Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 12

Artikel: Einrichtung zur Strombegrenzung in Wechselstromnetzen

Autor: Drescher, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915701

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Einrichtung zur Strombegrenzung in Wechselstromnetzen

Von *B. Drescher,* Nümbrecht

621.316.13:621.316.91

1. Einleitung

Die ständig zunehmende Kraftwerkleistung und die gleichzeitig damit verbundene immer engere Verflechtung der Netze hat auch entsprechend grössere Überströme bei Störungen zur Folge. Um die insbesondere durch Kurzschlüsse ausgelösten Rückwirkungen auf die Schadenstelle und auch auf andere Anlagenteile möglichst gering zu halten, ist eine ganze Reihe von Schutzeinrichtungen geschaffen worden, die bei Entstehen eines Überstromes den betreffenden Netzteil oder Verbraucher abschalten, ihn also stillegen. In vielen Fällen sind jedoch die Rückwirkungen auf den gestörten Netzteil bzw. auf das zu speisende Netz infolge der unvermeidbaren Verzögerung des Abschaltvorganges so gross, dass man zusätzlich strombegrenzende Mittel anwenden muss. Allgemein bekannt dafür ist die Zwischenschaltung einer Drosselspule an den Anfang des zu schützenden Stromkreises. Mit einer solchen Drosselspule kann aber nur eine beschränkte Strombegrenzung erreicht werden, da bei zu hoher Induktivität die Spannungsschwankungen zwischen Leerlauf und Vollast hinter der Drosselspule unzulässig gross werden würden. Ähnliche Verhältnisse treten bei der Kupplung zweier oder mehrerer Netze auf. Hier sollen Störungen in dem einen Netz von dem anderen ferngehalten und ein Auseinanderfallen des Netzverbandes infolge der Störung verhindert werden. Schliesslich gibt es auch Fälle, in denen eine Abschaltung an sich gar nicht erwünscht ist, weil beispielsweise die Störung auf andere Weise als durch Abschalten beseitigt werden kann, bei denen aber auch bei Zwischenschaltung einer Drosselspule die Rückwirkungen auf den gestörten Netzteil zu gross sind, als dass sie in Kauf genommen werden könnten, so dass also doch eine Abschaltung erfolgen muss.

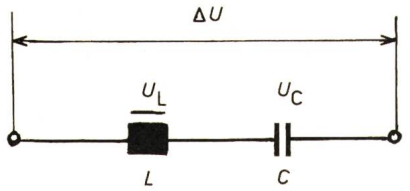


Fig. 1
Der nichtlineare Reihenresonanzkreis als Strombegrenzungseinrichtung
ΔU resultierende Spannung; U_L Spannung an der Drosselspule; U_C Spannung am Kondensator; C Kapazität des Kondensators; L Induktivität der Drosselspule

2. Anforderungen an eine Strombegrenzungseinrichtung

Will man die geschilderten Nachteile, die mit der stetig wachsenden Leistung der Kraftwerke immer schwerer ins Gewicht fallen, vermeiden, so muss man einer strombegrenzenden Einrichtung die folgenden Eigenschaften geben:

a) Bei Normalbetrieb, d. h. zwischen Leerlauf und Vollast, soll der Spannungsabfall an der Einrichtung vernachlässigbar klein sein.
b) Bei merklichem Überschreiten des Vollaststromes soll unverzögert die strombegrenzende Wirkung eintreten.
c) Im Kurzschlussfalle soll der auftretende Überstrom auf einen möglichst niedrigen Wert, beispielsweise das 2- bis 3fache des Nennstromes begrenzt werden.
d) Bei Wirksamwerden der Strombegrenzung sollen keine störenden Ausgleichsvorgänge auftreten.
e) Die Herabsetzung des bei einem Kurzschluss auftretenden Stromes auf Werte gleich oder kleiner als der Nennstrom ist anzustreben.

Ausserdem soll der erforderliche Aufwand möglichst gering sein.

3. Eine neuartige Strombegrenzungseinrichtung

3.1 Begrenzung auf Ströme oberhalb des Nennstromes (Ausführung I)

Die Lösung der genannten Aufgaben a) bis d) ist nach Fig. 1 durch die Reihenschaltung einer Eisendrosselspule mit Sättigungseigenschaften mit einem Kondensator im Zuge des zu schützenden Stromkreises möglich, wenn man im Bereich unterhalb des Nennstromes (Vollaststromes) bei ungesättigtem Eisenkern die Induktivität der Drosselspule mit der Kapazität des Kondensators so abstimmt, dass annähernd Spannungsresonanz auftritt. Dabei wird der Durchgangswiderstand praktisch vernachlässigbar klein. Kommt jedoch bei Überschreiten des Nennstromes das Eisen in Sättigung, so sinkt der induktive Widerstand der Drosselspule, da aber der kapazitive Widerstand des Kondensators konstant bleibt, erhöht sich der Durchgangswiderstand der Reihenschaltung, der ja im wesentlichen durch die Differenz der beiden Blindwiderstandswerte gegeben ist, und begrenzt dadurch den Strom. Wird der Kurzschluss oder die Überlastung beseitigt, so verschwindet die Sättigung der Eisendrosselspule, ihr Widerstand steigt auf den Wert bei ungesättigtem Eisenkern und der Ausgangszustand wird wieder hergestellt. Ausgleichsvorgänge treten praktisch nicht auf, da sich der ganze Vorgang bei jeder Halbwelle auf den neuen Wert einspielt.

Mit dieser einfachen Schaltung kann der Kurzschlußstrom bis auf Werte begrenzt werden, die etwas oberhalb des Nenn-

stromes liegen. Will man ihn bis auf den Nennstrom oder darunter herabsetzen [lit. e) der obigen Aufstellung], so lässt sich dies auf folgende Weise erreichen:

3.2 Begrenzung auf Ströme gleich oder kleiner als der Nennstrom (Ausführung II)

Die beschriebene Anordnung Eisendrosselspule—Kondensator arbeitet bei Durchgangsströmen, bei denen noch keine Sättigung des Eisenkerns auftritt, in Spannungsresonanz. Bei Überströmen wird diese Resonanz durch die Sättigung des Eisens gestört, und es verbleibt ein kapazitiver Restwiderstand. Legt man nun parallel zur Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator eine weitere Drosselspule (Fig. 2), die mit dieser Restkapazität auf Resonanz abgestimmt ist, so erhält man einen Parallelresonanzkreis, dessen Durchgangswiderstand bekanntlich sehr hoch ist, d. h. der Durchgangsstrom kann auf sehr kleine Werte — je nach Dämpfung auf Werte weit unterhalb des Nennstromes — begrenzt werden. In den Zweigen fliessen dann Kurzschlußströme, deren Grösse durch die in dieser Schaltung ebenfalls strombegrenzend wirkende Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator bestimmt ist. Im Normalbetrieb, wenn der Eisenkern der Drosselspule noch nicht gesättigt ist, ist der Widerstand der Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator so klein, dass die Paralleldrosselspule praktisch kurzgeschlossen ist und keinen Einfluss ausübt.

4. Die Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung I

4.1 Allgemeine Übersicht

Anhand der Fig. 1 und 3 seien die Vorgänge näher erläutert. Dabei seien der Einfachheit halber die Verlustwiderstände zunächst vernachlässigt, es werden also nur die Blindwiderstände berücksichtigt. Der Durchgangsstrom I mit der Kreisfrequenz ω ruft an der Eisendrosselspule einen Spannungsabfall U_L entsprechend der Magnetisierungskennlinie (Fig. 3) hervor, während an dem Kondensator mit der Kapazität C ein Spannungsabfall U_C auftritt, der dem Durchgangsstrom I proportional ist. Da die Spannungen U_L und U_C bei Vernachlässigung der Wirkwiderstände um 180° verschoben sind, ist der gesamte Spannungsabfall an der Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator

$$\Delta U = U_C - U_L \tag{1}$$

Macht man $U_C = U_L$, so wird $\Delta U = 0$, und es liegt Spannungsresonanz vor.

Legt man den Resonanzpunkt in den linearen Teil der Magnetisierungskurve (ungesättigter Eisenkern der Drosselspule), so ist bei Durchgangsströmen, die gleich oder kleiner als der Sättigungsstrom I_s sind, der Durchgangswiderstand der aus Eisendrosselspule und Kondensator in Reihenschaltung bestehenden Strombegrenzungseinrichtung also verschwindend klein.

Bei Kurzschluss liegt an der Strombegrenzungseinrichtung die volle Netzspannung, und es wird $\Delta U = U_0$. Man kann den sich dabei einstellenden maximal möglichen, also den begrenzten Kurzschlußstrom I_k nach Fig. 3 leicht bestimmen, wenn man im Abstande-U_0 eine Gerade parallel zu der Spannungslinie U_C zieht, die die Magnetisierungslinie im Punkte A schneidet. Der zu A gehörige Strom entspricht dem begrenzten Kurzschlußstrom I_k.

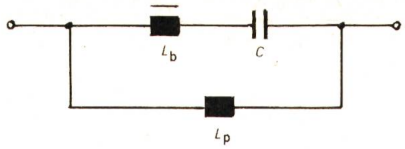


Fig. 2
Der nichtlineare Parallelresonanzkreis als Strombegrenzungseinrichtung
L_b Induktivität der Eisendrosselspule; L_p Induktivität der Paralleldrosselspule
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Aus Fig. 3 kann man bereits entnehmen, dass die Strombegrenzung um so wirksamer ist, je flacher die Magnetisierungskennlinie verläuft, je grösser die Sättigungsspannung U_s im Verhältnis zur Netzspannung U_0 ist, und je grösser die Überhöhung des kapazitiven Widerstandes $\frac{1}{\omega C}$ gegenüber dem Blindwiderstand ωL_0 der ungesättigten Drosselspule ist.

4.2 Rechnerische Bestimmung der Strombegrenzung bei Vernachlässigung der Wirkwiderstände

Zur rechnerischen Bestimmung der Grösse der Strombegrenzung sei zunächst die Magnetisierungskurve in bekannter Weise durch zwei Gerade angenähert [1][1]). Es gilt dann für die Beträge mit den Bezeichnungen der Fig. 4 und bei Vernachlässigung der Wirkwiderstände

$$U_L = U_s + (I - I_s)\,\omega L_r \tag{2}$$

und da $U_s = I_s\,\omega L_0$ ist,

$$U_L = I_s\,\omega L_0 \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right) + I\,\omega L_r$$

$$U_L = I\,\omega L_0 \left[\frac{L_r}{L_0} + \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)\frac{I_s}{I}\right] \tag{3}$$

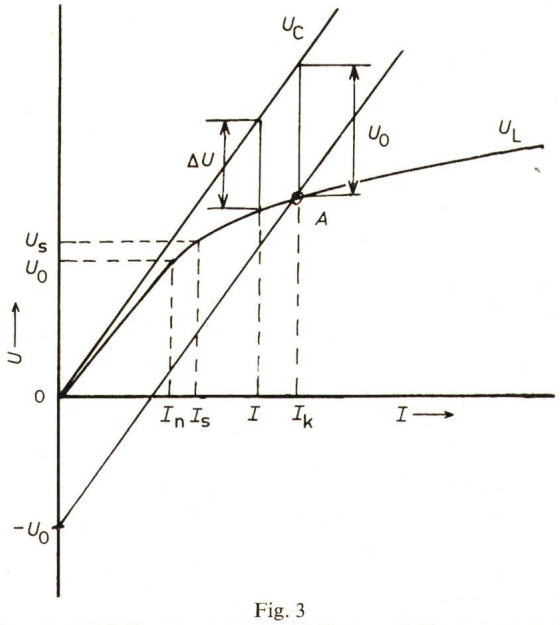


Fig. 3
Gesamt- und Teilspannungen am nichtlinearen Reihenresonanzkreis als Funktion des Durchgangsstromes

U	Spannung	I	Durchgangsstrom
U_c	Kondensatorspannung	U_L	Spannung an der Drosselspule
U_0	Netzspannung	U_s	Spannung bei beginnender Sättigung
ΔU	Spannung am Serieresonanzkreis	A	Schnittpunkt der Spannungslinien U_L und U_C–U_0

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Der Sättigungsfaktor α als Funktion von I/I_s mit L_r/L_s als Parameter

Tabelle I

$\frac{L_r}{L_s}$	$\frac{I}{I_s}$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0,01	α	0	0,333	0,495	0,594	0,666	0,706	0,743
0,05		0	0,317	0,475	0,570	0,633	0,679	0,712
0,10		0	0,300	0,450	0,540	0,600	0,643	0,675
0,20		0	0,267	0,400	0,480	0,533	0,571	0,600

Aus Sicherheitsgründen wird man bei Nennstrom in einem Bereich der Magnetisierungslinie arbeiten, der etwas unterhalb des Stromes I_s liegt, bei dem die Sättigung einsetzt — im folgenden kurz Sättigungsstrom genannt —. Es sei also:

$$I_n = p\, I_s \qquad p < 1 \tag{4}$$

Man erhält dann für die Spannung U_L an der Drosselspule aus Gl. (3):

$$U_L = I\,\omega\, L_0 \left[\frac{L_r}{L_0} + \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)\frac{1}{p}\left|\frac{I_n}{I}\right|\right] = I\,\omega\, L_0\,(1-\alpha) \tag{5}$$

Hierin ist der Sättigungsfaktor α ein Mass für die Sättigung der Drosselspule. Es ist:

$$\alpha = \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)\left[1 - \frac{1}{p}\left|\frac{I_n}{I}\right|\right] \tag{6}$$

In Fig. 5 sind die durch zwei Gerade angenäherten Magnetisierungslinien $\frac{U_L}{U_s} = f\left(\frac{I}{I_s}\right)$ und die zugehörigen α-Werte aufgezeichnet, die sich für verschiedene Grössen von $\frac{L_r}{L_0}$ ergeben (siehe auch Tabelle I).

Reihenschwingkreise mit Eisendrosselspulen neigen bekanntlich zu Kippschwingungen [2], die man aber mit Sicherheit vermeiden kann, wenn man den kapazitiven Widerstand $\frac{1}{\omega C}$ grösser macht als den induktiven Widerstand ωL_0 der ungesättigten Drosselspule. Es sei also:

$$\frac{1}{\omega C} = (1+\beta)\,\omega L_0 \qquad \beta > 0 \tag{7}$$

Damit ergibt sich für den Betrag der Spannung an der Strombegrenzungseinrichtung nach Gl. (1) und unter Berücksichtigung des Sättigungsfaktors α nach Gl. (5) bzw. (6)

$$\begin{aligned}\Delta U &= I\,\omega L_0\,[(1+\beta) - (1-\alpha)] = I\,\omega L_0\,(\alpha+\beta) = \\ &= I\,\omega\, L_0\left[\left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)\left(1 - \frac{1}{p}\left|\frac{I_n}{I}\right|\right) + \beta\right]\end{aligned} \tag{8}$$

Bei Kurzschluss liegt die volle Spannung U_0 an der Strombegrenzungseinrichtung, es wird also $\Delta U = U_0$, und man erhält für den maximal möglichen, d. h. für den begrenzten Kurzschlußstrom I_k aus Gl. (8)

$$I_k = \frac{U_0 + \frac{1}{p}\, I_n\, \omega L_0 \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)}{\omega L_0 \left(1 - \frac{L_r}{L_0} + \beta\right)} \tag{9}$$

und weiter, wenn man durch I_n dividiert und beachtet, dass $I_n\, \omega\, L_0 = U_0$ ist:

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{1 + \frac{1}{p}\left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)}{1 - \frac{L_r}{L_0} + \beta} \tag{9a}$$

Dieser Wert ist immer grösser als 1, so dass mit dieser einfachen Schaltung (Ausführung I) nur die lit. a)...d), nicht aber die lit. e) — d. h. kleinere Ströme als der Nennstrom — erfüllt werden können.

Gl. (9a) lässt sich für eine überschlägige Abschätzung der bei einer vorgegebenen Strombegrenzung erforderlichen Selbstinduktivität L_0 der ungesättigten Eisendrosselspule heranziehen. Da bei Vernachlässigung der Leitungsimpedanzen $\left|\frac{U_n}{I_n}\right| \approx Z_n$ ist, erhält man nach einigen Umformungen:

$$\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \frac{1}{\left(1 - \frac{L_r}{L_0} + \beta\right)\left|\frac{I_k}{I_n}\right| - \frac{1}{p}\left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)} \tag{10}$$

4.3 Berechnung der begrenzten Kurzschlußströme unter Berücksichtigung der Verlustwiderstände und Netzimpedanzen

Der Berechnung der begrenzten Kurzschlußströme sei das Netzbild nach Fig. 6 zu Grunde gelegt. Es seien also die Hauptschaltanlage mit der Sammelschiene S_H, die Unterstation mit der Sammelschiene S_U und die Kabelverbindung zwischen den beiden Stationen gegen zu hohe Kurzschlussströme zu sichern. Mit den Bezeichnungen der Tabelle II erhält man die Beziehung:

$$U_0 = I_k\left[(R_T + R_b) + j\left(x_T + \omega L - \frac{1}{\omega C}\right)\right],$$

$$U_0 = I_k\,[(R_T + R_b) + j\,(x_T - (\alpha_k + \beta)\,\omega L_0)] \tag{11}$$

Daraus folgt für den Betrag des begrenzten Kurzschlußstromes

$$|I_k| = \frac{U_0}{\sqrt{(R_T + R_b)^2 + [x_T - (\alpha_k + \beta)\,\omega L_0]^2}} \tag{12}$$

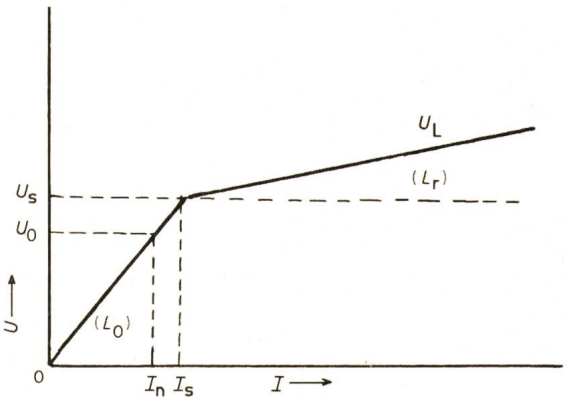


Fig. 4

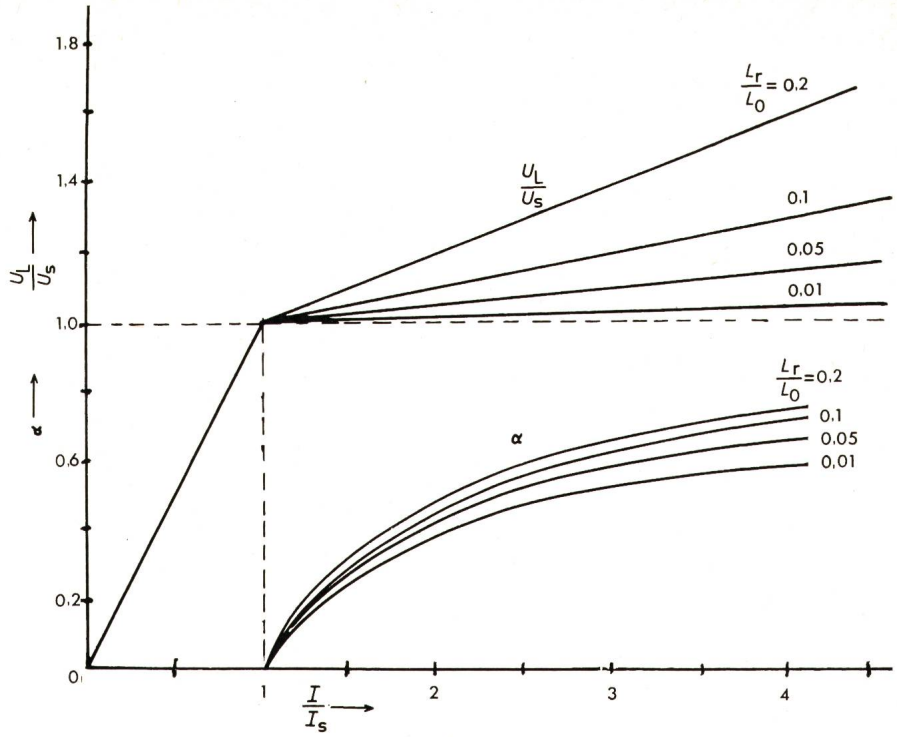
Angenäherte Darstellung der Magnetisierungskurve

L_r fiktive Induktivität der gesättigten Eisendrosselspule; L_0 Induktivität der ungesättigten Eisendrosselspule

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Fig. 5

$\frac{U_L}{U_s}$ und α als Funktion von $\frac{I}{I_s}$ mit $\frac{L_r}{L_0}$ als Parameter



Ohne die Strombegrenzungseinrichtung wäre der unbegrenzte Kurzschlußstrom

$$|I_{k0}| = \frac{U_0}{\sqrt{R_T^2 + x_T^2}} \qquad (13)$$

Das Verhältnis von $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ ist ein Mass für die Strombegrenzung. Es ist:

$$\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right| = \sqrt{\frac{R_T^2 + x_T^2}{(R_T + R_b)^2 + [x_T - (\alpha_k + \beta)\,\omega L_0]^2}} \approx \approx \left|\frac{x_T}{(\alpha_k + \beta)\,\omega L_0 - x_T}\right| \qquad (14)$$

Bezieht man den begrenzten Kurzschlußstrom auf den Verbrauchernennstrom I_n, so erhält man mit $\vec{Z}_b = R_b - j\,\beta\,\omega L_0$ (da lt. Voraussetzung bei $I = I_n$ $\alpha = 0$ ist):

$$\left|\frac{I_k}{I_n}\right| = \sqrt{\frac{(R_T + R_b + R_n)^2 + (x_T - \beta\,\omega L_0 + x_n)^2}{(R_T + R_b)^2 + [x_T - (\alpha_k + \beta)\,\omega L_0]^2}} \approx \approx \left|\frac{1}{(\alpha_k + \beta)\frac{\omega L_0}{Z_n} - \frac{x_T}{Z_n}}\right| \qquad (15)$$

In den Gl. (14) und (15) kommt der Sättigungsfaktor α_k vor, der nach Gl. (6) selbst eine Funktion von $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ ist. Setzt man den Wert von α_k in die Gl. (14) und (15) ein, so erhält man für $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ und $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ Gleichungen 4. Grades, deren Lösung nach bekannten Methoden vorgenommen werden kann. In der Praxis wird es sich aber in der Mehrzahl der Fälle darum handeln, für eine bestimmte, vorgegebene Strombegrenzung bzw. für einen maximal zulässigen Kurzschlußstrom den Sättigungsfaktor und die Grösse von Drosselspule und Kondensator zu bestimmen. Dazu ist Gl. (15) zu quadrieren. Man erhält dann nach einigen Umformungen und Division durch Z_n:

$$\frac{\omega L_0}{Z_n} = \frac{(\alpha_k + \beta)\frac{x_T}{Z_n} - \beta\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2\left(\frac{x_T}{Z_n} + \sin\varphi\right)}{(\alpha_k + \beta)^2 - \beta^2\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2} \pm \qquad (16)$$

$$\pm\sqrt{\left[\frac{(\alpha_k + \beta)\frac{x_T}{Z_n} - \beta\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2\left(\frac{x_T}{Z_n} + \sin\varphi\right)}{(\alpha_k + \beta)^2 - \beta^2\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2}\right]^2 + \frac{\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2\left[\left(\frac{R_T + R_b}{Z_n} + \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{x_T}{Z_n} + \sin\varphi\right)^2\right] - \left[\left(\frac{R_T + R_b}{Z_n}\right)^2 + \left(\frac{x_T}{Z_n}\right)^2\right]}{(\alpha_k + \beta)^2 - \beta^2\left|\frac{I_n}{I_k}\right|^2}}$$

Bei Vernachlässigung der Verlustwiderstände und für kleine Werte von β und $\left|\frac{I_n}{I_k}\right|$ ergibt sich daraus der Näherungswert

$$\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \frac{\frac{x_T}{Z_n} + \left|\frac{I_n}{I_k}\right|}{\alpha_k + \beta} \qquad (16a)$$

Der Wert von $\frac{\omega L_0}{Z_n}$ wächst also mit zunehmender Kurzschlussstrombegrenzung, während ein grosser Sättigungsfaktor α_k, also ein sehr flacher Verlauf der Magnetisierungskennlinie im Sättigungsgebiet und der Vergrösserungsfaktor des kapazitiven Widerstandes β im Sinne einer Verkleinerung der Drosselinduktivität wirken.

Zwischen dem begrenzten und dem unbegrenzten Kurzschlußstrom besteht noch die Beziehung:

$$\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right| = \left|\frac{I_k}{I_n}\right| \cdot \left|\frac{I_n}{I_{n0}}\right| \cdot \left|\frac{I_{n0}}{I_{k0}}\right| \qquad (17)$$

Hierin stellt $\left|\frac{I_{n0}}{I_{k0}}\right|$ das Verhältnis: Verbrauchernennstrom ohne Zwischenschaltung der Strombegrenzungseinrichtung zu unbegrenztem Kurzschlußstrom einen festen Wert dar. Es ist:

$$\left|\frac{I_{k0}}{I_{n0}}\right| = \sqrt{\frac{(R_T + R_n)^2 + (x_T + x_n)^2}{R_T^2 + x_T^2}} \approx \frac{Z_n}{x_T} \qquad (18)$$

Für das Verhältnis der Verbrauchernennströme mit und ohne Strombegrenzungseinrichtung ergibt sich

$$\left|\frac{I_n}{I_{n0}}\right| = \sqrt{\frac{(R_T + R_n)^2 + (x_T + x_n)^2}{(R_T + R_b + R_n)^2 + (x_T - \beta\,\omega L_0 + x_n)^2}} = \left|\frac{U_n}{U_{n0}}\right| \qquad (19)$$

Durch die Zwischenschaltung der Strombegrenzungseinrichtung werden also als Folge der Überhöhung des kapazitiven Resonanzwiderstandes die Verbraucherspannung U_n und der Verbraucherstrom I_n etwas grösser als die entsprechenden Werte bei unmittelbarem Anschluss der Verbraucher an das Netz.

Zusammenstellung der verwendeten Buchstabensymbole

Tabelle II

Netzteil	
U_0	Netzspannung
I_{k0}	Kurzschlußstrom ohne Strombegrenzungseinrichtung
I_k	Kurzschlußstrom mit Strombegrenzungseinrichtung
$Z_T'' = R_T + j\,x_T$	Impedanz des vorgeschalteten Netzteiles (Netz, Transformatoren, Verbindungsleitungen)
$\omega = 2\,\pi\,f$	Kreisfrequenz
Verbraucher	
U_{n0}	Nennspannung ohne Strombegrenzungseinrichtung
I_{n0}	Nennstrom ohne Strombegrenzungseinrichtung
U_n	Nennspannung mit Strombegrenzungseinrichtung
I_n	Nennstrom mit Strombegrenzungseinrichtung
P_n	Nennleistung mit Strombegrenzungseinrichtung
$Z_n'' = R_n + j\,x_n$	Verbraucherimpedanz
Strombegrenzungseinrichtung	
U_L	Spannung an der Eisendrosselspule beim Strom I
U_C	Spannung am Kondensator beim Strom I
$I_s = \frac{1}{p}\,I_n$	Strom, bei dem die Sättigung beginnt (kurz: Sättigungsstrom)
$\lvert P_L \rvert_{dd}$	Nennleistung der Eisendrosselspule
$\lvert P_C \rvert_{dd}$	Nennleistung des Kondensators
$\lvert P_p \rvert_{dd}$	Nennleistung der Paralleldrosselspule
$\Sigma \lvert P \rvert = \lvert P_L \rvert + \lvert P_C \rvert + \lvert P_p \rvert$	gesamte installierte Geräteleistung
$\alpha = \left(1 - \frac{L_r}{L_0}\right)\left(1 - \frac{1}{p}\cdot\left\lvert\frac{I}{I_n}\right\rvert\right)$	Sättigungsfaktor der Eisendrosselspule beim Strom I
$\beta = \frac{1}{\omega^2 L_0 C} - 1$	Vergrösserungsfaktor des kapazitiven Widerstandes
$p = \frac{I_n}{I_s}$	Sicherheitsfaktor

4.4 Dimensionierung der Strombegrenzungseinrichtung (Ausführung I)

Die Dauerleistungen, für die die Eisendrosselspule und der Kondensator auszulegen sind, betragen:

$$\text{Eisendrosselspule} \quad \left|\frac{P_L}{P_n}\right|_{dd} = \frac{\omega L_0}{Z_n}$$

$$\text{Kondensator} \quad \left|\frac{P_C}{P_n}\right|_{dd} = (1+\beta)\,\frac{\omega L_0}{Z_n} \qquad (20)$$

$$\text{Gesamte zu installierende Geräteleistung}\ \Sigma\left|\frac{P}{P_n}\right| = (2+\beta)\,\frac{\omega L_0}{Z_n}$$

Bei Kurzschluss steigen die Spannungen kurzzeitig, d. h. bis zur Beseitigung des Kurzschlusses an auf

$$\text{Eisendrosselspule} \quad \left|\frac{U_L}{U_n}\right|_k = \left(1-\alpha_k\right)\frac{\omega L_0}{Z_n}\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$$

$$\text{Kondensator} \quad \left|\frac{U_C}{U_n}\right|_k = \left(1+\beta\right)\frac{\omega L_0}{Z_n}\left|\frac{I_k}{I_n}\right| \qquad (21)$$

Es empfiehlt sich also, der Drosselspule eine möglichst kleine Induktivität zu geben und die Magnetisierungslinie flach verlaufen zu lassen.

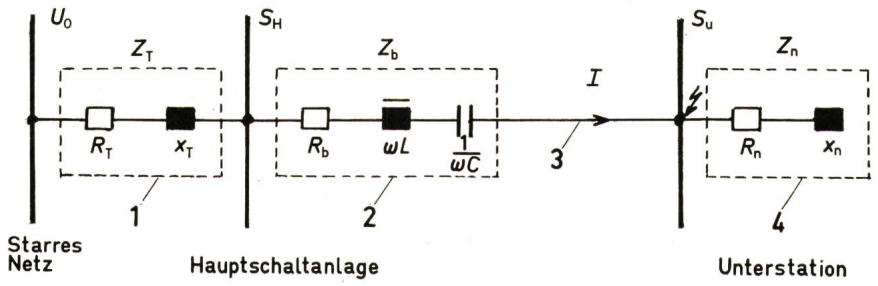


Fig. 6
Die Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung I im Netz

1 Netzimpedanz
2 Strombegrenzungseinrichtung
3 Verbindungsleitung
4 Verbraucher

U_0	starre Netzspannung	Z_n	Impedanz der Verbraucher
Z_T	Impedanz des vorgeschalteten Netzteiles	R_n	Wirkwiderstand der Verbraucher
R_T	Wirkwiderstand des vorgeschalteten Netzteiles	x_n	Blindwiderstand der Verbraucher
x_T	Blindwiderstand des vorgeschalteten Netzteiles	S_H	Sammelschiene der Hauptschaltanlage
Z_b	Impedanz der Strombegrenzungseinrichtung	S_U	Sammelschiene der Unterstation
ωL	induktiver Widerstand der Eisendrosselspule	I	Strom durch die Strombegrenzungseinrichtung
$\frac{1}{\omega C}$	kapazitiver Widerstand des Kondensators		

Der Sättigungsfaktor α_k als Funktion von I_k/I_n mit L_r/L_0 als Parameter

Tabelle III

$\frac{L_r}{L_0}$	$\frac{I_k}{I_n}$	1,5	2	3	4	5	6	7
0,01	α_k	0,258	0,440	0,624	0,715	0,770	0,806	0,833
0,05		0,247	0,424	0,599	0,686	0,739	0,775	0,800
0,10		0,234	0,400	0,567	0,650	0,700	0,734	0,757
0,20		0,208	0,356	0,504	0,578	0,622	0,652	0,673

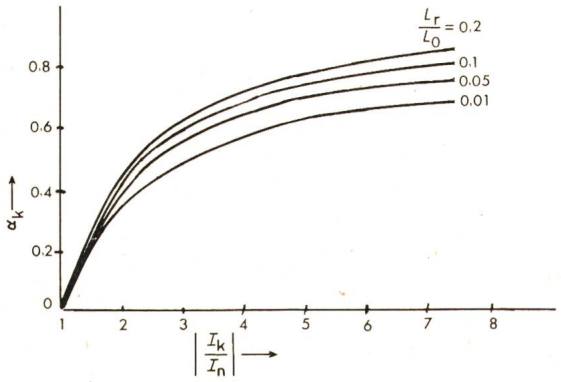


Fig. 7

Der Sättigungsfaktor α_k als Funktion von $\frac{I_k}{I_n}$ mit $\frac{L_r}{L_0}$ als Parameter

Bezeichnungen siehe Tab. II

4.5 Zahlenbeispiel

Um einen Einblick in die Grösse der erzielbaren Kurzschlußstrombegrenzung — die selbst bei an sich schon hohen Netzimpedanzen erreicht werden kann — zu erhalten, seien die folgenden Annahmen gemacht, wobei wieder die Schaltung nach Fig. 6 zu Grunde gelegt sei:

$$R_T = 0{,}02\, Z_n \quad R_b = 0{,}02\, Z_n \quad \frac{R_n}{Z_n} = \cos\varphi = 0{,}8 \quad \beta = 0{,}12$$

$$x_T = 0{,}10\, Z_n \qquad \frac{x_n}{Z_n} = \sin\varphi = 0{,}6 \quad p = 0{,}9$$

Rechnungsgang. Zunächst wird α_k für verschiedene Werte von $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ mit $\frac{L_r}{L_0}$ als Parameter berechnet (Fig. 7 und Tabelle III). Durch Einsetzen von α_k und der obigen Grössen in Gl. (16) erhält man $\frac{\omega L_0}{Z_n}$.

Anschliessend sind der Festwert $\left|\frac{I_{k0}}{I_{n0}}\right|$ nach Gl. (18) und das Verhältnis $\left|\frac{I_n}{I_{n0}}\right|$ nach Gl. (19) zu bestimmen.

Daraus ergibt sich schliesslich das Verhältnis begrenzter zu unbegrenztem Kurzschlußstrom $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ nach Gl. (17).

Als weiteres werden die Dimensionierungsgrössen nach Gl. (20) und (21) berechnet.

Die Ergebnisse sind aus Tabelle IV zu ersehen. Der Verlauf der Dimensionierungsgrössen in Abhängigkeit von dem Verhältnis begrenzter Kurzschlußstrom zu Verbrauchernennstrom $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ ist für das Verhältnis $\left|\frac{L_r}{L_0}\right| = 0{,}1$ in Fig. 8 dargestellt.

5. Die Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung II

5.1 Allgemeine Übersicht

Wie bereits dargelegt, kann man den Kurzschlußstrom auch auf Werte begrenzen, die gleich oder kleiner als der Nennstrom sind, wenn man gemäss Fig. 2 parallel zu einer Strombegrenzungseinrichtung der Ausführung I eine weitere Drosselspule mit dem Widerstand $Z_p'' = R_p + j\, x_p$ schaltet und den Kreis so abstimmt, dass bei Kurzschluss volle oder angenäherte Stromresonanz auftritt. Der Ersatzwiderstand dieser Schaltung (Fig. 9) errechnet sich zu:

$$Z_{b'}'' = \frac{Z_b''\, Z_p''}{Z_b'' + Z_p} = \frac{[R_b - j\,(\alpha + \beta)\,\omega\, L_0]\,[R_p + j\, x_p]}{(R_b + R_p) + j\,[-(\alpha + \beta)\,\omega\, L_0 + x_p]} \tag{22}$$

Zur Abstimmung auf Resonanz bei Kurzschluss muss man

$$x_p = (\alpha_k + \beta)\,\omega\, L_0 \tag{23}$$

machen, und man erhält für den Ersatzwiderstand der Parallelschaltung bei Kurzschluss

$$Z_{bk'}'' = \frac{R_b \cdot R_p + (\alpha_k + \beta)^2\,\omega^2\, L_0^2}{R_b + R_p} + j\,(\alpha_k + \beta)\,\frac{R_b - R_p}{R_b + R_p}\,\omega\, L_0 \tag{24}$$

Macht man weiterhin den Wirkwiderstand R_p der Paralleldrossel und den der Reihenschaltung Eisendrossel–Kondensator R_b (einschliesslich der Zuleitungen) gleich gross, also

$$R_p = R_b \tag{25}$$

so ergibt sich schliesslich für den Ersatzwiderstand der Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung II, bei Kurzschluss

$$Z_{bk'}'' = \frac{R_b^2 + (\alpha_k + \beta)^2\,\omega^2\, L_0^2}{2\, R_b} = \frac{R_b}{2} + (\alpha_k + \beta)^2\,\frac{\omega^2\, L_0^2}{2\, R_b} \tag{26}$$

Bei Nennstrom ist lt. Voraussetzung $\alpha = 0$, und es wird

$$Z_{bn'} = \frac{(R_b - j\,\beta\,\omega\, L_0)[R_p + j\,(\alpha_k + \beta)\,\omega\, L_0]}{(R_p + R_b) + j\,\alpha_k\,\omega\, L_0} \tag{27}$$

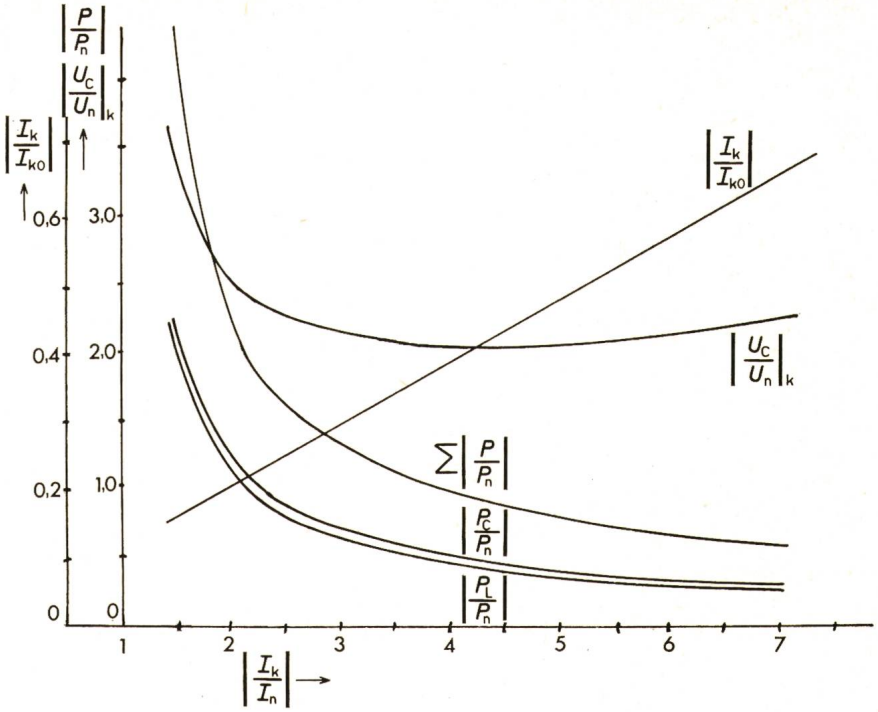
und bei $R_p = R_b$

$$Z_{bn'}'' = \frac{R_b\,[2\, R_b^2 + [2\,\beta\,(\alpha_k + \beta) + \alpha_k^2]\,\omega^2\, L_0^2] + j\,\alpha_k\,\omega\, L_0\,[R_b^2 - \beta\,(\alpha_k + \beta)\,\omega^2\, L_0^2]}{4\, R_b^2 + \alpha_k^2\,\omega^2\, L_0^2} \tag{27a}$$

Fig. 8
Die Dimensionierungsgrössen der Strombegrenzungseinrichtung (Ausführung I) als Funktion von

$$\left|\frac{I_k}{I_n}\right| \text{ für } \frac{L_r}{L_0} = 0{,}1$$

I_{kn} Kurzschluss- bzw. Nennstrom; P Geräteleistungen; P_L Leistung der Eisendrosselspule
Weitere Bezeichnungen siehe Tab. II



Im allgemeinen ist $R_b \ll \omega L_0$, es ist also weiterhin angenähert:

$$Z_{bn'} \approx R_b - j\,\frac{\beta(\alpha_k + \beta)}{\alpha_k}\,\omega L_0 \qquad (27b)$$

Der Widerstand einer Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung II ist also wie verlangt bei Nennstrom sehr klein — er wäre gleich dem Wirkwiderstand, wenn die kapazitive Überhöhung $\beta = 0$ wäre — und bei Kurzschluss sehr gross.

Massgebend für die Grösse der Kurzschlußstrombegrenzung ist die Sättigung der Eisendrosselspule bei ansteigendem Strom. Es sind also noch die Teilströme I_b und I_p der Parallelschaltung zu berechnen. Die Kenntnis dieser Teilströme ist ausserdem auch für die Dimensionierung der Drosselspulen und des Kondensators notwendig. Es verhält sich allgemein (Fig. 8):

$$\frac{I_b}{I} = \frac{Z_p''}{Z_p'' + Z_p''} \quad \text{und} \quad \frac{I_p}{I} = \frac{Z_b}{Z_b'' + Z_p''} \qquad (28)$$

Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Gl. (25) und (26) bei Kurzschluss

$$\frac{I_{bk}}{I_k} = \frac{R_b + j\,(\alpha_k + \beta)\,\omega L_0}{2\,R_b} \qquad \left(\approx + j\,(\alpha_k + \beta)\,\frac{\omega L_0}{2\,R_b}\right) \qquad (29)$$

$$\frac{I_{pk}}{I_k} = \frac{R_b - j\,(\alpha_k + \beta)\,\omega L_0}{2\,R_b} \qquad \left(\approx - j\,(\alpha_k + \beta)\,\frac{\omega L_0}{2\,R_b}\right) \qquad (30)$$

sowie bei Nennstrom

$$\frac{I_{bn}}{I_n} = \frac{R_b + j\,(\alpha_k + \beta)\,\omega L_0}{2\,R_b + j\,\alpha_k\,\omega L_0} \qquad \left(\approx 1 + \frac{\beta}{\alpha_k}\right) \qquad (31)$$

$$\frac{I_{pn}}{I_n} = \frac{R_b - j\,\beta\,\omega L_0}{2\,R_b + j\,\alpha_k\,\omega L_0} \qquad \left(\approx - \frac{\beta}{\alpha_k}\right) \qquad (32)$$

Durch die Überhöhung des kapazitiven Widerstandes gegenüber dem induktiven Widerstand in der Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator wird also bei Nennstrom der die Reihenschaltung durchfliessende Strom I_{bn} angenähert um den Wert $1 + \frac{\beta}{\alpha_k}$ grösser als der Nennstrom, was bei der Auslegung der Eisendrosselspule und des Kondensators berücksichtigt werden muss. Die Paralleldrosselspule braucht jedoch nur für einen Durchgangsstrom von ungefähr $\frac{\beta}{\alpha_k}\,|\,I_n\,|$, also für einen sehr geringen Wert bemessen zu werden.

Das für die Sättigung der Eisendrosselspule massgebende Verhältnis der Ströme, die die Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator bei Nennstrom, also im Normalbetrieb, und bei Kurzschluss durchfliessen, ist nach Gl. (29) und (31)

$$\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right| = \left|\frac{I_{bk}}{I_k}\right| \cdot \left|\frac{I_k}{I_n}\right| \cdot \left|\frac{I_n}{I_{bn}}\right| = \frac{\sqrt{4\,R_b^2 + \alpha_k^2\,\omega^2\,L_0^2}}{2\,R_b} \cdot \left|\frac{I_k}{I_n}\right| \qquad (33)$$

5.2 Berechnung der begrenzten Kurzschlußströme unter Berücksichtigung der Verlustwiderstände und Netzimpedanzen

Zu Grunde gelegt sei der gleiche Netzaufbau wie bei Fig. 6, wobei jedoch die einfache Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung I durch eine solche der eben besprochenen Ausführung II ersetzt ist (Fig. 10).

Der Gesamtwiderstand ist allgemein:

$$Z_{tot}'' = (R_T + R_b' + R_n) + j\,(x_T + x_b' + x_n) \qquad (34)$$

Bei Kurzschluss ist der begrenzte Kurzschlußstrom unter Berücksichtigung von Gl. (26):

$$I_k = \frac{U_0}{\left[R_T + \frac{R_b}{2} + \frac{(\alpha_k + \beta)^2\,\omega^2\,L_0^2}{2\,R_b}\right] + j\,x_T} \qquad (35)$$

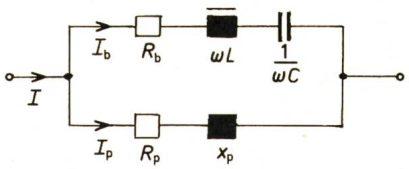


Fig. 9
Strombegrenzungseinrichtung (Ausführung II)

I Durchgangsstrom
I_b Strom durch die Strombegrenzungseinrichtung Ausführung I
I_p Strom durch die Paralleldrosselspule
R_b Wirkwiderstand des von I_b durchflossenen Zweiges «b»
ωL kapazitiver Widerstand des Zweiges «b»
$\frac{1}{\omega C}$ induktiver Widerstand des Zweiges «b»
R_p Wirkwiderstand der Paralleldrosselspule
x_p induktiver Widerstand der Paralleldrosselspule

Bei Normalbetrieb ist Gl. (27a):

$$I_n = \frac{U_0}{\left[R_T + R_n + R_b \frac{2 R_b^2 + ((\alpha_k + \beta)^2 + \beta^2)\omega^2 L_0^2}{4 R_b^2 + \alpha_k^2 \omega^2 L_0^2}\right] + j\left[x_T + x_n + \frac{\alpha_k \omega L_0 (R_b^2 - \beta(\alpha_k + \beta)\omega^2 L_0^2)}{4 R_b^2 + \alpha_k \omega^2 L_0^2}\right]} \tag{36}$$

Ohne die Strombegrenzungseinrichtung wäre wieder wie oben

$$I_{k0} = \frac{U_0}{\sqrt{R_T^2 + x_T^2}}$$

und

$$\left|I_{n0}\right| = \frac{U_0}{\sqrt{(R_T + R_n)^2 + (x_T + x_n)^2}} \tag{37}$$

Das Verhältnis der die Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator bei Kurzschluss und im Normalbetrieb durchfliessenden Teilströme wird nach Gl. (33):

$$\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right| = \sqrt{\frac{4 R_b^2 + \alpha_k^2 \omega^2 L_0^2}{4 R_b^2}} \cdot \sqrt{\frac{\left[R_T + R_n + \frac{R_b[2 R_b^2 + ((\alpha_k + \beta)^2 + \beta)^2 \omega^2 L_0^2]}{4 R_b^2 + \alpha_k^2 \omega^2 L_0^2}\right]^2 + \left[x_T + x_n + \frac{\alpha_k \omega L_0 (R_b^2 - \beta(\alpha_k + \beta)\omega^2 L_0^2)}{4 R_b^2 + \alpha_k^2 \omega^2 L_0^2}\right]^2}{\left[R_T + \frac{R_b}{2} + \frac{(\alpha_k + \beta)^2 \omega^2 L_0^2}{2 R_b}\right]^2 + x_T^2}} \tag{38}$$

Aus dieser Gleichung lässt sich ωL_0 bzw. $\frac{\omega L_0}{Z_n}$ berechnen, wobei zu beachten ist, dass die Grössen α_k und $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ physikalisch durch die Magnetisierungslinie der Eisendrosselspule miteinander verknüpft sind. Wenn ωL_0 berechnet ist, so lässt sich dann schliesslich das Verhältnis begrenzter Kurzschlußstrom zu Nennstrom $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ aus den Gl. (35) und (36) bestimmen. Analog ergibt sich das Verhältnis begrenzter Kurzschlußstrom zu Kurzschlußstrom ohne Strombegrenzungseinrichtung zu:

$$\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right| = \sqrt{\frac{R_T^2 + x_T^2}{\left[R_T + \frac{R_b}{2} + \frac{(\alpha_k + \beta)^2 \omega^2 L_0^2}{2 R_b}\right]^2 + x_T^2}} \tag{39}$$

Setzt man wieder voraus, dass R_b und R_T klein gegen x_T und ωL_0 sind, so erhält man den Näherungswert:

$$\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right| \approx \frac{2 R_b x_T}{(\alpha_k + \beta)^2 \omega^2 L_0^2} \tag{40}$$

Vergleicht man diesen Näherungswert mit dem entsprechenden Wert von Gl. (14), den man bei der Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung I, erhält, so sieht man, dass der begrenzte Kurzschlußstrom bei der Ausführung II um den Faktor $\approx \frac{2 R_b}{(\alpha_k + \beta)\omega L_0}$ kleiner ist als bei der Ausführung I. Unter der gleichen Voraussetzung wie eben, nämlich, dass die Verlustwiderstände R_b und R_T gegenüber den induktiven Widerständen ωL_0 und x_T vernachlässigt werden können, ergibt sich für das Verhältnis $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ nach Gl. (38) nach einigen Umformungen angenähert:

$$\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right| \approx \frac{\alpha_k}{(\alpha_k + \beta)^2} \cdot \frac{Z_n}{\omega L_0} \tag{41}$$

bzw.

$$\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \frac{\alpha_k}{(\alpha_k + \beta)^2} \left|\frac{I_{bn}}{I_{bk}}\right| \tag{42}$$

Setzt man diesen Näherungswert in Gl. (40) ein, so erhält man

$$\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right| \approx 2 \frac{R_b}{Z_n} \cdot \frac{x_T}{Z_n} \left(\frac{\alpha_k + \beta}{\alpha_k}\right)^2 \cdot \left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|^2 \tag{40a}$$

und schliesslich:

$$\left|\frac{I_k}{I_n}\right| \approx \frac{2 \frac{R_b}{Z_n}}{\alpha_k \frac{\omega L_0}{Z_n}} \left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$$

oder

$$\left|\frac{I_k}{I_n}\right| \approx 2 \frac{R_b}{Z_n} \left(\frac{\alpha_k + \beta}{\alpha_k}\right)^2 \cdot \left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|^2 \tag{43}$$

Die Kurzschlußstrombegrenzung ist also um so wirksamer, je geringer die Dämpfung des Parallelresonanzkreises durch die Verlustwiderstände und je kleiner die vorgeschaltete Netzimpedanz ist.

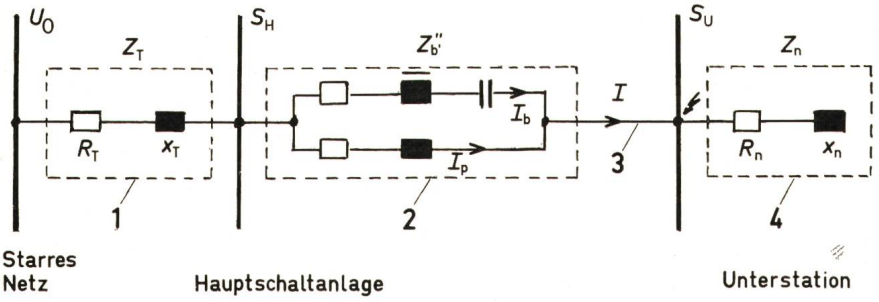


Fig. 10
Die Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung II, im Netz

1 Netzimpedanz
2 Strombegrenzungseinrichtung
3 Verbindungsleitung
4 Verbraucher

Z''_b Ersatzimpedanz der Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung II
I_b Strom durch die Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung I
I_p Strom durch die Paralleldrosselspule
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

5.3 Dimensionierung der Strombegrenzungseinrichtung nach Ausführung II

Die Dauerleistungen, für die die Drosselspulen und der Kondensator auszulegen sind, betragen angenähert

Eisendrosselspule
$$\left|\frac{P_L}{P_n}\right|_{dd} = \left|\frac{I_{bn}}{I_n}\right|^2 \frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \left(\frac{\alpha_k+\beta}{\alpha_k}\right)^2 \frac{\omega L_0}{Z_n}$$

Paralleldrosselspule
$$\left|\frac{P_p}{P_n}\right|_{dd} = \left|\frac{I_{pn}}{I_n}\right|^2 (\alpha_k+\beta) \frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \left(\frac{\beta}{\alpha_k}\right)^2 (\alpha_k+\beta) \frac{\omega L_0}{Z_n}$$

Kondensator
$$\left|\frac{P_L}{P_n}\right|_{dd} = \left|\frac{I_{bn}}{I_n}\right|^2 (1+\beta) \frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \left(\frac{\alpha_k+\beta}{\alpha_k}\right)^2 (1+\beta) \frac{\omega L_0}{Z_n} \qquad (44)$$

Gesamte zu installierende Geräteleistung
$$\Sigma \left|\frac{P}{P_n}\right|_{dd} \approx \frac{\alpha_k+\beta}{\alpha_k}\left[\frac{\alpha_k+\beta}{\alpha_k}(2+\beta) + \frac{\beta^2}{\alpha_k}\right]\frac{\omega L_0}{Z_n}$$

Bei Kurzschluss steigen die Spannungen kurzzeitig, d. h. bis zum Abschalten des Kurzschlusses, an auf:

Eisendrosselspule
$$\left|\frac{U_L}{U_n}\right|_k = \left|\frac{I_{bk}}{I_n}\right|(1-\alpha_k)\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \frac{1-\alpha_k}{\alpha_k+\beta}$$

Paralleldrosselspule
$$\left|\frac{U_p}{U_n}\right|_k = \left|\frac{I_{pk}}{I_n}\right|(\alpha_k+\beta)\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx 1 \qquad (45)$$

Kondensator
$$\left|\frac{U_L}{U_n}\right|_k = \left|\frac{I_{bk}}{I_n}\right|(1+\beta)\frac{\omega L_0}{Z_n} \approx \frac{1+\beta}{\alpha_k+\beta}$$

Die Ströme, die bei Kurzschluss durch die Drosselspulen und den Kondensator fliessen, sind lt. Gl. (29) und (30) praktisch gleich gross. Es ist:

$$\left|\frac{I_{bk}}{I_n}\right| \approx \left|\frac{I_{pk}}{I_n}\right| \approx \frac{1}{\alpha_k+\beta}\cdot\frac{Z_n}{\omega L_0} \qquad (46)$$

Das Verhältnis $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ *und die Dimensionierungsgrössen der Strombegrenzungseinrichtung (Ausführung I) in Abhängigkeit von* $\frac{I_k}{I_n}$ *mit* $\frac{L_r}{L_0}$ *als Parameter*

Tabelle IV

$\lvert I_k/I_n \rvert$	1,5	2	3	4	5	6	7
$L_r/L_0 = 0{,}01$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,160	0,201	0,292	0,384	0,479	0,570	0,665
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	1,955	1,081	0,598	0,432	0,348	0,295	0,261
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	2,190	1,211	0,670	0,484	0,390	0,330	0,293
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	4,145	2,292	1,268	0,916	0,738	0,625	0,554
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	2,180	1,210	0,675	0,493	0,400	0,344	0,305
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	3,280	2,430	2,010	1,935	1,950	1,985	2,045
$L_r/L_0 = 0{,}05$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,160	0,202	0,292	0,384	0,479	0,571	0,665
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,01	1,112	0,625	0,450	0,360	0,306	0,269
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	2,251	1,249	0,700	0,504	0,403	0,343	0,301
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	4,261	2,361	1,325	0,954	0,763	0,649	0,570
$\lvert U_L/U_0 \rvert_k$	2,270	1,285	0,753	0,565	0,470	0,413	0,377
$\lvert U_C/U_0 \rvert_k$	3,380	2,500	2,100	2,020	2,020	2,060	2,110
$L_r/L_0 = 0{,}10$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,161	0,202	0,293	0,386	0,479	0,571	0,666
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,073	1,126	0,651	0,470	0,377	0,320	0,283
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	2,320	1,260	0,730	0,526	0,422	0,359	0,317
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	4,393	2,386	1,381	0,996	0,799	0,679	0,600
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	2,390	1,350	0,846	0,650	0,566	0,510	0,480
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	3,480	2,520	2,190	2,100	2,120	2,150	2,220
$L_r/L_0 = 0{,}20$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,162	0,203	0,294	0,386	0,480	0,575	0,666
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,213	1,258	0,713	0,517	0,416	0,354	0,313
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	2,478	1,048	0,798	0,580	0,466	0,395	0,350
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	4,691	2,306	1,511	1,097	0,882	0,749	0,663
$\lvert U_L/U_0 \rvert_k$	2,630	1,618	1,060	0,874	0,783	0,736	0,716
$\lvert U_C/U_0 \rvert_k$	3,720	2,820	2,400	2,320	2,330	2,370	2,460

5.4 Zahlenbeispiel

Dem Zahlenbeispiel seien die Schaltung nach Fig. 10 und dieselben Widerstandswerte usw. wie im 1. Zahlenbeispiel (Abschnitt 4.5) zu Grunde gelegt. Es sei also

$$R_T = 0{,}02\, Z_n \quad R_b = 0{,}02\, Z_n = R_p \quad \cos\varphi = 0{,}8 \quad \beta = 0{,}12$$

$$x_T = 0{,}10\, Z_n \quad \left|\frac{I_{k0}}{I_{n0}}\right| = 10{,}59 \quad \sin\varphi = 0{,}6 \quad p = 0{,}9$$

Rechnungsgang. Zunächst wird α_k in Abhängigkeit von $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ mit $\frac{L_r}{L_0}$ als Parameter nach Gl. (6) berechnet. Die Werte können der Tabelle III entnommen werden. Die Rechnung wird dann mit den Näherungsgleichungen weitergeführt, da die sich gegenüber der genauen Rechnung ergebenden Abweichungen nur geringfügig sind.

Als nächstes wird α_k in Gl. (42) eingesetzt und $\frac{\omega L_0}{Z_n}$ berechnet, aus Gl. (40) und (40a) kann dann $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ bestimmt werden.

Schliesslich erhält man aus der Gl. (43) bzw. durch Division der Werte von $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$ durch $\frac{x_T}{Z_n}$ das Verhältnis begrenzter Kurzschlußstrom zu Nennstrom $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$. Anschliessend werden die Dimensionierungsgrössen nach den Gl. (44) und (45) ermittelt.

Die Ergebnisse sind aus Tabelle V zu ersehen. Ausserdem ist der Verlauf der Werte von $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ und der Dimensionierungsgrössen für das Verhältnis $\frac{L_r}{L_0} = 0{,}1$ in Abhängigkeit von $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ in Fig. 11 dargestellt.

6. Erforderlicher Relaisschutz

Wenn man den Kurzschlußstrom auf Werte begrenzt, die über dem Nennstrom liegen, so kann man den üblichen Überstromschutz verwenden. Man kann aber auch die Änderung der Spannung an der Strombegrenzungseinrichtung, dem Kondensator oder der Eisendrosselspule bei einem Überstrom als Kriterium heranziehen, denn mit dem Durchgangsstrom steigen sowohl die resultierende Gesamtspannung an der Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator als auch die Teilspannungen am Kondensator und an der Drosselspule, letztere allerdings dem Prinzip der Strombegrenzungseinrichtung entsprechend weniger stark als die Kondensatorspannung.

Drückt man bei Verwendung der Ausführung II der Strombegrenzungseinrichtung den sich bei einem Kurzschluss einstellenden resultierenden Strom auf Werte gleich oder kleiner als der Nennstrom, so muss man den Überstromschutz in einen der Teilzweige legen, da diese dann von den (durch die Reihenschaltung Eisendrosselspule—Kondensator begrenzten) Überströmen durchflossen werden. Man kann aber auch hier wie oben die Spannungsänderungen zur Feststellung, dass ein Kurzschluss oder Überstrom aufgetreten ist, heranziehen. Dabei sei noch kurz darauf hingewiesen, dass die Spannung an der Strombegrenzungseinrichtung schneller steigt als der Strom (praktisch von Null bei Nennstrom auf den vollen Wert der Netzspannung bei Kurzschluss).

7. Vergleich mit anderen Einrichtungen zur Begrenzung der Kurzschlußströme

Die Grenzen, die der Verwendung von Luftdrosselspulen gesetzt sind, wurden bereits eingangs erwähnt. Eine Schnellabschaltung in der 1. Halbwelle ist nur schwer durchzuführen und auch nur dann anwendbar, wenn keine Staffelung der Auslösezeiten hintereinander liegender Schalter notwendig ist. Hochleistungssicherungen können zwar auch den Strom begrenzen, sie müssen aber nach dem Ansprechen ausgewechselt werden, was im allgemeinen eine längere Unterbrechung der Stromversorgung in dem gestörten Netzteil zur Folge hat, ausserdem ist eine einwandfreie Staffelung nur schwer zu erreichen. Synchron arbeitende Schaltgeräte entlasten zwar diese selbst, nicht aber die übrigen Anlagenteile von den Kurzschlußströmen.

8. Vergleich der beiden Ausführungsarten der Strombegrenzungseinrichtung und Anwendungsmöglichkeiten

Die beiden Ausführungsarten der Strombegrenzungseinrichtung erfüllen die vier Bedingungen, die man an eine solche Einrichtung stellen muß, nämlich:

a) Vernachlässigbarer Spannungsabfall bei Normalbetrieb, unverzögert einsetzende Strombegrenzung bei auftretendem Überstrom;

b) Begrenzung des Überstromes und insbesondere des Kurzschlußstromes auf relativ wenig über dem Nennstrom liegende Werte;

c) Strombegrenzung ohne störende Ausgleichsvorgänge. Dagegen kann die Herabsetzung des Kurzschlußstromes auf einen Wert, der gleich oder kleiner als der Nennstrom ist, nur mit der Ausführung II erreicht werden.

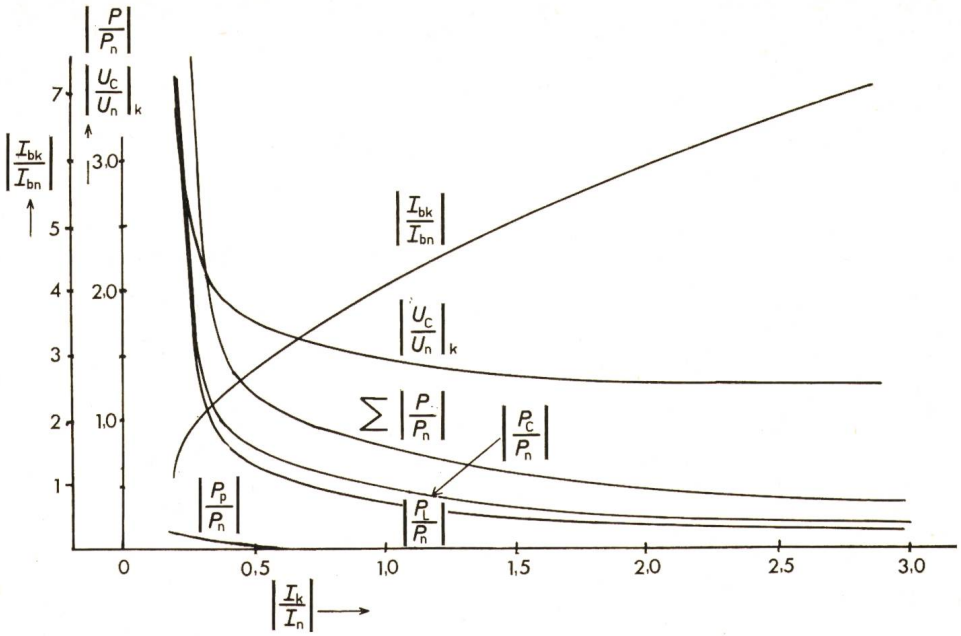
Die Begrenzung des Kurzschlußstromes durch eine wenig Aufwand erfordernde Einrichtung bringt grosse wirtschaftliche Vorteile: Nicht nur dass die Schaltanlagen für eine geringere Abschaltleistung ausgelegt werden können, sondern auch alle anderen durch die Strombegrenzungseinrichtung geschützten Netzteile unterliegen einer geringeren Beanspruchung, sie können also schwächer ausgeführt werden, oder es kann bei gleichbleibender Auslegung die Durchgangsleistung entsprechend erhöht werden. Es kann also auch z. B. durch Vorschalten der Strombegrenzungseinrichtung die Durchgangsleistung einer vorhandenen Schaltanlage erheblich erhöht werden, ohne dass sie im Hinblick auf die ohne Strombegrenzung erforderliche erhöhte Kurzschlußleistung umgebaut werden müsste. Dies bezieht sich nicht nur auf die Schaltgeräte, sondern auch auf die Messwandler, die Sammelschienen, die Umbruchskräfte, für die die Stützer usw. zu dimensionieren sind, und schliesslich auch auf die Kabel, die sehr häufig thermisch nicht nach dem normalen Durchgangsstrom, sondern nach dem Kurzschlußstrom und der bis zur Abschaltung verfliessenden Zeit auszulegen sind.

Nicht unerwähnt soll schliesslich auch die Einsatzmöglichkeit bei supraleitenden Kabeln bleiben, bei denen durch die Strombegrenzungseinrichtung der Kurzschlußstrom unter den kritischen Strom gesenkt werden kann. Auch den Schutz von Halbleiteranlagen, die gegen Überströme bekanntlich sehr empfindlich sind, kann die Strombegrenzungseinrichtung ohne weiteres mitübernehmen.

Bei einer Störung im Netz — insbesondere bei Verbundbetrieb — soll durch geeignete Massnahmen, z. B. durch eine Stosszusatzerregung der Synchronmaschinen die Stabilität

Fig. 11

Das Verhältnis der Teilströme $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ und die Dimensionierungsgrössen der Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung II, als Funktion von $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ für $\frac{L_r}{L_0} = 0{,}1$



verbessert werden. Da bei der Ausführung I der Strombegrenzungseinrichtung im Kurzschlußfalle ein kapazitiver Restwiderstand verbleibt, ergibt sich diese die Stabilität erhöhende Zusatzerregung ohne besondere Massnahmen von selbst. Durch entsprechende Verstimmung des Parallelresonanzkreises lässt sich dieser Effekt aber auch bei der Ausführung II erzielen.

Aus den Tabellen IV und V und den Fig. 8 und 11 können die zu installierenden Leistungen der Eisendrosselspule sowie (bei Ausführung II) der Paralleldrosselspule entnommen werden, die bei einer gewünschten Strombegrenzung zu installieren sind. Ein Vergleich der beiden Tabellen zeigt, dass durch die Paralleldrosselspule, die nur eine relativ kleine Leistung zu haben braucht, eine beachtliche Verbesserung der Strombegrenzung erreicht werden kann. Welche der beiden Ausführungsarten in einem bestimmten Falle zu wählen ist, wird im wesentlichen durch den Preis der Einzelgeräte bestimmt, der wiederum stark von der Betriebs- und der zu erwartenden Überspannung abhängt.

Die Bedingung nach lit. e): Herabsetzung des Kurzschlussstromes auf Werte gleich oder kleiner als der Nennstrom kann nur mit der Ausführung II erfüllt werden. Eine solche Verringerung des Kurzschlußstromes ist z. B. erwünscht, wenn eine «sichere Sammelschiene» von zwei unabhängigen Stromquellen versorgt werden soll, so dass bei Ausfall einer Stromquelle die andere sofort und ohne Spannungseinbruch die Speisung der «sicheren Sammelschiene» übernimmt. Eine solche sichere Stromversorgung ist bei allen kontinuierlich laufenden Betrieben erwünscht, wie z. B. in Kraftwerken, in der Chemie, der Textilindustrie, in Stahlwerken usw., und zwar sowohl für gewisse Hauptantriebe als auch bei entsprechend kleinerer Leistung für die Speisung von Steuer-, Regel- und Messgeräten in diesen Anlagen, ferner für Fernsprecheinrichtungen, Funkanlagen, Computer usw. Würde man eine solche «sichere Sammelschiene» direkt an die Stromquellen anschliessen, so würde ein Kurzschluss in einer Zuleitung oder der Ausfall einer Stromquelle einen Spannungseinbruch bis auf Null, bei Zwischenschaltung von zwei Drosselspulen oder Strombegrenzungseinrichtungen der Ausführung I einen solchen auf mindestens 50 % bedeuten, was bereits zum Abfallen von Schützen oder zum Stehenbleiben von Motoren infolge des quadratisch mit der Spannung absinkenden Drehmomentes führen kann, so dass der Betrieb zum Erliegen kommt. Bei der Ausführung II dagegen liegt bei einem Kurzschluss zwar die volle Betriebsspannung an der dem Kurzschluss zugewandten Strombegrenzungseinrichtung, durch die dann auftretende Stromresonanz wird aber der resultierende Strom sehr klein. Die der Ersatzstromquelle zugewandte Strombegrenzungseinrichtung tritt daher nicht in Aktion und die Spannung an der «sicheren Sammelschiene» bleibt ohne irgendwelche Absenkung erhalten. Auf diese Weise bleiben auch die bei Schnell- oder Langsamumschaltung der Motoren auftretenden Überströme, die in ungünstigen Fällen das Doppelte und mehr des normalen Motor-Einschaltstromes betragen können, aus, die Motoren brauchen also nicht mit verstärkter Wicklung zum Schutz gegen die dynamischen Kräfte dieser Überströme ausgeführt zu werden. Desgleichen fällt der für die Umschaltung erforderliche, nicht unerhebliche Relaisaufwand weg.

9. Zusammenfassung

Die beschriebene Einrichtung zur Strombegrenzung in Wechselstromnetzen besteht aus der Reihenschaltung einer Eisendrosselspule mit Sättigungseigenschaften und einem Kondensator. Der Eisenkern der Drosselspule ist so ausgelegt, dass er bei Strömen, die gleich oder kleiner als der Nennstrom sind, ungesättigt, und damit die Induktivität konstant ist, während er bei merklichem Überschreiten des Nennstromes in die Sättigung geht, die Induktivität also abnimmt. Die Kapazität des Kondensators ist mit der Induktivität der ungesättigten Drosselspule auf annähernd Netzfrequenz abgestimmt, der Durchgangsstrom ist dann also sehr klein und praktisch gleich dem Verlustwiderstand der Drosselspule. Bei Überschreiten des Nennstromes wird der Kreis verstimmt, da die Induktivität der Drosselspule sinkt, der Durchgangsstrom wird daher durch den anwachsenden Blindwiderstand des verstimmten Resonanzkreises begrenzt.

Der resultierende Widerstand der Strombegrenzungseinrichtung wird bei Überstrom kapazitiv, schaltet man also parallel zu der Reihenschaltung sättigbare Eisendrosselspule—Kondensator eine weitere Drosselspule, so erhält man einen Stromresonanzkreis, durch den bei entsprechender Abstimmung der bei Kurzschluss von der Strombegrenzungseinrichtung durchgelassene Strom unter den Nennstrom gesenkt werden kann.

Die Strom- und Spannungsverhältnisse werden unter Verwendung einer durch drei gerade Linienzüge angenäherten Magnetisierungslinie der Eisendrosselspule untersucht, wobei mit zwei Induktivitäten der Drosselspule — einer hohen, konstanten bei ungesättigtem und einer niedrigen, stromabhängi-

Die Werte von $\left|\frac{I_k}{I_{k0}}\right|$, $\left|\frac{I_k}{I_n}\right|$ *und die Dimensionierungsgrössen der Strombegrenzungseinrichtung, Ausführung II, in Abhängigkeit von den Teilströmen* $\left|\frac{I_{bk}}{I_{bn}}\right|$ *mit* $\frac{L_r}{L_0}$ *als Parameter*

Tabelle V

$\lvert I_{bk}/I_{bn} \rvert$	1,5	2	3	4	5	6	7
$L_r/L_0 = 0{,}01$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,020	0,026	0,050	0,087	0,133	0,189	0,254
$\lvert I_k/I_n \rvert$	0,195	0,259	0,500	0,870	1,330	1,890	2,540
$\omega L_0/z_n$	1,200	0,700	0,380	0,256	0,195	0,157	0,132
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,570	1,135	0,540	0,349	0,260	0,207	0,173
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	2,880	1,271	0,605	0,391	0,291	0,232	0,194
$\lvert P_p/P_n \rvert_{dd}$	0,098	0,029	0,011	0,006	0,004	0,003	0,003
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	5,548	2,435	1,156	0,746	0,555	0,442	0,370
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	1,965	1,000	0,505	0,342	0,258	0,209	0,175
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	2,965	2,000	1,505	1,342	1,258	1,209	1,175
$L_r/L_0 = 0{,}05$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,020	0,026	0,052	0,088	0,134	0,193	0,256
$\lvert I_k/I_n \rvert$	0,198	0,263	0,521	0,875	1,340	1,930	2,560
$\omega L_0/z_n$	1,220	0,720	0,386	0,265	0,201	0,162	0,136
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,690	1,180	0,556	0,365	0,270	0,216	0,180
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	3,010	1,320	0,624	0,409	0,302	0,242	0,202
$\lvert P_p/P_n \rvert_{dd}$	0,106	0,031	0,012	0,007	0,005	0,003	0,003
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	5,806	2,531	1,192	0,781	0,577	0,462	0,385
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	2,051	1,060	0,560	0,390	0,304	0,251	0,218
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	3,051	2,060	1,560	1,390	1,304	1,251	1,218
$L_r/L_0 = 0{,}10$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,020	0,027	0,053	0,090	0,136	0,195	0,264
$\lvert I_k/I_n \rvert$	0,204	0,271	0,530	0,900	1,360	1,950	2,640
$\omega L_0/z_n$	1,250	0,740	0,400	0,274	0,209	0,168	0,140
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	2,860	1,250	0,588	0,384	0,287	0,227	0,188
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	3,200	1,400	0,660	0,430	0,322	0,254	0,211
$\lvert P_p/P_n \rvert_{dd}$	0,116	0,035	0,012	0,007	0,005	0,004	0,003
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	6,176	2,685	1,260	0,821	0,614	0,485	0,402
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	2,160	1,153	0,630	0,455	0,365	0,312	0,277
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	3,160	2,153	1,630	1,455	1,365	1,312	1,277
$L_r/L_0 = 0{,}20$							
$\lvert I_k/I_{k0} \rvert$	0,022	0,028	0,055	0,094	0,142	0,202	0,272
$\lvert I_k/I_n \rvert$	0,224	0,285	0,548	0,935	1,420	2,020	2,720
$\omega L_0/z_n$	1,290	0,787	0,433	0,296	0,226	0,183	0,153
$\lvert P_L/P_n \rvert_{dd}$	3,200	1,400	0,662	0,432	0,321	0,256	0,213
$\lvert P_C/P_n \rvert_{dd}$	3,584	1,568	0,742	0,484	0,360	0,287	0,238
$\lvert P_p/P_n \rvert_{dd}$	0,141	0,043	0,015	0,009	0,006	0,005	0,004
$\Sigma \lvert P/P_n \rvert$	6,925	3,011	1,419	0,925	0,687	0,548	0,455
$\lvert U_L/U_n \rvert_k$	2,420	1,350	0,795	0,605	0,510	0,451	0,414
$\lvert U_C/U_n \rvert_k$	3,420	2,350	1,795	1,605	1,510	1,451	1,414

gen bei gesättigtem Eisenkern — als Festwerten gerechnet wird. Auf den Verlauf der Stromkurven während des Sättigungsvorganges selbst wird dabei nicht näher eingegangen, er erfolgt stetig ohne zusätzliche Überströme. An zwei Zahlenbeispielen, aus denen auch die jeweils erforderliche Geräteleistung zu ersehen ist, wird für vier verschiedene Magnetisierungslinien die erreichbare Strombegrenzung nachgewiesen. Zum Schluss werden nach einem kurzen Vergleich mit anderen Einrichtungen zur Begrenzung der Kurzschlußströme anhand einiger Anwendungsmöglichkeiten die Vorteile, die die beschriebene Strombegrenzungseinrichtung für Netz- und Industriebetriebe bietet, ersichtlich gemacht.

Literatur

[1] *R. Zahorka:* Unterschwingungen im Reihenschwingkreis mit sättigbarer Drosselspule. ETZ-A 88(1967)25, S. 623...628.

[2a] *W. Koch:* Kipperscheinungen in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen. Siemens Z. 33(1959)6, S. 385...395.

[2b] *F. Sammer:* Schwingungskreise mit Eienskernspulen. Leipzig, Geest und Portig, 1950.

[3] *B. Kalkner:* Die Begrenzungskupplung, ein Beitrag zum Kurzschlussproblem des Verbundbetriebes. ETZ-A 87(1966)19, S. 681...685.

Adresse des Autors:

B. Drescher, dipl. Ingenieur, Benroth, Auf dem Heidchen, D-5223 Nümbrecht.