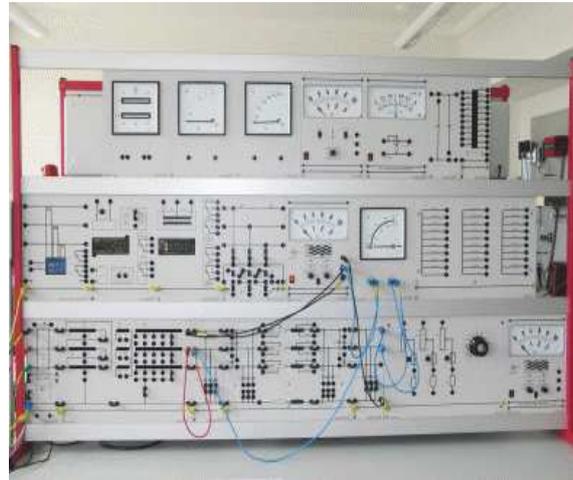


Anlagentechnisches Praktikum
Versuch EET1 (Version 23.03.2007)

Nachbildung und Schutz einer 380 kV Freileitung

Raum: 20.306
Betreuung: Dipl.-Ing. Hickmann



1. Versuchsziel

Kennen lernen wichtiger Eigenschaften einer Übertragungsleitung 380kV und deren Schutz anhand folgender Versuchsteile:

- Versuche zum Betriebsverhalten einer Leitung
 - im Leerlauf
 - bei Anpassung
 - beim dreipoligen Kurzschluss
 - bei ohmsch-induktiver und rein induktiver Last
- Versuch zu unsymmetrischen Kurzschlüssen
- Kurzschlusschutz mit Überstromrelais
- Über- und Unterspannungsschutz

2. Vorbereitung

Erarbeiten Sie sich die Grundlagen zu folgenden Schwerpunkten:

- Strom- und Spannungsverhältnisse an einer Übertragungsleitung im Dreiphasennetz bei Leerlauf, Anpassung und Kurzschluss.
- Was versteht man unter dem Ferranti – Effekt?
- Was versteht man unter einer unternatürlichen und einer übernatürlichen Betriebsweise ?

3. Literatur

Knies / Schierack: Elektrische Anlagentechnik, Hanser Verlag
Schultz : Leitungsnachbildung 380 kV , Leybold Didactic GmbH

4. Theorie

4.1 Elektrische Eigenschaften und Ersatzschaltbilder

Bei Betrieb einer Leitung mit Drehstrom sind neben dem ohmschen Widerstand des Leitermaterials (R) auch noch Ableitverluste (G) sowie induktive und kapazitive Eigenschaften (L und C) der Anordnung zu berücksichtigen. Da die genannten Größen in Form von sog. Belägen gleichmäßig über die Leitung verteilt sind, gilt das folgende Ersatzschaltbild mit konzentrierten Schaltelementen nur für „elektrische kurze“ Leitungen, d.h. für Leitungen mit einer Länge von weniger als 250 km.

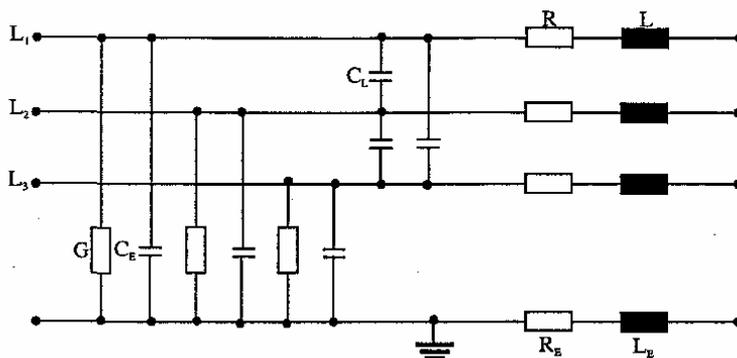


Bild 4.1 : Ersatzschaltbild einer Drehstromleitung

Der Wirkleitwert G erfasst die Ableitverluste, die aus dem begrenzten Isolationsvermögen von Kabeln bzw. aus Kriechströmen längs Isolatoren und Sprühverlusten an der Seiloberfläche von Freileitungen resultieren. Die Leitungsinduktivitäten L erfassen das magnetische Feld, das sich bei Stromfluss mit Nennfrequenz ausbildet. Die induktiven Widerstände liegen bei Kabeln und Freileitungen in der gleichen Größenordnung, wobei Freileitungen wegen der größeren Leiterabstände etwas höhere Werte als Kabel aufweisen.

Die Leitungskapazitäten C_E und C_L erfassen das elektrische Feld, das sich bei Anlegen einer Spannung mit Nennfrequenz ergibt. Hier sind jedoch grundsätzliche Unterschiede zu beachten: Bei Kabeln sind, bedingt durch die geringeren Abstände der Leiter untereinander und durch das Isolationsmaterial, die Kapazitäten deutlich größer als bei Freileitungen. Dies schränkt den Einsatzbereich von Kabeln wesentlich ein. Außerdem spielt es bei Kabeln eine Rolle, ob jeder Leiter für sich geschirmt ist (Einleiterkabel), oder ob alle drei Leiter einen gemeinsamen Schirm besitzen (Dreileiterkabel). Bei Freileitungen hingegen sind stets Kapazitäten zwischen den Leitern (C_L) und Kapazitäten zwischen Leitern und Erde (C_E) vorhanden (s. Bild 4.1).

In der Praxis ist man bemüht, Freileitungen bezüglich der Kapazitäten symmetrisch aufzubauen. Bei Anordnung der drei Phasen in Form eines gleichseitigen Dreiecks sind zwar die Abstände untereinander gleich, nicht aber diejenigen zur Erde. Durch zyklisches Vertauschen der Leiter in gewissen Abständen (sog. Verdrillen) erhält man auch Symmetrie bezüglich der Erde.

Durch eine Dreieck-Stern-Umwandlung von C_L können die Leitungskapazitäten zu einer Betriebskapazität C_B zusammengefasst werden. Es gilt

$$C_B = C_F + C_I$$

Im Falle eines unsymmetrischen Fehlers (und auch bei unsymmetrischer Last) fließt der Strom nicht nur durch die drei Außenleiter, sondern auch über das Erdreich und ggf. über ein Erdseil oder einen leitfähigen Kabelmantel zur Einspeisestelle zurück. Die Rückleitung besitzt den Charakter eines ohmsch-induktiven Widerstandes. In der Ersatzschaltung nach Bild 4.1 wird sie als Erdrückleitung bezeichnet und durch einen ohmschen Widerstand R_E sowie eine Induktivität L_E repräsentiert.

4.2 Betriebsverhalten

Für Hochspannungsfreileitungen sind der ohmsche Widerstand und die Ableitungsverluste im Vergleich zur induktiven Reaktanz vernachlässigbar. Andererseits handelt es sich bei Hochspannungsfreileitungen häufig nicht mehr um „elektrisch kurze“ Leitungen, d.h. die Annahme von konzentrierten elektrischen Bauelementen kann nicht weiter aufrecht erhalten werden. Anstelle eines Ersatzschaltbildes tritt eine Übertragungsmatrix. Für eine verlustlose Leitung der Länge l gilt:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma l) & jZ_W \sin(\gamma l) \\ j\sin(\gamma l)/Z_W & \cos(\gamma l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

mit dem Wellenwiderstand $Z_W = \sqrt{L'/C'}$ und $\gamma = \omega\sqrt{L'C'}$.

Bei der Untersuchung des Betriebsverhaltens einer Leitung werden der Leerlauf, die Anpassung und der Kurzschluss betrachtet.

4.2.1 Leerlauf

Dieser Fall tritt auf, wenn am einen Ende der Leitung Nennspannung anliegt während das andere Ende unbelastet ist (z.B. wegen eines Fehlers beim angeschlossenen Verbraucher). Aufgrund der Leitungskapazitäten erhöht sich die Spannung am offenen Leitungsende auf u.U. unzulässig hohe Werte. Diese Erscheinung wird **Ferranti-Effekt** genannt und stellt bei größeren Leitungslängen einen gefährlichen Zustand dar, der vom Netzschutz erfasst werden muss.

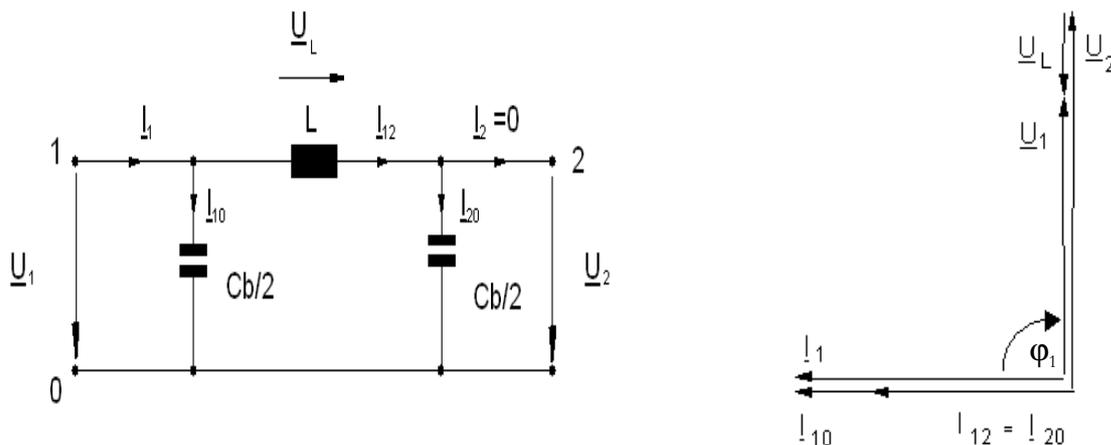


Bild 4.2 Einphasiges Ersatzschaltbild einer verlustlosen Leitung im **Leerlauf** und das zugehörige Zeigerdiagramm

I_{10} und I_{12} sind reine Blindströme. Der Phasenwinkel am Leitungsanfang beträgt genau 90° . Der im Leerlauf fließende Strom wird auch als Ladestrom bezeichnet. Er hängt von der Länge der Übertragungsstrecke ab und erreicht bei Kabeln sehr schnell den maximal zulässigen Strom. Dadurch sind diese Kabel u.U. schon im Leerlauf voll ausgelastet. Die Spannungserhöhung am Leitungsende hängt von der Größe der Betriebskapazität $C_B/2$ ab. Bei Kabeln mit großen Werten von C_B ist der Ferranti - Effekt stärker ausgeprägt als bei Freileitungen. Für die zugehörige Ladeblindleistung Q_C gilt:

$$Q_C = U_N^2 \omega C_B$$

4.2.2 Anpassung

Dieser Betriebsfall liegt vor, wenn die Leitung durch einen ohmschen Verbrauchswiderstand von der Größe des Wellenwiderstandes abgeschlossen wird. Die hierbei übertragene Leistung heißt **natürliche Leistung**. Der Leitungsstrom ist dabei gerade so groß, dass sich Blindleistungsverbrauch von Leitungsinduktivität und -kapazität aufheben und die Leitung zu ihrem Betrieb keine Blindleistung von außen benötigt. Da bei realen (d.h. verlustarmen) Leitungen die Wirkverluste der Übertragung hierbei ein Minimum aufweisen, ist dieser Fall als optimal anzusehen, denn der Wirkungsgrad der Leitung erreicht dabei sein Maximum. Die Belastung eines Netzes ändert sich jedoch ständig entsprechend dem Verbraucherverhalten. Somit kommt ein Betrieb mit natürlicher Leistung nur selten und zufällig vor.

Ändert sich der Leitungsstrom, so wird die Blindleistungsbilanz gestört. Bei kleinerem Strom wirkt die Leitung kapazitiv; man spricht dann von **unternatürlicher Betriebsweise**. Nimmt der Strom zu, so zeigt die Leitung induktives Verhalten; es liegt **übernatürliche Betriebsweise** vor. In beiden Fällen steigen bei realen Leitungen die Wirkverluste. Hält man die Spannung am Leitungsanfang konstant, so ist im unternatürlichen Betrieb am Leitungsende ein Spannungsanstieg festzustellen (vgl. Leerlauf als Grenzfall). Bei übernatürlicher Betriebsweise sinkt die Spannung am Leitungsende (vgl. Kurzschluss als Grenzfall). Um dem Verbraucher eine konstante Spannung zu garantieren, ist bei wechselnden Netzbelastungen also eine Spannungsregelung beim einspeisenden Transformator vorzunehmen.

Bei Freileitungen liegt die Belastbarkeit (d.h. die thermische Grenzleistung) deutlich über der natürlichen Leistung. Im praktischen Betrieb werden Freileitungen also meist übernatürlich belastet. Bei Hochspannungskabeln hingegen ist die Dauer-Belastbarkeit meist geringer als die natürliche Leistung. Hier ist also nur eine unternatürliche Betriebsweise möglich.

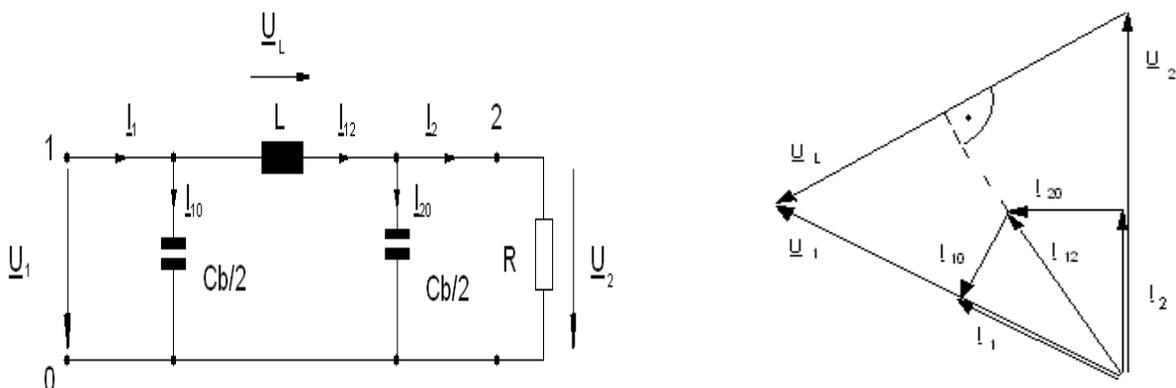


Bild 4.3 : Einphasiges Ersatzschaltbild einer verlustlosen Leitung bei **Anpassung** und das zugehörige Zeigerdiagramm

Der Verbraucherstrom I_2 ist mit der Spannung U_2 in Phase, die Leitung mit angeschlossenem Verbraucher entnimmt dem Netz nur Wirkleistung.

4.2.3 Kurzschluss

In diesem Fall wird der Verbraucherwiderstand durch einen Fehler (metallisch oder Lichtbogen) kurzgeschlossen, so dass ein sehr hoher Leitungsstrom zum Fließen kommt. Im Kurzschlussfall liegt die übertragene Leistung meist weit über der thermischen Grenzleistung der Leitung; der fehlerhafte Zustand muss daher vom Netzschutz erkannt und in kürzester Zeit abgeschaltet werden. Man unterscheidet zwischen symmetrischen (dreipoligen) und unsymmetrischen (ein- oder zweipoligen) Kurzschlüssen. Nur der dreipolige Fehler lässt sich im einphasigen Ersatzschaltbild darstellen; er soll deshalb zuerst betrachtet werden.

Unsymmetrische Kurzschlüsse werden später im Zusammenhang mit Fragen der Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen behandelt.

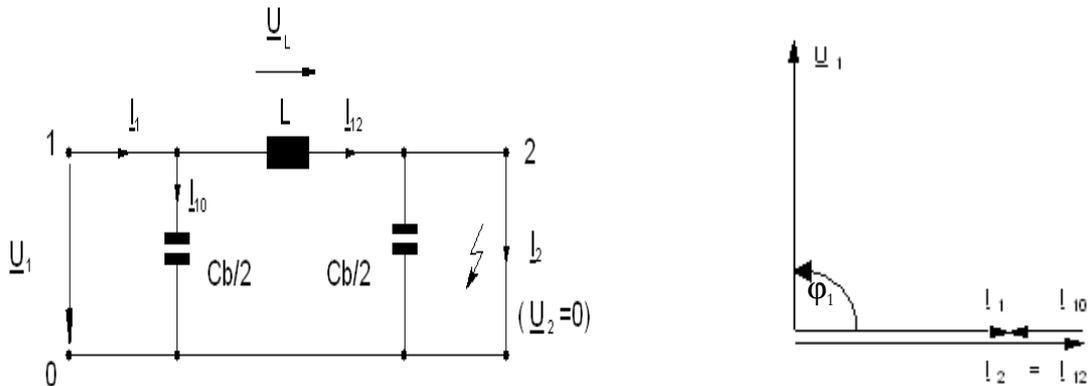


Bild 4.4 : Einphasiges Ersatzschaltbild einer verlustlosen Leitung **bei Kurzschluss** und das zugehörige Zeigerdiagramm:

Der Phasenwinkel φ_1 zwischen U_1 und I_1 beträgt 90° , bei verlustarmer Leitung sind es noch 85° .

4.3 Sternpunktbehandlung

Quantitativ wird die Beschaltung des Netzsternpunktes durch den sogenannten **Erdfehlerfaktor δ** beschrieben:

δ ist der Quotient aus U_{LE} (Spannung zwischen gesundem Außenleiter und Erde bei Erdschluss eines Leiters) und $U_N/\sqrt{3}$ (Sternspannung an derselben Stelle des Netzes im ungestörten Betrieb).

Je größer der Erdfehlerfaktor ist, desto höher wird die Spannungsbeanspruchung der gesunden Phasen bei einem einpoligen Fehler. Andererseits hat ein kleiner Erdfehlerfaktor jedoch einen hohen Fehlerstrom zur Folge, der vom Netzschutz erfasst und in kürzester Zeit abgeschaltet werden muss.

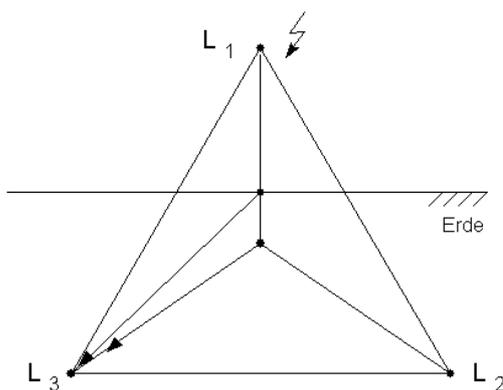


Bild 4.5 :

Zur Definition des Erdfehlerfaktors

Bei Auftreten eines unsymmetrischen Fehlers mit Erdberührung (Erdschluss, Erdkurzschluss) gewinnt die Behandlung des Sternpunktes in Verbindung mit der Spannungsebene des Netzes eine entscheidende Bedeutung, von der das Verhalten während der Fehlerdauer und die damit verbundenen Gefahren abhängen. Dies trifft besonders die Höhe des Fehlerstroms bei einem Erdschluss oder Erdkurzschluss und die Spannungserhöhung der nicht vom Fehler betroffenen („gesunden“) Phasen.

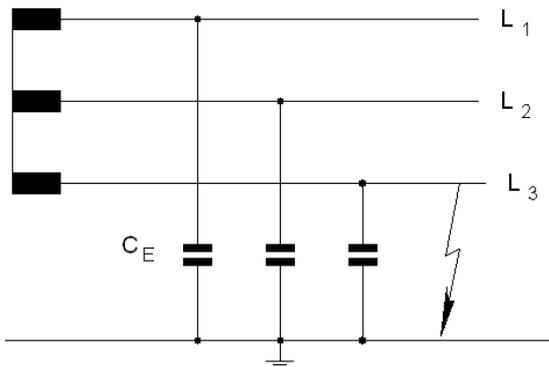


Bild 4.6 :

Erdschluss in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt

In Netzen mit isoliertem Sternpunkt fließt im Erdfehlerfall nur ein geringer Erdschlussstrom. Das Netz kann mit dem Erdschluss noch eine Weile weiter betrieben werden. Nachteilig ist die Spannungsüberhöhung der gesunden Phasen während der Fehlerdauer. Die Höhe des Erdschlussstromes wird im wesentlichen durch die Erdkapazität C_E der Leitungen bestimmt. Für den Betrag des Erdschlussstromes gilt, unter Vernachlässigung des Wirkwiderstandes der Leitung

$$I_E \approx \sqrt{3} U \omega C_E$$

mit $U \approx U_N$ = Spannung an der Fehlerstelle vor Eintritt des Fehlers.

4.3.1 Erdschlusskompensation

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, handelt es sich beim Erdschlussstrom um einen nahezu rein kapazitiven Strom, der in ausgedehnten Netzen gefährlich hohe Werte annehmen kann. Schaltet man in den Fehlerstromkreis eine Induktivität geeigneter Größe, so wird der Erdschlussstrom kompensiert oder "gelöscht". d.h. er verschwindet nahezu. Die Induktivität wird Erdschlusslöschspule oder nach ihrem Erfinder auch Petersenspule genannt.

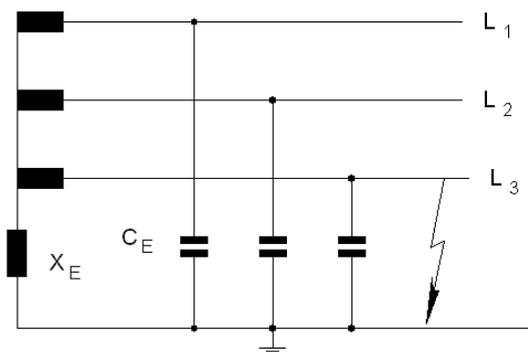


Bild 4.7 : Erdschluss in einem Netz mit Erdschlusslöschspule

Da bei sich ändernden Netzverhältnissen (Zu- und Abschaltung von Leitungen) sich die Erdkapazitäten mit ändern, muss die Induktivität der Löschspule ebenfalls veränderbar sein. Man setzt daher Tauchkernspulen oder Spulen mit Anzapfungen ein, die an ausgewählten Stellen des Netzes in die Erdungsleitung der Transformatorsternpunkte geschaltet werden.

Die rechnerische Ermittlung der erforderlichen Induktivität zur Kompensation ist wiederum nur mit Hilfe des Verfahrens der symmetrischen Komponenten möglich. Für den Blindwiderstand der Erdschlusspsule gilt die Bedingung:

$$X_E = \frac{1}{3\omega C_E}$$

Da der Fehlerstrom wegen der stets vorhandenen Leitungswiderstände auch einen Wirkanteil aufweist, ist eine vollständige Kompensation nicht möglich. Der Wirkanteil beträgt bis zu etwa 10% des Fehlerstromes und wird als Erdschlussreststrom bezeichnet.

4.4 Unsymmetrische Kurzschlüsse

Bei unsymmetrischen Betriebsverhältnissen (z.B. einphasiger Kurzschluss) reicht die einphasige Darstellung zur Beschreibung der Verhältnisse nicht mehr aus. Für den einpoligen Kurzschluss im niederohmig geerdeten Netz (Erdkurzschluss) wird eine leitende Verbindung des Außenleiters L1 mit Erde angenommen. Zur Bestimmung des Fehlerstroms wird das Verfahren der symmetrischen Komponenten angewendet. Die bei Kurzschlusseintritt wirksame Spannung wird als Anfangsspannung E'' bezeichnet. Um bei den Berechnungen auf der sicheren Seite zu liegen, wird für sie gewöhnlich der Wert

$$E'' = 1,1 \cdot U_N / \sqrt{3}$$

angesetzt (einphasige Darstellung). Für den Kurzschlussstrom ergibt sich:

$$I_1 = \frac{3E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

mit der Mitimpedanz $Z_1 = U_1 / I_1$, der Gegenimpedanz $Z_2 = U_2 / I_2$ und der Nullimpedanz $Z_0 = U_0 / I_0$. Die Mitimpedanz bei Leitungen ist der Quotient aus Sternspannung und Leiterstrom bei Speisung durch ein symmetrisches Mitsystem. Die Gegenimpedanz bei Leitungen ist der Quotient aus Sternspannung und Leiterstrom bei Speisung durch ein symmetrisches Gegensystem.

4.5 Schutz von Hochspannungsleitungen

4.5.1 Theoretische Grundlagen zum Schutz einer Hochspannungsleitung

Elektrische Betriebsmittel werden entsprechend ihrem Verwendungszweck für bestimmte Maximalwerte von Spannungen und Strömen ausgelegt. Ein Überschreiten dieser Grenzen führt zur Zerstörung der betreffenden Komponente, zur Gefährdung von Mensch und Tier und wegen der Übererwärmung nicht selten auch zu Bränden. Aber auch ein Betrieb mit zu geringer Spannung kann Schäden bewirken, etwa durch mangelnde Kühlung oder Schmierung von Maschinen. Im Bereich von höherer Spannungen müssen Schutzsysteme verwendet werden, die im Fehlerfall dem nächstliegenden Leistungsschalter einen Befehl zum Öffnen geben. Diese Schutzsysteme der Energietechnik werden aus historischen Gründen als Relais bezeichnet, obwohl sie heute ausschließlich mit elektronischen Bauteilen ausgerüstet sind.

Ströme und Spannungen müssen in Anlagen zur Energieversorgung zuerst durch Wandler auf ein niedriges Niveau herab transformiert werden, ehe eine Verarbeitung im Relais erfolgen kann. Die verwendeten Relaisstypen (Überstrom-Zeitrelais, Richtungsrelais, Erdschlusswarnrelais, Über- und Unterspannungsrelais) werden üblicherweise im Bereich der Mittel- und Hochspannungsnetze eingesetzt.

Die Art der Sternpunktbehandlung eines Netzes entscheidet über den Einsatz verschiedener Relaisstypen zu dessen Schutz. Bei zwei- und dreipoligen Fehlern fließen unabhängig von der Art der Sternpunktbeschaltung stets hohe Kurzschlussströme, die sofort abgeschaltet werden müssen. Hierfür eignen sich in einfachen Netzstrukturen (Strahlen- oder Ringnetze) unabhängige Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais) und abhängige Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais). Beim Überschreiten eines - einstellbaren - Ansprechwertes lösen diese nach einer vorgebbaren Verzögerungszeit (sog.

Kommandozeit) aus, und zwar unabhängig oder abhängig von der Höhe des Fehlerstromes, je nach Ausführungsform des Relais.

Beim Auftreten eines einpoligen Fehlers spricht man im Falle starrer Sternpunktterdung von einem Erdkurzschluss; bei einem gelöschten oder mit isoliertem Sternpunkt betriebenen Netz dagegen vom Erdschluss. Letzterer hat nur einen geringen Fehlerstrom zur Folge, der nicht unbedingt sofort abgeschaltet werden muss. Wegen der Gefahr einer Fehlerausweitung muss der Erdschluss jedoch zumindest durch sog. Erdschlusswarnrelais erfasst und angezeigt werden.

Als einfaches Kriterium für das Vorliegen eines Erdschlusses dient die sog. Verlagerungsspannung, das ist eine Spannung, die der Netzsternpunkt gegen Erde annimmt. Die Verlagerungsspannung tritt in allen galvanisch miteinander verbundenen Netzteilen (sog. Netzbezirken) gleichzeitig auf und kann mit Hilfe einer speziellen Spannungswandlerschaltung erfasst und in einem Erdschlussmelderelais ausgewertet werden. Da viele Erdschlüsse nach kurzer Zeit von selbst erlöschen, erfolgt eine Weitergabe der Meldung zeitverzögert, also nur bei einem sog. stehenden Erdschluss.

5. Beschreibung von Versuchskomponenten

5.1 Leitungsnachbildung 380 kV

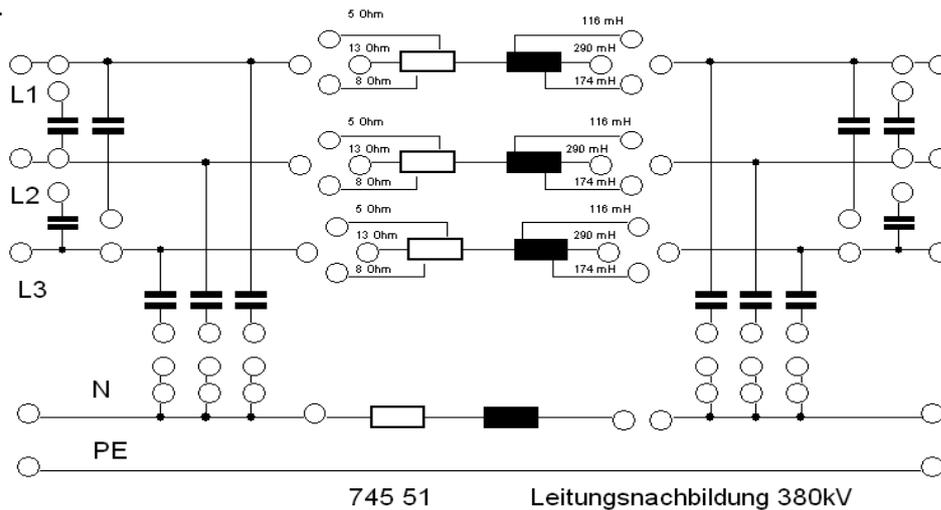


Bild 5.1 : Leitungsnachbildung 380 kV

Die Leitungsnachbildung weist die bekannten, konzentrierten Schaltelemente auf. Die drei möglichen Längen sind **144 km**, **216 km** und **360 km**. In den einzelnen Längen besitzt die Leitung folgende Daten:

Länge in km	144	216	360
Länge in %	40	60	100
R in Ω	5	8	13
L in mH	116	174	290
CB in μF	2	3	5

Tabelle 5.1 : Leitungsdaten bei verschiedenen Längen

5.2 Dreiphasentransformator

Der Transformator ist aus drei Einphasentransformatoren aufgebaut, wobei Primär- und Sekundärwicklung galvanisch getrennt sind.

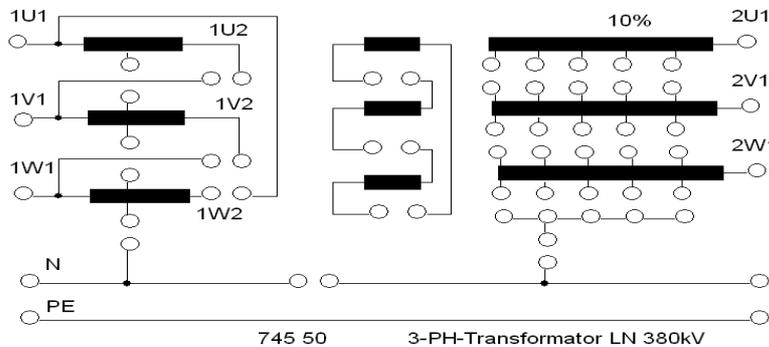
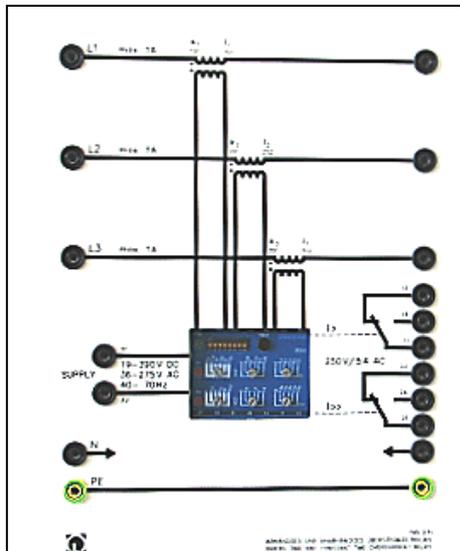


Bild 5.2 : Dreiphasentransformator

Die Primärklemmen tragen die Bezeichnung **1U1 – 1U3** , **1V1 – 1V3** , **1W1 – 1W3**. Es kann eine Dreieck oder eine Sternschaltung hergestellt werden. Die Sekundärklemmen tragen die Bezeichnung **2U1 – 2U3** , **2V1 – 2V3** , **2W1 – 2W3**. Sie sind für eine Sternschaltung mit herausgeführtem Sternpunkt vorgesehen.

Durch die verschiedenen Anzapfungen können anstelle der Nennspannung $U_N = 400V$ auch folgende Spannungen abgenommen werden: $U_N + 5\%$, $U_N - 5\%$, $U_N - 10\%$, $U_N - 15\%$. Der maximale Strom beträgt jeweils **1,2A**. Die Spannungen ergeben sich bei einer Belastung mit dem Nennstrom 1,2A..

5.3. Überstromzeitrelais, dreiphasig

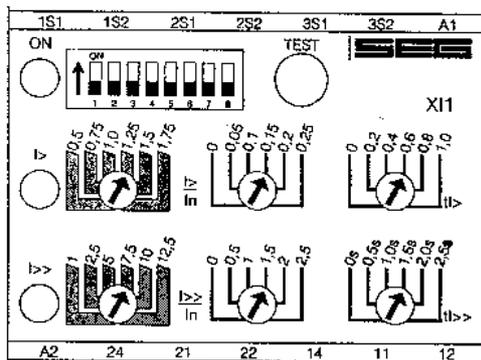


Dieses Überstromrelais wird als selektiver Überlast- und Kurzschlusschutz für Leitungen genutzt. Hinsichtlich der Auslösungscharakteristik besteht die Möglichkeit der Nutzung als unabhängiges Überstromzeitrelais (UMZ) bzw. als abhängiges Überstromzeitrelais (AMZ). Dem Relais werden die Ströme der Phasen L1 – L3 über Wandler zugeführt.

Bei diesem Überstromrelais lassen sich die Ansprechwerte für die Überströme der drei Phasen getrennt vorgeben. Wird der eingestellte Wert von einem oder mehreren Strömen überschritten, so erfolgt eine Anregung und zeitverzögert die Auslösung. Damit ist das Relais auch dann einsetzbar, wenn die zu schützende Komponente von vorn herein unsymmetrisch belastet wird.

Bild 5.3 : Überstromzeitrelais

Im vorliegenden Versuch wird das Relais zum Schutz einer Leitung gegen symmetrische und unsymmetrische Kurzschlüsse, sowie zum Schutz bei Überlastung durch den angeschlossenen Verbraucher, benutzt. Die zum Versuch notwendigen Anzeigen und Einstellungen erfolgen an der Frontseite des Gerätes.



Die LED **On** dient zur Anzeige der Betriebsbereitschaft des Gerätes bei anliegender Versorgungsspannung U_V . Die LEDs **I>** und **I>>** signalisieren eine Anregung (Blinken) bzw. Auslösung (Dauerlicht) der entsprechenden Funktionen. Durch drücken des Tasters **Test** 5s lang, kann eine Testauslösung des Gerätes vorgenommen werden. Dabei leuchten die LEDs **I>** und **I>>** rot auf. Alle DIP - Schalter bleiben in der Stellung **OFF**.

Bild 5.4 : Bedienelemente und Anzeigeelemente an der Frontseite des Überstromzeitrelais

Ansprechwerte und Kommandozeit des Relais lassen sich stufenlos über Einstellpotentiometer wählen, und zwar in den Bereichen 0,5 ... 2,0 A bzw. 1,0 ... 15,0 A und 0 ... 1 s bzw. 0 ... 2,5 s. Dieses Gerät benötigt zu seinem Betrieb eine Hilfsspannung U_H von 230 V AC (Buchsen A1 und A2). Der Ausgang K des Relais besitzt zwei getrennte Wechselkontakte 11, 12, 14 sowie 21, 22, 24.

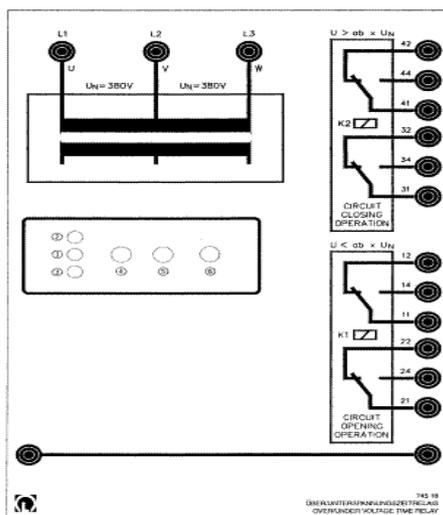
Die am Relais benötigten Einstellungen sind für den Versuch schon voreingestellt !

5.4 Über / Unterspannungszeitrelais

Das Relais dient als kombiniertes Über- und Unterspannungszeitrelais zur Überwachung eines 400-V-Drehstromnetzes. Bei Anschluss an einen geeigneten Spannungswandler kann das Relais auch in anderen Spannungsebenen verwendet werden. Da es keinen Sternpunktanschluss benötigt, kann es sowohl in Dreileiter- als auch in Vierleiternetzen eingesetzt werden.

Die Hilfsspannung zur Versorgung des Relais wird aus dem zu überwachenden Netz bezogen. Die Ansprechwerte sind stufenlos einstellbar und liegen im Bereich 0,7 ... 0,95 U_N für die Erfassung von Unterspannungen und im Bereich 1,05 ... 1,3 U_N für die Erfassung von Überspannungen.

Das Relais ist mit einer Zeitverzögerung versehen, die sich im Bereich von 0,5 ... 5s stufenlos einstellen lässt. Es verfügt über zwei getrennt arbeitende Ausgänge. Der Ausgang für Unterspannung arbeitet in Ruhestromschaltung (Relais K1, Wechselkontakte 11, 12, 14 sowie 21, 22, 24); der Ausgang für Überspannung in Arbeitsstromschaltung (Relais K2, Wechselkontakte 31, 32, 34 sowie 41, 42, 44). Bei Ausfall nur einer Phase des zu überwachenden Netzes bleibt die Zeitverzögerung voll wirksam. Bei Ausfall von zwei oder allen drei Phasen wird hingegen die Verzögerung bis auf die Eigenzeit des Gerätes unwirksam.



Die Zahlen im Bedienteil des Gerätes bedeuten:

- ① LED zur Anzeige von Überspannung (rot)
- ② LED zur Betriebsanzeige (weiß)
- ③ LED zur Anzeige von Unterspannung (rot)
- ④ Einstellpotentiometer für Zeitverzögerung
- ⑤ Einstellpotentiometer für Unterspannung
- ⑥ Einstellpotentiometer für Überspannung

Bild 5.5 : Über / Unterspannungszeitrelais

6. Versuche

6.1. Versuche zum Betriebsverhalten einer Leitung

6.1.1 Verhalten im Leerlauf

6.1.1.1 Versuchsziel

- Messen der Spannungsüberhöhung an einer leer laufenden Leitung
- Messen der Ladeleistung bei verschiedenen Leitungslängen

6.1.1.2 Benötigte Geräte

Die benötigten Geräte sind den am Versuchszettel ausliegenden **Bildern 6.1 – 6.5** zu entnehmen.

6.1.1.3 Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchszettel ausliegenden Bild 6.1. Auf der Sekundärseite des Dreiphasentransformators ist mit Hilfe der Verbindungsstecker die Spannung $U_N - 10\%$ zu wählen.

- Realisieren Sie durch Stecken der Verbindungsstecker eine Leitungslänge von 144 km. Messen Sie die Spannung zwischen zwei Außenleitern jeweils am Leitungsanfang und -ende, sowie die von einer Phase aufgenommene Ladeblindleistung.

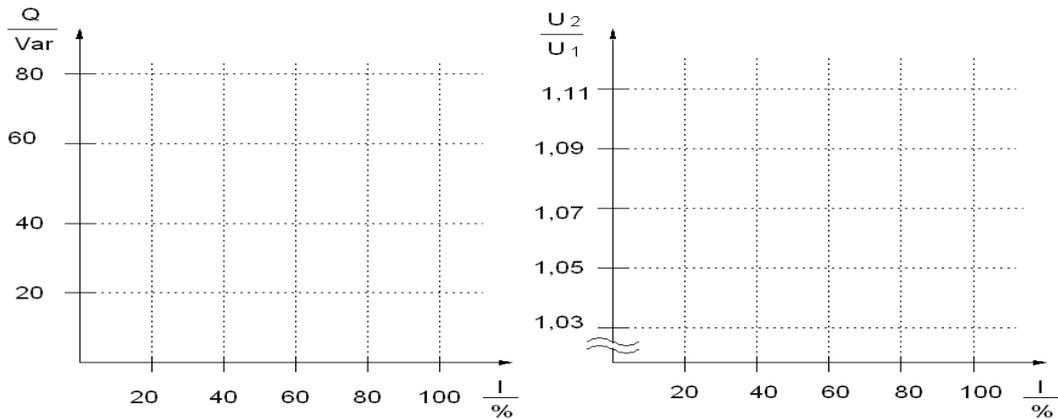
$U_1 =$	V	$U_2 =$	V	Verhältnis $U_2/U_1 =$
$Q_c =$	Var			

- Ändern Sie die Leitungslänge durch Umstecken der Verbindungsstecker gemäß dem am Versuchszettel ausliegenden **Bild 6.3** auf **360 km** und wiederholen Sie obige Messungen.

$U_1 =$	V	$U_2 =$	V	Verhältnis $U_2/U_1 =$
$Q_c =$	Var			

Tragen Sie die Ladeblindleistung Q_c und das Verhältnis U_2 / U_1 in Abhängigkeit von der zugehörigen Leitungslänge in ein Diagramm ein.

Welcher Zusammenhang ergibt sich?



Ergebnis:

.....
.....
.....

Vergleichen Sie die gemessene Ladeblindleistung mit derjenigen, die sie entsprechend ihrer jeweiligen Länge rechnerisch erfordern würde.

Ergebnis: **Ladeblindleistung rechnerisch**

für l = 144km :

.....

für l = 360km :

.....

6.1.2 Verhalten bei Anpassung

6.1.2.1. Versuchsziel

- Messen und deuten der Strom- und Spannungsverhältnisse einer Leitung bei Anpassung
- Interpretation der Begriffe Wellenwiderstand, über- und unternatürliche Betriebsweise, Wirkungsgrad und Übertragungsverluste.

6.1.2.2. Benötigte Geräte:

Die benötigten Geräte sind dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.6** zu entnehmen.

6.1.2.3. Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.6**. Die Leitungsnachbildung ist auf die Länge von 100% einzustellen. Die Spannung am Dreiphasen-Transformator ist mit dem Wert $U_N - 10\%$ zu wählen. Verkleinern Sie nun die ohmsche Last, vom Wert 100% ausgehend, in 7 Schritten gleichmäßig bis auf den Wert 10%.

Führen Sie die Messungen vor allem bei kleineren Widerstandswerten zügig durch, um die Versuchskomponenten nur kurzzeitig zu belasten !

Messen Sie die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Größen und tragen Sie die Größen in die Tabelle ein. Notieren Sie sich, welcher Art die jeweilige Blindleistung ist:

R(%)	$U_1(V)$	$I_1(A)$	$P_1(W)$	$Q_1(Var)$	$U_2(V)$	$I_2(A)$
100						
80						
60						
50						
30						
20						
10						

Tabelle 6.1 : Messwerte bei Anpassung

Bei welchen Werten der ohmschen Last liegt eine unternatürliche und bei welchen eine übernatürliche Betriebsweise vor? Ermitteln Sie denjenigen Wert der ohmschen Last, bei dem die Leitung die geringste Blindleistung aufnimmt (Anpassung).

.....

.....

.....

Zur Bestimmung von Übertragungsverlusten und Wirkungsgrad im Fall der Anpassung, ist die ohmsche Last auf den Wert des Wellenwiderstandes einzustellen. Messen Sie Spannungen und Ströme an Leitungsanfang und Leitungsende bei folgenden möglichen Speisespannungen, einstellbar sekundärseitig am Dreiphasentransformator.

Speise- spannungen	$U_1(V)$	$I_1(A)$	$U_2(V)$	$I_2(A)$
$U_N + 5\%$				
U_N				
$U_N - 10\%$				

Tabelle 6.2 : Spannungen und Ströme an Leitungsanfang und Leitungsende

Berechnen Sie aus den gemessenen Spannungs- und Stromwerten die gesamte Wirkleistung P_1 am Leitungsanfang und die gesamte Wirkleistung P_2 am Leitungsende für die in der Tabelle aufgeführten Speisespannungen nach der Gleichung $P = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$.

Die Differenz $\Delta P = P_1 - P_2$ liefert die Übertragungsverluste, während das Verhältnis P_2/P_1 den Wirkungsgrad der Leitung wiedergibt. Tragen Sie die Ergebnisse für die einzelnen Speisespannungen in die nachfolgende Tabelle ein.

Speise- spannungen	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$\Delta P(W)$	Wirkungs- grad(%)
$U_N + 5\%$				
U_N				
$U_N - 10\%$				

Tabelle 6.3 : Übertragungsverluste und Wirkungsgrad der Leitung

Ist der Wirkungsgrad von der Höhe der Speisespannung abhängig?

.....

6.1.3 Verhalten beim dreipoligen Kurzschluss

6.1.3.1 Versuchsziel

Messen und deuten der Strom- und Spannungsverhältnisse einer Leitung beim dreipoligen Kurzschluss

6.1.3.2 Benötigte Geräte:

Die benötigten Geräte sind dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.7** zu entnehmen

6.1.3.3 Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.7**. Auf der Sekundärseite des Dreiphasentransformators ist mit Hilfe der Verbindungsstecker die Spannung $U_N - 15\%$ zu wählen. **Führen Sie die folgenden Messungen zügig durch, da im Kurzschlussfall eine hohe Belastung der Versuchskomponenten vorliegt !**

Messen Sie die Spannung am Leitungsanfang, den Strom an beiden Leitungsenden, sowie die von der Leitungsnachbildung aufgenommene Wirk- und Blindleistung. Welcher Art ist die Blindleistung?

$U_1 =$	V	$I_1 =$	A	$I_2 =$	A
$P_1 =$	W	$Q_1 =$	Var		

Art der Blindleistung :

6.1.4 Verhalten bei ohmsch-induktiver und rein induktiver Last

6.1.4.1 Versuchsziel

Messen und deuten der Strom- und Spannungsverhältnisse einer Leitung bei gemischt ohmsch-induktiver bzw. rein induktiver Last.

6.1.4.2 Benötigte Geräte:

Die benötigten Geräte sind dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.8** zu entnehmen.

6.1.4.3 Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.8**. Auf der Sekundärseite des Dreiphasentransformators ist mit Hilfe der Verbindungsstecker die Spannung **$U_N + 5\%$** zu wählen. **Setzen Sie die induktive Last nicht zu hohen Strömen aus !**

Zuerst ist der Wert **1,2H** zu stecken, parallel dazu liegt die ohmsche Last. Diese ist vom Wert **100%** ausgehend nacheinander auf **60%** und **40%** einzustellen. Messen Sie bei jedem Schritt die folgenden Größen und tragen Sie die Messergebnisse in folgende Tabelle ein:

R(%)	$U_1(V)$	$I_1(A)$	$P_1(W)$	$Q_1(Var)$	$U_2(V)$	$I_2(A)$	$\cos\varphi_2$
100							
60							
40							

Tabelle 6.4 : Messwerte für **L = 1,2H**

R(%)	$U_1(V)$	$I_1(A)$	$P_1(W)$	$Q_1(Var)$	$U_2(V)$	$I_2(A)$	$\cos\varphi_2$
100							
60							
40							

Tabelle 6.5 : Messwerte für **L = 0,8H**

Welches charakteristische Merkmal bezüglich der Spannung ist allen Messungen gemeinsam?

.....

.....

Zeichnen Sie ein qualitatives Strom-Spannungs-Zeigerdiagramm für den Fall einer gemischt ohmsch-induktiven Last bei einem $\cos\varphi_2$ von 0,8. Die Betriebskapazität der Leitung ist dabei zu vernachlässigen.

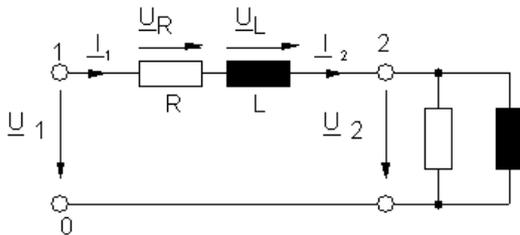


Bild 6.15 : Schaltung

Zeigerdiagramm

Entfernen Sie Verbindungen zur ohmschen Last und wiederholen Sie die letzte Messung mit **L = 0,8H**:

$U_1 =$ V , $I_1 =$ A , $P_1 =$ W , $Q_1 =$ Var

$U_2 =$ V , $I_2 =$ A , $\cos\varphi_2 =$

Warum nimmt die induktive Last auch Wirkleistung auf ($\cos\varphi_2 \neq 0$)

.....

.....

.....

6.2 Versuch zu unsymmetrischen Kurzschlüssen - einpoliger Kurzschluss

6.2.1 Versuchsziel

Den Fehlerstrom bei unsymmetrischem Kurzschluss messen und die Ergebnisse mit denen des dreipoligen Fehlers vergleichen.

6.2.2 Benötigte Geräte:

Die benötigten Geräte sind dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.11** zu entnehmen.

6.2.3. Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.11** Auf der Sekundärseite des Dreiphasentransformators ist mit Hilfe der Verbindungsstecker die Spannung **$U_N - 15\%$** zu wählen. Messen Sie den Kurzschlussstrom I_K der fehlerbehafteten Phase, sowie die Spannung der beiden gesunden Phasen gegen Erde:

1. Kurzschluss aller drei Phasen. Überlegen Sie, ob es dabei eine Rolle spielt, ob eine Verbindung zum Neutralleiter (Erde) vorhanden ist ?
2. Kurzschluss zweier beliebiger Phasen, mit und ohne Verbindung zum Neutralleiter (Erde)
3. Erdkurzschluss einer beliebigen Phase.

Für die Prüfung der Schutzwirkung gegen Überstrom, ist wieder der normale Betriebszustand (ohne Kurzschluss am Leitungsende) herzustellen. Verkleinern Sie langsam den Widerstand der ohmschen Last, so dass der Laststrom ansteigt. Bei welchem Strom erfolgt die Auslösung? Vergleichen Sie diesen mit dem am Relais eingestellten Wert.

Ergebnis: $I_{\text{Last}} = \quad \mathbf{A}$, $I_{\text{Relais}} = \quad \mathbf{A}$

Erfolgt nur eine kurzzeitige Überlastung der Leitung ($t < 1\text{s}$), darf das Überstromrelais nicht auslösen. Testen Sie die Reaktion des Relais in einem derartigen Fall, indem Sie den Widerstandswert der ohmschen Last nur ganz kurz auf Null verkleinern und sofort wieder auf 100% zurückdrehen.

6.4.1 Versuchsziel

Demonstration des Schutzes eines Verbrauchers bzw. einer Leitung gegen Über- und Unterspannung.

6.4.2 Benötigte Geräte

Die benötigten Geräte sind dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.13** (Schutz von Hochspannungsleitungen) zu entnehmen

Messgröße	Messgerät
U	Dreheisen - Messgerät 600V
I_K	Dreheisen - Messgerät 2,5A

6.4.3. Versuchsdurchführung

Verbinden Sie die Versuchskomponenten gemäß dem am Versuchsplatz ausliegenden **Bild 6.13** (Schutz von Hochspannungsleitungen). Wählen Sie zunächst am Dreiphasentransformator die Spannung $U_N - 15\%$ und an der Ohmschen Last einen Wert von 100% . Am Relais sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

$U >$ (Überspannung) : 1,1
 $U <$ (Unterspannung) : 0,9
 Kommandozeit : 1 s

6.4.3.1 Unterspannung

Für die Demonstration der Schutzwirkung des Relais gegen **Unterspannung** sind am Relaisausgang die Kontakte 21-24 zu benutzen.

Beim Einschalten des Versuches müssen diese beiden Kontakte zunächst durch eine Brücke miteinander verbunden werden, und zwar so lange, bis die Spannung zwischen den Leitern ihren Endwert erreicht hat. Danach ist die Brücke zu entfernen.

Messen Sie die am Relais anliegende Nennspannung U_N .

Beim eingestellten Wert der ohmschen Last fließt nur ein geringer Strom. Durch Vergrößern der Belastung nimmt der Spannungsabfall längs der Leitung zu und damit sinkt die Spannung beim Verbraucher. Verkleinern Sie **langsam** (wegen der Verzögerungszeit des Relais) den Wert der ohmschen Last und messen Sie, bei welcher Spannung das Relais auslöst. Vergleichen Sie den Messwert mit dem am Relais eingestellten Wert für $U_<$.

errechneter Wert: $U_{\text{auslöse}} = U_N \cdot 0,85 \cdot 0,9 =$

gemessener Wert: $U_{\text{auslöse}} =$

6.5.3.2 Überspannung

Für die Demonstration der Schutzwirkung des Relais gegen **Überspannung** sind am Relaisausgang die Kontakte 31- 32 zu benutzen. Wählen Sie jetzt am Dreiphasentransformator die Nennspannung und an der Ohmschen Last einen Wert von 20 %.

Beim eingestellten Wert der Ohmschen Last fließt ein relativ hoher Strom. Durch Verkleinern der Belastung nimmt der Spannungsabfall längs der Leitung ab und damit steigt die Spannung beim Verbraucher. Vergrößern Sie **langsam** (wegen der Verzögerungszeit des Relais) den Wert der Ohmschen Last und messen Sie, bei welcher Spannung das Relais auslöst. Vergleichen Sie den Messwert mit dem am Relais eingestellten Wert für $U_>$.

errechneter Wert: $U_{\text{auslöse}} = U_N \cdot 1,1 =$

gemessener Wert: $U_{\text{auslöse}} =$