

Berechnung von Kurzschlußströmen in Drehstromnetzen

DIN
VDE 0102

Diese auch vom Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V. genehmigte Norm ist damit zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter obenstehender Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.

Short-circuit current calculation
in three-phase a.c. systems

Ersatz für
VDE 0102 Teil 1/11.71
und teilweise Ersatz für
DIN 57102 Teil 2/
VDE 0102 Teil 2/11.75

Zusammenhang mit der von der International Electrotechnical Commission (IEC) herausgegebenen Internationalen Norm IEC 909:1988 siehe Erläuterungen. Die gegenüber IEC 909:1988 vorgenommenen Ergänzungen sind durch einen linksseitig gesetzten Strich gekennzeichnet. Der Hauptabschnitt drei wurde angefügt, siehe Erläuterungen. Der Anhang A von IEC 909:1988 wurde als Entwurf Beiblatt 1 zu DIN VDE 0102 Teil 100/07.87 veröffentlicht.

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm (VDE-Bestimmung) gilt ab 1. Januar 1990.

Daneben bleibt DIN 57102 Teil 2/VDE 0102 Teil 2/11.75, Abschnitte 13 bis 15 mit den Werten für Impedanzen von

- Freileitungen
- Kabeln u.
- Transformatoren

weiterhin gültig, siehe Erläuterungen.

Die Entwürfe waren veröffentlicht als DIN VDE 0102 Teil 100/04.85, Beiblatt 1 zu DIN VDE 0102 Teil 100/07.87 und DIN VDE 0102 Teil 200/04.85.

Fortsetzung Seite 2 bis 37

Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

		Seite	Inhalt	Seite
1	Anwendungsbereich	3	9.3.1 Allgemeines	18
2	Zweck	3	9.3.2 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	18
3	Begriffe	3		
4	Formelzeichen und Nebenzeichen	5		
4.1	Formelzeichen	5		
4.2	Indizes	6		
4.3	Nebenzeichen, oben rechts	6		
5	Voraussetzungen für die Berechnung ..	7		
6	Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle	8		
	Hauptabschnitt eins –			
	Netze mit Kurzschlußströmen ohne			
	abklingender Wechselstromkomponente			
	(Generatorferner Kurzschluß)			
7	Allgemeine Gesichtspunkte	9	10 Allgemeines	19
8	Kurzschlußparameter	10	11 Kurzschlußparameter	19
8.1	Symmetrischer Kurzschluß	10	11.1 Allgemeines	19
8.2	Unsymmetrischer Kurzschluß	10	11.2 Symmetrischer Kurzschluß	20
8.3	Kurzschlußimpedanzen	10	11.3 Unsymmetrischer Kurzschluß	20
8.3.1	Kurzschlußimpedanzen an der		11.4 Ersatzspannungsquelle an der Kurz-	
	Kurzschlußstelle F	10	schlußstelle	20
8.3.2	Kurzschlußimpedanzen		11.5 Kurzschlußimpedanzen	21
	von elektrischen Betriebsmitteln	11	11.5.1 Kurzschlußimpedanzen	
8.3.2.1	Netzeinspeisungen.	11	an der Kurzschlußstelle F	21
8.3.2.2	Transformatoren.	12	11.5.2 Kurzschlußimpedanzen von	
8.3.2.3	Freileitungen und Kabel.	13	elektrischen Betriebsmitteln	21
8.3.2.4	Kurzschlußstrom-Begrenzungsdrössel-		11.5.3 Berechnung der Kurzschlußimpedanzen	
	spulen.	14	von elektrischen Betriebsmitteln	21
8.3.2.5	Motoren	14	11.5.3.1 Netzeinspeisungen.	21
8.4	Umrechnung von Impedanzen,		11.5.3.2 Transformatoren.	21
	Strömen und Spannungen	14	11.5.3.3 Freileitungen und Kabel.	21
9	Berechnung der Kurzschlußströme ...	14	11.5.3.4 Kurzschlußstrom-Begrenzungsdrössel-	
9.1	Berechnungsverfahren für		spulen.	21
	dreipolige Kurzschlüsse	14	11.5.3.5 Motoren	21
9.1.1	Einfach gespeister dreipoliger Kurzschluß.		11.5.3.6 Generatoren mit direktem Netzanschluß ..	21
9.1.1.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	14	11.5.3.7 Generatoren und Blocktransformatoren	
9.1.1.2	Stoßkurzschlußstrom i_p	14	von Kraftwerksblöcken	22
9.1.2	Mehrseitig einfach gespeister dreipoliger		11.5.3.8 Kraftwerksblöcke	22
	Kurzschluß	15	11.6 Umrechnung von Impedanzen,	
9.1.2.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	15	Strömen und Spannungen	23
9.1.2.2	Stoßkurzschlußstrom i_p	15	12 Berechnung der Kurzschlußströme ...	23
9.1.3	Dreipoliger Kurzschluß im		12.1 Allgemeines	23
	vermaschten Netz	16	12.2 Berechnungsverfahren bei	
9.1.3.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	16	dreipoligen Kurzschlüssen	23
9.1.3.2	Stoßkurzschlußstrom i_p	16	12.2.1 Kurzschluß gespeist von einem Generator	
9.2	Berechnungsverfahren bei zweipoligen		12.2.1.1 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	23
	Kurzschlüssen und einpoligen		12.2.1.2 Stoßkurzschlußstrom i_p	23
	Erdkurzschlüssen.	17	12.2.1.3 Ausschaltwechselstrom I_a	24
9.2.1	Zweipoliger Kurzschluß ohne Erdberührung		12.2.1.4 Dauerkurzschlußstrom I_k	24
9.2.1.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_{k2} ...	18	12.2.2 Kurzschluß gespeist von einem	
9.2.1.2	Stoßkurzschlußstrom i_{p2}	18	Kraftwerksblock	26
9.2.2	Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung.		12.2.2.1 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	26
9.2.2.1	Anfangs-Kurzschlußwechselströme		12.2.2.2 Stoßkurzschlußstrom i_p	26
	I_{k2E} und I_{kE2E}	18	12.2.2.3 Ausschaltwechselstrom I_a	26
9.2.2.2	Stoßkurzschlußstrom i_{p2E}	18	12.2.2.4 Dauerkurzschlußstrom I_k	26
9.2.3	Einpoliger Erdkurzschluß	18	12.2.3 Mehrseitig einfach gespeister	
9.2.3.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_{k1} ...	18	dreipoliger Kurzschluß	26
9.2.3.2	Stoßkurzschlußstrom i_{p1}	18	12.2.3.1 Allgemeines	26
9.3	Kleinste Kurzschlußströme	18	12.2.3.2 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	28
			12.2.3.3 Stoßkurzschlußstrom i_p ,	
			Ausschaltwechselstrom I_a	
			und Dauerkurzschlußstrom I_k	28
			12.2.4 Dreipoliger Kurzschluß im vermaschten	
			Netz	28
			12.2.4.1 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	28
			12.2.4.2 Stoßkurzschlußstrom i_p	28
			12.2.4.3 Ausschaltwechselstrom I_a	28
			12.2.4.4 Dauerkurzschlußstrom I_k	30

12.3	Berechnungsverfahren bei zweipoligen Kurzschlüssen und einpoligen Erdkurzschlüssen	30
12.4	Kleinste Kurzschlußströme	30
12.4.1	Allgemeines	30
12.4.2	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k''	30
12.4.2.1	Kurzschluß gespeist von einem Generator	30
12.4.2.2	Kurzschluß im vermaschten Netz	30
12.4.3	Dauerkurzschlußstrom $I_{k\min}$ gespeist von Generatoren mit Kompounderregung	30
12.4.4	Anfangs-Kurzschlußwechselströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	30
13	Einfluß der Motoren	30
13.1	Synchronmotoren und Synchronphasenschieber	30
13.2	Asynchronmotoren	30
13.2.1	Allgemeines	30
13.2.2	Klemmenkurzschluß von Asynchronmotoren	32
13.2.3	Kurzschluß hinter einer Impedanz	32
13.3	Stromrichtergespeiste Antriebe	32

1 Anwendungsbereich

Diese Bestimmung enthält ein genormtes Verfahren zur Berechnung der Kurzschlußströme:

- in Niederspannungs-Drehstromnetzen und
- in Hochspannungs-Drehstromnetzen mit Nennspannungen bis einschließlich 380 kV

bei Nennfrequenz (50 Hz bzw. 60 Hz).

Dieses genormte Berechnungsverfahren liegt in einer Form vor, das seine Anwendung so weit wie möglich, auch für Ingenieure erleichtert, die nicht auf diesem Gebiet spezialisiert sind.

2 Zweck

Das Ziel dieser Norm ist es, ein allgemeines, gut handhabbares und kurzes Berechnungsverfahren festzulegen, das mit ausreichender Genauigkeit zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führen soll. Zu diesem Zweck wird mit einer Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle gerechnet, wie in Abschnitt 6 beschrieben. Dies schließt jedoch nicht die Anwendung von speziellen Berechnungsverfahren z.B. des Überlagerungsverfahrens aus, die besonderen Gegebenheiten besser angepaßt sind, sofern sie mindestens die gleiche Genauigkeit aufweisen. Kurzschlußströme und Kurzschlußimpedanzen dürfen auch aus Netzversuchen, Messungen an Netzmodellen oder mit einem Digitalrechner ermittelt werden. In bestehenden Niederspannungsnetzen ist es möglich, die Kurzschlußimpedanz durch Messungen an der angenommenen Kurzschlußstelle zu bestimmen.

Die Berechnung der Kurzschlußimpedanz, ausgehend von den Bemessungswerten der elektrischen Betriebsmittel und der Topologie des Netzes, hat den Vorteil, daß sie sowohl für bestehende Netze als auch für Netze im Planungsstadium angewendet werden kann.

Es wird zwischen zwei Kurzschlußströmen verschiedener Größe unterschieden:

- dem größten Kurzschlußstrom, der die Leistungsfähigkeit oder die Bemessung der elektrischen Betriebsmittel bestimmt

14	Berücksichtigung von passiven Lasten und Kondensatoren	32
14.1	Parallelkondensatoren	32
14.2	Reihen-kondensatoren	32

Hauptabschnitt drei – Doppelerdkurzschluß und Teilkurzschlußströme über Erde

15	Berechnungsverfahren bei Doppelerdkurzschluß	33
15.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_{kEE}'' . . .	33
15.2	Stoßkurzschlußstrom i_{pEE} , Ausschnittwechselstrom I_{aEE} und Dauerkurzschlußstrom I_{kEE}	33
16	Teilkurzschlußströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	33
16.1	Allgemeines	33
16.2	Erdkurzschluß innerhalb einer Anlage . . .	34
16.3	Erdkurzschluß außerhalb einer Anlage . . .	34

- dem kleinsten Kurzschlußstrom, der z.B. für die Auswahl von Sicherungen, für die Einstellung von Schutzeinrichtungen und für den Anlauf von Motoren zugrunde gelegt werden kann.

Es wird weiterhin unterschieden zwischen:

- Netzen mit Kurzschlußströmen ohne abklingende Wechselstromkomponente (Generatorferner Kurzschluß), behandelt in Hauptabschnitt eins
- Netzen mit Kurzschlußströmen mit abklingender Wechselstromkomponente (Generatornaher Kurzschluß), behandelt in Hauptabschnitt zwei. Dort wird auch der Einfluß der Motoren berücksichtigt.

Diese Norm beschäftigt sich nicht mit den Kurzschlußströmen, die unter Prüfbedingungen absichtlich in Kurzschluß-Prüffeldern erzeugt werden und auch nicht mit Kurzschlußströmen auf Schiffen und in Flugzeugen.

Zur Berechnung der thermisch gleichwertigen Kurzschlußströme siehe IEC 865 (1986) Hauptabschnitt zwei und DIN VDE 0103/04.88.

Eine Anwendungsrichtlinie zur Kurzschlußstromberechnung in nichtvermaschten Niederspannungs-Drehstromnetzen und ein Fachbericht zu den in dieser Norm verwendeten Berechnungs- und Korrekturfaktoren befinden sich in Vorbereitung.

3 Begriffe

Für diese Norm gelten die folgenden Definitionen. Die englischsprachigen Begriffe werden in Klammern angegeben. Wenn anwendbar, wird auf das Internationale Elektrotechnische Wörterbuch (IEV) DIN IEC 50 Teil 131 und Teil 151 sowie IEC 50 (441) hingewiesen.

3.1 Kurzschluß (Short circuit)

Die zufällige oder beabsichtigte Verbindung über eine verhältnismäßig niedrige Resistanz oder Impedanz zwischen zwei oder mehr Punkten eines Stromkreises, die üblicherweise unterschiedliche Spannung haben (siehe auch IEC 151-03-41).

3.2 Kurzschlußstrom (Short-circuit current)

Der Strom in einem elektrischen Stromkreis, in dem ein Kurzschluß eintritt (siehe auch IEC 441-11-07).

Anmerkung: Es ist notwendig, zwischen dem Kurzschlußstrom an der Kurzschlußstelle und den Kurzschlußströmen in den Netzzweigen (Teilkurzschlußströme) zu unterscheiden.

3.3 Zu erwartender Kurzschlußstrom (Prospective short-circuit current, available short-circuit current)

Der Kurzschlußstrom, der auftreten würde, wenn der Kurzschluß durch eine ideale Verbindung mit vernachlässigbarer Impedanz ersetzt würde ohne Änderung der Einspeisung.

Anmerkung: Angenommen wird, daß der dreipolige Kurzschluß simultan in allen Leitern des Drehstromnetzes auftritt. Überlegungen zum nichtsimultanen Auftreten von Kurzschlüssen, die zu höheren Gleichstromgliedern im Kurzschlußstrom führen können (z.B. beim Übergang vom zwei- in den dreipoligen Kurzschluß bei bestimmtem Zeitabstand) werden in dieser Norm nicht berücksichtigt.

3.4 Symmetrischer Kurzschlußstrom (Symmetrical short-circuit current)

Effektivwert der symmetrischen Wechselstromkomponente eines zu erwartenden Kurzschlußstromes (siehe Abschnitt 3.3), wobei die Gleichstromkomponente, soweit vorhanden, nicht berücksichtigt wird.

3.5 Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k'' (Initial symmetrical short-circuit current)

Der Effektivwert der symmetrischen Wechselstromkomponente eines zu erwartenden Kurzschlußstromes (siehe Abschnitt 3.3) im Augenblick des Kurzschlußeintritts (siehe Bild 1 und Bild 12), wenn die Kurzschlußimpedanz ihre Größe zum Zeitpunkt Null beibehält.

3.6 Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung S_k'' (Initial symmetrical short-circuit apparent power)

Fiktive Größe berechnet als Produkt aus dem Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_k'' (siehe Abschnitt 3.5), der Nennspannung des Netzes U_n (siehe Abschnitt 3.14) und dem Faktor $\sqrt{3}$:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$$

(Abgekürzt: Kurzschlußleistung, nur bei dreipoligem Kurzschluß)

3.7 Abklingende Gleichstromkomponente i_{DC} **des Kurzschlußstromes** (D. C. (aperiodic) component of short-circuit current)

Der Mittelwert zwischen der oberen und unteren Hüllkurve des Kurzschlußstromes, der von einem Anfangswert auf Null abklingt nach Bild 1 und Bild 12.

3.8 Stoßkurzschlußstrom i_p (peak short-circuit current)

Der maximal mögliche Augenblickswert des zu erwartenden Kurzschlußstromes (siehe Bild 1 und Bild 12).

Anmerkung: Die Größe des Stoßkurzschlußstromes ist abhängig vom Augenblick, in dem der Kurzschluß eintritt. Die Berechnung des Stoßkurzschlußstromes i_p bei dreipoligem Kurzschluß bezieht sich auf den Leiter und den Augenblick, für den der größt-

mögliche Strom auftritt. Folgefehler werden nicht betrachtet. Bei dreipoligen Kurzschlüssen wird vorausgesetzt, daß der Kurzschluß gleichzeitig in allen Leitern auftritt.

3.9 Ausschaltwechselstrom I_a (Symmetrical short-circuit breaking current I_b)

Der Effektivwert der symmetrischen Wechselstromkomponente des zu erwartenden Kurzschlußstromes (Mittelwert über eine Periode) im Augenblick der Kontakttrennung des erstlöschenden Pols einer Schalteinrichtung.

3.10 Dauerkurzschlußstrom I_k (Steady-state short-circuit current)

Der Effektivwert des Kurzschlußstromes, der nach dem Abklingen aller Ausgleichsvorgänge bestehen bleibt (siehe Bild 1 und Bild 12).

3.11 Anzugsstrom I_{an} (Symmetrical locked-rotor current I_{LR})

Der höchste symmetrische Effektivwert des Stromes eines Asynchronmotors bei festgebremstem Rotor gespeist mit der Bemessungsspannung U_{rM} bei Bemessungsfrequenz.

3.12 Netznachbildung (Equivalent electric circuit)

Ein Modell zur Beschreibung der Verhaltensweise eines Netzes durch eine Ersatzschaltung mit idealen Elementen (siehe auch IEC 131-01-33).

3.13 Spannungsquelle (Voltage source)

Ein aktives Element, das durch eine ideale Spannungsquelle, unabhängig von Strömen und anderen Spannungen im Netz, in Reihe mit einem passiven Element nachgebildet werden kann (siehe auch IEC 131-01-37).

3.14 Netznennspannung U_n (Nominal system voltage)

Die Spannung zwischen den Leitern, für die ein Netz bestimmt ist und auf die sich bestimmte Eigenschaften eines Netzes beziehen. Werte von U_n sind in der Publikation IEC 38 (1983), DIN IEC 38/05.87 zu finden. Für diese Norm wurde $U_n = 380$ kV zusätzlich eingeführt (siehe Erläuterungen).

3.15 Ersatzspannungsquelle $c U_n / \sqrt{3}$ (Equivalent voltage source)

Die Spannung einer idealen Quelle, die an der Kurzschlußstelle im Mitsystem als einzige wirksame Spannung des Netzes eingeführt wird zur Berechnung der Kurzschlußströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle nach Abschnitt 6.

3.16 Spannungsfaktor c (Voltage factor)

Verhältnis zwischen der Spannung der Ersatzspannungsquelle und $U_n / \sqrt{3}$. Wert in Tabelle I.

Anmerkung: Die Einführung eines Spannungsfaktors c ist aus verschiedenen Gründen notwendig. Diese Gründe sind: Spannungsunterschiede im Netz abhängig von der Zeit und vom Ort, Änderung der Stufenstellung von Transformatorstufenschaltern, Vernachlässigung der Lasten und der Kapazitäten bei der Berechnung mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle nach Abschnitt 6 und das subtransiente Verhalten von Generatoren und Motoren.

3.17 Subtransiente Spannung E'' einer Synchronmaschine (Subtransient voltage of a synchronous machine)

Der Effektivwert der symmetrischen inneren Spannung einer Synchronmaschine, die im Kurzschlußaugenblick hinter der subtransienten Reaktanz X_d'' wirksam ist.

3.18 Generatorferner Kurzschluß (Far-from-generator short circuit)

Ein Kurzschluß, bei dem die Größe der symmetrischen Wechselstromkomponente des zu erwartenden Kurzschlußstromes im wesentlichen konstant bleibt (siehe Abschnitt 7).

3.19 Generatornaher Kurzschluß (Near-to-generator short circuit)

Ein Kurzschluß, bei dem mindestens eine Synchronmaschine einen Anfangs-Kurzschlußwechselstrom liefert, der größer ist als das Doppelte des Bemessungsstromes der Synchronmaschine oder ein Kurzschluß, bei dem Synchron- oder Asynchronmotoren mehr als 5 % des Anfangs-Kurzschlußwechselstromes I_k'' ohne Motoren beitragen (siehe Abschnitt 10).

3.20 Kurzschlußimpedanzen an der Kurzschlußstelle F

3.20.1 Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)}$ eines Drehstromnetzes (Positive-sequence short-circuit impedance of a three-phase a. c. system)

Die Impedanz des Mitsystems, von der Kurzschlußstelle aus betrachtet (siehe Abschnitt 8.3.1 und Bild 4 a).

3.20.2 Kurzschlußgegenimpedanz $Z_{(2)}$ eines Drehstromnetzes (Negative-sequence short-circuit impedance of a three-phase a. c. system)

Die Impedanz des Gegensystems, von der Kurzschlußstelle aus betrachtet (siehe Abschnitt 8.3.1 und Bild 4 b).

3.20.3 Kurzschlußnullimpedanz $Z_{(0)}$ eines Drehstromnetzes (Zero-sequence short-circuit impedance of a three-phase a. c. system)

Die Impedanz des Nullsystems, von der Kurzschlußstelle aus betrachtet (siehe Abschnitt 8.3.1 und Bild 4 c). Der dreifache Wert der Impedanz Sternpunkt-Erde ($3 Z_{NE}$) ist hierin enthalten.

3.20.4 Kurzschlußimpedanz Z_k eines Drehstromnetzes (Short-circuit impedance of a three-phase a.c. system)

Abgekürzte Bezeichnung für die Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)}$ eines Drehstromnetzes nach Abschnitt 3.20.1 zur Berechnung dreipoliger Kurzschlußströme.

3.21 Kurzschlußimpedanzen elektrischer Betriebsmittel

3.21.1 Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)}$ eines elektrischen Betriebsmittels (Positive-sequence short-circuit impedance of electrical equipment)

Das Verhältnis der Leiter-Sternpunktspannung zum Kurzschlußstrom des zugehörigen Leiters eines elektrischen Betriebsmittels, wenn dieses durch ein mitlaufendes symmetrisches Spannungssystem gespeist wird (siehe Abschnitt 8.3.2).

Anmerkung: Der Index von $Z_{(1)}$ kann weggelassen werden, wenn keine Verwechslungsgefahr besteht mit $Z_{(2)}$ und $Z_{(0)}$ des Betriebsmittels.

3.21.2 Kurzschlußgegenimpedanz $Z_{(2)}$ eines elektrischen Betriebsmittels (Negative-sequence short-circuit impedance of electrical equipment)

Das Verhältnis der Leiter-Sternpunktspannung zum Kurzschlußstrom des zugehörigen Leiters eines elektrischen Betriebsmittels, wenn dieses durch ein gegenläufiges symmetrisches Spannungssystem gespeist wird (siehe Abschnitt 8.3.2).

3.21.3 Kurzschlußnullimpedanz $Z_{(0)}$ eines elektrischen Betriebsmittels (Zero-sequence short-circuit impedance of electrical equipment)

Das Verhältnis der Spannung Leiter gegen Erde zum Kurzschlußstrom des zugehörigen Leiters eines elektrischen Betriebsmittels, wenn dieses durch eine Wechselspannung gespeist wird bei Parallelschaltung der Leiter bzw. Klemmen und gemeinsamer Rückleitung über einen vierten Leiter und/oder Erde (siehe Abschnitt 8.3.2).

3.22 Subtransiente Reaktanz X_d'' einer Synchronmaschine (Subtransient reactance of a synchronous machine)

Die im Kurzschlußaugenblick wirksame Reaktanz. Für die Berechnung der Kurzschlußströme ist der gesättigte Wert X_d'' einzuführen.

Anmerkung: Wenn die Reaktanz X_d'' durch den Bemessungswert der Impedanz $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$ der Synchronmaschine dividiert wird, so wird das Ergebnis durch einen kleinen Buchstaben gekennzeichnet und als Dezimalzahl oder in % angegeben:

$$x_d'' = X_d'' / Z_{rG}.$$

3.23 Mindestschaltverzug $t_{\min}$ eines Leistungsschalters (Minimum time delay of a circuit breaker)

Die kleinstmögliche Zeit zwischen dem Beginn des Kurzschlußstromes und der ersten Kontakttrennung eines Poles einer Schalteinrichtung.

Anmerkung: Die Zeit $t_{\min}$ ist die Summe aus kleinstmöglicher Kommandozeit eines Relais (Schutzrelais) und der kürzesten Ausschaltzeit eines Leistungsschalters. Hierbei wird eine einstellbare Zeitverzögerung der Ausschalteinrichtung nicht berücksichtigt.

4 Formelzeichen und Nebenzeichen

Komplexe Größen werden unterstrichen, z.B.

$$\underline{Z} = R + jX.$$

Alle Gleichungen sind als Größengleichungen angegeben. Die Formelzeichen beinhalten sowohl den Zahlenwert als auch die Einheit. Die Größen sind unabhängig von den Einheiten, wenn ein kohärentes Einheitensystem gewählt wird, z.B. das Système International d'Unités (SI).

4.1 Formelzeichen

A	Anfangswert der Gleichstromkomponente
c	Spannungsfaktor
$cU_n/\sqrt{3}$	Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle

E''	Subtransiente Spannung einer Synchronmaschine	$Z_{(1)}$	Kurzschlußmitimpedanz
f	Frequenz (50 Hz bzw. 60 Hz)	$Z_{(2)}$	Kurzschlußgegenimpedanz
I_a	Ausschaltwechselstrom	$Z_{(0)}$	Kurzschlußnullimpedanz
I_{an}	Anzugsstrom eines Asynchronmotors	η	Wirkungsgrad eines Asynchronmotors
I_k	Dauerkurzschlußstrom	κ	Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlußstromes (Stoßfaktor)
I_{kK}	Dauerkurzschlußstrom an den Klemmen eines Generators mit Kompounderregung	λ	Faktor zur Berechnung des Dauerkurzschlußstromes
I_k'', I_{k3}''	Dreipoliger Anfangs-Kurzschlußwechselstrom	μ	Faktor zur Berechnung des Ausschaltwechselstromes
i_{DC}	Abklingende Gleichstromkomponente des Kurzschlußstromes	μ_0	Absolute Permeabilität des Vakuums, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
i_p	Stoßkurzschlußstrom	ρ	Spezifischer Widerstand
K	Korrekturfaktor für Impedanzen	φ	Phasenwinkel
$M_{(1)}, M_{(2)}$	Koppelimpedanz im Mit- und Gegen-system	4.2 Indizes	
P_{krT}	Transformatorwicklungsverluste bei Bemessungsstrom	(1)	Komponente des Mitsystems
p	Erdseilreduktionsfaktor	(2)	Komponente des Gegensystems
q	Faktor zur Berechnung des Ausschaltwechselstromes von Asynchronmotoren	(0)	Komponente des Nullsystems
q_n	Nennquerschnitt	an	Anzug-
R, r	Resistanz, absoluter bzw. bezogener Wert	f	Fiktiv
R_G	Fiktive Resistenz einer Synchronmaschine bei der Berechnung von I_k'' und i_p	k oder k3	Dreipoliger Kurzschluß
S_k''	Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung (Scheinleistung)	k1	Einpoliger Kurzschluß, Erdkurzschluß
S_r	Bemessungsscheinleistung eines elektrischen Betriebsmittels	k2	Zweipoliger Kurzschluß ohne Erdberührung
t_{min}	Mindestschaltverzögerung	k2E, kE2E	Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung, Leiterstrom bzw. Erdstrom
U_{fmax}	Maximale Erregerspannung	kEE	Doppelerdkurzschluß
U_{fr}	Erregerspannung bei Bemessungsbetrieb	max	Maximal
U_n	Netzennspannung (verkettete Spannung)	min	Minimal
U_r	Bemessungsspannung (verkettete Spannung)	n	Nennwert (siehe IEV 151-04-01), Begriff nach DIN 40 200 (siehe auch DIN 1304 Teil 1 und Teil 3)
u_{kr}	Bemessungswert der Kurzschlußspannung in %	r	Bemessungswert (siehe IEV 151-04-03), Begriff nach DIN 40200 (siehe auch DIN 1304 Teil 1 und Teil 3)
u_{Rr}	Bemessungswert des ohmschen Spannungsfalls in %	rsl	Resultierend
$\underline{U}_{(1)}, \underline{U}_{(2)}, \underline{U}_{(0)}$	Spannung im Mit-, Gegen- und Nullsystem	t	Transformierte Größe
$\ddot{u}_f$	fiktives Übersetzungsverhältnis	A, B, C	Sammelschiene, Anlage
$\ddot{u}_r$	Bemessungswert der Transformatorübersetzung (Stufenschalter in Mittelstellung); $\ddot{u}_r \geq 1$	E	Erde
X, x	Reaktanz, absoluter bzw. bezogener Wert	EBT	Eigenbedarfstransformator
X_d, X_q	Synchrone Reaktanz in der Längs- bzw. Querachse	F	Fehler-, Kurzschlußstelle
X_d'', X_q''	Subtransiente Reaktanz einer Synchronmaschine (gesättigter Wert) in der Längs- bzw. Querachse	G	Generator
X_{dK}	Fiktive Reaktanz eines Generators mit Kompounderregung bei Dauerkurzschluß an den Klemmen unter Berücksichtigung der Erregung	K	Klemme
x_d gesättigt	Kehrwert des Leerlauf-Kurzschlußverhältnisses	KW	Kraftwerksblock (Generator und Blocktransformator)
Z, z	Impedanz, absoluter bzw. bezogener Wert	L	Leitung (Freileitung oder Kabel)
Z_k	Kurzschlußimpedanz eines Drehstromnetzes	L1, L2, L3	Leiter des Drehstromnetzes
		M	Asynchronmotor oder Gruppe von Asynchronmotoren
		M —	Ohne Motor(en)
		MS	Mittelspannungsseite eines Transformators
		N	Sternpunkt des Drehstromsystems
		OS	Oberspannungsseite eines Transformators
		Q	Anschlußpunkt eines Netzes
		T	Transformator
		US	Unterspannungsseite eines Transformators
		4.3 Nebenzeichen, oben rechts	
		~	Anfangswert, subtransienter Wert
		˘	Resistanz oder Reaktanz je Längeneinheit

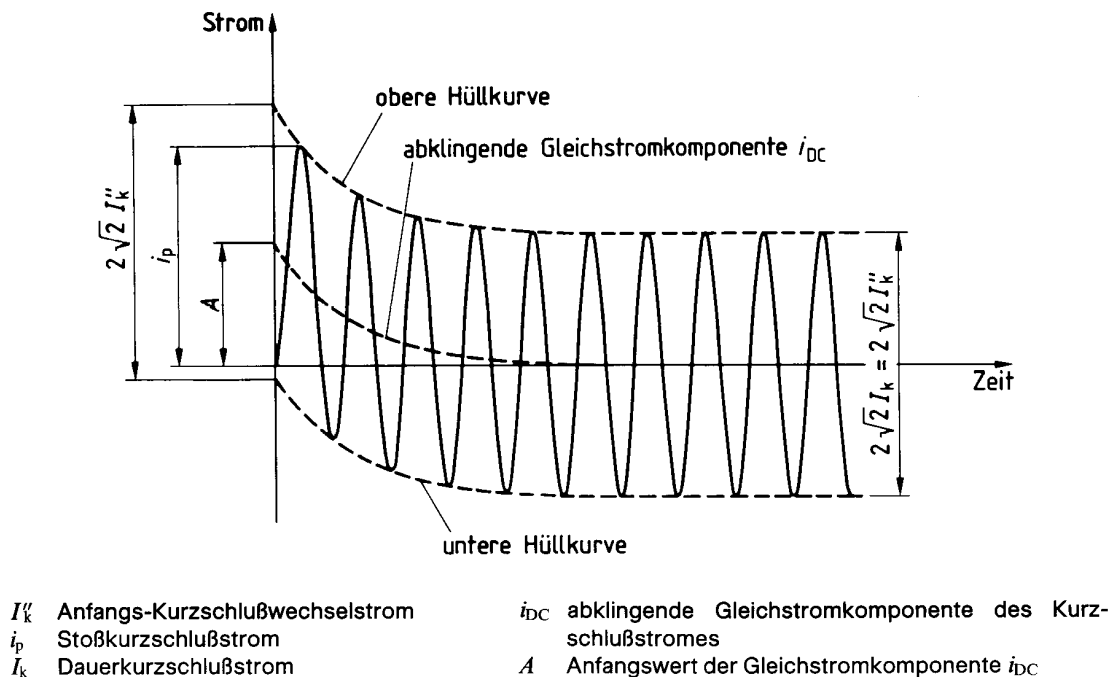


Bild 1. Zeitlicher Verlauf des Kurzschlußstromes bei generatorfernem Kurzschluß (schematischer Verlauf).

5 Voraussetzungen für die Berechnung

Eine vollständige Berechnung der Kurzschlußströme liefert den zeitlichen Verlauf der Ströme an der Kurzschlußstelle vom Beginn des Kurzschlusses bis zu seinem Ende abhängig vom Augenblickswert der Spannung beim Eintritt des Kurzschlusses (siehe Bild 1 und Bild 12).

In den meisten praktischen Fällen ist eine solche Berechnung jedoch nicht notwendig. Abhängig vom Anwendungsfall interessiert der Effektivwert der Wechselstromkomponente des Kurzschlußstromes und der höchste Stoßkurzschlußstrom i_p nach dem Kurzschlußeintritt. Der Stoßkurzschlußstrom i_p hängt von der Frequenz f (50 Hz oder 60 Hz) und der Zeitkonstante der abklingenden Gleichstromkomponente ab, d.h. vom Verhältnis R/X der Kurzschlußimpedanz Z_k ; er wird erreicht, wenn der Kurzschluß im Nulldurchgang der Spannung eintritt.

In vermaschten Netzen treten mehrere Zeitkonstanten auf. Daher ist es nicht möglich, auf einfache Weise die exakten Werte für i_p und i_{DC} zu berechnen. Spezielle Näherungsverfahren zur Berechnung von i_p mit ausreichender Genauigkeit sind im Abschnitt 9.1.3.2 enthalten.

Zur Bestimmung des unsymmetrischen Ausschaltstromes kann für die abklingende Gleichstromkomponente i_{DC} des Kurzschlußstromes (siehe Bild 1 und Bild 12) mit genügender Genauigkeit folgende Gleichung verwendet werden:

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k e^{-2\pi f t R/X} \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- I Anfangs-Kurzschlußwechselstrom Nennfrequenz
 f 50 Hz bzw. 60 Hz
 t Zeit
 R/X Verhältnis nach den Verfahren in den Abschnitten 9.1.1.2, 9.1.2.2 oder 9.1.3.2.

In vermaschten Netzen nach Abschnitt 9.1.3.2 ist bei Verfahren B die rechte Seite der Gleichung (1) mit 1,15 zu multiplizieren, während bei Verfahren C die Ersatzfrequenz wie folgt gewählt werden soll:

$2\pi f t$	$< 2\pi$	$< 5\pi$	$< 10\pi$	$< 25\pi$
f_c/f	0,27	0,15	0,092	0,055

mit $f = 50$ Hz oder $f = 60$ Hz.

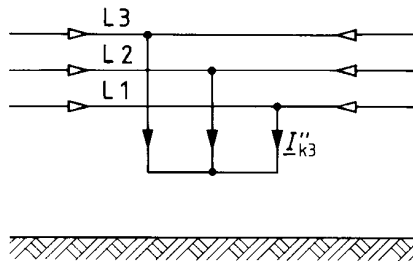
Die Berechnung der größten und der kleinsten Kurzschlußströme beruht auf folgenden Vereinfachungen:

- 1) Für die Dauer des Kurzschlusses tritt keine Änderung in der Art des Kurzschlusses ein, d.h., ein dreipoliger Kurzschluß bleibt dreipolig und ein einpoliger Erdkurzschluß bleibt einpolig während der gesamten Kurzschlußdauer.
- 2) Angenommen wird, daß sich der Stufenschalter von Stelltransformatoren auf der Hauptanzapfung befindet.
- 3) Lichtbogenwiderstände werden nicht berücksichtigt.

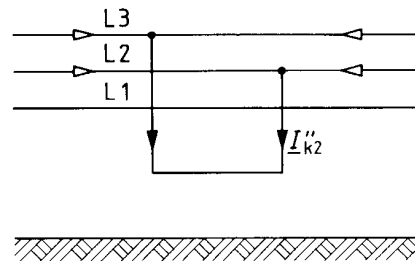
Die vorstehenden Annahmen treffen in den zu untersuchenden Drehstromnetzen nicht genau zu, es erscheint jedoch ausreichend in dieser Weise vorzugehen, ohne unzulässig große Fehler in Kauf nehmen zu müssen.

Bei symmetrischen und unsymmetrischen Kurzschlüssen in Bild 2 ist es nützlich, die Kurzschlußströme mit Hilfe des Verfahrens der symmetrischen Komponenten zu berechnen (siehe Abschnitt 8.2).

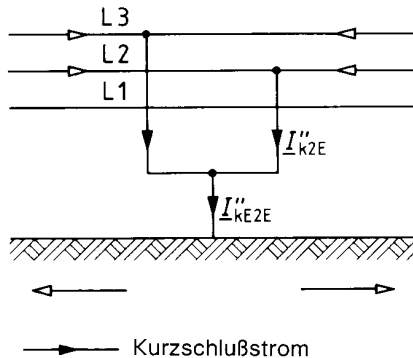
a) Dreipoliger Kurzschluß (symmetrischer Kurzschluß)



b) Zweipoliger Kurzschluß ohne Erdberührung



c) Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung



a) Einpoliger Erdkurzschluß

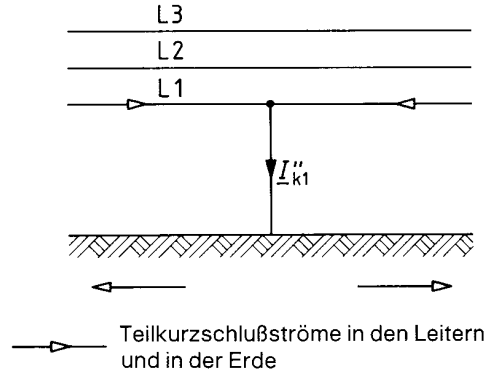


Bild 2. Beschreibung der Kurzschlüsse und ihrer Ströme. Die Richtung der Pfeile wurde willkürlich gewählt.

6 Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle

In allen in Hauptabschnitt eins bis Hauptabschnitt drei behandelten Fällen können die Kurzschlußströme an der Kurzschlußstelle F mit Hilfe einer Ersatzspannungsquelle bestimmt werden. Kenntnisse über die passiven Lasten, die Stellung der Stufenschalter von Transformatoren, den Erregungszustand der Generatoren usw. sind dann entbehrlich. Zusätzliche Berechnungen der verschiedenen möglichen Lastflüsse unmittelbar vor dem Kurzschluß sind überflüssig.

Die Ersatzspannungsquelle ist die einzige wirksame Spannung des Netzes. Die inneren Spannungen aller Netzeinspeisungen, Synchron- und Asynchronmaschinen werden hinter ihren Innenimpedanzen kurzgeschlossen (siehe Abschnitt 8.3.1).

Weiterhin sollen bei diesem Verfahren alle Leitungskapazitäten mit Ausnahme der Kapazitäten im Nullsystem (siehe Abschnitt 8.3.1 und Abschnitt 11.4) und alle Queradmittanzen von passiven Lasten vernachlässigt werden.

In vielen Fällen sind Hochspannungstransformatoren mit Reglern und unter Last verstellbaren Stufenschaltern ausgerüstet, während Transformatoren zur Speisung von Niederspannungsnetzen nur wenige Stufen haben, z.B. +2,5 oder +4 %. Bei generatorfernen Kurzschlüssen können die tatsächlich eingestellten Regler- und Stufenstellungen der Transformatoren ohne unzulässigen Verlust an Genauigkeit bei diesem Verfahren außer acht gelassen werden.

Die Nachbildung der Betriebsmittel durch ihre Impedanzen nach den Abschnitten 8.3.2 und 11.5.3 gilt im Zusammenhang mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle unabhängig davon, ob es sich um einen generatorfernen Kurzschluß nach Hauptabschnitt eins oder

einem generatornahen Kurzschluß nach Hauptabschnitt zwei handelt.

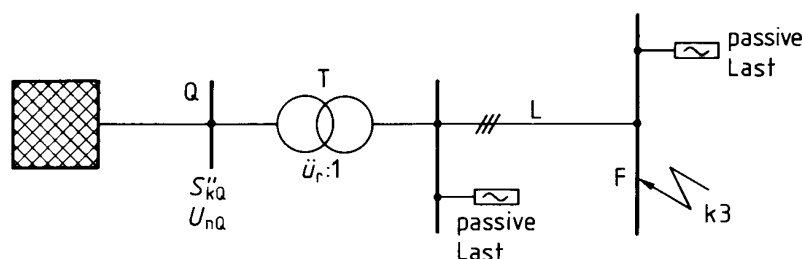
Bild 3 zeigt an einem Beispiel die Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle F als einzige wirksame Spannung bei der Speisung eines Netzes auf der Unterspannungsseite eines Transformators. Alle anderen treibenden Spannungen des Netzes werden kurzgeschlossen. Somit wird die Netzeinspeisung in Bild 3 a nur durch ihre innere Impedanz Z_Q (siehe Abschnitt 8.3.2.1) nachgebildet. Parallele Admittanzen (beispielsweise Leitungskapazitäten und passive Lasten) werden nicht berücksichtigt, wenn man bei der Berechnung der Kurzschlußströme nach Bild 3 b vorgeht.

Die Ersatzspannungsquelle $cU_n/\sqrt{3}$ (siehe Abschnitt 3.15) an der Kurzschlußstelle F setzt sich zusammen aus dem Spannungsfaktor c , der Netznennspannung U_n und $\sqrt{3}$. Der Faktor c ist unterschiedlich bei der Berechnung der größten und der kleinsten Kurzschlußströme. Wenn andere Normen dem nicht entgegenstehen, wird es als angemessen angesehen, den Faktor c nach Tabelle I zu wählen unter Berücksichtigung der Erfahrung, daß die höchste Spannung während des üblichen Betriebes näherungsweise in Niederspannungsnetzen nicht mehr als +5 % oder in Hochspannungsnetzen nicht mehr als +10 % von der Netznennspannung abweicht.

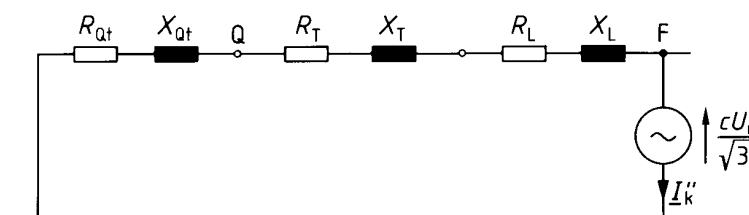
Bei diesem Vorgehen werden bei der Berechnung der größten Kurzschlußströme für die Ersatzspannungsquelle folgende Werte nach Tabelle I eingesetzt:

$$\begin{aligned} cU_n/\sqrt{3} &= 1,00 U_n/\sqrt{3} \\ &\text{in Niederspannungsnetzen 230/400 V, 50 Hz (2a)} \\ cU_n/\sqrt{3} &= 1,05 U_n/\sqrt{3} \\ &\text{in allen anderen Niederspannungsnetzen (2b)} \\ cU_n/\sqrt{3} &= 1,10 U_n/\sqrt{3} \\ &\text{in Mittel- und Hochspannungsnetzen. (2c)} \end{aligned}$$

a) Aufbau des Drehstromnetzes



b) Ersatzschaltplan im Mitsystem

Bild 3. Beispiel zur Veranschaulichung der Berechnung von I''_k mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle.Tabelle I. Spannungsfaktor c

Nennspannung U_n	Spannungsfaktor c zur Berechnung	
	des größten Kurzschlußstromes $c_{\max}$	des kleinsten Kurzschlußstromes $c_{\min}$
Niederspannung 100 V bis 1 000 V (siehe DIN IEC 38/05.87, Tabelle I) a) 230 V/400 V b) sonstige Spannungen	1,00 1,05	0,95 1,00
Mittelspannung > 1 kV bis 35 kV (siehe DIN IEC 38, Tabelle III)	1,10	1,00
Hochspannung > 35 kV bis 230 kV (siehe DIN IEC 38, Tabelle IV) 380 kV (siehe Erläuterungen)	1,10 1,10	1,00 1,00
Anmerkung: cU_n sollte die höchste Spannung U_m für Betriebsmittel in Netzen nicht überschreiten.		

Hauptabschnitt eins – Netze mit Kurzschlußströmen ohne abklingende Wechselstromkomponente (Generatorferner Kurzschluß)

7 Allgemeine Gesichtspunkte

Dieser Hauptabschnitt beschäftigt sich mit Kurzschlußströmen, bei denen während des Kurzschlusses weder eine Änderung der Spannung bzw. der Spannungen auftritt, die den Kurzschluß speisen (d.h. quasistationäre Spannungsbedingung), noch eine merkliche Änderung der Impedanz des Netzes (d.h. konstante Impedanz der Betriebsmittel).

Beim generatorfernen Kurzschluß kann deshalb der zu erwartende Kurzschlußstrom aus der Summe der folgenden beiden Komponenten bestimmt werden.

- Wechselstromkomponente mit konstanter Amplitude während des gesamten Kurzschlusses
- Gleichstromkomponente mit dem Anfangswert A , abklingend auf Null.

Bild 1 zeigt den schematischen Verlauf des Kurzschlußstromes bei generatorfernem Kurzschluß. Die symmetrischen Ströme I''_k und I_k sind Effektivwerte und haben nahezu gleiche Größe. Diese Annahme trifft häufig in Netzen zu, die von ausgedehnten Hochspannungsnetzen über Transformatoren gespeist werden, d.h. bei generatorfernem Kurzschluß.

Einzelnen über einen Transformator nach Bild 3 gespeiste Kurzschlüsse dürfen von vornherein als generatorferne Kurzschlüsse betrachtet werden, wenn $X_{TUS} \geq 2 X_{Qt}$ gilt, wobei X_{Qt} nach Abschnitt 8.3.2.1 und X_{TUS} nach Abschnitt 8.3.2.2 zu berechnen sind.

8 Kurzschlußparameter

8.1 Symmetrischer Kurzschluß

Der symmetrische Kurzschluß in einem Dreileiter-Drehstromnetz nach Bild 2 a ist von besonderem Interesse, weil dieser Fehler häufig zu den größten zu erwartenden Kurzschlußströmen führt und die Berechnung verhältnismäßig einfach wird auf Grund der Symmetrie des Kurzschlusses.

Zur Berechnung des Kurzschlußstromes genügt es, nur die von der Kurzschlußstelle aus betrachtete Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)} = Z_k$ (siehe Abschnitt 8.3.1) zu berücksichtigen.

Einzelheiten der Berechnung werden in Abschnitt 9 angegeben.

8.2 Unsymmetrischer Kurzschluß

Folgende unsymmetrische Kurzschlüsse werden in dieser Norm behandelt:

- Zweipoliger Kurzschluß ohne Erdberührung (siehe Bild 2 b)
- Zweipoliger Kurzschluß mit Erdberührung (siehe Bild 2 c)
- Einpoliger Erdkurzschluß (siehe Bild 2 d)

Im allgemeinen ist der dreipolige Kurzschlußstrom der größte. Bei einem Kurzschluß in der Nähe eines Transformators mit Sternpunktterdung oder eines Sternpunktbildners in einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung kann jedoch der einpolige Erdkurzschlußstrom größer als der dreipolige Kurzschlußstrom werden. Dies ist besonders bei Transformatoren der Schaltgruppen Yz, Dy und Dz dann zu erwarten, wenn die y- oder z-Wicklung auf der US-Seite des Transformators geerdet wird.

Die Berechnung der Ströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen in Drehstromnetzen wird durch Verwendung der symmetrischen Komponenten vereinfacht. Dieses Verfahren erfordert nur die Berechnung von drei unabhängigen Komponentensystemen.

Bei Anwendung dieses Verfahrens ergeben sich die Ströme in den Leitern L 1, L 2, L 3 durch Rücktransformation der Ströme der drei Komponentensysteme:

- Strom im Mitsystem $I_{(1)}$
- Strom im Gegensystem $I_{(2)}$
- Strom im Nullsystem $I_{(0)}$

Wird der Leiter L 1 als Bezugsleiter gewählt, so gilt für die Ströme I_{L1} , I_{L2} und I_{L3} :

$$I_{L1} = I_{(1)} + I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3 \text{ a})$$

$$I_{L2} = a^2 I_{(1)} + a I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3 \text{ b})$$

$$I_{L3} = a I_{(1)} + a^2 I_{(2)} + I_{(0)} \quad (3 \text{ c})$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{1}{2} \sqrt{3}; a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{1}{2} \sqrt{3} \quad (4)$$

Jedes der drei Komponentensysteme hat seine eigenen Impedanzen (siehe Abschnitt 8.3).

Bei diesem Verfahren wird vorausgesetzt, daß die Betriebsmittel symmetrisch aufgebaut sind bzw. symmetriert werden wie bei der Verdrillung von Freileitungen.

Genügende Genauigkeit ist jedoch auch bei unverdrillten Leitungen zu erwarten.

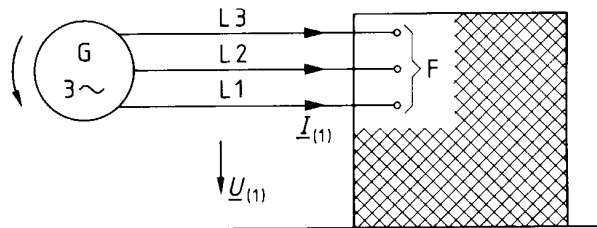
8.3 Kurzschlußimpedanzen

In dieser Norm unterscheidet man zwischen Kurzschlußimpedanzen an der Kurzschlußstelle F und Kurzschlußimpedanzen der einzelnen elektrischen Betriebsmittel. Entsprechend der Berechnung mit symmetrischen Komponenten werden Mitimpedanzen, Gegenimpedanzen und Nullimpedanzen unterschieden, wobei jeweils die Kurzschlußimpedanzen gemeint sind.

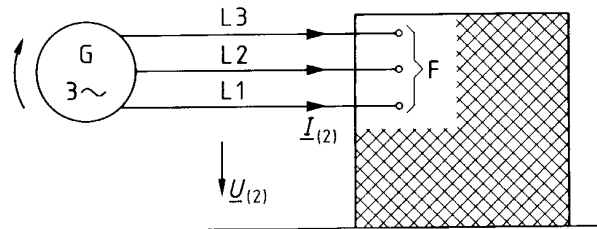
8.3.1 Kurzschlußimpedanzen an der Kurzschlußstelle F

Die Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)}$ an der Kurzschlußstelle F ergibt sich nach Bild 4 a, wenn ein symmetrisches mitlaufendes System von Spannungen an der Kurzschlußstelle F angelegt wird und wenn alle Synchron- und Asynchronmaschinen durch ihre Innenimpedanzen ersetzt werden. Bei der Berechnung der Kurzschlußströme nach Abschnitt 9 werden alle Leitungskapazitäten im Mitsystem und alle anderen Queradmittanzen von passiven Lasten vernachlässigt. Bei der Berechnung der dreipoligen Kurzschlußströme ist $Z_{(1)} = Z_k$ die einzige wirksame Impedanz (Nach Abschnitt 3.20.1 und Abschnitt 3.20.4).

a) Kurzschlußmitimpedanz $Z_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{I_{(1)}}$



b) Kurzschlußgegenimpedanz $Z_{(2)} = \frac{U_{(2)}}{I_{(2)}}$



c) Kurzschlußnullimpedanz $Z_{(0)} = \frac{U_{(0)}}{I_{(0)}}$

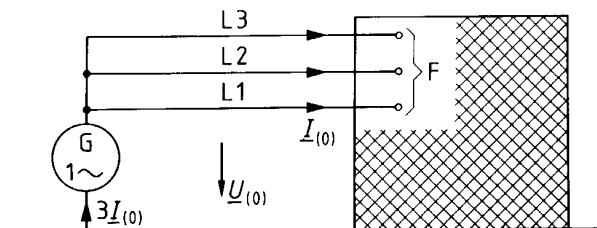


Bild 4. Kurzschlußimpedanzen eines Drehstromnetzes an der Kurzschlußstelle F.

Die Kurzschlußgegenimpedanz $Z_{(2)}$ an der Kurzschlußstelle F ergibt sich nach Bild 4 b, wenn ein symmetrisches gegenläufiges System von Spannungen an der Kurzschlußstelle F angelegt wird. Bei der Berechnung der Kurzschlußströme nach Abschnitt 9 werden alle Leitungskapazitäten im Gegensystem und alle anderen Queradmittanzen von passiven Lasten vernachlässigt.

Mit- und Gegenimpedanzen können nur bei rotierenden Maschinen voneinander abweichen. In diesem Teil, in dem generatorferne Kurzschlüsse behandelt werden, darf in jedem Fall $Z_{(2)} = Z_{(1)}$ gesetzt werden.

Die Kurzschlußnullimpedanz $Z_{(0)}$ an der Kurzschlußstelle F ergibt sich nach Bild 4 c, wenn eine Wechselspannung zwischen den kurzgeschlossenen Leitern und der gemeinsamen Rückleitung angelegt wird (zu der gemeinsamen Rückleitung gehören z.B. Erde, Erdungsanlagen, Nulleiter, Erdseile, Kabelmäntel, Kabelbewehrung usw.).

Bei der Berechnung von unsymmetrischen Kurzschlußströmen in Mittel- und Hochspannungsnetzen und bei Verwendung der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlußstelle sind in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder in Netzen mit Erdschlußkompensation die Leitungskapazitäten und die Queradmittanzen von passiven Lasten im Nullsystem zu berücksichtigen.

Die Vernachlässigung der Leitungskapazitäten in Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung führt zu Ergebnissen für die Kurzschlußströme, die größer sind als die tatsächlichen Kurzschlußströme. Die Abweichung hängt von mehreren Einflußgrößen des Netzes ab, z.B. von der Länge der Leitungen zwischen Transformatoren mit geerdeten Sternpunkten.

In Niederspannungsnetzen dürfen Leitungskapazitäten und Queradmittanzen von passiven Lasten vernachlässigt werden.

Bis auf Sonderfälle unterscheidet sich die Kurzschlußnullimpedanz von der Kurzschlußmitimpedanz.

8.3.2 Kurzschlußimpedanzen von elektrischen Betriebsmitteln

Für Netzeinspeisungen, Transformatoren, Freileitungen, Kabel, Drosselspulen und ähnliche Betriebsmittel gilt immer:

$$Z_{(1)} = U_{(1)}/I_{(1)} = Z_{(2)} = U_{(2)}/I_{(2)}$$

Bei der Berechnung der Kurzschlußnullimpedanz beispielsweise für eine Leitung (siehe Bild 5 d) wird $Z_{(0)} = U_{(0)}/I_{(0)}$ bestimmt durch Anlegen einer Wechselspannung zwischen den drei kurzgeschlossenen Leitern und der gemeinsamen Rückleitung (z.B.: Erde, Erdungsanlage, Nulleiter, Erdseil, Kabelmantel und Kabelbewehrung). In diesem Falle fließt der dreifache Nullstrom über die gemeinsame Rückleitung.

Die Kurzschlußnullimpedanz $Z_{(0)} = U_{(0)}/I_{(0)}$ unterscheidet sich im Regelfall von der Kurzschlußmitimpedanz. $Z_{(0)}$ kann größer, gleich oder kleiner als $Z_{(1)}$ sein.

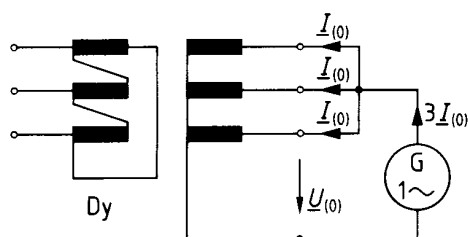
8.3.2.1 Netzeinspeisungen

Wenn ein Kurzschluß nach Bild 6 a aus einem Netz gespeist wird, von dem nur die Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung S_{kQ} oder der Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_{kQ} am Anschlußpunkt Q des Netzes bekannt ist, dann sollte die Netzzinnenimpedanz Z_Q (Kurzschlußmitimpedanz) am Anschlußpunkt Q berechnet werden mit:

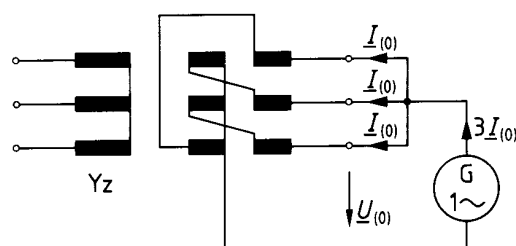
$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S_{kQ}'} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}'} \quad (5a)$$

Wenn der Kurzschluß nach Bild 6 b über einen Transformator aus einem Hochspannungsnetz gespeist wird, von dem nur die Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung S_{kQ} oder der Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I_{kQ} am Anschlußpunkt Q des Netzes bekannt ist, dann kann die

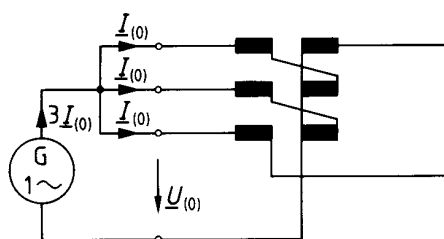
a) Transformator der Schaltgruppe Dy



b) Transformator der Schaltgruppe Yz



c) Sternpunktbildner in Zick-Zack-Schaltung



d) Leitung (Freileitung oder Kabel)

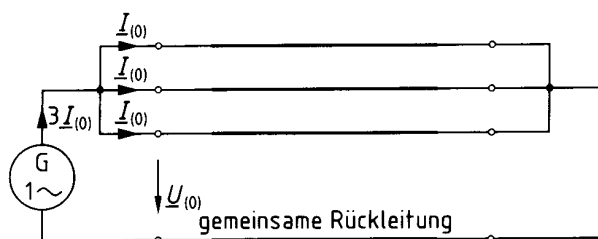
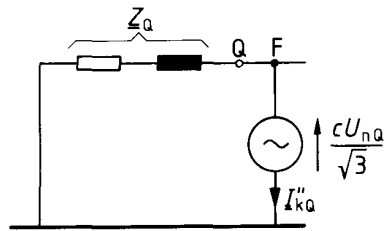
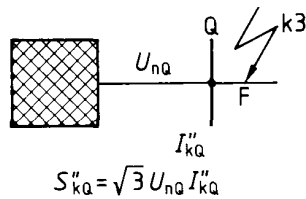


Bild 5. Messung der Kurzschlußnullimpedanzen von elektrischen Betriebsmitteln (Beispiele).

a) Ohne Transformator



b) Mit Transformator

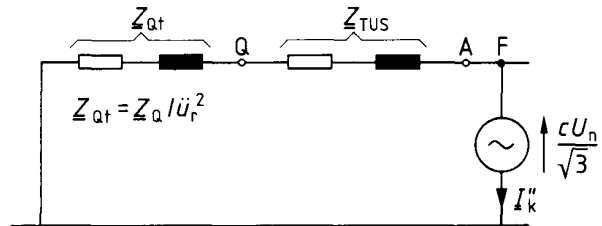
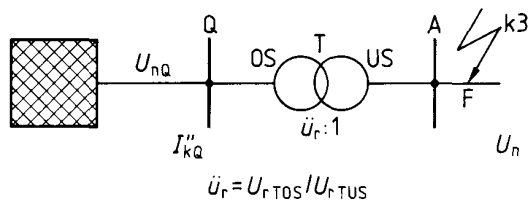


Bild 6. Netzschaltplan und Ersatzschaltplan für Netzeinspeisungen.

Netzzinnenimpedanz Z_{Qt} , bezogen auf die Unterspannungsseite des Transformators, berechnet werden mit:

$$Z_{Qt} = \frac{c U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{\ddot{u}_r^2} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{\ddot{u}_r^2} \quad (5b)$$

Hierin bedeuten:

- U_{nQ} Nennspannung des Netzes am Anschlußpunkt Q
- S''_{kQ} Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung am Anschlußpunkt Q des Netzes
- I''_{kQ} Anfangs-Kurzschlußwechselstrom am Anschlußpunkt Q des Netzes
- c Spannungsfaktor (siehe Abschnitt 3.16, Tabelle 1 und Gleichung (2))
- $\ddot{u}_r$ Bemessungswert der Transformatorübersetzung mit Stufenschalter auf der Hauptanzapfung (siehe auch Abschnitt 8.4).

Für Hochspannungs-Netzeinspeisungen mit Freileitungen bei $U_n > 35$ kV ist es im allgemeinen ausreichend, nur die Reaktanzen zu berücksichtigen, d. h. $Z_Q = 0 + jX_Q$ zu setzen. In allen anderen Fällen kann, wenn der Widerstand der Netzeinspeisung R_Q nicht bekannt ist, $R_Q = 0,1 X_Q$ eingeführt werden bei $X_Q = 0,995 Z_Q$.

Die Anfangs-Kurzschlußwechselstromleistung S''_{kQ} oder der Anfangs-Kurzschlußwechselstrom I''_{kQ} auf der Oberspannungsseite des einspeisenden Transformators ist von dem Energie-Versorgungs-Unternehmen anzugeben.

Häufig wird die Angabe der Kurzschlußnullimpedanz einer Netzeinspeisung für die Berechnung nicht benötigt (siehe Bild 6 b). In besonderen Fällen kann es jedoch notwendig sein, diese Impedanz zu berücksichtigen.

8.3.2.2 Transformatoren

Bei Zweiwicklungstransformatoren kann die Kurzschluß-

impedanz im Mitsystem $Z_T = R_T + jX_T$ aus den Bemessungsdaten des Transformators bestimmt werden:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (8)$$

Hierin bedeuten:

- U_{rT} Bemessungsspannung des Transformators auf der Ober- oder Unterspannungsseite
- I_{rT} Bemessungsstrom des Transformators auf der Ober- oder Unterspannungsseite
- S_{rT} Bemessungsscheinleistung des Transformators
- P_{krT} Gesamte Wicklungsverluste des Transformators bei Bemessungsstrom
- u_{kr} Bemessungswert der Kurzschlußspannung in %
- u_{Rr} Bemessungswert des ohmschen Spannungsfalls in %.

Die benötigten Daten können dem Typschild entnommen oder vom Hersteller erfragt werden.

Die Resistanz kann aus den Wicklungsverlusten des Transformators bei Bemessungsstrom ermittelt werden.

Das Verhältnis X/R nimmt im allgemeinen mit der Transformatorleistung zu. Bei Transformatoren großer Leistung ist die Resistanz so klein, daß es bei der Berechnung des Anfangs-Kurzschlußwechselstromes ausreicht, anstelle der Impedanz nur die Reaktanz anzunehmen. Der Widerstand muß berücksichtigt werden, wenn der Stoßkurzschlußstrom i_p oder die abklingende Gleichstromkomponente i_{DC} berechnet werden soll.

Die Kurzschlußnullimpedanzen $Z_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ von Transformatoren mit zwei oder mehr Wicklungen können vom Hersteller erfragt werden.

Anmerkung: Es ist ausreichend, die Impedanz Z_T für Transformatoren mit Stufenschalter nach Gleichung (6) zu berechnen.