Kurzschlußströme in Drehstromnetzen

Berechnung und Begrenzung

von

Dr.-Ing. Michael Walter

Dritte, unveränderte Auflage

Mit 124 Abbildungen

München und Berlin 1944
Verlag von R. Oldenbourg

Copr. 1935 R. Oldenbourg, München und Berlin
Photomechanische Ubertragung (Manuldruck) 1944
der Firma F. Ullmann G. m. b. H., Zwickau/Sa.
Printed in Germany

Vorwort zur ersten Auflage.

Im vorliegenden Buch werden die wesentlichsten Fragen, die bei Kurzschlüssen in Drehstromnetzen auftreten, zusammenhängend besprochen. Im einzelnen werden behandelt: die verschiedenen Kurzschlußarten, die Teil- und Gesamtwiderstände der Kurzschlußbahnen, die Größe der Kurzschlußströme sowie insbesondere deren Wirkung und Begrenzung. Schließlich wird auch das Ausschaltvermögen von Schaltern und Sicherungen, ferner die Berechnung der Kurzschlußausschaltleistung an beliebigen Netzstellen erörtert. Ausführliche Zahlenbeispiele sind an vielen Stellen des Buches zur Erhöhung der Anschaulichkeit eingestreut.

Einteilung und Behandlung des Stoffes entsprechen vorwiegend den Bedürfnissen des praktisch tätigen Ingenieurs und des Studierenden. Bei der Abfassung wurde bewußt darauf verzichtet, allzusehr auf Einzelheiten einzugehen und die Ableitung der Formeln zu bringen. Vielmehr wurde darauf Wert gelegt, nur das Wesentlichste in den Vordergrund zu stellen, und zwar in einer Art, wie man es in der Praxis braucht und wünscht, d. h. einfach und physikalisch anschaulich.

Der Verfasser hat sich in dem vorliegenden Buch weniger die Aufgabe gestellt, neue Probleme aufzuwerfen oder zu lösen, als vielmehr den im Schrifttum zerstreuten Stoff zusammenzufassen, systematisch zu ordnen und so dem Leser die Einführung in das Gebiet der Berechnung und Beherrschung der Kurzschlußströme zu erleichtern.

Für diejenigen Ingenieure, die in das Fragengebiet tiefer eindringen wollen und über die nötige Zeit verfügen, sind reichlich Literaturhinweise gegeben.

Berlin-Niederschönhausen, Juli 1935.

M. Walter.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Die zweite Auflage des vorliegenden Buches weist gegenüber der ersten Auflage verschiedene Verbesserungen und wesentliche Erweiterungen auf. Anlaß zu diesen Änderungen gab in der Hauptsache das Erscheinen der VDE-Regeln REH 1937, durch die eine Reihe neuer Begriffe eingeführt und ein einfaches Verfahren zur Berechnung der für die Auswahl von Schaltgeräten maßgebenden Kurzschlußströme empfohlen wird. Gleichzeitig ließen sich auch einige berechtigte Wünsche aus dem Leserkreise berücksichtigen.

Das Rechenverfahren nach den REH 1929 zur Ermittlung der Dauerkurzschlußströme konnte beibehalten werden. Die Berechnung der Stoßkurzschlußströme mußte dagegen in Anlehnung an die REH 1937 verbessert und erweitert werden. Besondere Beachtung fand darüber hinaus der Stoßkurzschluß-Wechselstrom, der für die Errechnung der Ausschaltströme als Grundgröße gebraucht wird. In diesem Zusammenhang mußte auch das Kapitel über das Schaltvermögen von Schaltern und Sicherungen gänzlich überarbeitet werden.

Außerdem wurden praktische Unterlagen zur Feststellung der im Betrieb auftretenden Spannungsabfälle an Kurzschluß-Drosselspulen und Angaben zur Bestimmung der Zerreißfestigkeit von Cu- und Al-Schienen an den entsprechenden Stellen in das Buch eingefügt.

Schließlich hat das Kapitel über die Berechnung der Kurzschlußströme in vermaschten und mehrfach gespeisten Netzen eine wesentliche Erweiterung erfahren und überdies ein Zahlenbeispiel aus der Praxis erhalten.

Berlin-Niederschönhausen, Oktober 1937.

M. Walter.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

A. Kurzschlußgefahren und Notwendigkeit der Kurzschlußstromberechnung 7

B. Fehlerarten in Drehstromnetzen 13

1. Allgemeine Grundlagen 13
2. Dreipoliger Kurzschluß 20
3. Zweipoliger Kurzschluß 21
4. Erdkurzschluß und Kurzschluß mit Erdberührung 22
5. Doppelerdschluß 24
6. Einpoliger Kurzschluß 27
7. Einfacher Erdschluß 29

C. Rechnungsgrößen für Hochspannungsanlagen 31

1. Nennstrom eines Generators bzw. Transformators 31
2. Streublindwiderstand und Ankerrückwirkungs-Blindwiderstand eines Drehstromgenerators je Wicklungsstrang 32
3. Blindwiderstand eines Transformators je Wicklungsstrang . . . 34
4. Blindwiderstand einer Kurzschluß-Drosselspule je Pol. 35
5. Blindwiderstand einer Freileitung je km und Phasenleiter. . . . 37
6. Blindwiderstand eines Drehstromkabels je km und Phasenleiter 39
7. Wirkwiderstand einer Freileitung bzw. eines Kabels je km und Phasenleiter 40
8. Widerstand des Kurzschlußlichtbogens 44
9. Scheinwiderstand eines Anlageteiles sowie einer gesamten Kurzschlußstrombahn 48

D. Stoß- und Dauerkurzschlußströme in Drehstromnetzen 50

1. Allgemeine Betrachtungen über die Berechnung der Kurzschlußströme 50
2. Stoßkurzschlußstrom 55
   a) Allgemeines über den Stoßkurzschlußstrom 55
   b) Kurzschluß an den Klemmen der Generatoren 58
   c) Kurzschluß im Netz 59
3. Stoßkurzschluß-Wechselstrom 60
4. Dauerkurzschlußstrom 61
   a) Allgemeines über den Dauerkurzschlußstrom 61
   b) Dauerkurzschlußstrom in Netzen ohne starre Spannung (Allgemeiner Fall) 62
   c) Dauerkurzschlußstrom in Netzen mit starrer Spannung (Sonderfall) 67

E. Wirkungen der Kurzschlußströme 70

1. Mechanische Wirkungen 70
   a) Mechanische Beanspruchung der Sammelschienen, Stützer und Durchführungen 71
   b) Mechanische Beanspruchung der Stromwandler 75

Seite

2. Thermische Wirkungen 81
a) Einfluß des Dauerkurzschlußstromes 85
b) Einfluß des Stoßkurzschlußstromes 86
3. Schlußbemerkungen 88

F. Begrenzung der Kurzschlußströme und ihrer Auswirkungen . . 88
1. Kurzschluß-Drosselspulen 95
2. Strombegrenzungsregler 97
3. Eisen-Schutzwiderstände und Hochspannungs-Schmelzsicherungen
4. Sonstige Mittel zur Begrenzung der Kurzschlußströme 103
5. Mittel zur Begrenzung der Auswirkungen der Kurzschlußströme . 105
6. Erhöhung der Betriebssicherheit eines übermäßig vermaschten Kabelnetzes 107

G. Schaltvermögen von Schaltern und Sicherungen 109
1. Allgemeine Betrachtungen 109
2. Begriffserklärungen 113
3. Elektrische Größen zur Kennzeichnung der Leistungsfähigkeit von Schaltern und Sicherungen 115
4. Auswahl der Schalter und Sicherungen 119
5. Ermittlung der Schaltströme und Schaltleistungen bei Kurzschluß in elektrischen Netzen 122

H. Erforderliche Unterlagen für Kurzschlußstrom-Berechnungen und Zahlenbeispiele aus der Praxis 125
1. Kurzschluß in einem Freileitungs-Ringnetz 126
α) Dreipoliger Kurzschluß 128
β) Zweipoliger Kurzschluß 133
γ) Diskussion des Zahlenbeispieles und ergänzende Bemerkungen . 134
2. Kurzschluß in einem Kabelnetz ohne Kurzschluß-Drosselspulen 137
α) Kraftwerk ohne Transformatoren 137
β) Kraftwerk mit Transformatoren 141
3. Kurzschluß in einem Kabelnetz mit Kurzschluß-Drosselspulen . . 144
4. Kurzschlüsse in einem Hochspannungsnetz mit mehreren Nennbetriebsspannungen 145

J. Kurzschlußströme in vermaschten und mehrfach gespeisten Netzen 149
1. Allgemeine Betrachtungen 149
2. Rechnerische Erfassung der Kurzschlußströme in verbundgespeisten Netzen 151
3. Zahlenbeispiel 153
α) Ermittlung der Stoßkurzschlußströme 155
β) Ermittlung der Ausschaltleistungen. 156
γ) Ermittlung der Dauerkurzschlußströme 158
δ) Diskussion des Zahlenbeispieles und Zusatzbemerkungen . . . 160
4. Schlußbemerkungen 161

Anhang: Kurventafeln zur Bestimmung des Erdschlußstromes von Freileitungen und Kabeln 162

Literaturverzeichnis 164

Sachverzeichnis 165

A. Kurzschlußgefahren und Notwendigkeit der Kurzschlußstromberechnung.

Kurzschlüsse entstehen in elektrischen Netzen dadurch, daß die Isolation zwischen den Phasenleitern[1]) überbrückt bzw. durchbrochen wird. Anlaß zu diesen Störungen geben gewöhnlich Überspannungen, Blitzeinschläge, Rauhreif, Sturm, Äste, Vögel, Ratten, falsche Schalthandlungen, Anhacken der Kabel usw.

Das Kurzschließen zweier oder dreier Leiter kann entweder in Form einer metallischen Berührung oder in Form eines Lichtbogens zustande

Abb. 1. Kurzschlußwirkungen an einem Kabelendverschluß.

kommen. Dementsprechend unterscheidet man in der Ausdrucksweise der Praxis die Benennungen: satter Kurzschluß (mitunter auch metallischer Kurzschluß genannt) und Lichtbogenkurzschluß. Beim satten Kurzschluß wird ein Verschweißen der Leiter nicht unbedingt vorausgesetzt. Diese Erscheinung tritt in der Praxis ja auch selten ein. Als satte Kurzschlüsse gelten vielmehr alle Kurzschlüsse mit geringer Spannung zwischen den Elektroden (bis etwa 500 V). Kenn-

[1]) In starr- oder halbstarrgeerdeten Netzen auch zwischen einem Phasenleiter und Erde.

zeichnend für den Lichtbogenkurzschluß hingegen ist der frei brennende Lichtbogen (vgl. Abb. 33 u. 34).

Kurzschlüsse können in elektrischen Anlagen sehr schwere Störungen hervorrufen. Ihre Wirkungen sind um so gefährlicher, je größer der Maschineneinsatz in den auf den Kurzschluß speisenden Kraftwerken ist und je stärker die Netze vermascht sind, und schließlich je länger die Kurzschlußdauer ist. Die Auswirkungen der Kurzschlüsse, die mechanischer und thermischer Natur sind, führen mitunter den Zusammenbruch des ganzen Betriebes für längere Zeit (mehrere Stunden oder Tage) herbei.

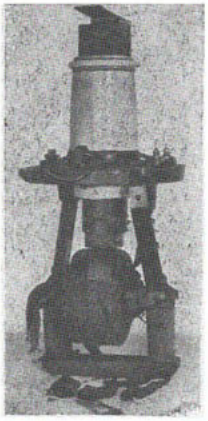


Abb. 2. Durch die dynamische Wirkung des Kurzschlußstromes zerstörter Topfstromwandler. (Ölkessel ist fortgenommen.)

Die mechanischen Wirkungen entstehen im wesentlichen durch die Stoßkurzschlußströme. Diese können zwischen den stromführenden Leitern der Anlageteile, wie: Sammelschienen, Kabelendverschlüsse, Stromwandler, Transformatoren usw. sehr hohe Kräfte durch Anziehung oder Abstoßung hervorrufen und die Anlageteile dadurch zerstören (Abb. 1 und 2). Falsch konstruierte oder unsachgemäß eingebaute Trennschalter können durch sehr hohe Stoßkurzschlußströme zuweilen auch aufgerissen werden (Abb. 2a).

Die thermischen Wirkungen werden ebenfalls durch die Stoßkurzschlußströme, in der Hauptsache jedoch durch die Dauerkurzschlußströme verursacht. Dauerkurzschlußströme sind wärmemäßig meist gefährlicher als Stoßkurzschlußströme, weil sie auf die Anlageteile wesentlich länger einwirken. Die üblichen Folgen einer thermischen Überbeanspruchung durch Kurzschlußströme sind: Das Verbrennen der Leiterisolation bei Stromwandlern, Transformatoren und Maschinen, das Ausglühen blanker Leiter und Kabel, das Spritzfeuer an schlecht angezogenen Leitungsklemmen und sonstigen Kontaktstellen u. a. m. Mitunter entstehen auch Ölbrände, die ein Verrußen und unter Umständen sogar ein Ausbrennen der Schaltanlagen zur Folge haben. Ferner können Ölschalterexplosionen entstehen, durch die manchmal ganze Schalthäuser auf- bzw. auseinandergerissen werden (Abb. 3 und 4). Derartige Explosionen stellen demnach eine Gefahr für Betriebsmannschaft und Gesamtbetrieb dar.

Beim Neubau großer Kraftwerke sowie bei Erweiterungen oder beim Zusammenschluß bereits bestehender Werke, ferner bei übermäßig vermaschten Netzen (vgl. z. B. Abb. 89) ist es stets geraten, die Kurzschlußströme an besonders gefährdeten Netzstellen vorher rechnerisch zu überprüfen und erforderlichenfalls Strombegrenzungsmaßnahmen zu treffen. Nur dadurch erspart man sich die unliebsamen Störungen, auf

die bereits hingewiesen wurde. In Kabel- und Freileitungsnetzen mit großer Kurzschlußleistung, insbesondere in solchen Netzen mit niedriger Betriebsspannung (unter 30 kV) und dementsprechend hoher Kurzschlußstromstärke muß man daher die einzelnen Anlageteile grundsätzlich nach der Kurzschlußleistung bzw. nach dem Kurzschlußstrom bemessen. Eine Auslegung der Anlageteile nach ihrer normalen Durchgangsleistung wäre abwegig. Nur in solchen Netzen, in denen die Kurzschlußströme

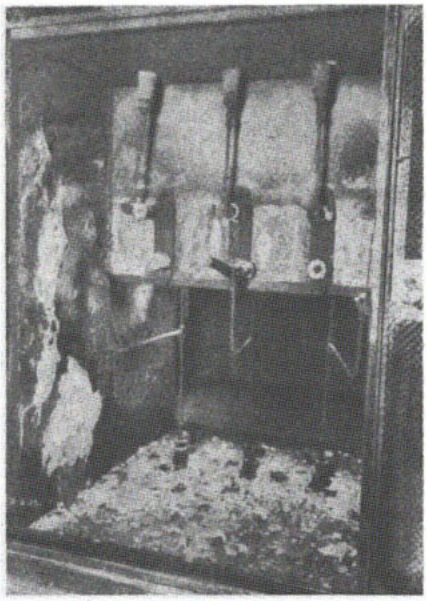


Abb. 2a. Kurzschlußwirkungen an einem Satz einpol. Trennschalter. Durch den an einer anderen Stelle des gleichen Leitungsstranges aufgetretenen Kurzschluß wurden diese Trennschalter unter dem Einfluß der dynamischen Wirkung des Stoßstromes aufgerissen. Es entstand somit ein neuer Kurzschlußherd.

stets klein bleiben, weil entweder die Kraftwerksleistung gering ist oder weil zwischen den Kraftwerken einerseits und einem beliebigen Netzpunkt andererseits große Scheinwiderstände liegen, kann man von der normalen Durchgangsleistung ausgehen.

Kurzschlußströme bzw. Kurzschlußleistungen lassen sich im wesentlichen durch Einbau von Strombegrenzungsdrosselspulen und selbsttätigen Stromreglern, durch Unterteilung der Sammelschienen bzw. durch zweckmäßige Auflockerung der Netzvermaschung[1]) auf ein erträgliches

[1]) Es soll hier keineswegs der Eindruck erweckt werden, daß der Verfasser grundsätzlich gegen jede Vermaschung der Netze wäre. Im Gegenteil, zweckmäßig durchgeführte Netzvermaschungen bieten seiner Ansicht nach oft sogar

Maß herabdrücken. Kurzschlußdrosselspulen, unterteilte Sammelschienen und insbesondere eine aufgelockerte Netzvermaschung bewirken außerdem, daß die Spannung im größten Teil des Netzes bei Kurzschluß nicht allzu stark zusammenbricht und beeinflussen damit im günstigen Sinne die Netzstabilität hinsichtlich der Pendelerscheinungen, d. h. sie erschweren wesentlich das Außertrittfallen der Generatoren, Ein-

Abb. 3. Folgen der Explosion eines Ölschalters.

ankerumformer, Motoren usw. Hierüber wird im Kapitel F unter 6 noch ausführlicher berichtet. Die Schutzrelais dagegen begrenzen die Auswirkungen der Kurzschlußströme nur zeitlich.

---

sehr große Vorteile. Diese bringen z. B. stets eine Verminderung der Spannungsabfälle im Normalbetrieb und mithin der Leitungsverluste, eine Herabsetzung der Überspannungsgefahr dadurch, daß sich die Wanderwellen in den einzelnen Leitungsringen leicht totlaufen können, eine gleichmäßige Belastung der Leitungsstränge und damit bessere Ausnützung der Leiterquerschnitte, eine erleichterte Betriebsführung bei Benutzung von Distanzschutzeinrichtungen usw.

Nachts und an Sonntagen arbeiten in den Kraftwerken vieler Netze aus wirtschaftlichen Gründen nur kleine Maschineneinheiten (Schwachlastbetrieb). Die Kurzschlußströme können dadurch während dieser Zeit unter Umständen kleiner werden als die Lastströme bei Vollastbetrieb. Die Ermittlung dieser minimalen Kurzschlußströme ist im besonderen für die Planung von Selektivschutzeinrichtungen erforder-

Abb. 4. Wirkungen der Explosion eines 30 kV-Ölschalters.

lich. In solchen Netzen dürfen nämlich die Schutzrelais nicht mit Überstrom-, sondern nur mit Unterimpedanz- oder Unterspannungsanregegliedern ausgerüstet sein. Andernfalls würde bei Kurzschluß die Anregung der Schutzrelais versagen und mithin die Auslösung der Netzschalter bis auf die Generatorenschalter ausbleiben[1]). Kurzschlußstrom-

[1]) Ausführlich s. in M. Walter, Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, Verlag R. Oldenbourg, München 1933, S. 14...27.

berechnungen haben sich also in vielen Fällen nicht nur auf die Ermittlung der maximalen Kurzschlußströme bei Vollastbetrieb zu erstrecken, sondern auch auf die Ermittlung der minimalen Kurzschlußströme bei Schwachlastbetrieb.

Die Berechnung der Kurzschlußströme wird in elektrischen Netzen somit im wesentlichen für folgende Zwecke benötigt:

1. Für die Ermittlung der dynamischen und thermischen Beanspruchung der Anlageteile,
2. für die Wahl der Anregeglieder und mitunter auch für die Auslegung der Meßglieder von Selektivschutzeinrichtungen,
3. für die Ermittlung des erforderlichen Kurzschluß-Schaltvermögens von Leistungsschaltern, Leistungstrennschaltern und Sicherungen,
4. für die Bemessung der Kurzschlußdrosselspulen.

Netzanlagen, die auf Grund sorgfältig durchgeführter Kurzschlußstromberechnungen geplant und mit geeigneten Schutzmitteln versehen sind, gewährleisten einen Betrieb mit hohem Sicherheitsgrad und bieten mithin auch wirtschaftliche Vorteile. Die Kurzschlußströme verlieren dadurch ihre Gefährlichkeit, denn die von ihnen durchflossenen Anlageteile halten den dynamischen und thermischen Beanspruchungen stand; die Zerstörungen bleiben klein und auf den Kurzschlußherd beschränkt. Die Stromausfälle, die durch Kurzschlüsse verursacht werden, halten sich in mäßigen Grenzen, und dementsprechend wird auch die Verärgerung der Stromabnehmer zurückgehen.

Bezüglich der Störungshäufigkeit durch Kurz- und Erdschlüsse in elektrischen Netzen ist folgendes zu bemerken:

In Netzen mit hochisoliertem Sternpunkt, also in Hochspannungsnetzen, wie sie in Mitteleuropa vorherrschen, kommen auf 100 Störungen etwa 20...10 Kurzschlüsse und 80...90 Erdschlüsse bzw. Wischer. Diese Aussage gilt vornehmlich für Netze mit Erdschluß-Kompensationseinrichtungen (Petersen-Spulen, Bauch-Löschtransformatoren u. dgl.), die das Übergehen der Erdschlüsse in Kurzschlüsse wirksam verhindern. In Netzen mit starr- oder halbstarrgeerdetem Systemnullpunkt (amerikanische Praxis) führt jede Erdberührung eines spannungführenden Anlageteils unmittelbar zu einem einpoligen Kurzschluß. Die Kurzschluß-Störhäufigkeit ist dadurch um ein Vielfaches größer als in Netzen mit hochisoliertem Sternpunkt[1]).

[1]) Ausführlicher hierüber s. in M. Walter, Grundsätzliche Betrachtungen über den Netzschutz, Elektr.-Wirtschaft 1937, S. 415.

B. Fehlerarten in Drehstromnetzen.

1. Allgemeine Grundlagen.

Als Einführung in die Betrachtung der Fehlerarten in Drehstromnetzen soll zunächst ein Kurzschluß in einem Einphasenwechselstromkreis kurz behandelt werden. In Abb. 5 speist der Generator G über eine kurze Speiseleitung den Motor M. Vor dem Motor möge an der Stelle K aus irgendeinem Grunde ein satter Kurzschluß zwischen den beiden Leitern entstehen. Hierdurch wird der vom Motor gebildete

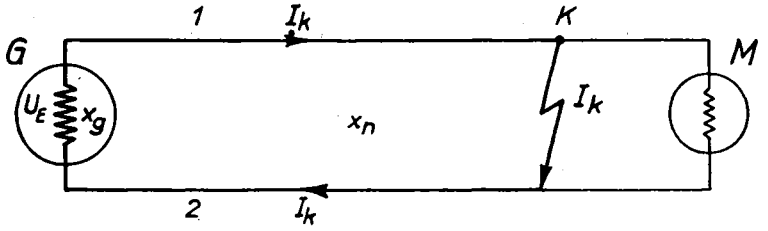


Abb. 5. Kurzschluß in einem Einphasen-Wechselstromkreis.

Widerstand kurzgeschlossen, und die im Generator induzierte Spannung U_E (unter U_E ist hier die EMK E zu verstehen) treibt nunmehr den Strom durch den Leiterkreis: Ständerwicklung — Leiter *1* — Fehlerstelle — Leiter *2*. Die Größe dieses Kurzschlußstromes I_k ist gegeben durch die Grundbeziehung

$$I_k = \frac{U_E}{x_g + x_n} = \frac{U_E}{x}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

in der x_g den Gesamtblindwiderstand des Generators einschließlich des Ankerrückwirkungsblindwiderstandes x_a, x_n den Blindwiderstand der Schleife: Leiter-Leiter und x den Gesamtblindwiderstand des Kurzschlußstromkreises in Ohm bedeuten.

Die im Generator induzierte Spannung U_E hat die Streuspannung U_s der Generatorwicklung und die Selbstinduktionsspannung U_k der Leiterschleife *1—2* zu überwinden. Sie setzt sich entsprechend der folgenden Beziehung zusammen

$$U_E = U_s + U_k \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

U_k ist gleich der Klemmenspannung des Generators bei Kurzschluß im Außenkreis und ergibt sich aus Gl. (2) zu

$$U_k = U_E - U_s \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (3)$$

In den Gl. (1) und (2) sind die Wirkwiderstände der Kurzschlußbahn vernachlässigt worden, da sie unter den angenommenen Umständen im Verhältnis zum Gesamtblindwiderstand sehr klein sind. Der Wirkwiderstand eines Generators beträgt nämlich nur etwa 7% seines Blindwiderstandes. Er wird daher bei Kurzschlußstromberechnungen fast immer vernachlässigt.

Bei den Speiseleitungen liegen die Verhältnisse etwas anders. Handelt es sich um Leitungen mit kurzen und dicken Leitern, wie in dem gewählten Beispiel, dann spielt der Wirkwiderstand ebenfalls keine Rolle. Sind die Leiter aber schwach und sehr lang, dann können ihre Wirkwiderstände die Größenordnung des Gesamtblindwiderstandes des Kurzschlußstromkreises erreichen und müssen deshalb in der Grundbeziehung (1) berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich die Gleichung

$$I_k' = \frac{U_E}{\sqrt{(x_g + x_n)^2 + r_n^2}} = \frac{U_E}{z} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

Hier bedeuten r_n den Wirkwiderstand der Schleife: Leiter-Leiter und z den Scheinwiderstand (Impedanz) der gesamten Kurzschlußstrombahn. Die Berücksichtigung des Wirkwiderstandes hat gewöhnlich zur Folge, daß der Kurzschlußstrom I_k' nach Gl. (4) kleiner wird als der nach Gl. (1) ermittelte Wert I_k.

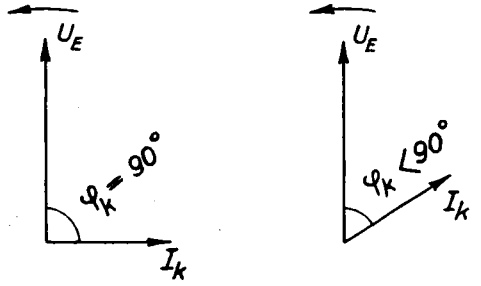


Abb. 6. Vektor-Diagramme für Strom und Spannung bei Kurzschluß.

In Abb. 6 ist die Phasenlage zwischen Strom und Spannung für den besprochenen Kurzschlußfall angedeutet. Dort ist links das Vektordiagramm für den rein induktiven Kurzschlußstromkreis, rechts das Diagramm für den gemischten Kurzschlußstromkreis, bestehend aus Wirk- und Blindwiderstand, dargestellt. In beiden Fällen eilt der Kurzschlußstrom der treibenden Spannung nach. φ_k bedeutet dabei den jeweiligen Kurzschlußphasenwinkel.

Nach diesen kurzen Erörterungen über die Vorgänge beim Kurzschluß im Wechselstromkreis können nunmehr die entsprechenden Betrachtungen über die Vorgänge in Drehstromkreisen angestellt werden. Das Beispiel eines solchen Kurzschlußfalles auf einer einfachen

Drehstromleitung zeigt die Abb. 7. In der dargestellten Netzanlage speisen die Kraftwerke *A* und *B* eine Drehstromleitung mit den Unterstationen *a* und *b*. Auf der Drehstromleitung möge plötzlich an der Stelle *K* ein satter Kurzschluß zwischen zwei Leitern (zweipoliger Kurzschluß) entstehen. Die Ströme beider Kraftwerke fließen dann über die Kurzschlußstelle (geringster Widerstand im Netz!), und die ent-

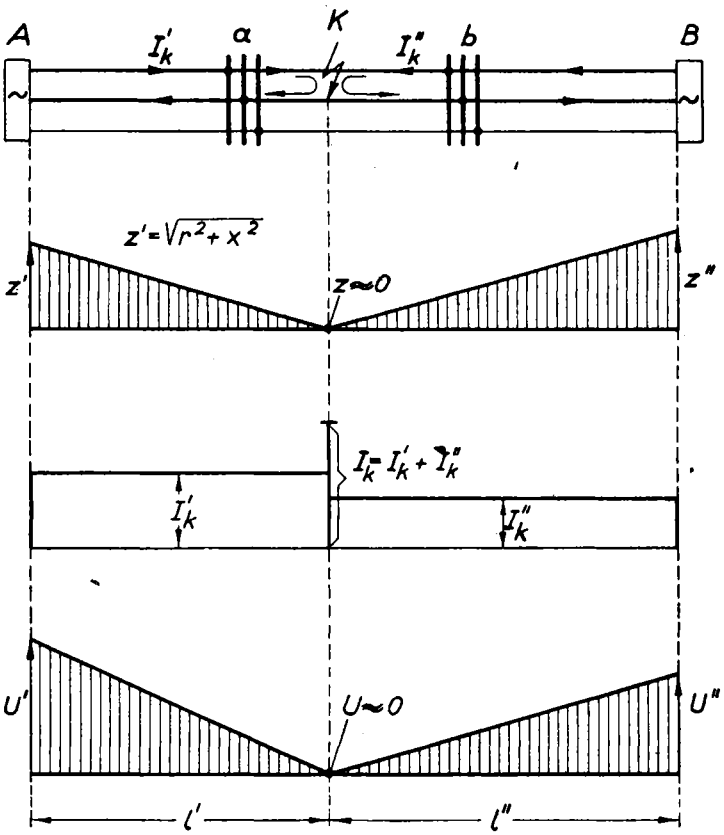


Abb. 7. Verlauf der charakteristischen Größen einer Drehstromleitung bei Kurzschluß.

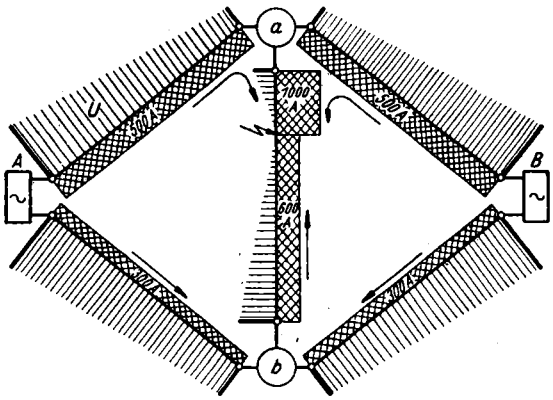
sprechenden Stromstärken I'_k und I''_k sind längs der einzelnen Leitungsstrecken konstant. Von der Kurzschlußstelle aus baut sich die Spannung *U* zwischen den kurzgeschlossenen Leitern nach den Kraftwerken hin stetig auf, entsprechend der Zunahme des jeweiligen Scheinwiderstandes *z*.

Der Verlauf der Spannung, des Stromes und des Scheinwiderstandes in den Kurzschlußschleifen zu beiden Seiten der Fehlerstelle ist in dem Bild ebenfalls dargestellt. Die Wirk- und Blindwiderstände bauen sich

sinngemäß auf; sie sind im Bild der besseren Übersicht halber nicht eingezeichnet worden.

Sind Material und Querschnitt der Leiter zwischen den einzelnen Stationen verschieden, so verlaufen die Scheinwiderstände und die Spannungen nicht mehr linear, sondern nach gebrochenen Linien. Ein nicht linearer Verlauf ergibt sich auch dann, wenn an der Kurzschlußstelle hohe Wirkwiderstände (Lichtbogen- oder Erdübergangswiderstände) auftreten[1]).

Wie sich die Strom- und Spannungsverteilung sowie die Energierichtung bei Kurzschluß in einem vermaschten Netz gestalten, zeigt ganz allgemein die Abb. 8. Hier stellt die senkrechte Schraffur den Span-



A und *B* — Kraftwerke. | *a* und *b* — Unterstationen.

Abb. 8. Strom- und Spannungsverteilung in einem zweiseitig gespeisten, vermaschten Ringnetz bei Kurzschluß.

nungsverlauf, die karierte Schraffur die Stromverteilung dar. Die Stromverteilung bei Kurzschluß ist in Abb. 9 auch für andere Netzgebilde gezeigt. Man sieht, daß bei mehreren parallelen Leitungen sowie in vermaschten Netzen die kranken Leitungsstrecken die größten Kurzschlußströme aufweisen. Die Ströme verteilen sich dabei über die kranken und sämtlichen anderen Leitungsstrecken im umgekehrten Verhältnis der Scheinwiderstände der Leitungspfade.

Die Größe der Kurzschlußströme auf einer Stichleitung (Einfachleitung mit einseitiger Einspeisung) in Abhängigkeit der Fehlerentfernung von der Stromquelle ist im Prinzip aus Abb. 49 ersichtlich.

Die Phasenverschiebung[2]) zwischen Strom und Spannung im Kurzschlußstrompfad ist stets induktiv, d. h. der Kurzschlußstrom eilt

[1]) M. Walter, Fehlerortbestimmung in Freileitungsnetzen, ETZ 1931, S. 1056.

[2]) Die Phasenverschiebung spielt eine Rolle bei der Ablaufzeit der phasenwinkelabhängigen Distanzrelais und beim Schaltvermögen der Leistungsschalter und Sicherungen.

der treibenden Spannung um einen bestimmten Winkel, den Phasenwinkel φ_k, nach. — Bei Kabeln ist der Kurzschlußphasenwinkel φ_k unter sonst gleichen Voraussetzungen, d. h. bei gleichem Leiterquerschnitt und gleichem Leitermaterial, wesentlich kleiner als bei Frei-

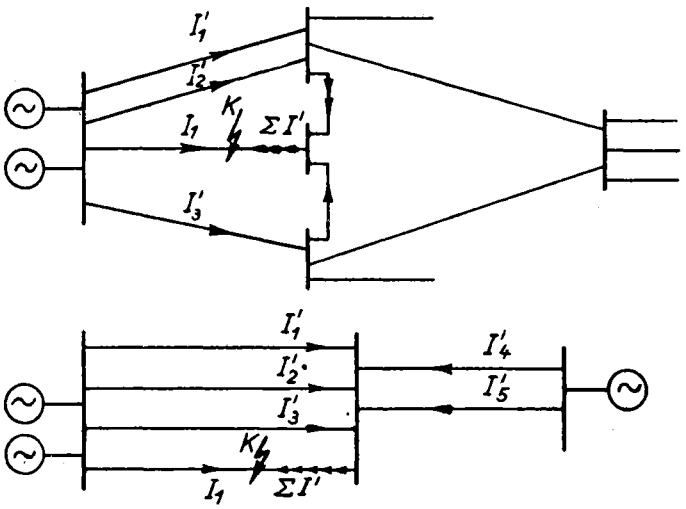
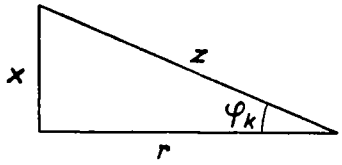


Abb. 9. Stromverteilung bei Kurzschluß in einem einseitig gespeisten vermaschten Ringnetz sowie in einem zweiseitig gespeisten Netz mit mehrfach parallelen Leitungen.

leitungen, da bekanntlich die Selbstinduktion der Kabel (besonders bei niedriger Netzspannung) infolge der geringen Leiterabstände verhältnismäßig sehr klein ist. Selbst bei einem Drehstromkabel in H-Ausfüh-



r Wirkwiderstand je Leiter in Ω/km.
x Blinkwiderstand je Leiter in Ω/km.
z Scheinwiderstand je Leiter in Ω/km.
φ_k Kurzschlußphasenwinkel.

Abb. 10. Widerstandsdreieck eines H-Kabels für 70 kV Nennspannung, Leiterquerschnitt 50 mm² Cu, Frequenz 50 Hz.

rung[1]) für 70 kV Nennspannung mit einem Leiterquerschnitt von 50 mm² Cu beträgt der Kurzschlußphasenwinkel annähernd erst 24° gemäß der nachstehenden Beziehung, die in Abb. 10 zeichnerisch dargestellt ist:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{x}{r} = \frac{0{,}16}{0{,}38} = 0{,}42,$$

$$\sphericalangle \varphi_k \approx 24^0.$$

[1]) Kabel nach Höchstädter, nähere Beschreibung s. auf S. 39.