



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

DIPLOMARBEIT

Einfluss der Längs-, Schräg- und Querregelung auf die Selektivität des Transformator - Differentialschutzes

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK
Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian GERERSTORFER (APG)

eingereicht an der

Technischen Universität Wien
Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe

von
Erhard JAROSCH
Matr. Nr.: 01325746

Wien, im Februar 2020

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im Jahr 2019/20 am Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe an der Technischen Universität Wien durchgeführt.

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Prof. Wolfgang Gawlik für die tatkräftige Unterstützung bedanken. Außerdem danke ich der Firma Austrian Power Grid, die mir erst die Diplomarbeit ermöglicht hat. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Dr. Christian Gererstorfer für die gute Zusammenarbeit bedanken, der mir auch immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. An dieser Stelle auch ein herzliches Dankeschön an meine Familie für die Unterstützung während meines Studiums und der Diplomarbeit.

Wien, im Februar 2020

Erhard Jarosch

Abstract

Alongside the primary task of transformers to connect different voltage levels, transformers are also used to control the active and reactive power flow. These transformers are called regulating transformers. If the regulator is not in the middle position, the current turns ratio is not equal to the nominal turns ratio of the transformer and the differential protection relay calculates a differential current in the case of an external fault. This could cause a non-selective trip command. I will discuss different methods to avoid a false tripping in this master thesis. For this purpose, a model has been implemented in Simulink. It consists of a grid followed by the regulating transformer, the power line and the fault block. With the stabilization of the differential protection relay it is possible to prevent a non-selective trip command in the case of a 3 – phase short circuit. If diagonal or cross regulators are used the method of the virtual – transformer - end is necessary to distinguish between an external and an internal phase to phase fault. Additionally, the zero – sequence current filtering is needed to avoid a false tripping in the case of a phase to ground short circuit if only one side of the transformer is connected to the earth.

Kurzfassung

Neben der eigentlichen Aufgabe von Transformatoren unterschiedliche Spannungsebenen miteinander zu verbinden, werden Transformatoren auch eingesetzt, um Wirk- und Blindleistungsflüsse zu steuern, diese werden Regeltransformatoren genannt. Befindet sich die Regelung nicht in Mittelstellung, weicht das tatsächliche Übersetzungsverhältnis vom Nennübersetzungsverhältnis ab und der Differentialschutz berechnet bei einem außenliegenden Fehler einen vermeintlichen Differentialstrom, welcher zu einer nicht selektiven Auslösung führen kann. In der Arbeit sollen unterschiedliche Methoden untersucht werden, um eine solche Fehlauflösung zu verhindern. Dazu wird in Simulink ein Modell bestehend aus Netz, Regeltransformator, Leitung und Fehlerstelle aufgebaut. Es zeigt sich, dass bei einem 3 – poligen Kurzschluss die Stabilisierung ausreicht, um eine Fehlauflösung zu verhindern. Wird eine Schräg- bzw. Querregelung eingesetzt, ist zusätzlich noch die Methode des virtuellen Beins notwendig, damit der Differentialschutz zwischen einem innen- und außenliegenden 2 – poligen Kurzschluss unterscheiden kann. Eine Nullstromaussiebung wird benötigt, um eine Fehlauflösung bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss zu verhindern, wenn nur eine Seite mit Erde verbunden ist.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1. Symmetrische Komponenten	2
2.2. Leistungstransformator	4
2.2.1. Einphasiger Transformator	4
2.2.2. Transformator - Kurzschlussspannung	6
2.2.3. Drehstromtransformator	7
2.2.4. Regeltransformator	9
2.3. Transformator – Differentialschutz	11
2.4. Fehlerarten	13
2.4.1. 3 – poliger Kurzschluss	13
2.4.2. 2 – poliger Kurzschluss ohne Erdberührung	15
2.4.3. 2 – poliger Kurzschluss mit Erdberührung	15
2.4.4. 1 – poliger Erdkurzschluss (Erdschluss)	16
3. Modellierung	18
3.1. Modellierung des Netzes in symmetrischen Komponenten	18
3.1.1. Modellierung des Netzes	18
3.1.2. Modellierung des Transformators	18
3.1.3. Modellierung der Leitung	21
3.1.4. Gesamtmodell	21
3.2. Modellierung des Regeltransformators und Beschreibung des Simulink - Modells	22
3.2.1. Längs- bzw. Schrägregelung	22
3.2.2. Querregelung	32
3.3. Modellierung des Differentialschutzes in Simulink	37
3.3.1. Grundsätzlicher Aufbau	37
3.3.2. Nullstromaussiebung	39
3.3.3. Virtuelles Bein	39
3.4. Leistungstransformator mit in Serie geschaltetem Koppeltransformator	45
3.5. Berechnung der stationären Werte mittels Excel	50
3.5.1. Excel File der Längs- bzw. Schrägregelung	50
3.5.2. Excel File der Querregelung	52
4. Simulation	53
4.1. Einfluss der Längsregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes	53
4.1.1. 3 – poliger Kurzschluss	54
4.1.2. 2 – poliger Kurzschluss	56
4.1.3. 1 – poliger Erdkurzschluss	56

4.1.4.	2 – poliger Erdkurzschluss	58
4.2.	Einfluss der Schrägregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes	60
4.2.1.	3 – poliger Kurzschluss	60
4.2.2.	1 – poliger Erdkurzschluss	61
4.2.3.	2 – poliger Kurzschluss	63
4.2.4.	2 – poliger Erdkurzschluss	67
4.3.	Einfluss der Querregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes	69
4.3.1.	3 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)	70
4.3.2.	2 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)	71
4.4.	Einfluss der Kombination aus Längs- und Querregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes.....	73
4.4.1.	3 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)	73
4.4.2.	2 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)	74
5.	Zusammenfassung.....	78
6.	Literaturverzeichnis	79

1. Einleitung

Zum Schutz von Leistungstransformatoren werden unter anderem Differenzialschutzgeräte eingesetzt. Diese vergleichen den Primär- und Sekundärstrom des Transformators und errechnen daraus, einen etwaigen Differentialstrom. Damit das Schutzgerät, den Primär- und Sekundärstrom miteinander vergleichen kann, werden diese zunächst auf den jeweiligen Nennstrom der Transformatorseite bezogen. Das bedeutet, fließt der Nennstrom, hat dieser unabhängig ob auf der Primär- oder Sekundärseite den normierten Wert eins.

Neben der Funktion unterschiedliche Spannungsebenen miteinander zu verbinden, werden Transformatoren auch eingesetzt, um Wirk- und Blindleistungsflüsse zu steuern. Diese Transformatoren werden als Regeltransformatoren bezeichnet. Zur Beeinflussung der Wirkleistungsflüsse, werden sogenannte Querregler eingesetzt, welche im Wesentlichen die Phasenlage der Spannung verändern. Mit Längsregler wird der Betrag der Spannung und damit der Blindleistungsfluss kontrolliert. Schrägregler ändern sowohl den Betrag als auch den Winkel der Spannung und damit die übertragene Wirk- und Blindleistung. In der Arbeit werden ausschließlich Transformatoren mit der Schaltgruppe YNyn0/d5 behandelt.

Für die Normierung der primär- und sekundärseitigen Größen verwendet das Schutzgerät den Nennstrom der jeweiligen Transformatorseite bei Mittelstellung aller Regelungen, unabhängig von der tatsächlich eingestellten Stufe. Beim Einsatz einer Regelung weicht das wirksame Übersetzungsverhältnis vom Nennübersetzungsverhältnis ab, wodurch der Differentialschutz einen vermeintlichen Differentialstrom berechnet. Dem Schutz wird bei einem außenliegenden Fehler ein im Schutzbereich liegender Fehler vorgetäuscht, was zu einer Fehlauflösung führen kann. In dieser Arbeit soll untersucht werden, in welchen Betriebsbereichen bzw. Fehlerzuständen eine solche Überfunktion auftreten kann und welche Methoden diese verhindern können, z.B. die Stabilisierung.

Im Besonderen stellt der 2 – polige Kurzschluss beim Einsatz der Schräg- bzw. Querregelung eine Herausforderung für den Schutz dar, da primär in der vom Fehler nicht betroffenen Phase ein Strom fließt, obwohl der Strom sekundär in derselben Phase 0 ist. Die Arbeit beschäftigt sich unter anderem mit der Methode des virtuellen Beins, um in einem solchen Fehlerfall eine mögliche Fehlauflösung zu verhindern.

Üblicherweise wird nur eine Seite des Transformators geerdet, damit keine Nullsystem verschleppt wird. Dadurch tritt ein etwaiger Nullstrom, z.B. durch einen 1 – poligen Erdkurzschluss, nur auf einer Transformatorseite auf, was wieder zur Bildung eines vermeintlichen Differentialstroms führt. Eine nicht selektive Auslösung kann mittels Nullstromaussiebung verhindert werden, diese wird ebenfalls in der Arbeit näher beleuchtet.

Um die oben genannten Methoden genauer betrachten zu können, wird in Simulink ein Modellnetz aufgebaut, bestehend aus einem Netz, dem Regeltransformator, einer Leitung und einer Kurzschlussnachbildung. Das Simulink Programm wird im Kapitel Modellierung im Detail beschrieben. Im Kapitel Simulation werden unterschiedliche Fehlerszenarien simuliert, um die Wirksamkeit der unterschiedlichen Verfahren bewerten zu können. Die für die weiteren Betrachtungen wichtigen grundlegenden Zusammenhänge werden im Kapitel 2 im Detail beschrieben.

2. Grundlagen

2.1. Symmetrische Komponenten

Ein wichtiges Instrument zur Berechnung elektrischer Netze sind die sogenannten symmetrischen Komponenten.

In der Praxis ist es häufig so, dass Betriebsmittel in allen drei Phasen ident aufgebaut sind, man spricht von sogenannten „symmetrischen Betriebsmittel“. Weiters werden Netze meist symmetrisch betrieben, das bedeutet, die Ströme und Spannungen in den drei Phasen haben denselben Betrag und sind um 120° phasenverschoben. Diese Eigenschaften werden in den symmetrischen Komponenten genutzt, um die Gleichungssysteme zu vereinfachen [1]. Zur Darstellung der Transformationsmatrix wird der sogenannte Drehoperator \underline{a} benötigt.

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} \quad (1)$$

Damit kann die Transformationsvorschrift angegeben werden. Der Buchstabe \underline{V} steht für eine beliebige Größe, das kann z.B. die Spannung, der Strom aber auch der magnetische Fluss sein.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{(0)} \\ \underline{V}_{(1)} \\ \underline{V}_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dabei wird T als Transformationsmatrix bezeichnet.

$$T = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Das Nullsystem wird mit dem Index (0) gekennzeichnet und beschreibt ein System, welches in allen drei Phasen gleichzeitig (-phasig) auftritt. Das Mitsystem rotiert in derselben Richtung wie das Feld im Generator und ist am Index (1) zu erkennen. Index (2) beschreibt das Gegensystem, welches in entgegengesetzter Richtung zum Mitsystem dreht. Zur besseren Veranschaulichung siehe Abbildung 1, in der ein unsymmetrisches Dreiphasensystem in seine symmetrischen Komponenten (012 - System) zerlegt wird.

Um Größen aus dem 012 – System zurück in das abc – System (Originalsystem) zu transformieren, muss Formel (2) von links mit der inversen Transformationsmatrix multipliziert werden, damit ergibt sich folgendes Ergebnis.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_{(0)} \\ \underline{V}_{(1)} \\ \underline{V}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Die inverse Transformationsmatrix wird auch als Rücktransformationsmatrix bezeichnet [2].

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

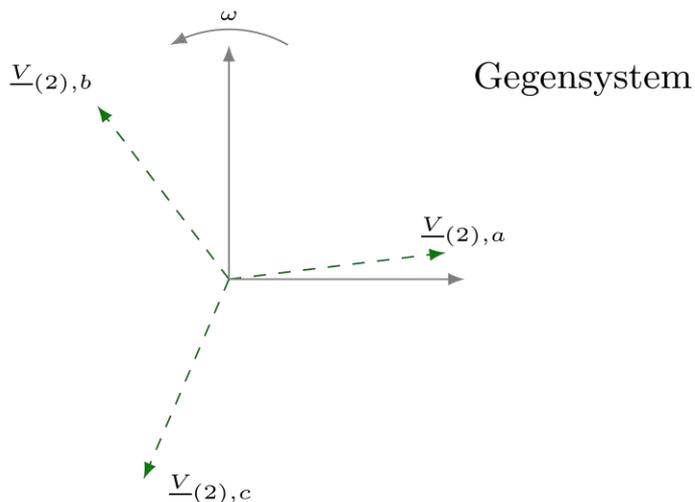
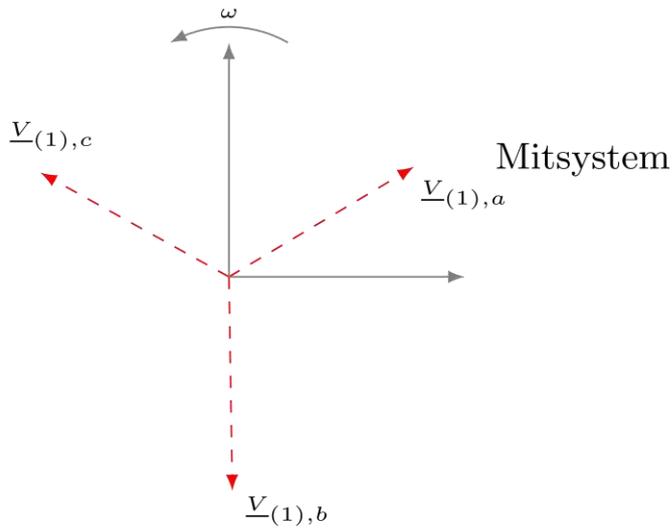
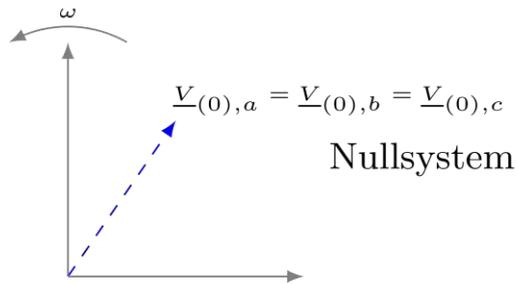
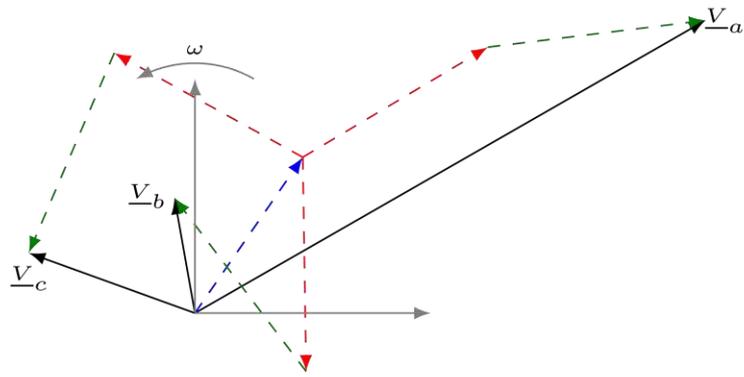


Abbildung 1: Veranschaulichung der symmetrischen Komponenten [1]

2.2. Leistungstransformator

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt in unterschiedlichen Spannungsebenen, um diese Ebenen miteinander verbinden zu können werden Transformatoren eingesetzt. Im Speziellen werden in dieser Arbeit Netzkuppltransformatoren untersucht, zur Kopplung von 380 kV Netzen mit 220 kV Netzen oder 220 kV Netzen mit 110 kV Netzen [2].

2.2.1. Einphasiger Transformator

Grundsätzlich besteht ein einphasiger Transformator aus zwei Spulen, welche über einen magnetischen Kreis miteinander verbunden sind. Wird an der primärseitigen Wicklung eine (sinusförmige) Spannung eingeprägt, stellt sich zur Folge des Induktionsgesetzes eine Primärflussverkettungsänderung ein. Zur vollständigen Beschreibung, müssen noch die ohmschen Spannungsabfälle einer realen Spule mitberücksichtigt werden.

$$u_1(t) = R_1 \cdot i_1(t) + \frac{d\psi_1(t)}{dt} \quad (6)$$

Analog kann die sekundäre Klemmenspannung berechnet werden.

$$u_2(t) = R_2 \cdot i_2(t) + \frac{d\psi_2(t)}{dt} \quad (7)$$

Der primäre Verkettungsfluss ist proportional dem Strom in der Primärwicklung und der Sekundärwicklung. Die beiden Proportionalitätsfaktoren werden als Selbst- und Gegeninduktivität bezeichnet. Gleiches gilt auch vice versa für die Sekundärflussverkettung. Das Superponieren zweier Flüsse ist nur solange zulässige, solange die Linearität des Eisenkerns vorausgesetzt wird.

$$\psi_1(t) = L_1 \cdot i_1(t) + L_{12} \cdot i_2(t) \quad (8)$$

$$\psi_2(t) = L_{21} \cdot i_1(t) + L_2 \cdot i_2(t) \quad (9)$$

Für alle weiteren Untersuchungen betrachten wir ausschließlich die Grundschiwingung im eingeschwungenen Betriebszustand. Dann können beide Spannungsgleichungen der Primär- und Sekundärseite wie folgt mit Hilfe der komplexen Wechselstromrechnung vereinfacht dargestellt werden. Dabei bezeichnet ω die Kreisfrequenz.

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_{12} \cdot \underline{I}_2 \quad (10)$$

$$\underline{U}_2 = R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_{12} \cdot \underline{I}_1 \quad (11)$$

Mit Hilfe des Übersetzungsverhältnisses, also dem Quotienten der primären und sekundären Windungszahl ($\ddot{u} = N_1/N_2$), können die sekundärseitigen Größen auf primärseitige Größen umgerechnet werden. Die umgerechneten Größen sind mittels Hochkomma gekennzeichnet.

$$\underline{U}'_2 = \ddot{u} \cdot \underline{U}_2 \quad \underline{I}'_2 = \frac{I_2}{\ddot{u}} \quad (12)$$

Damit ergeben sich folgende Spannungsgleichungen.

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot (L_1 - \ddot{u} \cdot L_{12}) \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot \ddot{u} \cdot L_{12} \left(\underline{I}_1 + \frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}} \right) \quad (13)$$

$$\ddot{u} \cdot \underline{U}_2 = \ddot{u} \cdot \left[R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot \left(L_2 - \frac{L_{12}}{\ddot{u}} \right) \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_{12} \left(\underline{I}_1 + \frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}} \right) \right] \quad (14)$$

Wobei die Spannungsgleichungen weiter vereinfacht werden können.

$$\underline{U}_1 = R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot \ddot{u} \cdot L_{12} (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (15)$$

$$\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot \omega \cdot L'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot \omega \cdot \ddot{u} \cdot L_{12} (\underline{I}_1 + \underline{I}'_2) \quad (16)$$

Jene Flüsse, welche nur mit einer der beiden Wicklungen verkettet sind, werden durch die beiden Streuinduktivitäten $L_{1\sigma}$ und $L_{2\sigma}$ beschrieben.

$$L_{1\sigma} = (L_1 - \ddot{u} \cdot L_{12}) \quad L'_{2\sigma} = \ddot{u}^2 \cdot \left(L_2 - \frac{L_{12}}{\ddot{u}} \right) \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad (17)$$

Die Hauptinduktivität L_m , ergibt sich aus dem Produkt des Übersetzungsverhältnisses und der Gegeninduktivität.

$$L_m = \ddot{u} \cdot L_{12} \quad (18)$$

Die beiden Spannungsgleichungen (15) und (16) liefern folgendes Transformatorersatzschaltbild. Wobei die Induktivitäten durch Reaktanzen ersetzt werden, also dem Produkt aus Induktivität und Kreisfrequenz.

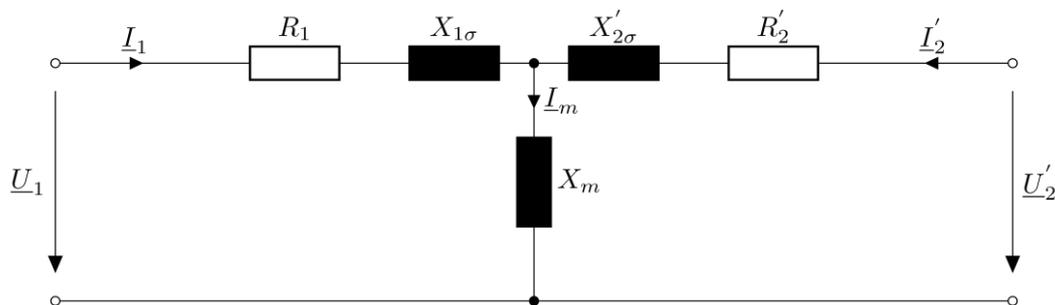


Abbildung 2: T – Ersatzschaltbild eines einphasigen Transformators

Die Summe aus \underline{I}_1 und \underline{I}'_2 wird als Magnetisierungsstrom \underline{I}_m bezeichnet.

Werden die Streuflüsse und auch die ohmschen Spannungsabfälle vernachlässigt, dann ist das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} in guter Näherung gleich dem Verhältnis der beiden Leerlaufspannungen (Nennspannungen) [3].

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad (19)$$

2.2.2. Transformator - Kurzschluss Spannung

In einem Transformator Datenblatt wird üblicherweise neben den Nennspannungen und der Nennleistung auch die bezogene Kurzschluss Spannung u_k in Prozent angegeben. Wie der Name bereits vermuten lässt, wird diese mittels des Kurzschlussversuches ermittelt. Sie beschreibt bei wie viel Prozent der Nennspannung im Kurzschlussfall der Nennstrom fließt.

Um diese Spannung bestimmen zu können, setzen wir die Spannungsgleichung der Sekundärseite null.

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j \cdot X_m \cdot \underline{I}_m & (20) \\ \underline{U}'_2 &= 0 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + j \cdot X_m \cdot \underline{I}_m & (21) \end{aligned}$$

Da die Hauptreaktanz um etwa den Faktor 1000 größer als die Streureaktanz ist, kann bei dieser Untersuchung der Quersweig vernachlässigt werden. Daher gilt:

$$\underline{I}'_2 \approx -\underline{I}_1 \quad (22)$$

Damit ergibt sich folgende Primärspannungsgleichung.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1K} &= [(R_1 + R'_2) + j \cdot (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})] \cdot \underline{I}_{1K} = (R_K + j \cdot X_K) \cdot \underline{I}_{1K} \\ &= \underline{Z}_K \cdot \underline{I}_{1K} \end{aligned} \quad (23)$$

Die bezogene Kurzschluss Spannung u_k , errechnet sich aus dem Verhältnis der Kurzschluss Spannung U_{1K} und der Nennspannung der Primärseite.

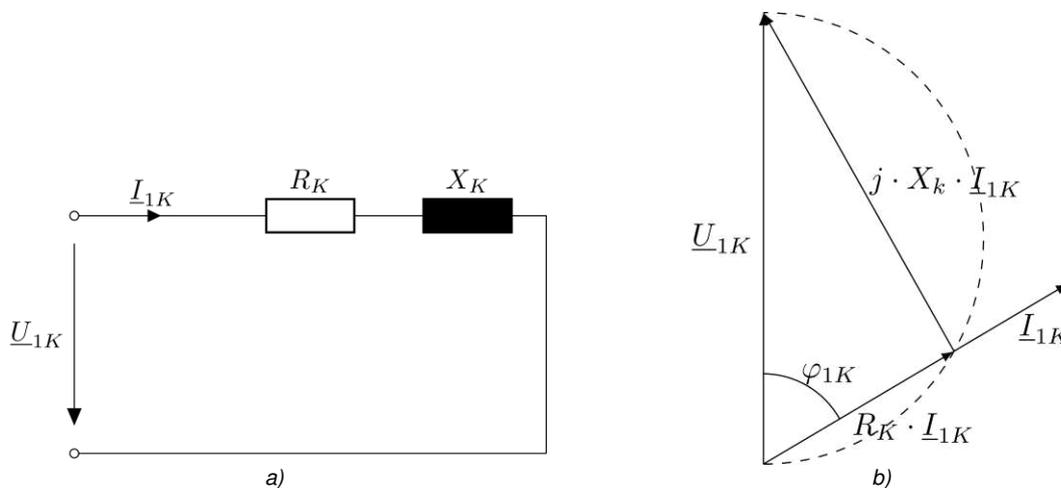


Abbildung 3: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm des Kurzschlussversuches

Der Kehrwert der bezogenen Kurzschluss Spannung gibt an, der wie vielfache Nennstrom im Kurzschlussfall bei Speisung mit Nennspannung fließt. Das bedeutet, dass der Fehlerstrom mit kleiner werdender Kurzschluss Spannung zunimmt. Wie in Abbildung 3 b) zu erkennen ist, wird die Kurzschluss Spannung hauptsächlich durch die Streureaktanz bestimmt, diese ist daher entscheidend für die Begrenzung des Kurzschlussstroms [3].

2.2.3. Drehstromtransformator

Die elektrische Energieübertragung erfolgt im Allgemeinen dreiphasig, deshalb werden auch dreiphasige Transformatoren benötigt. Es wird zwischen drei unterschiedlichen Ausführungen des Transformator-kerns unterschieden, die Drehstrombank (drei separate Transformatorkerne), der Dreischenkeltransformator und der Fünfschenkeltransformator. Ein Nullfluss ist dadurch gekennzeichnet, dass er auf allen drei Schenkeln dieselbe Phasenlage aufweist, daher hat die Bauart des Kerns einen wesentlichen Einfluss auf die Hauptreaktanz im Nullsystem. Bei Verwendung eines Dreischenkeltransformators, schließt sich der Fluss über Luft und Kessel, was zu einem deutlich höheren magnetischen Widerstand führt und damit im Vergleich zum Mit- und Gegensystem eine kleinere Hauptreaktanz im Nullsystem zur Folge hat. Die in die Kesselwand induzierten Ströme wirken dem Hauptfluss entgegen und senken die Hauptreaktanz im Nullsystem weiter ab. Bei Drehstrombänken und Fünfschenkeltransformatoren findet der Nullfluss einen freien magnetischen Rückschluss vor, wodurch die Hauptreaktanz in etwa gleich der Hauptreaktanz im Mit- und Gegensystem ist [1] [4].

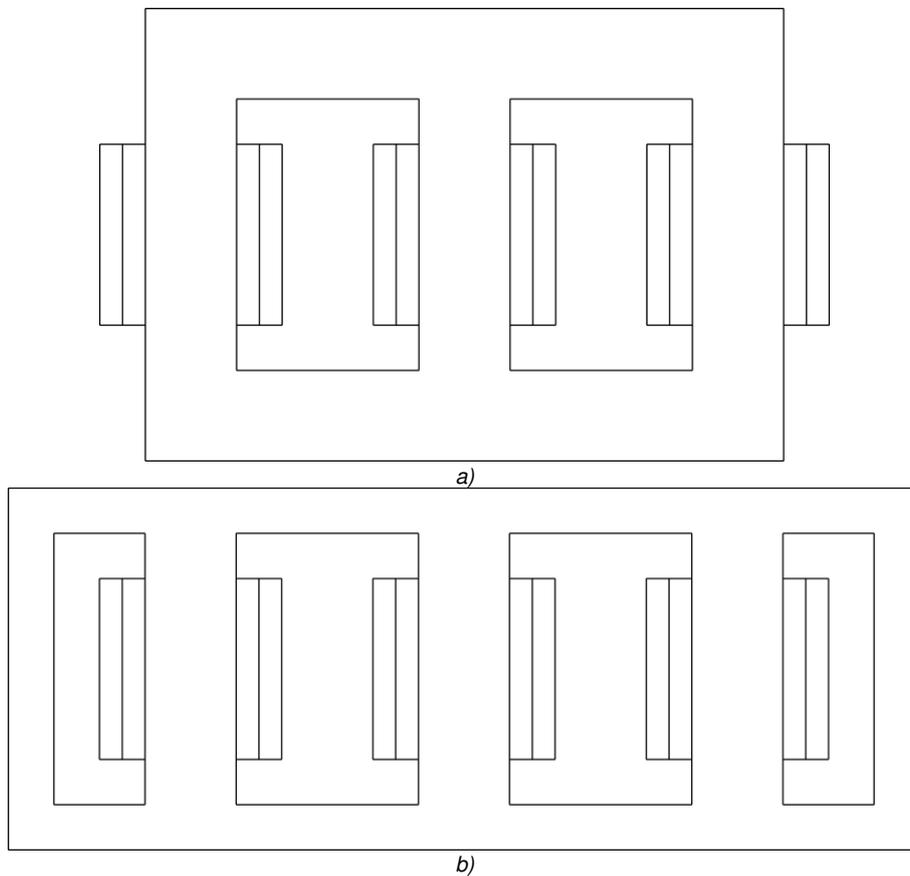


Abbildung 4: Bauformen von Transformator-kernen
a) Dreischenkel- b) Fünfschenkeltransformator

Weiters stellt sich die Frage wie die einzelnen Wicklungen der Primär- und Sekundärseite miteinander verschaltet werden. Dazu stehen unterschiedliche Schaltungen zur Verfügung, die Stern-, die Dreieck- und die Zick-Zack Schaltung, wobei ich mich in der Arbeit auf die Betrachtung der Stern- und Dreieckschaltung beschränke. Die Verschaltung wird beschrieben durch die sogenannte Schaltgruppe. Der erste Buchstabe der Schaltgruppe gibt die Verschaltung der Primärseite an, der zweite Buchstabe die Verschaltung der Sekundärseite und die Stundenziffer beschreibt in Vielfachen von 30° die Phasenverschiebung der Spannung der Sekundärseite gegenüber der Primärseite. Exemplarisch ist in Abbildung 5 die

Schaltgruppe Dyn5 dargestellt. Der Buchstabe n sagt aus, dass der Mittelpunktsteiter auf der Sekundärseite herausgeführt ist [3].

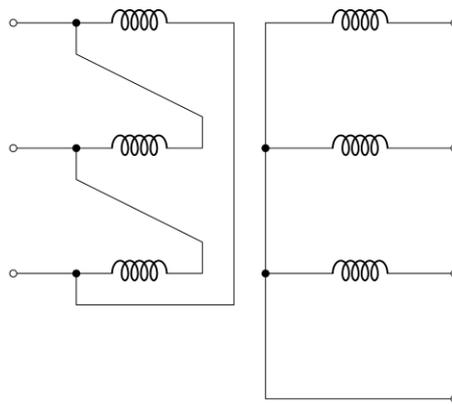


Abbildung 5: Schaltgruppe Dyn5

Die Nullreaktanz wird bestimmt durch die Bauform des Kerns, die Schaltgruppe und die Sternpunktbehandlung des Transformators. Damit überhaupt ein Nullsystem auftreten kann, ist die Unterspannungsseite in Stern geschaltet und der Sternpunkt mit Erde verbunden. Es gibt nun zwei unterschiedliche Arten, wie die Oberspannungsseite verschalten werden kann, in Dreieck oder in Stern mit und ohne geerdetem Sternpunkt. Wird die Oberspannungsseite in Dreieck geschaltet, bildet sich zur Folge des Nullstroms der Sternschaltung in dieser ein sogenannter Kreisstrom (gleichphasiger Strom in allen drei Wicklungen) aus. Dieser Kreisstrom erzeugt Flüsse, welche dem Nullfluss entgegengesetzt gerichtet sind und diesen größtenteils aufheben. Damit wird die Nullreaktanz im Wesentlichen durch die Streureaktanzen bestimmt. Abbildung 6 zeigt das Ersatzschaltbild des Transformator Nullsystems. Eine Dreieckschaltung ist dadurch charakterisiert, dass Schalter b in Querrichtung geschlossen und da kein Rückleiter vorhanden Schalter a in Längsrichtung offen ist. Wird hingegen die Oberspannungsseite in Stern verschalten und der Sternpunkt nicht geerdet, so erzwingt die Knotenregel die Stromsumme null. Daher können sich keine gleichphasigen Ströme überspannungsseitig ausbilden und beide Schalter sind offen. Ist der Sternpunkt auch überspannungsseitig geerdet, wird das Nullsystem übertragen, das wird im Ersatzschaltbild nachgebildet, indem Schalter a in Längsrichtung geschlossen ist. Gleiches gilt vice versa auch für die Unterspannungsseite [1].

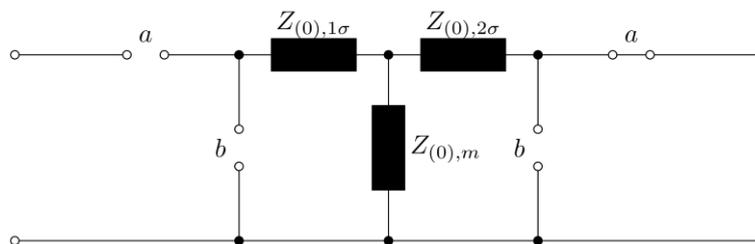


Abbildung 6: T - Ersatzschaltbild des Transformator Nullsystems

2.2.4. Regeltransformator

Neben seiner primären Aufgabe, dem Verbinden unterschiedlicher Spannungsebenen wird ein Transformator auch eingesetzt, um Wirk- und Blindleistungsflüsse zu beeinflussen. Um das zu zeigen, wird folgende Anordnung (Abbildung 7) untersucht, bestehend aus zwei Netzen, die über eine Reaktanz X (z.B. Leitung- bzw. Kurzschlussreaktanz) miteinander verbunden sind. Dabei beschreibt U_1 den Betrag der Spannung von Netz 1, U_2 den Betrag der Spannung von Netz 2 und δ die Phasenverschiebung zwischen beiden Netzen (Spannungen). Da zunächst nur symmetrische Betriebszustände modelliert werden, beschränkt sich die Betrachtung auf das Mitsystem, wobei bei der Berechnung auf den Index (1) verzichtet wird.

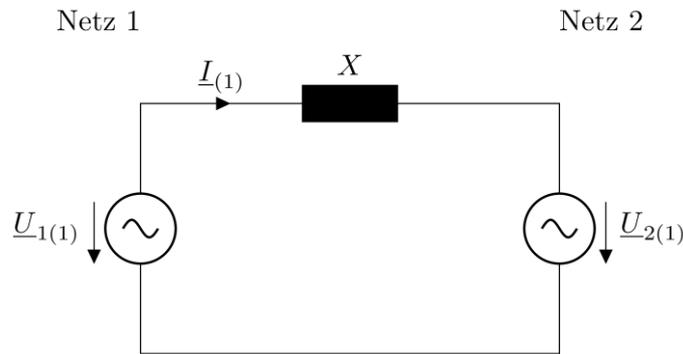


Abbildung 7: Ersatzschaltbild des Modellnetzes

Aus der Maschengleichung kann die Spannung \underline{U}_2 bestimmt werden.

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - j \cdot X \cdot \underline{I} \tag{24}$$

Die reelle Achse zeigt in Richtung \underline{U}_2 , daher ist der Phasenwinkel von \underline{U}_2 gleich null, die Spannung \underline{U}_1 eilt der Spannung \underline{U}_2 um den Winkel δ voraus.

$$\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j\delta} \qquad \underline{U}_2 = U_2 \tag{25}$$

Weiters wird die Leistung \underline{S}_2 wie folgt berechnet.

$$\underline{S}_2 = P_2 + j \cdot Q_2 = 3 \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* \tag{26}$$

Daraus kann die übertragene Wirk- und Blindleistung bestimmt werden.

$$P = 3 \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\delta) \qquad P_{kippp} = 3 \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \tag{27}$$

$$Q = 3 \cdot U_2 \cdot \frac{U_1 \cdot \cos(\delta) - U_2}{X} \tag{28}$$

In Abbildung 8 wird die Abhängigkeit der Wirkleistung vom Übertragungswinkel δ dargestellt. Die maximal übertragbare Leistung wird als Kippleistung P_{kippp} bezeichnet. Es ist zu erkennen, dass es für Leistungen unterhalb der Kippleistung zwei Schnittpunkte gibt, jedoch nur einer stellt einen stabilen Arbeitspunkt dar. Wird der Übertragungswinkel in Arbeitspunkt 1 (AP1) durch eine Störung geringfügig vergrößert, steigt die übertragene Leistung an. Diese zusätzliche Leistung muss vom Generator aus Netz 1 bereitgestellt werden, wodurch die rotierenden Massen aufgrund des Energieerhaltungssatzes abgebremst und der Übertragungswinkel verringert wird. Damit sind Arbeitspunkte mit einem Übertragungswinkel kleiner 90° stabil.

Führt man für einen Arbeitspunkt AP2 mit einem Winkel größer 90° dasselbe Gedankenexperiment durch, ist zu erkennen, dass die übertragene Leistung absinkt. Damit werden die Energie und die Drehzahl der rotierenden Massen vergrößert. Das hat zur Folge, dass der Übertragungswinkel weiter anwächst und der Arbeitspunkt daher instabil ist.

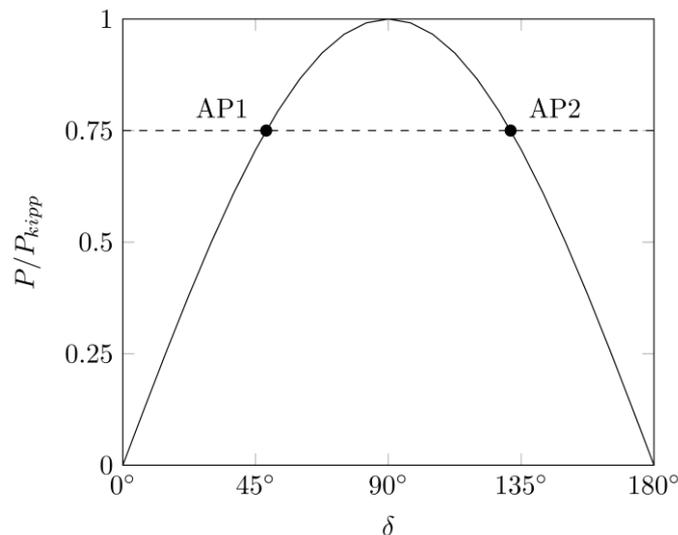


Abbildung 8: Übertragene Wirkleistung als Funktion des Übertragungswinkels δ

Ist der Übertragungswinkel sehr klein, so gilt die Näherung $\sin(\delta) \approx \delta$ und $\cos(\delta) \approx 1$.

$$P \approx 3 \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \delta \quad (29)$$

$$Q \approx 3 \cdot U_2 \cdot \frac{U_1 - U_2}{X} \quad (30)$$

An den beiden Näherungen ist zu erkennen, dass die übertragene Wirkleistung im Wesentlichen vom Übertragungswinkel und die Blindleistung im Wesentlichen von der Betragsdifferenz der beiden Knotenspannungen abhängig ist. Zur Änderung des Betrages bzw. Winkels der Knotenspannung, können sogenannte Regeltransformatoren eingesetzt werden.

Grundsätzlich wird zwischen drei Arten von Regeltransformatoren unterschieden, Längs-, Quer- und Schrägeregler. Bei der Längsregelung wird ausschließlich der Betrag der Spannung variiert und damit nach Formel (30) die übertragene Blindleistung. Die Querregelung verändert hauptsächlich die Phasenlage der Spannung und damit die Wirkleistung. Eine Kombination der beiden stellt die Schrägregelung dar, die sowohl Wirk- als auch Blindleistung verändert. Die entsprechenden Zeigerdiagramme sind in Abbildung 9 dargestellt [5].

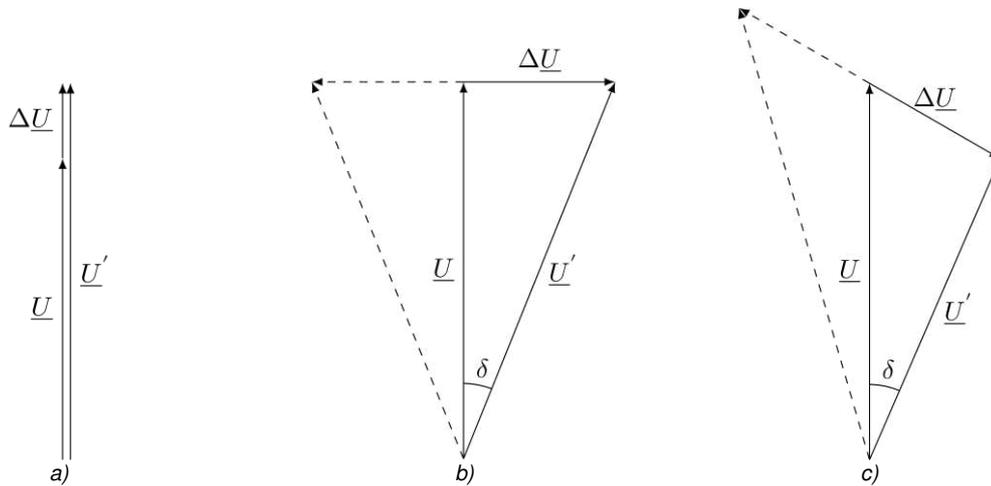


Abbildung 9: Zeigerdiagramme unterschiedlicher Regeltransformatoren
a) Längs- b) Quer- c) Schrägregelung

2.3. Transformator – Differentialschutz

Der Differentialschutz vergleicht den auf den jeweiligen Nennstrom normierten Primär- und Sekundärstrom des Transformators und bildet daraus den Differentialstrom i_{diff} . Überschreitet dieser den Ansprechwert erfolgt eine Auslösung.

Abbildung 10 zeigt den Fall eines außenliegenden Fehlers, das bedeutet, der Strom, der in den Transformator hineinfließt, fließt auch sekundärseitig aus dem Transformator heraus, damit ist der Differentialstrom gleich null. Liegt der Fehler hingegen im inneren des Schutzobjektes, also im Transformator, so addieren sich Primär- und Sekundärstrom und der Differentialstrom nimmt einen Wert ungleich null an, siehe Abbildung 11.

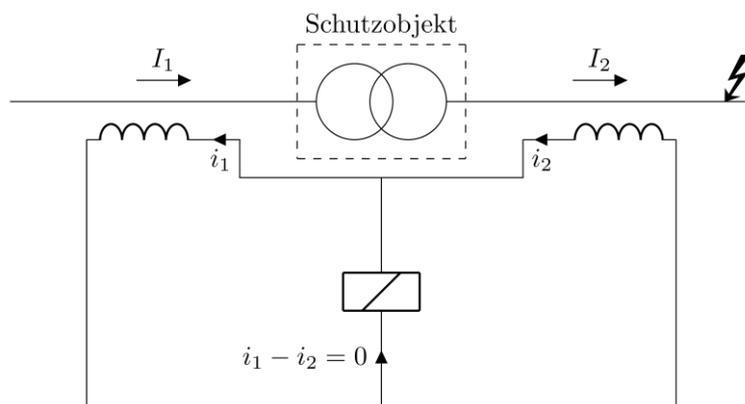


Abbildung 10: Bildung des Differentialstroms bei einem außenliegenden Fehler

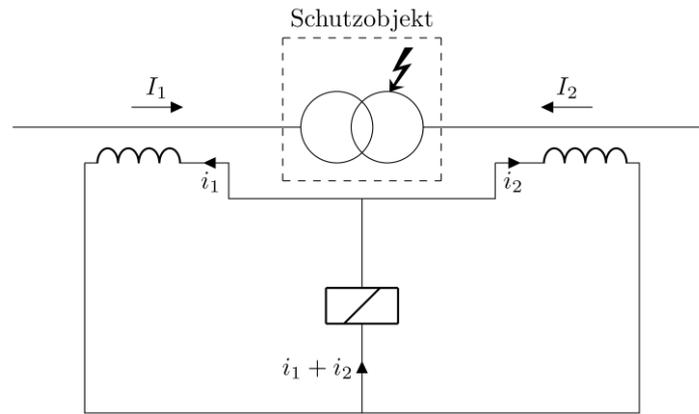


Abbildung 11: Bildung des Differentialstroms bei einem innenliegenden Fehler

Der Differentialstrom errechnet sich aus der Differenz des bezogenen Primär- und Sekundärstroms.

$$i_{diff} = \left| \frac{I_1}{I_{1N}} - \frac{I_2}{I_{2N}} \right| \quad (31)$$

Es kann jedoch auch zur Bildung eines Differentialstroms kommen durch Übersetzungsfehler oder Sättigungserscheinungen von Wandlern bei stromstarken außenliegenden Fehlern. Dieser Differentialstrom täuscht dem Schutz einen im Schutzbereich liegenden Fehler vor, wodurch es zu einer nicht selektiven Auslösung kommt. Mittels der sogenannten Stabilisierung kann eine solche Fehlerrauslösung verhindert werden. Dazu ermittelt das Schutzgerät neben dem Differentialstrom auch den Halte- bzw. Stabilisierungsstrom. Der Ansprechwert, also jener Wert, bei dem der Differentialschutz auslöst, nimmt mit steigendem Haltestrom zu, siehe Abbildung 12. Der Stabilisierungsstrom wird aus der Betragssumme der beiden Ströme geteilt durch den Faktor 2 errechnet.

$$i_{stab} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left| \frac{I_1}{I_{1N}} \right| + \left| \frac{I_2}{I_{2N}} \right| \right) \quad (32)$$

In der Arbeit werden folgende Schutzeinstellungen verwendet. Der Ansprechwert bei einem Haltestrom null ist 0,4, gefolgt von zwei Geradenstücken mit einer Steigung von 0,3 bzw. 0,7. Der erste Knick ist beim Schnittpunkt der Kennlinie mit der Fehlerstromkennlinie bei einseitiger Einspeisung. Der zweite Knickpunkt ist bei einem Stabilisierungsstrom von 4 [5] [6].

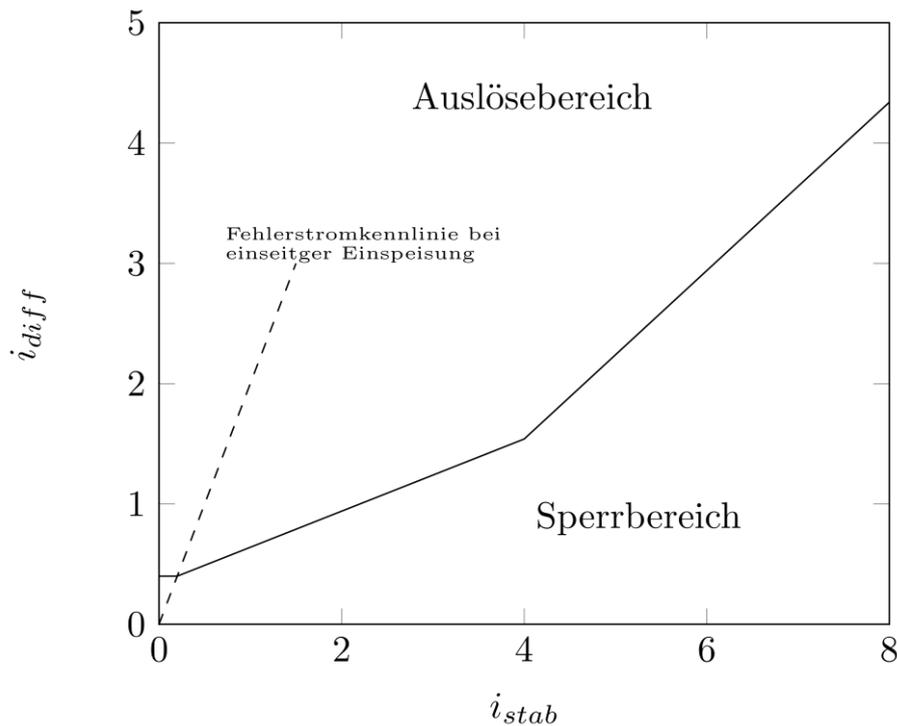


Abbildung 12: Auslösekennlinie des stabilisierten Differentialschutzes

2.4. Fehlerarten

In der Arbeit werden lediglich Hauptfehler untersucht, das sind Fehler in Phase a bzw. jene, welche symmetrisch zur Phase a liegen, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Hauptfehler

Fehlerart	Betroffene Phasen
3 – poliger Kurzschluss ohne (mit) Erdberührung	a, b, c, (N)
2 – poliger Kurzschluss ohne (mit) Erdberührung	b, c, (N)
1 – poliger Erdkurschluss (Erdschluss)	a, N

Für Fehler in anderen Phasen, erhalten die Fehlerbedingungen in symmetrischen Komponenten Drehoperatoren, eine detaillierte Beschreibung ist in den Vorlesungsunterlagen zur LVA Fehlerberechnung in Drehstromnetzen [1] zu finden.

2.4.1. 3 – poliger Kurzschluss

In Abbildung 13 a) ist das Schaltbild für einen 3 – poligen Kurzschluss mit Erdberührung dargestellt. Daraus lassen sich folgende Fehlerbedingungen im abc - System ableiten.

$$\underline{U}_{aN} = \underline{U}_{bN} = \underline{U}_{cN} = 0 \quad (33)$$

Mittels Transformationsmatrix können die Fehlerbedingungen in das 012 - System transformiert werden.

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} = 0 \quad (34)$$

Daraus erhält man das in Abbildung 13 b) gezeigt Schaltbild in symmetrischen Komponenten.



Abbildung 13: 3 - poliger Kurzschluss mit Erdberührung
a) abc – System b) 012 - System

Bei einer symmetrischen Speisung befindet sich lediglich im Mitsystem eine Spannungsquelle, die Ströme im Gegen- und Nullsystem sind daher null. Der Strom im Mitsystem kann wie folgt berechnet werden.

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{(1)}} \quad (35)$$

$$\underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = 0 \quad (36)$$

Mittels Rücktransformationsmatrix werden die Ströme vom 012 – System in das abc – System transformiert.

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{(1)} \quad (37)$$

$$\underline{I}_b = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (38)$$

$$\underline{I}_c = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (39)$$

Da es sich hierbei um einen symmetrischen Fehler handelt, sind die Fehlerströme in allen 3 Phasen dem Betrag nach gleich groß.

$$I''_{k3p} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} \quad (40)$$

Im Falle eines 3 – poligen Kurzschlusses ohne Erdberührung entfällt der Kurzschluss im Nullsystem, das hat jedoch bei symmetrischer Speisung keinen Einfluss auf das Ergebnis, da sich nur im Mitsystem eine Spannungsquelle befindet und der Strom im Nullsystem ohnehin null ist.

Im Allgemeinen stellt der 3 – polige Kurzschlussstrom den höchsten Fehlerstrom dar und wird daher für die Bemessung der Betriebsmittel (z.B. Schaltgeräte) verwendet.

2.4.2. 2 – poliger Kurzschluss ohne Erdberührung

Bei einem zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung zwischen Phase b und c werden zur Folge der Fehlerbedingungen Mit- und Gegensystem parallel geschaltet, siehe Abbildung 14.

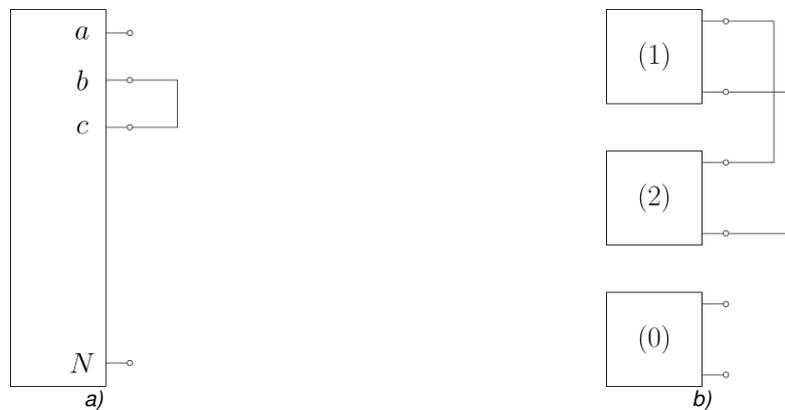


Abbildung 14: 2 - poliger Kurzschluss ohne Erdberührung
a) abc - System b) 012 - System

Damit ergeben sich folgende Ströme im Mit- bzw. Gegensystem.

$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)})} \quad (41)$$

Mittels Rücktransformationsmatrix aus Abschnitt 2.1 lassen sich die Ströme in den drei Phasen bestimmen.

$$\underline{I}_a = 0 \quad (42)$$

$$\underline{I}_b = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{(1)} \quad (43)$$

$$\underline{I}_c = -\underline{I}_b \quad (44)$$

In den meisten passiven Netzen ist die Vereinfachung zulässig, dass die Impedanz im Mit- und Gegensystem gleich groß ist. Der Betrag des Stroms lässt sich wie folgt bestimmen.

$$I''_{k2p} = \frac{c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} \approx \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} \quad (45)$$

Wird nun der 2 – polige Kurzschlussstrom auf den 3 – poligen Kurzschlussstrom bezogen ist zu erkennen, dass dieser um etwa 13,4% kleiner ist.

$$\frac{I''_{k2p}}{I''_{k3p}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866 \quad (46)$$

2.4.3. 2 – poliger Kurzschluss mit Erdberührung

Bei einem 2 – poligen Kurzschluss mit Erdberührung, wird zusätzlich das Nullsystem parallel zum Gegensystem geschaltet. Das hat zur Folge, dass die Nullimpedanz und damit auch die Sternpunktbehandlung die Höhe des Fehlerstroms mitbestimmen.

Das entsprechende Schaltbild im abc – System bzw. 012 – System ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: 2 - poliger Kurzschluss mit Erdberührung
a) abc – System b) 012 - System

2.4.4. 1 – poliger Erdkurzschluss (Erdschluss)

Der am häufigsten vorkommenden Fehler (75 %...85 %) ist der 1 - polige Erdschluss (Erdschluss). Aufgrund der Fehlerbedingungen werden in den symmetrischen Komponenten alle drei Systeme in Serien geschaltet (Abbildung 16), daher spielt das Nullsystem eine entscheidende Rolle.



Abbildung 16: 1 - poliger Erdschluss (Erdschluss)
a) abc – System b) 012 - System

Der Strom, der alle drei Systeme durchfließt, kann wie folgt berechnet werden.

$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)})} \quad (47)$$

Durch Rücktransformation erhält man den Strom in Phase a.

$$\underline{I}_a = 3 \cdot \underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{(\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)})} \quad (48)$$

Der Betrag wird wie folgt berechnet.

$$I''_{k1p} \approx \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(0)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(1)}|} \quad (49)$$

Wieder wird der Quotient zwischen dem 1 - poligen und dem 3 - poligen Kurzschlussstrom gebildet. In den meisten Fällen ist die Nullimpedanz an der Fehlerstelle größer als die Mitimpedanz, wodurch der 1 – polige Fehlerstrom kleiner als der 3 – polige Fehlerstrom ist. In einem kompensierten (verlustfreien) Netz geht die Nullimpedanz im Resonanzfall gegen unendlich, wodurch der 1 – polige Kurzschlussstrom verschwindet und der Quotient null wird [2].

$$\frac{I''_{k1p}}{I''_{k3p}} \approx \frac{3 \cdot \underline{Z}_{(1)}}{|\underline{Z}_{(0)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(1)}|} \quad (50)$$

3. Modellierung

3.1. Modellierung des Netzes in symmetrischen Komponenten

In der Arbeit sollen die Auswirkungen untersucht werden, die die Längs-, Schräg- bzw. auch Querregelung des Transformators auf die Selektivität des Transformator - Differentialschutzes haben. Das dazu verwendete Modellnetz besteht aus drei Elementen, dem Netz, dem Regeltransformator und einer Leitung an deren Ende ein Fehler simuliert wird, siehe Abbildung 17.

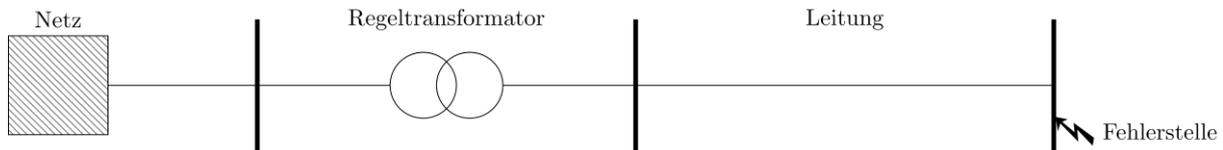


Abbildung 17: Modellierung des Netzes

3.1.1. Modellierung des Netzes

Das Ersatzschaltbildes des Netzes im Mitsystem besteht aus einer idealen Quelle, einem ohmschen Widerstand und einer Induktivität. Charakterisiert wird das Netz typischerweise mit der Kurzschlussleistung, der Nennspannung und dem Verhältnis R/X . Da lediglich 220 kV und 380 kV Netze modelliert werden, ist das Verhältnis R/X üblicherweise in der Größenordnung von 0,1 [7]. Bei symmetrischer Speisung entfällt im Gegensystem die Quelle und das Netz wird lediglich durch den ohmschen Widerstand und die Induktivität beschrieben. Da der Transformator bei allen Simulationen überspannungsseitig nicht geerdet wird, muss das Nullsystem nicht weiter behandelt werden [2].

$$Z_N = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} \quad (51)$$

$$X_N = \frac{Z_N}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_N}{X_N}\right)^2}} \quad (52)$$

$$R_N = X_N \cdot \left(\frac{R_N}{X_N}\right) \quad (53)$$

3.1.2. Modellierung des Transformators

Der Transformator wird im Mit- und Gegensystem durch die Kurzschlussimpedanz beschrieben. Der Einfachheit halber wird der ohmsche Widerstand mit null angenommen. Mittels Nennleistung, Nennspannung und bezogener Kurzschlussleistung lässt sich die entsprechende Reaktanz ermitteln.

$$Z_T = j \cdot X_T = j \cdot \frac{u_k \cdot U_n^2}{S_n} \quad (54)$$

$$R_T = 0 \quad (55)$$

Wie bereits im Abschnitt 2.2.3 näher erläutert, bestimmt die gewählte Schaltgruppe und Sternpunktbehandlung die Impedanz im Nullsystem. In der Arbeit werden nur Transformatoren mit der Schaltgruppe YNyn0/d5 untersucht. Das bedeutet, dass sowohl die Primär- als auch

die Sekundärseite in Stern geschaltet sind, wobei beide Mittelpunktsleiter herausgeführt werden. Im Betrieb ist es jedoch sinnvoll, dass nur einer der beiden Sternpunkte geerdet ist, da sonst ein etwaiges auftretendes Nullsystem verschleppt wird. Der Transformator besitzt noch ein drittes Wicklungssystem, die sogenannte Ausgleichswicklung, die in Dreieck geschaltet ist. Um das Ersatzschaltbild des Transformator Nullsystems (Abbildung 18) zu erhalten, wird wie in Abschnitt 2.2.3 vorgegangen, wobei das Modell um einen dritten Pfad erweitert wird, welcher die Tertiärwicklung darstellt. Da sowohl Ober- als auch Unterspannungsseite in Stern geschaltet sind, sind die Schalter in Querrichtung offen. Die Schalterstellung in Längsrichtung ist abhängig, von der jeweiligen Sternpunktbehandlung. Die Tertiärwicklung ist in Dreieck geschaltet, daher ist der Schalter in Querrichtung zu.

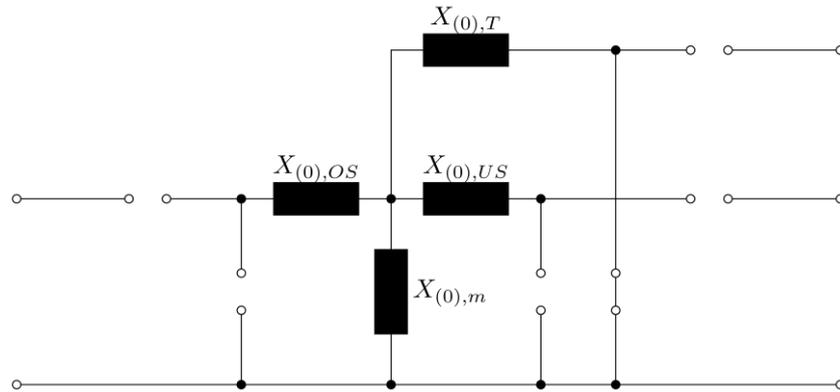


Abbildung 18: Ersatzschaltbild des Nullsystems eines Transformators mit Ausgleichswicklung

Weiters gilt, dass ähnlich wie bei einer Dy - Schaltung die Hauptreaktanz in guter Näherung vernachlässigt werden kann, damit ergibt sich das in Abbildung 19 dargestellte Ersatzschaltbild [1].

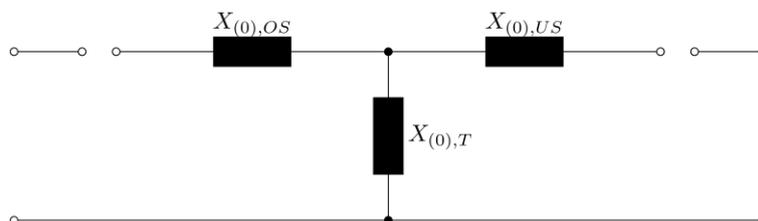


Abbildung 19: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Nullsystems eines Transformators mit Ausgleichswicklung

110 kV Netze werden üblicherweise gelöscht betrieben, dazu wird der unterspannungsseitige Sternpunkt induktiv über eine Petersenspule geerdet. Die Petersenspule bildet mit den Leitungskapazitäten eine Parallelschwingkreis, wodurch sich der kapazitive Fehlerstrom und der induktive Strom über die Petersenspule kompensieren, siehe Abbildung 20.

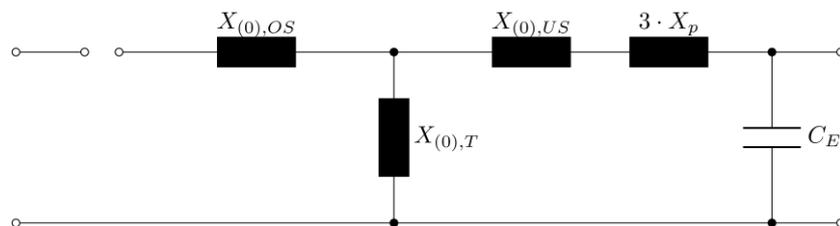


Abbildung 20: Ersatzschaltbild des Nullsystems bei Erdschlusskompensation

Durch Abstimmen des Schwingkreises geht die Impedanz im idealen Resonanzfall gegen unendlich. Bei der Berechnung wird die Nullreaktanz des Transformators vernachlässigt.

$$j 3 \cdot X_p + \frac{1}{j \omega \cdot C_E} = 0 \quad (56)$$

$$X_p = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_E} \quad (57)$$

In der Regel wird nicht exakt auf Resonanz abgestimmt, denn dadurch würde beim Erdschluss die maximale Verlagerungsspannung auftreten, das wäre bei einem 110 kV Netz 63 kV. Weiters bildet sich auch im Normalbetrieb eines ausgedehnten nicht ausgekreuzten Freileitungsnetzes eine nicht mehr tolerierbare (> 10%) Verlagerungsspannung aus. Um die Verlagerungsspannung zu begrenzen wird eine Überkompensation vorgenommen, das bedeutet, die Reaktanz der Petersenspule wird reduziert. Weiters bewegt man sich vom Resonanzpunkt weg, wenn die Netzkapazität durch einen Erdschluss verkleinert wird. In der Arbeit gehen wir von einer Überkompensation von 5% aus [5].

$$X_p = 0,95 \cdot \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_E} \quad (58)$$

Im Gegensatz dazu, werden 220 kV Netze im Allgemeinen geerdet betrieben, dazu wird im Modell der unterspannungsseitige Sternpunkt mit Erde verbunden. Dadurch liegt die Nullreaktanz in der Größenordnung der Reaktanz im Mit- und Gegensystem, siehe Abbildung 21 [8].

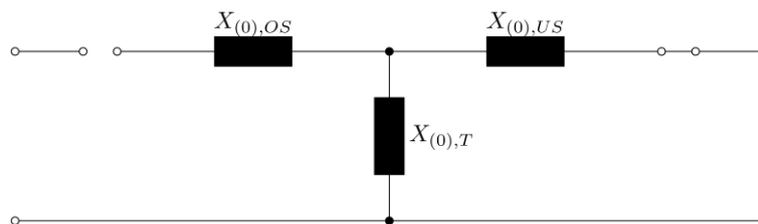


Abbildung 21: Ersatzschaltbild des Nullsystems bei geerdetem Sternpunkt

Um die Fehlerströme an der Fehlerstelle ermitteln zu können, müssen die Impedanzen von der Oberspannungsseite des Transformators auf die Unterspannungsseite umgerechnet werden.

Das komplexe Übersetzungsverhältnis $\underline{\ddot{u}}$ beschreibt das Verhältnis der primär- und sekundärseitigen Spannung unter Berücksichtigung der Phasenbeziehung.

$$\underline{\ddot{u}} = \frac{U_1}{U_2} \quad (59)$$

Weiters gilt, die Leistung muss bei einem idealen Transformator auf der Ober- und Unterspannungsseite gleich sein.

$$\underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* - \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = 0 \quad (60)$$

Damit kann das Verhältnis der Ströme bestimmt werden.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2^*}{U_1^*} = \frac{1}{\underline{\ddot{u}}^*} \quad (61)$$

Daraus folgt der Zusammenhang der Impedanzen ober- und unterspannungsseitig.

$$\underline{Z}_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{\underline{u}} \cdot \frac{1}{\underline{I}_1 \cdot \underline{u}^*} = \frac{1}{\underline{u}^2} \cdot \frac{U_1}{I_1} = \frac{1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_1 \quad (62)$$

Die Transformation der Impedanz von der Ober- auf die Unterspannungsseite beeinflusst lediglich den Betrag nicht aber den Winkel.

3.1.3. Modellierung der Leitung

Bei der Leitung handelt es sich wahlweise um eine 110 kV bzw. 220 kV Leitung. Da bei der Simulation über die Leitungsimpedanz lediglich die unterschiedlichen Fehlerströme eingestellt werden, ist die Impedanz in allen drei Systemen gleich groß, siehe Abbildung 22. Das R/X – Verhältnis ist bei einer 110 kV Leitungen ungefähr 0,3 und bei einer 220 kV Leitungen 0,2 [2].

3.1.4. Gesamtmodell

Damit ergibt sich das in Abbildung 22 dargestellt Gesamtersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten, wobei die Spannung $\underline{U}_{(1)}$ aus dem Quotienten der Netzspannung (Sternspannung) und dem komplexen Übersetzungsverhältnis des Regeltransformators errechnet wird.

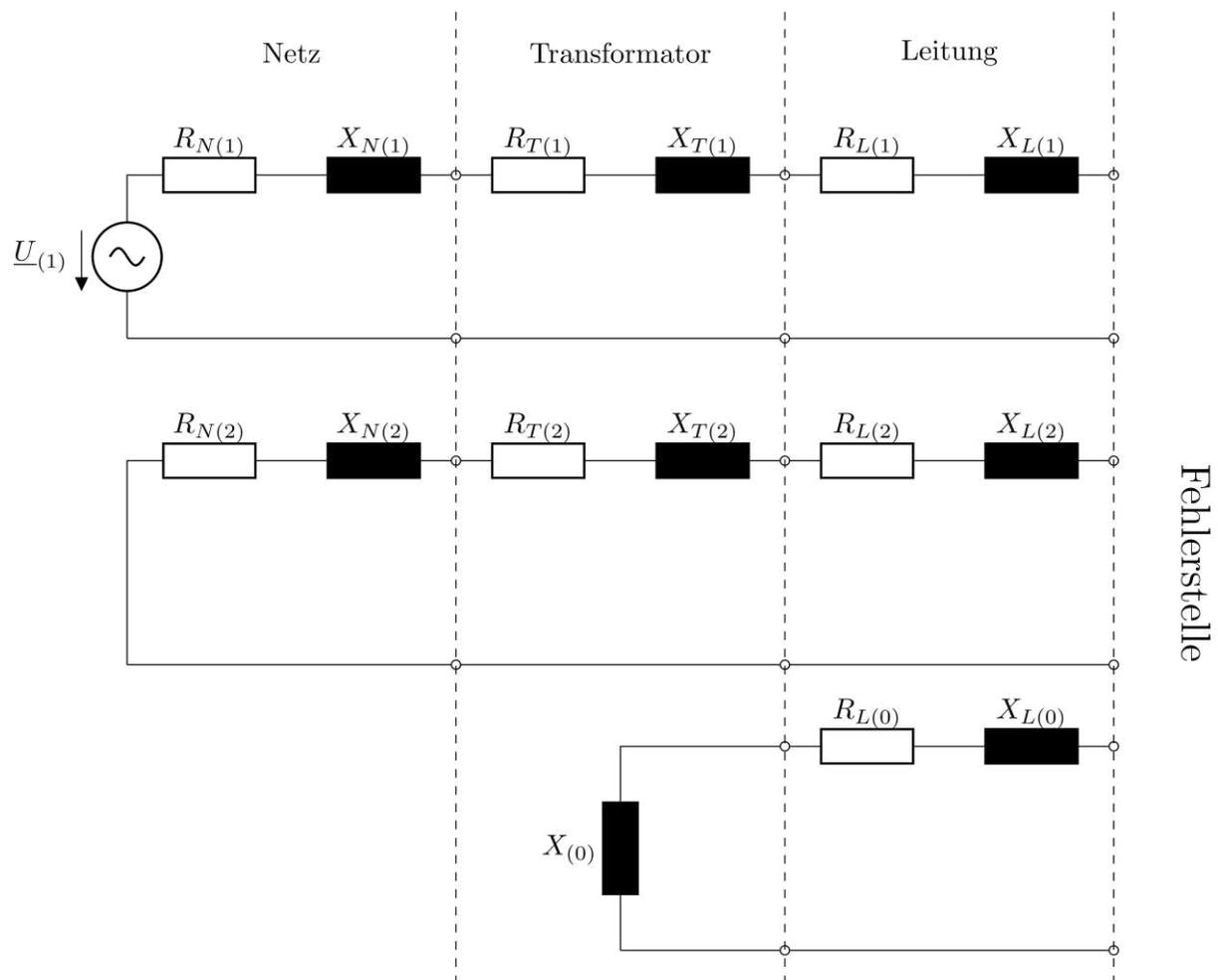


Abbildung 22: Ersatzschaltbild des Modellnetzes in symmetrischen Komponenten

Die Verschaltung der einzelnen Systeme an der Fehlerstelle wurde bereits in Abschnitt 2.4 näher erläutert.

3.2. Modellierung des Regeltransformators und Beschreibung des Simulink - Modells

3.2.1. Längs- bzw. Schrägregelung

Eine Längs- bzw. Schrägregelung kann realisiert werden indem die primärseitige Wicklung in eine Stamm- und eine sternpunktseitige Regelwicklung unterteilt wird. Ist die Stammwicklung mit der Regelwicklung derselben Phase verbunden, handelt es sich um eine Längsregelung. Wird hingegen die Stammwicklung mit einer Regelwicklung einer der beiden anderen Phasen verbunden erhält man eine Schrägregelung, siehe Abbildung 23.

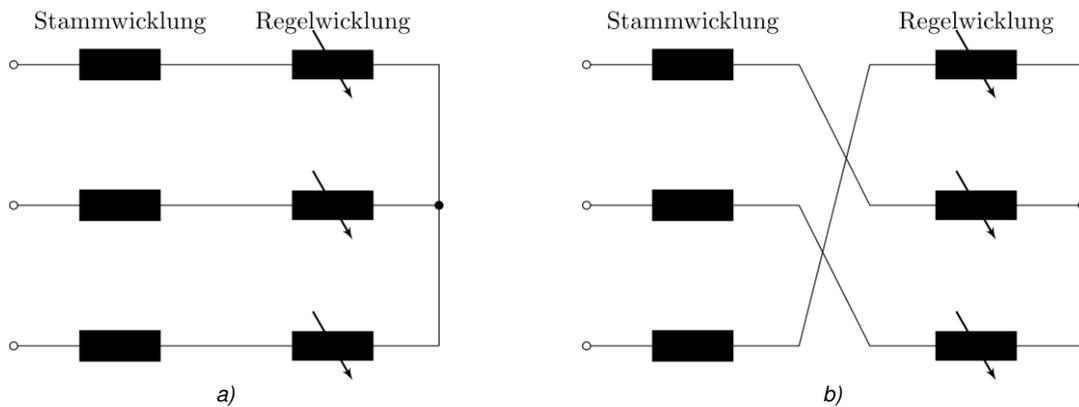


Abbildung 23: Ersatzschaltbild der Primärwicklung der Längs- bzw. Schrägregelung
a) Längs- b) Schrägregelung

Weiters stellt sich die Frage, welche primärseitigen Ströme sich beim Einsatz der Schrägregelung und unsymmetrischer sekundärseitiger Belastung einstellen. Hier ist exemplarisch der Fall dargestellt, dass die Stammwicklung aus Phase a mit der Regelwicklung aus Phase b verbunden ist (Abbildung 24). Analog können die primärseitigen Ströme bestimmt werden, wenn die Stammwicklung mit der Regelwicklung aus Phase c verbunden ist.

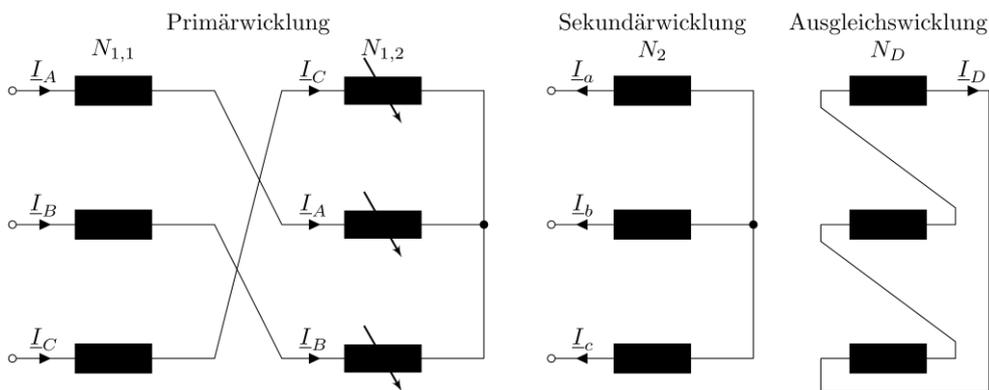


Abbildung 24: Ersatzschaltbild der Schrägregelung

Um die drei primären Ströme bestimmen zu können, werden drei Gleichungen benötigt, die beiden Durchflutungsgleichungen über beide Transformatorfenster und die Knotengleichung im primärseitigen Sternpunkt. Da die Durchflutung der Dreiecksausgleichswicklung sowohl mit positivem als auch negativem Vorzeichen in der Durchflutungsgleichung auftritt kann diese vernachlässigt werden.

$N_{1,1}$ beschreibt die Windungszahl der primären Stammwicklung, $N_{1,2}$ die Windungszahl der Regelwicklung und N_2 die Windungszahl der Sekundärwicklung.

$$N_{1,1} \cdot I_A + N_{1,2} \cdot I_C - N_{1,2} \cdot I_A - N_{1,1} \cdot I_B = N_2 \cdot (I_a - I_b) \quad (63)$$

$$N_{1,1} \cdot I_B + N_{1,2} \cdot I_A - N_{1,2} \cdot I_B - N_{1,1} \cdot I_C = N_2 \cdot (I_b - I_c) \quad (64)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (65)$$

$$\left(1 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right) \cdot I_A - I_B + \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} \cdot I_C = \frac{N_2}{N_{1,1}} \cdot (I_a - I_b) \quad (66)$$

$$\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} \cdot I_A + \left(1 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right) \cdot I_B - I_C = \frac{N_2}{N_{1,1}} \cdot (I_b - I_c) \quad (67)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (68)$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} & -1 & \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} \\ \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} & 1 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_2}{N_{1,1}} & -\frac{N_2}{N_{1,1}} & 0 \\ 0 & \frac{N_2}{N_{1,1}} & -\frac{N_2}{N_{1,1}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (69)$$

Formel (70) beschreibt die Primärströme in Abhängigkeit der sekundärseitigen Ströme und der Schrägregelung.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\left(\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right)^2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1} \cdot \begin{bmatrix} 2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} & \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1 & \left(\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right)^2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1 \\ -\left(\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1\right) & 1 - 2 \cdot \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} & \left(\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right)^2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1 \\ -\left(1 - 2 \cdot \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right) & -\left(2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right) & \left(\frac{N_{1,2}}{N_{1,1}}\right)^2 - \frac{N_{1,2}}{N_{1,1}} + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (70)$$

In Abbildung 40 ist das Simulink Modell der Längs- bzw. Schrägregelung abgebildet. Es besteht aus einer idealen Quelle mit einer in Reihe geschalteten Netzimpedanz, gefolgt vom Regeltransformator und einer Leitung. Am Ende der Leitung befindet sich ein Block zur Modellierung des Fehlers. Simulink erlaubt nicht, dass eine Induktivität und ein Fehlerblock direkt in Serie geschaltet werden, daher befindet sich dazwischen eine parallel geschaltete Last mit 1 W.

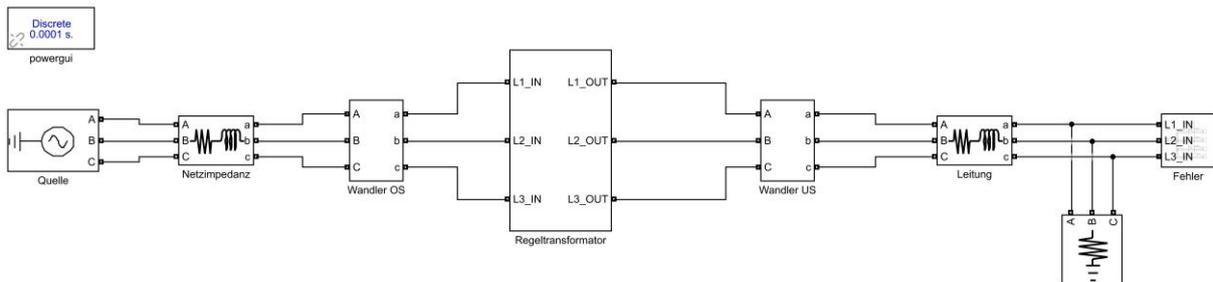


Abbildung 25: Modellübersicht der Längs- bzw. Schrägregelung

Durch Doppelklick auf den Regeltransformator erscheint folgende Eingabemaske (Abbildung 26).

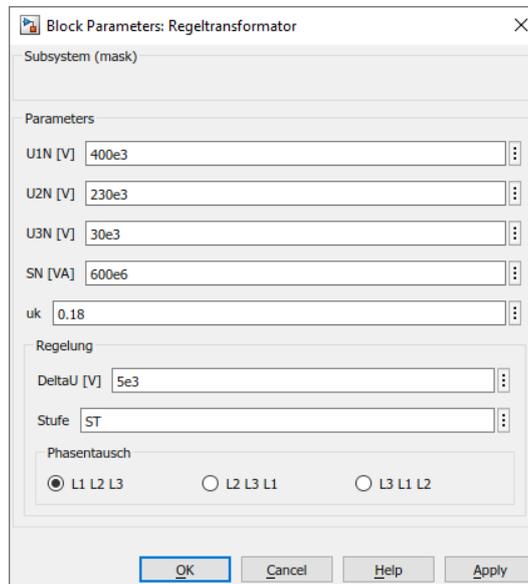


Abbildung 26: Eingabemaske der Längs- bzw. Schrägregelung

In dieser Maske können die wesentlichen Parameter des Regeltransformators festgelegt werden. Dazu zählen die ober- und unterspannungsseitige Nennspannung, die Nennspannung der Tertiärwicklung, die Nennleistung des Transformators, die Kurzschlussspannung, das ΔU zwischen zwei Stufe und die Reglerstufe. Weiters kann noch die Verschaltung der Stammwicklung mit der Regelwicklung ausgewählt werden.

Sowohl die Impedanz des Netzes als auch die Leitung wird modelliert mittels eines RL – Gliedes, siehe Abbildung 27. Durch Multiplikation mit dem Faktor $1/\omega$ (bei 50 Hz $1/314,15$) erhält man aus einer Reaktanz eine Induktivität.

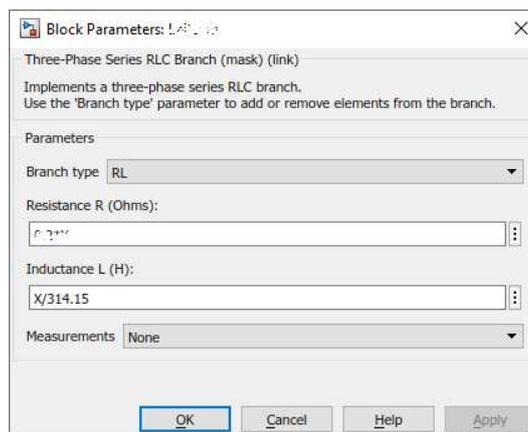


Abbildung 27: Eingabemaske eines RL - Gliedes (gültig für Netzimpedanz und Leitung)

Die Modellierung des Regeltransformators erfolgt in zwei Stufen. Mit der ersten Stufe wird die eigentliche Regelung modelliert, die zweite Stufe beschreibt den Leistungstransformator, siehe Abbildung 28. Die Tertiärwicklung der zweiten Stufe, also die Ausgleichswicklung, ist unbelastet, da wir von einem Eigenbedarf null ausgehen.

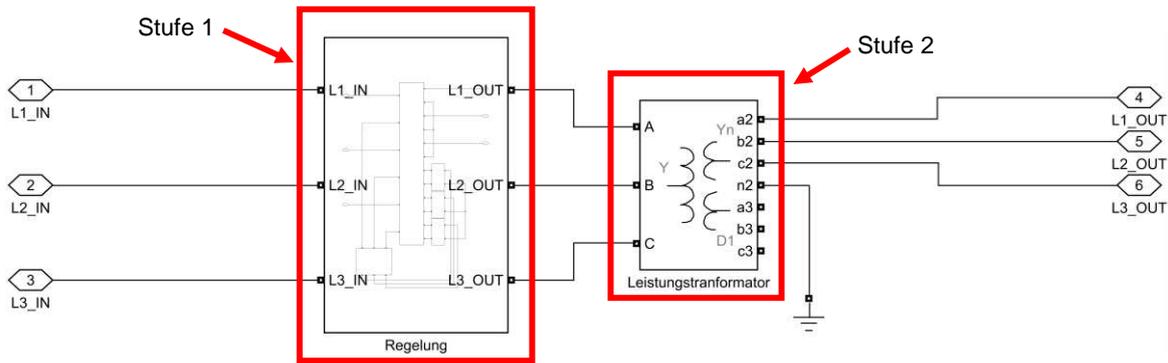


Abbildung 28: Detailansicht der Längs- bzw. Schrägregelung

Die eigentliche Regelung besteht aus drei Blöcken, einem nahezu idealen Transformator, dem Phasentauscher und drei identen Blöcken zur Vorzeichenumkehr, siehe Abbildung 29.

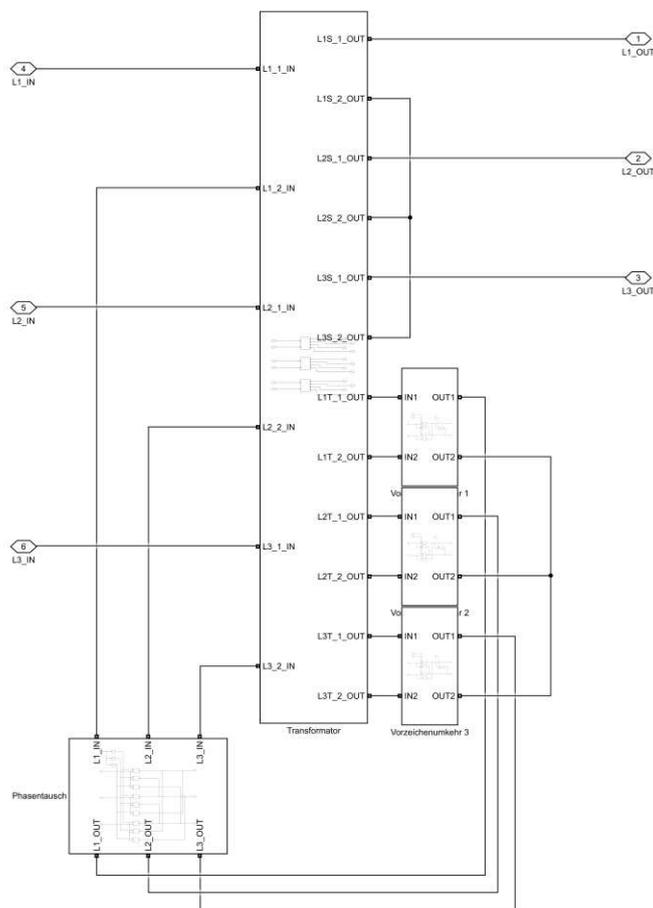


Abbildung 29: Detailansicht der Regelung (Stufe 1)

Der Block mit dem Namen Phasentausch ist in Abbildung 30 dargestellt. Er dient dazu, die Stammwicklung mit den unterschiedlichen Regelwicklungen zu verbinden. Für die Stammwicklung aus Phase a, gibt es dazu drei Möglichkeiten. Wird die Stammwicklung mit der Regelwicklung aus Phase a verbunden, wird eine Längsregelung modelliert, wird hingegen die Stammwicklung mit der Regelwicklung aus Phase b oder c verbunden, erhält man eine Schrägregelung. Die Auswahl erfolgt mittels der Variable PT.

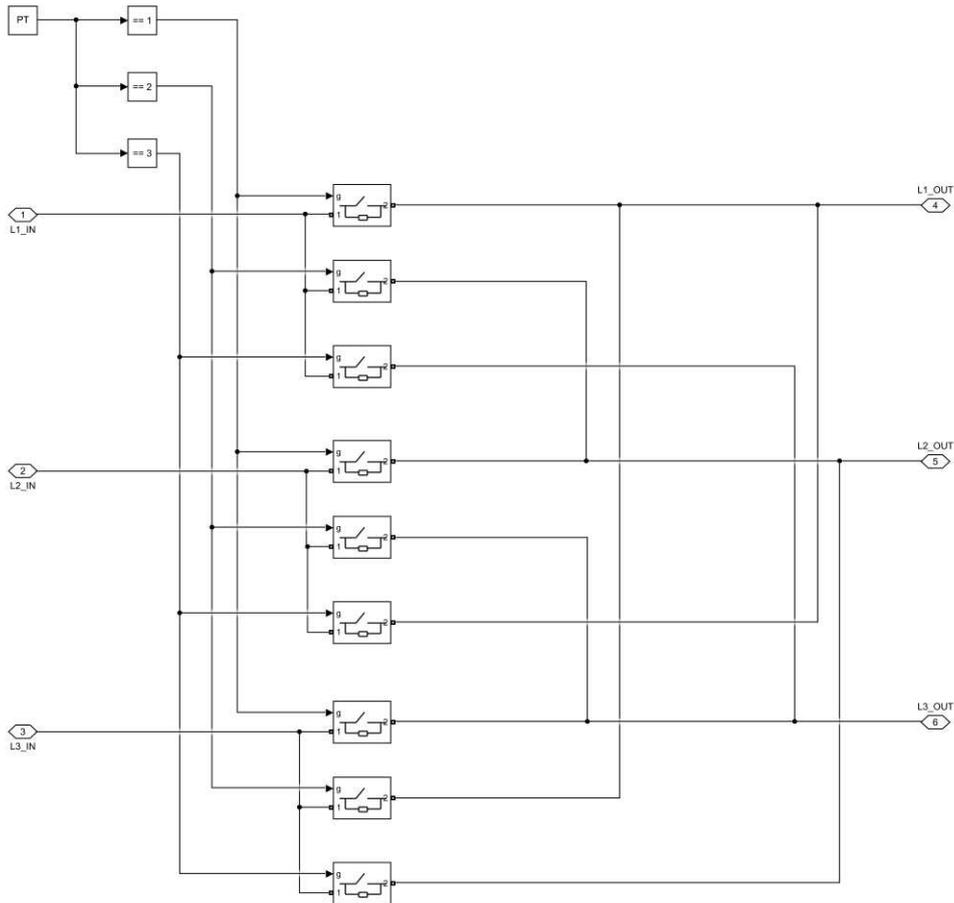


Abbildung 30: Detailansicht des Phasentauchers

Der Block Vorzeichenumkehr (Abbildung 31) hat zwei Funktionen. Auf der einen Seite wird mit diesem Block das Vorzeichen der Zusatzspannung geändert, auf der anderen Seite, können die beiden Ausgänge kurzgeschlossen werden. Das ist notwendig, da die Spannung eines Wicklungssystems null in Simulink nicht zulässig ist. Die beiden Variablen SW1 und SW2 werden benötigt, um das Vorzeichen der Zusatzspannung zu bestimmen. SW3 betätigt den Schalter zum Kurzschließen der Ausgänge.

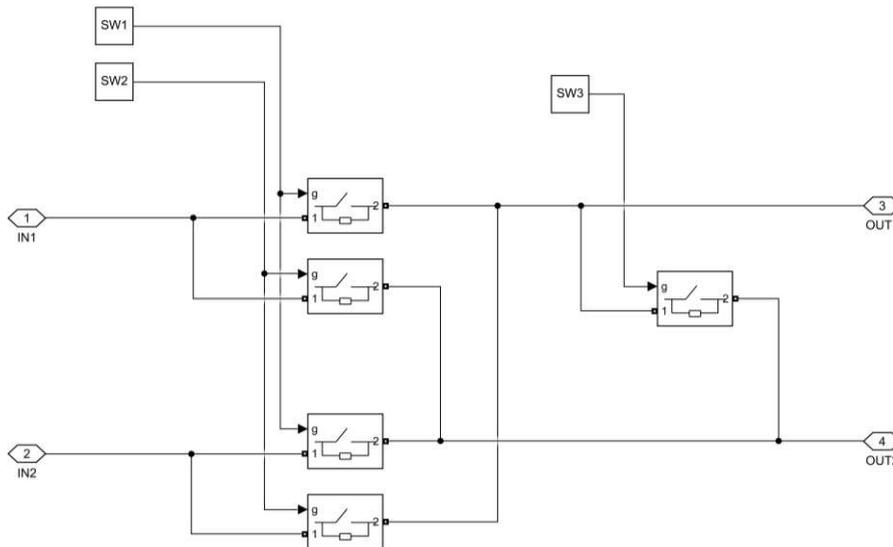


Abbildung 31: Detailansicht der Vorzeichenumkehr

Der letzte noch fehlende Block aus Stufe 1 ist der Transformator (Abbildung 32). Er ist aufgebaut aus drei einphasigen Transformatoren mit jeweils 3 Wicklungssystemen. Das dritte Wicklungssystem wird benötigt, da es in jeder Phase neben der überspannungsseitigen Stammwicklung und der unterspannungsseitigen Wicklung noch eine Regelwicklung gibt. Der Transformator ist nur nahezu ideal, da zwar die ohmschen Widerstände in Längsrichtung null sind, aber die Induktivitäten normiert einen Wert von $1 \cdot 10^{-6}$ haben. Weiters haben der ohmsche Widerstand und die Induktivität in Querrichtung einen bezogenen Wert von 5000, siehe Abbildung 33. Diese Wahl ist Simulink geschuldet, da anderenfalls keine Simulation möglich wäre.

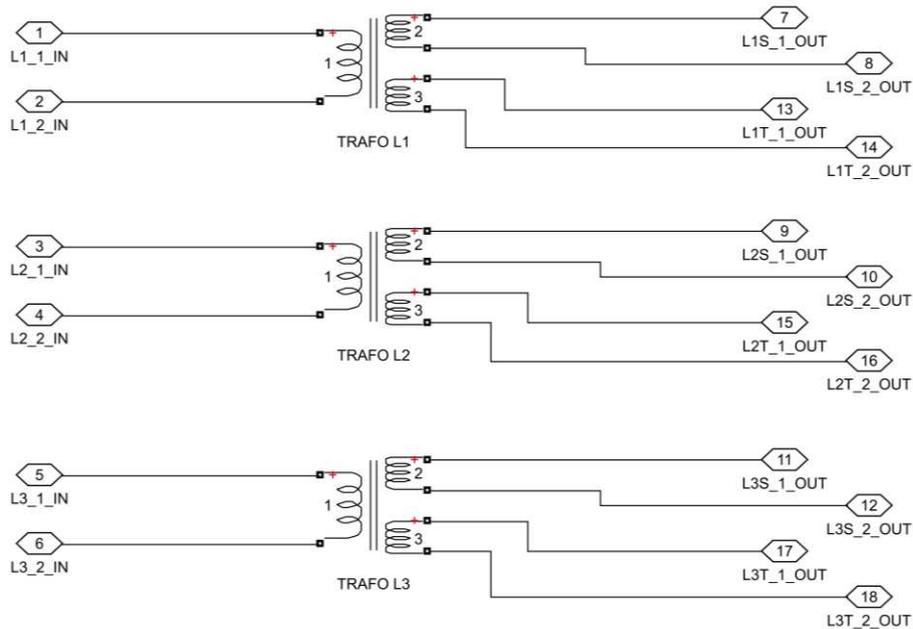


Abbildung 32: Detailsicht des Transformators (Längs- bzw. Schrägregelung)

Wicklung 1 ist die primäre Stammwicklung, Wicklung 2 ist die unterspannungsseitige Wicklung und Wicklung 3 ist die Regelwicklung. Sowohl Wicklung 1 als auch Wicklung 2 haben dieselbe Nennspannung U_{1N} , da die eigentliche Übersetzung erst in der zweiten Stufe erfolgt. Die Nennspannung der dritten Wicklung ergibt sich aus dem Produkt des Betrages der Stufe und dem ΔU , siehe Abbildung 33. Die Leistung des Transformators wird gleich der Nennleistung gesetzt und die Frequenz beträgt 50 Hz.

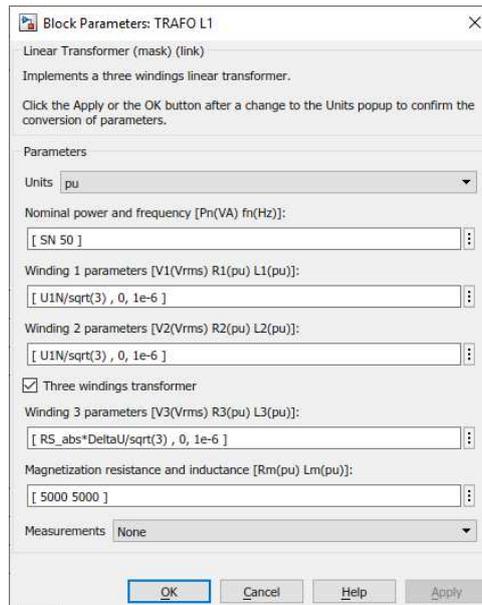


Abbildung 33: Eingabemaske des Transformators (Längs- bzw. Schrägregelung)

Die zweite Stufe beschreibt den eigentlichen Leistungstransformator. Untersucht wird ein Transformator mit einer Schaltgruppe YNyn0/d5. Da der oberspannungsseitige Sternpunkt bei keiner Simulation geerdet wird, ist die Schaltung von Wicklung 1 gleich Y. Für Wicklung 2 (Unterspannungsseite) wird die Schaltung Yn gewählt, also eine Sternschaltung mit herausgeführten Mittelpunktsleiter. Der Transformator wird auf der Unterspannungsseite wahlweise induktive über eine Petersenspule oder widerstandslos geerdet. In Abbildung 28 ist die Variante der unmittelbaren (widerstandslosen) Sternpunkterdung dargestellt. Die Schaltung der dritten Wicklung (Ausgleichswicklung) ist D1, siehe Abbildung 34. Um eine Schaltgruppe 5 zu erhalten, müssen die Anschlüssen der Wicklung 3 wie in der Simulink Anleitung [9] beschrieben vertauscht werden.

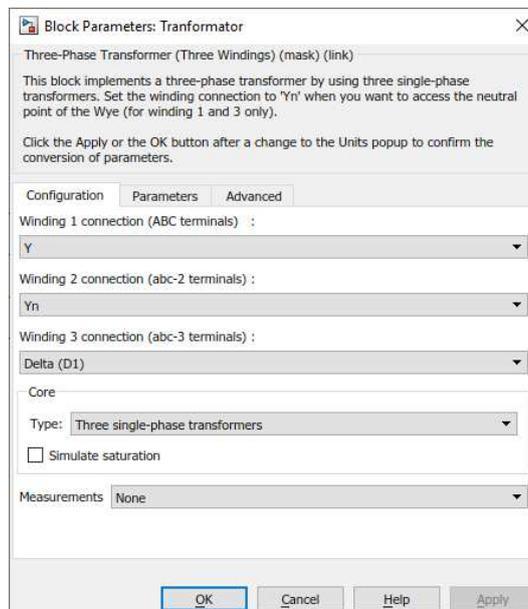


Abbildung 34: Eingabemaske des Leistungstransformators - Konfiguration

Die Spannungen der einzelnen Wicklungssysteme entsprechen, den über die Eingabemaske gewählten Nennspannungen. Die bezogene Induktivität der Ober- und Unterspannungsseite ist gleich der halben Kurzschlussspannung, derselbe Wert wird auch für die Tertiärwicklung verwendet. Da bei der Betrachtung, der Querweig des Transformatorersatzschaltbildes nicht

von Interesse ist, wird für den entsprechenden ohmschen Widerstand und Induktivität ein übertrieben hoher Wert von bezogen 5000 gewählt.

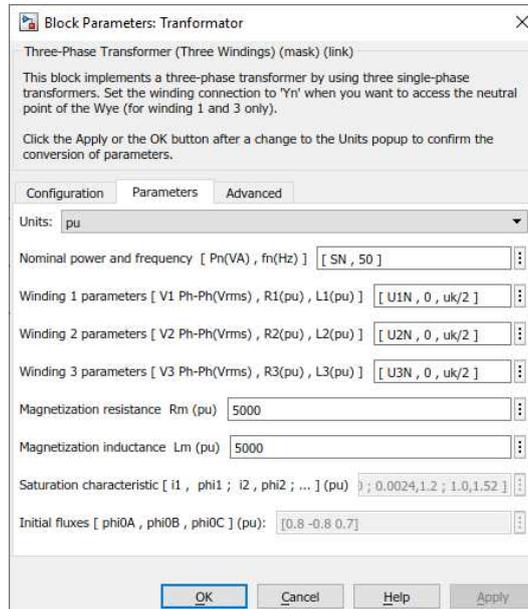


Abbildung 35: Eingabemaske des Leistungstransformators – Parameter

Untersucht werden 4 unterschiedliche Fehlerarten, der 3 – polige Kurzschluss, der 2 – polige Kurzschluss mit und ohne Erdberührung und der 1 – polige Erdschluss (Erdschluss). Simulink bietet zur Simulation von Fehlern einen vorgefertigten Block, mit diesem kann jedoch nur ein fest eingestellter Fehler simuliert werden, siehe Abbildung 36. Um zwischen unterschiedlichen Fehlern umschalten zu können, wird die Steuerung auf extern gestellt. Die Umschaltung erfolgt, wie in Abbildung 37 dargestellt mittels der Variablen FN. Damit der Fehler nicht unmittelbar nach dem Simulationsstart eintritt, wird das Signal um 100 ms zeitverzögert. Der Fehlerwiderstand wird auf einen vernachlässigbar kleinen Wert von $1 \cdot 10^{-9}$ gestellt.

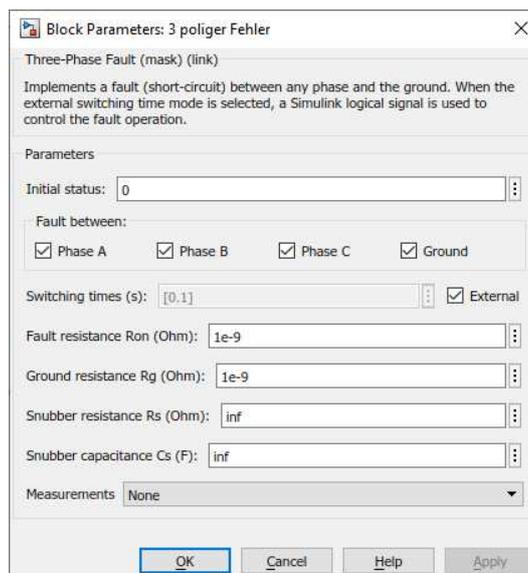


Abbildung 36: Eingabemaske des Fehlers

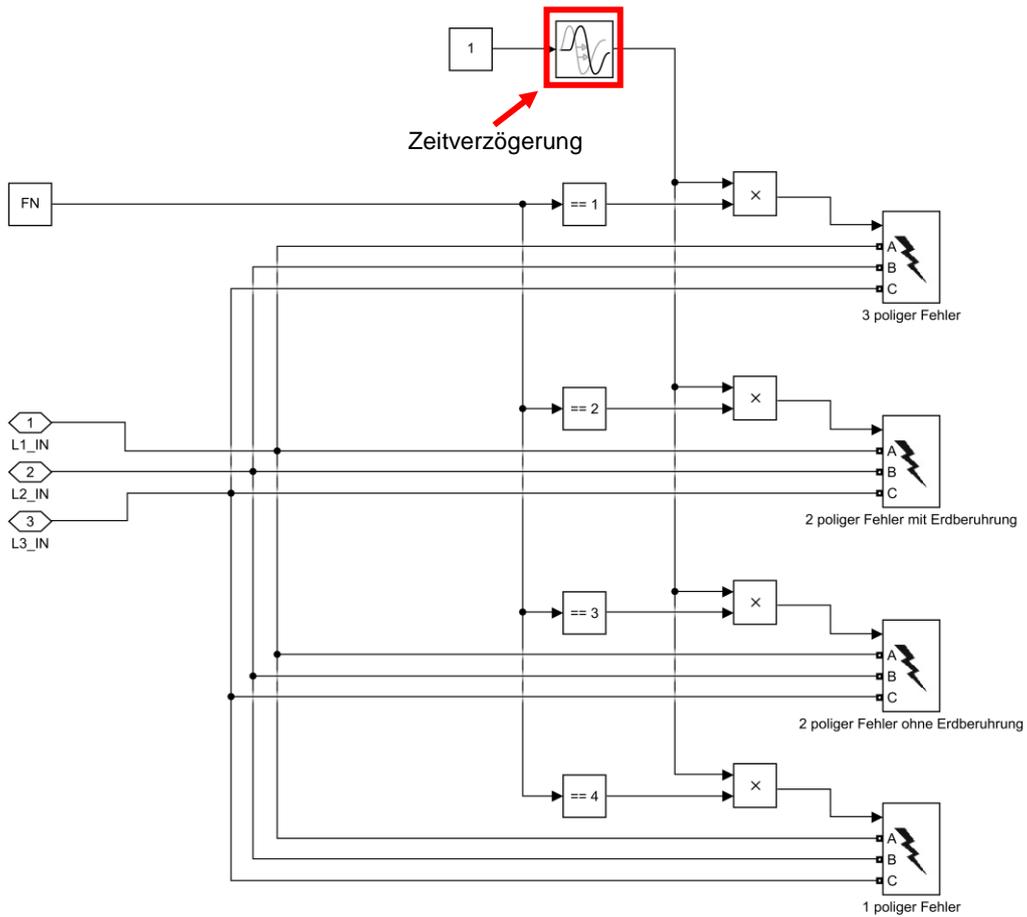


Abbildung 37: Detailansicht des Fehlerblocks

Die Eingabemaske des Regeltransformators aus Abbildung 26 wurde mittels Simulink Mask Editor erstellt (Abbildung 38). Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die verwendeten Variablen und deren Bedeutung.

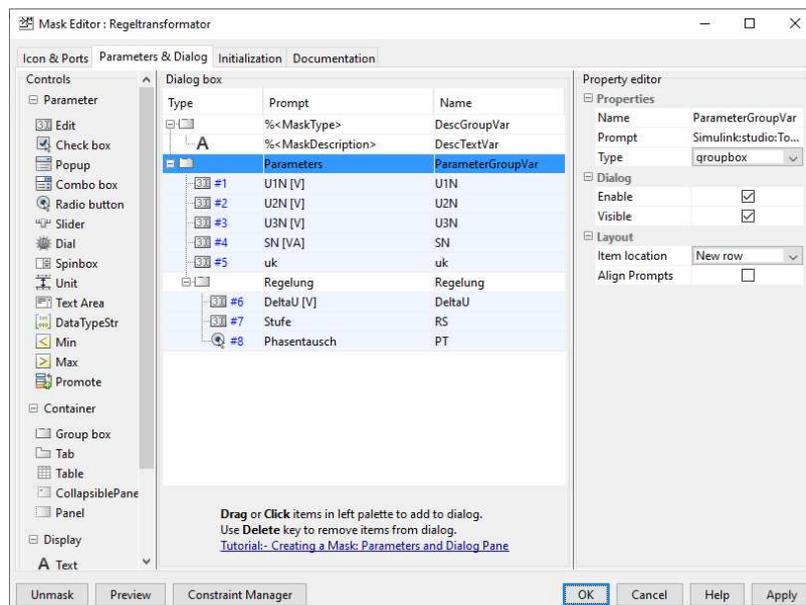


Abbildung 38: Simulink Mask Editor - Parameter

Tabelle 2: Übersicht über die bei der Längs- bzw. Schrägregelung verwendeten Variablen

Variablenname	Bedeutung
U1N	Nennspannung der Primärwicklung
U2N	Nennspannung der Sekundärwicklung
U3N	Nennspannung der Tertiärwicklung
SN	Nennleistung des Transformators
uk	Kurzschlussspannung des Transformators
DeltaU	Spannungsdifferenz zwischen zwei Reglerstufen
RS	Stufe der Regelung
FN	Fehlernummer 1 => 3 – poliger Kurzschluss 2 => 2 – poliger Kurzschluss mit Erdberührung 3 => 2 – poliger Kurzschluss ohne Erdberührung 4 => 1 – poliger Erdkurzschluss (Erdschluss)
PT	Beschreibt die Verschaltung der Stammwicklung mit der Regelwicklung Längsregelung L1-L2-L3 bedeutet, dass jede Stammwicklung mit der Regelwicklung derselben Phase verbunden ist. Schrägregelung L2-L3-L1 bedeutet, dass die Stammwicklung der Phase a mit der Regelwicklung der Phase b verbunden ist, die Verschaltung der anderen Phasen erhält man durch zyklisches Weitertauschen. L3-L1-L2 bedeutet, dass die Stammwicklung der Phase a mit der Regelwicklung der Phase c verbunden ist, die Verschaltung der anderen Phasen erhält man durch zyklisches Weitertauschen.

Im Reiter Initialisierung (Code 1), werden die Werte der Variablen SW1, SW2 und SW3 ermittelt. Zunächst werden alle drei Variablen auf null gesetzt. Die Variable RS bezeichnet die aktuelle Stufe der Regelung. Um die Spannung der Regelwicklung bestimmen zu können, wird lediglich der Betrag der Stufe (RS_abs) benötigt, da das Vorzeichen der Zusatzspannung über den Block Vorzeichenumkehr festgelegt wird. Für Stufe null, wird zum Kurzschließen der Ausgänge SW3 auf eins gesetzt, die beiden anderen Variablen sind null. Da wie bereits erwähnt Simulink eine Nennspannung eines Wicklungssystems null nicht zulässt, wird die Stufe (RS_abs) auf eins erhöht, das hat jedoch keine weiteren Auswirkungen, da SW1 und SW2 null sind, siehe Abbildung 31. Für positive Stufen ist SW1 gleich eins und für negative Stufen ist SW2 gleich eins.

```

SW1 = 0;
SW2 = 0;
SW3 = 0;

RS_abs = abs(RS);

if RS == 0
    SW3 = 1;
    RS_abs = 1;
elseif RS > 0
    SW1 = 1;
elseif RS < 0
    SW2 = 1;
end

```

Code 1: Simulink Mask Editor – Initialisierung

3.2.2. Querregelung

Um eine Querregelung realisieren zu können, werden neben der Stammwicklung zwei Regelwicklungen benötigt, siehe Abbildung 39. Abbildung 40 zeigt das Zeigerdiagramm der Sekundärseite einer solchen Regelung. Um nicht wieder eine Längsregelung zu erhalten, muss eine der beiden Regelwicklungen umgekehrt Strom durchflossen sein.

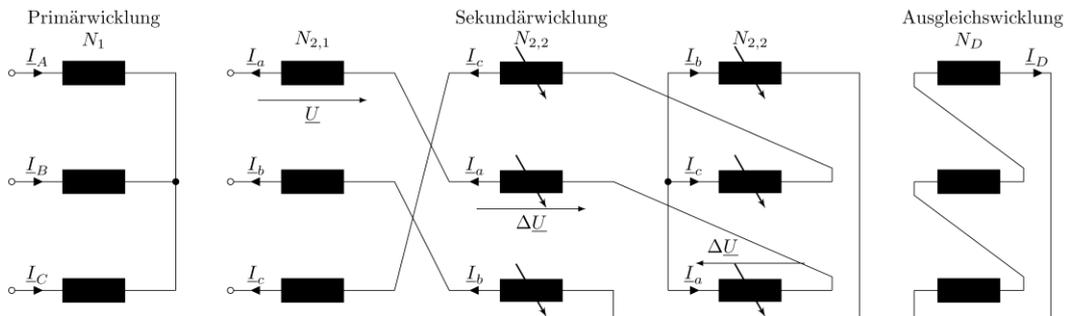


Abbildung 39: Ersatzschaltbild der Querregelung

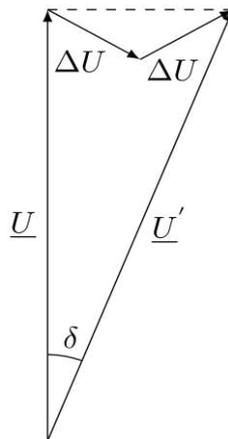


Abbildung 40: Zeigerdiagramm der Sekundärseite der Querregelung

Zur Bestimmung der primärseitigen Ströme kann analog zu Punkt 3.2.1 vorgegangen werden.

$$N_1 \cdot (I_A - I_B) = N_{2,1} \cdot (I_a - I_b) + N_{2,2} \cdot (I_c - I_b + I_c - I_a) \quad (71)$$

$$N_1 \cdot (I_B - I_C) = N_{2,1} \cdot (I_b - I_c) + N_{2,2} \cdot (I_a - I_c + I_a - I_b) \quad (72)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (73)$$

$$I_A - I_B = \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) \cdot I_a - \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) \cdot I_b + 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} \cdot I_c \quad (74)$$

$$I_B - I_C = 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} \cdot I_a + \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) \cdot I_b - \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) \cdot I_c \quad (75)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (76)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) & - \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) & 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} \\ 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} & \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) & - \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1} \right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (77)$$

Formel (78) beschreibt die Primärströme in Abhängigkeit der sekundärseitigen Ströme und der Querregelung.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1}\right) & -\left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1}\right) & 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} \\ 2 \cdot \frac{N_{2,2}}{N_1} & \left(\frac{N_{2,1}}{N_1} - \frac{N_{2,2}}{N_1}\right) & -\left(\frac{N_{2,1}}{N_1} + \frac{N_{2,2}}{N_1}\right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (78)$$

Das Simulink Modell der Querregelung ist ähnlich aufgebaut wie das Simulink Modell der Längs- bzw. Schrägregelung. Es besteht wieder aus einer idealen Quelle mit einer in Serie geschalteten Netzimpedanz, dem Regeltransformator, der Leitung und dem Fehlerblock.

Im Gegensatz zum Modell aus Abschnitt 3.2.1 wird hier kein geerdetes, sondern ein kompensiert betriebenes Netz untersucht. Dazu befindet sich zwischen dem Leitungs- und dem Fehlerblock eine Kapazität zur Nachbildung der Leiter – Erde Kapazität. Weiter ist der Sternpunkt induktiv über eine Petersenspule mit Erde verbunden, siehe Abbildung 43.

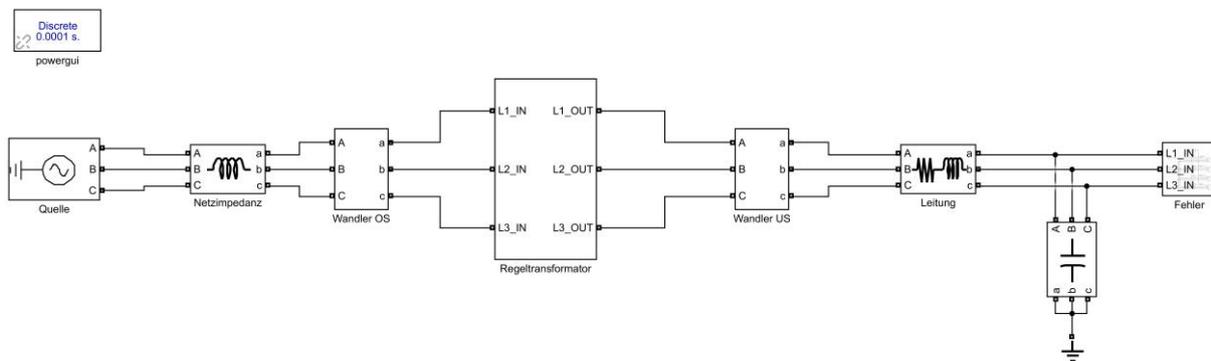


Abbildung 41: Modellübersicht der Querregelung

Die Eingabemaske (Abbildung 42) ist im Wesentlichen gleich aufgebaut wie in Punkt 3.2.1. Der Transformator verfügt über zwei Regelungen, einer Längsregelung primärseitig und einer Querregelung sekundärseitig. Für jede der beiden Regelungen muss sowohl das ΔU als auch die Stufe angegeben werden.

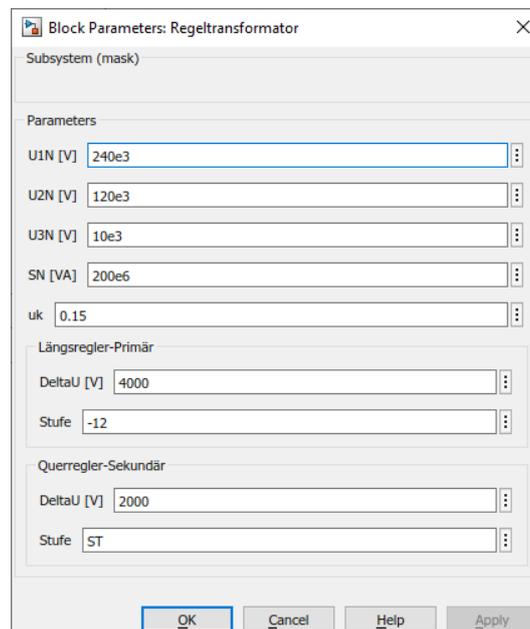


Abbildung 42: Eingabemaske der Querregelung

Der Regeltransformator ist wieder in zwei Stufen aufgebaut, die erste Stufe ist die eigentliche Regelung und die zweite Stufe der Leistungstransformator, siehe Abbildung 43. Bei der Regelung werden pro Phase 4 Wicklungen benötigt. Eine überspannungsseitige Wicklung, eine unterspannungsseitige Stammwicklung und 2 Regelwicklungen. Wobei die Wicklungen wie in Abbildung 39 dargestellt verschaltet werden. Vor dem Eingang jeder Regelwicklung befindet sich wieder ein Block mit dem Namen Vorzeichenumkehr, für eine detaillierte Beschreibung siehe Punkt 3.2.1.

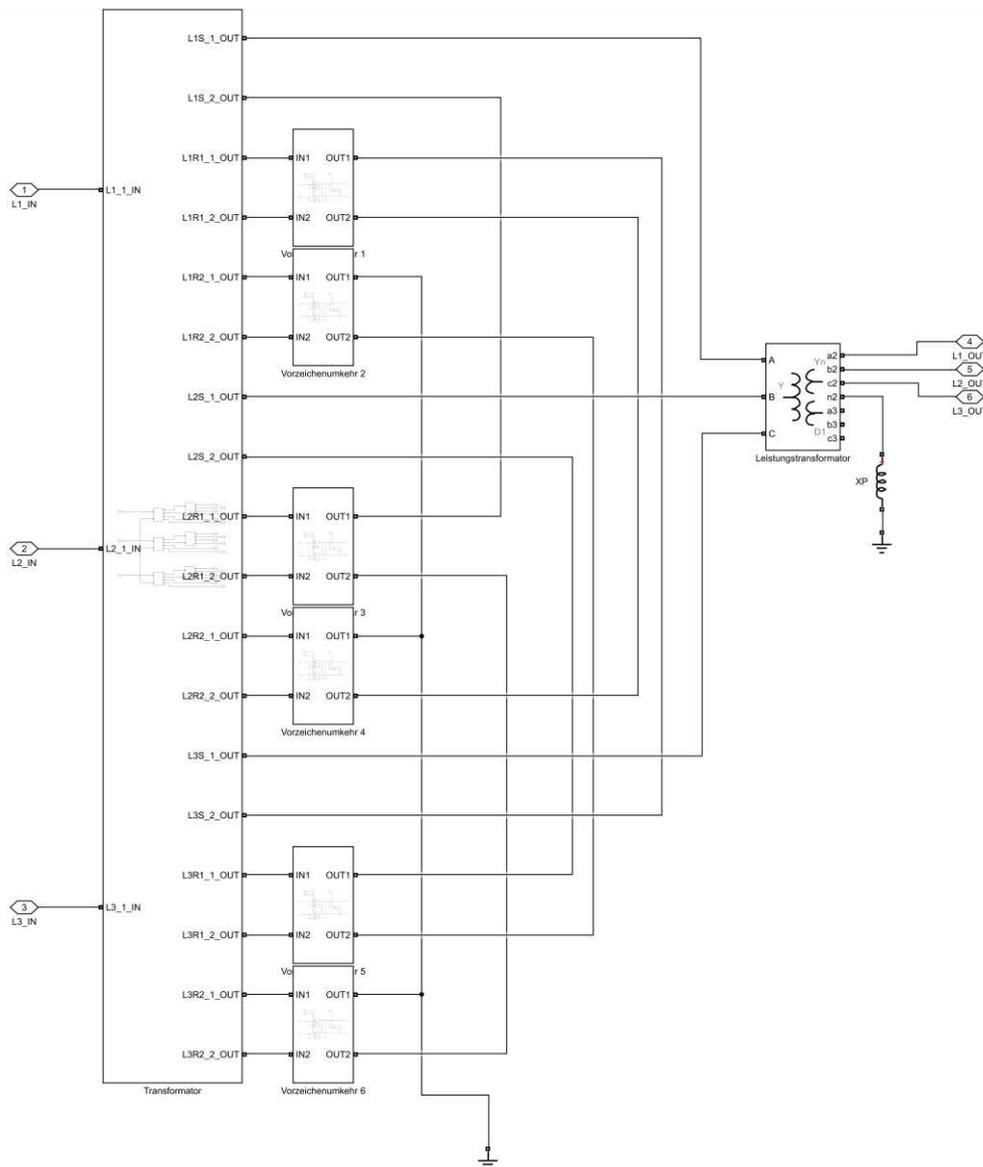


Abbildung 43: Detailansicht der Querregelung

Jede Phase benötigt 4 Wicklungssysteme. Dazu werden zwei Dreiwickler Transformatoren in Serie geschaltet, siehe Abbildung 44. Für die Nennspannung der Sekundärseite des ersten Transformators und die für Nennspannung der Primärseite des zweiten Transformators ist ein beliebig hoher, aber gleicher Wert zu wählen. Im Modell wird dieser Wert auf 100 kV festgelegt, da diese Wahl ein gutes numerisches Verhalten zeigt. Die primäre Nennspannung des ersten Transformators entspricht der Spannung U_{1N} und die Nennspannung der Sekundärseite des zweiten Transformators entspricht U_{2N} . Das Produkt aus der gewählten Stufe und ΔU (der Querregelung) beschreibt die Spannung der beiden Tertiärsysteme.

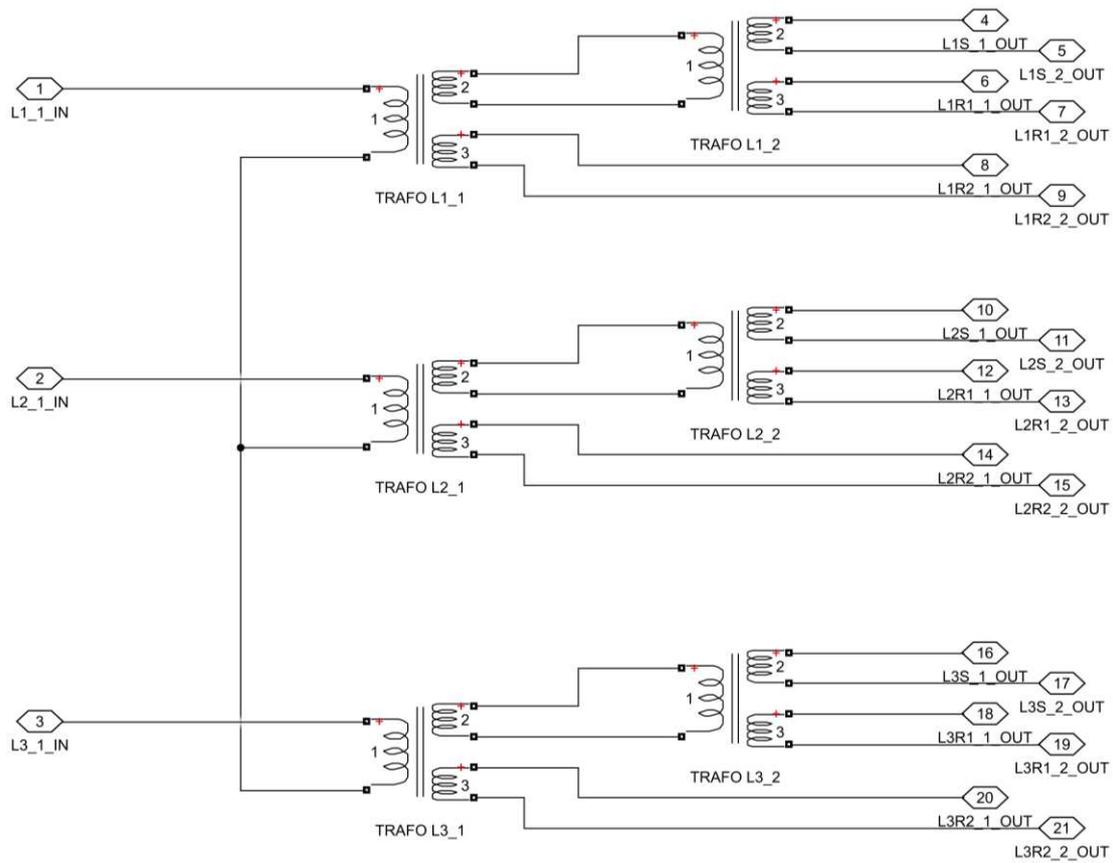


Abbildung 44: Detailsicht des Transformators (Querregelung)

Die primärseitige Längsregelung wird realisiert, indem die Nennspannung des primärseitigen Wicklungssystems (erster Transformator) um das Produkt aus ΔU und Stufe (der Längsregelung) variiert wird, siehe Abbildung 45. Die restlichen Parameter entsprechen jenen der Längs- bzw. Schrägregelung.

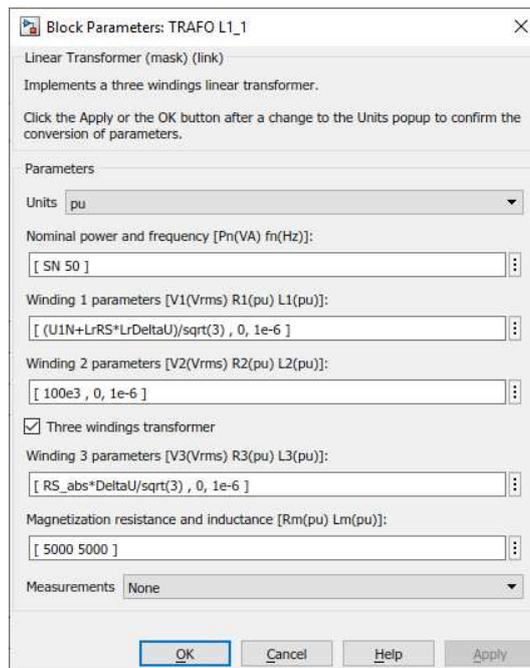


Abbildung 45: Eingabemaske des Transformators (Querregelung)

Da die Übersetzung der Spannungen bereits in Stufe 1 erfolgt ist, sind die Nennspannungen von Wicklung 1 und 2 des Leistungstransformators gleich U_{2N} . Die Spannung der Tertiärwicklung (Wicklung 3) ist wieder U_{3N} , siehe Abbildung 46.

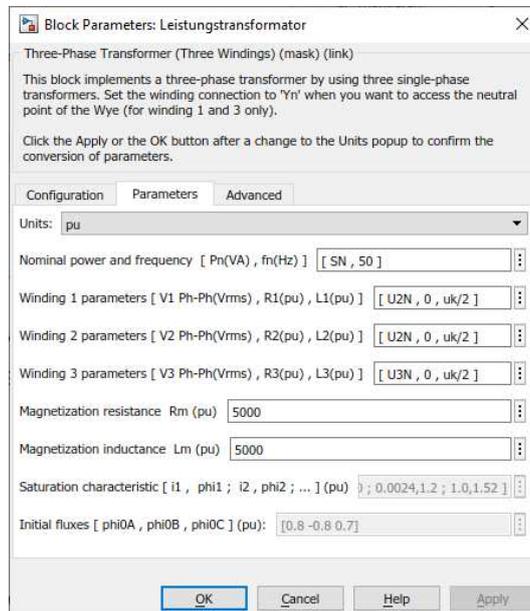


Abbildung 46: Eingabemaske des Leistungstransformators – Parameter (Querregelung)

Die Beschreibung der restlichen Blöcke kann Abschnitt 3.2.1 entnommen werden. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die verwendeten Variablen bzw. deren Bedeutung.

Tabelle 3: Übersicht über die bei der Querregelung verwendeten Variablen

Variablenname	Bedeutung
U1N	Nennspannung der Primärwicklung
U2N	Nennspannung der Sekundärwicklung
U3N	Nennspannung der Tertiärwicklung
SN	Nennleistung des Transformators
uk	Kurzschlussspannung des Transformators
LrDeltaU	Spannungsdifferenz zwischen zwei Reglerstufen der Längsregelung
LrRS	Stufe der Längsregelung
DeltaU	Spannungsdifferenz zwischen zwei Reglerstufen der Querregelung
RS	Stufe der Querregelung
FN	Fehlernummer 1 => 3 – poliger Kurzschluss 2 => 2 – poliger Kurzschluss mit Erdberührung 3 => 2 – poliger Kurzschluss ohne Erdberührung 4 => 1 – poliger Erdkurzschluss (Erdschluss)

3.3. Modellierung des Differentialschutzes in Simulink

3.3.1. Grundsätzlicher Aufbau

Die Stromwandler werden simuliert, indem die gemessenen ober- und unterspannungsseitigen Ströme durch das Übersetzungsverhältnis des entsprechenden Stromwandlers geteilt werden. Diese Sekundärgrößen werden dann dem Differentialschutz übergeben, siehe Abbildung 47.

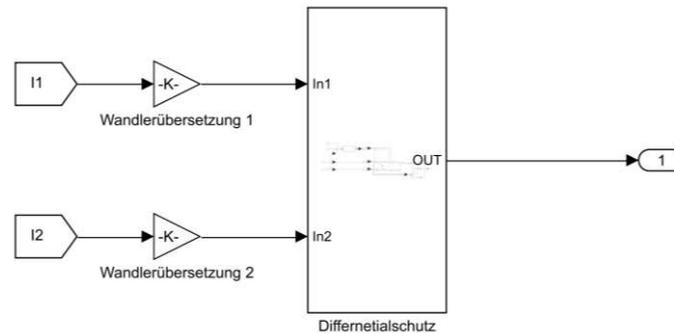


Abbildung 47: Nachbildung der Stromwandler

Dieser bestimmt den Differentialstrom, aus der Differenz der normierten ober- und unterspannungsseitigen Ströme. Dazu werden die gemessenen Werte mit dem jeweiligen Stromwandler Übersetzungsverhältnis multipliziert, um wieder primäre Größen zu erhalten. Zur Normierung werden die Ströme durch den Transformator Nennstrom der entsprechenden Seite dividiert. Mittels Fourier Analyse (Block) wird der Betrag und Winkel der Grundschwingung bestimmt. Es ist zu beachten, dass dieser Block den Spitzwert des Signals liefert, daher wird der Betrag durch $\sqrt{2}$ dividiert, um den Effektivwert zu erhalten. Zur Bildung der Differenz zweier komplexer Größen, werden die Messwerte in das kartesische Koordinatensystem transformiert (Abbildung 48). In diesem wird separat für Real- und Imaginärteil die Differenz gebildet. Anschließend wird mit Hilfe des Satzes von Pythagoras der Betrag des Differentialstroms errechnet.

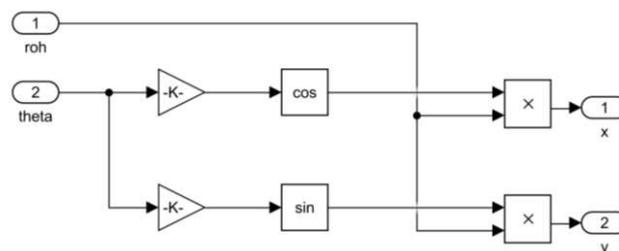


Abbildung 48: Umrechnung von polare auf kartesische Koordinaten

Die Bildung des Stabilisierungsstromes ist vergleichsweise einfach, den es muss lediglich die Betragssumme beider Ströme errechnet und durch den Faktor 2 geteilt werden.

Die Eingabemaske des Differentialschutzes wird in Abschnitt 3.3.3 näher beschrieben.

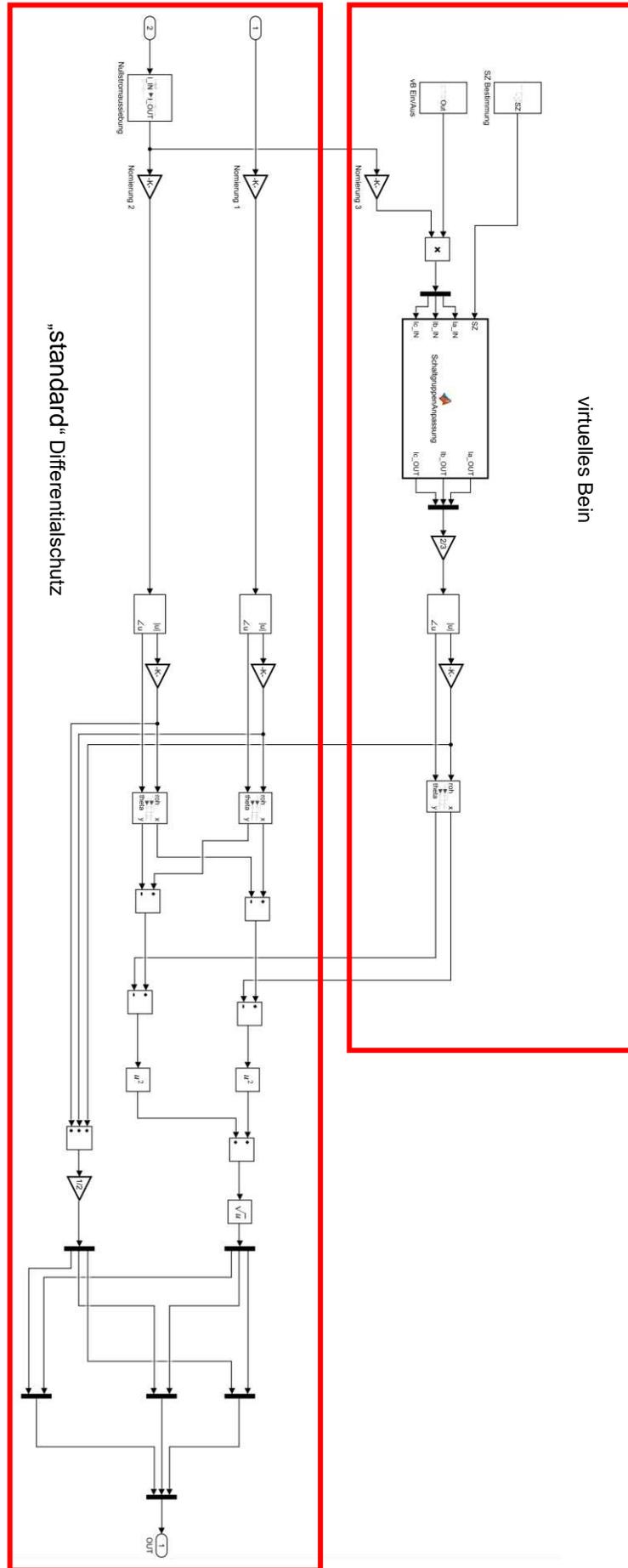


Abbildung 49: Übersichtsschaltbild des Differentialschutzes

3.3.2. Nullstromaussiebung

Ein Nullsystem kann wie bereits beschrieben nur auftreten, wenn eine der beiden Wicklungen in Stern geschaltet und der Sternpunkt mit Erde verbunden ist, im betrachteten Fall die Unterspannungsseite des Transformators. Ist die Oberspannungsseite nicht geerdet, führt der „fehlende“ Nullstrom, z.B. bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss, auf dieser dazu, dass ein Differentialstrom auftritt. Abhilfe schafft hier die Nullstromaussiebung, bei der, vor der Berechnung des Differentialstroms vom unterspannungsseitigen Strom der Nullstrom abgezogen wird. Der Nullstrom kann aus der Summe aller drei Ströme geteilt durch den Faktor 3 errechnet werden.

$$I_D = \frac{1}{3} \cdot [I_a + I_b + I_c] \quad (79)$$

Abbildung 50 zeigt die Realisierung in Simulink. Über die Variable NA kann die Nullstromaussiebung durch setzen eines Hakens in der Eingabemaske des Differentialschutzes eingeschaltet werden, siehe Abbildung 55 [10].

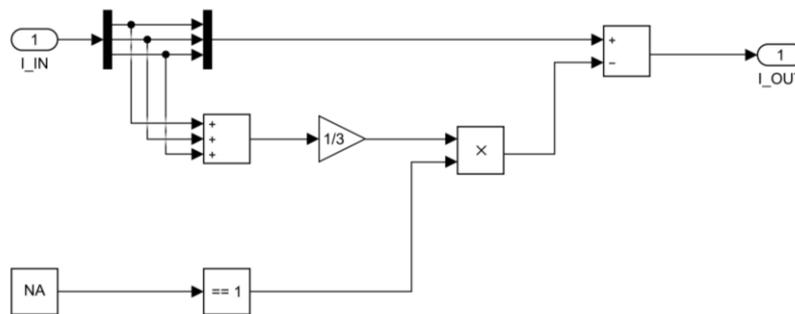


Abbildung 50: Modellierung der Nullstromaussiebung

Die Wirksamkeit dieser Methode wird in Abschnitt 4.1.3 näher beschrieben.

3.3.3. Virtuelles Bein

Eine besondere Herausforderung für den Differentialschutz ist der 2 – polige Kurzschluss. In der vom Fehler nicht betroffenen Phase, also Phase a, ist der Strom auf der Unterspannungsseite null, jedoch fließt oberspannungsseitig beim Einsatz der Schräg-, bzw. Querregelung ein Strom. Der Differentialstrom ist damit gleich dem normierten oberspannungsseitigen Strom und der Stabilisierungsstrom ist nach Formel (32) halb so groß. Das kann bei ausreichend hoher Stromstärke zur nicht selektiven Auslösung des Differentialschutzes führen.

Um eine solche Fehlauflösung zu verhindern, wird eine zusätzliche „virtuelle“ Wicklung bzw. Bein eingeführt. Dieses zusätzliche Wicklungssystem wird charakterisiert durch eine Stundenziffer und einen Nennstrom. Die Ströme der virtuellen Wicklung werden wie in diesem Abschnitt beschrieben aus den sekundären Messwerten errechnet. Formel (31) zur Berechnung des Differentialstroms ist, um den Strom des virtuellen Beins zu erweitern, wobei Stundenziffer und Nennstrom so gewählt werden, dass der auftretende Differentialstrom bestmöglich kompensiert wird [10] [11].

Zunächst ist zu klären, wie die Drehung des Stroms um eine bestimmte Stundenziffer allgemein mathematisch beschrieben werden kann. Dabei ist das ungestrichene System das Ausgangssystem und das gestrichelte System das Zielsystem. Es wird in Abbildung 51 exemplarisch eine Drehung um 90°, als Stundenziffer 3 dargestellt.

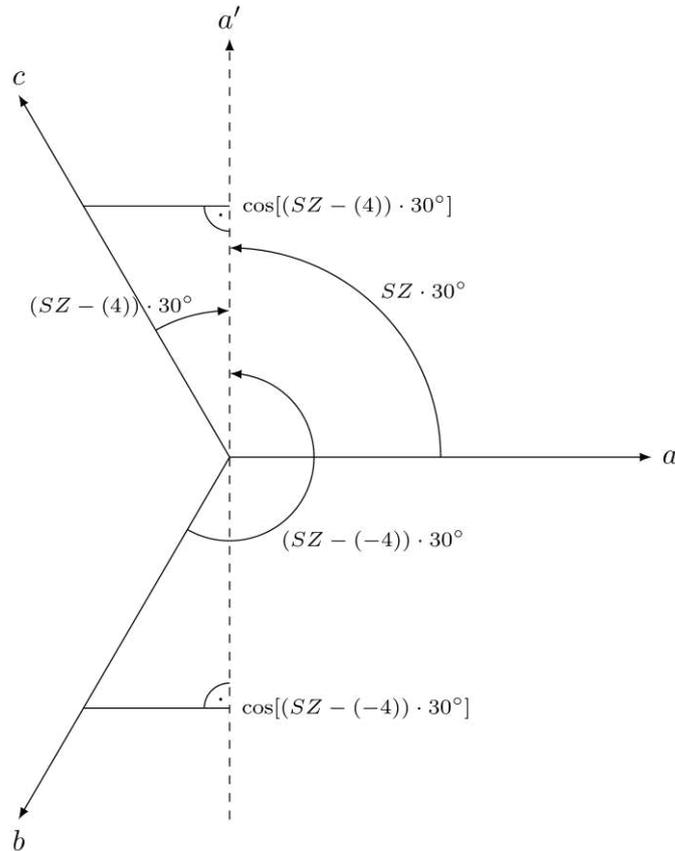


Abbildung 51: Zeigerdiagramm der Drehung um eine Stundenziffer SZ

Da die beiden Achsen a und a' normal aufeinander stehen, ist die Projektion null, mathematisch wird die Projektion von Achse a auf a' durch den Kosinus wie folgt beschrieben. SZ bezeichnet die Stundenziffer.

$$\cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] = \cos[(3 - (0)) \cdot 30^\circ] = 0; a \Rightarrow a' \quad (80)$$

Formel (81) und (82) beschreiben die Projektion der b und c Achse auf Achse a' , wobei der erste Summand die Verdrehung (in diesem Fall $3 \cdot 30^\circ$) und der zweite Summand die ursprüngliche Lage der Achse beschreiben.

$$\cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] = \cos[(3 - (-4)) \cdot 30^\circ] = -\frac{\sqrt{3}}{2}; b \Rightarrow a' \quad (81)$$

$$\cos[(SZ - (+4)) \cdot 30^\circ] = \cos[(3 - (+4)) \cdot 30^\circ] = \frac{\sqrt{3}}{2}; c \Rightarrow a' \quad (82)$$

Dieselbe Überlegung kann auch für die Achse b' und c' angestellt werden, damit erhält man allgemein folgende Transformationsvorschrift.

$$\begin{bmatrix} L'_a \\ L'_b \\ L'_c \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_a \\ L_b \\ L_c \end{bmatrix} \quad (83)$$

Der Faktor C wird derart bestimmt, dass eine Amplitude 1 im ungestrichenen System wieder eine Amplitude 1 im gestrichenen System wird. Ausgangspunkt ist ein Strom mit der Amplitude 1 in Phase a, der Einfachheit halber, wird bei der Berechnung auf die Einheit Ampere verzichtet.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}'_a \\ \dot{I}'_b \\ \dot{I}'_c \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] \end{bmatrix} \quad (84)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] \end{bmatrix}$$

Die Gesamtlänge wird aus der geometrischen Summe der drei Komponenten berechnet. Dazu wird diese im gestrichenen System in eine x bzw. y Komponente zerlegt, siehe Abbildung 52.

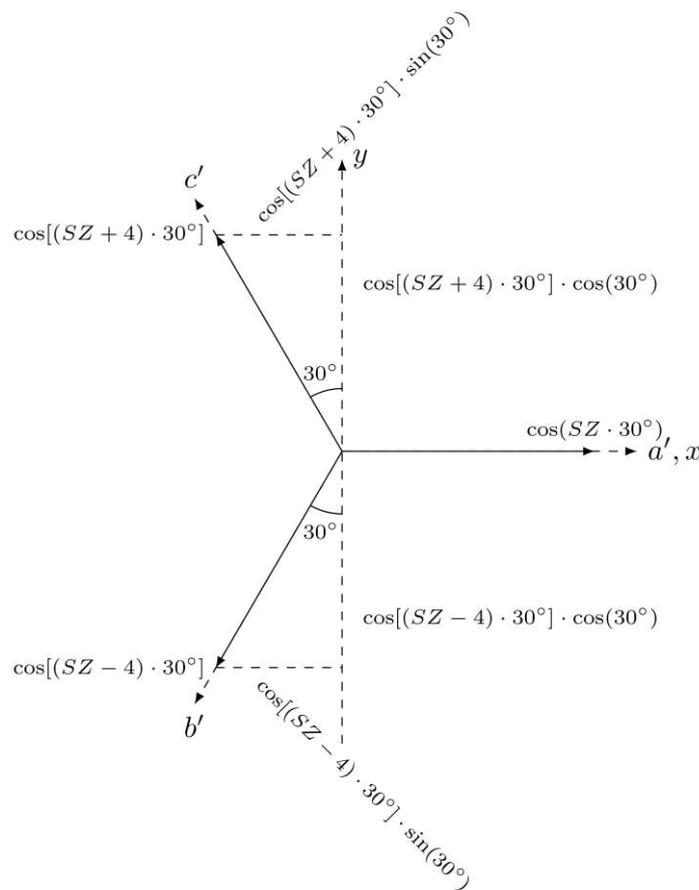


Abbildung 52: Bestimmung der resultierenden Amplitude im gestrichenen Koordinatensystem

Die x Komponente wird unter Vernachlässigung des C – Faktors wie folgt berechnet.

$$x = \cos(SZ \cdot 30^\circ) - \{\cos[(SZ - 4) \cdot 30^\circ] + \cos[(SZ + 4) \cdot 30^\circ]\} \cdot \sin(30^\circ) \quad (85)$$

$$x = \cos(SZ \cdot 30^\circ) - 2 \cdot \cos(SZ \cdot 30^\circ) \cdot \cos(4 \cdot 30^\circ) \cdot \sin(30^\circ) \quad (86)$$

$$x = \cos(SZ \cdot 30^\circ) \cdot \{1 - 2 \cdot \cos(120^\circ) \cdot \sin(30^\circ)\} = \frac{3}{2} \cdot \cos(SZ \cdot 30^\circ) \quad (87)$$

Weiters muss noch die y Komponente bestimmt werden.

$$y = \{\cos[(SZ + 4) \cdot 30^\circ] - \cos[(SZ - 4) \cdot 30^\circ]\} \cdot \cos(30^\circ) \quad (88)$$

$$y = -2 \cdot \sin(SZ \cdot 30^\circ) \cdot \sin(4 \cdot 30^\circ) \cdot \cos(30^\circ) = -\frac{3}{2} \cdot \sin(SZ \cdot 30^\circ) \quad (89)$$

Der Satz von Pythagoras liefert die resultierende Amplitude mit einer Höhe von 3/2.

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \cos^2(SZ \cdot 30^\circ) + \left(-\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \sin^2(SZ \cdot 30^\circ)} = \frac{3}{2} \quad (90)$$

Um wieder eine Amplitude 1 zu erhalten, muss C gleich 2/3 gewählt werden.

$$\begin{bmatrix} I_a' \\ I_b' \\ I_c' \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] \\ \cos[(SZ - (-4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (4)) \cdot 30^\circ] & \cos[(SZ - (0)) \cdot 30^\circ] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (91)$$

Die Wahl der passenden Stundenziffer wird in Abschnitt 4.2.3 näher erläutert.

Damit wird wie folgt der Differentialstrom berechnet. I_{3N} beschreibt den Nennstrom des virtuellen Beins, die Wahl des Nennstroms wird ebenfalls in Abschnitt 4.2.3 näher beschrieben.

$$i_{diff} = \left| \frac{I_1}{I_{1N}} - \frac{I_2}{I_{2N}} - \frac{I_2'}{I_{3N}} \right| \quad (92)$$

Selbstverständlich muss auch der Haltestrom um den dritten Term erweitert werden.

$$i_{stab} = \frac{1}{2} \cdot \left(\left| \frac{I_1}{I_{1N}} \right| + \left| \frac{I_2}{I_{2N}} \right| + \left| \frac{I_2'}{I_{3N}} \right| \right) \quad (93)$$

Neben dem „standard“ Differentialschutz ist in Abbildung 49 auch die Erweiterung um das virtuelle Bein dargestellt. Zur Normierung des unterspannungsseitigen Stroms wird dieser mit dem Stromwandler Übersetzungsverhältnis multipliziert, um den Primärstrom (des Stromwandlers) zu erhalten und anschließend durch den Nennstrom des virtuellen Beins dividiert. Im Funktionsblock mit dem Namen Schaltgruppenanpassung, wird die Drehung um eine bestimmte Stundenziffer SZ nach Formel (91) realisiert. Der Funktionsblock enthält dazu folgenden Matlabcode:

```
function [Ia_OUT, Ib_OUT, Ic_OUT] = SchaltgruppenAnpassung(SZ, Ia_IN,
Ib_IN, Ic_IN)

Ia_OUT = Ia_IN * cos((SZ - 0) * 30 * pi/180) + Ib_IN * cos((SZ + 4) * 30
* pi/180) + Ic_IN * cos((SZ - 4) * 30 * pi/180);
Ib_OUT = Ia_IN * cos((SZ - 4) * 30 * pi/180) + Ib_IN * cos((SZ - 0) * 30
* pi/180) + Ic_IN * cos((SZ + 4) * 30 * pi/180);
Ic_OUT = Ia_IN * cos((SZ + 4) * 30 * pi/180) + Ib_IN * cos((SZ - 4) * 30
* pi/180) + Ic_IN * cos((SZ - 0) * 30 * pi/180);
```

Code 2: Matlabcode der Schaltgruppenanpassung

Der Block SZ-Bestimmung (Abbildung 53) dient dazu, für positive und negative Stufen zwischen unterschiedlichen Stundenziffern zu wechseln, welche über die noch beschriebene Eingabemaske ausgewählt werden.

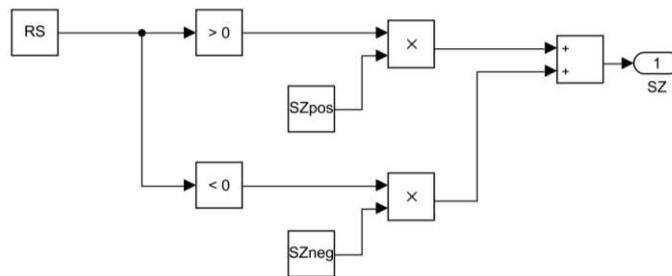


Abbildung 53: Bestimmung der Stundenziffer

Mit dem Block vB-Ein/Aus (Abbildung 54) kann das virtuelle Bein wie der Name schon sagt ein- bzw. ausgeschaltet werden. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten, einerseits über die Variable vB, mit der das virtuelle Bein generell ein- und ausgeschaltet wird, andererseits kann ein Betrag einer Stufe angegeben werden, ab der das virtuelle Bein aktiv sein soll. Beide Bedingungen werden über den UND Block miteinander verknüpft. Der Vergleichsoperator ist notwendig, um eine Variable vom Typ Boolean in eine Variable vom Typ UInt zu wandeln, damit anschließend die Multiplikation ausgeführt werden kann. Das virtuelle Bein wird deaktiviert, indem die Messwerte mit null multipliziert werden.

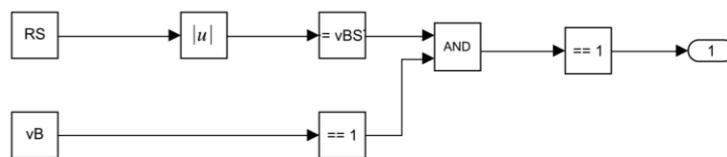


Abbildung 54: Virtuelles Bein ein- bzw. ausschalten

Zur Bestimmung der primär- und sekundärseitigen Nennströme des Transformators, sind die Nennleistung bzw. die beiden Nennspannungen anzugeben. Weiters werden die primären und sekundären Nennströme der Stromwandler benötigt. Mit dem Haken „Virtuelles Bein aktiv“ kann das virtuelle Bein generell ein- bzw. ausgeschaltet werden. Anschließend ist noch die Stufe der Schräg- bzw. Querregelung anzugeben, welche Stundenziffer für eine positive bzw. negative Stufe verwendet wird, wie hoch der Nennstrom der virtuellen Wicklung ist und ab welchen Betrag der Stufe das virtuelle Bein aktiv sein soll, siehe Abbildung 55.

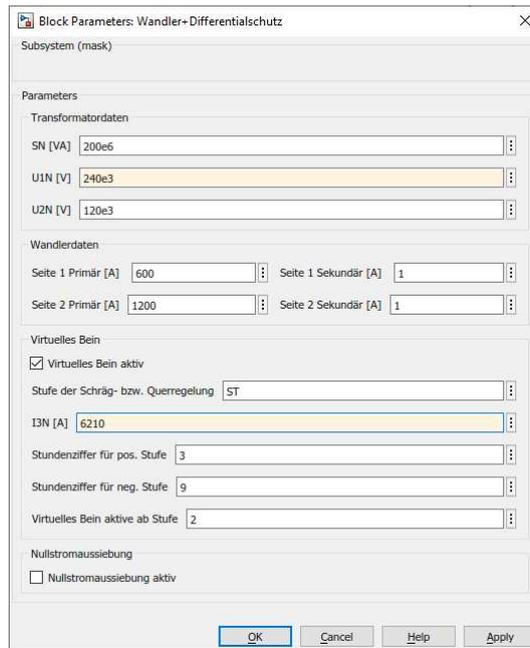


Abbildung 55: Eingabemaske des Differentialschutzes

3.4. Leistungstransformator mit in Serie geschaltetem Koppeltransformator

Die erste Idee, um einen Regeltransformator zu modellieren war, dem eigentlichen Leistungstransformator einen weiteren Transformator in Serie zu schalten und diesen wahlweise über die Tertiärwicklung oder die Sekundärseite zu versorgen. Die grundsätzliche Überlegung ist in Abbildung 56 dargestellt, wobei das Modell über zwei Koppel- bzw. Serientransformatoren verfügt, einen auf der Primärseite und einen auf der Sekundärseite.

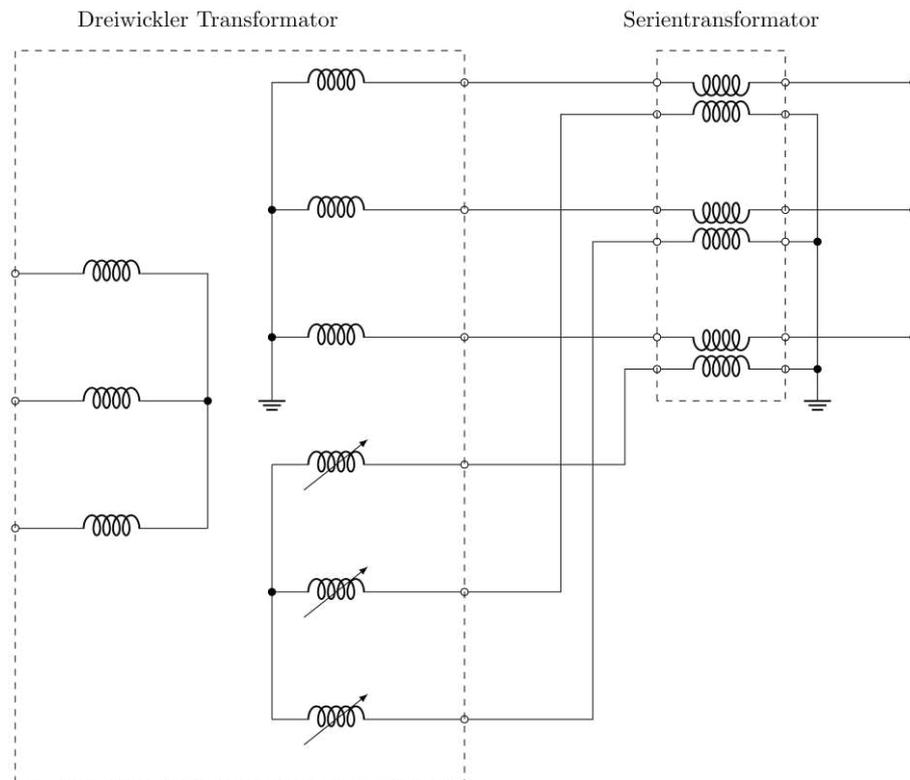


Abbildung 56: Übersichtsschaltbild des Regeltransformators bei Speisung des sekundären Serientransformators von der Tertiärwicklung

Zusätzlich wird auf der Primär- und Sekundärseite eine Längsregelung implementiert. Das Modell sollte weiters in der Lage sein, alle technisch möglichen Schaltgruppen zu simulieren. Die Bedienung des Modells erfolgt wieder über eine Eingabemaske (Abbildung 57), welche durch einen Doppelklick auf den Regeltransformator aufgerufen werden kann. Zunächst wird die Frequenz festgelegt, weiters muss ausgewählt werden um welche Transformator Typ es sich handelt. Zur Auswahl stehen ein Modell eines Voll – Transformators aus der Simulink Bibliothek und ein aus drei Einzeltransformatoren aufgebauter Voll – Transformator. Der Transformator wird parametrisiert, indem die beiden Nennspannungen, die Nennleistung und die Kurzschlussspannung angegeben werden. Weiters ist für den aus drei Einzeltransformatoren aufgebauten Voll – Transformator die Schaltgruppe zu wählen, bzw. ob ein möglicher Sternpunkt geerdet ist. Die Tertiärwicklung wird charakterisiert mittels Nennspannung, Verschaltung und Phasenverschiebung angegeben in 30° Schritten zur Primärseite.



Abbildung 57: Eingabemaske Trafo

Im Reiter Schrägregelung (Abbildung 58) werden die für die Schrägregelung notwendigen Parameter eingegeben. Zunächst wird festgelegt, ob der Serientransformator aus der Tertiärwicklung oder von der Sekundärseite gespeist wird. Weiters muss das ΔU und die Stufe der Regelung angegeben werden, gefolgt von der Parametrierung des Serientransformators. Es ist auch noch anzugeben, ob die eingekoppelte Spannung invertiert wird, bzw. wie die Phasen bei sekundärer Speisung vertauscht werden.

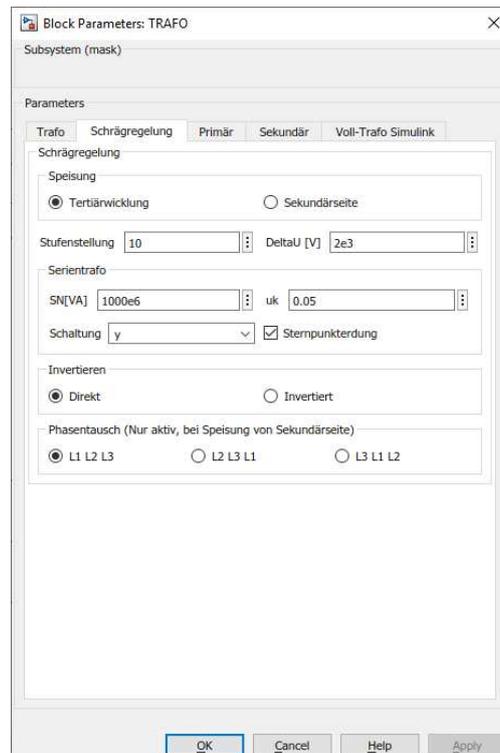


Abbildung 58: Eingabemaske Schrägregelung

Die Reiter Primär und Sekundär (Abbildung 59) ist ident aufgebaut. Damit wird einerseits die Längsregelung parametrisiert, andererseits kann festgelegt werden, auf welche Seite die Schrägregelung wirkt.

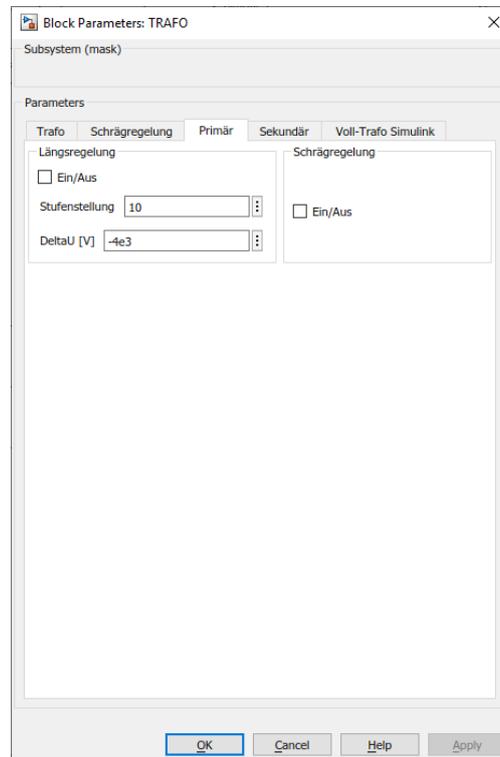


Abbildung 59: Eingabemaske Primär, Sekundär

Es ist zu beachten, dass wenn der von Simulink zur Verfügung gestellte Voll-Transformator verwendet wird, die Schaltgruppe direkt in der Eingabemaske des Transformators einzustellen ist. Der Simulink Anleitung kann entnommen werden, dass die Ausgänge durchgetauscht werden müssen, um alle möglichen Schaltgruppen realisieren zu können. Dies erfolgt in Reiter Voll-Trafo Simulink, siehe Abbildung 60 [9].

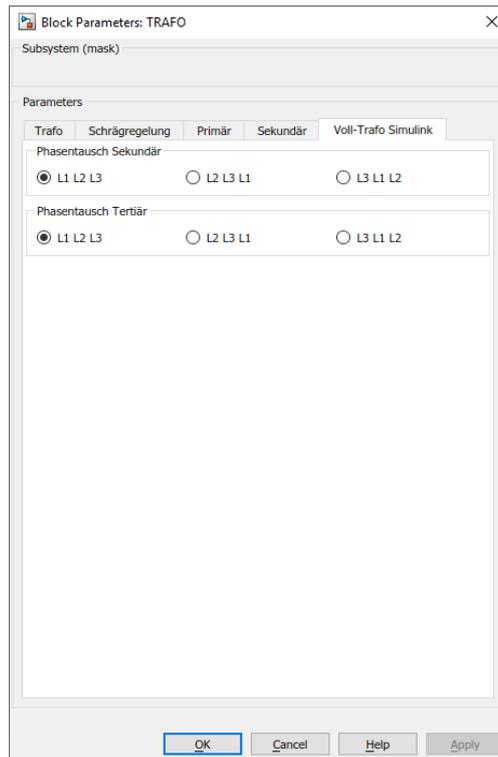


Abbildung 60: Eingabemaske Voll – Trafo Simulink

Da der Aufbau dieses Modells sehr stark vom Aufbau der untersuchten Transformatoren abweicht, wurde es in der Arbeit nicht weiterverfolgt. Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 61 ein Übersichtsschaltbild dargestellt.

3.5. Berechnung der stationären Werte mittels Excel

Um die simulierten Ergebnisse verifizieren zu können, wurde ein Excel File erstellt, zur Berechnung der stationären Werte.

3.5.1. Excel File der Längs- bzw. Schrägregelung

Die erste Registerkarte mit dem Namen „Eingabe_Ausgabe“ dient wie der Name schon sagt, zur Eingabe der Parameter bzw. zur Ausgabe der errechneten Werte. Gelbe Felder sind Eingabefelder, blaue Felder sind Ausgabefelder (Abbildung 62). Für die Bedeutung der einzelnen Felder sei auf die vorangegangenen Kapitel verwiesen.

<table border="1"> <tr> <td>Trafo Verschaltung</td> <td><input type="radio"/> L1-L2-L3</td> </tr> <tr> <td></td> <td><input checked="" type="radio"/> L2-L3-L1</td> </tr> <tr> <td></td> <td><input type="radio"/> L3-L1-L2</td> </tr> </table>	Trafo Verschaltung	<input type="radio"/> L1-L2-L3		<input checked="" type="radio"/> L2-L3-L1		<input type="radio"/> L3-L1-L2	<table border="1"> <tr> <td>3-poliger Fehler</td> <td>[kA]</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>I_A</td> <td>3.654</td> <td>4.219</td> <td>-89.54</td> </tr> <tr> <td>I_B</td> <td>3.654</td> <td>4.219</td> <td>150.46</td> </tr> <tr> <td>I_C</td> <td>3.654</td> <td>4.219</td> <td>30.46</td> </tr> <tr> <td>I_a</td> <td>6.029</td> <td>4.003</td> <td>-83.65</td> </tr> <tr> <td>I_b</td> <td>6.029</td> <td>4.003</td> <td>156.35</td> </tr> <tr> <td>I_c</td> <td>6.029</td> <td>4.003</td> <td>36.35</td> </tr> </table>	3-poliger Fehler	[kA]	[p.u.]	[°]	I_A	3.654	4.219	-89.54	I_B	3.654	4.219	150.46	I_C	3.654	4.219	30.46	I_a	6.029	4.003	-83.65	I_b	6.029	4.003	156.35	I_c	6.029	4.003	36.35	<table border="1"> <tr> <td>3-poliger Fehler</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>Idiff_A</td> <td>0.475</td> <td>-149.54</td> </tr> <tr> <td>Istab_A</td> <td>4.111</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_B</td> <td>0.475</td> <td>90.46</td> </tr> <tr> <td>Istab_B</td> <td>4.111</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_C</td> <td>0.475</td> <td>-29.54</td> </tr> <tr> <td>Istab_C</td> <td>4.111</td> <td></td> </tr> </table>	3-poliger Fehler	[p.u.]	[°]	Idiff_A	0.475	-149.54	Istab_A	4.111		Idiff_B	0.475	90.46	Istab_B	4.111		Idiff_C	0.475	-29.54	Istab_C	4.111													
Trafo Verschaltung	<input type="radio"/> L1-L2-L3																																																																				
	<input checked="" type="radio"/> L2-L3-L1																																																																				
	<input type="radio"/> L3-L1-L2																																																																				
3-poliger Fehler	[kA]	[p.u.]	[°]																																																																		
I_A	3.654	4.219	-89.54																																																																		
I_B	3.654	4.219	150.46																																																																		
I_C	3.654	4.219	30.46																																																																		
I_a	6.029	4.003	-83.65																																																																		
I_b	6.029	4.003	156.35																																																																		
I_c	6.029	4.003	36.35																																																																		
3-poliger Fehler	[p.u.]	[°]																																																																			
Idiff_A	0.475	-149.54																																																																			
Istab_A	4.111																																																																				
Idiff_B	0.475	90.46																																																																			
Istab_B	4.111																																																																				
Idiff_C	0.475	-29.54																																																																			
Istab_C	4.111																																																																				
<table border="1"> <tr> <td>Netz</td> <td>UN [kV]</td> <td>380</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SK" [MVA]</td> <td>10000</td> </tr> <tr> <td></td> <td>R/X</td> <td>0</td> </tr> </table>	Netz	UN [kV]	380		SK" [MVA]	10000		R/X	0	<table border="1"> <tr> <td>2-poliger Fehler mit Erdberührung</td> <td>[kA]</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>I_A</td> <td>1.490</td> <td>1.721</td> <td>-98.14</td> </tr> <tr> <td>I_B</td> <td>3.081</td> <td>3.557</td> <td>170.33</td> </tr> <tr> <td>I_C</td> <td>3.386</td> <td>3.910</td> <td>16.43</td> </tr> <tr> <td>I_a</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>I_b</td> <td>6.340</td> <td>4.210</td> <td>151.87</td> </tr> <tr> <td>I_c</td> <td>6.331</td> <td>4.204</td> <td>40.89</td> </tr> </table>	2-poliger Fehler mit Erdberührung	[kA]	[p.u.]	[°]	I_A	1.490	1.721	-98.14	I_B	3.081	3.557	170.33	I_C	3.386	3.910	16.43	I_a	0.000	0.000	0.00	I_b	6.340	4.210	151.87	I_c	6.331	4.204	40.89	<table border="1"> <tr> <td>2-poliger Fehler mit Erdberührung</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>Idiff_A</td> <td>1.721</td> <td>-98.14</td> </tr> <tr> <td>Istab_A</td> <td>0.860</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_B</td> <td>1.402</td> <td>-81.57</td> </tr> <tr> <td>Istab_B</td> <td>3.884</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_C</td> <td>1.743</td> <td>-70.82</td> </tr> <tr> <td>Istab_C</td> <td>4.057</td> <td></td> </tr> </table>	2-poliger Fehler mit Erdberührung	[p.u.]	[°]	Idiff_A	1.721	-98.14	Istab_A	0.860		Idiff_B	1.402	-81.57	Istab_B	3.884		Idiff_C	1.743	-70.82	Istab_C	4.057										
Netz	UN [kV]	380																																																																			
	SK" [MVA]	10000																																																																			
	R/X	0																																																																			
2-poliger Fehler mit Erdberührung	[kA]	[p.u.]	[°]																																																																		
I_A	1.490	1.721	-98.14																																																																		
I_B	3.081	3.557	170.33																																																																		
I_C	3.386	3.910	16.43																																																																		
I_a	0.000	0.000	0.00																																																																		
I_b	6.340	4.210	151.87																																																																		
I_c	6.331	4.204	40.89																																																																		
2-poliger Fehler mit Erdberührung	[p.u.]	[°]																																																																			
Idiff_A	1.721	-98.14																																																																			
Istab_A	0.860																																																																				
Idiff_B	1.402	-81.57																																																																			
Istab_B	3.884																																																																				
Idiff_C	1.743	-70.82																																																																			
Istab_C	4.057																																																																				
<table border="1"> <tr> <td>Trafo</td> <td>U1N [kV]</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td></td> <td>U2N [kV]</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SN [MVA]</td> <td>600</td> </tr> <tr> <td></td> <td>uk [%]</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td></td> <td>DeltaU [kV]</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Stufe</td> <td>9</td> </tr> </table>	Trafo	U1N [kV]	400		U2N [kV]	230		SN [MVA]	600		uk [%]	18		DeltaU [kV]	5		Stufe	9	<table border="1"> <tr> <td>2-poliger Fehler ohne Erdberührung</td> <td>[kA]</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>I_A</td> <td>0.375</td> <td>0.433</td> <td>-173.65</td> </tr> <tr> <td>I_B</td> <td>2.960</td> <td>3.418</td> <td>-173.65</td> </tr> <tr> <td>I_C</td> <td>3.335</td> <td>3.851</td> <td>6.35</td> </tr> <tr> <td>I_a</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>I_b</td> <td>5.221</td> <td>3.466</td> <td>-173.65</td> </tr> <tr> <td>I_c</td> <td>5.221</td> <td>3.466</td> <td>6.35</td> </tr> </table>	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	[kA]	[p.u.]	[°]	I_A	0.375	0.433	-173.65	I_B	2.960	3.418	-173.65	I_C	3.335	3.851	6.35	I_a	0.000	0.000	0.00	I_b	5.221	3.466	-173.65	I_c	5.221	3.466	6.35	<table border="1"> <tr> <td>2-poliger Fehler ohne Erdberührung</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>Idiff_A</td> <td>0.433</td> <td>-173.65</td> </tr> <tr> <td>Istab_A</td> <td>0.217</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_B</td> <td>0.049</td> <td>6.35</td> </tr> <tr> <td>Istab_B</td> <td>3.442</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_C</td> <td>0.384</td> <td>6.35</td> </tr> <tr> <td>Istab_C</td> <td>3.659</td> <td></td> </tr> </table>	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	[p.u.]	[°]	Idiff_A	0.433	-173.65	Istab_A	0.217		Idiff_B	0.049	6.35	Istab_B	3.442		Idiff_C	0.384	6.35	Istab_C	3.659	
Trafo	U1N [kV]	400																																																																			
	U2N [kV]	230																																																																			
	SN [MVA]	600																																																																			
	uk [%]	18																																																																			
	DeltaU [kV]	5																																																																			
	Stufe	9																																																																			
2-poliger Fehler ohne Erdberührung	[kA]	[p.u.]	[°]																																																																		
I_A	0.375	0.433	-173.65																																																																		
I_B	2.960	3.418	-173.65																																																																		
I_C	3.335	3.851	6.35																																																																		
I_a	0.000	0.000	0.00																																																																		
I_b	5.221	3.466	-173.65																																																																		
I_c	5.221	3.466	6.35																																																																		
2-poliger Fehler ohne Erdberührung	[p.u.]	[°]																																																																			
Idiff_A	0.433	-173.65																																																																			
Istab_A	0.217																																																																				
Idiff_B	0.049	6.35																																																																			
Istab_B	3.442																																																																				
Idiff_C	0.384	6.35																																																																			
Istab_C	3.659																																																																				
<table border="1"> <tr> <td>Leitung</td> <td>R/X</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>R [Ω]</td> <td>0.1762</td> </tr> <tr> <td></td> <td>X [Ω]</td> <td>0.881</td> </tr> </table>	Leitung	R/X	0.2		R [Ω]	0.1762		X [Ω]	0.881	<table border="1"> <tr> <td>1-poliger Fehler</td> <td>[kA]</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>I_A</td> <td>2.634</td> <td>3.041</td> <td>-83.61</td> </tr> <tr> <td>I_B</td> <td>1.552</td> <td>1.793</td> <td>96.39</td> </tr> <tr> <td>I_C</td> <td>1.082</td> <td>1.249</td> <td>96.39</td> </tr> <tr> <td>I_a</td> <td>6.554</td> <td>4.351</td> <td>-83.61</td> </tr> <tr> <td>I_b</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>I_c</td> <td>0.000</td> <td>0.000</td> <td>0.00</td> </tr> </table>	1-poliger Fehler	[kA]	[p.u.]	[°]	I_A	2.634	3.041	-83.61	I_B	1.552	1.793	96.39	I_C	1.082	1.249	96.39	I_a	6.554	4.351	-83.61	I_b	0.000	0.000	0.00	I_c	0.000	0.000	0.00	<table border="1"> <tr> <td>1-poliger Fehler</td> <td>[p.u.]</td> <td>[°]</td> </tr> <tr> <td>Idiff_A</td> <td>1.310</td> <td>96.39</td> </tr> <tr> <td>Istab_A</td> <td>3.696</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_B</td> <td>1.793</td> <td>96.39</td> </tr> <tr> <td>Istab_B</td> <td>0.896</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Idiff_C</td> <td>1.249</td> <td>96.39</td> </tr> <tr> <td>Istab_C</td> <td>0.624</td> <td></td> </tr> </table>	1-poliger Fehler	[p.u.]	[°]	Idiff_A	1.310	96.39	Istab_A	3.696		Idiff_B	1.793	96.39	Istab_B	0.896		Idiff_C	1.249	96.39	Istab_C	0.624										
Leitung	R/X	0.2																																																																			
	R [Ω]	0.1762																																																																			
	X [Ω]	0.881																																																																			
1-poliger Fehler	[kA]	[p.u.]	[°]																																																																		
I_A	2.634	3.041	-83.61																																																																		
I_B	1.552	1.793	96.39																																																																		
I_C	1.082	1.249	96.39																																																																		
I_a	6.554	4.351	-83.61																																																																		
I_b	0.000	0.000	0.00																																																																		
I_c	0.000	0.000	0.00																																																																		
1-poliger Fehler	[p.u.]	[°]																																																																			
Idiff_A	1.310	96.39																																																																			
Istab_A	3.696																																																																				
Idiff_B	1.793	96.39																																																																			
Istab_B	0.896																																																																				
Idiff_C	1.249	96.39																																																																			
Istab_C	0.624																																																																				

Abbildung 62: Registerkarte „Eingabe_Ausgabe“ der Längs- bzw. Schrägregelung

In der Registerkarte „Berechnung_US“ werden die Fehlerströme auf der Unterspannungsseite des Transformators bestimmt, siehe Abbildung 63. Die Ermittlung der oberspannungsseitigen Ströme erfolgt in den Registerkarten „Berechnung_OS1...3“, für die 3 unterschiedlichen Verschaltungen. Die dafür notwendigen Formeln wurden in Abschnitt 3.1 und 3.2 näher beschrieben. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung dieser Registerkarte in der Arbeit verzichtet.

Zur Bestimmung des Betrags und Winkels der Primärspannung des Transformators beim Einsatz der Längs- bzw. Schrägregelung dienen folgende VBA Funktionen (Code 3). Um den Betrag der Primärspannung bestimmen zu können, wird zunächst der Betrag der Zusatzspannung berechnet. Diese Zusatzspannung wird dann in eine x und eine y Komponente zerlegt. Die y Komponente ist jene, welche normal auf die ursprüngliche Spannung U1N steht, die x Komponente liegt parallel zu dieser Spannung. Abhängig, ob die Stufe positiv oder negativ ist, wird die Komponente in x Richtung addiert oder subtrahiert. Mittels des Satzes von Pythagoras kann der Gesamtbetrag bestimmt werden.

Ähnlich wird mit dem Winkel verfahren, es wird lediglich aus der x und y Komponente nicht der Betrag, sondern mittels arctan der Winkel berechnet.

```

Function MyU(U1N As Double, DeltaU As Double, Stufe As Integer) As Double
    ZusatzU = Abs(Stufe * DeltaU)
    ZusatzUx = ZusatzU * Cos(60 * WorksheetFunction.Pi / 180)
    ZusatzUy = ZusatzU * Sin(60 * WorksheetFunction.Pi / 180)
    Uly = ZusatzUy

    If Stufe >= 0 Then
        U1x = U1N - ZusatzUx
    Else
        U1x = U1N + ZusatzUx
    End If

    MyU = Sqr(U1x ^ 2 + Uly ^ 2)
End Function

Function MyDelta(U1N As Double, DeltaU As Double, Stufe As Integer) As Double
    ZusatzU = Abs(Stufe * DeltaU)
    ZusatzUx = ZusatzU * Cos(60 * WorksheetFunction.Pi / 180)
    ZusatzUy = ZusatzU * Sin(60 * WorksheetFunction.Pi / 180)

    If Stufe >= 0 Then
        U1x = U1N - ZusatzUx
        Uly = -ZusatzUy
    Else
        U1x = U1N + ZusatzUx
        Uly = ZusatzUy
    End If

    MyDelta = Atn(Uly / U1x) * 180 / WorksheetFunction.Pi
End Function
    
```

Code 3: VBA – Funktionen der Längs- bzw. Schrägregelung

Trafo Verschaltung	Opt_Feld_Eingabe		2	3-poliger Fehler	I_MIT	666.957449052092-5991.57797102416i
	Opt_Feld_Ergebnis		1		I_a	666.957449052092-5991.57797102416i
					I_b	-5522.33745618819+2418.1868913897i
Netz	ZN [Ω]		14.44		I_c	4855.3800071361+3573.39107963446i
	XN [Ω]		14.440	2-poliger Fehler mit Erdberührung	I_MIT	467.674183519755-4184.82979675808i
	RN [Ω]		0.000		I_GEG	-199.283265532337+1806.74817426608i
	XN' [Ω]		5.304		I_NULL	-268.390917987418+2378.081622492i
	RN' [Ω]		0.000		I_a	0
	ZN' [Ω]		5.30377365040792i		I_b	-5591.44510864327+2989.52033961563i
					I_c	4786.27235468102+4144.72452786037i
Trafo	U1 [kV]		379.506	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	I_MIT	333.478724526046-2995.78898551208i
	Delta [°]		-5.894		I_GEG	-333.478724526046+2995.78898551208i
	XT' [Ω]		15.870		I_a	0
	ZT' [Ω]		15.87i		I_b	-5188.85873166214-577.60209412238i
	ü		1.650		I_c	5188.85873166214+577.60209412238i
	üKomplex	1.64130434782609-0.169439752914346i				
	üKon	1.64130434782609+0.169439752914346i				
Leitung	ZL'		0.1762+0.881i	1-poliger Fehler	I_MIT	243.203555187298-2171.05928755241i
					I_a	729.610665561894-6513.17786265723i
Spannung	ULN'	132260.413862231+13653.8795348029i			I_b	0
					I_c	0
Impedanz	Mitsystem		0.1762+22.0547736504079i			
	Gegensystem		0.1762+22.0547736504079i			
	Nullsystem		0.1762+16.751i			
	GEG NULL	0.0897455738049718+9.52023522701521i				
Drehoperatoren	a		-0.5+0.866025403784439i			
	a^2		-0.5-0.866025403784438i			

Abbildung 63: Registerkarte „Berechnung_US“ der Längs- bzw. Schrägregelung

3.5.2. Excel File der Querregelung

Ein vergleichbares Excel File wurde auch für die Querregelung erstellt. Die Registerkarte Eingabe_Ausgabe ist in Abbildung 64 dargestellt. Der grundsätzliche Aufbau entspricht dem Excel File der Längs- bzw. Schrägregelung.

Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die VBA – Funktionen an die Querregelung der Sekundärseite angepasst sind, das bedeutet, dass die Zusatzspannung normal auf die Spannung der sekundären Stammwicklung steht. Code 4 zeigt die Realisierung in VBA.

Netz	UN [kV]	220	3-poliger Fehler		[kA]	[p.u.]	[*°]	3-poliger Fehler		[p.u.]	[*°]
	SK" [MVA]	4840		I_A	3.142	6.530	-88.23		Idiff_A	1.944	-124.33
	R/X	0		I_B	3.142	6.530	151.77		Istab_A	5.810	
Trafo	U1N [kV]	240	2-poliger Fehler mit Erdberührung	I_C	3.142	6.530	31.77	2-poliger Fehler mit Erdberührung	Idiff_B	1.944	115.67
	U2N [kV]	120		I_a	4.898	5.090	-75.23		Istab_B	5.810	
	SN [MVA]	200		I_b	4.898	5.090	164.77		Idiff_C	1.944	-4.33
	uk [%]	15	I_c	4.898	5.090	44.77	Istab_C	5.810			
Querregelung	DeltaU [kV]	2	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	I_A	1.408	2.926	-105.02	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	Idiff_A	2.926	-105.02
	Stufe	-8		I_B	2.456	5.105	174.40		Istab_A	1.463	
				I_C	3.024	6.286	21.73		Idiff_B	1.319	-91.04
Längsregelung	DeltaU [kV]	4	1-poliger Fehler	I_a	0.000	0.000	0.00	1-poliger Fehler	Istab_B	5.239	
	Stufe	-12		I_b	5.171	5.374	160.23		Idiff_C	2.940	-36.23
Leitung	R/X	0.3	I_c	5.141	5.343	49.54	Istab_C	5.815			
	R [Ω]	0.51402	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	I_A	0.707	1.469	-165.23	2-poliger Fehler ohne Erdberührung	Idiff_A	1.469	-165.23
	X [Ω]	1.7134		I_B	2.297	4.775	-165.23		Istab_A	0.735	
		I_C		3.004	6.244	14.77	Idiff_B		0.367	-165.23	
			I_a	0.000	0.000	0.00	Istab_B	4.591			
			I_b	4.241	4.408	-165.23	Idiff_C	1.837	14.77		
			I_c	4.241	4.408	14.77	Istab_C	5.326			
			1-poliger Fehler	I_A	2.224	4.622	-75.07	1-poliger Fehler	Idiff_A	0.924	104.93
				I_B	1.557	3.236	104.93		Istab_A	5.085	
				I_C	0.667	1.387	104.93		Idiff_B	3.236	104.93
			I_a	5.337	5.547	-75.07	Istab_B	1.618			
			I_b	0.000	0.000	0.00	Idiff_C	1.387	104.93		
			I_c	0.000	0.000	0.00	Istab_C	0.693			

Abbildung 64: Registerkarte „Eingabe_Ausgabe“ der Querregelung

```
Function MyU(U2N As Double, DeltaU As Double, Stufe As Integer) As Double
```

```
    ZusatzU = Abs(Stufe * DeltaU)
```

```
    MyU = Sqr(U2N ^ 2 + (2 * ZusatzU * Cos(30 * WorksheetFunction.Pi / 180)) ^ 2)
```

```
End Function
```

```
Function MyDelta(U2N As Double, DeltaU As Double, Stufe As Integer) As Double
```

```
    ZusatzU = Abs(Stufe * DeltaU)
```

```
    If Stufe >= 0 Then
```

```
        C = -1
```

```
    Else
```

```
        C = 1
```

```
    End If
```

```
    MyDelta = Atn(C * (2 * ZusatzU * Cos(30 * WorksheetFunction.Pi / 180)) / U2N) * 180 / WorksheetFunction.Pi
```

```
End Function
```

Code 4: VBA – Funktionen der Querregelung

4. Simulation

4.1. Einfluss der Längsregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes

Zunächst wird diskutiert, wie sich der Einsatz der Längsregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes auswirkt, dazu werden unterschiedliche Fehlerstromstärken bei unterschiedlichen Fehlerarten untersucht.

Für die Simulation wird ein 400 kV zu 230 kV Transformator (YNyn0/d5) herangezogen, wobei der unterspannungsseitige Sternpunkt mit Erde verbunden ist. Der Transformator verfügt auf der Primärseite je nach Verschaltung über eine Längs- bzw. Schrägregelung (L2-L3-L1). Der Versuch wird aus einem idealen Netz gespeist, da die Netzimpedanz auf die eigentliche Funktion des Differentialschutzes keinen wesentlichen Einfluss hat. Wie in Abbildung 65 dargestellt, folgt auf den Transformator eine Leitung mit der unterschiedliche Leitungsimpedanzen (-längen) bis zur Fehlerstelle simuliert werden. Bei der Leitung handelt es sich um eine 220 kV Leitung mit einem R/X – Verhältnis von 0,2. Zur Berechnung der jeweiligen Leitungs- bzw. Fehlerimpedanz wird der 3 – polige Kurzschluss bei Stufe null der Regelung herangezogen. Die Fehlerimpedanz wird für alle anderen Fehlerarten konstant gehalten, um diese miteinander vergleichen zu können. Zur Berechnung der Impedanzen wird der 1 -, 3 – und 5 – fache Transformatornennstrom verwendet.

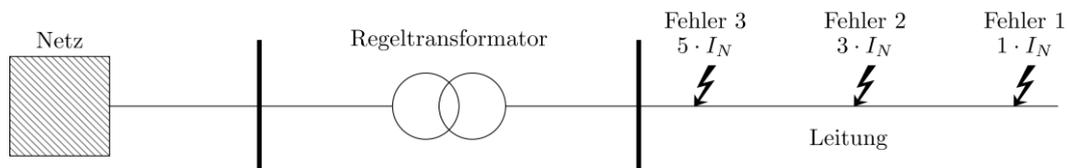


Abbildung 65: Modellierung des Netzes mit eingezeichneten Fehlerstellen

In Tabelle 4 sind die für die Simulation notwendigen Parameter zusammengefasst.

Tabelle 4: Simulationsparameter der Längs- bzw. Schrägregelung

Netz	U_N	380 kV
a)		
Regeltransformator	U_{1N}	400 kV
	U_{2N}	230 kV
	S_n	600 MVA
	u_k	18%
	ΔU	5 kV
	Stufen	-12 . . . 13
b)		
Leitung	X für Fehler 1	66,815 Ω
	X für Fehler 2	11,947 Ω
	X für Fehler 3	0,881 Ω
	R/X	0,2

c)

Aufgrund der besseren Lesbarkeit sind die (End-) Stellungen der Regelung nur für Fehler 3 eingetragen, gelten aber in gleicher Weise auch für Fehler 1 und 2.

4.1.1. 3 – poliger Kurzschluss

Im ersten Schritt wird ein 3 – poliger Kurzschluss untersucht. Zur Berechnung der normierten Ströme auf der Primär- und Sekundärseite des Transformators werden die jeweiligen Nennströme bei Stufe null der Regelung herangezogen. Durch den Einsatz der Längsregelung, weicht das tatsächliche Übersetzungsverhältnis vom Nennübersetzungsverhältnis ab und wir erwarten, dass das Schutzgerät einen Differentialstrom errechnet. Nun stellt sich die Frage, ob die Stabilisierung ausreicht, um eine Fehlauslösung zu verhindern.

Der Differentialstrom hat in allen drei Phasen dieselbe Abhängigkeit vom Stabilisierungsstrom, da es sich um einen symmetrischen Fehler handelt. Bei Stufe 13 der Längsregelung, ist die primäre Nennspannung des Transformators am größten und damit auch das Übersetzungsverhältnis. Mit steigendem Übersetzungsverhältnis sinkt jedoch die Spannung auf der Sekundärseite des Transformators. Das hat zur Folge, dass auch der Fehlerstrom absinkt. Deshalb ist das jener Betriebspunkt, bei dem der Stabilisierungsstrom, also die Summe des ober- und unterspannungsseitigen Stroms, am geringsten ist. Wie noch gezeigt wird, ist der Differentialstrom bei einer positiven Stufe der Längsregelung bei konstantem Fehlerstrom kleiner als bei derselben negativen Stufe. In Kombination mit einem geringeren Fehlerstrom, ist der Differentialstrom in diesem Punkt deutlich kleiner als bei Stufe -12 der Regelung.

Mit abnehmender Stufe sinkt das Übersetzungsverhältnis, das bewirkt, dass der Fehlerstrom und damit auch der Stabilisierungsstrom ansteigt. Der Differentialstrom sinkt ab, da sich das tatsächliche Übersetzungsverhältnis immer mehr an das Nennübersetzungsverhältnis annähert. Bei Stufe null verschwindet der Differentialstrom.

Wird nun die Stufe negativ, so wird das tatsächliche Übersetzungsverhältnis kleiner als das Nennübersetzungsverhältnis und der Differentialstrom steigt wieder an. Der Stabilisierungsstrom steigt auch weiter an, da die Fehlerströme aufgrund des kleiner werdenden Übersetzungsverhältnisses weiter ansteigen. Für jede der drei Fehlerimpedanzen stellt sich bei Stufe -12 der größte Differential- bzw. auch Stabilisierungsstrom ein.

Wie in Abbildung 66 zu erkennen ist, wird in keinen der drei Fälle die Auslösekennlinie überschritten, daher sind bei einem 3 – poligen Kurzschluss keine weiteren Maßnahmen zusätzlich zur Stabilisierung notwendig.

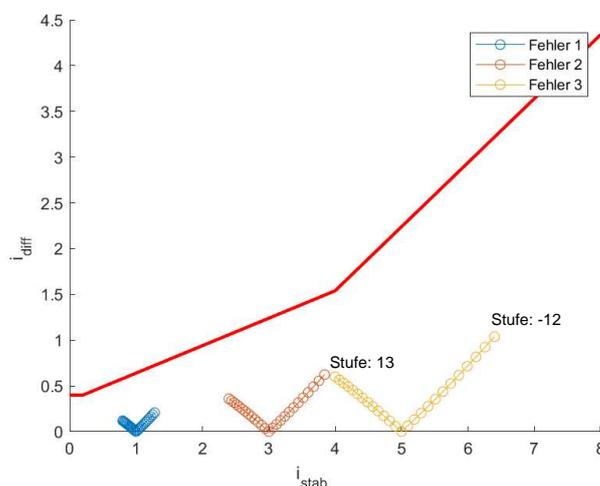


Abbildung 66: Differentialstrom bei einem 3 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase a, b, c)

Anmerkung: Würde beim Einsatz einer (symmetrischen) Längsregelung der Fehlerstrom konstant gehalten werden, dann wären trotzdem die Differentialströme der beiden Endstellungen der Regelung nicht gleich. Um das zu zeigen, gehen wir von einer bezogenen Änderung des Übersetzungsverhältnisses von $\pm 15\%$ aus. Damit lässt sich wie folgt, der Differentialstrom aus dem Sekundärstrom berechnen.

$$i_{diff,pos} = i_2 \cdot \left| \frac{1}{1,15} - 1 \right| = 0,130 \cdot i_2 \Rightarrow \text{pos. Endstellung} \quad (94)$$

$$i_{diff,neg} = i_2 \cdot \left| \frac{1}{0,85} - 1 \right| = 0,176 \cdot i_2 \Rightarrow \text{neg. Endstellung} \quad (95)$$

Es zeigt sich, dass bei der negativen Endstellung ein um 35% höherer Differentialstrom auftritt. Dieses Phänomen ist auch in Abbildung 67 beobachtbar, in der die Abhängigkeit des Differentialstroms vom Haltestrom bei konstantem Fehlerstrom ($3 \cdot I_N$) dargestellt ist.

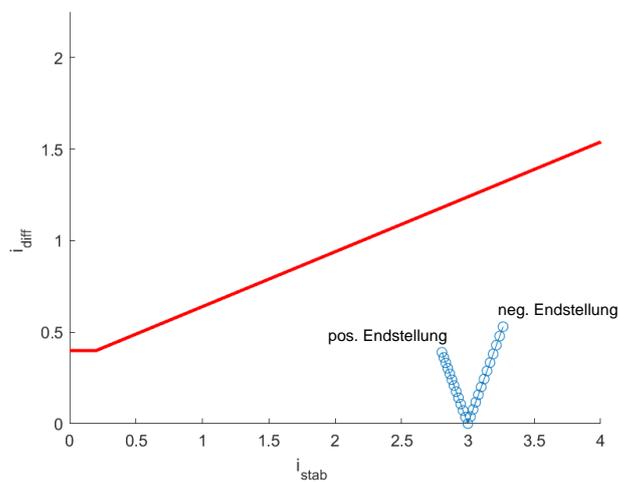


Abbildung 67: Differentialstrom bei einem 3-poligen Kurzschluss und Einsatz der Längsregelung bei konstantem Fehlerstrom ($3 \cdot I_N$) (Phase a, b, c)

4.1.2. 2 – poliger Kurzschluss

Für den Fall eines 2 – poligen Kurzschlusses in Phase b und c, weist der Differentialstrom in den betroffenen Phasen denselben prinzipiellen V – förmigen Verlauf auf, wie im 3 – poligen Fehlerfall. Der Strom in Phase a ist primär und sekundär null und kann daher vernachlässigt werden.

Wie im 3 – poligen Fehlerfall, kommt es auch hier zu keiner Auslösung des Schutzes, siehe Abbildung 68.

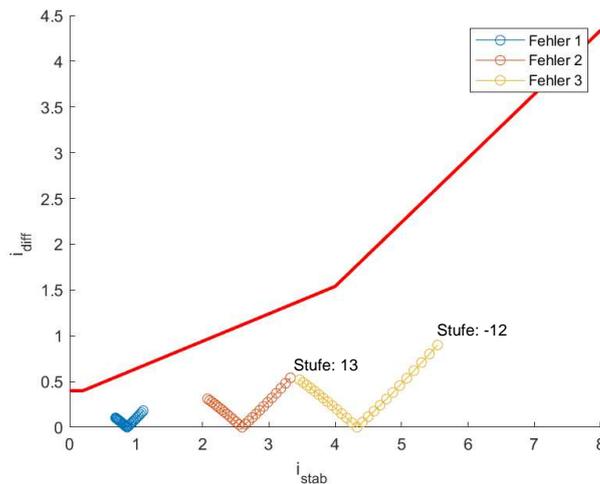


Abbildung 68: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase b, c)

4.1.3. 1 – poliger Erdkurzschluss

Es handelt sich hierbei um einen sogenannten Erdkurzschluss, da der sekundäre Transformator Sternpunkt widerstandslos mit Erde verbunden ist. Wie Abbildung 69 und 70 zeigen, liegt der Differentialstrom deutlich über der Auslösekennlinie.

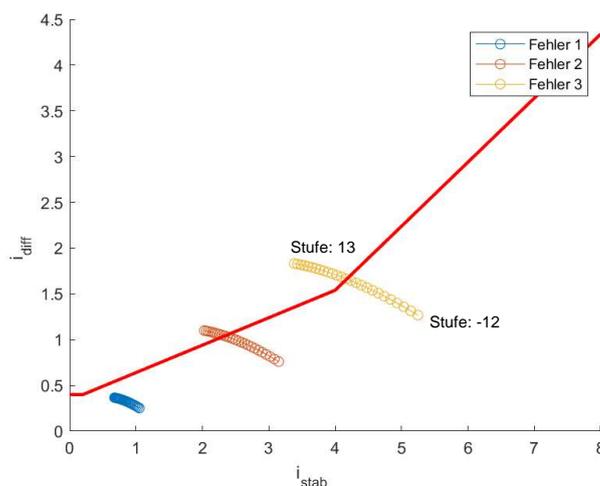


Abbildung 69: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase a)

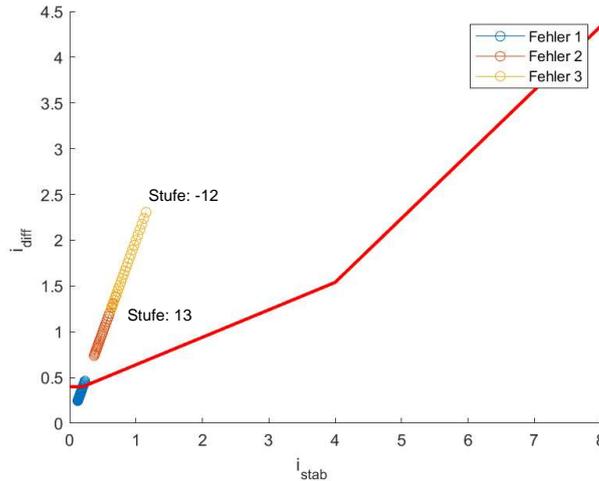


Abbildung 70: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase b, c)

Damit kein Nullsystem auf die Oberspannungsseite des Transformators verschleppt wird, ist nur der unterspannungsseitige Sternpunkt geerdet. Der Differentialschutz berechnet aufgrund des „fehlenden“ Nullsystems auf der Oberspannungsseite einen massiven Differentialstrom. Um die ober- und unterspannungsseitigen Ströme wieder vergleichen zu können, muss zuvor unterspannungsseitig das Stromnullsystem ebenfalls eliminiert werden, dazu wird die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Nullstromaussiebung verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 71 und 72 dargestellt.

Der Differentialstrom wird wieder durch V – Kurven beschrieben wobei die Auslösekennlinie nicht mehr überschritten wird

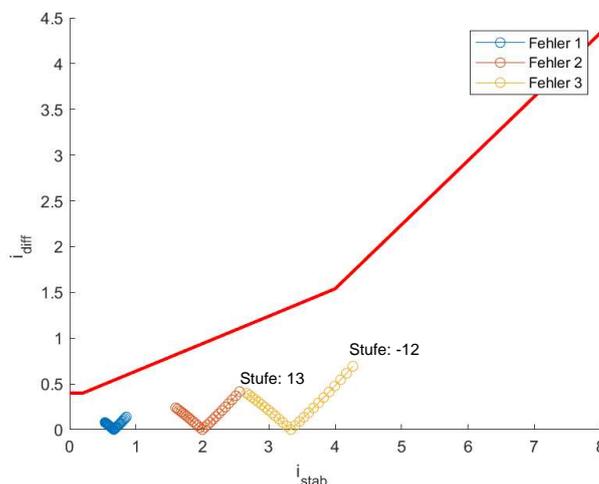


Abbildung 71: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung mit Nullstromaussiebung (Phase a)

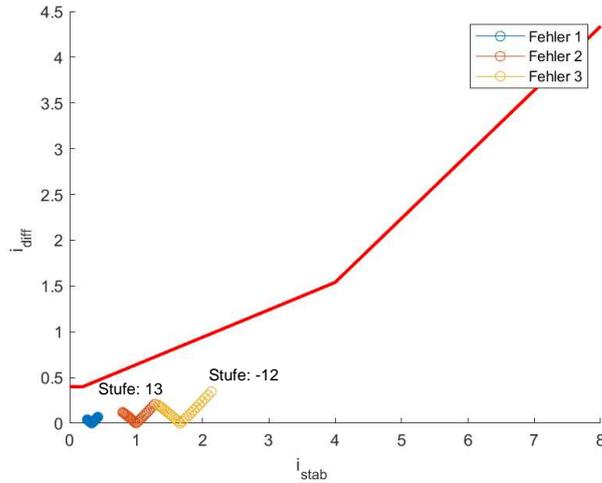


Abbildung 72: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung mit Nullstromaussiebung (Phase b, c)

4.1.4. 2 – poliger Erdkurzschluss

Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, wird der Nullstrom nicht auf die Oberspannungsseite des Transformators übertragen. Das führt wieder dazu, dass ohne Einsatz einer Nullstromaussiebung ein erheblicher Differentialstrom auftritt, vor allem in der vom Fehler nicht betroffenen Phase, welcher die Auslösekennlinie trotz Stabilisierung übersteigt, siehe Abbildung 73 und 74.

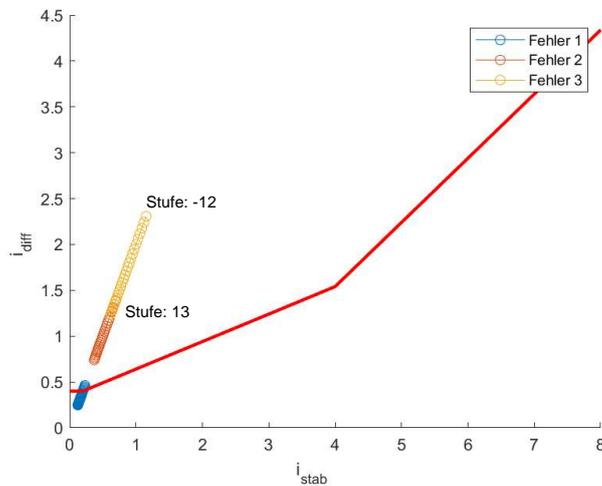


Abbildung 73: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase a)

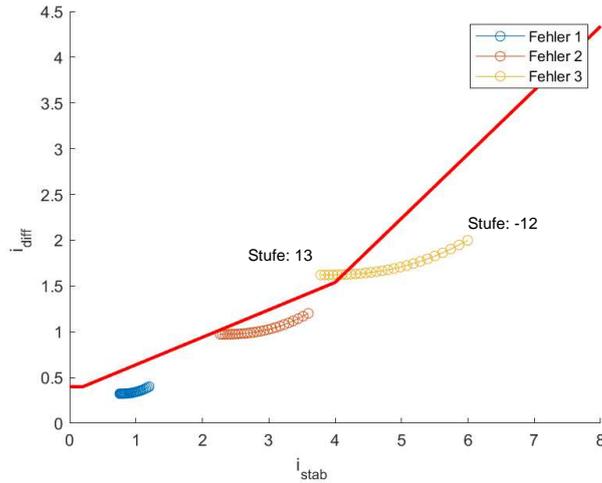


Abbildung 74: Differentialstrom bei einem 2-poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung (Phase b, c)

Durch den Einsatz der Nullstromaussiebung aus Abschnitt 3.3.2 wird der Differentialstrom bei Stufe null gleich null und hat wieder einen V – förmige Verlauf. Wie in Abbildung 75 und 76 zu erkennen ist, bleibt nun der Differentialstrom unterhalb der Auslösekennlinie.

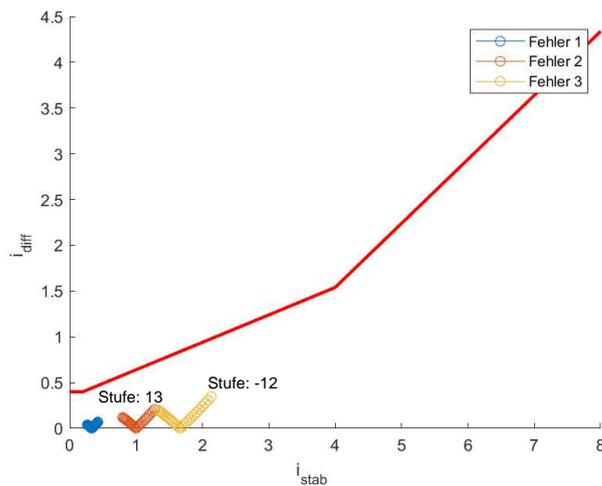


Abbildung 75: Differentialstrom bei einem 2-poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung mit Nullstromaussiebung (Phase a)

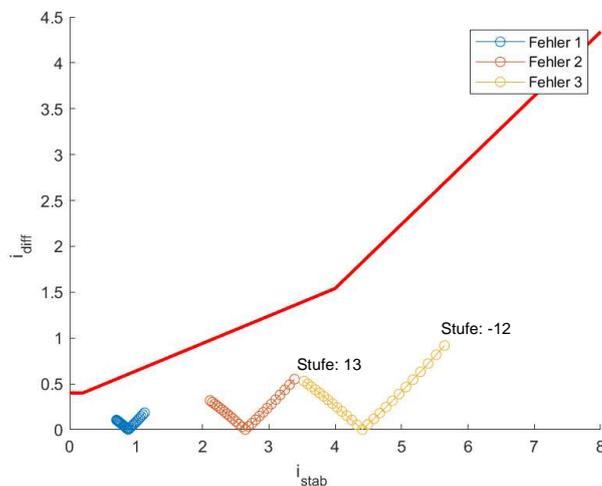


Abbildung 76: Differentialstrom bei einem 2-poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Längsregelung mit Nullstromaussiebung (Phase b, c)

4.2. Einfluss der Schrägregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes

Für die Simulation der Schrägregelung wird dasselbe Modell verwendet, wie bei der Simulation der Längsregelung aus Punkt 4.1. Es wird nur nicht die Stammwicklung mit der Regelwicklung derselben Phase verbunden, sondern die Stammwicklung der Phase a mit der Regelwicklung aus Phase b. Die Verschaltungen der anderen Phasen ergeben sich durch zyklisches Weitertauschen.

4.2.1. 3 – poliger Kurzschluss

Abbildung 77 zeigt, dass die Auslösekennlinie des stabilisierten Differentialschutzes bei einem 3 – poligen Kurzschluss nicht überschritten wird.

Die Zusatzspannung für Phase a stammt nicht wie bei der Längsregelung aus derselben Phase, sondern aus Phase b. Diese hat eine Phasenverschiebung von -120° bzw. $+60^\circ$ gegenüber der Spannung der Stammwicklung. Dadurch wird bei selben ΔU und Stufe der Betrag des Übersetzungsverhältnisses nicht so stark variiert wie beim Einsatz der Längsregelung, jedoch wird das Übersetzungsverhältnis eine komplexe Größe. Die geringere Änderung im Betrag des Übersetzungsverhältnisses führt zu einer geringeren Änderung in der Höhe des Fehlerstroms und damit auch des Stabilisierungsstroms. Die V – Kurven, also die Abhängigkeit des Differentialstroms vom Haltestrom, sind daher deutlich „schmäler“ als beim Einsatz der Längsregelung.

Beim Einsatz der Schrägregelung hat die Spannung der Regelwicklung bei einer positiven Stufe eine Phasenverschiebung von -120° gegenüber der Spannung der Stammwicklung. Damit wird im Gegensatz zur Längsregelung bei einer positiven Stufe der Betrag des Übersetzungsverhältnisses verkleinert und damit die Sekundärspannung vergrößert. Das hat weiters zur Folge, dass die V – Kurven in entgegengesetzter Richtung durchlaufen werden.

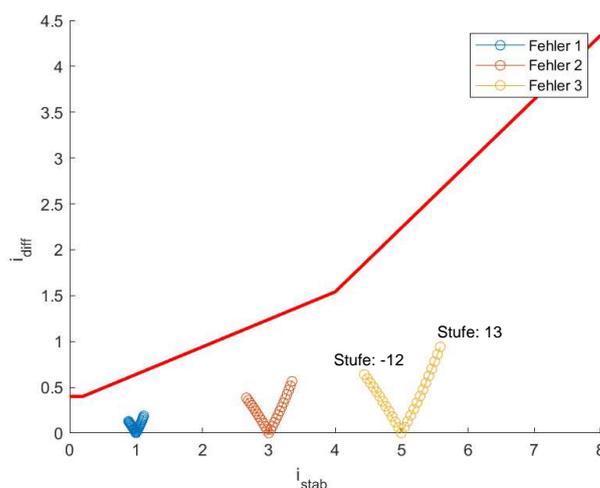


Abbildung 77: Differentialstrom bei einem 3 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase a, b, c)

4.2.2. 1 – poliger Erdkurzschluss

Wie bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, übersteigt der Differentialstrom die Auslösekennlinie im Falle eines 1 – poligen Erdkurzschlusses ohne Nullstromaussiebung, da das Nullsystem nicht auf die Oberspannungsseite übertragen wird. Dieses Phänomen ist auch beim Einsatz der Schrägregelung beobachtbar, siehe Abbildung 78 bis 80.

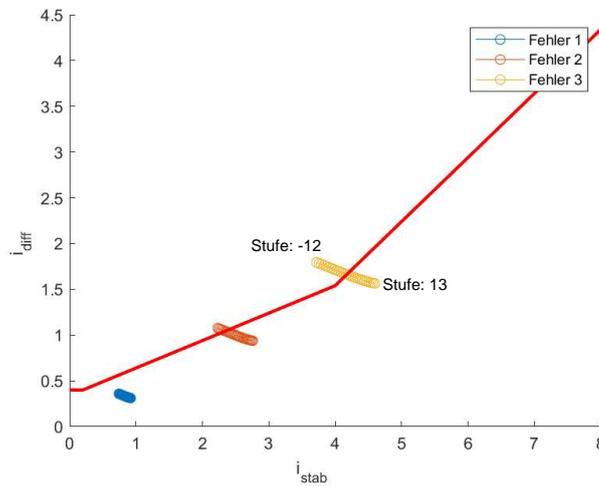


Abbildung 78: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase a)

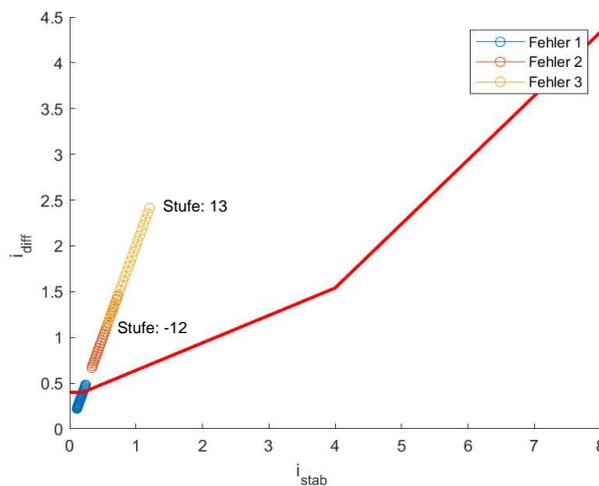


Abbildung 79: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase b)

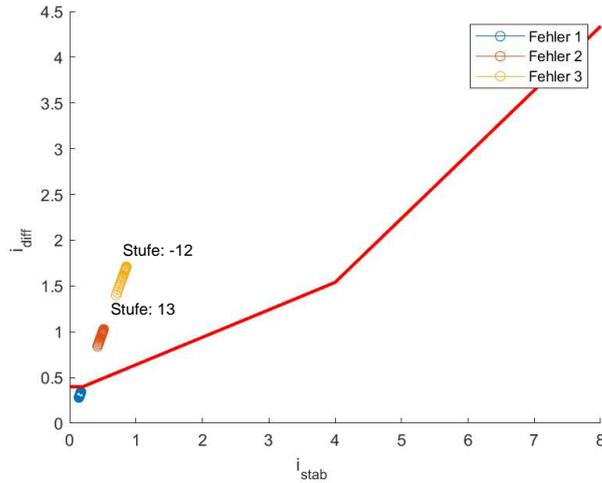


Abbildung 80: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase c)

Der Einsatz der Nullstromaussiebung führt wie beim Einsatz der Längsregelung dazu, dass die stabilisierte Auslösekennlinie nicht mehr verletzt wird (Abbildung 81 bis 83).

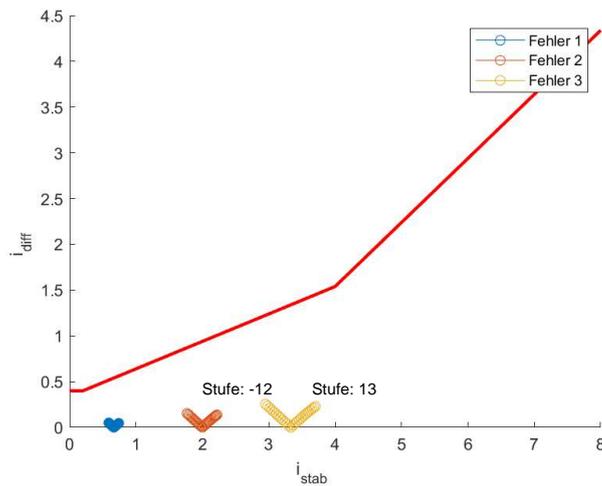


Abbildung 81: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Nullstromaussiebung (Phase a)

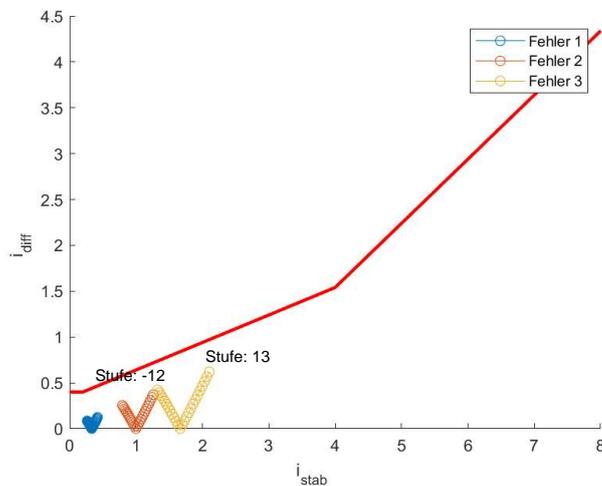


Abbildung 82: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Nullstromaussiebung (Phase b)

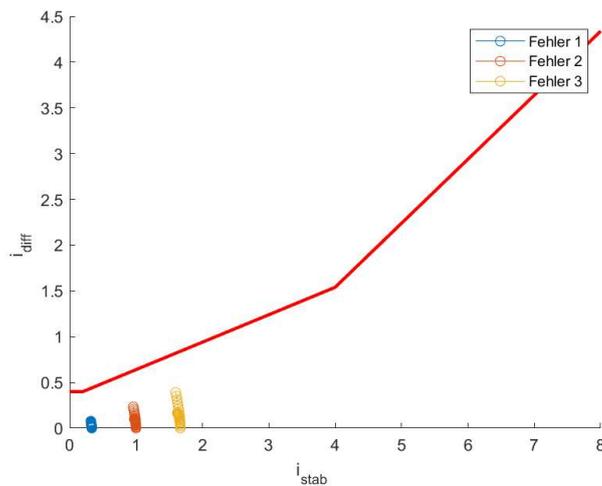


Abbildung 83: Differentialstrom bei einem 1 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Nullstromaussiebung (Phase c)

4.2.3. 2 – poliger Kurzschluss

Im Gegensatz zur Längsregelung, tritt bei einem 2 – poligen Kurzschluss beim Einsatz der Schrägregelung ein erheblicher Differentialstrom in der vom Fehler nicht betroffenen Phase a auf. Der Grund dafür ist, dass die Regelwicklung der Phase a am Schenkel der Phase b sitzt und sich aufgrund der Durchflutungsgleichungen ein Strom in diese Wicklung einstellt. Damit fließt primär ein Strom in Phase a, obwohl der sekundäre Strom in Phase a null ist. Der Differentialstrom ist daher gleich dem Strom auf der Primärseite (der Stabilisierungsstrom ist halb so groß) und führt wie in Abbildung 84 dargestellt, zur Auslösung des Schutzes. Abhilfe schafft das in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt virtuelle Bein.

Der 2 – polige Kurzschluss stellt für den Transformator einen unsymmetrischen Betriebszustand dar, welcher auch eine unsymmetrische Durchflutung der drei Schenkeln zur Folge hat. Da die Regelwicklung der Phase b am Schenkel der Phase c und die Regelwicklung der Phase c am Schenkel der Phase a sitzt, sind die Verläufe der Differentialströme in Phase b und c nicht mehr ident, siehe Abbildung 85 und 86.

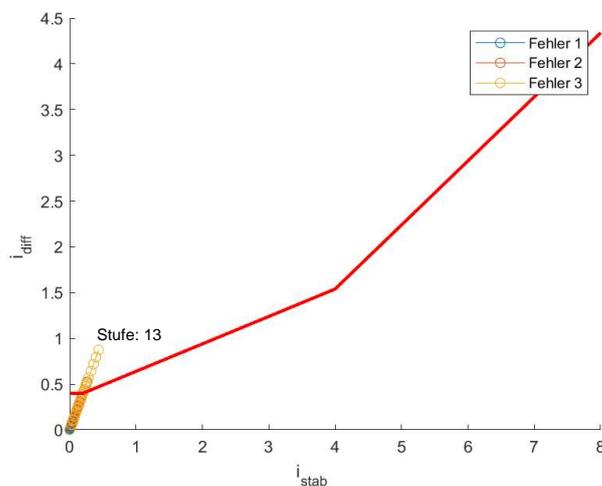


Abbildung 84: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase a)

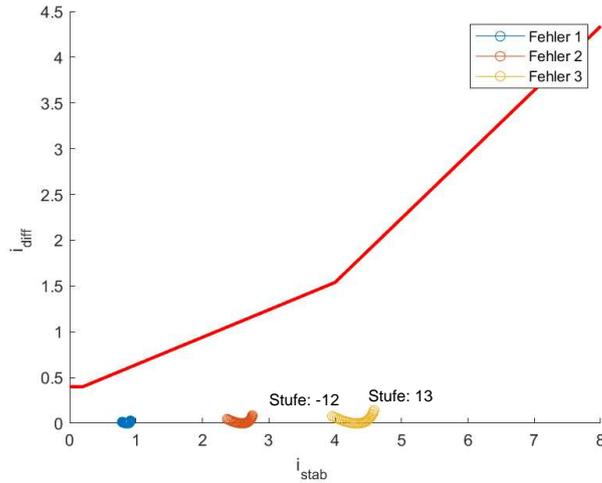


Abbildung 85: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase b)

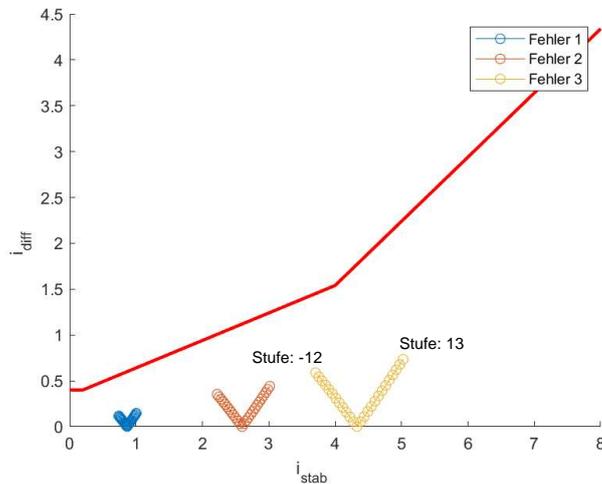


Abbildung 86: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase c)

Um eine Fehlauslösung des Differentialschutzes zu verhindern, wird das sogenannte virtuelle Bein verwendet. Die Formel zur Berechnung des Differentialstroms wird dazu um einen dritten Term dieser virtuellen Wicklung erweitert. Die Stundenziffer muss nun so gewählt werden, dass dieser zusätzliche Term den auftretenden Differentialstrom bestmöglich kompensiert, dazu betrachten wir das Zeigerdiagramm für den Fall einer positiven bzw. negativen Stufe der Schrägregelung, siehe Abbildung 87.

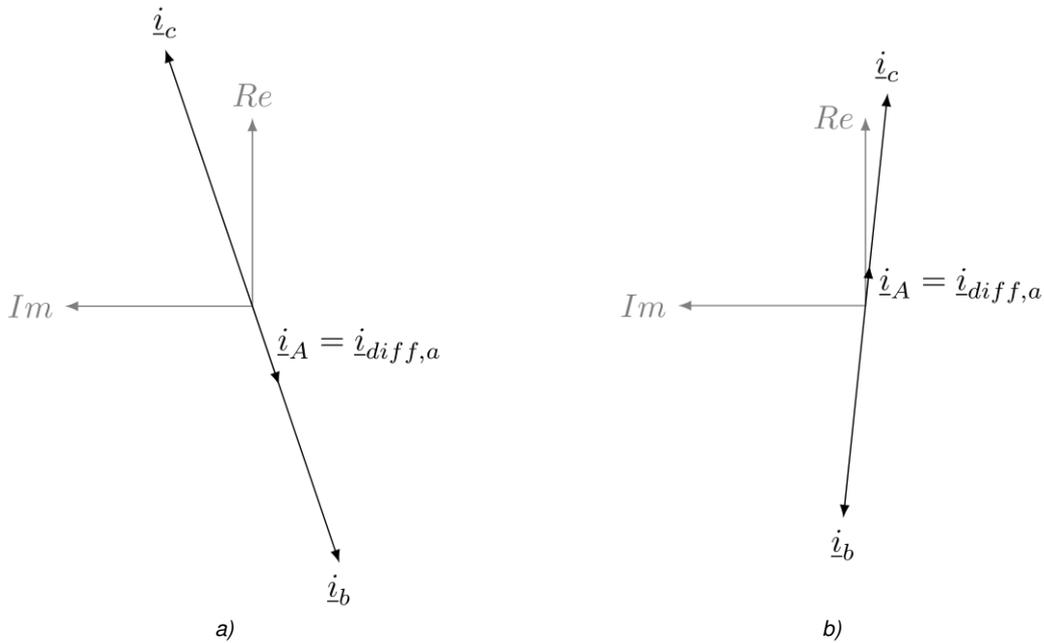


Abbildung 87: Zeigerdiagramm des 2-poligen Kurzschlusses mit Einsatz der Schrägregelung
 a) für eine positive Stufe b) für eine negative Stufe

Es ist zu erkennen, dass der Differentialstrom in Phase a, für eine positive Stufe mit dem Sekundärstrom aus Phase b und für eine negative Stufe mit dem Sekundärstrom aus Phase c in Phase ist. Daher bietet sich die Schaltgruppen 8 bzw. 4 zur Kompensation des Differentialstroms an. Weiters ist der Nennstrom des virtuellen Beins so zu wählen, dass der Differentialstrom für eine bestimmte Stufe verschwindet. Für die Bestimmung des Nennstroms wird Stufe 9 herangezogen, die Ströme dieser Stufe sind in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Ströme bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung bei Stufe 9

	Betrag in kA	Betrag in p.u.	Winkel in °		Betrag in p.u.	Winkel in °
I_A	0.0494	0.570	-173.50	$I_{diff,A}$	0.570	-173.50
I_B	3.897	4.500	-173.50	$I_{stab,A}$	0.285	
I_C	4.391	5.070	6.50	$I_{diff,B}$	0.064	6.50
I_a	0.000	0.000	0.00	$I_{stab,B}$	4.532	
I_b	6.874	4.564	-173.50	$I_{diff,C}$	0.506	6.50
I_c	6.874	4.564	6.50	$I_{stab,C}$	4.817	

Mittels Formel (91) werden die Sekundärströme um die Stundenziffer 8 gedreht.

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} -0,5 & 1 & -0,5 \\ -0,5 & -0,5 & 1 \\ 1 & -0,5 & -0,5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 4,564 e^{-j173,50^\circ} \\ 4,564 e^{j6,50^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,564 e^{-j173,5^\circ} \\ 4,564 e^{j6,50^\circ} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (96)$$

Zur Bestimmung des Nennstroms, wird Formel (92) für Phase a null gesetzt und nach dem Nennstrom der virtuellen Wicklung aufgelöst. Da alle Ströme auf einer Geraden liegen, können die Betragsstriche weggelassen werden.

$$i_{diff,a} = i_A - i_a - \frac{I'_a}{I_{3N}} = 0 \quad (97)$$

$$\frac{I'_a}{I_{3N}} = i_A \Rightarrow I_{3N} = \frac{i'_a}{i_A} \cdot I_{2N} = 12059A \quad (98)$$

In Abbildung 88 bis 90 ist zu erkennen, dass durch den Einsatz des virtuellen Beins, der Differentialstrom die Auslösekennlinie nicht mehr überschreitet. Das virtuelle Bein ist ab Stufe (Betrag) 4 der Schrägregelung aktiv.

Das für die Berechnung der Kompensation des Differentialstroms Stufe 9 verwendet wird und dass das virtuelle Bein ab Stufe 4 aktiv ist, wurde empirisch ermittelt. Die Unstetigkeit in den Plots rührt daher, da das virtuelle Bein nur für Stufen größer gleich 4 wirksam ist.

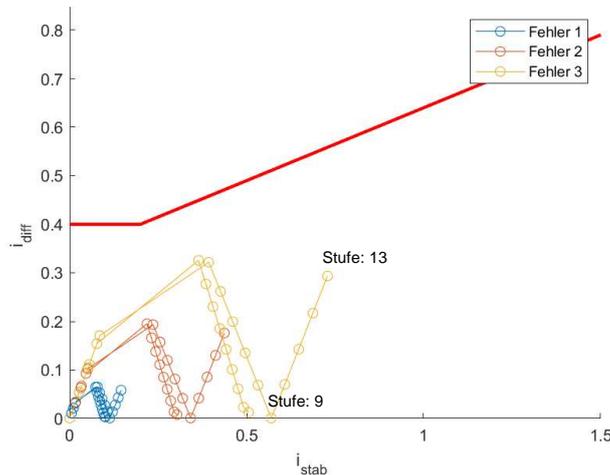


Abbildung 88: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins (Phase a)

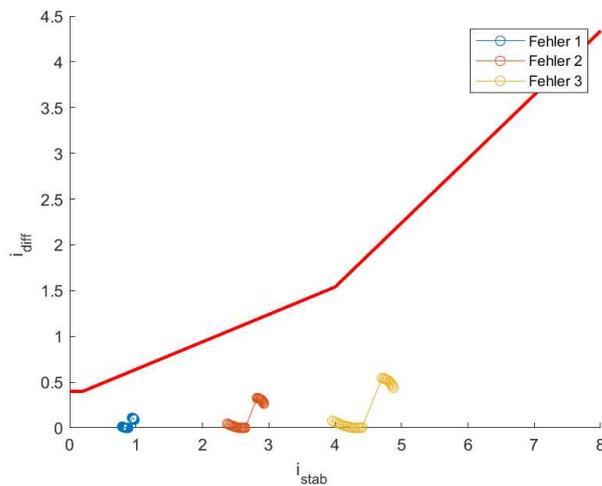


Abbildung 89: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins (Phase b)

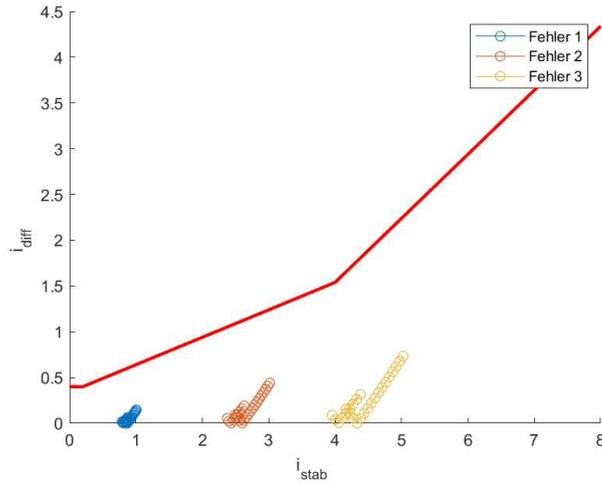


Abbildung 90: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins (Phase c)

4.2.4. 2 – poliger Erdkurzschluss

Durch den Einsatz der Schrägregelung kommt es wie im Punkt 4.2.3 beschrieben zur Bildung eines Differentialstroms, zusätzlich wird das unterspannungsseitige Nullsystem nicht auf die Oberspannungsseite übertragen, wodurch der Differentialstrom weiter vergrößert wird, siehe Abbildung 91 bis 93. Daher sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um eine Fehlauflösung zu verhindern.

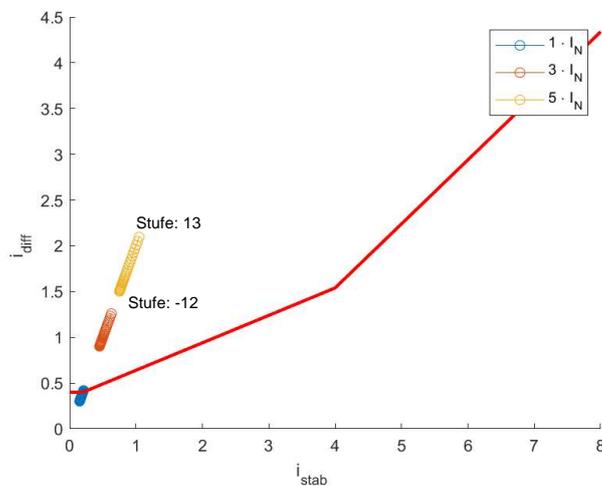


Abbildung 91: Differentialstrom bei einem 2-poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase a)

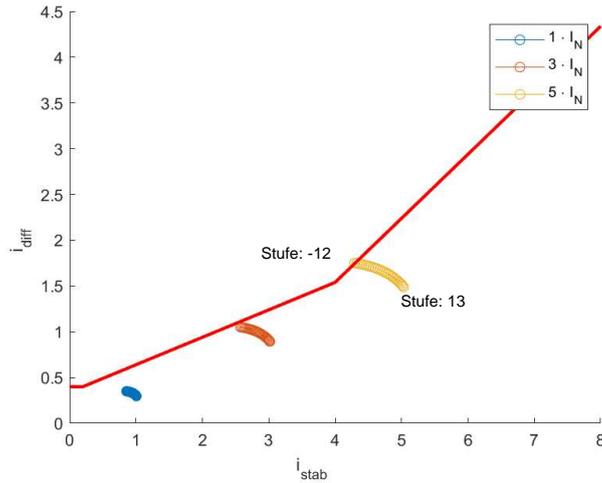


Abbildung 92: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase b)

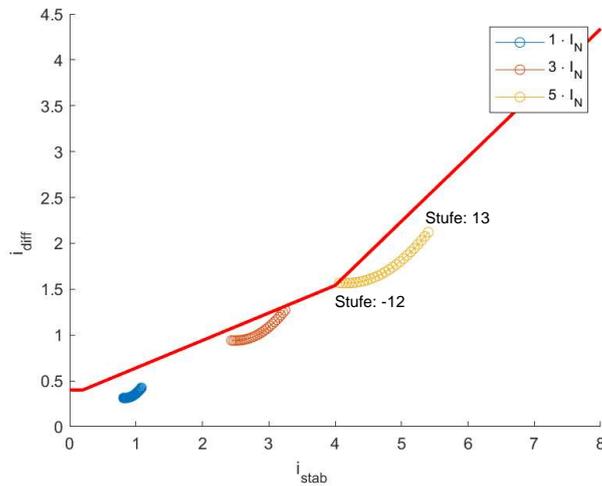


Abbildung 93: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung (Phase c)

In Abbildung 94 bis 96 ist zu erkennen, dass bei Verwendung der Nullstromaussiebung und dem Einsatz des virtuellen Beins die Auslösekennlinie in keinen der drei Phasen mehr verletzt wird.

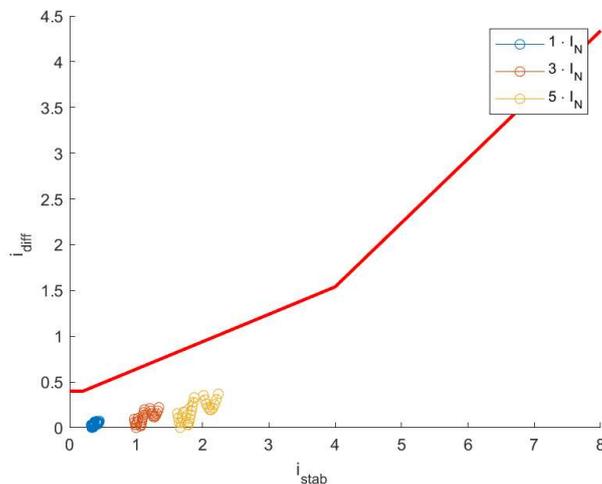


Abbildung 94: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins und der Nullstromaussiebung (Phase a)

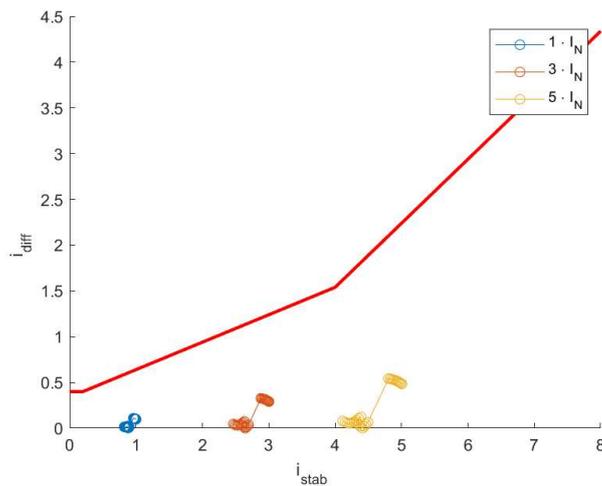


Abbildung 95: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins und der Nullstromaussiebung (Phase b)

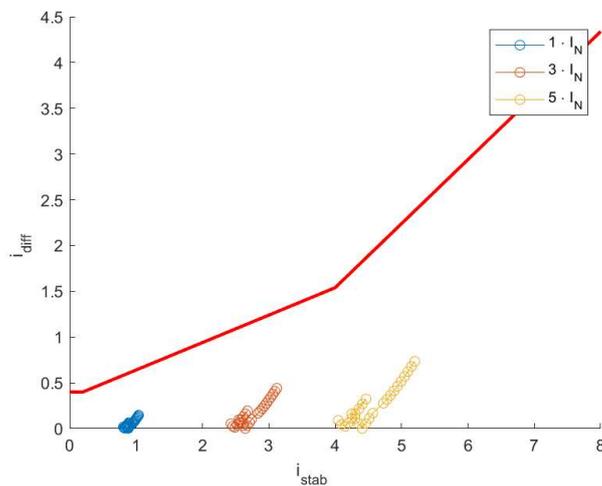


Abbildung 96: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Erdkurzschluss und Einsatz der Schrägregelung mit Verwendung des virtuellen Beins und der Nullstromaussiebung (Phase c)

4.3. Einfluss der Querregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes

Das Simulink Modell enthält sowohl eine Querregelung auf der Sekundärseite als auch eine Längsregelung auf der Primärseite. Zunächst wird nur der Einfluss der Querregelung untersucht. In einem zweiten Schritt wird der gemeinsame Einfluss der Quer- und Längsregelung auf den Differentialstrom analysiert.

Die Schaltgruppe des Transformators ist wieder YNyn0/d5, jedoch wird die Spannung von 220 kV auf 110 kV transformiert. Üblicherweise werden 110 kV Netz gelöscht betrieben, das bedeutet, der sekundäre Sternpunkt des Transformators wird induktiv über eine Petersenspule geerdet. Um die Petersenspule nach Formel (58) bemessen zu können, muss die Leiter – Erde Kapazität der Leitung bekannt sein. Hierzu wird ein Kapazitätsbelag von 9 nF/km angenommen. Die Petersenspule wird auf eine Leitungslänge von 100 km abgestimmt. Der Fehlerstrom wird wieder über die Leitungsimpedanz eingestellt, es wird lediglich eine Netzreaktanz von 10Ω vorgeschaltet. Zur Berechnung der Leitungsimpedanz wird der 1 -, 2,5 – und 4 – fache Transformatornennstrom verwendet. Auf die Simulation bei 5 – fachen

Nennstrom wird verzichtet, da wie sich zeigen wird, der Differentialstrom bereits bei Fehler 3 nahe der Auslösekennlinie liegt. Die sonstigen für die Simulation notwendigen Parameter können Tabelle 6 entnommen werden.

Da es sich um ein gelöschtes Netz handelt, kann bei der Analyse des Differentialstroms auf die Untersuchung des 1 – poligen Erdschlusses verzichtet werden, da die resultierenden Ströme für den Differentialschutz verschwindend klein sind. Ebenfalls wird der 2 – polige Kurzschluss mit Erdberührung nicht gesondert behandelt, da für die Bildung des Differentialstroms die Ströme gegen Erde vernachlässigbar sind.

Tabelle 6: Simulationsparameter der Querregelung

Netz	U_N	220 kV
	X_N	10 Ω
a)		
Regeltransformator	U_{1N}	240 kV
	U_{2N}	120 kV
	S_n	200 MVA
	u_k	15%
	$\Delta U_{\text{Längsregelung}}$	4 kV
	Stufen _{Längsregelung}	-12 . . . 12
	$\Delta U_{\text{Querregelung}}$	2 kV
	Stufen _{Querregelung}	-8 . . . 8
b)		
Leitung	X für Fehler 1	50,909 $\Omega \Rightarrow (1 \cdot I_N)$
	X für Fehler 2	12,818 $\Omega \Rightarrow (2.5 \cdot I_N)$
	X für Fehler 3	3,173 $\Omega \Rightarrow (4 \cdot I_N)$
	R/X	0,3
	X_L	0,39 Ω/km
	C'_E	9 nF/km
	X_P	1120 Ω
c)		

4.3.1. 3 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)

Wie zu erwarten war, ist die Abhängigkeit des Differentialstroms vom Stabilisierungsstrom in allen drei Phasen gleich, da ein 3 – poliger Kurzschluss einen symmetrischen Fehlerzustand darstellt. Ein reiner Querregler hat die Eigenschaft, dass er im Wesentlichen nur den Winkel der Spannung beeinflusst und der Betrag nur geringfügig verändert wird. Das bedeutet, dass mit steigender Stufe der Betrag der sekundären Transformator-nennspannung geringfügig ansteigt und damit der Betrag des Übersetzungsverhältnisses absinkt. Das führt bei eingprägter Quellenspannung zum Anstieg der Sekundärspannung und zu einem geringfügigen Ansteigen des Fehlerstroms und damit verbunden des Stabilisierungsstroms.

Die Zusatzspannung hat eine Phasenverschiebung zur Spannung der Stammwicklung von $\pm 90^\circ$. Aufgrund dieser Symmetrie sind die Differentialströme und auch die Stabilisierungsströme für positive und negative Stufen gleich groß.

Mit steigender Stufe nimmt der Phasenwinkel des Übersetzungsverhältnisses zu, was dazu führt, dass der Differentialstrom ansteigt, siehe Abbildung 97. Wie zu erkennen ist, wird die Auslösekennlinie nicht verletzt.

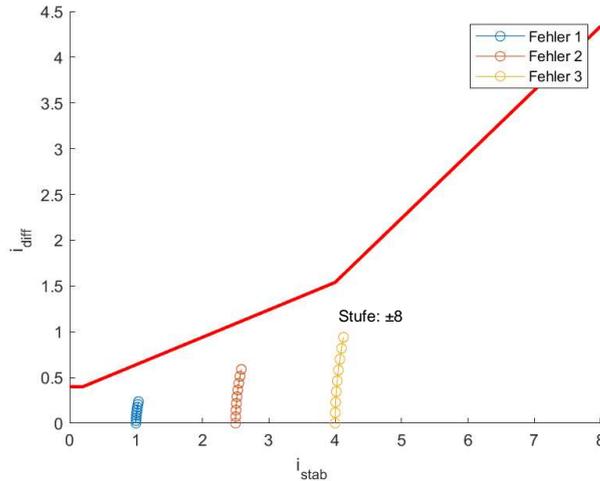


Abbildung 97: Differentialstrom bei einem 3 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung (Phase a, b, c)

4.3.2. 2 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)

Mittels Formel (78) kann gezeigt werden, dass bei einem 2 – poligen Kurzschluss beim Einsatz der Querregelung überspannungsseitig in der vom Fehler nicht betroffenen Phase ein Strom fließt. Damit ergibt sich der bereits bekannte Verlauf des Differentialstroms in Phase a (Abbildung 98). Um zu verhindern, dass die Auslösekennlinie überschritten wird, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich.

In Phase b und c zeigt der Differentialstrom prinzipielle dieselbe Abhängigkeit vom Stabilisierungsstrom, jedoch werden die V – Kurven in unterschiedlicher Richtung durchlaufen, siehe Abbildung 99. Anderes gesagt, tritt in Phase c bei Stufe -8, derselbe Differentialstrom, wie in Phase b bei Stufe 8 auf, da in beiden Fällen der jeweilige Schenkel dem Betrag nach gleich durchflutet ist, siehe dazu Ersatzschaltbild der Querregelung in Abbildung 39.

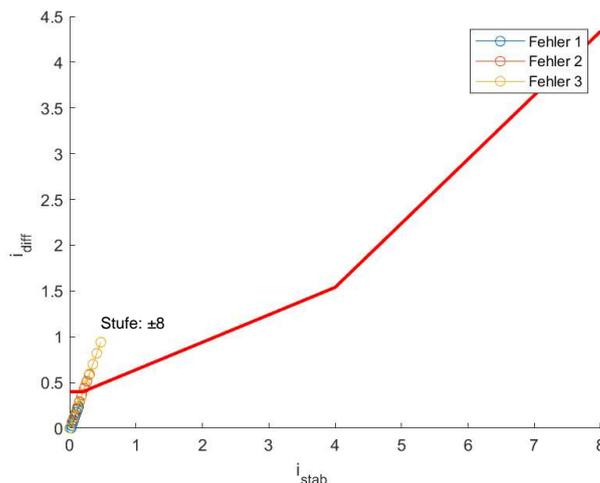


Abbildung 98: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung (Phase a)

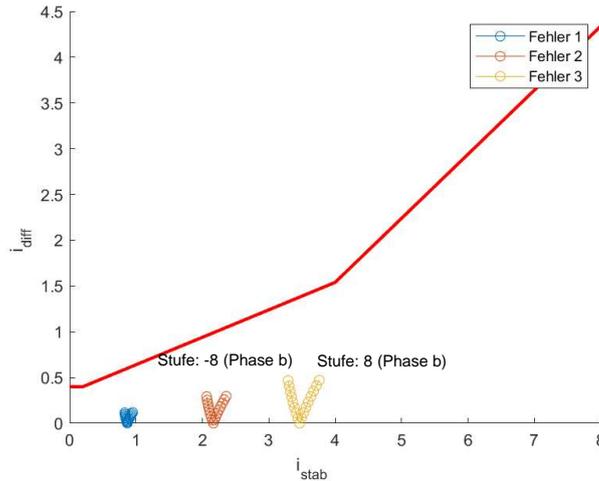


Abbildung 99: Differentialstrom bei einem 2 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung (Phase b, c)

Um eine Fehlauflösung aufgrund des Differentialstroms in Phase a verhindern zu können, wird wieder die Methode des virtuellen Beins angewandt. Dazu muss zunächst die notwendige Stundenziffer ermittelt werden. Zur besseren Veranschaulichung wird hierzu, dass Zeigerdiagramm des 3 – poligen Kurzschlusses verwendet.

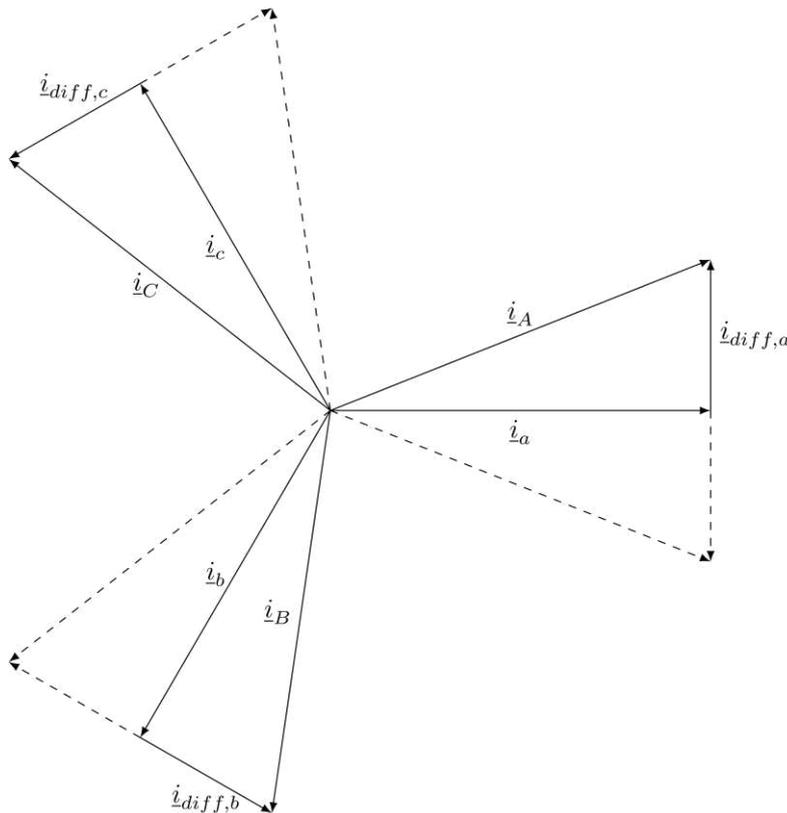


Abbildung 100: Zeigerdiagramm des 3 – poligen Kurzschlusses mit Einsatz der Querregelung

In Abbildung 100 ist zu erkennen, dass der Differentialstrom eine Phasenverschiebung von $\pm 90^\circ$ zum Sekundärstrom der jeweiligen Phase aufweist. Daher bietet sich Stundenziffer 3 bzw. 9 zur Kompensation an.

In diesem Fall wird der Nennstrom des virtuellen Beins empirisch ermittelt. Für einen Nennstrom von 6210 A ist das Ergebnis in Abbildung 101 und 102 dargestellt. Das virtuelle Bein ist ab Stufe (Betrag) 2 der Querregelung aktiv, wodurch die Auslösekennlinie des

stabilisierten Differentialschutzes nicht mehr verletzt wird. Wie bereits bei der Schrägregelung beschrieben wird auch hier die Stufe, ab der das virtuelle Bein aktiv ist, experimentell bestimmt.

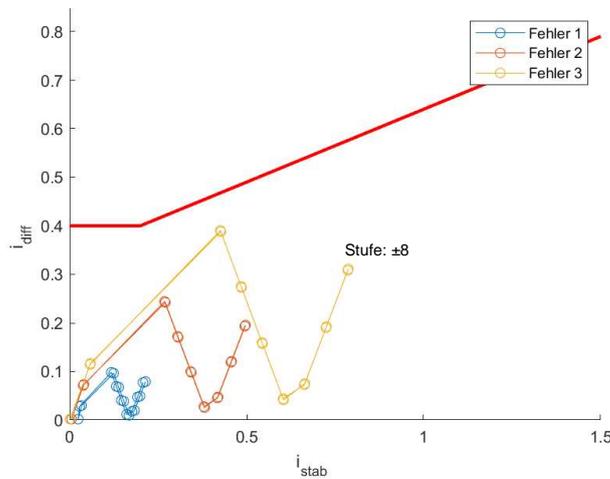


Abbildung 101: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins (Phase a)

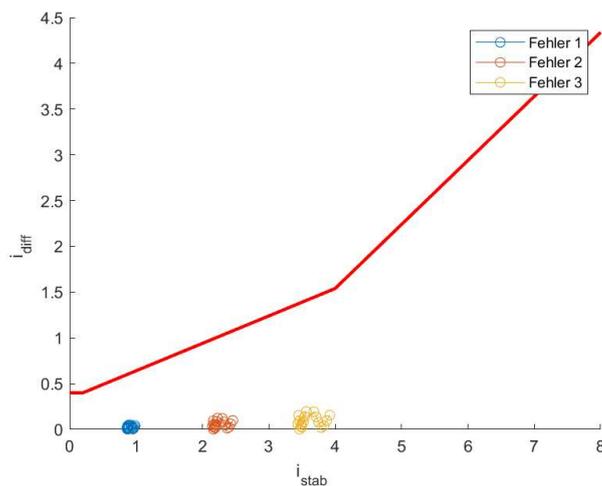


Abbildung 102: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins (Phase b, c)

4.4. Einfluss der Kombination aus Längs- und Querregelung auf die Selektivität des Differentialschutzes

Es stellt sich nun die Frage, wie sich der Differentialstrom ändert, wenn zusätzlich zur Querregelung auch die Längsregelung verwendet wird. Dazu werden speziell die beiden Endstellung 12 und -12 der Längsregelung untersucht.

4.4.1. 3-poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)

Abbildung 103 zeigt den Verlauf des Differentialstroms für Stufe -12 und Abbildung 104 für Stufe 12 der Längsregelung. Aufgrund des Einsatzes der Längsregelung ist der Differentialstrom auch für Stufe null (der Querregelung) ungleich null. Bei Stufe -12 der Längsregelung nimmt der Fehlerstrom seinen größten Wert an, dadurch treten deutlich höhere Differentialströme als bei Stufe 12 auf. Weiters wird bei Stufe -12 auch der Stabilisierungsstrom am Größten, wodurch der Ansprechwert des Schutzes deutlich höher liegt und es daher zu

keiner Fehlerrückmeldung kommt. Abbildung 104 zeigt, dass auch bei Stufe 12 der Längsregelung der Differentialstrom die Auslösekennlinie nicht überschreitet.

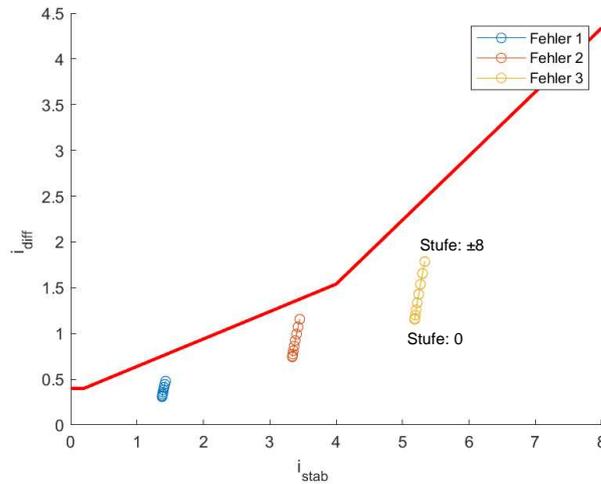


Abbildung 103: Differentialstrom bei einem 3 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung, Längsregelung Stufe -12 (Phase a, b, c)

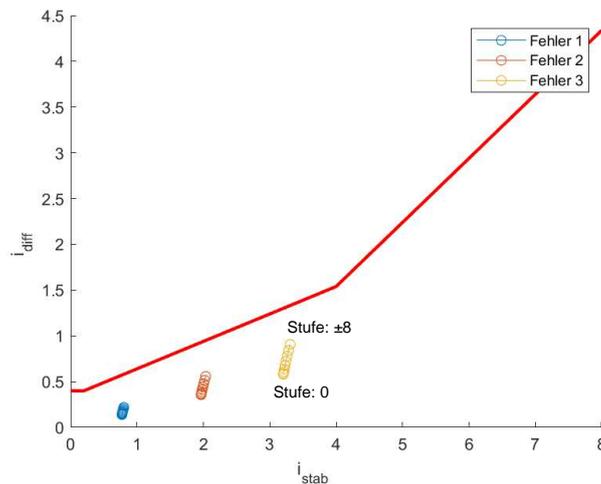


Abbildung 104: Differentialstrom bei einem 3 – poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung, Längsregelung Stufe 12 (Phase a, b, c)

4.4.2. 2 – poliger Kurzschluss (ohne Erdberührung)

In Abbildung 105 ist die Abhängigkeit des Differentialstroms vom Haltestrom für Stufe -12 der Längsregelung in Phase a dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der vom Fehler nicht betroffenen Phase trotz Einsatz des virtuellen Beins der Differentialstrom für Fehler 3 nahe der Auslösekennlinie liegt.

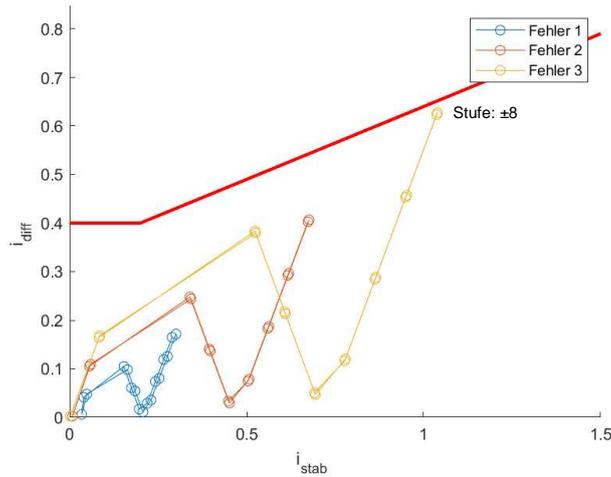


Abbildung 105: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins, Längsregelung Stufe -12 (Phase a)

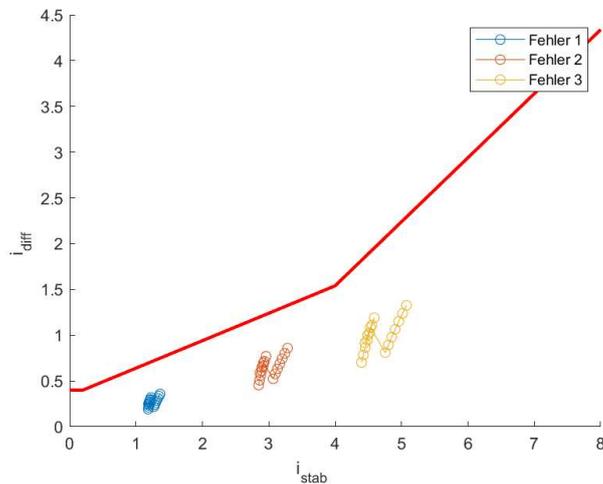


Abbildung 106: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins, Längsregelung Stufe -12 (Phase b, c)

Aufgrund der negativen Stufe der Längsregelung und dem damit verbundenen höheren Fehlerstrom, steigt auch der Differentialstrom an, wodurch die Methode des virtuellen Beins an ihre Grenzen kommt. Nun stellt sich die Frage, ab welchem Fehlerstrom der Differentialstrom die untersuchte Auslösekennlinie übersteigt. Der Verlauf des Differentialstroms als Funktion des Fehlerstroms bei voller Ausregelung (Längsregelung Stufe -12 und Querregelung Stufe -8) ist in Abbildung 107 schwarz strichliert dargestellt, wobei dieser ab dem 4,41 – fachen Nennstrom oberhalb der untersuchten Auslösekennlinie liegt.

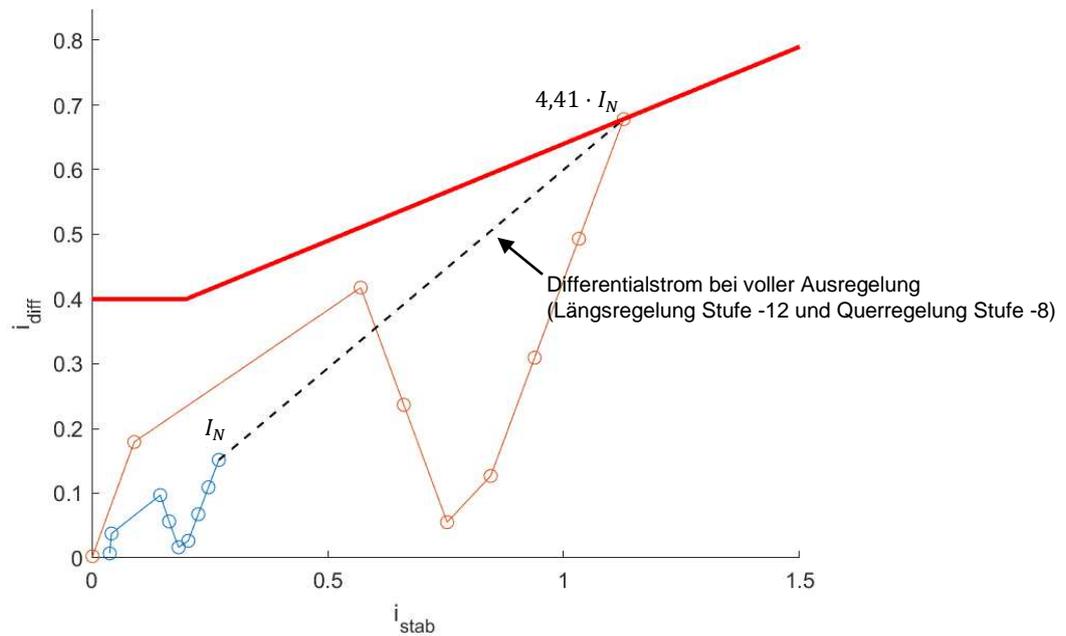


Abbildung 107: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins, Längsregelung Stufe -12 (Phase a), Bestimmung der Grenze der Methode des virtuellen Beins

Bei Stufe 12 der Längsregelung, treten deutlich kleiner Differential- und Stabilisierungsströme auf. Die Differentialströme bleiben wie in Abbildung 108 zu sehen ist, unterhalb der stabilisierten Auslösekennlinie.

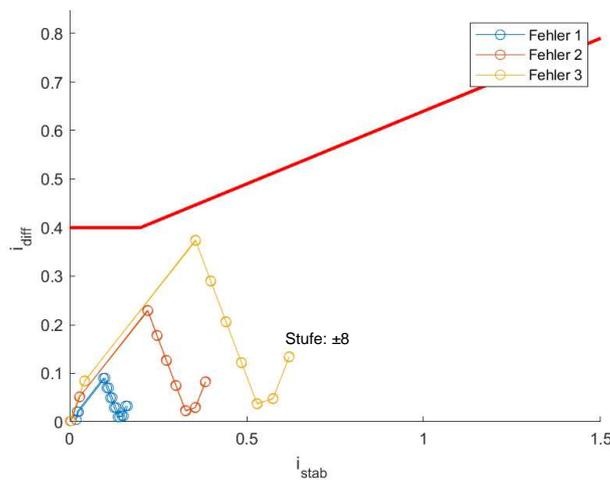


Abbildung 108: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins, Längsregelung Stufe 12 (Phase a)

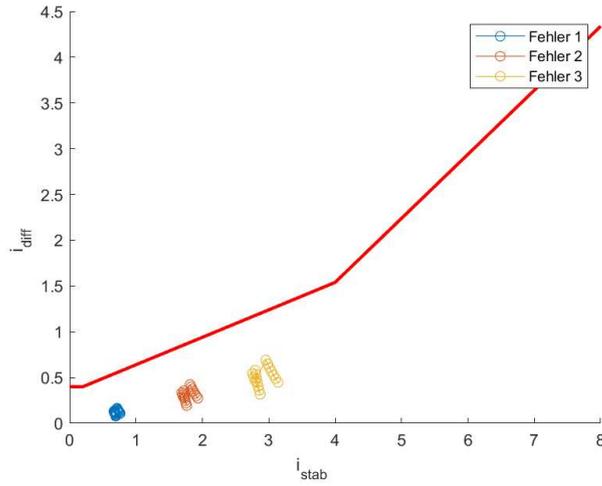


Abbildung 109: Differentialstrom bei einem 2-poligen Kurzschluss und Einsatz der Querregelung mit Verwendung des virtuellen Beins, Längsregelung Stufe 12 (Phase b, c)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5. Zusammenfassung

Die Simulationen haben gezeigt, dass die reine Stabilisierung nicht ausreicht, um bei Regeltransformatoren eine Fehlauslösung des Transformator - Differentialschutzes bei unterschiedlichen Fehlerarten und Sternpunktbehandlungen zu verhindern.

Versorgt ein Transformator mit der Schaltgruppe YNyn0/d5 aus einem 380 kV Netz ein 220 kV Netz und wird wie im beschriebenen Modell nur der unterspannungsseitige Sternpunkt geerdet, kann sich nur auf dieser Seite ein Nullstrom ausbilden. Da das Nullsystem nicht übertragen wird, führt eine Belastung mit einem Nullstrom (z.B. durch einen 1 – poligen Erdkurzschluss) zur Bildung eines Differentialstroms und täuscht damit dem Schutzgerät einen innenliegenden Fehler vor, was eine nicht selektive Auslösung zur Folge haben kann. Mittels Nullstromaussiebung kann eine solche Fehlauslösung verhindert werden. Im Gegensatz dazu, werden 110 kV Netze üblicherweise kompensiert betrieben, dadurch kann auf eine Nullstromaussiebung verzichtet werden, da der im kompensierten Netz auftretende Nullstrom für den Differentialschutz vernachlässigbar klein ist.

Wird eine Schräg- oder Querregelung verwendet, tritt bei einem außenliegenden 2 – poligen Kurzschluss in der vom Fehler nicht betroffenen Phase primär ein Strom auf. Der Differentialstrom ist gleich dem Primärstrom, da der Sekundärstrom in dieser Phase null ist. Nach Formel (32) ist der Stabilisierungsstrom gleich dem halben Primärstrom, dadurch besteht die Gefahr einer nicht selektiven Auslösung. Durch Einsatz des virtuellen Beins kann der Differentialstrom teilweise kompensiert und somit eine Fehlauslösung verhindert werden.

Besonders kritisch ist der kombinierte Einsatz der Längs- und Querregelung bei negativen Stufen der Längsregelung. Aufgrund des Einsatzes der Längsregelung steigt die Sekundärspannung an und damit auch der Fehlerstrom. Im Gegensatz zum 2 – poligen Kurzschluss, verhindert beim 3 – poligen Kurzschluss der deutlich höhere Stabilisierungsstrom eine Fehlauslösung. Beim 2 – poligen Kurzschluss und voller Ausregelung (Längsregelung Stufe -12 und Querregelung Stufe -8) reicht im untersuchten Modellnetz trotz Einsatz des virtuellen Beins der Differentialstrom bis nahe an die untersuchte Auslösekennlinie heran (Fehler 3), wobei ab dem 4,41 – fachen Nennstrom die untersuchte Auslösekennlinie überschritten wird und es damit zu einer Fehlauslösung kommt.

Besteht in einem Netz die Gefahr, dass bei einem 2 – poligen Kurzschluss ein höherer Fehlerstrom als der 4,41 – fache Nennstrom auftritt, kann eine nichtselektive Auslösung verhindert werden, in dem die Auslösekennlinie angehoben wird. Dazu kann sowohl der Ansprechwert bei einem Haltestrom null vergrößert werden als auch die Steigung der beiden Geradenstücke. Wird ein innliegender Fehler nur von einer Seite gespeist liegt der Differentialstrom stets auf der Fehlerstromkennlinie bei einseitiger Einspeisung. Ein höherer Ansprechwert bei Haltestrom null führt zu einer Verringerung der Empfindlichkeit des Schutzgerätes, wodurch ein größerer Schaden am Transformator entstehen kann. Bei vermascht betriebenen Netzen wird ein Fehler im Transformator von zwei Seiten gespeist. Da der Stabilisierungsstrom aus der Betragssumme des ober- und unterspannungsseitigen Stroms errechnet wird, wird der Differentialstrom im Auslöseprogramm nach rechts verschoben, also hin zu höheren Ansprechwerten. Es muss daher überprüft werden, dass der Differentialschutz bei angehobener Auslösekennlinie keine Unterfunktion zeigt.

6. Literaturverzeichnis

- [1] R. Schürhuber, Fehlerberechnung in Drehstromsystemen, TU Wien, 2015.
- [2] W. Gawlik, Energieversorgung, TU Wien, 2014.
- [3] M. Schrödl, Elektrische Antriebe, TU Wien, 2016.
- [4] B. R. Oswald, Berechnung von Drehstromnetzen, Hannover: Springer, 2012.
- [5] W. Gawlik, Energieübertragung und Hochspannungstechnik, TU Wien, 2016.
- [6] M. Wurm, Schutztechnik in elektrischen Netzen, TU Wien, 2015.
- [7] G. Ziegler, Digitaler Distanzschutz: Grundlagen und Anwendung, 2008.
- [8] K. Heuck, Elektrische Energieversorgung, Hamburg, 2013.
- [9] „Three-Phase Transformer (Three Windings),“ Matlab, [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformerthreewindings.html>. [Zugriff am 08 01 2020].
- [10] S. Electric, „Easergy MiCOM P633,“ [Online]. Available: https://www.se.com/at/de/download/document/P633_DE_M_R-a5-B__312_660/. [Zugriff am 28 01 2020].
- [11] H. Mitter, „Transformatordifferentialschutz - Phasenschiebertransformator,“ 05 12 2018. [Online]. Available: <https://www.netzschutz-magazin.com/maschinenschutz/transformatorschutz/transformatorshydifferentialshyschutz-phasenschiebershytransformatoren/>. [Zugriff am 28 01 2020].

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, am _____

Erhard JAROSCH