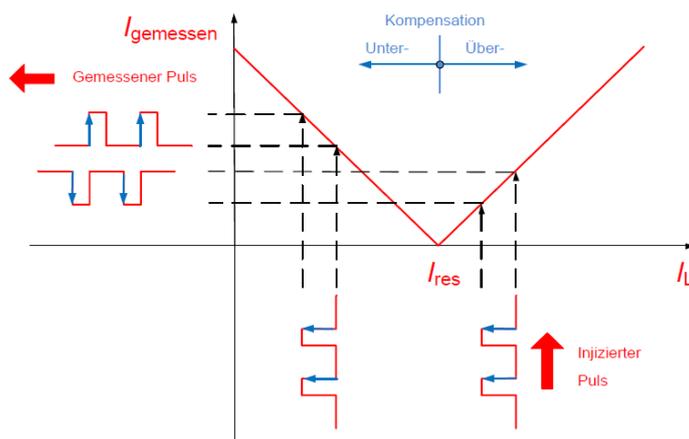


Abbildung 20: Verhalten der Pulse in Abhängigkeit der eingestellten Kompensation [3]

Die Folge einer zu geringen Überkompensation wird in Abbildung 21 deutlich. Da der eingesetzte Pulsstrom größer als der überkompensierte Strom ist, kommt es zu einer Auslöschung der Pulse. Infolgedessen kann das Pulsmuster nicht mehr detektiert und der erdschlussbehaftete Abschnitt nicht gefunden werden. Um dies zu vermeiden sollte die Überkompensation stets größer als der Pulsstrom sein. [3]

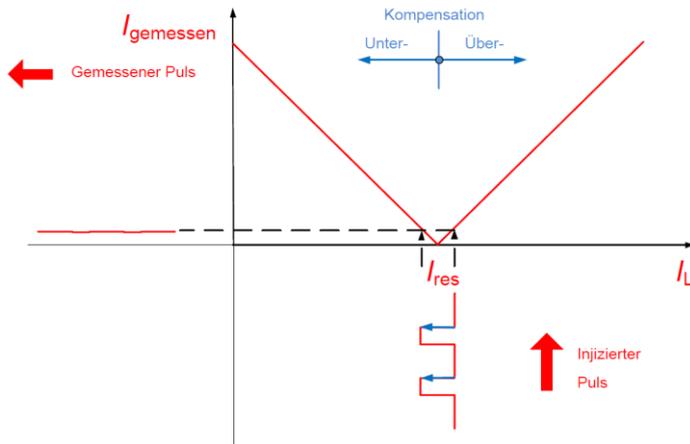


Abbildung 21: Detektiertes Pulsmuster bei zu geringer Überkompensation [3]

Einen weiteren Einflussfaktor im Zusammenhang mit der Kompensation stellen dezentral aufgestellte Löschspulen dar. Es sollte nach Möglichkeit vermieden werden, dass diese, wie in Abbildung 22 dargestellt, eine zu große Löscheinleistung in das davor liegende Netz speisen. Der Erdschluss würde in einem solchen Fall in einem falschen Abschnitt detektiert werden, da die Ortungsrelais das Pulsmuster ab dem Stromnulldurchgang nicht mehr erkennt. [12]

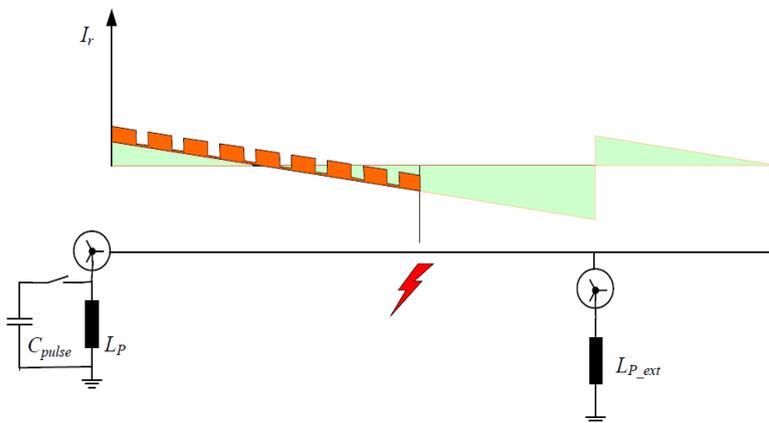


Abbildung 22: Zu große Kompensationsleistung der dezentralen Löschspule [12]

Abbildung 23 zeigt die für eine Pulsortung gewünschten Kompensationsleistungsverhältnisse im Netz. Die zentrale Petersen-Spule stellt für den Abschnitt bis zur dezentralen Löschspule genügend Kompensationsleistung zur Verfügung und speist nur das Netz in ihrem Rücken. Dadurch erfolgt kein Nulldurchgang des Stromes und das Ortungsrelais hat im Erdschlussfall keine Probleme mit der Erkennung der Pulse. [12]

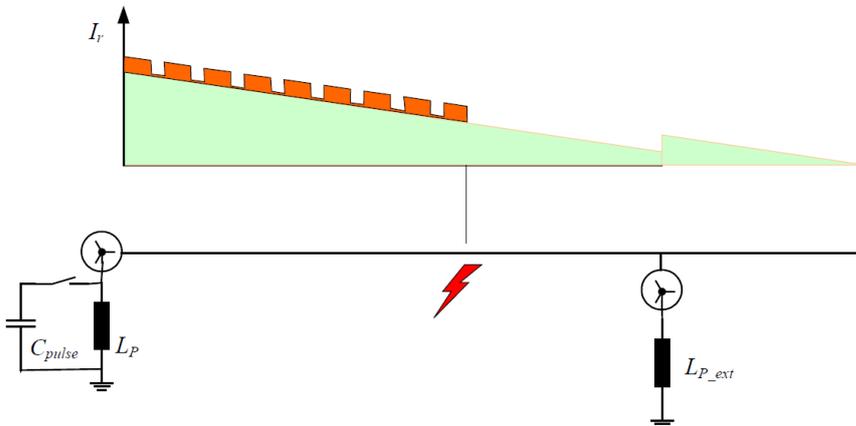


Abbildung 23: Passende Kompensationsleistung der dezentralen Löschspule [12]

Bei den vorangegangenen Betrachtungen wurde bezüglich der Kompensation von idealen Zuständen ausgegangen. Wie aber bereits am Beginn von Kapitel 4.3 erläutert, fließt im Erdschlussfall auch bei Vollkompensation der Grundwelle an der Fehlerstelle ein komplexer Strom. Der Wirkanteil dieses Stromes ist abhängig von der Größe des ohmschen Erdübergangswiderstandes. Abbildung 24 lässt exemplarisch erkennen, dass sich die V-Kurve durch den Wirkstrom zu einer Hyperbel verändert. [12]

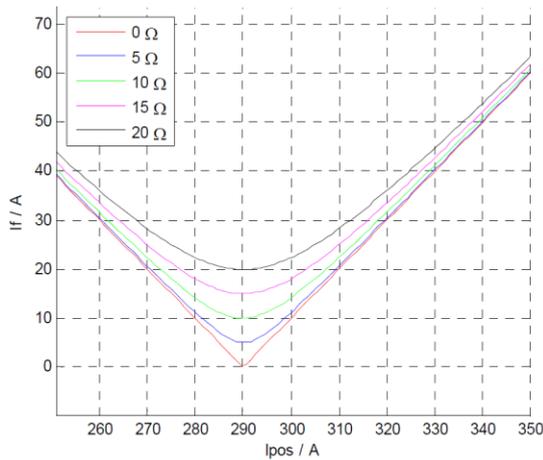


Abbildung 24: V-Kurve in Abhängigkeit des ohmschen Erdübergangswiderstandes [12]

Dieses Verhalten macht eine höhere Überkompensation notwendig, da die Pulse durch die Form der Übertragungskennlinie in ihrer Amplitude verringert werden (Abbildung 25). [3]

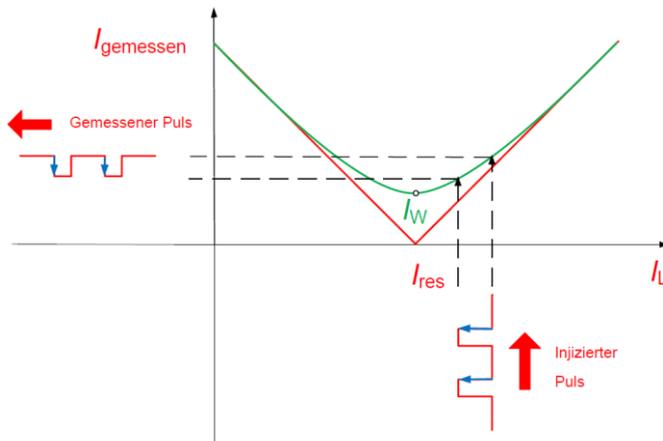


Abbildung 25: Auswirkungen des Wattreststromes auf das detektierte Pulsmuster [3]

In der Praxis kann der Einstellwert für die Überkompensation der Petersen-Spule mit folgender Formel aus [12] abgeschätzt werden:

$$I_{\text{überkompensiert}} = \frac{I_{\text{Watt}}}{2} + I_{\text{Puls}} \quad (16)$$

Der Blindanteil des oben erwähnten Stromes setzt sich im Wesentlichen aus Oberschwingungen zusammen. Viele der heute noch üblichen Relais werten den Effektivwert aus, wodurch sich die Oberschwingungsströme negativ auf den Ortungserfolg auswirken. Es ergibt sich eine Überlagerung mit dem Pulssignal, welche, wie bereits zuvor beschrieben, abermals eine größere Überkompensation nötig macht. [3]

Zu den angeführten Nachteilen der klassischen Pulsortung kommt noch dazu, dass diese in Ringen nicht funktioniert. Aufgrund der Topologie wird der Erdschluss beidseitig vom Pulsstrom gespeist und durch die Aufteilung ergibt sich eine Verkleinerung der Pulsamplitude. Sollte der Pulsstrom dennoch groß genug sein kommt es am ganzen Ring zu einer Anzeige, der erdschlussbehaftete Abschnitt kann nicht detektiert werden. [3]

4.7.2 ALTERNATIVE FORMEN

Durch verschiedene Änderungen bzw. Erweiterungen der klassischen Pulsortung können einige der bisher beschriebenen Nachteile des Verfahrens aufgehoben werden. Aus diesem Grund existiert eine Vielzahl neuer Verfahren, die auf dem Prinzip aufbauen. Die nachfolgend beschriebenen Methoden sind inhaltlich aus [3] zusammengefasst.

Ein Ansatz zur Verbesserung der Empfindlichkeit ist die Synchronisierung des Taktgenerators mit den Pulsortungsrelais im Feld. Allerdings ist dies aufgrund der räumlichen Verteilung der Relais mit einem erhöhten Einsatz hinsichtlich der Kommunikation verbunden.

Eine weitere Eingriffsmöglichkeit bietet die Auswertung. So können statt des Effektivwertes des Summenstroms der komplexe Strom oder die drei Leiterströme im Zuge einer differentiellen Messung ausgewertet werden. Je nach Verfahren können dadurch verschiedene Nachteile wie z.B. Einflüsse durch Oberschwingungen, die erforderliche Überkompensation, die Problematik bei Ringen oder hochohmige Erdschlüsse behoben werden.

Andere Methoden beruhen auf einer Einspeisung von nicht-netzfrequenten Strömen und ermöglichen Richtungsortungen aufgrund der im normalen Netzbetrieb nicht vorkommenden Frequenzen. Der Einsatz von Thyristorschaltungen beschleunigt das Verfahren. Bei der schnellen Pulsortung sind dadurch verschiedene Pulsmuster realisierbar.

5 TECHNISCHE ANWENDBARKEIT IM MUSTERNETZ

In diesem Kapitel wird untersucht inwiefern die in Kapitel 4 beschriebenen Erdschlussortungsverfahren in städtischen Mittelspannungsnetzen grundsätzlich verwendet werden können. Zu diesem Zweck wurde das in Kapitel 3.5 vorgestellte 10 kV-Musternetz konzipiert, welches repräsentativ für ein Netzgebiet eines realen Netzes ist. Im Zuge der Untersuchung werden die verschiedenen Ortungsverfahren im Erdschlussfall mithilfe der Theorie der Symmetrischen Komponenten mathematisch analysiert.

Für die Berechnungen in diesem Kapitel können einige Vereinfachungen getroffen werden. So werden die Parallelimpedanzen des Restnetzes und die Kabelkapazitäten im Mit- und Gegen-system vernachlässigt, da diese keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnungen haben. Außerdem können der Transformator und das übergeordnete Netz im Mit- und Gegen-system als rein induktiv angenommen und im Nullsystem vernachlässigt werden. [2]

5.1 NATÜRLICHES OBERSCHWINGUNGSVERFAHREN

Nachfolgend werden die verschiedenen Auswertungsverfahren des Oberschwingungsverfahrens durch exemplarische Berechnungen überprüft. Dabei wird jeweils von einem „satten“ Erdschluss ausgegangen ($R_{ij} = 0\Omega$).

5.1.1 AMPEREMETRISCHE AUSWERTUNG

Bei der in Kapitel 4.1 erläuterten amperemetrischen Auswertungsmethode des Oberschwingungsverfahrens, ist vor allem der Betrag des Oberschwingungserdschlussstroms von Interesse. Dieser sollte auf der Primärseite des Wandlers eine gewisse Grenze nicht unterschreiten, damit das Erdschlussortungssystem auf der Sekundärseite das Signal richtig verarbeiten kann. Um dies zu gewährleisten, wird in den folgenden Kapiteln ein Einstellwert für das Relais gesucht, welcher ein zuverlässiges Ansprechen im Erdschlussfall sicherstellt.

Methodik

Wie bei allen Schutzeinrichtungen ist auch bei Erdschlussordnungsrelais die Ansprechbarkeit hinsichtlich Unterfunktionen für den in diesem Sinne ungünstigsten Fall zu prüfen, nämlich:

- Geringe Oberschwingungspegel (z.B. in der Nacht, am Wochenende, ...)
- Ungünstige Lage des Fehlerorts (Fernfehler)
- Dämpfender Einfluss eines allfälligen Übergangswiderstands

Der erforderliche Ansprechwert zur Vermeidung von Unterfunktionen muss deutlich unter dem minimalen Signalpegel eines jeden erdschlussbehafteten Abgangs liegen. Ein Faktor 2 wird empfohlen. Damit werden sogenannte „Schutzversager“ (fehlerbehafteter Abgang wird nicht erkannt) vermieden.

Der andere Fall, nämlich sogenannte „Fehlauslösungen“ (nicht-erdschlussbehafteter Abgang wird angezeigt), muss natürlich ebenso verhindert werden. Dazu wird die Selektivität bezüglich Überfunktionen für den in dieser Hinsicht ungünstigsten Fall geprüft, und zwar für:

- Hohe Oberschwingungspegel (z.B. am Vormittag unter der Woche)
- Ungünstige Lage des Fehlerorts (Resonanzpunkt)
- Satter Erdschluss (kein Übergangswiderstand)
- Hoher kapazitiver Erdschlussstrombeitrag

Der erforderliche Ansprechwert für die Vermeidung von Überfunktionen muss deutlich über dem maximalen Signalpegel aller nicht-erdschlussbehafteten Abgänge liegen. Auch hier ist der Faktor 2 heranzuziehen.

Ansprechbarkeit (keine Unterfunktion)

Im Zuge der technischen Untersuchung des Musternetzes wird der Oberschwingungserdschlussstrom anhand des Ersatzschaltbildes des Musternetzes (Abbildung 26) für verschiedene Bedingungen berechnet. Der Berechnung liegt die in der Praxis sehr häufig verwendete Frequenz von $f = 250 \text{ Hz}$ (5. Harmonische) zugrunde. Die Ordnungszahl n ergibt sich aus dem Verhältnis dieser Frequenz zur Netzfrequenz.

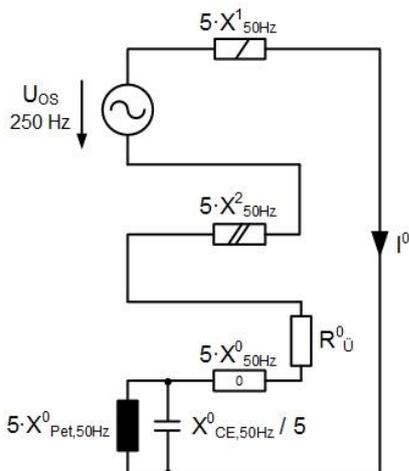


Abbildung 26: Verhalten der Reaktanzen beim natürlichen Oberschwingungsverfahren

Zur Orientierung kann der Oberschwingungserdschlussstrom in Abhängigkeit von der Oberschwingungsfrequenz, dem kapazitiven Erdschlussstrom bei Netzfrequenz und dem natürlichen Oberschwingungsspannungspegel^d für eine erste, schnelle Abschätzung im Sinne von [9] mit folgender Formel ermittelt werden.

$$I_{F\sim,250} = I_{CE} \cdot \frac{f_{250}}{f_{Netz}} \cdot p_{250} = 180 \text{ A} \cdot 5 \cdot 0,003 = 2,7 \text{ A} \quad (17)$$

Die obige Faustformel geht davon aus, dass der Oberschwingungssummenstrom im Erdschlussfall nur durch die Kapazität im Nullsystem bestimmt wird und die stets vorhandenen Induktivitäten keine Rolle spielen.

Die frequenzabhängigen Reaktanzen werden, wie in Kapitel 4.1 erläutert und in Abbildung 26 dargestellt, mithilfe der Ordnungszahl n auf die Frequenz der verwendeten Oberschwingung umgerechnet. Die hierfür erforderlichen Beläge sind in Kapitel 3.5 für die Netzfrequenz bestimmt worden.

Im nachfolgenden Beispiel wird der Schwellwert für die sichere Anregung (keine Unterfunktion) des amperemetrischen Erdschlussschutzes am „kranken“ Abgang abgeleitet. Dabei wird im Netz ein Oberschwingungsspannungspegel (im Sinne der „pre-fault voltage“) von $p_{250} = 0,3 \%$ angenommen, um im Sinne der Aufgabenstellung (Vermeidung von Unterfunktionen) ungünstige Fehlerpegel zu erhalten (Worst-Case-Abschätzung).

^d Für die Randwertbetrachtung bezüglich Unterfunktion wird ein geringer Pegel von 0,3% angenommen

Hinweis: Dieser Oberschwingungspegel ist nicht zwangsläufig der Oberschwingungspegel der im Fehlerfall an der Sammelschiene gemessenen Verlagerungsspannung.

In Abweichung von der in dieser Arbeit üblichen Vorgehensweise (Abgangslänge = Fehlerentfernung = 5 km), wird eine Fehlerentfernung von $l_F = 1 \text{ km}$ eingesetzt. Die Begründung dafür (Resonanzvermeidung) erfolgt im nachfolgenden Abschnitt anhand der Behandlung der Überfunktion.

Als Erstes werden die Oberschwingungsspannung beim angenommenen Pegel und die Mit-, Gegen- und Nullimpedanz der fehlerhaften Leitung bestimmt.

$$U_{250} = p_{250} \cdot U_{Ph} = 0,003 \cdot \frac{10 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 17,3 \text{ V} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{L,250}^1 = \mathbf{Z}_{L,250}^2 &= l_F \cdot (r'_L + n \cdot j x'_L) = 1 \text{ km} \cdot (0,21 + 5 \cdot j 0,13) \frac{\Omega}{\text{km}} \\ &= (0,2 + j 0,7) \Omega \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{L,250}^0 &= (3 \cdot \mathbf{k}_0 + 1) \cdot \mathbf{Z}_{L,250}^1 = (3 \cdot 0,7 \cdot e^{-j 30^\circ} + 1) \cdot (0,2 + j 0,7) \Omega \\ &= (1,3 + j 1,8) \Omega \end{aligned} \quad (20)$$

Für den Transformator und das übergeordnete Netz sind die ohmschen Widerstände vernachlässigbar. Aufgrund der geringen Reaktanz des übergeordneten Netzes wäre auch diese vernachlässigbar, wird aber in diesem Beispiel der Vollständigkeit halber berücksichtigt.

$$\mathbf{Z}_{T,250}^1 = \mathbf{Z}_{T,250}^2 = n \cdot \mathbf{Z}_T^1 = 5 \cdot j 0,6 \Omega = j 3,0 \Omega \quad (21)$$

$$\mathbf{Z}_{\dot{U}N,250}^1 = \mathbf{Z}_{\dot{U}N,250}^2 = n \cdot \mathbf{Z}_{\dot{U}N}^1 = 5 \cdot j 0,03 \Omega = j 0,2 \Omega \quad (22)$$

Damit können die Mit- und die Gegenimpedanz ermittelt werden.

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{250}^1 = \mathbf{Z}_{250}^2 &= \mathbf{Z}_{L,250}^1 + \mathbf{Z}_{T,250}^1 + \mathbf{Z}_{\dot{U}N,250}^1 = (0,2 + j (0,7 + 3 + 0,2)) \Omega \\ &= (0,2 + j 3,9) \Omega \end{aligned} \quad (23)$$

Die Nullimpedanz des Yd5-Transformators ist unendlich und kann daher vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu wird die Nullimpedanz des Sternpunktbildners als vernachlässigbar betrachtet bzw. der Nullimpedanz der Petersen-Spule zugeschlagen.

Nun müssen noch die Nullreaktanzen der Petersen-Spule und des kapazitiven Restnetzes bestimmt werden.

Bei der Überprüfung der Ansprechbarkeit ist der Oberschwingungssummenstrom im Sinne einer Resonanzbetrachtung von Interesse. Aus diesem Grund wird für die Nullreaktanz des kapazitiven Restnetzes im Zuge einer Vereinfachung die Hälfte der Leiter-Erde-Kapazität des Pi-Ersatzschaltbilds der fehlerbehafteten Leitung berücksichtigt, da diese (wie Abbildung 27 zeigt) parallel zur Kapazität des Restnetzes liegt.

Daher wird die Anzahl der Abgänge in Formel (25) mit 14,5 angenommen. Der Ausdruck $\#_{Abg.korr}$ gibt also wieder, dass die halbe Nullkapazität der „kranken“ Leitung mit der Sammelschiene verbunden ist. Unabhängig von der Fehlerentfernung beträgt die Länge der „gesunden“ Abgänge weiterhin 5 km.

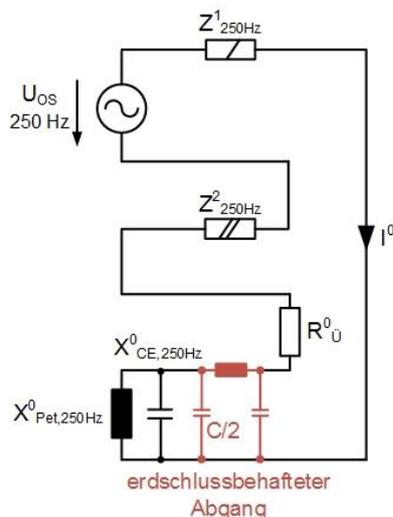


Abbildung 27: Berücksichtigung des Pi-Ersatzschaltbilds der fehlerbehafteten Leitung

$$j X_{Pet,250}^0 = n \cdot j X_{Pet,50}^0 = 5 \cdot j 91,7 \Omega = j 458,5 \Omega \quad (24)$$

$$j X_{CE,250}^0 = j \frac{x'_{CE,50}}{l_{Ltg.} \cdot \#_{Abg.korr} \cdot n} = j \frac{-7074 \Omega km}{5 km \cdot 14,5 \cdot 5} = -j 19,5 \Omega \quad (25)$$

Anhand des Ergebnisses der Parallelimpedanz bestätigt sich die Aussage aus Kapitel 4.1, wonach das kompensierte Netz für Oberschwingungen näherungsweise als isoliertes Netz angesehen werden kann, da die Berücksichtigung der Löschspule das Ergebnis nur geringfügig ändert.

$$Z_{Par,250}^0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{Pet}^0} + \frac{1}{jX_{Pet,250}^0} + \frac{1}{jX_{CE,250}^0}} = \frac{1}{\frac{1}{17,8 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{j458,5 \Omega} + \frac{1}{-j19,5 \Omega}} = -j20,4 \Omega \quad (26)$$

Somit kann auch die gesamte Nullimpedanz und in weiterer Folge die gesamte Impedanz der Symmetrischen Komponenten für die angenommene Frequenz berechnet werden.

$$Z_{250}^0 = Z_{L,250}^0 + Z_{Par,250}^0 = (1,3 + j1,8) \Omega - j20,4 \Omega = (1,3 - j18,6) \Omega \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Z_{250} &= Z_{250}^1 + Z_{250}^2 + Z_{250}^0 = 2 \cdot (0,2 + j3,9) \Omega + (1,3 - j18,6) \Omega \\ &= (1,7 - j10,8) \Omega \end{aligned} \quad (28)$$

Es zeigt sich, dass die induktiven Reaktanzen des Mit- und des Gegensystems durch die höhere Frequenz einen größeren Einfluss auf die Gesamtimpedanz als bei den netzfrequenten Verfahren haben. Im Gegensatz dazu wird der ohmsche Anteil der Gesamtimpedanz auch ohne Berücksichtigung des Erdübergangswiderstands hauptsächlich durch das Nullsystem vorgegeben.

Nun kann der Betrag des Erdschlussstroms berechnet werden. In dieser Berechnung wird von einem „satten“ Erdschluss ausgegangen ($R_{\ddot{u}} = 0 \Omega$). Für die Miteinbeziehung eines Erdübergangswiderstands muss dieser lediglich bei der Gesamtimpedanz berücksichtigt werden.

$$I_{o,R\ddot{u},250}^0 = \frac{U_{250}}{|Z_{250}|} = \frac{17,3 \text{ V}}{|(1,7 - j10,8) \Omega|} = 1,6 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{F,250,o,R\ddot{u}} = 3 \cdot I_{o,R\ddot{u},250}^0 = 3 \cdot 1,6 \text{ A} = 4,8 \text{ A} \quad (30)$$

Das Ergebnis zeigt eine kleine Abweichung von dem mit Formel (17) berechneten Orientierungswert. Nun kann für die gewählte Konstellation, wie am Beginn des Kapitels beschrieben, der folgende maximale Ansprechwert des Erdschlussortungsrelais abgeleitet werden.

$$I_{An,250} \leq \frac{I_{F,250,o,R\ddot{u}}}{2} = \frac{4,8 \text{ A}}{2} = 2,4 \text{ A} \quad (31)$$

Um die jederzeitige Einsatzbereitschaft des amperemtrischen Oberschwingungsverfahrens zu überprüfen, sollten bezüglich des Pegels, aufgrund der in Kapitel 4.1 dargelegten tages- und jahreszeitlichen Schwankungen des Oberschwingungsgehalts im Netz, entsprechende Messungen durchgeführt werden.

Ansprechbarkeit (keine Überfunktion)

Wie gezeigt werden kann, besteht beim amperemetrischen Oberschwingungsverfahren die Gefahr von Überfunktionen (Erdschlussmeldungen nicht-erdschlussbehafteter Abgänge) für den Fall von Resonanzzuständen. Diese treten dann auf, wenn es zu einer entfernungsbedingten Resonanz zwischen Nullsystem und Mit- bzw. Gegensystem kommt. Mit steigender Fehlerentfernung nehmen die Werte für die Induktivitäten im Nullsystem und Mit- bzw. Gegensystem zu, so dass die Reihenschaltung dieser Induktivitäten mit den Nullsystemkapazitäten zu einer Serienresonanz führt, bei welcher besonders große Fehlerströme und auch Verlagerungsspannungen an der Sammelschiene auftreten.

In diesem Fall kommt es zu stark überhöhten Amplituden der 250 Hz-Verlagerungsspannung an der Sammelschiene, aufgrund derer sich besonders große 250 Hz-Summenströme in den gesunden Abgängen ausbilden, welche beim amperemetrischen Verfahren zu einer Erdschlussanzeige eines solchen Abgangs führen und im Sinne der obigen Ausführung als Überfunktion zu klassieren sind. Dieses Phänomen wird im folgenden Beispiel für eine Fehlerentfernung von 4,8 km und einen Oberschwingungspegel von 1%^e gezeigt.

Zunächst werden wiederum die Oberschwingungsspannung beim angenommenen Pegel, sowie die Mit-, Gegen- und Nullimpedanz der fehlerhaften Leitung berechnet.

$$U_{250} = p_{250} \cdot U_{Ph} = 0,01 \cdot \frac{10 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 57,7 \text{ V} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Z_{L,250}^1 = Z_{L,250}^2 &= l_F \cdot (r'_L + n \cdot j x'_L) = 4,8 \text{ km} \cdot (0,21 + 5 \cdot j 0,13) \frac{\Omega}{\text{km}} \\ &= (1,0 + j 3,1) \Omega \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Z_{L,250}^0 &= (3 \cdot k_0 + 1) \cdot Z_{L,250}^1 = (3 \cdot 0,7 \cdot e^{-j 30^\circ} + 1) \cdot (1,1 + j 3,3) \Omega \\ &= (6,1 + j 7,7) \Omega \end{aligned} \quad (34)$$

Für die Impedanzen von Transformator und übergeordnetem Netz können die Werte aus dem vorigen Abschnitt „Ansprechbarkeit (keine Unterfunktion)“ übernommen werden, da diese unabhängig von der Länge der erdschlussbehafteten Leitung sind. Damit können die Mit- und die Gegenimpedanz ermittelt werden.

^e Dies entspricht einem durchaus gängigen Pegel für die 5. Harmonische in einem Mittelspannungsnetz

$$\begin{aligned} Z_{250}^1 = Z_{250}^2 = Z_{L,250}^1 + Z_{T,250}^1 + Z_{ÜN,250}^1 &= (1,0 + j(3,1 + 3 + 0,2)) \Omega \\ &= (1,0 + j6,3) \Omega \end{aligned} \quad (35)$$

Die Nullreaktanzen der Petersen-Spule und des Restnetzes sowie die Parallelimpedanz können ebenso aus der vorhergehenden Berechnung übernommen werden. Damit ergeben sich folgende Werte für die Nullimpedanz und die Gesamtimpedanz.

$$Z_{250}^0 = Z_{L,250}^0 + Z_{Par,250}^0 = (6,1 + j7,7) \Omega - j20,4 \Omega = (6,1 - j12,7) \Omega \quad (36)$$

$$Z_{250} = Z_{250}^1 + Z_{250}^2 + Z_{250}^0 = 2 \cdot (1,0 + j6,3) \Omega + (6,1 - j12,7) \Omega \approx 8,2 \Omega \quad (37)$$

Das Ergebnis der Gesamtimpedanz zeigt, dass beim Musternetz für die 5. Harmonische bei einer Fehlerentfernung von ca. 4,8 km eine Serienresonanz auftritt. Dies ist als kritisch einzustufen, da im Musternetz Leitungslängen bis 5 km auftreten und der Fall somit durchaus eintreten kann.

Nun kann der Betrag des Erdschlussstroms berechnet werden. Zum Vergleich wird anschließend auch für diese Konstellation noch einmal ein Orientierungswert mit der Formel (40) im Sinne von [9] abgeschätzt.

$$I_{o.Rü,250}^0 = \frac{U_{250}}{|Z_{250}|} = \frac{57,7 V}{8,2 \Omega} = 7,0 A \quad (38)$$

$$I_{F,250,o.Rü} = 3 \cdot I_{o.Rü,250}^0 = 3 \cdot 7,0 A = 21,0 A \quad (39)$$

$$I_{F\sim,250} = I_{CE} \cdot \frac{f_{250}}{f_{Netz}} \cdot p_{250} = 180 A \cdot 5 \cdot 0,01 = 9 A \quad (40)$$

Es zeigt sich, dass die Abschätzung des Oberschwingungserdschlussstromes im Resonanzfall mit dem tatsächlich berechneten Wert nicht mehr überein stimmt. Die Ursache dafür ist die im vorigen Abschnitt „Anspruchsicherheit (keine Unterfunktion)“ erwähnte Vernachlässigung der Induktivitäten.

Unter der Annahme gleich langer Abgänge teilt sich der Fehlerstrom entsprechend der Formel (25) auf, sodass jeder der „gesunden“ Abgänge folgenden Strom führt.

$$I_{Abg.-gesund} = \frac{I_{F,250,o.Rü}}{\#_{Abg.korr}} = \frac{21,0 A}{14,5} = 1,5 A \quad (41)$$

Wenn für diesen Fall eine Überfunktion (Erdschlussanzeige eines gesunden Abgangs) vermieden werden soll, so muss der Ansprechwert für alle Abgänge mindestens wie folgt eingestellt werden.

$$I_{An,250} \geq 2 \cdot I_{Abg.-gesund} = 2 \cdot 1,5 A = 3,0 A \quad (42)$$

Bestimmung des Ansprechwertes

Um der Forderung nach Ansprechsicherheit im Sinne von keiner Unterfunktion und keiner Überfunktion gerecht zu werden, ist aus den beiden vorhergehenden Betrachtungen „Ansprechsicherheit (keine Unterfunktion)“ und „Ansprechsicherheit (keine Überfunktion)“ abgeleiteten Forderungen der optimale Ansprechwert zu bestimmen.

$$I_{An,250} \leq 2,4 A \quad \text{und} \quad I_{An,250} \geq 3,0 A \quad (43)$$

Ein genauer Blick auf die Werte zeigt jedoch, dass es sich bei dieser Forderung um einen Widerspruch handelt. Es ist unmöglich einen Einstellwert zu finden, der ein zuverlässiges Ansprechen gewährleistet. Das amperemetrische Oberschwingungsverfahren ist für diese Konstellation somit nicht geeignet.

Wäre es möglich einen zuverlässigen Ansprechwert zu finden (z.B. bei anderen Netzparametern), so kann das Verfahren noch unter Berücksichtigung der maximal zu erwartenden Erdübergangswiderstände im Zuge einer Worst-Case-Berechnung für das entsprechende Netz untersucht werden. Grundsätzlich kann das Verfahren bei einer sehr großen Anzahl von Abgängen bzw. bei Oberschwingungspegeln, welche sich nur in engen Grenzen bewegen, bei sorgfältiger Prüfung aller Randbedingungen (minimale / maximale Ladeströme der einzelnen Kabel für alle möglichen Schaltzustände) eingesetzt werden.

5.1.2 SIN(Φ) - AUSWERTUNG

Um eine mögliche Implementierung des Oberschwingungsverfahrens zu prüfen, muss vor allem die Art der Auswertung berücksichtigt werden. Erfolgt diese durch frequenzselektive Richtungsrelais, so wird der Winkel zwischen der Verlagerungsspannung und dem Summenstrom

als Auswertungskriterium verwendet. Dabei sollte ein Mindestwert vorgegeben werden. Die Bedienungsanleitung eines marktüblichen Erdschlussortungsrelais schlägt für diesen Fall einen Orientierungswert von 15° vor [9]. Abbildung 28 zeigt die Möglichkeiten zur Parametrierung der Mindestwerte von Betrag und Winkel des Oberschwingungserdschlussstromes.

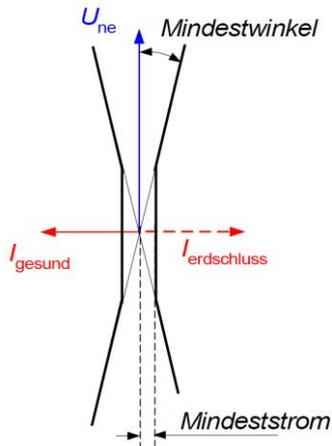


Abbildung 28: Einstellung der Auswertungskriterien beim Oberschwingungsverfahren [9]

Für die nachfolgende Berechnung werden die Annahmen aus dem Abschnitt „Anspruchsicherheit (keine Unterfunktion)“ des Kapitels 5.1.1 übernommen.

Da bei dieser Betrachtung auf das Relais (welches sich zwischen dem erdschlussbehafteten Abgang und der Sammelschiene befindet) Bezug genommen wird, werden hier ausschließlich die 14 „gesunden“ Abgänge berücksichtigt. Aus diesem Grund muss die Nullreaktanz des kapazitiven Restnetzes neu berechnet werden.

$$j X_{CE,250}^0 = j \frac{x'_{CE,50}}{l_{Ltg.} \cdot \#_{Abg.-gesund} \cdot n} = j \frac{-7074 \Omega km}{5 km \cdot 14 \cdot 5} = -j 20,2 \Omega \quad (44)$$

Ausgehend von den restlichen Werten des Abschnitts 5.1.1, „Anspruchsicherheit (keine Unterfunktion)“, ergibt sich, dass das Schutzrelais des fehlerbehafteten Abgangs die nachfolgende Parallelimpedanz „im Rücken sieht“.

$$\begin{aligned} Z_{Par,250}^0 &= \frac{1}{\frac{1}{R_{Pet}^0} + \frac{1}{j X_{Pet,250}^0} + \frac{1}{j X_{CE,250}^0}} = \frac{1}{\frac{1}{17,8 k\Omega} + \frac{1}{j 458,5 \Omega} + \frac{1}{-j 20,2 \Omega}} \\ &= 21,1 \Omega \cdot e^{-j 89,9^\circ} \end{aligned} \quad (45)$$

Bei der Berechnung des Relaisstromes über das ohmsche Gesetz kann für die Spannung in guter Näherung ein Winkel von 0° angenommen werden. Da sich zudem die oben berechnete

Parallelimpedanz im Nenner befindet, ergibt sich für den Winkel des Relaisstromes ein Wert von $+89,9^\circ$. Das eingangs erwähnte Winkelerfordernis von mindestens 15° kann in diesem Beispiel somit gut erfüllt werden.

Hinsichtlich der Minimalamplitude des Stromes wird auf die Berechnung für den amperemetrischen Schutz (Gleichung (30) in Kapitel 5.1.1) verwiesen, bei der ein Minimalpegel von 4,8 A bestimmt wurde. Dementsprechend muss eine sichere Winkelbestimmung, nach Berechnung (31) in Kapitel 5.1.1, ab einem Strom von 2,4 A erfolgen.

5.1.3 AMPEREMETRISCHES RELATIVVERFAHREN

Das amperemetrische Relativverfahren ist dahingehend zu prüfen, ob es schlecht konditioniert ist. Dies ist dann der Fall, wenn der Unterschied zwischen dem gesamten Fehlerstrom (welcher vom Relais des „kranken“ Abganges über die Sammelschiene in die Leitungskapazitäten der gesunden Abgänge fließt) und dem größten kapazitiven Strom eines „gesunden“ Abganges zu gering ist.

Im Musternetz fließt beispielsweise für einen Signalpegel von $p_{250} = 0,3\%$ im „kranken“ Abgang ein Oberschwingungssummenstrom von 4,8 A (Gleichung (30) in Kapitel 5.1.1) und in den „gesunden“ Abgängen (unter der Annahme gleich langer Abgänge) der nachfolgende Oberschwingungssummenstrom.

$$I_{Abg.-gesund} = \frac{I_{F,250,o.Rü}}{\#_{Abg.-gesund}} = \frac{4,8 \text{ A}}{14} = 0,34 \text{ A} \quad (46)$$

Nun sollte das Verhältnis zwischen dem Oberschwingungssummenstrom im Relais des „kranken“ Abganges und dem größten Oberschwingungssummenstrom im Relais des „gesunden“ Abganges mit dem größten kapazitiven Strombeitrag mit Formel (47) berechnet werden. Allerdings ergibt sich im vorliegenden Beispiel aufgrund der Annahme gleich langer Abgänge, laut obiger Formel wenig überraschend, ein Verhältnis von 14. In anderen Netzkonfigurationen wird es aber durchaus „gesunde“ Abgänge geben die einen viel größeren kapazitiven Strom beitragen, weshalb das Verhältnis überprüft werden sollte.

$$\frac{I_{F,250,o.Rü}}{I_{Abg.-gesund}} = \frac{4,8 \text{ A}}{0,34 \text{ A}} = 14 \quad (47)$$

Dieser Wert sollte für eine sichere Auswertung über 1,5 liegen. Damit ist die Forderung nach einer Selektivität erfüllt.

5.1.4 RESONANZKRITISCHE LEITUNGSLÄNGE

Wie in Kapitel 4.1 erläutert, kann das gelöschte Netz für hohe Frequenzen näherungsweise als isoliertes Netz angesehen werden. Abbildung 29 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild des Musternetzes für Oberschwingungen in den Symmetrischen Komponenten.

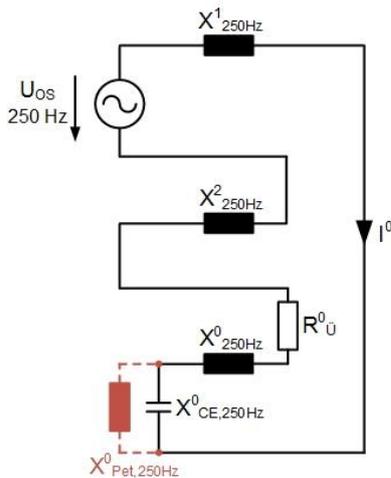


Abbildung 29: Oberschwingungsverfahren in den Symmetrischen Komponenten

Durch die Vernachlässigung der Nullreaktanz der Löschspule kann für die Resonanzbetrachtung von einer Serienschaltung der Reaktanzen ausgegangen werden. Daher kann die Resonanzbedingung bei vorzeichenrichtiger Berücksichtigung der induktiven und kapazitiven Blindwiderstände angeschrieben werden.

$$\sum_i X_i = 0 \tag{48}$$

Wie in den vorangegangenen Berechnungen gezeigt werden konnte, werden die Mit- und Gegenreaktanz vor allem vom Yd5-Transformator und der erdschlussbehafteten Leitung gebildet. Letztere ist auch hauptsächlich bestimmend für die induktive Nullreaktanz. Die kapazitive Nullreaktanz wird vom „gesunden“ Restnetz gebildet. Dementsprechend kann die Gleichung nach Formel (49) angeschrieben werden.

$$X^1_{T,250} + X^1_{L,250} + X^2_{T,250} + X^2_{L,250} + X^0_{L,250} - X^0_{CE,250} = 0 \tag{49}$$

$$2 \cdot (X^1_{T,250} + X^1_{L,250}) + X^0_{L,250} - X^0_{CE,250} = 0$$

Durch Einsetzen der Beziehungen und anschließender Umformung kann eine Formel für die resonanzkritische Leitungslänge angeschrieben werden.

$$2 \cdot \left(\frac{u_k \cdot U_N^2 \cdot n}{S_T} + l_{Res} \cdot x^{1'} \cdot n \right) + l_{Res} \cdot x^{0'} \cdot n - \frac{3 \cdot U_{Ph}}{I_{CE} \cdot n} = 0 \quad (50)$$

$$l_{Res} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_{CE} \cdot n} - \frac{u_k \cdot U_N^2 \cdot n}{S_T} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot x^{1'} + x^{0'}} \quad (51)$$

Mithilfe der Formel (51) kann für übliche Kabelkonstruktionen bzw. Freileitungen eine kritische Entfernung hinsichtlich des Auftretens von Resonanzen berechnet werden. Der induktive Nullreaktanzenbelag $x^{0'}$ kann wie bei den Impedanzen mithilfe des k_0 -Faktors mithilfe der nachfolgenden Formel berechnet werden.

$$x^{0'} = (3 \cdot k_0 + 1) \cdot x^{1'} \quad (52)$$

5.2 OS-VERFAHREN MIT TONFREQUENZ-RUNDSTEUERANLAGEN

Das Oberschwingungsverfahren mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen basiert auf dem im vorangegangenen Kapitel dargelegten Prinzip. Zusätzlich besteht bei der TRA der Vorteil des einstellbaren Signalpegels. Im Bereich dieser Anlagen gibt es viele verschiedene Signalfrequenzen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass mit der Höhe der Frequenz die Reichweite eingeschränkt wird, da bereits bei relativ kurzen Leitungslängen die Gefahr einer Serienresonanz besteht. Außerdem dämpfen die mit zunehmender Frequenz steigenden induktiven Reaktanzen (Transformator, Leitungen) den Summenstrom im Erdschlussfall stark. Aufgrund dieser beiden Phänomene ergeben sich, wie in Kapitel 5.1.1 gezeigt, große Probleme mit der Ansprechbarkeit.

In diesem Abschnitt wird eine Tonfrequenz-Rundsteueranlage mit einer exemplarischen Frequenz von 1014 Hz betrachtet. Dadurch ergibt sich die nachfolgende Ordnungszahl.

$$n = \frac{f_{TRA}}{f_{Netz}} = \frac{1014 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 20,3 \quad (53)$$

Gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1.4 kann für diese Frequenz und den Parametern des vorliegenden Musternetzes die resonanzkritische Leitungslänge berechnet werden.

$$l_{Res} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_{CE} \cdot n} - \frac{u_k \cdot U_N^2 \cdot n}{S_T} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot x^{1'} + x^{0'}} = -0,6 \text{ km} \quad (54)$$

Für das konzipierte Musternetz ergibt sich bei der angenommenen Frequenz für die resonanzkritische Leitungslänge ein auf den ersten Blick erklärungsbedürftiger Wert von -0,6 km, also eine negative resonanzkritische Leitungslänge.

Dieser negative Wert aufgrund der hohen Frequenz zeigt, dass bei zunehmender Fehlerentfernung im Gegensatz zum 250 Hz-Oberschwingungsverfahren der Pegel nicht erst in Richtung der Resonanzstelle ansteigt und dahinter abnimmt, sondern bereits ab der Sammelschiene stetig abnimmt. Unter dem Ergebnis könnte daher verstanden werden, dass sich die Resonanzstelle hinter der Sammelschiene, z.B. in der Transformatorwicklung, befindet.

Daher ist, je nach Kenndaten des Netzes und Frequenz der Rundsteueranlage, für den ungünstigsten Fall (maximale Leitungsimpedanz) zu prüfen, ob bei großen Leitungslängen noch ein ausreichend detektierbarer Pegel vorhanden ist. Ein zuverlässiger Ansprechwert kann in diesem Fall durch eine genauere Berechnung analog zu Kapitel 5.1 durchgeführt werden.

5.3 NATÜRLICHES WATTRESTSTROMVERFAHREN

Abbildung 30 zeigt das Prinzip des natürlichen Wattreststromverfahrens im Musternetz. Der ohmsche Verlustwiderstand der Petersen-Spule bildet die Kupfer- und Eisenwirkverluste ab und wird energietechnisch als Parallelwiderstand zur Induktivität berücksichtigt.

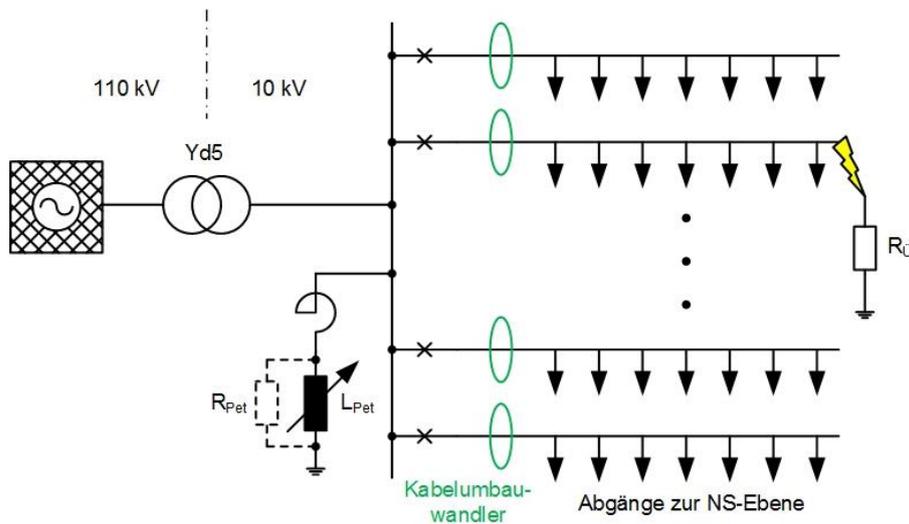


Abbildung 30: Natürliches Wattreststromverfahren im Musternetz

Die Anordnung kann in das Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten übergeführt werden (Abbildung 31). Von Interesse ist in diesem Fall der Wirkstrom der Anordnung, welcher nachfolgend berechnet wird.

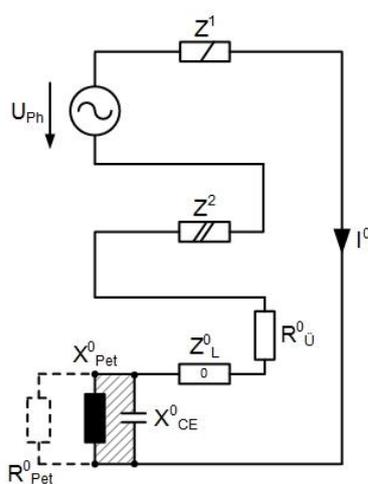


Abbildung 31: Natürliches Wattreststromverfahren in den Symmetrischen Komponenten

Zunächst können die Mit-, Gegen- und Nullimpedanz der erdschlussbehafteten Leitung, sowie mithilfe der Werte für den Transformator und das übergeordnete Netz aus Kapitel 3.5.1 die gesamte Mit- und Gegenimpedanz berechnet werden.

$$\mathbf{Z}_L^1 = \mathbf{Z}_L^2 = l_F \cdot (r'_L + j x'_L) = 5 \text{ km} \cdot (0,21 + j 0,13) \frac{\Omega}{\text{km}} = (1,1 + j 0,7) \Omega \quad (55)$$

$$\mathbf{Z}_L^0 = (3 \cdot \mathbf{k}_0 + 1) \cdot \mathbf{Z}_L^1 = (3 \cdot 0,7 \cdot e^{-j 30^\circ} + 1) \cdot (1,1 + j 0,7) \Omega = (3,8 + j 0,8) \Omega \quad (56)$$

$$\mathbf{Z}^1 = \mathbf{Z}^2 = \mathbf{Z}_L^1 + \mathbf{Z}_T^1 + \mathbf{Z}_{UN}^1 = (1,1 + j (0,7 + 0,6 + 0,03)) \Omega = (1,1 + j 1,3) \Omega \quad (57)$$

Nach der Berechnung der kapazitiven Reaktanz und der Parallelschaltung im Nullsystem können die Nullimpedanz und anschließend die Gesamtimpedanz bestimmt werden.

$$j X_{CE}^0 = \frac{U_{Ph}}{\mathbf{I}_{CE}^0} = 3 \cdot \frac{U_{Ph}}{I_{CE}} = 3 \cdot \frac{5774 \text{ V}}{j 180 \text{ A}} = -j 96,2 \Omega \quad (58)$$

$$\mathbf{Z}_{par}^0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{Pet}^0} + \frac{1}{j X_{Pet}^0} + \frac{1}{j X_{CE}^0}} = \frac{1}{\frac{1}{17,8 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{j 91,7 \Omega} + \frac{1}{-j 96,2 \Omega}} = (213,3 + j 1936,9) \Omega \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}^0 &= \mathbf{Z}_L^0 + \mathbf{Z}_{Par}^0 = (3,8 + j 0,8) \Omega + (213,3 + j 1936,9) \Omega \\ &= (217,1 + j 1937,7) \Omega \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{ges} &= \mathbf{Z}^1 + \mathbf{Z}^2 + \mathbf{Z}^0 = 2 \cdot (1,1 + j 1,3) \Omega + (217,1 + j 1937,7) \Omega \\ &= (219,3 + j 1940,3) \Omega \end{aligned} \quad (61)$$

Nun können, zunächst ohne Berücksichtigung des für das Musternetz angenommenen Erdübergangswiderstands, der komplexe Gesamtstrom der Ersatzschaltung und in weiterer Folge der natürliche Wattreststrom und der Betrag des induktiven Differenzstroms berechnet werden.

$$\mathbf{I}_{o.Rü}^0 = \frac{U_{Ph}}{\mathbf{Z}_{ges}} = \frac{5774 \text{ V}}{(219,3 + j 1940,3) \Omega} = (0,33 - j 2,94) \text{ A} \quad (62)$$

$$I_{W,nat,o.Rü} = \Re \{3 \cdot \mathbf{I}_{o.Rü}^0\} = \Re \{3 \cdot (0,33 - j 2,94) \text{ A}\} = 1 \text{ A} \quad (63)$$

$$I_{B-Diff,o.Rü} = |\Im \{3 \cdot \mathbf{I}_{o.Rü}^0\}| = |\Im \{3 \cdot (0,33 - j 2,94) \text{ A}\}| = 9 \text{ A} \quad (64)$$

Da der ohmsche Verlustwiderstand der Petersen-Spule viel größer als der für das Musternetz angenommene Erdübergangswiderstand (10Ω) ist, wirkt ersterer in der Ersatzschaltung hauptsächlich strombegrenzend und für die oben berechneten Ströme ergeben sich unter Berücksichtigung des Erdübergangswiderstands nur geringfügig veränderte Werte.

Die hier durchgeführte genaue Berechnung des natürlichen Wattrest- und des induktiven Differenzstroms erfordert einiges an Rechenaufwand. Für die Praxis gibt es die folgende, kürzere Vorgehensweise.

Ein Blick auf die genaue Berechnung zeigt, dass der Betrag der Teilspannung, die am Nullsystem und in der Folge (bei vernachlässigbarem Übergangswiderstand) am hochohmigen Verlustwiderstand der Löschspule anliegt, mit sehr guter Näherung im Bereich der Strangspannung des Netzes liegt. Aufgrund der Division durch den relativ großen Widerstand verursacht die vereinfachende Annahme, dass die Strangspannung an der Parallelschaltung des Nullsystems anliegt nur einen kleinen Fehler im Nachkommabereich. Die Spannungsabfälle an den Mit- und Gegenimpedanzen, sowie der Nullimpedanz der Leitung können in guter Näherung vernachlässigt werden.

$$I_{W,nat} = 3 \cdot I_{W,nat}^0 = 3 \cdot \frac{U_{Ph}}{R_{Pet}^0} = 3 \cdot \frac{5774 \text{ V}}{17,8 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ A} \quad (65)$$

Dies entspricht 1,7% des Wandler-Nennstromes im angenommenen Musternetz. Die, in Kapitel 4.3 beschriebenen, hohen Anforderungen an die Wandler hinsichtlich der Auswertung werden durch dieses Ergebnis bestätigt.

Die Einstellung der Petersen-Spule wird wie in Kapitel 3.5.1 beschrieben angenommen. Tritt nun ein Erdschluss auf, so können bei einer gegebenen Gesamtkabellänge der Beitrag des Netzes zum kapazitiven Erdschlussstrom und der Betrag des induktiven Differenzstromes berechnet werden.

$$I_{CE} = l_{ges.} \cdot I'_{CE} = 75 \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{A}}{\text{km}} = 180 \text{ A} \quad (66)$$

$$I_{B-Diff} = I_{Pet} - I_{CE} = 189 \text{ A} - 180 \text{ A} = 9 \text{ A} \quad (67)$$

Durch die Berechnung des Winkels zwischen dem induktiven Differenzstrom und dem Gesamtstrom und anschließender Darstellung in Abbildung 32 können die möglichen Auswertungsschwierigkeiten gut veranschaulicht werden.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,nat}}{I_{B-Diff}}\right) = \arctan\left(\frac{1 A}{9 A}\right) = 6,3^\circ \quad (68)$$

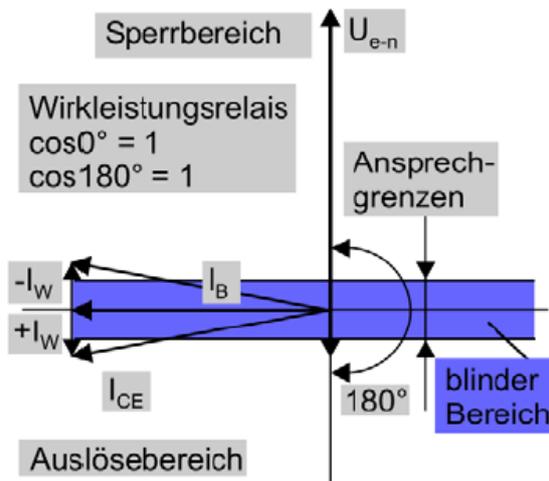


Abbildung 32: Winkelproblematik beim natürlichen Wattreststromverfahren [2]

Die beiden folgenden Unterkapitel zeigen, dass das Wattreststromverfahren in diesem Musternetz, wie in manchen realen Netzen, ohne zusätzliche Maßnahmen in der Praxis nicht zuverlässig funktionsfähig ist.

5.3.1 BERÜCKSICHTIGUNG DER KAPAZITÄT DES KRANKEN ABGANGES

Die vorangegangene Berechnung entspricht einer ersten Abschätzung. Aufgrund des für eine zuverlässige Auswertung knappen Ergebnisses ist eine genauere Betrachtung notwendig. Nachfolgend wird anhand eines Beispiels die Problematik des Blindstromanteils im Summenstrom am Einbauort des Relais^f bei Berücksichtigung der Kapazität des erdschlussbehafteten Abganges erläutert. Der Wirkstromanteil des Summenstromes wird nicht angeführt, da es sich um eine reine Blindstrombetrachtung handelt.

Abbildung 33 zeigt das Musternetz mit dem erdschlussbehafteten Abgang und der Lage des Erdschlussortungsrelais im Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten. Hierbei werden die Impedanzen des Mit- und Gegensystems vernachlässigt, da für den resultierenden Summenstrom vor allem das Nullsystem maßgeblich ist. Damit fällt auch der Faktor 3 zwischen Null- und Phasengrößen weg.

^f Im Allgemeinen wird das Relais in unmittelbarer Nähe der Sammelschiene im Umspannwerk eingebaut

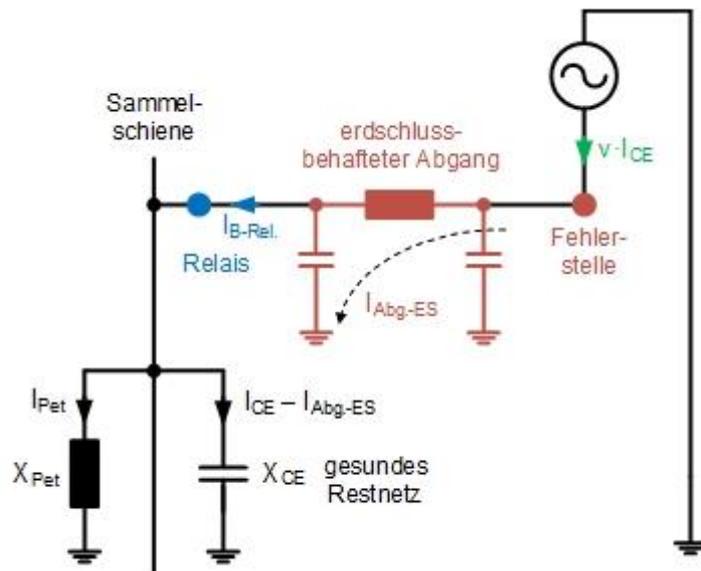


Abbildung 33: Relais und fehlerbehafteter Abgang in den Symmetrischen Komponenten

In den meisten Fällen stimmt die Messstelle des Relais nicht mit der Fehlerstelle überein, zumal Erdschlüsse prinzipiell überall im Netz auftreten können. Es ist gut ersichtlich, dass ein Teil des Fehlerstromes über die Kapazität des erdschlussbehafteten Abgangs gegen Erde abfließt. Dieses Verhalten kann anhand von Abbildung 33 mathematisch formuliert werden.

$$v \cdot I_{CE} = I_{Abg.-ES} + I_{B-Rel.} \tag{69}$$

Durch Einsetzen der Beziehung für die Verstimmung kann die resultierende Formel (70) auf den Strom, den das Relais misst⁹, umgeformt werden. Zur Vereinfachung werden von diesen rein imaginären Strömen in weiterer Folge die Beträge gebildet, wobei induktive und kapazitive Ströme vorzeichenrichtig^h berücksichtigt werden. Da gelöschte Netze in der Praxis überkompensiert betrieben werden, wird diese Betriebsart hier ebenso angenommen. Es gilt also die Beziehung $|I_{Pet}| > |I_{CE}|$. Das bedeutet, dass die vorzeichenrichtige Summe dieser beiden Ströme und damit auch der Strom am Relais negativ, also induktiv sind.

$$I_{Pet} + I_{CE} = I_{Abg.-ES} + I_{B-Rel.} \tag{70}$$

$$j \underbrace{I_{B-Rel.}}_{<0} = j \underbrace{I_{Pet}}_{<0} + j \underbrace{I_{CE}}_{>0} - j \underbrace{I_{Abg.-ES}}_{>0} \tag{71}$$

⁹ In der Realität misst das Relais den Strom nicht direkt, sondern über einen Stromwandler

^h Siehe geschwungene Klammern in Formel (71)

Formel (72) zeigt die mit vorzeichenrichtigen Beträgen angeschriebene Gleichung. Aus praktischen Gründen wird diese noch mit dem Faktor (-1) multipliziert und in Formel (73) intuitiv zusammengefasst.

$$-|I_{B-Rel.}| = -|I_{Pet}| + |I_{CE}| - |I_{Abg.-ES}| \quad (72)$$

$$I_{B-Rel.} = I_{Pet} - (I_{CE} - I_{Abg.-ES}) \quad (73)$$

Daraus lässt sich allgemein ableiten, dass in einem überkompensierten Netz im Erdschlussfall die Kapazität des fehlerbehafteten Abgangs in die Messung des Relais eingeht und daher bei der Dimensionierung dieses Erdschlussortungsverfahrens berücksichtigt werden sollte. Bei der Überkompensation ist der Term $|I_{Pet}| - |I_{CE}|$ stets positiv und der induktive Blindstromanteil im Summenstrom am Relaiseinbauort steigt bei größer werdenden Abgangskapazitäten stets an. Dadurch verschlechtert sich die Ausgangssituation für die Winkelmessung bei einem wattmetrischen Erdschlussortungsverfahren.

Angewendet auf das Musternetz ergibt sich die folgende Situation.

$$I_{Abg.-ES} = l_F \cdot I'_{CE} = 5 \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{A}}{\text{km}} = 12 \text{ A} \quad (74)$$

$$I_{B-Rel.} = I_{Pet} + I_{CE} - I_{Abg.-ES} = -j189 \text{ A} + j180 \text{ A} - j12 \text{ A} = -j21 \text{ A} \quad (75)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,nat}}{I_{B-Rel.}}\right) = \arctan\left(\frac{1 \text{ A}}{21 \text{ A}}\right) = 2,7^\circ \quad (76)$$

Ein Vergleich mit dem Ergebnis aus Kapitel 5.3 zeigt, dass der Winkel stark verringert wurde. In Anbetracht der Ansprechgrenzen (Abbildung 32) bringt dies eine Verschlechterung für die Erdschlussortung. Das gilt besonders dann, wenn durch gewollte Schaltmaßnahmen („Erdschlusssuche“ nach dem „Trial-and-Error-Verfahren“) oder nach einer Auslösung aufgrund eines Doppelerdschlusses die Restnetzkapazität massiv verringert wurde (siehe auch Kapitel 5.3.2 bzw. Kapitel 5.3.3). Dieses Prinzip gilt für das Musternetz genauso, wie für jedes andere gelöschte Netz, in dem ein wattmetrisches Verfahren mit Relais an der Sammelschiene zum Einsatz kommt.

Zwar kann eine Segmentierung der Schutzstrecke durch den Einsatz mehrerer Stromwandler an einem Abgang hinsichtlich der Auswertung unter Umständen gewisse Erleichterungen bewirken, da durch diese Maßnahme in vielen Fällen die Entfernung zwischen der Messstelle und der Fehlerstelle verringert wird, jedoch sind damit auch höhere Ausgaben für die dazu erforderliche technische Ausrüstung notwendig. Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, verbessern

sich die Winkelbedingungen beim wattmetrischen Verfahren in der Tiefe des Abgangs geringfügig. [13]

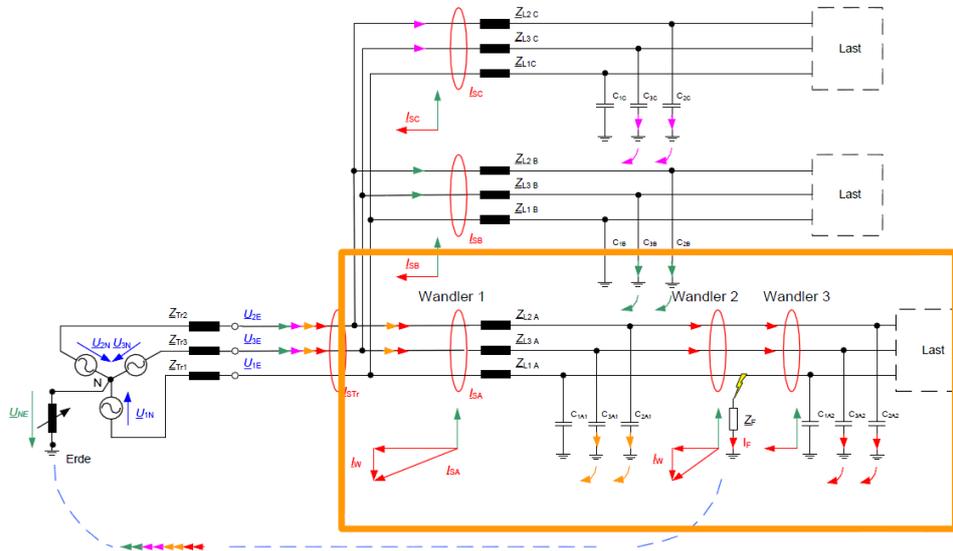


Abbildung 34: Verbesserte Winkelbedingungen durch Teilung der Schutzstrecke [13]

Allerdings weisen viele der in der Praxis eingesetzten Stromwandler hinsichtlich des Strombetrags nur eine Genauigkeit von 3% des Nennstromes auf und die Winkelgenauigkeit ist sogar oftmals nicht definiert [13]. Hinzu kommt, dass das Erdschlussortungsrelais bezüglich der Empfindlichkeitseinstellungen nicht auf der untersten Stufe (höchste Empfindlichkeit) betrieben werden sollte. Manche Erdschlussortungsrelais bieten die Einstellung eines Mindestwinkels an, um eventuell auftretende Fehlwinkel durch Wandler zu kompensieren [9]. Anhand dieser Gründe ist die Forderung nach einem größeren Winkel zur eindeutigeren Entscheidung beim Wattreststromverfahren eine logische Folge. Um konkretere Auswertungen zu ermöglichen erscheint, wie bereits in Kapitel 4 erläutert, deshalb die Maßnahme der Wattreststromerhöhung sinnvoll (siehe Kapitel 5.4).

5.3.2 EINFLUSS DURCH SCHALTZUSTANDSÄNDERUNGEN

Ein weiterer beachtenswerter Faktor im Netzbetrieb sind Schaltzustandsänderungen. Die Ursachen dafür können geplanter (z.B. Wartungsarbeiten) oder ungeplanter (z.B. Abschaltung nach einem Fehler) Art sein. Das folgende Beispiel verdeutlicht die auftretenden Probleme des natürlichen Wattreststromverfahrens bei Änderungen der Kabellängen im versorgten Gebiet. Es wird angenommen, dass eine Kabelstrecke (5 km) des Musternetzes abgeschaltet ist. Bei Auftreten eines Erdschlusses muss, aufgrund der veränderten Gesamtkabelkapazität, der neue Beitrag des Restnetzes zum kapazitiven Erdschlussstrom berechnet werden.

$$I_{CE,neu} = l_{neu} \cdot I'_{CE} = (75 - 5) \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{A}}{\text{km}} = 168 \text{ A} \quad (77)$$

Der erdschlussbehaftete Abgang wird ebenfalls mit einer Länge von 5 km angenommen und der dazugehörige kapazitive Strombetrag ist bereits berechnet worden. Gemäß Kapitel 5.3.1 kann nun noch der erdschlussbehaftete Abgang berücksichtigt werden.

$$I_{B-Rel.} = I_{Pet} - (I_{CE,neu} - I_{Abg.-ES}) = 189 \text{ A} - (168 \text{ A} - 12 \text{ A}) = 33 \text{ A} \quad (78)$$

Der natürliche Wattreststrom bleibt unverändert, dadurch kann der neue Winkel ermittelt werden.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,nat}}{I_{B-Rel.}}\right) = \arctan\left(\frac{1 \text{ A}}{33 \text{ A}}\right) = 1,7^\circ \quad (79)$$

Es ergibt sich also eine weitere Winkelreduktion durch den veränderten Schaltzustand. Die Auswertung ist dadurch praktisch nicht mehr möglich.

5.3.3 AUSWIRKUNGEN VON FEHLSCHALTUNGEN

Die folgende Überlegung veranschaulicht, wie wichtig eine eindeutige Identifizierung des erdschlussbehafteten Abgangs ist.

Die Erkenntnisse aus Kapitel 5.3.2 zeigen, dass durch die Abschaltung eines „gesunden“ Abgangs im Vorfeld des Fehlers der kapazitive Erdschlussstrom verringert wird und dadurch ein erhöhter induktiver Strom auftritt. Die unerwünschte Abschaltung eines nicht-erdschlussbehafteten Abgangs während eines Erdschlusses bewirkt im Prinzip dasselbe, wodurch ein plötzlicher Stromstoß in der Höhe des Strombeitrags des abgeschalteten Abgangs auftritt. Speziell bei langen Abgängen stellt dies eine beträchtliche zusätzliche Belastung dar und sollte auf jeden Fall vermieden werden. Unerwünschte Abschaltungen können aus folgenden Ursachen vorkommen:

- Fehlauslösungen durch das Schutzsystem
- Fehlschaltungen durch Irrtum
- Suchschaltungen aufgrund von verwirrenden Anzeigen

Diese Ursachen sollten durch eine korrekte Auslegung des Schutzsystems vermieden werden.

5.4 WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Um den in Kapitel 5.3 aufgezeigten Auswertungsproblemen beim natürlichen Wattreststromverfahren beizukommen bietet sich die Erhöhung des Wattreststroms in den folgenden zwei Varianten an:

- Klassische Wattreststromerhöhung
- Wattmetrische KNOSPE

5.4.1 KLASSISCHE WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Die Realisierung der Wattreststromerhöhung im Musternetz nach dem klassischen Verfahren wird in Abbildung 35 dargestellt. Aufgrund der Implementierung des Widerstands über die Hilfswicklung der Löschspule ist bei der Dimensionierung zu beachten, dass der Betrag der Wirkstromerhöhung durch die maximale Belastbarkeit der Hilfswicklung begrenzt ist.

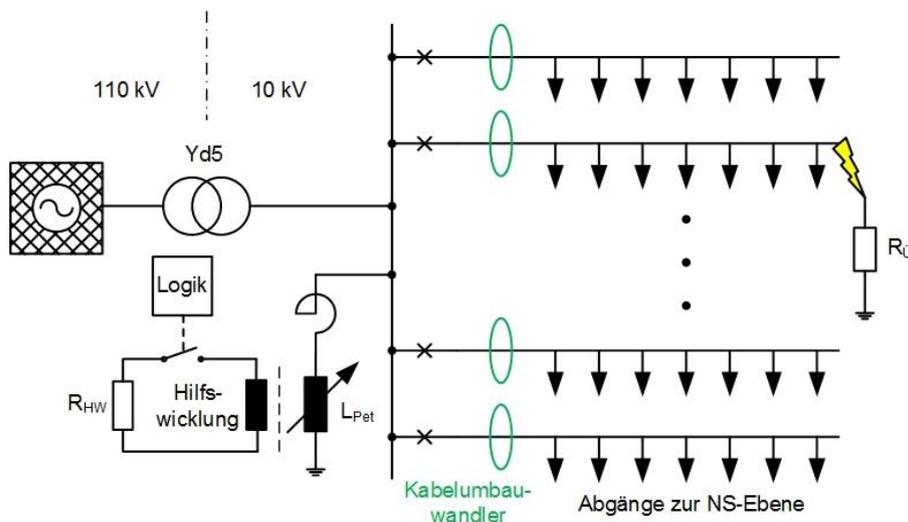


Abbildung 35: Wattreststromerhöhung im Musternetz

Für die Berechnung ist es zweckmäßig die Anordnung mithilfe der Symmetrischen Komponenten darzustellen (Abbildung 36). Die genaue Berechnung des Gesamtstroms und anschließende Ermittlung des Wirk- und des Blindstromes kann ähnlich wie in Kapitel 5.3 durchgeführt werden. Ähnlich wie dort können die Größen aber auch in ausreichender Genauigkeit mit der kürzeren Vorgehensweise ermittelt werden.

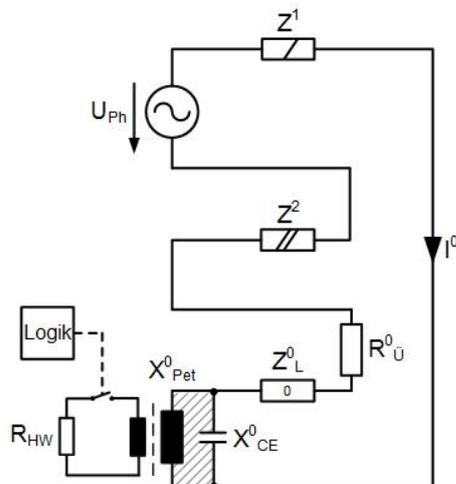


Abbildung 36: ESB der Wattreststromerhöhung in Symmetrischen Komponenten

Ausgangspunkt für die Dimensionierung ist der normale Schaltzustand des Netzes unter Berücksichtigung der Kapazität des erdschlussbehafteten Abgangs, da das Netz im überwiegenden Teil der Zeit in dieser Konfiguration vorliegt. Als Ansatz dient z.B. eine bestimmte Forderung für die Größe des Winkels φ , bei dem in Kapitel 5.3 ermittelten induktiven Differenzstrom am Relais. Exemplarisch wird im folgenden Rechenbeispiel ein Winkel von 16° angesetzt, welcher – wie weiter unten gezeigt wird – der maximalen Stromauslastung der Hilfswicklung entspricht. Danach wird der dafür benötigte Wattreststrom bestimmt.

$$I_{W,erh} = I_{B-Rel.} \cdot \tan(\varphi_{erh}) = 21 \text{ A} \cdot \tan(16^\circ) = 6 \text{ A} \quad (80)$$

$$I_{W-zus.prim} = I_{W,erh} - I_{W,nat} = 6 \text{ A} - 1 \text{ A} = 5 \text{ A} \quad (81)$$

Bei dieser Einstellung des Löschspulenstromes wird für die Spannung an der Hilfswicklung ein Praxiswert von 506 V angenommen. Über das Übersetzungsverhältnis zwischen Petersenspule und Hilfswicklung können der für diesen zusätzlich benötigten Wirkstrom erforderliche ohmsche Widerstand und in weiterer Folge die umgesetzte Leistung ermittelt werden.

$$I_{W-zus,HW} = \ddot{u} \cdot I_{W-zus.prim} = \frac{5774 \text{ V}}{506 \text{ V}} \cdot 5 \text{ A} = 57,1 \text{ A} \quad (82)$$

$$R_{HW} = \frac{U_{HW}}{I_{W-zus,HW}} = \frac{506 \text{ V}}{57,1 \text{ A}} = 8,9 \Omega \quad (83)$$

$$P_{W,erh} = U_{HW} \cdot I_{W-zus,HW} = 506 \text{ V} \cdot 57,1 \text{ A} = 28,9 \text{ kW} \quad (84)$$

Sowohl die Hilfswicklung der Löschspule als auch der ohmsche Widerstand zur Wattreststromerhöhung müssen demzufolge einer Belastung von 30 kW standhalten können. Je nach Zeitsteuerung (dauernde Parallelschaltung oder zeitbegrenzte Zuschaltung für z.B. 1 s) ist die thermische Leistungsfähigkeit des Ortungszusatzes zu beachten. Auf diese Weise kann unter Berücksichtigung der erlaubten Belastung der Hilfswicklung der mithilfe der Wattreststromerhöhung maximal erreichbare Winkel ermittelt werden.

Einfluss durch Schaltzustandsänderungen

Bei einem Vergleich des Beispiels aus Kapitel 5.3.2 mit der durch die Wattreststromerhöhung gewonnenen Winkelreserve wird für den Fall einer bereits erfolgten Schaltzustandsänderung der Vorteil dieser Methode deutlich.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,erh}}{I_{B-Rel.}}\right) = \arctan\left(\frac{6 A}{33 A}\right) = 10,3^\circ \quad (85)$$

Der Winkel zwischen dem induktiven Differenzstrom und dem Gesamtstrom wird durch die abgeschaltete Kabelstrecke zwar ebenso verkleinert, verglichen mit der Winkelreduktion beim natürlichen Wattreststromverfahren ergibt sich hier für die Auswertung allerdings ein um Faktor 6 größerer Winkel.

Es zeigt sich, dass dieses Verfahren im Zuge der Planung konkret auf das jeweils vorliegende Netz und die möglicherweise auftretenden Besonderheiten, wie z.B. maximal zu erwartender induktiver Zusatzstrom am Relais durch Schaltzustandsänderungen, dimensioniert werden muss. Dabei sollten auf jeden Fall auch die Randwerte und die Toleranzen der Wandler sowie der Relais berücksichtigt werden.

Lösungstechnologien

Sind in naher Zukunft Änderungen der Verstimmung (z.B. aufgrund eines Netzausbaues) oder öfter vorkommende Schaltzustandsänderungen (z.B. im Zuge von Wartungsarbeiten) zu erwarten, so kann es vorkommen, dass die Wattreststromerhöhung durch den für das ursprüngliche Netz dimensionierten Widerstand unter Umständen nicht mehr ausreicht. Abhilfe könnte in diesem Fall die Technologie der automatischen Widerstandseinschaltung gemäß [14] bieten. Dabei kann der parallel zur Hilfswicklung geschaltete Widerstand in Stufen verändert und damit an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden.

5.4.2 WATTMETRISCHE KNOSPE

Das Verfahren der Wattmetrischen KNOSPE (siehe Abbildung 37) arbeitet analog zur klassischen Wattreststromerhöhung, liefert aber aufgrund der stärkeren Belastbarkeit eine größere Winkelreserve.

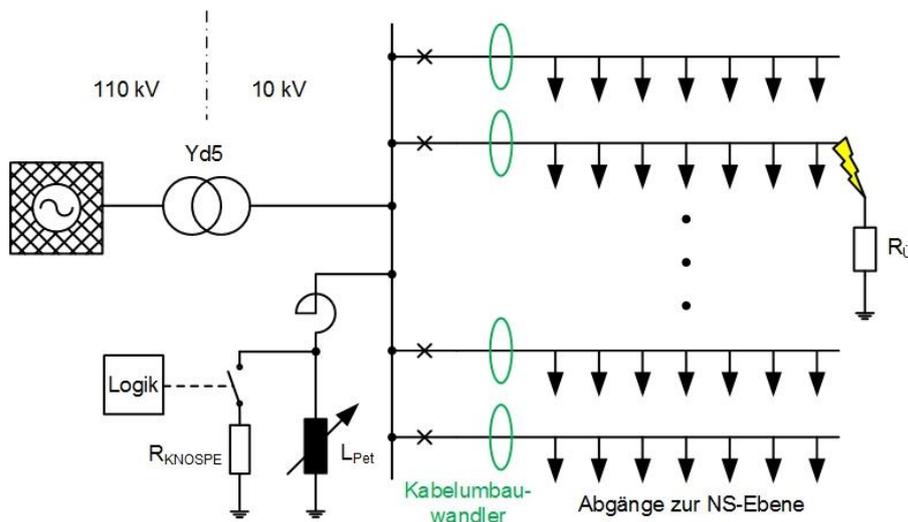


Abbildung 37: Prinzip der Wattmetrischen KNOSPE

So wird beispielsweise bei einem Widerstand von $R_{KNOSPE} = 100 \Omega$ der resultierende Wirkstrom wie folgt abgeschätzt.

$$I_{KNOSPE} = \frac{U_{Ph}}{R_{KNOSPE}} = \frac{5774 \text{ V}}{100 \Omega} = 57,7 \text{ A} \quad (86)$$

Dadurch kann der Winkel zwischen dem tatsächlichen Summenstrom am Relaisbauort und einem reinen Blindstrom (φ) gemäß Gleichung (85) bestimmt werden. Als Annahme dient hierbei der Grundschaltzustand in Kapitel 5.3.1 mit einem induktiven Relaisstrom von 21 A.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,erh}}{I_{B-Rel.}}\right) = \arctan\left(\frac{57,7 \text{ A}}{21 \text{ A}}\right) = 70^\circ \quad (87)$$

Dieses Ergebnis entspricht einer guten Ausgangssituation für die wattmetrische Auswertung. Selbst wenn eine Schaltzustandsänderung (wie in Kapitel 5.3.2) mit einem induktiven Relaisstrom von 33 A angenommen wird, ergibt sich noch immer die nachfolgende Winkelreserve.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_{W,erh}}{I_{B-Rel.}}\right) = \arctan\left(\frac{57,7 \text{ A}}{33 \text{ A}}\right) = 60,2^\circ \quad (88)$$

5.5 AMPEREMETRISCHE KNOSPE

Wie bereits in Kapitel 4.5 dargelegt, erfolgt die Auswertung bei diesem Verfahren amperemetratisch. Im Anschluss wird zunächst die Dimensionierung der amperemetrischen KNOSPE behandelt. Danach erfolgt eine Betrachtung des Überstromverhaltens der Stromwandler bei der Anwendung der amperemetrischen KNOSPE.

5.5.1 DIMENSIONIERUNG

Ist an der Petersen-Spule keine Hilfswicklung vorhanden oder genügt die maximale Belastbarkeit der Hilfswicklung nicht für eine ausreichende Erhöhung des Wirkstromes, so muss eine stärkere Wirkstromerhöhung durch die direkte Parallelschaltung eines niederohmigen Widerstandes zur Löschkspule realisiert werden. Abbildung 38 zeigt die Umsetzung der amperemetrischen KNOSPE im Musternetz.

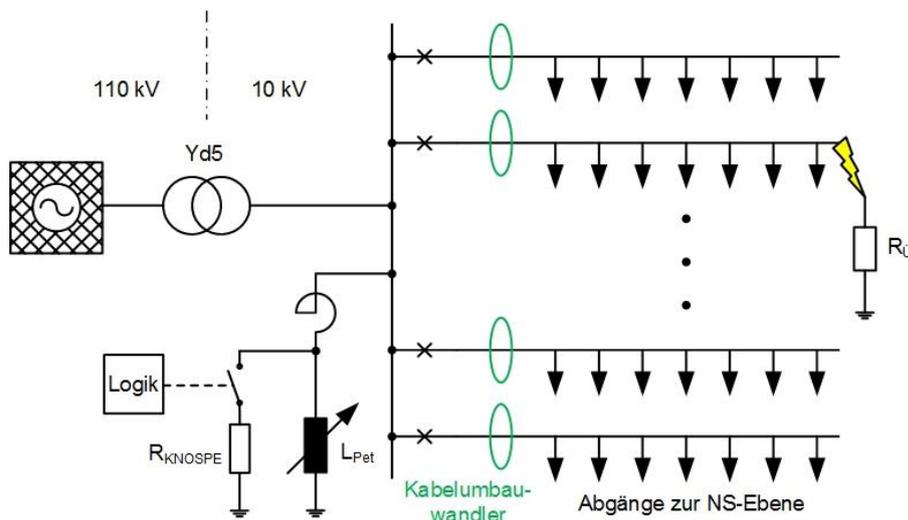


Abbildung 38: KNOSPE im Musternetz

Zur Erlangung eines Richtwertes für die Auslegung der amperemetrischen KNOSPE, werden in einem ersten Schritt die Grenzen für den Anregerwert des Relais betrachtet. Um Fehlauflö-

sungen (nicht-erdschlussbehafteter Abgang wird abgeschaltet) und Schutzversager (fehlerbehafteter Abgang wird nicht erkannt) zu vermeiden, werden die Randwerte des Anregestroms im Zuge einer Worst-Case-Betrachtung abgeschätzt.

Für den unteren Orientierungswert, den maximalen Störpegel, wird angenommen, dass zwei Abgänge des Musternetzes zusammengeschaltet sind und gleichzeitig auf einem anderen Abgang ein Erdschluss auftritt. Der Beitrag des langen Abgangs (7,5 km) zum kapazitiven Erdschlussstrom kann mit der bereits bekannten Formel berechnet werden.

$$I_{CE-Abg.max.} = l_{Abg.max.} \cdot I'_{CE} = 7,5 \text{ km} \cdot 2,4 \frac{\text{A}}{\text{km}} = 18 \text{ A} \quad (89)$$

Im Sinne einer ausreichend großen Reserve wird zwischen dem unteren Orientierungswert und dem Anregewert, sowie zwischen dem Anregewert und dem oberen Randwert jeweils ein Abstand von Faktor 2 gewählt und damit der minimale Fehlerstrom als Designwert bestimmt.

$$\text{max. Störpegel} < \text{Anregewert} < \text{min. Nutzsinal}$$

$$2 \cdot I_{CE-Abg.max.} < I_{An} < I_{Fehler,min.} \quad (90)$$

$$36 \text{ A} < I_{An} < 144 \text{ A}$$

Ein Wert aus der Mitte dieses Intervalls, z.B. 100 A, wird als Einstellwert für das Erdschlussortungsrelais gewählt. Anstelle eines „Bottom-Up-Ansatzes“, bei dem für einen maximalen Erdübergangswiderstand und eine maximale Länge bis zur Fehlerstelle ein minimaler Ortungsstrom gefordert wird, wird für den gewünschten Fehlerstrom ein typischer Erfahrungswert eingesetzt, in diesem Fall 300 A, und anschließend durch eine Berechnung anhand des Ersatzschaltbildes der Symmetrischen Komponenten die Funktionalität getestet. Die Dimensionierung des Sternpunktwidestands kann für einen ersten Orientierungswert wie bereits in den beiden vorhergehenden Kapiteln mithilfe der kürzeren Vorgehensweise unter Verwendung der Strangspannung erfolgen.

$$R_{KNOSPE}^0 = 3 \cdot \frac{U_{Ph}}{I_{KNOSPE}} = 3 \cdot \frac{5774 \text{ V}}{300 \text{ A}} = 57,7 \Omega \quad (91)$$

Hinsichtlich der Wahl des Sternpunktwidestands muss geprüft werden, ob dieser zu groß dimensioniert wurde und sich damit möglicherweise ein zu geringer Ortungsstrom einstellt, was Anrege- und Auslöseprobleme zur Folge hat.

Ein zu kleiner Sternpunktwiderstand kann sehr große Ortungsströme verursachen und, wie bereits im Theoriekapitel erwähnt, zu Schwierigkeiten hinsichtlich zu hoher Berührungs- und Schrittspannungen führen.

Da der maximale Fehlerstrom bei der KNOSPE durch die auftretenden Impedanzen (Leitungsimpedanzen, Nullreaktanz des Restnetzes, Erdübergangswiderstand), welche je nach Erdschlussbedingungen variieren, noch verringert wird, macht diese Annahme durchaus Sinn.

Nun wird mithilfe des Ersatzschaltbildes der Symmetrischen Komponenten (Abbildung 39) der Gesamtstrom für zwei Fälle, also mit und ohne Berücksichtigung des Erdübergangswiderstands, berechnet. Dabei wird die Länge des erdschlussbehafteten Abgangs wie in den vorhergehenden Kapiteln angenommen.

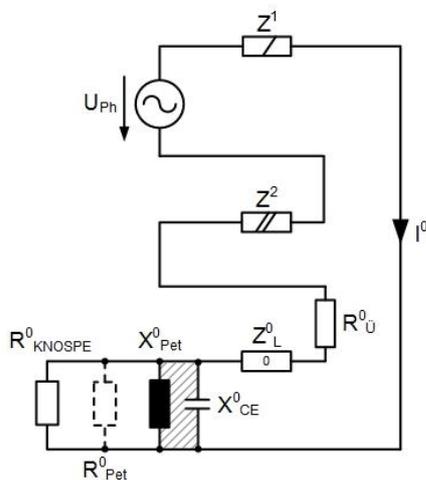


Abbildung 39: Ersatzschaltbild der KNOSPE in Symmetrischen Komponenten

Mit den bereits aus Kapitel 5.3 bekannten Werten können die Impedanz der Parallelschaltung des Nullsystems, die Null- und die Gesamtimpedanz bestimmt werden.

$$\mathbf{Z}_{par}^0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{KNOSPE}^0} + \frac{1}{R_{Pet}^0} + \frac{1}{jX_{Pet}^0} + \frac{1}{Z_{CE}^0}} = \frac{1}{\frac{1}{57,7 \Omega} + \frac{1}{17,8 k\Omega} + \frac{1}{j 91,7 \Omega} + \frac{1}{-j 96,2 \Omega}} \quad (92)$$

$$= (57,5 + j 1,7) \Omega$$

$$\mathbf{Z}^0 = \mathbf{Z}_L^0 + \mathbf{Z}_{par}^0 = (3,8 + j 0,8) \Omega + (57,5 + j 1,7) \Omega = (61,3 + j 2,5) \Omega \quad (93)$$

$$\mathbf{Z}_{ges} = \mathbf{Z}^1 + \mathbf{Z}^2 + \mathbf{Z}^0 = 2 \cdot (1,1 + j 1,3) \Omega + (61,3 + j 2,5) \Omega = (63,5 + j 5,1) \Omega \quad (94)$$

Berechnung des Gesamtstromes ohne Berücksichtigung des Erdübergangswiderstands.

$$I_{o.R\ddot{u}}^0 = \frac{U_{Ph}}{Z_{ges}} = \frac{5574 \text{ V}}{(63,5 + j 5,1) \Omega} = (90,3 - j 7,3) \text{ A} \quad (95)$$

$$I_{F,o.R\ddot{u}} = 3 \cdot I_{o.R\ddot{u}}^0 = 3 \cdot (90,3 - j 7,3) \text{ A} = (270,9 - j 21,9) \text{ A} = 271,8 \text{ A} \cdot e^{-j 4,6^\circ} \quad (96)$$

Das Ergebnis zeigt, dass bei vernachlässigtem Erdübergangswiderstand im Erdschlussfall der durch den Sternpunktwiderstand eingestellte Strom nur wenig gedämpft wird.

Berechnung des Gesamtstromes mit Berücksichtigung eines Erdübergangswiderstands von 10Ω .

$$I_{m.R\ddot{u}}^0 = \frac{U_{Ph}}{Z_{ges} + R_{\ddot{u}}^0} = \frac{5574 \text{ V}}{(63,5 + j 5,1) \Omega + 30 \Omega} = (61,6 - j 3,4) \text{ A} \quad (97)$$

$$I_{F,m.R\ddot{u}} = 3 \cdot I_{m.R\ddot{u}}^0 = 3 \cdot (61,6 - j 3,4) \text{ A} = (184,8 - j 10,2) \text{ A} = 185,1 \text{ A} \cdot e^{-j 3,2^\circ} \quad (98)$$

Ein Vergleich der beiden Ströme im Erdschlussfall veranschaulicht den großen Einfluss des für das Musternetz angenommenen Erdübergangswiderstands.

$$\Delta I = I_{F,m.R\ddot{u}} - I_{F,o.R\ddot{u}} = 271,8 \text{ A} - 185,1 \text{ A} = 86,7 \text{ A} \quad (99)$$

Der Ortungsstrom liegt in diesem Fall zwar über dem, am Beginn dieses Kapitels festgelegten, Anregerwert des Erdschlussortungsrelais, jedoch wurde der Strom von einem 10Ω -Erdübergangswiderstand bereits stark verringert (in diesem Beispiel um fast 90 A).

Außerdem hat der Erdübergangswiderstand bei der KNOSPE im Vergleich zum Wattreststromverfahren in Kapitel 5.3 einen wesentlich größeren Einfluss, da der Wert des strombegrenzenden Sternpunktwiderstands hier in einer ähnlichen Größenordnung wie der angenommene Erdübergangswiderstand liegt. Dieses Ergebnis bestätigt die Wahl des, verglichen mit der Wattreststromerhöhung, relativ großen Stromes bei der KNOSPE, da der Erdübergangswiderstand in der Praxis noch zusätzlich variieren kann.

Die Zuschaltung im Erdschlussfall erfolgt mithilfe einer Steuerungslogik. Der Sternpunktwiderstand muss dabei für folgende Leistung ausgelegt werden.

$$P_{KNOSPE} = U_{Ph} \cdot I_{KNOSPE} = 5774 \text{ V} \cdot 300 \text{ A} \approx 1,8 \text{ MW} \quad (100)$$

Die Dauer der Zuschaltung hängt von der gewählten Schutzstrategie ab. Soll der Netzbetrieb im Erdschlussfall aufrechterhalten werden und die Schutzeinrichtungen nur anregen, so reicht eine entsprechend kurze Zuschaltdauer, von z.B. 0,15 s, aus. Ist im Fehlerfall eine sofortige Abschaltung des entsprechenden Abschnitts erwünscht, so muss der Sternpunktwiderstand länger, z.B. 0,8 s, zugeschalten bleiben. Aufgrund der umgesetzten Leistung ist die Zuschaltdauer auf jeden Fall zeitlich begrenzt.

Hinweis: Bezüglich Nachschaltungen ist auf die Gesamterwärmung abzustellen, und es wird empfohlen, einen Thermoschutz einzubauen.

5.5.2 ÜBERSTROMVERHALTEN DER STROMWANDLER

Die Auswertung des großen Ortungsstromes der KNOSPE durch das Relais erfordert den Einsatz von Stromwandlern. Konventionelle Stromwandler sind, wie in Abbildung 40 zu sehen, grundsätzlich Transformatoren und dementsprechend mit einem Eisenkern aufgebaut. Im vorliegenden Musternetz wird von einem primären Nennstrom von 60 A ausgegangen. Da die KNOSPE mit einem Ortungsstrom von 300 A dimensioniert wird, muss der Stromwandler auf sein Sättigungsverhalten bei diesem Überstrom untersucht werden.

Gelangt der Wandler in Sättigung, so tritt eine sehr große Stromaufnahme im Magnetisierungs-kreis auf und der übersetzte Strom auf der Sekundärseite kann nicht mehr als Referenz für den primärseitigen Strom herangezogen werden. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Fall die Nennüberstromziffer, also „jenes Vielfache des primären Nennstromes, bei welchem mit Nenn-bürde der Stromfehler -5% bzw. -10% beträgt“ [5]. Die Ursache für den Stromfehler des Wandlers ist die Sättigung der Hauptinduktivität (X_m in Abbildung 40) [5].

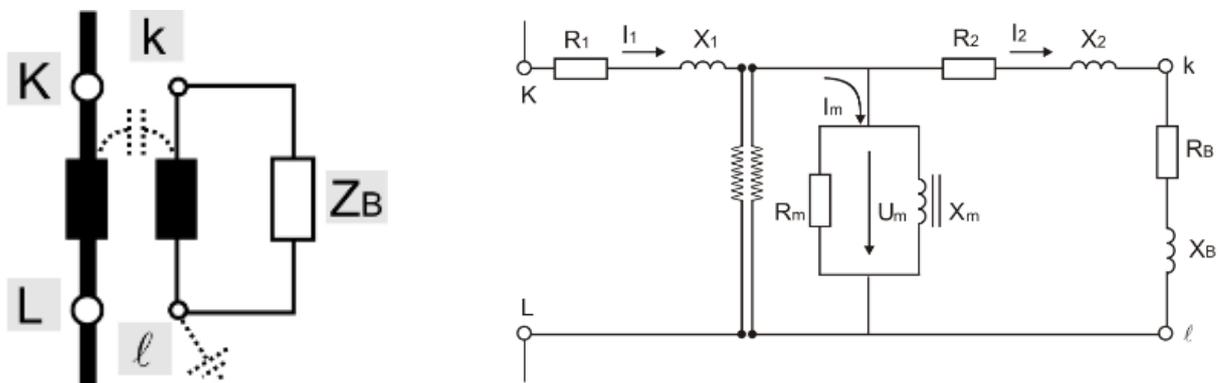


Abbildung 40: Konventioneller Stromwandler mit Ersatzschaltbild [5]

Tabelle 4 zeigt die angenommenen Kennwerte zur Untersuchung des Sättigungsverhaltens der Stromwandler.

<i>Stromwandler</i>				<i>Relais</i>
S_N	\ddot{u}_N	n_N	R_2	R_B
VA			Ω	Ω
5	60A : 1A	5	2	0,2

Tabelle 4: Kennwerte der Stromwandler und Relais

Eine gute Abschätzung für die Sättigung eines Stromwandlers ist nach [5] daher über die sogenannte Sättigungsspannung (Kniespannung) möglich. Dafür muss die Nennimpedanz der Bürde berechnet werden.

$$Z_{BN} = \frac{S_N}{I_{N,sek.}^2} = \frac{5 \text{ VA}}{(1 \text{ A})^2} = 5 \Omega \quad (101)$$

Nun wird die Nennsättigungsspannung des Stromwandlers bestimmt.

$$U_{KN} = n_N \cdot (R_2 + Z_{BN}) \cdot I_N = 5 \cdot (2 \Omega + 5 \Omega) \cdot 1 \text{ A} = 35 \text{ V} \quad (102)$$

In einem Folgeschritt wird nach Berechnung des Ortungsstromes auf der Wandlersekundärseite, die tatsächliche Spannung an der Hauptinduktivität des Stromwandlers bei einem Einsatz der amperemetrischen KNOSPE im Erdschlussfall mit Formel (105) nach [5] bestimmt. Der guten Ordnung halber wird zusätzlich der Widerstand der Verdrahtung gemäß nachfolgender Berechnung berücksichtigt.

$$R_{Verdr.} = \frac{l}{\gamma \cdot A} = \frac{10 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2} = 71 \text{ m}\Omega \quad (103)$$

$$I_{KNOSPE,sek} = \frac{I_{KNOSPE}}{\ddot{u}_N} = \frac{300 \text{ A}}{60} = 5 \text{ A} \quad (104)$$

$$\begin{aligned} U_m &= (R_2 + R_{Verdr.} + R_B) \cdot I_{KNOSPE,sek} = (2 \Omega + 2 \cdot 71 \text{ m}\Omega + 0,2 \Omega) \cdot 5 \text{ A} \\ &= 11,7 \text{ V} \end{aligned} \quad (105)$$

Das Ergebnis zeigt, dass die Spannung an der Hauptinduktivität bei einem Einsatz der KNOSPE einen um Faktor 3 kleineren Wert als die Nennsättigungsspannung des Stromwandlers annimmt. Ein Eintreten der Sättigung ist bei diesem Verfahren im betrachteten Fall somit nicht zu erwarten. Wird die Einführung einer amperemetrischen KNOSPE in einem Netz in Erwägung gezogen, so sollte das Sättigungsverhalten der Stromwandler bei der Planung auf jeden Fall untersucht werden.

5.6 KNOPE

Wie bereits in Kapitel 4.6 erklärt, wird bei dieser Methode ein stromkontrollierter Doppelerdschluss bewusst zur Fehlerfindung eingesetzt. Das Prinzip der KNOPE im Musternetz ist in Abbildung 41 zu sehen.

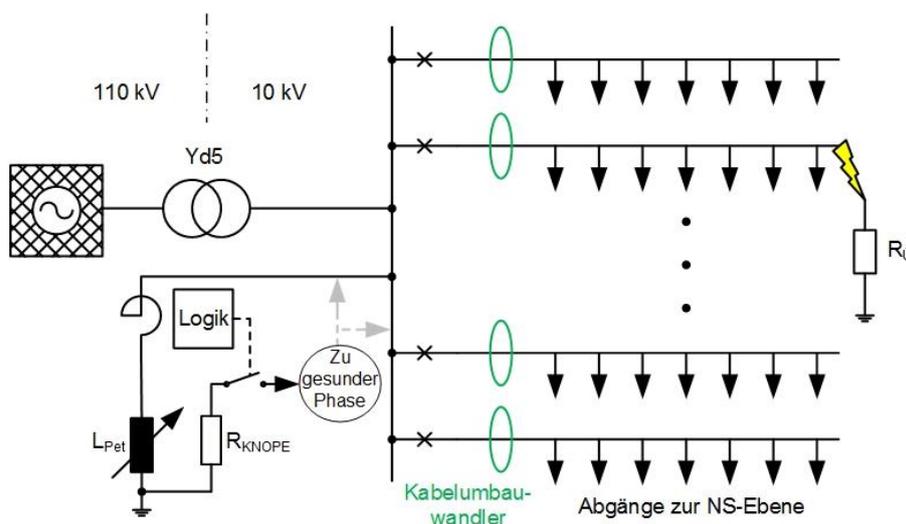


Abbildung 41: KNOPE im Musternetz

5.6.1 DIMENSIONIERUNG

Bei der Dimensionierung des Widerstands für das KNOPE-Verfahren sollten zwei Faktoren berücksichtigt werden. Einerseits muss sichergestellt werden, dass der Ortungshilfsstrom groß genug ist, um ein Ansprechen der letzten Überstromeinrichtung der längsten Leitung zu gewährleisten. Andererseits kann ein zu hoher Strom zu einer Überschreitung der, laut Normⁱ

ⁱ Vgl. EN 50522

erlaubten, Berührungs- und Schrittspannungen führen. Darüber hinaus können zu große Or-
tungshilfsströme zu kurzzeitigen Einsenkungen der Spannung auf der Niederspannungsebene
führen. [4]

Entsprechend den angeführten Erfordernissen, muss der Strombegrenzungswiderstand für
das vorliegende Musternetz abgeschätzt werden. Die Überstromanzeiger sind auf einen
exemplarischen Wert von 500 A eingestellt. Um eine Unterfunktion zu vermeiden, wird dieser
Wert mit einer Sicherheitsreserve von 25% beaufschlagt. Damit wird bereits ohne Berücksich-
tigung der Impedanzen der Fehlerschleife (siehe Abbildung 42) ein Mindeststrom von 625 A
gefordert. Da der Strom aufgrund der erwähnten Fehlerschleifenimpedanzen noch verringert
wird, wird für den Fehlerstrom unter Berücksichtigung eines in der Schutztechnik üblichen Si-
cherheitsfaktors von 2 ein Sollwert von 1250 A angesetzt.

$$R_{KNOPE} = \frac{U_N}{I_F} = \frac{10 \text{ kV}}{1,25 \text{ kA}} = 8 \Omega \quad (106)$$

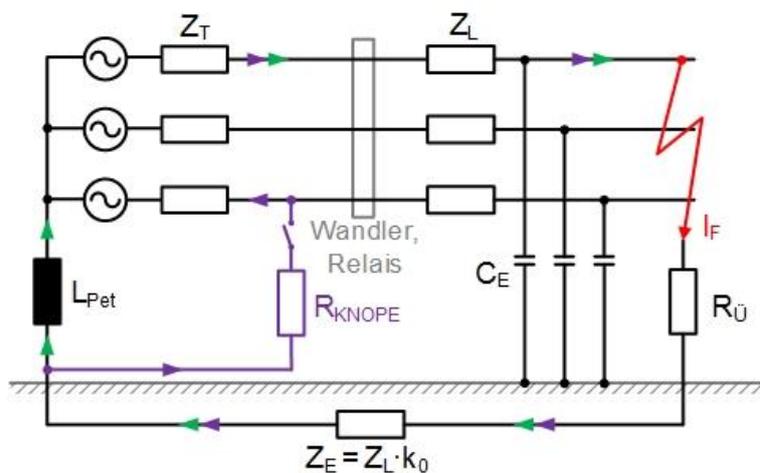


Abbildung 42: Prinzipschaltbild des KNOPE-Verfahrens (nach [4], eigene Darstellung)

Aus Abbildung 42 ergibt sich Formel (107) für den Betrag des Fehlerstromes.

$$I_F = \left| \frac{U_N}{2 \cdot Z_T + Z_L \cdot (1 + k_0) + R_{\ddot{U}} + R_{KNOPE}} \right| \quad (107)$$

Ein Erdschluss kann im Netz prinzipiell überall, also z.B. in der Nähe der Sammelschiene
(Nahfehler) aber auch am Ende der längsten Kabelstrecke (Fernfehler), auftreten. Aus diesem
Grund wird mit dem Wert für den Strombegrenzungswiderstand nun der Bereich, in welchem
der Fehlerstrom liegen kann, untersucht. Dazu werden die Fehlerströme mithilfe der Formel
(107) für verschiedene Leitungsimpedanzen und Erdübergangswiderstände berechnet und in

Tabelle 5 dargestellt. Der Berechnung liegen die Werte des in dieser Arbeit verwendeten Musternetzes zugrunde.

Wie Formel (108) zeigt, ergibt sich, bezüglich der umgesetzten Leistung, beim KNOPE-Verfahren der größte Wert aller betrachteten Verfahren. Daher ist der Widerstand nach einer Zuschaltung aus thermischer Sicht für eine gewisse Zeit unter Umständen nicht sofort wieder einsatzfähig. [4]

$$P_{KNOPE} = U_N \cdot I_{F,max.} = 10 \text{ kV} \cdot 1236 \text{ A} = 12,4 \text{ MW} \quad (108)$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei wird für den Fernfehler ein Fehlerort am Ende eines typischen Abganges (5 km) angenommen. Der Nahfehler besteht in einem Erdschluss, welcher in unmittelbarer Nähe der speisenden Sammelschiene auftritt.

Fehlerart	$R_{\dot{U}}$ in Ω	$R_{KNOPE} = 8 \Omega$	$R_{KNOPE} = 4 \Omega$	$R_{KNOPE} = 2 \Omega$
		I_F in A	I_F in A	I_F in A
Fernfehler	0	981	1583	2244
Fernfehler	5	661	894	1085
Nahfehler	0	1236	2395	4287
Nahfehler	5	766	1101	1408
P_{KNOPE} in MW		12,4	24	43

Tabelle 5: Fehlerströme bei Variation von Leitungslänge und Erdübergangswiderstand

Die Berechnung zeigt, dass sich der Erdübergangswiderstand aufgrund des niederohmigen R_{KNOPE} besonders stark auswirkt. Eine Auslegung des R_{KNOPE} auf den höchsten anzunehmenden Lichtbogenwiderstand am Ende der längsten Kabelstrecke bedeutet im Umkehrschluss einen sehr hohen Strom bei einem sammelschienenennahen Fehler, welcher einen geringen Erdübergangswiderstand aufweist. Dieser Strom bewegt sich im Bereich des Kurzschlussstromes. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich bei der KNOPE Probleme für die Erdschlussortung in Freileitungsnetzen, bei denen größere Erdübergangswiderstände auftreten können, ergeben. Bei Kabelnetzen hingegen darf man technologiebedingt von kleinen Übergangswiderständen und kurzen Entfernungen ausgehen, weshalb hier die KNOPE einsetzbar ist.

5.6.2 ÜBERSTROMVERHALTEN DER STROMWANDLER

Der Ortungsstrom der KNOPE ist zwar noch größer als jener der KNOSPE, eine Untersuchung des Überstromverhaltens ist bei dieser Methode jedoch nicht nötig, da die Auswertung in diesem Fall mit einem anderen Equipment durchgeführt wird:

Bei der Verwendung von Überstromanzeigern zur Tiefenortung beim KNOPE-Verfahren werden keine Stromwandler benötigt. Werden die Kurzschlusschutzeinrichtungen des Netzes zur Auswertung herangezogen, so kann davon ausgegangen werden, dass deren Wandler überstromfähig sind, da die im Kurzschlussfall auftretenden Ströme noch größer als bei der KNOPE ausfallen können.

5.7 PULSORTUNG

Wie in Kapitel 4.7 beschrieben, gibt es verschiedene Varianten der Pulsortung. Abbildung 43 zeigt eine Ausführungsform der Methode im Musternetz, bei welcher der Pulscondensator in Kombination mit einer Logik im Erdschlussfall mit einem bestimmten Takt direkt parallel zur Petersen-Spule geschaltet wird.

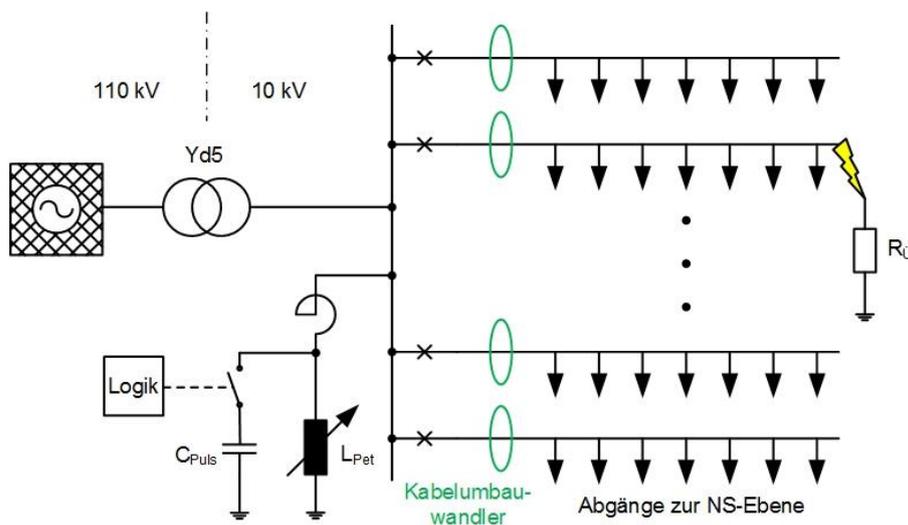


Abbildung 43: Pulsortung im Musternetz

Zur Dimensionierung des Pulscondensators kann die Anordnung in das Ersatzschaltbild der Symmetrischen Komponenten (Abbildung 44) übergeführt werden. Gemäß der Erklärung in Kapitel 4.7 ergeben sich für die Pulsortung erst bei höheren Erdübergangswiderständen Probleme. Diese treten vor allem bei Erdschlüssen an Freileitungen auf, wenn z.B. der Fehler durch einen ein Baum verursacht wird. Da das Musternetz als reines Kabelnetz konzipiert ist, sind

bei einem Erdschluss keine hohen Übergangswiderstände zu erwarten, weshalb der Erdübergangswiderstand für die Dimensionierung des Pulscondensators vernachlässigt werden kann.

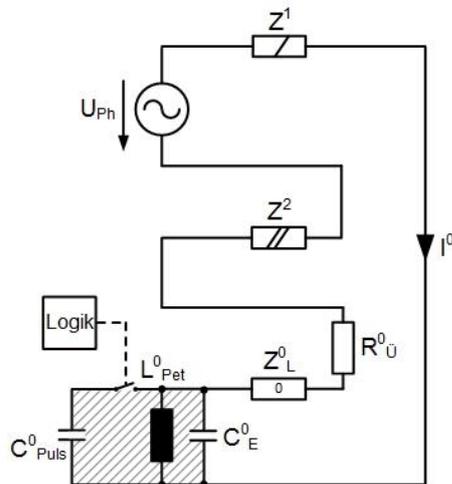


Abbildung 44: Ersatzschaltbild der Pulsortung in Symmetrischen Komponenten

Wie bereits in Kapitel 5.3 veranschaulicht, verursacht die vereinfachende Annahme, dass die Strangspannung an der Parallelschaltung des Nullsystems anliegt keinen nennenswerten Fehler, da hauptsächlich die Impedanz der Parallelschaltung aufgrund ihrer Größe strombegrenzend wirkt. Aus diesem Grund können die Impedanzen des Mit- und des Gegensystems, sowie die Nullimpedanz der Leitung auch hier vernachlässigt werden, an ihnen treten keine nennenswerten Spannungsabfälle auf. Dadurch muss nicht mehr mit Nullsystemgrößen gerechnet werden und der Faktor 3 der Symmetrischen Komponenten fällt weg.

Um eine sichere Detektion des Pulsmusters zu gewährleisten, sollte nach [9] bei der Pulsortung ein Mindesttaktthub vorhanden sein. Gemäß Kapitel 3.5 wird das Musternetz mit einer Überkompensation von 5% betrieben. Wird der Pulscondensator für eine Vollkompensation bei der Grundfrequenz dimensioniert, so muss bei einer Zuschaltung folgende Bedingung gelten.

$$I_{C_{Puls}} + v \cdot I_{CE} = 0 \tag{109}$$

$$I_{C_{Puls}} - j 9 A = 0 \rightarrow I_{C_{Puls}} = j 9 A$$

Die Stromänderung des Taktsignals beträgt mit diesem Ansatz 9 A. Nun kann die kapazitive Reaktanz und daraus anschließend die Kapazität des Pulscondensators berechnet werden. Zusätzlich ist noch die erforderliche Taktleistung beim gegebenen Pulshub von Interesse.

$$j X_{C_{Puls}} = \frac{U_{Ph}}{I_{C_{Puls}}} = \frac{5774 \text{ V}}{j 9 \text{ A}} = -j 641,6 \Omega \quad (110)$$

$$C_{Puls} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot |X_{C_{Puls}}|} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 641,6 \Omega} = 5 \mu\text{F} \quad (111)$$

$$Q_{Puls} = U_{Ph} \cdot I_{C_{Puls}} = 5774 \text{ V} \cdot 9 \text{ A} = 52 \text{ kvar} \quad (112)$$

Bezüglich der berechneten Leistung lässt sich festhalten, dass der angenommene Takthub großzügig dimensioniert wurde. Das Verfahren kann in der Praxis auch mit einer geringeren Stromänderung realisiert werden, wodurch sich die Taktleistung entsprechend verringert. Vor allem im Vergleich zur KNOSPE und zur KNOPE benötigt die Pulsortung eine relative geringe Leistung.

In den meisten Fällen wird man den Kondensator nicht direkt parallel zur Petersenspule schalten, sondern an die Hilfswicklung. In diesem Fall sind die Werte entsprechend umzurechnen.

6 WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNGSFAKTOREN

In diesem Kapitel werden alle für die Implementierung des jeweiligen Erdschlussortungsverfahrens relevanten Kostenfaktoren dargelegt und einander gegenübergestellt. Es wird dabei im Sinne einer Green-Field-Studie kein bereits vorhandenes Equipment vorausgesetzt. Folgende Kostenfaktoren fallen unabhängig von der Art des gewählten Verfahrens auf jeden Fall an:

- Planungskosten
- Kosten für Montage und Inbetriebnahme
- Kosten für Personalschulung
- Reserveteile
- Zubehör (Hilfsspannungsversorgung, Kleinteile, ...)

Hinzu kommen, je nach Art des Verfahrens, die technologiebedingten Komponenten. Sie sind im Folgenden für jedes Verfahren angegeben.

6.1 NATÜRLICHES OBERSCHWINGUNGSVERFAHREN

Der Vorteil einer Umsetzung des natürlichen Oberschwingungsverfahrens ist zweifellos, dass keine externe Quelle oder Änderungen der Netzkonfiguration nötig sind. Die Verwendung der im Netz vorhandenen Oberschwingungen setzt jedoch, wie bereits in den Kapiteln 4.1 und 5.1 erklärt und gezeigt, zu jeder Zeit einen Mindestpegel der verwendeten Oberschwingung voraus. Für die Realisierung der Methode fallen nachfolgende technologiebedingte Kostenfaktoren an:

- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „Oberschwingungsverfahren“
- Summenstromwandler

Spannungswandler zur Messung der Verlagerungsspannung, werden nur beim $\sin(\varphi)$ -Verfahren benötigt.

6.2 OS-VERFAHREN MIT TONFREQUENZ-RUNDSTEUERANLAGEN

Bei diesem Verfahren tritt neben den Kostenfaktoren aus Kapitel 6.1 noch die Tonfrequenz-Rundsteueranlage in Erscheinung. Meist fällt die Entscheidung für diese Methode allerdings weil die Tonfrequenz-Rundsteueranlage bereits im Netz vorhanden ist.

6.3 NATÜRLICHES WATTRESTSTROMVERFAHREN

Wird im Zuge eines Erdschluss-Engineerings nach Kapitel 5.3 festgestellt, dass der natürliche Wattreststrom für die Realisierung dieser Methode ausreichend groß ist, so sind folgende Kostenpunkte erforderlich:

- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „wattmetrisches Verfahren“
- Summenstromwandler
- Spannungswandler zur Messung der Verlagerungsspannung

6.4 WATTRESTSTROMERHÖHUNG

6.4.1 KLASSISCHE WATTRESTSTROMERHÖHUNG

Für die Umsetzung der Wattreststromerhöhung muss die Löschspule mit einer Hilfswicklung ausgestattet sein.

Zusätzlich werden noch benötigt:

- Leistungswiderstand (ausgelegt für die Spannung der Hilfswicklung)
- Schaltschütz (für die geplante Stromerhöhung und die Spannung der Hilfswicklung)
- Steuerung (Zuschaltlogik)
- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „wattmetrisches Verfahren“

6.4.2 WATTMETRISCHE KNOSPE

Für die Realisierung der wattmetrischen KNOSPE wird die Hilfswicklung nicht benötigt. Hier wird ein der gewünschten Stromerhöhung entsprechender Widerstand direkt parallel zur Petersen-Spule geschaltet.

Dazu wird folgendes Equipment benötigt:

- Leistungswiderstand (ausgelegt für die primäre Strangspannung)
- Leistungsschalter (1 Stück)
- Mittelspannungskabel inkl. Endabschluss (Länge nach Bedarf) zum Anschluss der Leistungsschalter-Widerstands-Kombination
- Bauliche Maßnahmen (Fundament, o.Ä.)
- Steuerung (Zuschaltlogik)
- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „wattmetrisches Verfahren“

6.5 AMPEREMETRISCHE KNOSPE

Die amperemetrische KNOSPE kann wahlweise mit den folgenden Komponenten realisiert werden:

- Leistungswiderstand
- Strombegrenzende Drossel

Unabhängig von der gewählten Variante sind die nachstehenden Kostenfaktoren relevant:

- Leistungsschalter (1 Stück)
- Mittelspannungskabel inkl. Endabschluss (Länge nach Bedarf)) zum Anschluss der Leistungsschalter-Widerstands-Kombination
- Bauliche Maßnahmen (Fundament, o.Ä.)
- Steuerung (Zuschaltlogik)

Wird die **Mittelstrom-KNOSPE (typ. 300 A)** verwendet, so ist zur Auswertung noch folgendes Equipment nötig:

- Überstromfähige Summenstromwandler (Anzahl nach gewünschter Segmentierung)
- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „wattmetrisches Verfahren“

Bei Anwendung der **Hochstrom-KNOSPE (typ. 1 kA)** kann die Auswertung mit der meist bereits vorhandenen Ausrüstung erfolgen:

- Kurzschlusschutzeinrichtungen des Netzes
- Überstromanzeiger (Anzahl nach gewünschter Segmentierung)

6.6 KNOPE

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.6 handelt es sich bei der KNOPE um das leistungsintensivste Erdschlussortungsverfahren. Demzufolge ist für die Implementierung auch der Platzbedarf am größten (siehe Abbildung 16). Folgende Kostenfaktoren treten bei der KNOPE in Erscheinung:

- Eigener Mittelspannungsabgang inkl. Leistungsschalter im Umspannwerk
- 2 einphasige Leistungsschalter (z.B. in den Außenleitern L1 und L3)
- Leistungswiderstand
- Steuerung (Phasenauswahl und Zuschaltlogik)
- Bauliche Maßnahmen (Fundament, o.Ä.)
- Mittelspannungskabel inkl. Endabschluss (Länge nach Bedarf)

Die Auswertung kann mit dem meist bereits vorhandenen Equipment erfolgen:

- Kurzschlusschutzeinrichtungen des Netzes
- Überstromanzeiger (Anzahl nach gewünschter Segmentierung)

6.7 PULSORTUNG

Wie in Kapitel 4.7 aufgezeigt, gibt es viele Möglichkeiten die Pulsortung zu realisieren. Nachfolgende Kostenpunkte beziehen sich auf die klassische Variante der Methode, bei der ein Kondensator mit einem gewissen Takt parallel zur Hilfswicklung Kompensationsspule geschaltet wird:

- Pulscondensator (ausgelegt für die Spannung der Hilfswicklung)
- Schaltschütz
- Steuerung (Zuschaltlogik)
- Erdschlussortungsrelais mit Funktion „Pulsortung“

Wird der Pulscondensator direkt parallel zur Kompensationsspule geschaltet, so werden folgende Komponenten benötigt:

- Pulscondensator (ausgelegt für die primäre Strangspannung)
- Leistungsschalter (1 Stück)
- Mittelspannungskabel inkl. Endabschluss (Länge nach Bedarf)

7 ZUSAMMENFASSUNG

Als Basis für die Ableitung und Demonstration des Verfahrens des Erdschluss-Engineerings dienen grundlegenden Betrachtungen zum Erdschluss, speziell der Sternpunktbehandlung und den einzelnen physikalischen Phasen eines Erdschlusses.

Anschließend werden Netzgebiete hinsichtlich ihrer erdschlussrelevanten Eigenschaften wie folgt typisiert: Innenstadt, Wohngebiet, Gewerbegebiet, ländliches Gebiet. Um später das Erdschluss-Engineering anhand eines universellen Modells zu erklären, wird aus diesen verschiedenen Netztypen ein Musternetz geschaffen.

Hinsichtlich der Theorie der Erdschlussortungsverfahren werden folgende stationären Verfahren beschrieben:

- Natürliches Oberschwingungsverfahren in drei Varianten (amperemetrische Auswertung, $\sin(\varphi)$ -Auswertung, Amperemetrisches Relativverfahren)
- Oberschwingungsverfahren mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen
- Natürliches Wattreststromverfahren
- Wattreststromerhöhung in zwei Varianten (klassische Wattreststromerhöhung und wattmetrische KNOSPE)
- Amperemetrische KNOSPE in zwei Varianten (Mittelstrom-KNOSPE und Hochstrom-KNOSPE)
- KNOPE (kurzzeitige niederohmige Phasenerdung)
- Pulsortung

Nach diesem theoretischen Exkurs werden alle oben genannten Verfahren auf das Musternetz angewendet. Dabei wird detailliert und in allen Einzelheiten aufgezeigt, welche Netzparameter und Funktionsparameter der Schutzeinrichtungen ein sicheres und selektives Ansprechen von Erdschlussschutzeinrichtungen gewährleisten und welche Grenzen einzuhalten sind.

Eine Aufstellung der wirtschaftlichen Faktoren für die Konzeption eines Erdschlussortungs-Systems gemäß dem Prinzip der Green-Field-Studie schließt die Arbeit ab.

Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, umfasst die Planung für die Einführung von Erdschlussortungsverfahren sehr viele Aspekte. Durch eine sorgfältige Analyse der Beschaffenheit des Netzes, sowie eine darauf aufbauende, fundierte Vorgehensweise im Zuge des Erdschluss-Engineerings können auftretende Erdschlüsse schneller und genauer geortet werden. Daraus können in weiterer Folge eine Verbesserung der Versorgungssicherheit, sowie eine längere Lebensdauer der eingesetzten Betriebsmittel und damit wirtschaftliche Vorteile erzielt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Herwig Renner et al., "Skriptum zum Labor Elektrische Energiesysteme", 2012, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz.
- [2] Lothar Fickert, "Der Erdschluss, Bildungsunterlagen", 2004.
- [3] Gernot Druml, "Innovative Methoden zur Erdschlussortung und Petersen-Spulen Regelung", 2012, Dissertation.
- [4] Herbert Steurer et al., "Einführung eines neuen Erdschlussortungs-Systems KNOPE und erste Erfahrungen", e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Dezember 2014.
- [5] Lothar Fickert, "Skriptum zur Vorlesung Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme", 2005, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz.
- [6] Lothar Fickert, "Skriptum zur Vorlesung Elektrische Energiesysteme 1", 2008, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz.
- [7] Helmut Melzer et al., "Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)", Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), Nürnberg, 2012, Fachbericht, ISBN 978-3-8007-3416-0.
- [8] Herwig Renner und Manfred Sakulin, "Skriptum zur Vorlesung Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit", 2008, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz.
- [9] A. Eberle GmbH & Co. KG, "Erdschlussortungsrelais EOR-D, Bedienungsanleitung", 2010.
- [10] Lothar Fickert und Wernfried Halder, "Verfahren und Einrichtung zur Erfassung von Erdschlüssen", 02. Okt. 1996, Patent 19640821.
- [11] CENELEC, "Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV; EN 50522", 2010.
- [12] Gernot Druml, "Entscheidungshilfen zur Auswahl geeigneter Verfahren zur gerichteten Erdschlusserfassung", 2011, Beitrag zur OMICRON Anwendertagung.
- [13] Gerd Kaufmann, "Erdschlussortung", Beitrag zur VDE-Fachtagung Spremberg, 2015, A. Eberle GmbH.
- [14] EGE - Electrical Engineering Division spol.s r.o., "SRA - Die automatischen Widerstände".

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Grundprinzip eines kompensierten Netzes (nach [2], eigene Darstellung).....	2
Abbildung 2: Physikalische Vorgänge bei einem Erdschluss [2]	4
Abbildung 3: Zeigerdiagramm des Entladevorgangs der erdschlussbehafteten Phase [3]	5
Abbildung 4: Zeigerdiagramm des Aufladevorgangs der nicht-fehlerbehafteten Phasen [3]...	5
Abbildung 5: Zeiger im „gesunden“ Netz (links) und beim stationären Erdschluss (rechts) [3] 6	
Abbildung 6: Anschlussschema für ein Umspannwerk mit zwei Netzgruppen	8
Abbildung 7: Aufbau des Musternetzes	11
Abbildung 8: Verhalten der Oberschwingungsströme im Erdschlussfall [9]	17
Abbildung 9: Richtungsentscheid beim Oberschwingungsverfahren [9] [2].....	17
Abbildung 10: Auswertungsprinzip des wattmetrischen Relais [2]	20
Abbildung 11: Prinzip der klassischen Wattreststromerhöhung [2]	22
Abbildung 12: Prinzip der wattmetrischen KNOSPE [2]	22
Abbildung 13: Auswertung ohne (links) und mit (rechts) Wattreststromerhöhung [2].....	23
Abbildung 14: Prinzip der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunkterdung [2].....	24
Abbildung 15: Dreiphasiges Prinzipschaltbild der KNOPE (nach [4], eigene Darstellung)....	26
Abbildung 16: Gehäuse der KNOPE-Zuschaltlogik (links) und des Widerstands (rechts) [4] 27	
Abbildung 17: Prinzip der KNOPE-Zuschaltlogik (links) und Phasenauswahl (rechts) [4].....	28
Abbildung 18: Sinkender Ortungshilfsstrom durch die Erwärmung [4]	30
Abbildung 19: Pulsortung mit Kondensator auf der Hochspannungsseite [3].....	31
Abbildung 20: Verhalten der Pulse in Abhängigkeit der eingestellten Kompensation [3]	33
Abbildung 21: Detektiertes Pulsmuster bei zu geringer Überkompensation [3].....	34
Abbildung 22: Zu große Kompensationsleistung der dezentralen Löschspule [12].....	34
Abbildung 23: Passende Kompensationsleistung der dezentralen Löschspule [12]	35
Abbildung 24: V-Kurve in Abhängigkeit des ohmschen Erdübergangswiderstandes [12].....	35
Abbildung 25: Auswirkungen des Wattreststromes auf das detektierte Pulsmuster [3].....	36
Abbildung 26: Verhalten der Reaktanzen beim natürlichen Oberschwingungsverfahren.....	40
Abbildung 27: Berücksichtigung des Pi-Ersatzschaltbilds der fehlerbehafteten Leitung	42
Abbildung 28: Einstellung der Auswertungskriterien beim Oberschwingungsverfahren [9]... 47	
Abbildung 29: Oberschwingungsverfahren in den Symmetrischen Komponenten	49
Abbildung 30: Natürliches Wattreststromverfahren im Musternetz.....	52
Abbildung 31: Natürliches Wattreststromverfahren in den Symmetrischen Komponenten ...	52
Abbildung 32: Winkelproblematik beim natürlichen Wattreststromverfahren [2]	55
Abbildung 33: Relais und fehlerbehafteter Abgang in den Symmetrischen Komponenten ...	56
Abbildung 34: Verbesserte Winkelbedingungen durch Teilung der Schutzstrecke [13]	58
Abbildung 35: Wattreststromerhöhung im Musternetz.....	60
Abbildung 36: ESB der Wattreststromerhöhung in Symmetrischen Komponenten.....	61

Abbildung 37: Prinzip der Wattmetrischen KNOSPE.....	63
Abbildung 38: KNOSPE im Musternetz	64
Abbildung 39: Ersatzschaltbild der KNOSPE in Symmetrischen Komponenten	66
Abbildung 40: Konventioneller Stromwandler mit Ersatzschaltbild [5].....	68
Abbildung 41: KNOPE im Musternetz.....	70
Abbildung 42: Prinzipschaltbild des KNOPE-Verfahrens (nach [4], eigene Darstellung)	71
Abbildung 43: Pulsortung im Musternetz	73
Abbildung 44: Ersatzschaltbild der Pulsortung in Symmetrischen Komponenten	74