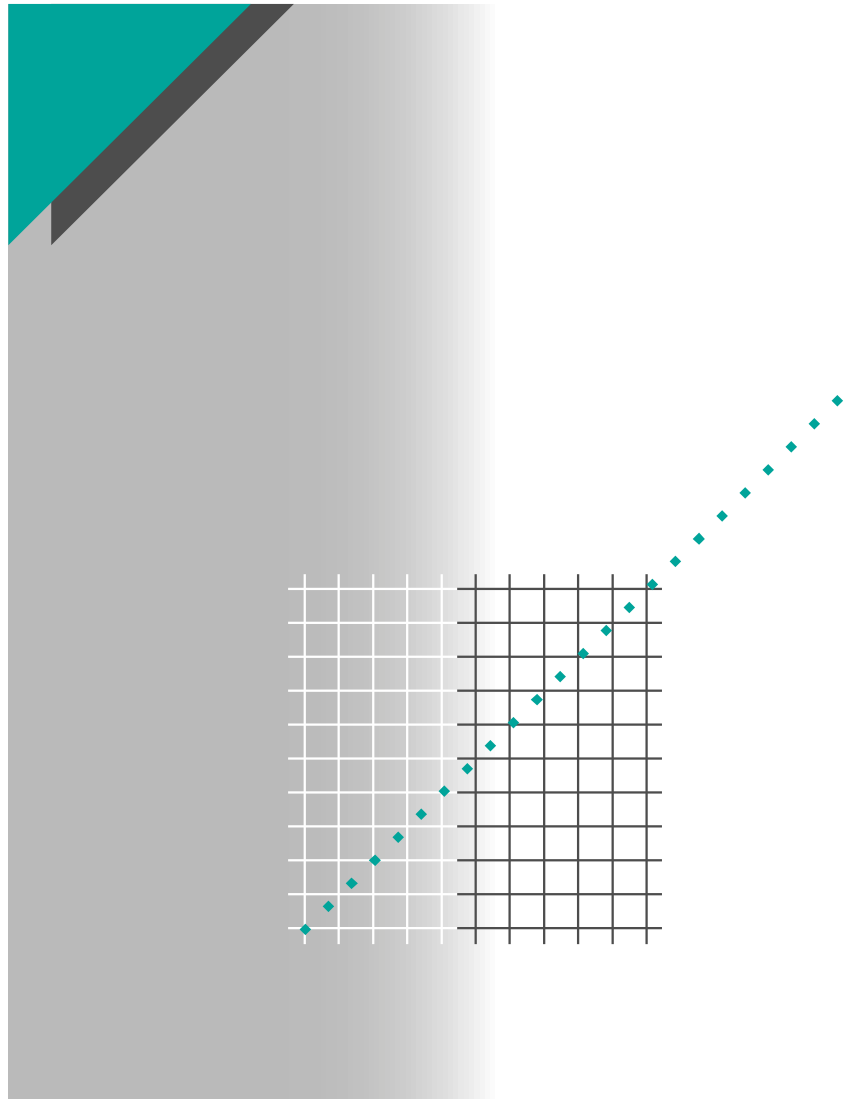


Technisches Heft Nr. 158

Berechnung von Kurzschlußströmen



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Die Technischen Hefte umfassen eine Sammlung von rund hundert Titeln, die für die Ingenieure und Techniker bestimmt sind, die weitergehende Informationen suchen, als sie in den Leitfäden, Katalogen und Datenblättern enthalten sind.

Die Technischen Hefte vermitteln Kenntnisse über die neuen elektrotechnischen und elektronischen Methoden und Verfahren. Sie ermöglichen ferner ein besseres Verständnis der in den Anlagen, Systemen und Betriebsmitteln auftretenden Erscheinungen.

Jedes Technische Heft behandelt eingehend ein bestimmtes Thema auf den Gebieten Stromversorgungsnetze, Schutzeinrichtungen, Leittechnik und Prozesssteuerung.

Die zuletzt erschienenen Publikationen können von der Internet-Site von Schneider heruntergeladen werden.

Adresse: **<http://www.schneider-electric.ch>**

Rubrik: **Dokumentation / Technisches Heft**

Um ein Technisches Heft oder eine Liste der verfügbaren Titel zu erhalten, wenden Sie sich bitte an die nächste Schneider-Vertretung.

Die Sammlung der Technischen Hefte ist Bestandteil der «Technischen Reihe» der Schneider-Gruppe.

Anmerkung

Der Autor lehnt jede Haftung für eine falsche Anwendung der in der vorliegenden Publikationen enthaltenen Angaben und Schemas ab, und haftet in keiner Weise für allfällige Fehler oder Auslassungen oder Folgen, die sich aus der Anwendung der in der vorliegenden Publikation enthaltenen Angaben oder Schemas ergeben können.

Die vollumfängliche oder teilweise Reproduktion eines Technischen Heftes ist nur mit Bewilligung der Direction Scientifique et Technique und nur mit dem folgenden Hinweis gestattet:

«Auszug aus dem Technischen Heft Schneider Nr. ... (anzugeben)».



Berechnung von Kurzschlussströmen

An der Ausarbeitung dieses Heftes
waren beteiligt:
Roland Calvas,
Benoit De Metz Noblat,
André Ducluzaux,
Georges Thomasset.

Lexikon

Abkürzungen:

ASV	Ausschaltvermögen
NS-HV	Niederspannungs-Hauptverteiler
SS	Sammelschienen

Symbole:

α	Einschaltwinkel (Phasenwinkel, um den das Auftreten des Fehlers gegen den Nulldurchgang der Spannung verschoben ist)
c	Spannungsfaktor
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
e	Reaktanz in % von elektrischen Maschinen
E	Elektromotorische Kraft (Maximalwert)
φ	Phasenwinkel (zwischen Strom und Spannung)
i	Momentanstrom
i_a	Sinusförmige Wechselstromkomponente des Momentanstroms
i_c	Gleichstromkomponente des Momentanstroms
i_p	Maximalwert des Stroms (erster Scheitelwert des Fehlerstroms)
I	Maximaler Effektivwert des Stroms
I _b	Abgeschalteter Kurzschlussstrom (IEC 909)
I _{cc}	Dauerkurzschlussstrom (I _{cc3} = dreipolig, I _{cc2} = zweipolig usw.)
I _k	Dauerkurzschlussstrom (IEC 909)
I _{k''}	Anfangskurzschlussstrom (IEC 909)
I _r	Bemessungsstrom des Generators
I _s	Betriebsstrom
λ	Von der Sättigungsinduktivität eines Generators abhängiger Faktor
k und K	Gegebene Konstanten (Tabellen oder Nomogramme)
R _a	Ersatzwiderstand des vorgeschalteten Netzes
R _L	Widerstandsbelag einer Leitung
S	Leiterquerschnitt
S _{cc}	Kurzschlussleistung
S _n	Scheinleistung des Transformators
t _{min}	Minimale Totzeit für den Aufbau eines Kurzschlusses, oft gleich der Verzögerungszeit eines Leistungsschalters
u	Momentanspannung
u _{cc}	Kurzschlussspannung eines Transformators, ausgedrückt in %
U	Verkettete Spannung des unbelasteten Netzes
U _n	Nennspannung des belasteten Netzes
X _a	Ersatzinduktivität des vorgeschalteten Netzes
X _L	Reaktanzbelag einer Leitung
Z _a	Ersatzimpedanz des vorgeschalteten Netzes
Z _{cc}	Impedanz des vorgeschalteten Netzes bei einem dreipoligen Kurzschluss
Z _d , Z _i , Z _o	Direkte, indirekte und Nullimpedanz eines Netzes oder eines Bauteils
Z _L	Leitungsimpedanz

Berechnung von Kurzschlussströmen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	Die wichtigsten Kurzschlussfehler	S. 5
	Entstehung des Kurzschlussstroms	S. 6
	Normen und Berechnungen der Icc	S. 9
	Die in diesem Technischen Heft behandelten Methoden	S. 10
	Grundlegende Annahmen	S. 10
2. Berechnung der Icc mit der Impedanzenmethode	Der Icc in Abhängigkeit von der Kurzschlussart	S. 11
	Bestimmung der verschiedenen Kurzschlussimpedanzen	S. 12
	Beziehung zwischen den Impedanzen der einzelnen Spannungsebenen einer Anlage	S. 15
	Berechnungsbeispiel	S. 16
	Vorteil dieser Methode	S. 19
3. Berechnung der Icc in Strahlennetzen mit Hilfe symmetrischer Komponenten	Allgemeines über symmetrische Komponenten	S. 19
	Berechnung nach IEC 909	S. 20
	Gleichungen der einzelnen Ströme	S. 21
	Berechnungsbeispiel	S. 22
4. Berechnungen mit dem Computer und Schlussfolgerung		S. 24
Anhang: Literaturverzeichnis		S. 24

Die Dimensionierung einer elektrischen Anlage und der zu verwendenden Betriebsmittel sowie die Festlegung der Schutzeinrichtungen für Personen und Sachwerte erfordern eine Berechnung der Kurzschlussströme an jeder Stelle des Netzes.

Das vorliegende Technische Heft beschreibt die in der Norm IEC 909 bzw. 781 vorgesehenen Berechnungsmethoden für Kurzschlussströme. Es behandelt den Fall der strahlenförmigen Niederspannungs-(NS-) und Hochspannungs-(HS-)Netze.

Das Ziel besteht darin, die Berechnungsmethoden zur sachgemässen Bestimmung der Kurzschlussströme selbst bei Anwendung der elektronischen Datenverarbeitung bekanntzumachen.

1. Einleitung

Jede elektrische Anlage muss – von einigen Ausnahmen abgesehen – an allen elektrischen Übergangsstellen, d.h. im allgemeinen bei einer Änderung des Leiterquerschnitts, gegen Kurzschlüsse geschützt werden. Die Grösse des Kurzschlussstroms muss auf verschiedenen Ebenen der Anlage berechnet werden, damit die technischen Daten der Betriebsmittel festgelegt werden können, die in der Lage sein müssen, den Fehlerstrom auszuhalten oder zu unterbrechen.

Das Ablaufschema der Abbildung 1 zeigt das Vorgehen, das zu den ver-

schiedenen Kurzschlussströmen und den sich daraus ergebenden Parametern für die einzelnen Schutzeinrichtungen führt.

Um die Schutzeinrichtungen richtig auszuwählen und einzustellen, müssen zwei Werte des Kurzschlussstroms bekannt sein:

- Der maximale Kurzschlussstrom, der
 - das Ausschaltvermögen (ASV) der Leistungsschalter,
 - das Einschaltvermögen der Schaltgeräte,

□ das elektrodynamische Verhalten der Leitungen und Geräte bestimmt.

Dieser entspricht einem Kurzschluss in unmittelbarer Nähe der verbraucherseitigen Klemmen der Schutzeinrichtung. Er muss genau berechnet werden (Sicherheitsmarge).

■ Der minimale Kurzschlussstrom, der für die Wahl der Auslösekurve der Leistungsschalter und Sicherungen unerlässlich ist, speziell wenn

- die Kabel lang sind und/oder die Quelle eine relativ hohe Impedanz hat (Wechselrichter),

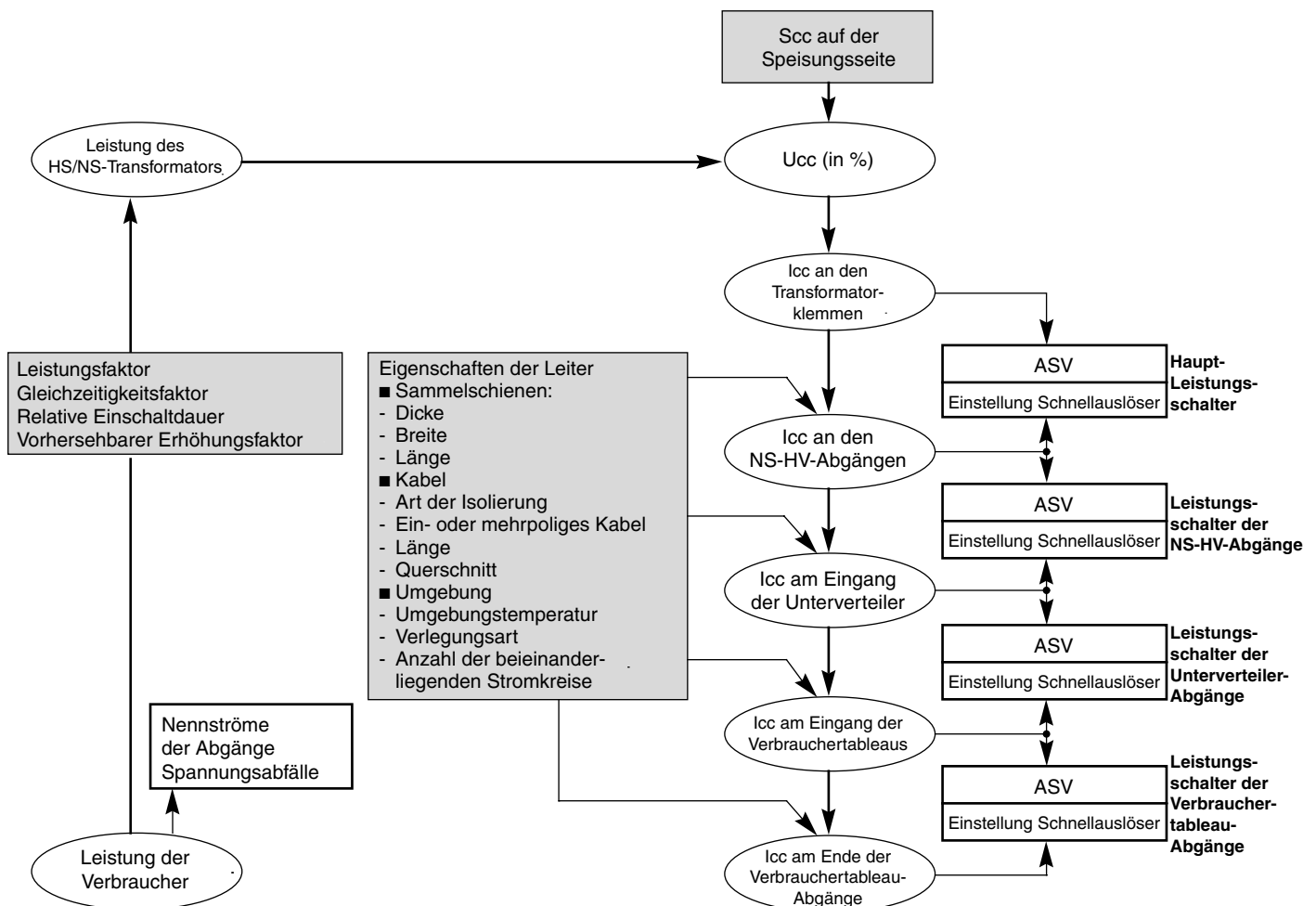


Abb. 1: Berechnungsverfahren für die Icc für die Auslegung einer elektrischen Anlage.

□ der Personenschutz auf dem Ansprechen von Leistungsschaltern oder Sicherungen beruht, was vor allem bei den Erdungsschemas TN oder IT der Fall ist.

Es sei daran erinnert, dass der minimale Kurzschlussstrom einem Kurzschlussfehler am Ende der geschützten Leitung bei einem zweipoligen Fehler und unter den am wenigsten strengen Betriebsbedingungen entspricht (Fehler am Ende eines Feeders und nicht unmittelbar hinter der Schutzeinrichtung, mit einem einzigen Transformator in Betrieb, wenn zwei betroffen sind usw.).

Ferner muss daran erinnert werden, dass in allen Fällen unabhängig vom Kurzschlussstrom (vom minimalen bis zum maximalen) die Schutzeinrichtung den Kurzschluss innerhalb einer Zeit (t_c) beseitigen muss, die kompatibel ist mit der thermischen Belastung, die das geschützte Kabel aushalten kann:

$$\int i^2 \cdot dt \leq k^2 \cdot S^2 \quad (\text{cf. fig. 2, 3, 4})$$

worin S der Leiterquerschnitt und k eine aus verschiedenen Korrekturfaktoren in Funktion der Verlegungsart, der Anzahl benachbarter Stromkreise, der Bodenbeschaffenheit usw. berechnete Konstante ist.

Für weitergehende praktische Einzelheiten wird empfohlen, in den von Merlin Gerin ausgearbeiteten Richtlinien für elektrische Installationen (siehe Literaturverzeichnis) nachzuschlagen.

Die wichtigsten Kurzschlussfehler

In elektrischen Anlagen können verschiedene Kurzschlüsse auftreten.

Merkmale der Kurzschlüsse

Die wichtigsten Merkmale sind:

- Dauer: selbstlöschender, flüchtiger oder Dauerkurzschluss.
- Entstehung:
 - Mechanisch (Leiterbruch, ungewollte elektrische Verbindung zwischen zwei Leitern durch einen leitenden Fremdkörper wie z.B. ein Werkzeug oder ein Tier).
 - Elektrische Überspannungen mit interner oder atmosphärischer Ursache,
 - oder infolge Verschlechterung der Isolation durch Wärme, Feuchtigkeit oder korrosive Umgebung.

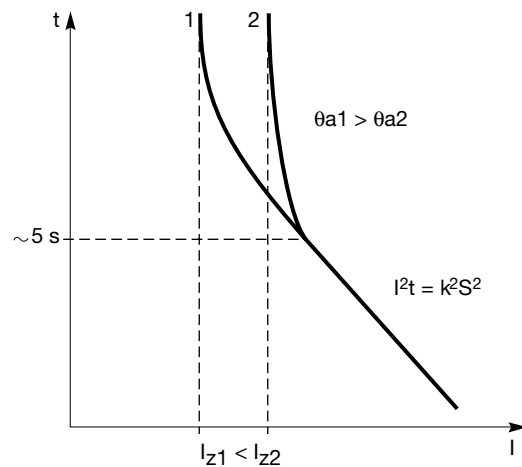


Abb. 2: I^2t -Kennlinie eines Leiters in Funktion der Umgebungstemperatur.

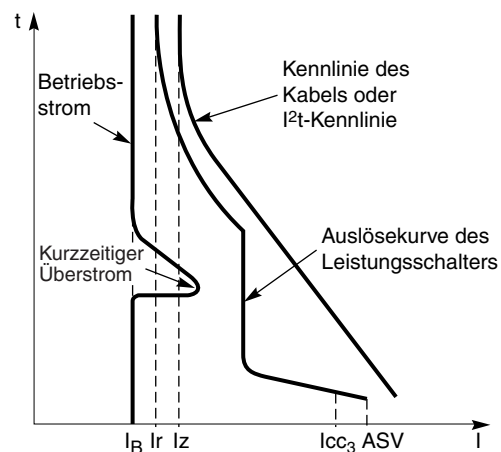


Abb. 3: Schutz eines Stromkreises mit einem Leistungsschalter.

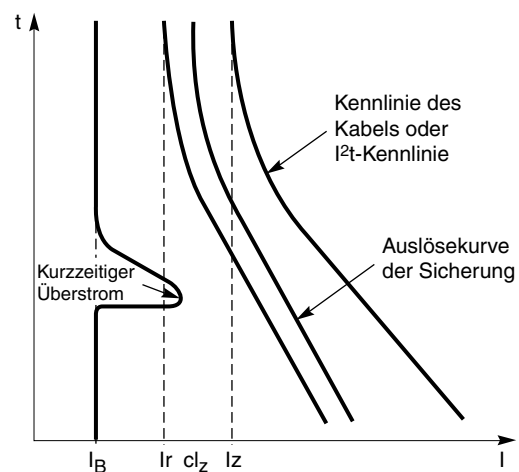


Abb. 4: Schutz eines Stromkreises mit einer aM-Sicherung.

■ Ort des Auftretens: intern oder extern an einer Maschine oder einer Schalttafel. Abgesehen von diesen Merkmalen unterscheidet man

- Einpolige Kurzschlüsse: 80% der Fälle.
- Zweipolige Kurzschlüsse: 15% der Fälle. Diese Fehler entwickeln sich oft zu dreipoligen Kurzschlüssen.
- Dreipolige Kurzschlüsse: Nur 5% der Fälle sind von Anfang an dreipolige Kurzschlüsse.

Die damit verbundenen Kurzschlussströme sind in der Abbildung 5 dargestellt.

Folgen der Kurzschlüsse

Die Folgen sind je nach der Art und der Dauer des Fehlers, dem Ort des Auftretens in der Anlage und der Stromstärke verschieden:

■ Am Ort des Fehlers treten Lichtbögen auf, mit

- Beschädigung der Isolationen,
- Brandgefahr und Gefährdung von Personen.

■ Im fehlerhaften Stromkreis:

- Elektrodynamische Kräfte, mit
 - Deformation der SS,
 - Zerstörung von Kabeln,
- Überhitzung wegen der Zunahme der ohmschen Verluste und damit Gefahr einer Beschädigung der Isolationen.

■ Für andere Stromkreise des betroffenen Netzes oder benachbarter Netze:

- Spannungseinbrüche während der Dauer der Beseitigung des Fehlers zwischen wenigen Millisekunden und einigen hundert Millisekunden.
- Ausserbetriebsetzung eines mehr oder weniger grossen Teils des Netzes je nach dessen Schema und der Selektivität seiner Schutzeinrichtungen.
- Dynamische Instabilität und/oder Verlust des Synchronismus der Maschinen.

□ Störungen in Steuerungs- und Überwachungskreisen, usw.

Entstehung des Kurzschlussstroms

Ein vereinfachtes Netz besteht lediglich aus einer konstanten Wechselspannungsquelle, einem Schalter, einer Impedanz Z_{cc} , die alle vor dem Schalter vorhandenen Impedanzen repräsentiert, und einer Lastimpedanz Z_s (siehe Abb. 6).

In Wirklichkeit besteht die Impedanz der Quelle aus allem, was vor dem Kurzschluss liegt, mit Netzen verschiedener Spannungen (HS, NS) und in Serie geschalteten Leitungen mit verschiedenen Querschnitten und Längen.

Im Schema der Abbildung 6 fliesst, wenn der Schalter geschlossen ist, im Netz der Betriebsstrom I_s .

Ein zwischen den Punkten A und B auftretender Fehler mit vernachlässigbarer Impedanz bewirkt einen sehr hohen Kurzschlussstrom I_{cc} , der nur durch die Impedanz Z_{cc} begrenzt wird.

Der Strom I_{cc} entsteht aus einem Ausgleichsvorgang in Funktion der Reaktanzen X und der Widerstände R , welche die Impedanz Z_{cc} bilden:

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Bei der Starkstromverteilung ist die Reaktanz $X = L\omega$ in der Regel wesentlich grösser als der Widerstand R , wobei das Verhältnis R/X zwischen 0,1 und 0,3 liegt. Angesichts dieser niedrigen Werte ist es praktisch gleich dem $\cos \varphi_{cc}$, somit

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

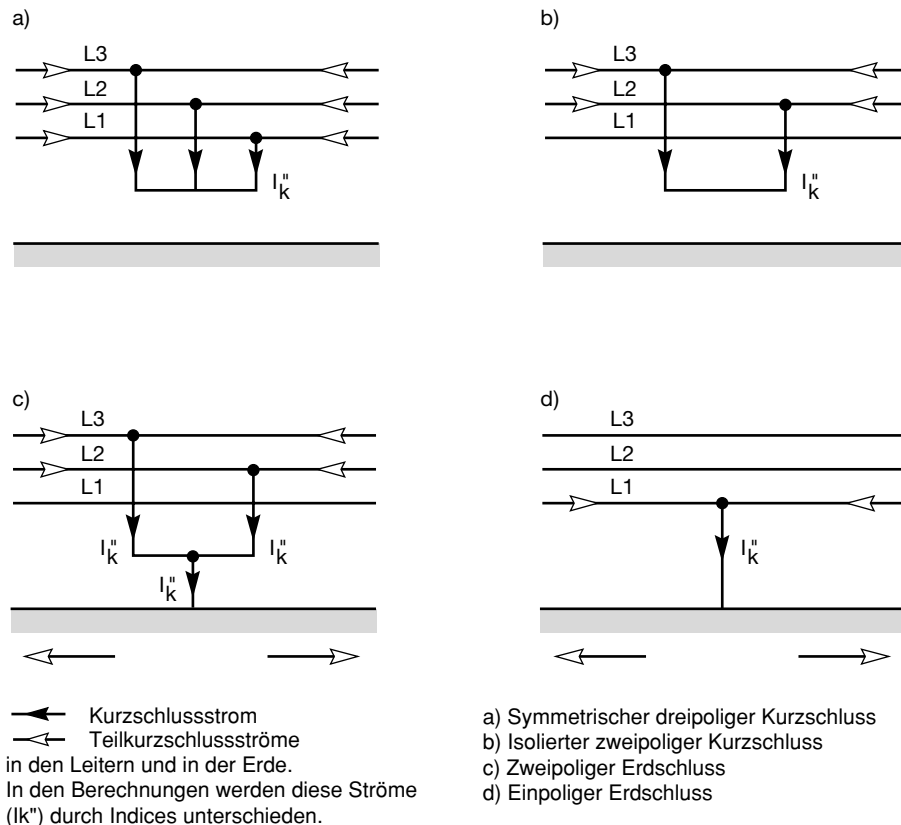


Abb. 5: Die verschiedenen Kurzschlüsse und ihre Ströme. Die Richtung der die Ströme darstellenden Pfeile ist willkürlich (siehe IEC 909).

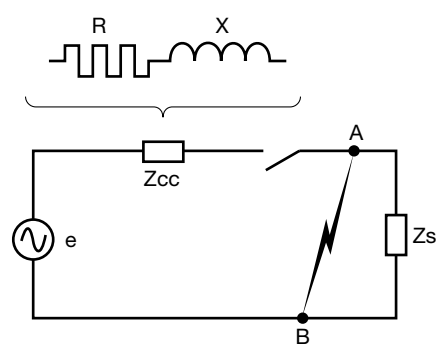


Abb. 6: Vereinfachtes Schema eines Netzes.

Der Ausgleichsvorgang, aus dem der Kurzschlussstrom entsteht, ist je nach der Entfernung des Fehlerortes zu den Generatoren verschieden. Diese Entfernung bedeutet nicht unbedingt eine geographische Distanz, sondern darunter ist zu verstehen, dass die Impedanzen der Generatoren kleiner sind als die Impedanzen der Verbindungen zwischen diesen und dem Ort des Fehlers.

Fehler in grosser Entfernung von den Generatoren

Dies ist der häufigste Fall. Der Ausgleichsvorgang ist dabei derjenige, der bei der Anwendung eines aus einer Induktivität und einem Widerstand bestehenden Stromkreises mit der Spannung

$$e = E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

entsteht.

Der Strom i ist dabei die Summe der beiden Komponenten $i = i_a + i_c$.

■ Die eine Komponente (i_a) ist die sinusförmige Wechselstromkomponente $i_a = I \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$ wobei

$$I = \text{Maximalwert des Stroms} = \frac{E}{Z_{cc}}$$

α = elektrischer Winkel zwischen dem Auftreten des Fehlers und dem Nulldurchgang der Spannungswelle

■ Die andere Komponente (i_c) ist die Gleichstromkomponente

$i_c = -I \cdot \sin \alpha \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$. Ihr Anfangswert hängt von α ab und ihr Abklingen ist um so schneller, je grösser R/L ist.

Zu Beginn des Kurzschlusses ist i definitionsgemäss gleich null (wenn man den Betriebsstrom I_s vernachlässigt), woraus:

$$i = i_a + i_c = 0$$

Die Abbildung 7 zeigt den grafischen Aufbau von i durch algebraische Addition der Ordinaten der beiden Komponenten i_a und i_c .

Die Abbildung 8 zeigt die beiden möglichen Extremfälle für die Entstehung eines I_{cc} , die zum einfacheren Verständnis durch eine Einphasen-Wechselspannung dargestellt werden.

Der Faktor $e^{-\frac{R}{L}t}$ ist um so höher, je kleiner das Verhältnis R/L bzw. R/X und damit je schwächer das Abklingen der Gleichstromkomponente ist.

Somit muss i_p berechnet werden, um das Ausschaltvermögen der zu instal-

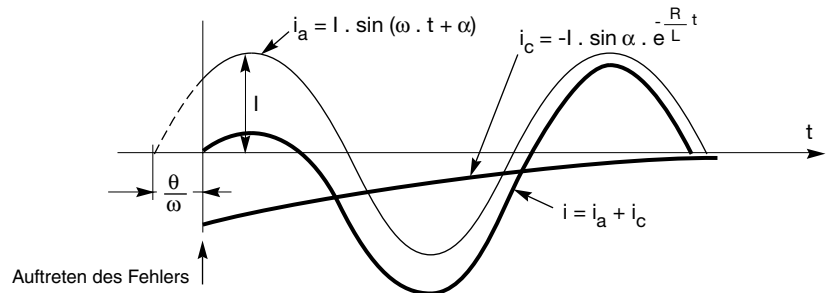
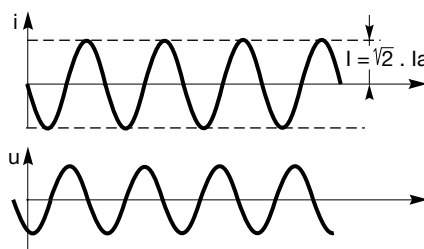


Abb. 7: Grafische Darstellung und Aufteilung des Stroms eines Kurzschlusses, der in grosser Entfernung von einem Generator auftritt.

a) Symmetrisch



Da der Moment des Auftretens des Fehlers oder des Einschaltens in bezug auf die Netzspannung durch seinen Einschaltwinkel α (Auftreten des Fehlers) gekennzeichnet ist, kann die Spannung wie folgt geschrieben werden:

$$u = E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha).$$

Der Verlauf des Stroms hat somit die folgende Form:

$$i = \frac{E}{Z} \left[\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

wobei seine Wechselstromkomponente um φ gegenüber der Spannung verschoben ist und seine Gleichstromkomponente gegen 0 tendiert, wenn t gegen unendlich geht. Daraus ergeben sich die beiden Extremfälle, die gegeben sind durch:

□ $\alpha = \varphi \approx \pi/2$, "symmetrischer Fall" genannt (siehe Abb. a). Dabei hat der Fehlerstrom die Form:

$$i = \frac{E}{Z} \sin \omega \cdot t \text{ und von Anfang an denselben}$$

Verlauf wie im eingeschwungenen Zustand mit dem Spitzenwert E/Z .

□ $\alpha = 0$, "unsymmetrischer Fall" genannt (siehe Abb. b). Dabei hat der Fehlerstrom die Form:

$$i = \frac{E}{Z} \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

Somit hängt der erste Spitzenwert i_p von φ und somit vom Verhältnis $R/X = \cos \varphi$ des Stromkreises ab.

b) Asymmetrisch

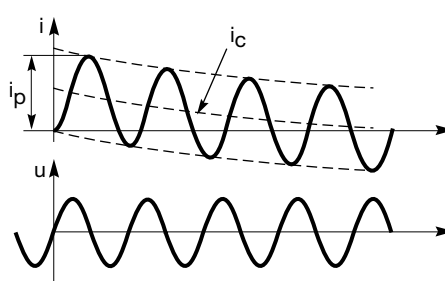


Abb. 8: Rekapitulation und grafische Darstellung der beiden Extremfälle eines Kurzschlussstroms, symmetrisch und unsymmetrisch.

lierenden Leistungsschalter zu bestimmen, jedoch auch, um die elektrodynamischen Belastungen zu ermitteln, welche die gesamte Anlage auszuhalten in der Lage sein muss.

Dieser Wert kann aufgrund der folgenden Beziehung aus dem Effektivwert des symmetrischen Kurzschlussstroms abgeleitet werden:

$i_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a$, wobei der Koeffizient K der Kurve der Abbildung 9 in Funktion des Verhältnisses R/X bzw. R/L entnommen werden kann.

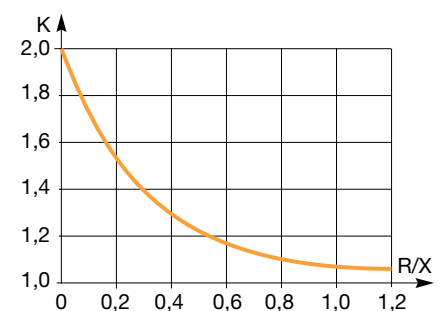


Abb. 9: Verlauf des Faktors K in Funktion von R/X bzw. R/L (siehe IEC 909).

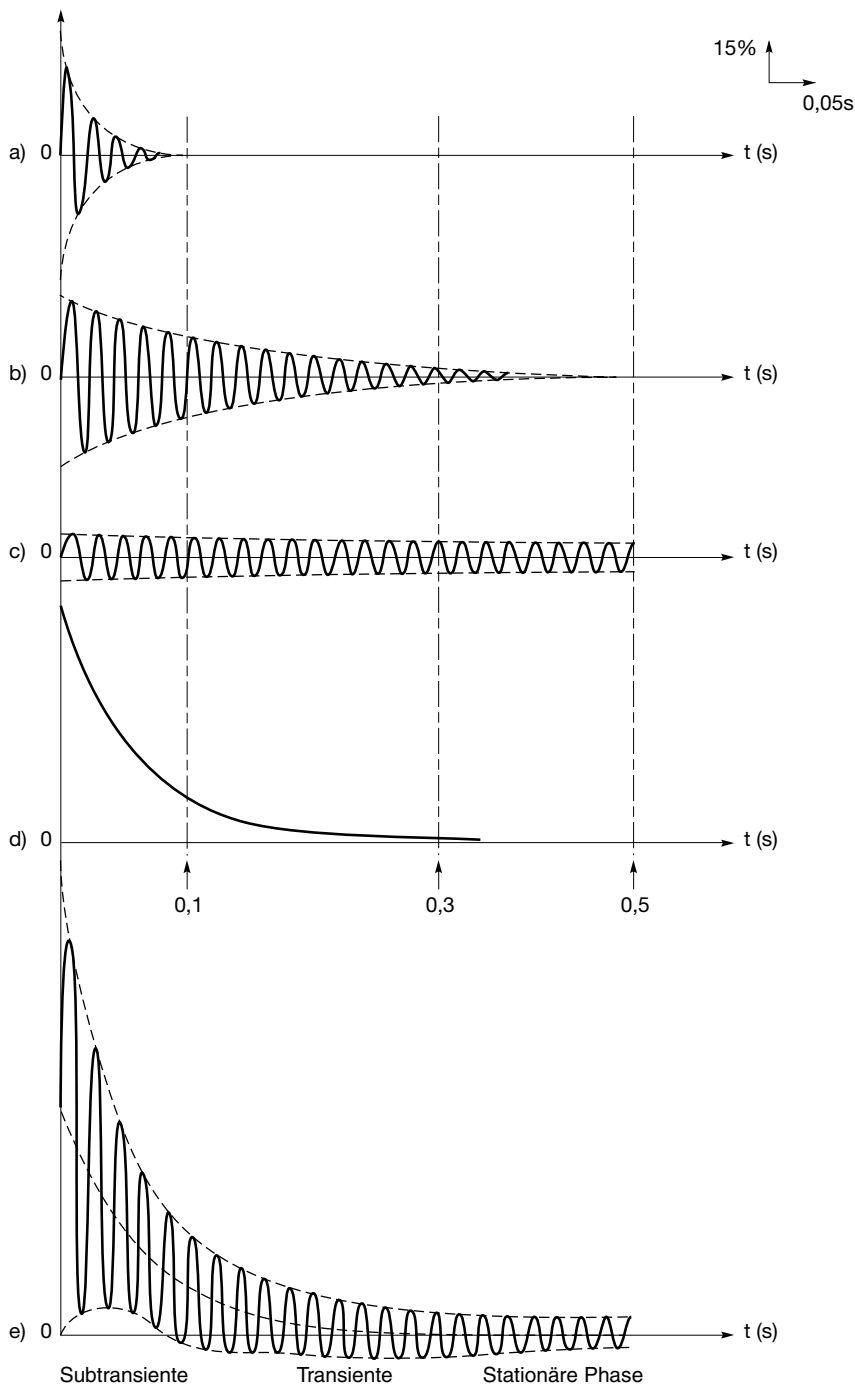


Abb. 10: Beiträge zum Gesamtkurzschlussstrom I_{cc} (e):

- a) der subtransienten Reaktanz
- b) der transienten Reaktanz
- c) der stationären Reaktanz
- d) der Gleichstromkomponente.

Es muss auf den Fall hingewiesen werden, in dem die Abnahme der Reaktanz des Generators schneller erfolgt als die Abnahme der Gleichstromkomponente. Dieser seltene Fall kann Abschalt- und Stättigungsprobleme der magnetischen Kreise bewirken, da ein Nulldurchgang des Stroms erst nach mehreren Perioden erfolgt.

Fehler in der Nähe der Generatoren

Wenn der Fehler in der unmittelbaren Nähe des den betreffenden Stromkreis speisenden Generators auftritt, bewirkt die nunmehr vorherrschende Änderung der Impedanz des Generators eine Abschwächung des Kurzschlussstroms.

Effektiv wird der Ausgleichsvorgang, aus dem der Kurzschlussstrom entsteht, durch die sich aus dem Kurzschluss ergebende Änderung der EMK (elektromotorischen Kraft) kompliziert. Zur Vereinfachung nimmt man die EMK als konstant an, jedoch die innere Reaktanz der Maschine als variabel. Diese Reaktanz ändert sich je nach den drei Phasen:

- **Subtransiente Reaktanz**, die während der ersten 10 bis 20 Millisekunden des Fehlers auftritt.
- **Transiente Reaktanz**, die bis zu 500 Millisekunden dauern kann.
- **Stationäre Reaktanz** oder synchrone Reaktanz.

Dazu ist zu bemerken, dass die Reaktanz in jeder Phase in der angegebenen Reihenfolge zunimmt: die subtransiente Reaktanz ist kleiner als die transiente Reaktanz, und diese wiederum kleiner als die stationäre Reaktanz. Diese Zunahme der Reaktanz bewirkt eine Abnahme des Kurzschlussstroms, der somit die Summe von vier Komponenten ist (siehe Abb. 10):

- Den drei Wechselstromkomponenten (subtransiente, transiente und stationäre Komponente).
- Der Gleichstromkomponente als Ergebnis der Entstehung des Stroms im (induktiven) Stromkreis.

In der Praxis ist die Kenntnis des Verlaufes des Kurzschlussstroms nicht immer unerlässlich:

- In der Niederspannung genügt wegen der Schnelligkeit der Abschaltvorrichtungen die Kenntnis des mit I''_k bezeichneten subtransienten Kurzschlussstroms sowie des maximalen unsymmetrischen Scheitelwertes i_p für die Bestimmung des ASV der Schutzeinrichtungen und der elektrodynamischen Beanspruchungen.
- In der Niederspannungsverteilung und in der Hochspannung wird hingegen der transiente Kurzschlussstrom oft verwendet, wenn die Abschaltung erfolgt, bevor der Dauer Kurzschlussstrom erreicht ist. Es ist deshalb von Vorteil,

den abgeschalteten Kurzschlussstrom I_n einzuführen, der das ASV der verzögerten Leistungsschalter bestimmt. I_b ist der Wert des Kurzschlussstroms im Moment der effektiven Unterbrechung und somit nach der Zeit t nach dem Auftreten des Kurzschlusses, wobei $t = t_{\min}$. Die Zeit t_{\min} (minimale Totzeit) ist die Summe der minimalen Verzögerung (Verzögerungszeit) eines Schutzrelais und der kürzesten Öffnungszeit des damit verbundenen Leistungsschalters. Es handelt sich um die kürzeste Zeit, die zwischen dem Auftreten des Kurzschlussstroms und der ersten Trennung der Kontakte eines Poles des Schaltgerätes verstreicht.

Die Abbildung 11 zeigt die so definierten Kurzschlussströme.

Normen und Berechnungen der I_{cc}

Von den Normen werden verschiedene Methoden vorgeschlagen.

■ Der Anwendungs-Leitfaden UTE C 15-105, nach franz. Norm, enthält die folgenden vier Methoden:

□ Die "Impedanzen"-Methode, mit der die Fehlerströme an jeder Stelle der Anlage mit ziemlicher Genauigkeit berechnet werden können.

Sie besteht darin, die einzelnen Widerstände und Reaktanzen der Fehlersehleife von einschliesslich der Quelle bis zur betrachteten Stelle zu addieren und hierauf die entsprechende Impedanz zu berechnen. Schliesslich wird der I_{cc} mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes erhalten:

$$I_{cc} = U_n / \sum(Z).$$

Alle Eigenschaften der einzelnen Teile der Fehlersehleife (Quellen und Leitungen) müssen bekannt sein.

□ Die "Zusammensetzungs"-Methode, die angewendet werden kann, wenn die Eigenschaften der Speisung nicht bekannt sind. Die speisungsseitige Impedanz des betrachteten Stromkreises wird aufgrund des Kurzschlussstroms an der Einspeisung berechnet. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_{cc} = R/X$ wird als an der Einspeisung und an der Fehlerstelle identisch angenommen. Mit anderen Worten entspricht dies der Annahme, dass die Elementarimpedanzen der beiden aufeinanderfolgenden Abschnitte der Anlage genügend benachbarte Argumente haben, um die vektorielle

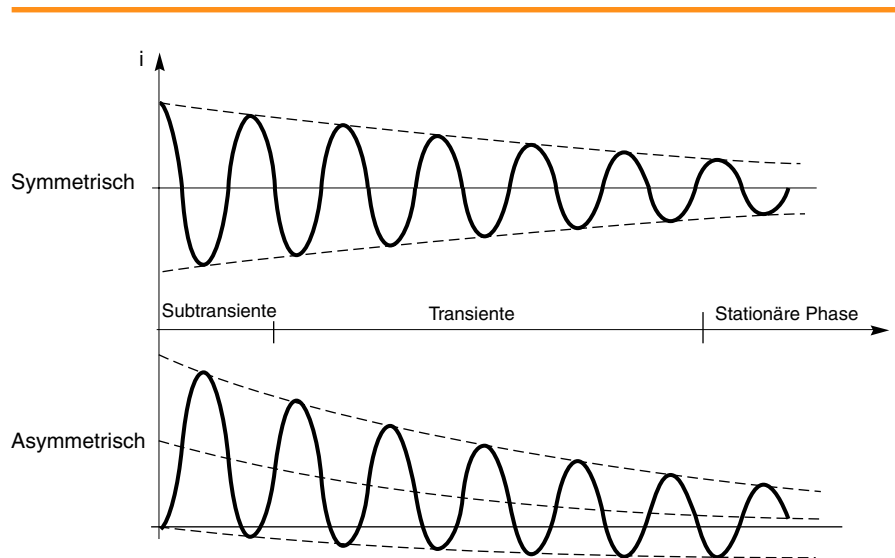


Abb. 11: Kurzschlussströme in der Nähe eines Generators (schematische Darstellung).

Addition durch eine algebraische Addition der Impedanzen zu ersetzen. Aufgrund dieser Näherung kann man den Wert des Moduls der Kurzschlussströme mit genügender Genauigkeit erhalten, um einen Stromkreis hinzuzufügen.

Diese angenäherte Methode kann nur für Anlagen mit einer Leistung unter 800 kVA angewendet werden.

□ Die sogenannte "konventionelle" Methode, welche die Möglichkeit bietet, die minimalen Kurzschlussströme und die Fehlerströme am Ende einer Leitung zu berechnen, ohne die Impedanzen oder die I_{cc} des dem betreffenden Stromkreis vorgeschalteten Teils der Anlage zu kennen.

Sie beruht auf der Annahme, dass die Spannung an der Einspeisung während der Dauer des Kurzschlusses bzw. des Fehlers gleich 80% der Nennspannung der Anlage ist.

Sie berücksichtigt nur den Widerstand der Leiter, auf den sie, um auch ihre Induktivität zu berücksichtigen, für grosse Querschnitte einen Erhöhungsfaktor (1,15 für 150 mm², 1,20 für 185 mm² usw.) anwendet.

Diese Methode gelangt vor allem für Verbraucherstromkreise zur Anwendung, deren Einspeisepunkt genügend weit entfernt von der Speisequelle ist (Gruppennetz).

□ Die sogenannte "vereinfachte" Methode (im gleichen Leitfadens im Detail dargestellt), die mit Hilfe von aufgrund

von zahlreichen vereinfachenden Annahmen erstellten Tabellen für jeden Leiterquerschnitt direkt die folgenden Angaben liefert:

- Bemessungsstrom der Einrichtung, die den Überlastschutz sicherstellt,
- maximale Länge der gegen indirektes Berühren geschützten Leitungen,
- vom Gesichtspunkt der Spannungsabfälle zulässige Längen.

Diese Tabellen enthalten effektiv die Resultate von im wesentlichen mit der Zusammensetzungs- und der konventionellen Methode durchgeführten Berechnungen.

Diese Methode bietet die Möglichkeit, die Eigenschaften eines Stromkreises zu bestimmen, der einer bestehenden Anlage hinzugefügt wird, dessen Eigenschaften nicht genügend bekannt sind. Sie ist direkt auf Niederspannungsanlagen anwendbar, und zwar mit Korrekturfaktoren, wenn die Spannung verschieden von 230/400 V ist.

■ Die Methode nach der Norm IEC 909 (VDE 0102) ist für alle Strahlen- und Maschennetze bis 230 kV anwendbar. Sie besteht darin, eine Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle zu berechnen, um hierauf den Strom an dieser Stelle zu bestimmen. Alle Einspeisungen des Netzes sowie Synchron- und Asynchronmaschinen werden durch ihre Impedanzen (direkte, indirekte und Nullimpedanz) ersetzt. Bei dieser Methode werden alle Leitungs-

kapazitäten und Paralleladmittanzen der nicht rotierenden Lasten ausser jenen des Nullsystems vernachlässigt.

■ Es gibt noch weitere Methoden. Sie beruhen auf dem Überlagerungsprinzip und erfordern eine vorherige Berechnung des Laststroms. Ferner muss auf die Methode der Norm IEC 865 (VDE 0103) hingewiesen werden, die zur Berechnung des thermisch äquivalenten Kurzschlussstroms führt.

Die in diesem Technischen Heft behandelten Methoden

In diesem Technische Heft werden speziell zwei Methoden für die Berechnung der Kurzschlussströme in Strahlennetzen behandelt:

■ Bei der einen Methode, die vor allem für Niederspannungsnetze angewendet wird, handelt es sich um die Impedanzmethode. Sie wurde wegen der mit ihr möglichen Genauigkeit gewählt, sowie angesichts ihres didaktischen Wertes, da dabei praktisch alle Eigenschaften des betreffenden Stromkreises in Betracht gezogen werden müssen.

■ Die andere Methode, die vorwiegend in der Hochspannung Anwendung fin-

det, ist jene nach IEC 909, die wegen ihrer Genauigkeit und ihres analytischen Gesichtspunktes ausgewählt wurde. Technisch wendet sie das Prinzip der symmetrischen Komponenten an.

Grundlegende Annahmen

Für diese Kurzschlussstromberechnungen müssen Annahmen getroffen werden, die den Gültigkeitsbereich der gegebenen Formeln festlegen. Diese oft vereinfachenden und mit begründeten Näherungen verbundenen Annahmen erleichtern das Verständnis der physikalischen Vorgänge und damit der Berechnungen unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer in jeder Beziehung genügenden Genauigkeit.

Die in diesem Dokument gewählten Annahmen sind:

■ Das betrachtete Netz ist ein Strahlennetz, und seine Nennspannung reicht von der Niederspannung bis zur Hochspannung (übersteigt jedoch den in der Norm IEC 909 angegebenen Wert von 230 kV nicht).

■ Bei einem dreipoligen Kurzschluss tritt der Kurzschlussstrom an allen drei Phasen gleichzeitig auf.

■ Während der Dauer des Kurzschlusses ändert sich die Anzahl der betroffenen Phasen nicht. Ein dreipoliger Kurzschluss bleibt dreipolig, und ein einpoliger Erdschluss bleibt ein einpoliger Erdschluss.

■ Während der gesamten Kurzschlussdauer ändern sich die Spannungen, die das Fließen des Stroms bewirkt haben, sowie die Kurzschlussimpedanz nicht wesentlich.

■ Die Regler oder Stufenschalter der Transformatoren befinden sich in ihrer mittleren Stellung (bei einem generatorfernen Kurzschluss können die wirklichen Stellungen dieser Stufenschalter ausser acht gelassen werden).

■ Die Lichtbogenwiderstände werden nicht berücksichtigt.

■ Sämtliche Leitungskapazitäten werden vernachlässigt.

■ Die Lastströme werden vernachlässigt.

■ Alle Nullimpedanzen werden berücksichtigt.

2. Berechnung der Icc mit der Impedanzenmethode

Icc in Abhängigkeit von der Kurzschlussart

Dreipoliger Kurzschluss

Dieser Fehler entspricht der Zusammenschaltung der drei Phasen. Der Kurzschlussstrom I_{CC3} beträgt:

$$I_{CC3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC}}$$

wobei U (verkettete Spannung) der Leerlaufspannung des Transformators entspricht, die um 3 bis 5% höher liegt als die Klemmenspannung unter Last. In einem 390-V-Netz zum Beispiel beträgt die angenommene Spannung $U = 410 \text{ V}$ mit einer Phasenspannung von $U/\sqrt{3} = 237 \text{ V}$.

Die Berechnung des Kurzschlussstroms reduziert sich somit auf die Berechnung der Impedanz Z_{CC} , der Ersatzimpedanz aller von Icc durchflossenen Impedanzen (der Quelle und der Leitungen) vom Generator bis zur Fehlerstelle (siehe Abb. 12). Dies ist effektiv die "direkte" Impedanz pro Phase:

$$Z_{CC} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \text{ mit}$$

$\sum R$ = Summe der in Serie geschalteten Widerstände

$\sum X$ = Summe der in Serie geschalteten Reaktanzen

Der dreipolige Fehler gilt als jener, der die höchsten Fehlerströme erzeugt. Effektiv wird der Fehlerstrom im Ersatzschema eines Mehrphasensystems nur durch die Impedanz einer Phase unter der Phasenspannung des Netzes begrenzt. Somit ist die Berechnung von I_{CC3} unerlässlich, um die Betriebsmittel (in bezug auf die auszuhaltenden Stromstärken und elektrodynamischen Beanspruchungen) auswählen zu können.

Isolierter zweipoliger Kurzschluss

Dieser entspricht einem von der verketteten Spannung U gespeisten Fehler zwischen zwei Phasen.

Der dabei auftretende Strom I_{CC2} ist kleiner als bei einem dreipoligen Fehler:

$$I_{CC2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{CC}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{CC3} \approx 0,86 \cdot I_{CC3}$$

Isolierter einpoliger Kurzschluss

Dieser entspricht einem von der Phasenspannung $V = U/\sqrt{3}$ gespeisten Fehler zwischen einer Phase und dem Neutralleiter.

Der dabei auftretende Strom I_{CC1} beträgt:

$$I_{CC1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC} + Z_{Ln}}$$

In bestimmten Fällen eines einpoligen Fehlers ist die Nullimpedanz der Quelle niedriger als Z_{CC} (zum Beispiel an den Klemmen eines Transformators in Stern-Zickzack-Schaltung oder eines Generators im subtransienten Zustand). Der Strom kann dann bei einem einpoligen Fehler höher sein als bei einem dreipoligen Fehler.

(Einpoliger oder zweipoliger) Erdschluss

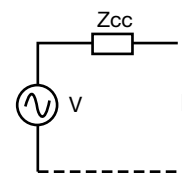
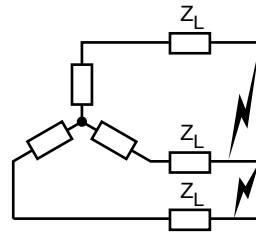
Bei einem solchen Fehler kommt die Nullimpedanz Z_0 zur Wirkung.

Ausser beim Vorhandensein von elektrischen Maschinen, bei denen die Nullimpedanz reduziert ist, ist der auftretende Strom I_{CCh} niedriger als beim dreipoligen Kurzschluss.

Seine Berechnung kann je nach der Sternpunktbehandlung (dem Erdungsschema) für die Wahl der Einstellwerte der gleichpoligen (HS) oder differentialen (NS) Schutzeinrichtungen erforderlich sein.

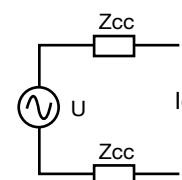
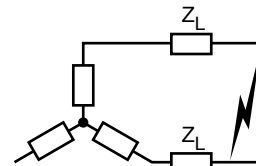
Zusammenfassende Tabelle der verschiedenen Kurzschlussströme (siehe Abb. 12).

Dreipoliger Kurzschluss



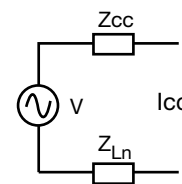
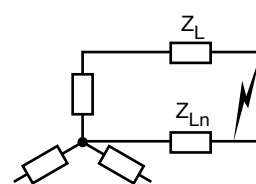
$$I_{CC3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC}}$$

Zweipoliger Kurzschluss



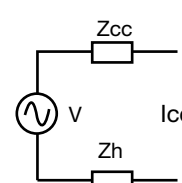
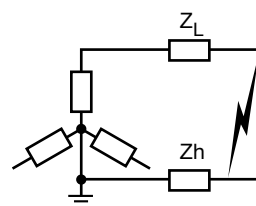
$$I_{CC2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{CC}}$$

Einpoliger Kurzschluss



$$I_{CC1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC} + Z_{Ln}}$$

Erdschluss



$$I_{CCh} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC} + Z_h}$$

Abb. 12: Die verschiedenen Kurzschlussströme.

Bestimmung der verschiedenen Kurzschlussimpedanzen

Das Prinzip dieser Methode besteht darin, die Kurzschlussströme aufgrund der Impedanz des vom Kurzschlussstrom durchflossenen "Stromkreises" zu bestimmen. Diese Impedanz wird berechnet, nachdem man separat die einzelnen Widerstände und Reaktanzen der Fehlerschleife von einschliesslich der Stromversorgungsquelle bis zur betrachteten Stelle addiert hat.

(Die Nummern (x) dienen dazu, im Beispiel am Schluss dieses Kapitels die im Text enthaltenen Erklärungen leicht zu finden.)

Impedanzen des Netzes

■ Impedanz des vorgeschalteten Netzes
In den meisten Berechnungen geht man speisungsseitig nicht weiter als bis zur Übergabestelle der Energie. Die Kenntnis des vorgeschalteten Netzes beschränkt sich somit in der Regel auf die vom Versorgungsunternehmen gelieferten Angaben, d.h. lediglich die Kurzschlussleistung S_{cc} (in MVA).

Die Ersatzimpedanz des vorgeschalteten Netzes beträgt:

$$(1) \Rightarrow Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

U ist die verkettete Spannung des unbelasteten Netzes.

Der vorgeschaltete Widerstand und die vorgeschaltete Reaktanz können aufgrund von R_a/Z_a in der HS ermittelt werden:

$$R_a / Z_a \approx 0,3 \text{ in } 6 \text{ kV,}$$

$$R_a / Z_a \approx 0,2 \text{ in } 20 \text{ kV,}$$

$$R_a / Z_a \approx 0,1 \text{ in } 150 \text{ kV.}$$

$$(2) \Rightarrow X_a = 0,980 Z_a \text{ in } 20 \text{ kV,}$$

Deshalb die Näherung $X_a \approx Z_a$.

■ Innere Impedanz des Transformators

Die Impedanz berechnet sich aus der Kurzschlussspannung u_{cc} ausgedrückt in %:

$$(3) \Rightarrow Z_T = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} \text{ worin}$$

U = Verkettete Leerlaufspannung des Transformators

S_n = Scheinleistung des Transformators

$U \cdot u_{cc}$ = Spannung, die auf der Primärseite des Transformators angelegt werden muss, damit die Sekundärseite bei kurzgeschlossenen sekundärseitigen NS-Klemmen vom Nennstrom I_n durchflossen wird.

Für HS/NS-Speisetransformatoren der öffentlichen Stromversorgung sind die Werte von u_{cc} von der EDF (HN52 S20) und in einem europäischen Normenentwurf (PR-HD 428.1S1) festgelegt (siehe Abb. 13). In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass die Genauigkeit dieser Werte einen unmittelbaren Einfluss auf die Berechnung der I_{cc} hat, weil ein Fehler von $x\%$ für u_{cc} einen Fehler von der gleichen Grössenordnung ($x\%$) für Z_T bewirkt.

(4) \Rightarrow Normalerweise $R_T \ll X_T$, in der Grössenordnung von $0,2 X_T$, wobei die innere Impedanz der Transformatoren mit der Reaktanz X_T gleichgesetzt werden kann. Für kleine Leistungen ist hingegen die Berechnung von Z_T notwendig, da das Verhältnis R_T/X_T grösser ist. Dieser Widerstand wird somit wie folgt aus den ohmschen Verlusten (W) in den Wicklungen berechnet:

$$W = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3 \cdot I_n^2}$$

Anmerkungen:

(5) \Rightarrow □ Wenn n Transformatoren von gleicher Leistung parallel geschaltet sind, müssen ihre Werte für die innere Impedanz sowie den Widerstand oder die Reaktanz durch n dividiert werden.
□ Besondere Beachtung muss den Spezialtransformatoren geschenkt werden. Zum Beispiel die Transformatoren der Gleichrichtergruppen haben Werte von u_{cc} , die 10 bis 12% erreichen, um den Kurzschlussstrom zu begrenzen.

Unter Berücksichtigung der Impedanz auf der Speisungsseite des Transformators und der inneren Impedanz des Transformators kann der Kurzschlussstrom wie folgt ausgedrückt werden:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_a + Z_T)}$$

In erster Näherung können Z_a und Z_T mit ihren Reaktanzen gleichgesetzt werden. Die Kurzschlussimpedanz Z_{cc} ist dann gleich ihrer algebraischen Summe.

Die Impedanz des vorgeschalteten Netzes kann in diesem Fall vernachlässigt

werden, wobei der neue Wert des Kurzschlussstroms beträgt:

$$I'_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_T}$$

Der relative Fehler beträgt:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I'_{cc} - I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{Z_a}{Z_T} = \frac{U^2 / S_{cc}}{u_{cc} \cdot U^2 / S_n}$$

und somit:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{100}{u_{cc}} \times \frac{S_n}{S_{cc}}$$

Die Abbildung 14 zeigt den zusätzlichen Fehler bei der Berechnung von I_{cc} , wenn die vorgeschaltete Impedanz vernachlässigt wird. Diese Abbildung zeigt sehr gut, dass die vorgeschaltete Impedanz bei Netzen vernachlässigt werden kann, deren Kurzschlussleistung S_{cc} im Verhältnis zur Leistung S_n des Transformators hoch ist. So beträgt für $S_{cc}/S_n = 300$ der Fehler etwa 5%.

■ Leitungsimpedanz

Die Leitungsimpedanz Z_L hängt vom Widerstands- und Reaktanzbelag und von der Länge der Leitungen ab.

□ Der Widerstandsbelag R_L von Freileitungen, Kabeln und Sammelschienen berechnet sich mit der Formel:

$$R_L = \frac{\rho}{S}$$

wobei:

S = Leiterquerschnitt

ρ = Spezifischer Widerstand des Leiters, wobei jedoch der anzuwendende Wert je nach dem berechneten maximalen oder minimalen Kurzschlussstrom verschieden ist.

(6) \Rightarrow Die Tabelle der Abbildung 15 enthält diese Werte für jeden einzelnen Fall.

In Wirklichkeit wird in der Niederspannung und für Leiterquerschnitte unter 150 mm^2 nur der Widerstand berücksichtigt (für $S > 150 \text{ mm}^2$ ist $R_L < 0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$).

□ Der Reaktanzbelag X_L von Freileitungen, Kabeln und Sammelschienen berechnet sich mit der Formel:

$$X_L = L \cdot \omega = [15,7 + 144,44 \text{ Log} \left(\frac{d}{r} \right)]$$

Leistung des HS/NS-Speisetransformators \leq (in kVA)	630	800	1000	1250	1600	2000
Kurzschlussspannung u_{cc} (in %)	4	4,5	5	5,5	6	7

Abb. 13: Normierte Kurzschlussspannung u_{cc} für HS/NS-Speisetransformatoren der öffentlichen Stromversorgung.

ausgedrückt in mΩ/km für ein im Dreieck angeordnetes ein- oder dreipoliges Kabelsystem mit

r = Radius der Leiteradern

d = mittlerer Abstand zwischen den Leitern.

NB: Log = Logarithmus zur Basis 10.

Bei Freileitungen nimmt die Reaktanz mit dem Abstand der Leiter (proportional zu $\text{Log}\left(\frac{d}{r}\right)$) und somit mit der Betriebsspannung leicht zu.

⑦ ➔ Die folgenden Mittelwerte muss man sich merken:

$X = 0,3 \Omega/\text{km}$ (NS- oder MS-Leitungen)

$X = 0,4 \Omega/\text{km}$ (MS- oder HS-Leitungen)

Für Kabel fasst die Abbildung 16 verschiedene Reaktanzwerte für die Niederspannung in Funktion der Verlegungsart zusammen.

Die folgenden Mittelwerte muss man sich merken:

- $0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$ für ein Dreileiterkabel (⊙⊙⊙). Dieser Mittelwert ist für Hochspannung etwas höher und liegt dort zwischen $0,1$ und $0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$;

⑧ ➔ - $0,09 \text{ m}\Omega/\text{m}$ für (in einer Ebene ⊙⊙⊙ oder im Dreieck ⊙⊙⊙ aneinanderliegende) Einleiterkabel.

⑨ ➔ - und $0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$ als Standard für Sammelschienen (▮▮▮) und in einem Abstand voneinander angeordnete Einleiterkabel (⊙⊙⊙). Für SS mit mehrlagig angeordneten Phasen (Canalis-Typ von Telemecanique) ist diese Reaktanz wesentlich niedriger.

Anmerkungen:

□ Die Impedanz kurzer Verbindungen zwischen dem Verteilpunkt und dem HS/NS-Transformator kann vernachlässigt werden, wenn man einen zusätzli-

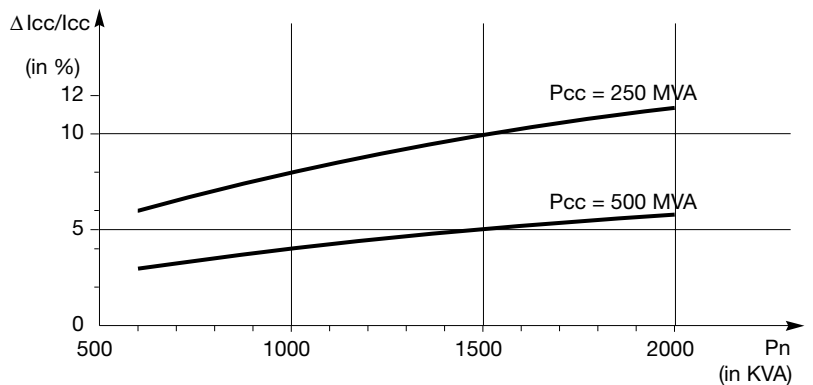


Abb. 14: In die Berechnung des Kurzschlussstroms eingebrachter Fehler, wenn die Impedanz Z_a des vorgeschalteten Netzes vernachlässigt wird.

Regel	Spez. Widerstand (*)	Wert des spez. Widerstandes ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)		Betroffene Leiter
		Kupfer	Aluminium	
Maximaler Kurzschlussstrom	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$	0,0225	0,036	P-N
Minimaler Kurzschlussstrom	$\rho_1 = 1,5 \rho_{20}$	0,027	0,043	PH-N
Fehlerstrom in den Erdungsschemas TN und IT	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$	0,0225	0,036	PH-N (**) PE-PEN
Spannungsabfall	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$	0,0225	0,036	PH-N (*)
Überstrom für die Überprüfung der thermischen Beanspruchungen der Leiter	$\rho_1 = 1,5 \rho_{20}$	0,027	0,043	Phase-Neutralleiter PEN-PE, wenn im gleichen Mehrleiterkabel enthalten
	$\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$	0,0225	0,036	Separater PE

(*) ρ_{20} spezifischer Widerstand der Leiter bei 20° C . $0,018 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ für Kupfer und $0,029 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ für Aluminium.

(**) Der Querschnitt des Neutralleiters N ist kleiner als der Querschnitt der Phasenleiter.

Abb. 15: Je nach dem berechneten maximalen oder minimalen Kurzschlussstrom zu berücksichtigende Werte für den spezifischen Widerstand r der Leiter (siehe UTE C 15-105).

Verlegungsart	Sammelschienen	Dreipoliges Kabel	In einem Abstand voneinander angeordnete Einleiterkabel	Im Dreieck aneinanderliegende Einleiterkabel	In einer Ebene aneinanderliegende Einleiterkabel	3 in einer Ebene im Abstand "d" voneinander angeordnete Kabel $d = 2r$	im Abstand "d" voneinander angeordnete Kabel $d = 4r$
Symbol							
Reaktanzbelag Mittelwerte (in $\text{m}\Omega/\text{m}$)	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
Reaktanzbelag Extremwerte (in $\text{m}\Omega/\text{m}$)	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Abb. 16: Werte für die Reaktanz der Kabel in Funktion der Verlegungsart.

chen Fehler in bezug auf den Kurzschlussstrom in Kauf nimmt. Dieser Fehler ist um so grösser, je höher die Transformatorleistung ist.

□ Die Kapazität der Kabel gegen Erde (äusserer Modus) ist 10- bis 20-mal so gross wie jene der Freileitungen und muss für Erdfehler berücksichtigt werden. Als Richtwert beträgt die Kapazität eines Drehstrom-Hochspannungskabels mit einem Leiterquerschnitt von 120 mm² ungefähr 1 µF/km. Der kapazitive Strom bleibt jedoch mit etwa 5 A/km bei 20 kV niedrig.

■ Der Widerstand oder die Reaktanz der Leitungen kann vernachlässigt werden. Wenn eine der Grössen R_L oder X_L gegenüber der anderen klein ist, kann sie vernachlässigt werden, da in diesem Fall der Fehler in bezug auf die Impedanz Z_L klein ist. Beispielsweise bei einem Verhältnis von 3 zwischen R_L und X_L beträgt der Fehler in bezug auf Z_L 5,1%.

Aufgrund der Kurven von R_L und X_L wie jenen der Abbildung 17 können die Kabelquerschnitte bestimmt werden, für welche die Impedanz dem Widerstand oder der Reaktanz gleichgesetzt werden kann.

Beispiele:

□ 1. Fall: Drehstromkabel bei 20 °C, dessen Leiter aus **Kupfer** bestehen. Deren Reaktanz beträgt 0,08 mΩ/m. Die Kurven von R_L und X_L (siehe Abb. 17) zeigen, dass die Impedanz Z_L zwei Asymptoten hat, die Gerade R_L bei den kleinen Querschnitten und die Gerade $X_L = 0,08$ mΩ/m bei den grossen Querschnitten. Für diese Querschnitte ist es somit möglich, anzunehmen, dass die Kurve der Impedanz Z_L in die Asymptoten übergeht.

Die Impedanz des betrachteten Kabels ist somit mit einem Fehler von weniger als 5,1%

- für Querschnitte unter 74 mm² ein ohmscher Widerstand,
- für Querschnitte über 660 mm² eine Reaktanz.

□ 2. Fall: Drehstromkabel bei 20 °C, dessen Leiter aus **Aluminium** bestehen.

Wie im obigen Fall geht die Kurve der Impedanz Z_L in ihre Asymptoten über, jedoch für Querschnitte unter 120 mm² bzw. über 1000 mm² (die Kurven sind hier nicht dargestellt).

Impedanz elektrischer Maschinen

■ Synchrongeneratoren.
Die Impedanzen elektrischer Maschi-

nen werden in der Regel in Prozenten ausgedrückt:

$I_{cc} / I_n = 100/e$ (wobei e das Pendant zum u_{cc} der Transformatoren ist).

Somit:

$$\textcircled{10} \Rightarrow Z = \frac{e}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad \text{wobei}$$

U = Verkettete Leerlaufspannung des Generators

S_n = Scheinleistung (VA) des Generators

$\textcircled{11} \Rightarrow$ Zudem geht, da R/X klein ist

und in der Hochspannung 0,05 bis 0,1 und in der Niederspannung 0,1 bis 0,2 beträgt, die Impedanz Z in die Reaktanz X über. Werte für e sind in der Tabelle der Abbildung 18 für Turbogeneratoren und (mit niedrigeren Drehzahlen laufende) "Wasserkraftwerks"-Schenkelpolgeneratoren angegeben.

Beim näheren Betrachten dieser Tabelle kann es erstaunen, dass die stationären Kurzschlussreaktanzen 100% übersteigen können (in diesem Moment ist $I_{cc} < I_n$). Der Kurzschlussstrom ist jedoch im wesentlichen induktiv und braucht die gesamte Blindenergie, welche die selbst übererregte Erregerwicklung liefern kann, während der Nennstrom die von der Turbine gelieferte Wirkleistung überträgt ($\cos \varphi$ von 0,8 bis 1).

■ Synchronmotoren und -phasenschieber.

Das Kurzschlussverhalten dieser Maschinen ist demjenigen der Generatoren ähnlich.

$\textcircled{12} \Rightarrow$ Sie geben einen Strom in das Netz ab, der von ihrer Reaktanz in % anhängt (siehe Abbildung 19).

■ Asynchronmotoren.

Ein plötzlich vom Netz abgetrennter Asynchronmotor hält an seinen Klemmen eine Spannung aufrecht, die in wenigen Hundertstelsekunden abklingt. Wenn an diesen Klemmen ein Kurzschluss auftritt, liefert demnach der Motor einen Strom, der noch schneller abklingt, mit einer Zeitkonstante von ungefähr:

□ 2/100 s für Motoren mit Einfachkäfigläufer bis 100 kW,

□ 3/100 s für Motoren mit Doppelkäfigläufer und Motoren über 100 kW,

□ 3 bis 10/100 s für sehr grosse Hochspannungsmotoren (1000 kW) mit Schleifringläufer.

Der Asynchronmotor ist somit im Kurzschlussfall ein Generator, dem man

eine (nur subtransiente) Impedanz von 20 bis 25% zumisst.

Auch ist die grosse Anzahl der Niederspannungsmotoren niedriger Einheitsleistung in den Industrieanlagen eine Überlegung wert, da es schwierig ist, die durchschnittliche Zahl der in Betrieb stehenden Motoren vorauszusehen, die den Fehler im Moment eines Kurzschlusses speisen. Somit ist es aufwendig und nutzlos, den Rückstrom jedes Motors unter Berücksichtigung seiner Rückwirkungsimpedanz zu berechnen. Deshalb ist es (insbesondere in den USA) üblich, den Beitrag aller Niederspannungs-Asynchronmotoren einer Anlage zum Fehlerstrom global zu betrachten.

$\textcircled{13} \Rightarrow$ Sie werden somit mit einer einzigen Quelle verglichen, die einen Strom an die Sammelschienen liefert, der gleich dem 3fachen der Summe der Nennströme aller installierten Motoren ist.

Andere Impedanzen

■ Kondensatoren

Eine parallel geschaltete Kondensatorbatterie in der Nähe der Fehlerstelle entlädt sich und erhöht dadurch den Kurzschlussstrom. Diese gedämpft schwingende Entladung ist durch eine erste hohe Spitze gekennzeichnet, die sich der ersten Spitze des Kurzschlussstroms überlagert, und dies obwohl ihre Frequenz wesentlich höher ist als die Netzfrequenz.

Je nach dem Zusammentreffen des Auslösemomentes des Fehlers mit der Spannungswelle sind zwei Extremfälle möglich:

□ Wenn dieser Moment mit einem Nulldurchgang der Spannung zusammenfällt, ist der Entladestrom der Kapazität gleich null, während gerade der Kurzschlussstrom unsymmetrisch mit einer ersten maximalen Amplitudenspitze ist.

□ Wenn hingegen dieser Moment mit einem Spannungsmaximum zusammenfällt, gibt die Batterie einen Strom ab, der sich der ersten niedrigen Spitze des Fehlerstroms überlagert, da dieser symmetrisch ist.

Deshalb ist es wenig wahrscheinlich, dass diese Überlagerung - ausser für Kondensatorbatterien sehr hoher Leistung - eine erste Spitze bewirkt, die höher ist als die Spitze eines unsymmetrischen Fehlers. Somit ist es für die Berechnung des maximalen Kurzschlussstroms nicht notwendig, Kondensatorbatterien zu berücksichtigen.

Über Kondensatorbatterien muss man sich hingegen bei der Wahl der Technologie der Leistungsschalter Gedanken machen, denn beim Öffnen reduzieren sie in hohem Masse die Eigenfrequenz des Stromkreises und haben somit einen Einfluss auf die Unterbrechung.

■ Schalt- und Steuergeräte

⑭ ➔ Bestimmte Geräte (Leistungsschalter, Schütze mit Lichtbogenlöschspulen, Hauptstrom-Thermorelais usw.) weisen eine Impedanz auf, die berücksichtigt werden kann. Diese Impedanz ist bei der Berechnung des I_{cc} nur für die Geräte zu berücksichtigen, die sich auf der Speisungsseite des Gerätes befinden, das den betreffenden Kurzschluss unterbrechen soll, und der Geräte, die geschlossen bleiben (selektive Leistungsschalter).

⑮ ➔ Für NS-Leistungsschalter ist zum Beispiel für die Reaktanz ein Wert von $0,15 \text{ m}\Omega$ richtig, wobei der Widerstand vernachlässigt wird.

Für Schaltgeräte muss eine Unterscheidung in bezug auf die Schnelligkeit gemacht werden, mit der sie einen Stromkreis unterbrechen:

- gewisse Geräte öffnen sehr schnell und reduzieren so die Kurzschlussströme sehr stark. Dazu gehören die sogenannten strombegrenzenden Schnellschalter, die wesentlich niedrigere elektrodynamische und thermische Beanspruchungen des betreffenden Anlagenteils als die theoretischen Maximalwerte bewirken.
- Andere, wie zum Beispiel Leistungsschalter mit verzögerter Auslösung, bieten diesen Vorteil nicht.

■ Kurzschlusslichtbogen

Der Kurzschlussstrom fließt oft durch einen Lichtbogen an der Fehlerstelle, dessen Widerstand beachtlich und sehr variabel ist. Der Spannungsabfall eines Kurzschlusslichtbogens variiert zwischen 100 und 300 Volt.

In der Hochspannung ist dieser Wert im Vergleich zur Netzspannung vernachlässigbar und hat der Lichtbogen keinen reduzierenden Einfluss auf den Kurzschlussstrom.

In der Niederspannung hingegen ist der effektive Kurzschlussstrom mit Lichtbogen um so begrenzter im Verhältnis zum berechneten Strom (satter Kurzschluss durch metallische Berührung), je niedriger die Spannung ist.

⑯ ➔ Der zum Beispiel bei einem Kurzschluss zwischen Leitern oder Sammelschienen auftretende Lichtbogen kann den prospektiven Kurzschlussstrom um 20 bis 50% reduzieren, und bei Nennspannungen unter 440 V um über 50%.

Diese in der Niederspannung für 90% der Kurzschlussfälle sehr günstige Erscheinung kann jedoch für die Bestimmung des ASV nicht berücksichtigt werden, da sich 10% der Kurzschlüsse beim Schliessen eines Schaltgerätes auf einen satten Kurzschluss ereignen, wo kein Lichtbogen auftritt. Sie muss hingegen bei der Berechnung des minimalen Kurzschlussstroms berücksichtigt werden.

■ Diverse Impedanzen

Andere Teile können nicht vernachlässigbare Impedanzen hinzufügen. Dies gilt für gegenharmonische Filter und Drosselspulen zur Kurzschlussstrombegrenzung, die natürlich in der Berechnung berücksichtigt werden müssen, jedoch auch für Stromwandler mit gewickelter Primärspule, deren Impedanz sich mit der Baugröße und Bauart ändert.

Beziehungen zwischen den Impedanzen der einzelnen Spannungsebenen einer Anlage

Impedanzen in Abhängigkeit von der

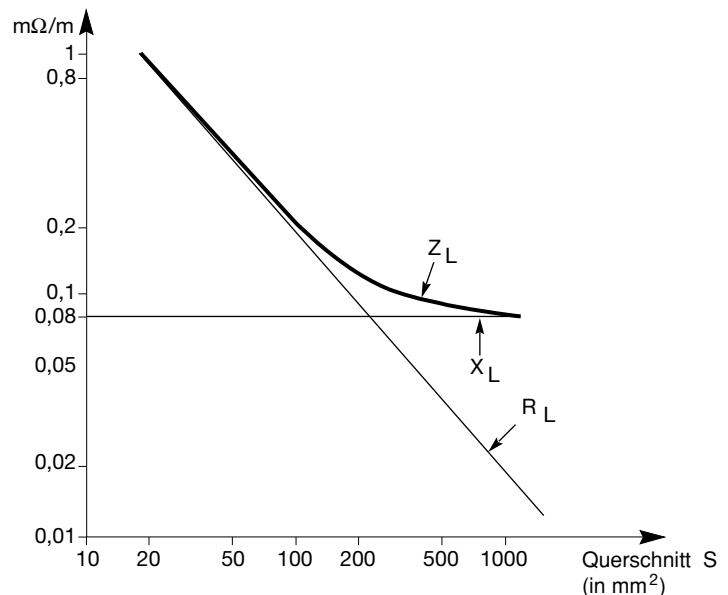


Abb. 17: Impedanz Z_L eines Drehstromkabels bei 20°C mit Kupferleitern.

	Subtransiente Reaktanz	Transiente Reaktanz	Stationäre Reaktanz
Turbogenerator	10–20	15–25	150–230
Schenkelpolgenerator	15–25	25–35	70–120

Abb. 18: Werte der Reaktanzen von Generatoren in e %.

	Subtransiente Reaktanz	Transiente Reaktanz	Stationäre Reaktanz
Schnelllaufende Motoren	15	25	80
Langsamlaufende Motoren	35	50	100
Phasenschieber (Kondensatoren)	25	40	160

Abb. 19: Reaktanzen in e % von Synchronmotoren und -phasenschiebern.

Spannung

Die Kurzschlussleistung S_{cc} an einer bestimmten Stelle des Netzes ist gegeben durch:

$$S_{cc} = U \cdot I\sqrt{3} = \frac{U^2}{Z_{cc}}$$

Dieser Ausdruck der Kurzschlussleistung bedeutet definitionsgemäss, dass S_{cc} an einer bestimmten Stelle des Netzes unabhängig von der Spannung unveränderlich ist. Ferner bedeutet der Ausdruck

$$I_{cc3} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{cc}}$$

, dass alle Impedanzen berechnet werden müssen, indem sie mit der Spannung der Fehlerstelle in Beziehung gebracht werden, was eine gewisse Komplikation ist, die in Berechnungen für Netze mit zwei oder mehreren Spannungsebenen zu Fehlern führen kann. Somit muss die Impedanz einer Hochspannungsleitung für die Berechnung eines Kurzschlusses auf der NS-Seite des Transformators mit dem umgekehrten Quadrat des Übersetzungsverhältnisses multipliziert werden:

$$(17) \Rightarrow Z_{BT} = Z_{HT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2$$

Eine einfache Methode bietet die Möglichkeit, diese Schwierigkeiten zu umgehen: die von H. Rich vorgeschlagene sogenannte Methode der relativen Impedanzen.

Berechnung der relativen Impedanzen

Dabei handelt es sich um eine Berechnungsmethode, mit der eine Beziehung zwischen den Impedanzen der einzelnen Spannungsebenen einer elektrischen Anlage hergestellt werden kann.

Diese Methode beruht auf der folgenden Übereinkunft: Die Impedanzen (in Ohm) werden durch das Quadrat der verketteten Spannung (in Volt) dividiert, die das Netz an der Stelle hat, wo diese in Betrieb stehen. Dadurch werden sie zu relativen Impedanzen.

■ Für Freileitungen und Kabel betragen die relativen Impedanzen

$$R_R = \frac{R}{U^2} \quad \text{und} \quad X_R = \frac{X}{U^2}$$

mit R in Ohm und U in Volt.

■ Für Transformatoren wird die Impedanz aufgrund ihrer Kurzschlussspannungen u_{cc} und ihrer Nennleistungen S_n ausgedrückt:

$$Z = \frac{U^2}{S_n} \cdot \frac{u}{100}$$

■ Für elektrische Maschinen ist die Formel identisch, wobei e die in % ausgedrückte Impedanz bedeutet.

■ Für das Ganze wird die Kurzschlussleistung, nachdem alle relativen Impedanzen zusammengestellt worden sind, mit der folgenden Formel bestimmt:

$$S_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R}$$

woraus der Kurzschlussstrom I_{cc} an der Stelle mit der Spannung U wie folgt abgeleitet werden kann:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \sum Z_R}$$

Berechnungsbeispiel

(mit den Impedanzen der Quellen, des vorgeschalteten Netzes, des Speisetransformators und der Leitungen)

Aufgabenstellung

Gegeben ist ein 20-kV-Netz, das über eine 2 km lange Freileitung eine HS/NS-Transformatorstation speist, sowie ein 1-MVA-Generator, der parallel dazu die Sammelschienen dieser Transformatorstation speist. Zwei parallel 1000-kVA-Transformatoren beliefern die NS-Sammelschienen, an die 20 Abgänge

wie jener für den Motor M angeschlossen sind (siehe Abb. 20). Diese 20 Motoren von je 50 kW sind alle mit gleichen Kabeln verbunden und stehen im Kurzschlussmoment alle in Betrieb.

Es muss der Kurzschlussstrom I_{cc} an den angegebenen Stellen im Schema des Netzes berechnet werden, d.h.:

- Bei A an den HS-SS mit vernachlässigbarer Impedanz
- Bei B an den NS-SS in 10 m Abstand von den Transformatoren
- Bei C an den SS eines Unterverteilers
- Bei D an den Klemmen eines Motors M

Dann wird der Rückstrom der Motoren in C und B und hierauf in D und A berechnet.

In diesem Beispiel werden die Reaktanzen X und Widerstände R unter ihrer Anlagenspannung berechnet. Die Methode der relativen Impedanzen wird nicht angewendet.

I - Kurzschluss bei A (HS-SS)

(Betroffene Teile: 1, 2, 3)

Vorgeschaltetes Netz

$U_1 = 20$ kV
 $P_{cc} = 500$ MVA

Freileitung

3 Kupferseile 50 mm²
Länge = 2 km

Generator

1 MVA
 Z subtr. = 15%

2 Transformatoren

1000 kVA
Sekundärspannung 237/410 V
 $e = 5\%$

NS-HV

Sammelschienen
3 Schienen 400 mm²/Phase, Kupfer
Länge = 10 m

Verbindung 1

3 Einleiterkabel 400 mm², Aluminium
Länge = 80 m

NS-Unterverteiler

Verbindung 2

3 Drehstromkabel 35 mm², Kupfer
Länge = 30 m

Motor

50 kW
 $e = 25\%$

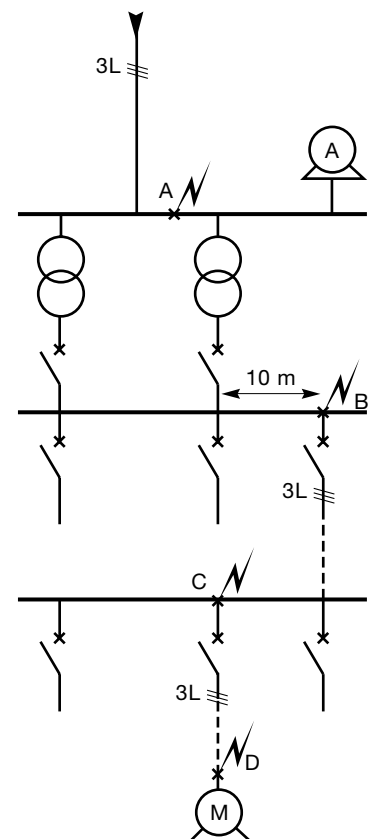


Abb. 20: Aufgabe: Berechnung von I_{cc} an den Punkten A, B, C und D.

Lösung

Abschnitt	Berechnungen	Resultate
(Die Nummern ⊗ verweisen auf die Erklärungen im vorhergehenden Text)		
20 kV ↘		X (Ω) R (Ω)
1. Vorgeschaltetes Netz	$Z_a = (20 \times 10^3)^2 / 500 \times 10^6$ (1)	
	$X_a = 0,98 Z_a$ (2)	0,78
	$R_a = 0,2 X_a$	0,15
2. Freileitung (50 mm ²)	$X_{c_a} = 0,4 \times 2$ (7)	0,8
	$R_{c_a} = 0,018 \times \frac{2000}{50}$ (6)	0,72
3. Generator	$X_A = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \times 10^3)^2}{10^6}$ (10)	60
	$R_A = 0,1 X_A$ (11)	6
20 kV ↘		X (mΩ) R (mΩ)
Kurzschluss bei A		
4. Transformatoren	$Z_T = \frac{1}{2} \times \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6}$ (3) (5)	
	$X_T \approx Z_T$	4,2
	$R_T = 0,2 X_T$ (4)	0,84
410 V ↘		
5. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$ (15)	0,15
6. Sammelschienen (3 x 400 mm ²)	$X_B = 0,15 \times 10^{-3} \times 10$ (9)	1,5
	$R_B = 0,0225 \times \frac{10}{3 \times 400}$ (6)	≈ 0
Kurzschluss bei B		
7. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$	0,15
8. Verbindung 1 durch Kabel (3 x 400 mm ²)	$X_{c_1} = 0,15 \times 10^{-3} \times 80$	12
	$R_{c_1} = 0,036 \times \frac{80}{3 \times 400}$ (6)	2,4
Kurzschluss bei C		
9. Leistungsschalter	$X_d = 0,15$	0,15
10. Verbindung 2 durch Kabel (35 mm ²)	$X_{c_1} = 0,09 \times 10^{-3} \times 30$ (8)	2,7
	$R_{c_2} = 0,0225 \times \frac{30}{35}$	19,2
Kurzschluss bei D		
11. Motor 50 kW	$X_m = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{50 \times 10^3}$ (12)	840
	$R_m = 0,2 X_m$	168

Die Impedanz "Netz + Leitung" liegt parallel zu jener des Generators. Letztere ist jedoch wesentlich grösser und kann vernachlässigt werden:

$$X_A = 0,78 + 0,8 \approx 1,58 \Omega$$

$$R_A = 0,15 + 0,72 \approx 0,87 \Omega$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \approx 1,80 \Omega \text{ woraus}$$

$$I_A = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 1,80} \approx 6415 \text{ A}$$

I_A ist der "stationäre I_{cc} ", und zum Berechnen des I_{cc} (unsymmetrisches Maximum):

$$\frac{R_A}{X_A} = 0,55 \text{ was aus der Kurve der Abbildung 9 k} = 1,2 \text{ ergibt, so dass } I_{cc}:$$

$$1,2 \times \sqrt{2} \times 6415 = \mathbf{10\ 887 \text{ A.}}$$

II - Kurzschluss bei B (NS-HV-SS)

[Betroffene Teile:

(1, 2, 3) + (4, 5, 6)]

Die auf der Hochspannungsseite berechneten Reaktanzen X und die Widerstände R müssen durch Multiplikation mit dem Quadrat des Spannungsverhältnisses (17) in das NS-Netz "übergeführt" werden, d.h.:

$$(410 / 20\ 000)^2 = 0,42 \text{ woraus}$$

$$X_B = [(X_A \cdot 0,42) + 4,2 + 0,15 + 1,5] \cdot 10^{-3}$$

$$X_B = 6,51 \text{ m}\Omega \text{ und}$$

$$R_B = [(R_A \cdot 0,42) + 0,84] \cdot 10^{-3}$$

$$R_B = 1,2 \text{ m}\Omega$$

Diese Berechnung zeigt einerseits die reduzierte Bedeutung der vorgeschalteten HS-Reaktanz im Verhältnis zu jener der beiden parallelgeschalteten Transformatoren, und andererseits, dass die Impedanz der 10 Meter NS-SS nicht vernachlässigbar ist.

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \approx 6,62 \text{ m}\Omega$$

$$I_B = \frac{410}{\sqrt{3} \times 6,62 \times 10^{-3}} \approx 35\ 758 \text{ A}$$

$\frac{R_B}{X_B} = 0,18$ was aus der Kurve der Abbildung 9 k = 1,58 ergibt, so dass I_{cc} :

$$1,58 \times \sqrt{2} \times 35\ 758 \approx \mathbf{79\ 900 \text{ A.}}$$

Wenn zudem der Kurzschlusslichtbogen berücksichtigt wird (siehe ■ Kurzschlusslichtbogen (16)), wird I_B höchstens

28 606 A und mindestens 17 880 A.

III - Kurzschluss bei C (SS des NS-Unterverteilers)

[Betroffene Teile:

(1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8)]

Die Reaktanzen und Widerstände des Leistungsschalters und der Kabel müssen zu X_B und R^B hinzugefügt werden.

$$X_C = (X_B + 0,15 + 12) 10^{-3} = 18,67 \text{ m}\Omega$$

und

$$R_C = (R_B + 2,4) 10^{-3} = 3,6 \text{ m}\Omega$$

Anhand dieser Werte kann man die Bedeutung der Begrenzung der I_{cc} infolge der Kabel verstehen.

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \approx 19 \text{ m}\Omega$$

$$I_C = \frac{410}{\sqrt{3} \times 19 \times 10^{-3}} \approx 12\,459 \text{ A}$$

$$\frac{R_C}{X_C} = 0,19, \text{ was aus der Kurve der}$$

Abbildung 9 $k = 1,55$ ergibt, so dass I_{cc} :

$$1,55 \times \sqrt{2} \times 12\,459 \approx \mathbf{27\,310 \text{ A.}}$$

IV - Kurzschluss bei D (NS-Motor)

[Betroffene Teile:

(1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8) + (9, 10)]

Die Reaktanzen und Widerstände des Leistungsschalters und der Kabel müssen zu X_C und R_C hinzugefügt werden.

$$X_D = (X_C + 0,15 + 2,7) 10^{-3} = 21,52 \text{ m}\Omega$$

und

$$R_D = (R_C + 19,2) 10^{-3} = 22,9 \text{ m}\Omega$$

$$Z_D = \sqrt{R_D^2 + X_D^2} \approx 31,42 \text{ m}\Omega$$

$$I_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 31,42 \times 10^{-3}} \approx 7\,534 \text{ A}$$

$$\frac{R_D}{X_D} = 1,06, \text{ was aus der Kurve der}$$

Abbildung 9 $k \approx 1,05$ ergibt, so dass I_{cc} :

$$1,05 \times \sqrt{2} \times 7\,534 \approx \mathbf{11\,187 \text{ A.}}$$

Auf jeder Berechnungsebene ist ersichtlich, dass der Einfluss der Leistungsschalter in Verhältnis zu den übrigen Teilen des Netzes vernachlässigbar ist.

Rückströme der Motoren

Oft ist es schneller, die Motoren als unabhängige Generatoren zu betrachten, die einen "Rückstrom" in den Fehler einspeisen, der sich dem Fehlerstrom des Netzes überlagert.

■ Kurzschluss bei C

Der von einem Motor abgegebene Strom wird aufgrund der Impedanz "Motor + Kabel" berechnet:

$$X_M = (840 + 2,7) 10^{-3} \approx 843 \text{ m}\Omega$$

$$R_M = (168 + 19,2) 10^{-3} \approx 188 \text{ m}\Omega$$

$Z_M = 863 \text{ m}\Omega$ woraus

$$I_M = \frac{410}{\sqrt{3} \times 863 \times 10^{-3}} \approx 274 \text{ A}$$

Für die 20 Motoren

$$I_{MC} = 5\,480 \text{ A.}$$

Statt diese Rechnung durchzuführen,

wäre es möglich (siehe (13)), den von allen Motoren abgegebenen Strom auf das 3fache ihres Nennstroms (95 A) zu veranschlagen, somit:

$(3 \times 95) \times 20 = 5\,700 \text{ A}$. Wie man sieht, liegt dieser Wert sehr nahe am für I_{MC} berechneten Wert von 5 480 A.

$$I_{MC} : 5\,480 \text{ A.}$$

Aus dem Verhältnis $R/X = 0,22$

$$\Rightarrow k = 1,5 \text{ und}$$

$$I_{cc} = 1,5 \times \sqrt{2} \times 5\,480 \approx \mathbf{11\,630 \text{ A.}}$$

Somit erhöht sich der (subtransiente) Kurzschlussstrom an der NS-SS von 12 459 A auf 17 939 A und der I_{cc} von 27 310 A auf 38 940 A.

■ Kurzschluss bei D

Die in Betracht zu ziehende Impedanz ist $1/19$ von Z_M , erhöht um die Impedanz des Kabels.

$$X_{MD} = \left(\frac{843}{19} + 2,7\right) 10^{-3} \approx 47 \text{ m}\Omega$$

$$R_{MD} = \left(\frac{187}{19} + 19,2\right) 10^{-3} \approx 29 \text{ m}\Omega$$

$Z_{MD} = 55 \text{ m}\Omega$ woraus

$$I_{MD} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 55 \times 10^{-3}} \approx 4\,300 \text{ A}$$

d.h. bei D ein Total von:

$$7\,534 + 4\,300 = 11\,834 \text{ Aeff und ein } I_{cc} \approx \mathbf{17\,876 \text{ A.}}$$

■ Kurzschluss bei B

Wie beim "Kurzschluss bei C" wird der abgegebene Strom aufgrund der Impedanz "Motor + Kabel" berechnet:

$$X_M = (840 + 2,7 + 12) 10^{-3} \approx 855 \text{ m}\Omega$$

$$R_M = (168 + 19,2 + 2,4) 10^{-3} \approx 189,6 \text{ m}\Omega$$

$Z_M = 876 \text{ m}\Omega$ woraus

$$I_M = \frac{410}{\sqrt{3} \times 876 \times 10^{-3}} \approx 270 \text{ A}$$

Woraus für die 20 Motoren $I_{MB} = 5\,400 \text{ A}$.

Auch hier ist es möglich, die obengenannte Näherung (3facher Nennstrom von 95 A eines Motors) anzuwenden,

d.h. 5 700 A (siehe oben). Dieser Wert liegt nahe am für I_{MB} berechneten Wert.

Aus dem Verhältnis $R/X = 0,22$

$$\Rightarrow k = 1,5 \text{ und}$$

$$I_{cc} = 1,5 \times \sqrt{2} \times 5\,400 \approx 11\,455 \text{ A.}$$

Somit erhöht sich der (subtransiente) Kurzschlussstrom am NS-HV von 35 758 A auf 41 158 A und der I_{cc} von 79 900 A auf **91 355 A**.

Aber auch hier reduziert sich I_{cc} , wenn der Kurzschlusslichtbogen berücksichtigt wird, auf einen Wert zwischen 45,6 und 73 kA.

■ Kurzschluss bei A (HS-Seite)

Statt die Ersatzimpedanzen zu berechnen, ist es einfacher, den Rückstrom der Motoren in A abzuschätzen, indem man den unter B erhaltene Wert mit dem NS/HS-Übersetzungsverhältnis

(17) multipliziert, d.h.:

$$5\,400 \times \frac{410}{20 \times 10^{-3}} \approx 110 \text{ A}$$

Dieser Wert kann vernachlässigt werden, wenn man ihn mit dem vorher berechneten Wert von 6 415 A vergleicht.

Angenäherte Berechnung des Kurzschlusses bei D

Diese Berechnung benützt alle in den vorangehenden Texten genannten Näherungen, wie z.B. die mit (15) und (16) bezeichneten.

$$\Sigma X = 4,2 + 1,5 + 12 + 0,15$$

$$\Sigma X = 17,85 \text{ m}\Omega = X'_D$$

$$\Sigma R = 2,4 + 19,2 = 21,6 \text{ m}\Omega = R'_D$$

$$Z'_D = \sqrt{R'^2_D + X'^2_D} \approx 28,02 \text{ m}\Omega$$

$$I'_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 28,02 \times 10^{-3}} \approx 8\,448 \text{ A}$$

woraus I_{cc} :

$$\sqrt{2} \times 8\,448 \approx \mathbf{11\,945 \text{ A.}}$$

Zu diesem Wert muss, um das I_{cc} (unsymmetrisches Maximum) zu erhalten, der Beitrag der im Kurzschlussmoment unter Spannung stehenden Motoren hinzugefügt werden, d.h. das 3fache

ihres Nennstroms (von 95 A) (13) :

$$(3 \times 95) \times 20 = 5\,700 \text{ A, woraus}$$

$$I_{cc} = 11\,945 + [(3 \times 95 \times \sqrt{2}) \times 20] = 20\,005 \text{ A.}$$

Die beiden Resultate liegen nahe an den mit den vollständigen Berechnung erhaltenen Resultate (11 945 anstelle von 11 843 und 20 005 anstelle von 17 876), wobei vor allem die Abweichungen auf der sicheren Seite liegen.

3. Berechnung der Icc in Strahlennetzen mit Hilfe symmetrischer Komponenten

Vorteil dieser Methode

Die Berechnung mit Hilfe symmetrischer Komponenten ist besonders vorteilhaft, wenn ein Drehstromnetz unsymmetrisch ist, weil die sogenannten "zyklischen" klassischen Impedanzen R und X normalerweise nicht mehr verwendbar sind, zum Beispiel infolge von magnetischen Erscheinungen. Ferner ist diese Berechnung in den folgenden Fällen erforderlich:

- Wenn ein Spannungs- und Stromsystem nicht symmetrisch ist (Fresnel'sche Vektoren mit verschiedenen Modulen und von 120° abweichenden Phasenverschiebungen). Dies ist der Fall bei einem einpoligen oder zweipoligen Kurz- oder Erdschluss.

- Das Netz enthält elektrische Maschinen und/oder Spezialtransformatoren (zum Beispiel der Schaltgruppe Yyn).

Diese Methode ist auf alle Arten von Stromversorgungs-Strahlennetzen unabhängig von der Spannung anwendbar.

Allgemeines über symmetrische Komponenten

So wie das Leblanc-Theorem besagt, dass ein Wechselfeld mit sinusförmiger Amplitude zwei entgegengesetzt umlaufenden Drehfeldern entspricht, beruht die Definition der symmetrischen Komponenten auf der Äquivalenz zwischen einem unsymmetrischen Dreiphasensystem und der Summe von drei symmetrischen Dreiphasensystemen: dem mitlaufenden System, dem gegenlaufenden System und dem Nullsystem (siehe Abb. 21).

Das Überlagerungsprinzip ist nun auf die Berechnung von Kurzschlussströmen anwendbar.

Für die nachfolgende Erklärung wird das System dadurch definiert, dass

man den Strom \vec{I}_1 als Drehreferenz nimmt, und

- \vec{I}_{1d} als seine mitlaufende Komponente,

- \vec{I}_{1i} als seine gegenlaufende Komponente,

- \vec{I}_{1o} als seine Nullkomponente, und indem man den Operator

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ zwischen } \vec{I}_1, \vec{I}_2 \text{ und } \vec{I}_3$$

verwendet.

Die Anwendung dieses Prinzips auf ein System von Strömen lässt sich durch grafische Konstruktion überprüfen (siehe Abb. 21). So ergibt zum Beispiel die

grafische Addition der Vektoren für \vec{I}_2 :

$$\vec{I}_2 = a^2 \cdot \vec{I}_{1d} + a \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{1o}$$

Die Ströme $\vec{I}_1 + \vec{I}_3$ werden auf dieselbe Weise ausgedrückt, woraus sich das folgende System ergibt:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{1d} + \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{1o}$$

$$\vec{I}_2 = a^2 \cdot \vec{I}_{1d} + a \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{1o}$$

$$\vec{I}_3 = a \cdot \vec{I}_{1d} + a^2 \cdot \vec{I}_{1i} + \vec{I}_{1o}$$

Diese symmetrischen Stromkomponenten sind über die entsprechenden Impedanzkomponenten mit den symmetrischen Spannungskomponenten verbunden:

$$Z_d = \frac{V_d}{I_d}, \quad Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad \text{und} \quad Z_o = \frac{V_o}{I_o}$$

Diese Impedanzen können aufgrund der (von den Herstellern angegebenen) Eigenschaften der einzelnen Betriebsmittel des untersuchten Stromnetzes definiert werden. Zu diesen Eigenschaften ist zu bemerken, dass $Z_i \approx Z_d$ (außer für elektrische Maschinen), während Z_o je nach Betriebsmittel variiert (siehe Abb. 22).

Betriebsmittel	Z_o
Transformator (von der Sekundärseite gesehen)	
Ohne Sternpunkt	∞
Yyn oder Zyn	Freier Fluss ∞ Erzwungener Fluss 10–15 X_d
Dyn oder YNyn	X_d
Primärseite D oder Y + zn	0,1–0,2 X_d
Maschine	
Synchron	$\approx 0,5 Z_d$
Asynchron	≈ 0
Leitung	$\approx 3 Z_d$

Abb. 22: Nulleigenschaft der einzelnen Betriebsmittel eines Stromnetzes.

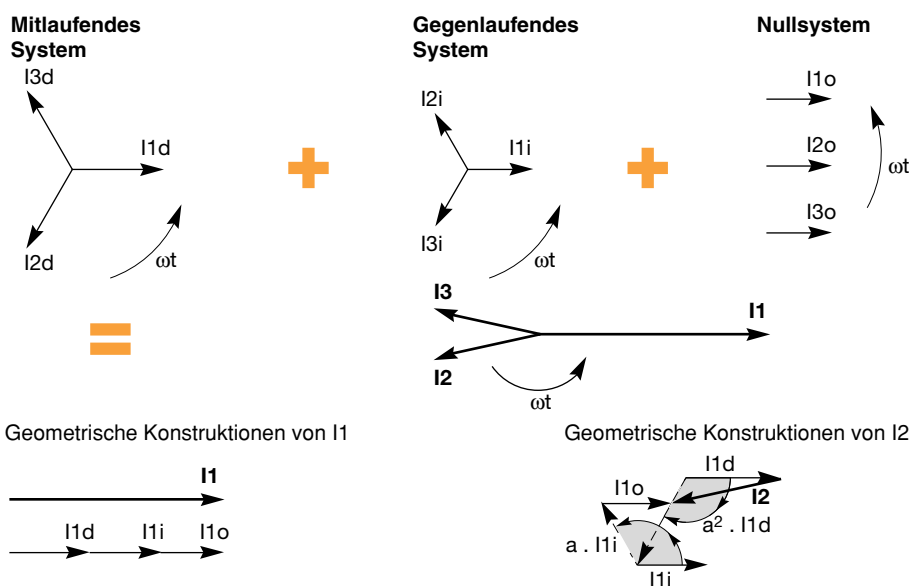


Abb. 21: Grafische Konstruktion der Summe der drei symmetrischen Dreiphasensysteme mitlaufendes System, gegenlaufendes System und Nullsystem.

Zur Vertiefung dieses Themas enthält das Technische Heft Nr. 18 eine detailliertere Darstellung dieser Berechnungsmethode der Ströme bei satten Kurzschlüssen und solchen über einen Fehlerwiderstand (siehe Literaturverzeichnis).

Berechnung nach IEC 909

Die Norm IEC 909 enthält ein Verfahren, das von nicht spezialisierten Ingenieuren angewendet werden kann und die symmetrischen Komponenten verwendet.

Dieses Verfahren ist für Stromnetze mit einer Spannung unterhalb von 230 kV anwendbar.

Es beschreibt die Berechnung der maximalen und minimalen Kurzschlussströme. Die ersteren dienen dazu, die Bemessungsdaten der Betriebsmittel zu bestimmen. Die letzteren werden für die Kalibrierung der Überstromschutzeinrichtungen benötigt.

Diese Norm wird für ihre Anwendung auf NS-Netze durch den Leitfadens IEC 781 ergänzt.

Verfahren

1- Berechnung der Ersatzspannung an der Fehlerstelle gleich $c \cdot U_n / \sqrt{3}$. Dabei ist c ein Spannungsfaktor, der in

die Berechnungen eingeführt werden muss, um:

- die örtlichen und zeitlichen Spannungsschwankungen,
- eventuelle Änderungen der Stufenschalter der Transformatoren,
- das subtransiente Verhalten der Generatoren und Motoren zu berücksichtigen.

In der Abbildung 23 sind die normativen Werte dieses Spannungsfaktors in Funktion der durchzuführenden Berechnungen und der betrachteten Spannungsebenen angegeben.

2- Bestimmung und Addition der direkten, inversen und Null-Ersatzimpedanzen auf der Speisungsseite der Fehlerstelle.

3- Berechnung des Anfangskurzschlussstroms mit Hilfe symmetrischer Komponenten. Die in der Praxis je nach Art des Kurzschlusses für die Berechnung der I_{cc} anzuwendenden Formeln sind in der Tabelle der Abbildung 24 enthalten.

4- Aufgrund des Wertes von I_{cc} ($I_{k''}$), Berechnung der übrigen Grössen, wie zum Beispiel des Spitzenwertes von I_{cc} , des stationären Wertes von I_{cc} oder auch des maximalen stationären Wertes von I_{cc} .

Einfluss der Distanz zwischen der Fehlerstelle und dem Generator

Bei dieser Berechnungsmethode müssen immer zwei Fälle unterschieden werden:

- Fall der generatorfernen Kurzschlüsse, der den Netzen entspricht, in denen die Kurzschlussströme keine abklingende Wechselstromkomponente haben. Dies ist im allgemeinen in der NS der Fall, ausser wenn Verbraucher mit hoher Stromaufnahme über spezielle Transformatorstationen gespeist werden.
- Fall der generatornahen Kurzschlüsse (siehe Abb. 11), der den Netzen entspricht, in denen die Kurzschlussströme abklingende Wechselstromkomponenten haben. Dieser Fall tritt im allgemeinen in der Hochspannung auf. Er kann jedoch in der Niederspannung

Nennspannung U_n	Spannungsfaktor c für die Berechnung von $I_{cc \max}$ $I_{cc \min}$	
	NS	
230–400 V	1	0,95
andere	1,05	1
HS		
1–230 kV	1,1	1

Abb. 23: Werte des Spannungsfaktors c (siehe IEC 909).

Art des Kurzschlusses	$I_{k''}$ Allgemeiner Fall	Generatorferner Kurzschluss
Dreipolig (Z_t beliebig)	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$	$= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$
In beiden Fällen hängt der Kurzschlussstrom nur von Z_d ab. Somit wird Z_d im allgemeinen durch Z_k ersetzt = Kurzschlussimpedanz an der Fehlerstelle, wobei $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$, worin R_k die Summe der in Serie geschalteten Widerstände einer Phase, X_k die Summe der in Serie geschalteten Reaktanzen einer Phase ist.		
Isoliert zweipolig ($Z_t = \infty$)	$= \frac{c \cdot U_n}{ Z_d + Z_i }$	$= \frac{c \cdot U_n}{2 Z_d }$
Einpolig	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o }$	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ 2 \cdot Z_d + Z_o }$
Zweipoliger Erdschluss (Z_{cc} zwischen den Phasen = 0)	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3} Z_i }{ Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_o + Z_d \cdot Z_o }$	$= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + 2 \cdot Z_o }$

Für diese Tabelle gewählte Bezeichnungen:

- Effektivwert der verketteten Spannung des Drehstromnetzes = U
- Der Modul k'' bezeichnet den Anfangskurzschlussstrom
- Symmetrische Impedanzen = Z_d, Z_i, Z_o
- Kurzschlussimpedanz = Z_{cc}
- Erdungsimpedanz = Z_t

Abb. 24: Werte der Kurzschlussströme in Funktion der direkten, inversen und Nullimpedanz des betrachteten Netzes (siehe IEC 909).

vorkommen, wenn zum Beispiel ein Notstromaggregat mit Priorität versehene Abgänge speist.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen diesen beiden Fällen sind:

- Bei den generatorfernen Kurzschlüssen besteht Übereinstimmung zwischen dem Anfangskurzschlussstrom (I_k''), dem Dauerkurzschlussstrom (I_k) und dem abgeschalteten Kurzschlussstrom (I_b) einerseits ($I_k'' = I_k = I_b$);
- und zwischen der direkten (Z_d) und der inversen (Z_i) Impedanz andererseits ($Z_d = Z_i$).

■ Bei den generatornahen Kurzschlüssen wird hingegen die folgende Ungleichung überprüft: $I_k < I_b < I_k''$, und zudem Z_d , welche Impedanz nicht unbedingt gleich Z_i ist.

Dazu ist jedoch zu bemerken, dass auch Asynchronmotoren einen Kurzschluss speisen können, wobei deren Beitrag innerhalb der ersten 30 Millisekunden 30% des I_{cc} des Netzes erreichen kann. In diesem Fall stimmt die Gleichung $I_k'' = I_k = I_b$ nicht mehr.

Für die Berechnung der minimalen und maximalen Kurzschlussströme einzuhaltende Bedingungen

- Die Berechnung der **maximalen** Kurzschlussströme berücksichtigt die folgenden Punkte:
 - Den anzuwendenden Spannungsfaktor c , welcher der Berechnung des maximalen Kurzschlussstromes entspricht.
 - Sämtliche in diesem Dokument aufgeführten Annahmen und Näherungen, wobei nur jene in Betracht gezogen werden dürfen, die zu Werten führen, die auf der sicheren Seite liegen.
 - Die Widerstände R_L der Leitungen (Freileitungen, Kabel, Phasen- und Neutralleiter) für eine Temperatur von 20 °C.
- Für die Berechnung der **minimalen** Kurzschlussströme
 - muss der Spannungsfaktor c angewendet werden, welcher der im Netz zulässigen Mindestspannung entspricht,
 - muss die Netzkonfiguration gewählt werden, und in bestimmten Fällen die minimale Speisung durch Quellen und Leitungen, die an der Fehlerstelle den Minimalwert des Kurzschlussstromes bewirken,
 - muss die Impedanz der Sammelschienen, der Stromwandler usw. berücksichtigt werden,
 - müssen die Motoren unbeachtet bleiben,

□ muss der Widerstand R_L für die höchste zu erwartende Temperatur gewählt werden:

$$R_L = \left[1 + \frac{0,004}{^\circ\text{C}} (\theta_e - 20^\circ\text{C}) \right] \times R_{L20}$$

wobei R_{L20} der Widerstand bei der Temperatur 20 °C und θ_e die für den Leiter am Ende des Kurzschlusses zulässige Temperatur (in °C) ist.

Der Faktor 0,004/°C gilt für Kupfer, Aluminium und die Aluminiumlegierungen.

Gleichungen der einzelnen Ströme

Anfangskurzschlussstrom I_k''

Die Berechnung der einzelnen Anfangskurzschlussströme erfolgt mit Hilfe der in der Tabelle der Abbildung 24 angegebenen Formeln.

Maximalwert i_p des Kurzschlussstroms

Der Maximalwert i_p des Kurzschlussstroms für nicht vermaschte Netze kann unabhängig von der Art des Kurzschlusses mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$i_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad \text{wobei}$$

I_k'' = Anfangskurzschlussstrom,

K = Faktor in Funktion von R/X gemäß Abbildung 9 oder berechnet mit der folgenden Näherungsformel:

$$K = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3R}{X}}$$

Abgeschalteter Kurzschlussstrom I_b

Die Berechnung des abgeschalteten Kurzschlussstroms I_b ist nur erforder-

lich, wenn sich die Fehlerstelle in der Nähe des Generators befindet und der Schutz durch verzögerte Leistungsschalter erfolgt. Es sei daran erinnert, dass dieser Strom dazu dient, das ASV dieser Leistungsschalter zu bestimmen.

Dieser Strom kann mit guter Näherung mit der folgenden Formel berechnet werden:

$I_b = \mu \cdot I_k''$ worin:

μ = Faktor in Abhängigkeit von der minimalen Totzeit t_{\min} und vom Verhältnis I_k''/I_r (siehe Abb. 25), das den Einfluss der subtransienten und transienten Reaktanzen darstellt, wobei I_r = Bemessungsstrom des Generators.

Dauerkurzschlussstrom I_k

Da die Amplitude des Dauerkurzschlussstroms I_k von Sättigungszustand des Eisens der Generatoren abhängt, ist seine Berechnung weniger genau als die Berechnung des symmetrischen Anfangsstroms I_k'' .

Die vorgeschlagenen Berechnungsmethoden liefern eine genügend genaue Abschätzung der oberen und unteren Werte für den Fall, wo der Kurzschluss durch einen Generator oder eine Synchronmaschine gespeist wird.

■ Der maximale Dauerkurzschlussstrom unter der grössten Erregung des Synchrongenerators ist gegeben durch:

$$I_{k_{\max}} = \lambda_{\max} \cdot I_r$$

■ Den minimalen Dauerkurzschlussstrom erhält man für eine konstante (minimale) Erregung im Leerlauf der Synchronmaschine. Er ist gegeben durch:

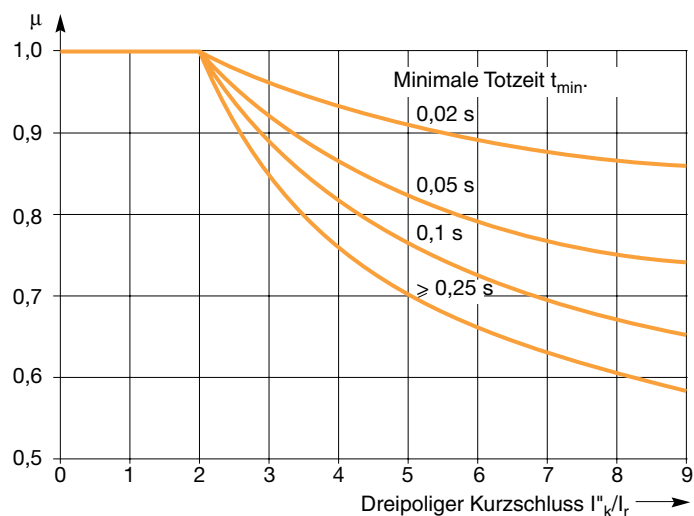


Abb. 25: Faktor μ für die Berechnung des abgeschalteten Kurzschlussstroms I_b (siehe IEC 909).

$I_{k_{min}} = \lambda_{min} \cdot I_r$ wobei
 I_r = Bemessungswert des Stroms an den Klemmen des Generators,
 λ = von der Sättigungsinduktivität $X_{d_{sat}}$ abhängiger Faktor.
 Die Werte von λ_{max} und λ_{min} sind in der Abbildung 26 für Turbogeneratoren und

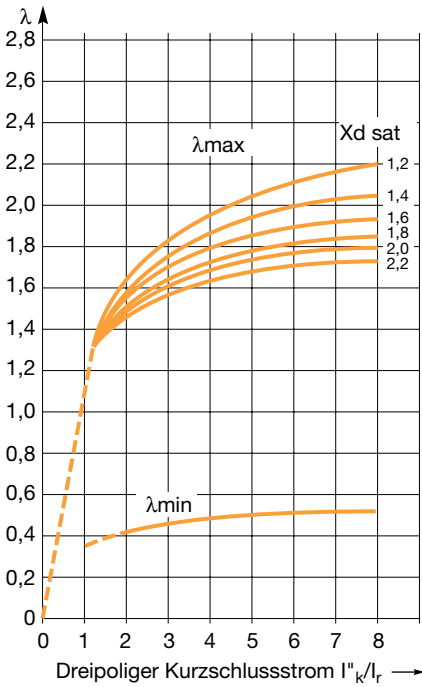


Abb. 26: Faktoren λ_{max} und λ_{min} für Turbogeneratoren (siehe IEC 909).

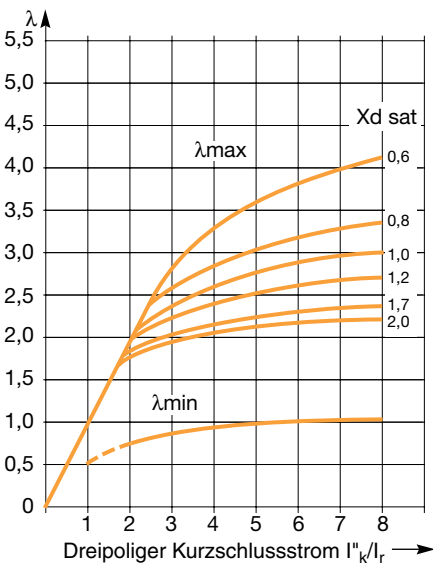


Abb. 27: Faktoren λ_{max} und λ_{min} für Schenkelpolgeneratoren (siehe IEC 909).

in der Abbildung 27 für Schenkelpolgeneratoren angegeben.

Berechnungsbeispiel

Aufgabenstellung:

Vier Netze, drei mit 5 kV und eines mit 15 kV, werden über die Transformatoren der Station E von einem 30-kV-Netz gespeist (siehe Abb. 28). Anlässlich des Baus der Leitung GH wird verlangt, das Ausschaltvermögen des Schalters M zu bestimmen.

Bekannt ist, dass

- die einzigen Erdungen jene der Sekundärwicklungen der Transformatoren der Station E sind,

- für eine 30 km lange Leitung die Reaktanz $0,35 \Omega/\text{km}$ im mit- und gegenlaufenden System und $3 \times 0,35 \Omega/\text{km}$ im Nullsystem beträgt,

- die Kurzschlussreaktanz der Transformatoren für die Station E 6% und für die übrigen Stationen 8% beträgt,

- der Spannungsfaktor c als 1 angenommen wird,

- alle an den Punkten F und G angeschlossenen Lasten im wesentlichen passiv sind,

- sämtliche Widerstände gegenüber den Reaktanzen vernachlässigbar sind.

Lösung:

- Aufgrund des mit- und gegenlaufenden Schemas (siehe Abb. 29) kann geschrieben werden:

$$a = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{30^2}{290} \Rightarrow j 3,1 \Omega$$

$$b = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{6}{100} \times \frac{30^2}{10} \Rightarrow j 5,4 \Omega$$

$$c1 = 0,35 \times 40 \Rightarrow j 14 \Omega$$

$$c2 = 0,35 \times 30 \Rightarrow j 10,5 \Omega$$

$$c3 = 0,35 \times 20 \Rightarrow j 7 \Omega$$

$$c4 = 0,35 \times 15 \Rightarrow j 5,25 \Omega$$

$$d = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{8} \Rightarrow j 9 \Omega$$

$$e = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{6} \times 0,6 \Rightarrow j 90 \Omega$$

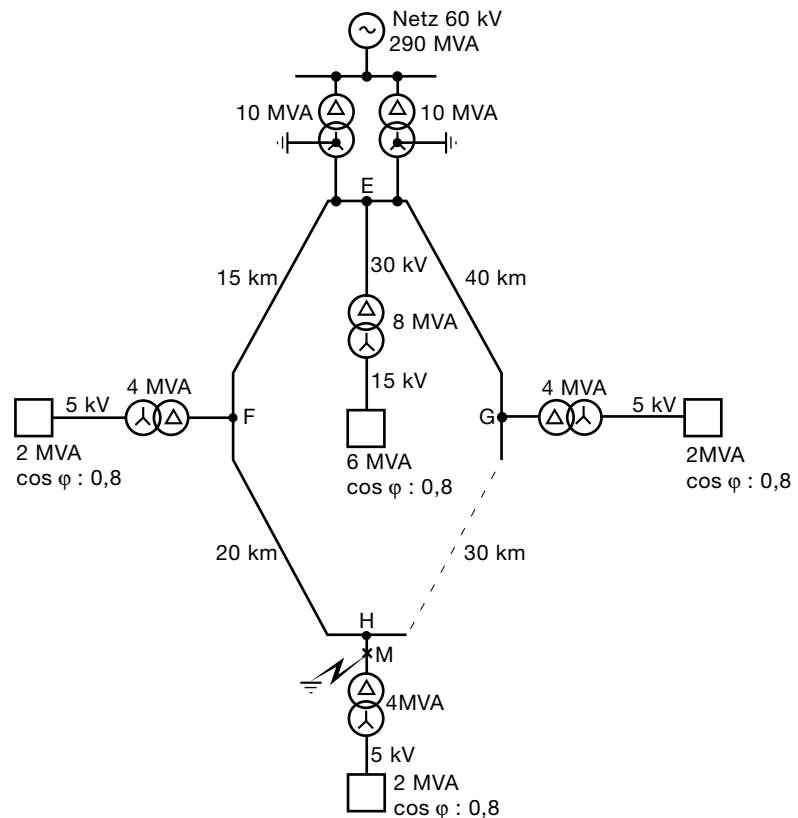


Abb. 28.

$$f = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{4} \Rightarrow j 18 \Omega$$

$$g = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{2} \times 0,6 \Rightarrow j 270 \Omega$$

■ Zum Nullschema (siehe Abb. 30) ist zu bemerken:

□ Die im Dreieck geschalteten Wicklungen der Transformatoren der Station E halten die Nullströme zurück, weshalb sie im Netz nicht in Erscheinung treten.

□ Auch die Transformatoren der Stationen F, H und G haben wegen ihren im Dreieck geschalteten Wicklungen keine Nullströme und deshalb für diesen Fehler eine unendliche Impedanz.

$$b' = b1 = j 5,4 \Omega$$

$$c'1 = 3 \times c1 = j 42 \Omega$$

$$c'2 = 3 \times c2 = j 31,5 \Omega$$

$$c'3 = 3 \times c3 = j 21 \Omega$$

$$c'4 = 3 \times c4 = j 15,75 \Omega$$

$$d' = \infty$$

$$f' = \infty$$

■ Somit gilt es, zwei reduzierte Schemata zu studieren:

□ Leitung GH offen (siehe Abb. 31)

$$Z_d = Z_i = j 17,25 \Omega$$

$$Z_o = j 39,45 \Omega$$

$$I_{cc3} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_d| \sqrt{3}} \approx 1,104 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_o|} \approx 0,773 \text{ kA}$$

Anmerkung: Hochspannungsnetz, weshalb $c = 1,1$.

□ Leitung GH geschlossen (siehe Abb. 32)

$$Z_d = Z_i = j 13,05 \Omega$$

$$Z_o = j 27,2 \Omega$$

$$I_{cc3} = 1,460 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = 1,072 \text{ kA}$$

Aufgrund des grössten Kurzschlussstroms ($I_{cc3} = 1,460 \text{ kA}$) muss der Leistungsschalter der Leitung am Punkt M wie folgt dimensioniert werden:

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = 30 \times 1,460 \times \sqrt{3}$$

$$P \approx 76 \text{ MVA.}$$

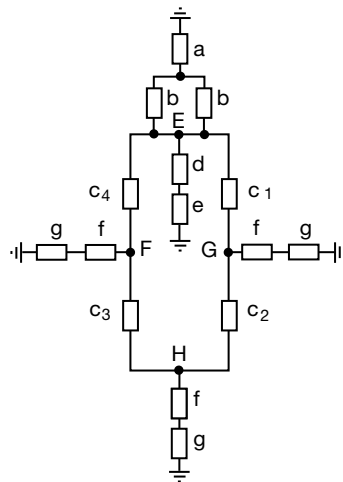


Abb. 29.

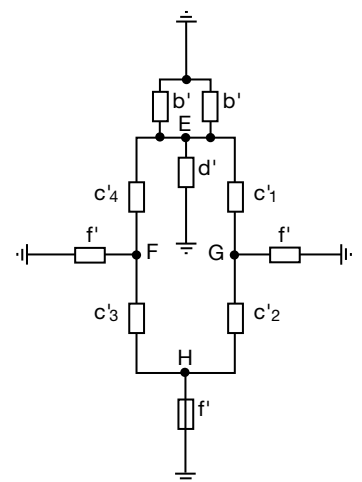


Abb. 30.

Mit- und gegenlaufendes Schema

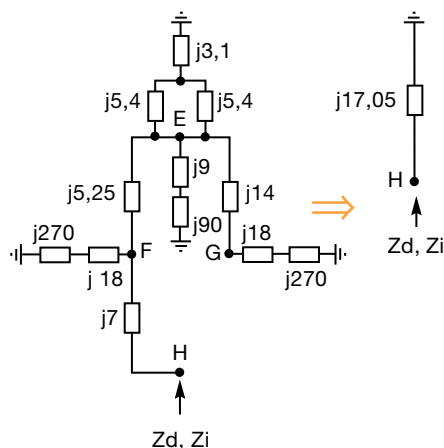
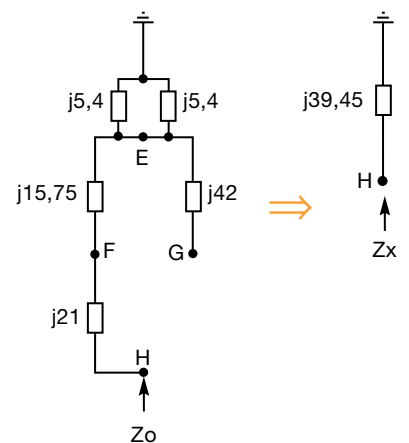


Abb. 31.

Nullschema



Mitlaufendes Schema

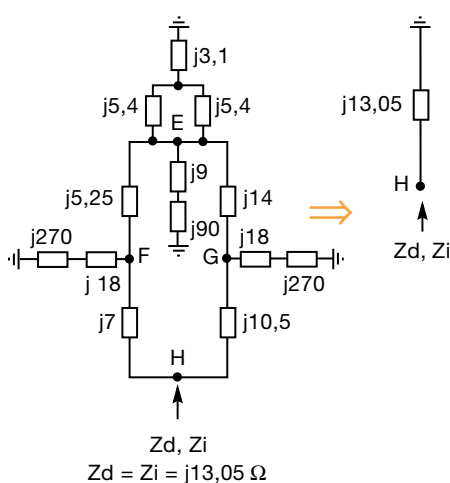
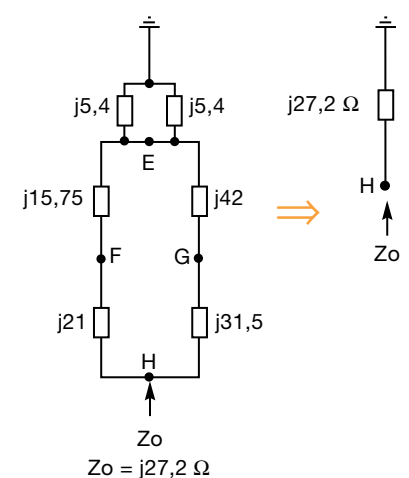


Abb. 32.

Nullschema



4. Berechnungen mit dem Computer und Schlussfolgerung

Zum Berechnen des Kurzschlussstroms sind mehrere Methoden entwickelt und in die Normen - und somit in das vorliegende Technische Heft - aufgenommen worden.

Mehrere dieser normierten Methoden sind so ausgelegt, dass der Kurzschlussstrom von Hand oder mit dem Taschenrechner berechnet werden kann. Mit dem Aufkommen der Möglichkeit wissenschaftlicher Berechnungen mit dem Computer in den 70er Jahren haben die Projektanten von elektrischen Anlagen für ihre eigenen Bedürfnisse Software-Programme entwickelt, zuerst auf grossen Zentralrechnern und dann auf Minicomputern. Deren Anwendung war Eingeweihten vorbehalten, da schwierig.

Diese Entwicklungen sind später auf den einfacher einzusetzenden Personal Computer (PC) übertragen worden. Heute gibt es zum Berechnen der Icc in der Niederspannung zahlreiche den Normen entsprechende Programme, wie die von Merlin Gerin entwickelte und vertriebene Software Ecodial.

Alle diese Programme für Kurzschlussberechnungen dienen im wesentlichen zum Bestimmen des Ein- und Ausschaltvermögens der Schaltgeräte sowie des elektromagnetischen Verhaltens der Betriebsmittel.

Schliesslich werden weitere Berechnungsprogramme von spezialisierten Netzprojektanten eingesetzt, zum Beispiel zum Studium des dynamischen Verhaltens von Stromnetzen.

Solche Programme gestatten genaue Simulationen der zeitlichen Erscheinungen. Ihre Anwendung erstreckt sich auf das vollständige elektromechanische Verhalten der Netze und Anlagen.

Trotzdem sind diese Programme, ob schon sehr leistungsfähig, nur Werkzeuge. Ihre wirksame Anwendung erfordert Fachkenntnisse, die man sich vorher durch Studien angeeignet hat, sowie ein spezielles Know-how und Erfahrung.

Anhang: Literaturverzeichnis

Normen

- IEC 909: Berechnung von Kurzschlussströmen in Drehstromnetzen.
- IEC 781: Anwendungsleitfaden für die Berechnung von Kurzschlussströmen in Niederspannungs-Strahlennetzen.
- UTE C 15-105: Praktische Richtlinien. Bestimmung der Leiterquerschnitte und Wahl der Schutzeinrichtungen (franz. Richtlinie).

Technische Hefte Merlin Gerin

- Selektivität der Schutzeinrichtungen
Technisches Heft Nr. 13 - F. Sautriau
- Analyse von Drehstromnetzen im gestörten Betrieb mit Hilfe symmetrischer Komponenten
Technisches Heft Nr. 18 - B. De Metz-Noblat
- Sternpunktterdung in industriellen Hochspannungsnetzen
Technisches Heft Nr. 62 - F. Sautriau
- Unterbrechungsverfahren der Niederspannungs-Leistungsschalter
Technisches Heft Nr. 148 - R. Morel

Diverse Veröffentlichungen

- Richtlinien für elektrische Installationen (Ausgabe Juli 1991), Ausgearbeitet von Merlin Gerin, Verlag France Impressions Conseil BP 283 F-38434 Echirrolles-Cedex
- Elektrische Energienetze (2. Teil), R. Pelissier Verlag Dunod

Schneider Electric

Hauptverwaltung Deutschland:

Schneider Electric GmbH
Gothaer Strasse 29 • D-40880 Ratingen
Postfach 10 12 61 • D-40832 Ratingen
Telefon (0 21 02) 4 04-0
Telefax (0 21 02) 4 04 92 56
www.schneiderelectric.de

Hauptverwaltung Schweiz:

Schneider Electric (Schweiz) AG
Schermenwaldstrasse 11
Postfach • CH-3063 Ittigen
Telefon (031) 917 33 33
Telefax (031) 917 33 55
www.schneider-electric.ch