Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 4

Artikel: Energiebegrenzendes Schalten in Niederspannungsnetzen

Autor: Bächtold, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914842

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: 10.12.2025

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

BULLETIN

des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens

des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Energiebegrenzendes Schalten in Niederspannungsnetzen

Von R. Bächtold

621.316.54:621.316.9;

Die Besonderheiten und die Funktionsweise der verschiedenen Leitungsschutzschaltertypen werden behandelt. Der Begriff der Strombegrenzung wird kritisch betrachtet und der gegenwärtige Stand der Technik untersucht. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich der Leser schon mit Begriffen wie Strombegrenzung und Durchlassenergie befasst hat [1] [1]).

L'auteur traite des particularités et du fonctionnement des divers types de disjoncteurs de canalisation. La notion de la limitation du courant est analysée et l'état actuel de la technique examiné, en admettant toutefois que le lecteur est familiarisé avec les notions de limitation du courant et d'énergie passante.

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit der Abschaltung von Kurzschlüssen in Niederspannungsnetzen ist in den letzten Jahren der Begriff der *strombegrenzenden* Leistungsschalter oder Leitungsschutzschalter entstanden. Man versteht darunter Schaltautomaten, welche die während der Abschaltung fliessende Energie möglichst stark begrenzen. Wie weit dies realisierbar ist, hängt vor allem von den Kurzschlußstromverhältnissen am Einbauort des Schalters ab. Diese Daten, d.h. Kurzschlußstrom und Leistungsfaktor, weichen von Anlage zu Anlage voneinander ab, so dass sich allgemeingültige Angaben kaum machen lassen.

Der Begriff *Kurzschlußstrom* ist überall gleich definiert. Es handelt sich um den stationären Strom, der in einem gestörten Netz fliessen würde, wenn sämtliche im Netz eingebauten Überstromunterbrecher durch Leitungen von vernachlässigbarer Impedanz überbrückt sind oder wenn zumindest derjenige Überstromunterbrecher, welcher unmittelbar vor der Kurzschlußstelle liegt, überbrückt ist. Die möglichen Kurzschlußströme sind von der Leistung der Stromquelle, von den Leitungselementen wie Sammelschienen, Kabel und Leitungen, welche zwischen der Kurzschlußstelle und der Stromquelle liegen, sowie von der Art des Kurzschlusses, d.h. ob dreiphasig, zweiphasig oder einphasig, abhängig.

Fig. 1 zeigt eine Anlage, bestehend aus einer Haupt- und mehreren Unterverteilungen, die von einem Transformator mit einer Nennleistung von 1000 kVA und einer Kurzschlußspannung von 5% gespeist wird. Unter der Voraussetzung, dass die Hochspannungsseite eine vernachlässigbar geringe Impedanz hat, kann der Transformator bei einem satten 3phasigen Kurzschluss auf der Sekundärseite (3×380 V~) einen maximalen Kurzschlußstrom von 28 600 A abgeben. Dabei wird sich ein Leistungsfaktor von 0,273 einstellen. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis von Wirkwiderstand und Impedanz der Transformatorwicklung.

Im Versorgungsgebiet dieses Trafos können Kurzschlussströme zwischen 0 und 28 600 A auftreten, wobei der cos φ entsprechend den Impedanzen der Leitungselemente vor der Kurzschlußstelle sehr stark variieren kann. Fig. 2 zeigt die theoretisch möglichen Leistungsfaktoren in Abhängigkeit des Kurzschlußstromes. Kurve a gibt den cos φ an, wenn der Strom durch rein ohmsche Widerstände begrenzt wird, während Kurve b sich auf eine Begrenzung durch rein induktive Widerstände bezieht. Die an den Netzpunkten A...F_2 (Fig. 1) tatsächlich auftretenden Ströme und cos φ-Werte sind ebenfalls eingetragen. Sie liegen nahe beim möglichen theoretischen Wert, weil die Blindwiderstände der Kabel und Leitungen verglichen mit deren Wirkwiderständen gering sind.

Im Kurzschlussfall müssen diese Ströme abgeschaltet werden, wobei die Abschaltleistungen der Überstromunterbrecher entsprechend gross sein müssen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Schmelzsicherung

Der älteste und auch bekannteste Kurzschlußschutz ist die Schmelzsicherung. Ihre Abschaltleistung ist in den entsprechenden SEV-Vorschriften [2; 3] festgelegt. So muss eine Gewinde-II-Sicherung ein Abschaltvermögen von 4000 A haben, während die Gewinde-III-Sicherung 8000 A schalten muss. Mag auch die Abschaltleistung dieser Sicherungen in Wirklichkeit höher sein, so ist doch festzuhalten, dass für eine sorgfältige Projektierung diese Grenzen beachtet werden müssen, was bedeutet, dass in Haupt- und Unterverteilungen praktisch überall Niederspannungshochleistungssicherungen eingebaut sein sollten. Die Tatsache, dass diesem Punkt in sehr vielen Fällen wenig Beachtung geschenkt wird und trotzdem selten etwas passiert, ist nur darauf zurückzuführen, dass in der Praxis selten der maximal mögliche Kurzschlußstrom auftritt.

3. Leitungsschutzschalter

3.1 Aktueller Stand

Auf dem Gebiet der Leitungsschutzschalter ist gegenwärtig das Vorschriftenwesen im Umbruch. Nach den bisher gültigen Vorschriften [4; 5] wird eine Abschaltleistung von 1200 A gefordert. Ist ein Leitungsschutzschalter an Stellen eingesetzt, wo höhere Ströme auftreten können, so muss er durch eine Schmelzsicherung von max. 60 A Nennstromstärke geschützt sein, wobei man dann nur hoffen kann, dass diese Sicherung den Strom ihrerseits auch wirklich bewältigt. Ein Leitungsschutzschalter-Hersteller hatte überdies die Möglichkeit, sein Fabrikat so prüfen zu lassen, dass es hinter einer höheren Vorsicherung als 60 A eingesetzt werden konnte. Aus physikalisch-technischen Gründen ist eine maximale Vorsicherung von 100 A möglich und die entsprechende Abschaltleistung des Leitungsschutzschalters liegt je nach Konstruktion bei 3000 bis 6000 A.

Da aus Gründen des Querschnittschutzes praktisch immer irgendwo eine Sicherung vor dem Leitungsschutzschalter liegt, wird in der Praxis heute der Kurzschlußschutz im Extremfall – trotz des Leitungsschutzschalters – durch die Schmelzsicherung übernommen. *Wenn die Vorsicherung den nachgeschalteten Leitungsschutzschaltern richtig zugeordnet ist, können hinter dieser beliebige Leitungsschutzschalter eingesetzt werden.*

Die neuen internationalen Vorschriften und die darauf basierenden SEV-Vorschriften [2]) sehen für Leitungsschutzschalter Schaltleistungsklassen von 1500 A, 3000 A, 6000 A und 10000 A vor. Die neuesten Konstruktionen werden nach diesen Vorschriften entwickelt, wobei die Hersteller meist die Schaltleistungsklasse 6000 A wählen. Ein Blick auf Fig. 1 und Fig. 2 zeigt aber, dass wesentlich höhere Ströme auftreten können; überall dort, wo der mutmassliche Kurzschlußstrom das Abschaltvermögen des Leitungsschutzschalters übersteigt, kann auch in Zukunft auf die den Schalter schützende Vorsicherung nicht verzichtet werden.

Eine sorgfältige Prüfung des Zusammenarbeitens von Leitungsschutzschalter und Vorsicherung durch die Prüfstelle des SEV ist also nach wie vor nötig, wobei die relativ breiten Streubänder der Schmelzsicherungen berücksichtigt werden müssen.

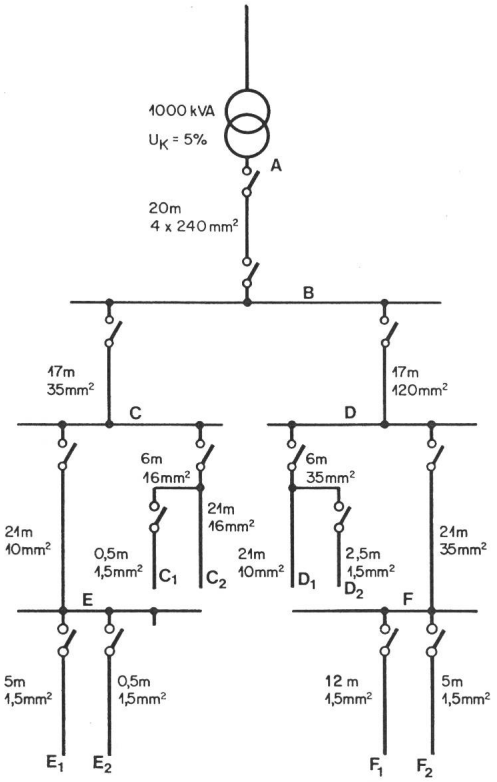


Fig. 1 Prinzipschema einer Industrieverteilung

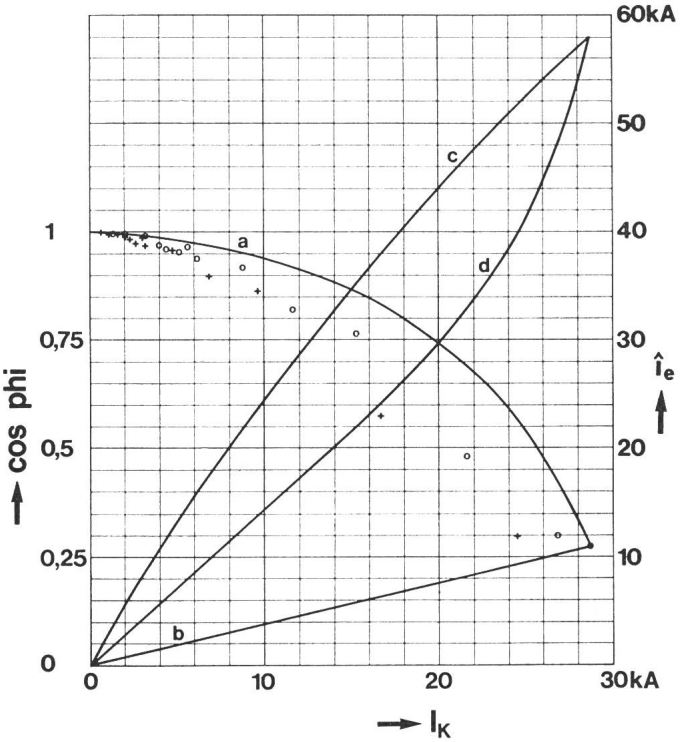


Fig. 2 Bereiche der möglichen Leistungsfaktoren und Stromscheitelwerte hinter einem 1000-kVA-Trafo in Abhängigkeit des Kurzschlußstromes

a, b Grenzkurven des cosφ bei rein ohmschen resp. rein induktiven Widerständen

c, d Grenzkurven der Scheitelwerte des Kurzschlußstromes

○ In der Anlage gemäss Fig. 1 auftretende dreiphasige Kurzschlußströme

+ In der Anlage gemäss Fig. 1 auftretende einphasige Kurzschlußströme

[2]) Erscheinen voraussichtlich etwa Ende 1978 unter der 6-Monate-Regel.

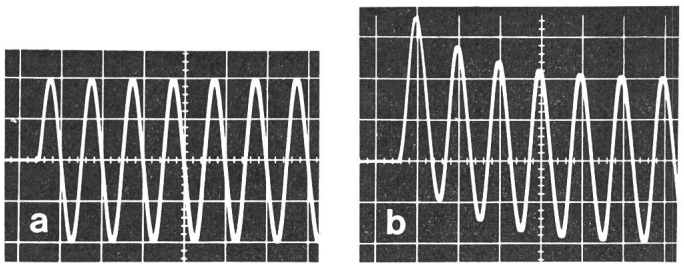


Fig. 3 Stromverlauf nach dem Einschalten beim Einschaltmoment 0° bezogen auf die Spannungshalbwelle
a $\cos\varphi = 0{,}95$
b $\cos\varphi = 0{,}095$
Zeitmaßstab 20 ms/E

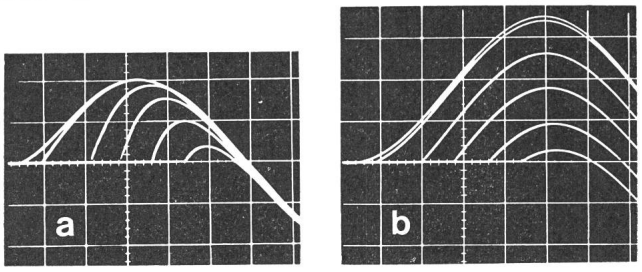


Fig. 4 Stromverlauf nach dem Einschalten bei verschiedenen Einschaltmomenten
Einschaltmoment 0°, 30°, 60°, 90°, 120° und 150° bezogen auf die Spannungshalbwelle bei
a $\cos\varphi = 0{,}95$
b $\cos\varphi = 0{,}095$
Zeitmaßstab 2 ms/E

3.2 Technische Möglichkeiten

Diese Überlegungen führen zur Erkenntnis, dass in der heutigen Installationstechnik ein Leitungsschutzschalter mit sehr hoher Abschaltleistung, d.h. in der Grössenordnung von 25...30 kA fehlt. Dabei stellt sich die Frage, ob der Bau eines solchen Apparates mit technisch vertretbaren Mitteln und in vernünftigen geometrischen Abmessungen überhaupt möglich ist.

Fig. 2 zeigt, dass bei einem bestimmten Kurzschlußstrom Leistungsfaktoren innerhalb eines breiten Streubandes auftreten können, wobei beachtet werden muss, dass der $\cos\varphi$ auf den Kurzschlußstrom und dessen Abschaltung einen bedeutenden Einfluss hat. Fig. 3 zeigt den Verlauf des Kurzschlussstromes von 10000 A bei den beiden Extremwerten des $\cos\varphi$ im Beispiel von Fig. 2. Der asymmetrische Einschwingvorgang bei $\cos\varphi = 0{,}095$ ergibt einen Stromscheitelwert, der ca. das 1,7fache des Scheitelwertes des stationären Zustandes beträgt. Die Kurven c und d in Fig. 2 zeigen die maximal möglichen Scheitelwerte des Kurzschlußstromes, wobei die Kurve c den tiefen und die Kurve d den hohen $\cos\varphi$-Werten entspricht.

Für die Abschaltung des Kurzschlußstromes ist – wenn diese zeitlich unverzögert erfolgt – die erste Halbwelle massgebend. Fig. 4 zeigt den Stromverlauf in der ersten Halbwelle bei verschiedenen Einschaltwinkeln. Sehr deutlich zeigen diese Oszillogramme, dass bei tiefen Leistungsfaktoren die Stromanstiegsgeschwindigkeiten geringer sind als bei hohen $\cos\varphi$-Werten, was für das Verhalten der eingesetzten Leitungsschutzschalter und die sog. Strombegrenzung wichtig ist.

Beim Abschalten eines Stromes durch einen Automaten unterscheidet man zwei Phasen. Die erste Phase ist die Eigenzeit, die Zeit vom Auftreten des Kurzschlußstromes bis zum Beginn der Kontaktöffnung. Während dieser Zeit, welche bei modernen Selbstschaltern zwischen 0,5 und 1 ms liegt, steigt der Kurzschlußstrom auf einen Wert an, welcher nur durch die Impedanzverhältnisse des Kurzschlußstromkreises und den Innenwiderstand des Leitungsschutzschalters bestimmt ist. Dies ist besonders dann gravierend, wenn der Kurzschluss kurz vor dem Spannungsmaximum auftritt und der $\cos\varphi$ nahe bei 1 liegt (Fig. 4a). Fig. 5 zeigt, dass der Strom unter Umständen derart steil ansteigen kann, dass er nach 0,5...1 ms, also im Moment der Kontaktöffnung, schon fast seinen theoretisch möglichen Wert erreicht hat, eine Tatsache, die vom Schalter *nicht* beeinflusst werden kann.

Die grösstmögliche Stromanstiegsgeschwindigkeit ist gleich dem Quotienten des Scheitelwertes der Netzspannung und der Induktivität des Kurzschlußstromkreises. Im Versorgungsgebiet des erwähnten Trafos sind z.B. Stromanstiegsgeschwindigkeiten von 13 kA/ms möglich. Bei gleichem Kurzschlussstrom kann je nach Netzverhältnissen die Anstiegsgeschwindigkeit und damit der tatsächlich auftretende Strom stark variieren, ein Grund, weshalb man mit dem Begriff Strombegrenzung etwas vorsichtig umgehen sollte.

Nach der Kontaktöffnung folgt die 2. Phase der Abschaltung, die Löschung des Lichtbogens. Die dafür benötigte Zeit ist sehr stark von der Konstruktion der Lichtbogenkammer abhängig. Die Löschphase kann mit dem Ersatzschema nach Fig. 6 dargestellt werden. Nach Kirchhoff kann beim angegebenen Bezugssinn folgende Gleichung geschrieben werden:

$$U_N = iR + L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t + U_B$$

Bei einem Kurzschluss steigt der Strom mit einer Geschwindigkeit an, die vom Momentanwert der Netzspannung und der Induktivität des Kurzschlußstromkreises abhängig ist. Die sich nach dem Öffnen der Kontakte über diesen ausbildende Lichtbogenspannung u_B führt zu einer Reduktion von $L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$, d.h. die Stromanstiegsgeschwindigkeit wird geringer. Wird die Lichtbogenspannung zusammen mit dem ohmschen Spannungsabfall grösser als die momentane Netzspannung, so wird $L\,\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ negativ, d.h. der Strom sinkt. Der Verlauf der eigent-

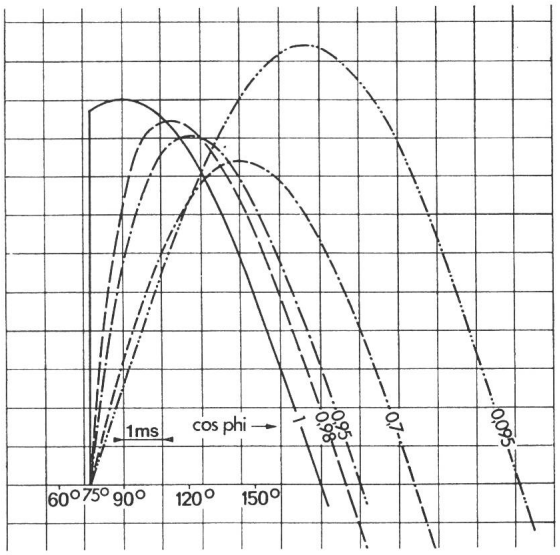


Fig. 5 Stromverlauf in Funktion der Zeit
Einschaltmoment bei 75° bezogen auf die Spannungshalbwelle

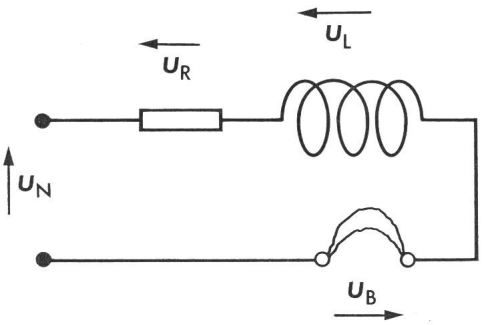


Fig. 6 Ersatzschema eines einphasigen Stromkreises während der Abschaltung

U_N Netzspannung
U_R ohmscher Spannungsabfall (= iR)
U_L induktiver Spannungsabfall (= L · di/dt)
U_B Lichtbogenspannung
R ohmscher Widerstand des Stromkreises
L induktiver Widerstand des Stromkreises

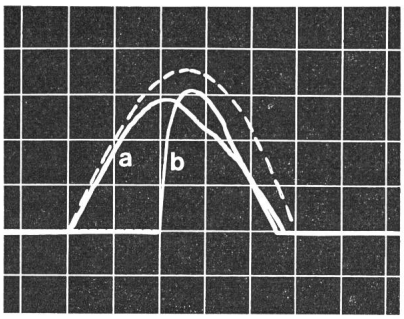


Fig. 7 Abschaltung eines Kurzschlußstromes von 2500 A (cos $\varphi \approx 1$) durch einen Schalter mit einer Lichtbogenspannung von 150 V

a Entstehung des Kurzschlusses bei 0° der Spannungshalbwelle
b Entstehung des Kurzschlusses bei 70° der Spannungshalbwelle
Strom: 1000 A/E; Zeit: 2 ms/E

lichen Löschphase ist also wesentlich von der Lichtbogenspannung abhängig.

Leitungsschutzschalter mit kleiner Lichtbogenspannung

Eine Lichtbogenkammer, welche keine speziellen Vorrichtungen wie Löschbleche, Blas- und Kühlvorrichtungen oder Mehrfachunterbrechung hat, ergibt eine Lichtbogenspannung von 80...150 V, was bei einer Phasenspannung von 220 V~ als klein bezeichnet werden kann. Eine solche Lichtbogenkammer ergibt das folgende Abschaltverhalten:

Entsteht der Kurzschluss beim Spannungsnulldurchgang, so steigt der Strom sinusförmig bis zum Beginn der Kontaktöffnung an. Der sich über den Kontakten bildende Lichtbogen ergibt eine Reduktion der Stromanstiegsgeschwindigkeit. Da die Lichtbogenspannung wesentlich kleiner als der Scheitelwert der Netzspannung ist, wird der tatsächlich fliessende Strom etwas unterhalb seines theoretischen Verlaufs liegen und 1 bis 2 ms vor seinem natürlichen Nulldurchgang abgeschaltet sein (Fig. 7). Schalter, die nach diesem Löschsystem funktionieren, werden deshalb als *Nullpunktlöscher* bezeichnet. Wenn die Netzspannung beim Auftreten des Kurzschlusses bei 70° der Spannungshalbwelle liegt (Fig. 7, Kurve b), steigt der Strom bis zum Öffnungsbeginn der Kontakte rasch an, und zwar um so rascher, je grösser der cos φ ist. Der Strom erreicht also höhere Werte bei einem hohen als bei einem tiefen cos φ. Die Löschung erfolgt auch hier kurz vor dem natürlichen Stromnulldurchgang.

Die Durchlassenergie des Nullpunktlöschers ist am grössten, wenn der Kurzschluss etwa beim Nulldurchgang der Spannung erfolgt. Sie beträgt je nach Höhe des Kurzschlußstromes 80 bis 30 % der entsprechenden Sinushalbwelle (Fig. 8, Kurve a).

Leitungsschutzschalter mit mittlerer Lichtbogenspannung

Durch den Einbau von Deionisierungsblechen in die Lichtbogenkammer kann die Lichtbogenspannung angehoben werden. Wenn es durch konstruktive Massnahmen gelingt, den Lichtbogen zwischen die Bleche zu treiben, kann mit etwa 10 Deionisierungsblechen eine Lichtbogenspannung von 300 bis 400 V erreicht werden, was etwa dem Scheitelwert der Phasenspannung von 220 V~ entspricht.

Entsteht hier der Kurzschluss beim Spannungsnulldurchgang, so steigt der Strom bis zum Beginn der Kontakttrennung wiederum etwa sinusförmig an. Nach dem Öffnen der Kontakte bewirkt die Lichtbogenspannung ein Abfallen des Stromes, weil die Netzspannung in diesem Moment noch wesentlich tiefer als die Lichtbogenspannung ist. Je nach dem Verlauf der Lichtbogenspannung ist der Strom nach 2...3 ms abgeschaltet (Fig. 9). Eine solche Abschaltung ist für einen Automaten, der mit erhöhter Lichtbogenspannung arbeitet, absolut problemlos, da die Durchlassenergie gering ist.

Ein interessanterer Fall liegt vor, wenn die Netzspannung beim Auftreten des Kurzschlusses kurz vor ihrem Maximum liegt (Fig. 9, Kurve b). Infolge der grossen Anstiegsgeschwindigkeit öffnen die Kontakte erst, wenn der Strom praktisch den maximalen Wert des Kurzschlußstromes erreicht hat. Wenn auch die Abschaltzeit nur etwa 3 ms beträgt, ist die Durchlassenergie wesentlich höher, als beim Auftreten des Kurzschlusses im Spannungsnulldurchgang. Bei Schaltern, welche mit erhöhter Lichtbogenspannung arbeiten, ist daher immer dieser Fall der ungünstigste.

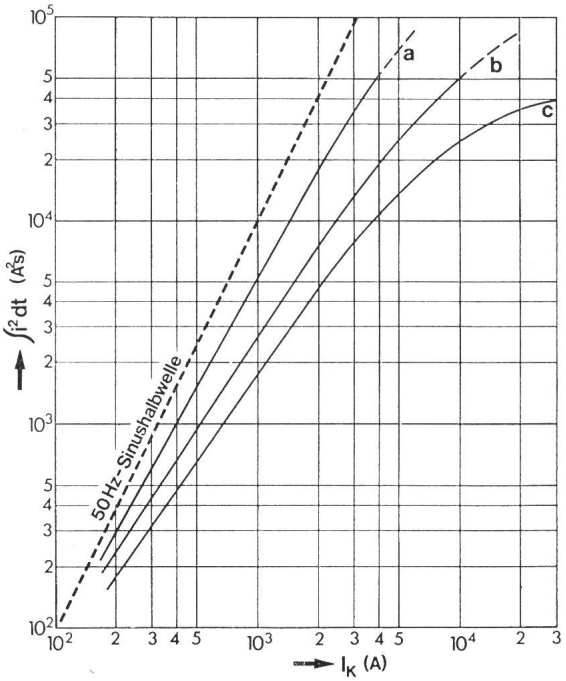


Fig. 8 Durchlassenergie in Funktion des Kurzschlußstromes

a Lichtbogenspannung 150 V
b Lichtbogenspannung 350 V
c Lichtbogenspannung 700 V

Die Durchlassenergie ist in Fig. 8b dargestellt. Sie beträgt je nach Höhe des Kurzschlußstromes und Qualität des Schalters 60...8 % der entsprechenden Sinushalbwelle.

Fig. 8 zeigt, dass die Energiebegrenzung von Leitungsschutzschaltern mit höherer Lichtbogenspannung erst mit grösser werdendem Kurzschlußstrom wirksam wird. Da die Durchlassenergie unter anderem bei der Frage der Selektivität zur Vorsicherung wichtig ist, bedeutet dies, dass bei kleinen Kurzschlußströmen, also bei 1000 A oder weniger, wie sie in Feinnetzen oder in Hausinstallationen auftreten, die Selektivitätsverhältnisse durch den Einsatz von Leitungsschutzschaltern mit höherer Lichtbogenspannung gegenüber Nullpunktlöschern kaum verbessert werden können, vor allem wenn noch der grosse Streubereich der Sicherungen berücksichtigt wird.

Neben ihrem Einfluss auf das Selektivitätsverhalten zu vorgeschalteten Schmelzsicherungen ist die Durchlassenergie auch ein Mass für die Beanspruchung der Schaltkammer und des sich im Leitungsschutzschalter befindlichen Bimetalles. Da das Bimetall eines 10-A-Schalters im Maximum etwa 50000 A^2s erträgt und auch die Schaltkammer bei Schaltern mit den heute üblichen geometrischen Abmessungen bei 60000...80000 A^2s an der Grenze ihrer Beanspruchungsfähigkeit angelangt ist, kann festgestellt werden, dass die maximale Abschaltleistung beim Nullpunktlöscher bei etwa 4000...5000 A, beim Schalter mit einer Lichtbogenspannung von 350 V etwa bei 8000...10000 A liegt.

Wesentlich grössere Abschaltleistungen sind nicht ohne besondere Massnahmen möglich. Da der Strom selbst wegen der nur von der Netzinduktivität abhängigen Anstiegsgeschwindigkeit kaum beeinflusst werden kann, bleibt nur eine Reduktion der Abschaltzeit, um bei noch grösseren Strömen die Durchlassenergie tief zu halten. Dies ist praktisch nur über eine weitere Erhöhung der Lichtbogenspannung möglich.

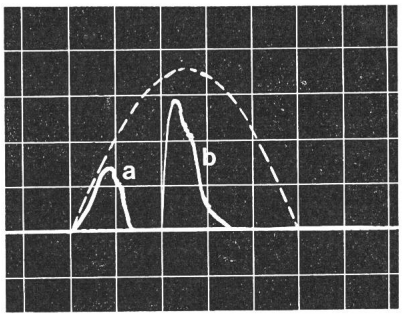


Fig. 9 Abschaltung eines Kurzschlußstromes von 2500 A ($\cos\varphi \approx 1$) durch einen Schalter mit einer Lichtbogenspannung von 350 V

a Entstehung des Kurzschlusses bei 0° der Spannungshalbwelle
b Entstehung des Kurzschlusses bei 70° der Spannungshalbwelle
Strom: 1000 A/E; Zeit: 2 ms/E

Leitungsschutzschalter mit hoher Lichtbogenspannung

Eine minimale Abschaltzeit wird erreicht, wenn die Konstruktion der Lichtbogenkammer einerseits ein dauerndes Ansteigen der Lichtbogenspannung bis zur vollständigen Abschaltung des Stromes zulässt und anderseits der Automat eine sehr geringe Eigenzeit hat. Für eine schnelle Abschaltung sind bei einer Phasenspannung von 220 V Lichtbogenspannungen von 700...800 V nötig. Dabei entstehen Abschaltzeiten von 1,6...1,8 ms. Als Beispiel zeigt Fig. 10 die Abschaltung eines Stromes von 10000 A mit einem Schalter, dessen Lichtbogenspannung etwa 800 V erreicht. Mit einem solchen Schalter (Fig. 11) ist im 380/220-V-Netz eine Abschaltleistung von 30...40 kA möglich. Die Durchlassenergie beträgt je nach Höhe des Kurzschlußstromes 40...0,4 % der entsprechenden Sinushalbwelle (Fig. 8c).

4. Durchlassenergie

Aufgrund eines Abschaltoszillogrammes kann die Durchlassenergie bestimmt werden, indem die Stromkurve quadriert und dann über die Zeit integriert wird. Die Durchlassenergie ist für das Selektivitätsverhalten eines Schalters zur Vorsicherung wichtig. Sie lässt sich aber nur dann korrekt angeben, wenn zumindest zwei Parameter, nämlich der Schalternennstrom sowie der $\cos\varphi$ des Kurzschlußstromes berücksichtigt werden.

Einfluss des Schalternennstromes

Wenn ein Schalter im Stromkreis liegt, wird der tatsächliche Kurzschlußstrom wegen des Schalterinnenwiderstandes nicht auf seinen theoretischen Wert ansteigen, selbst dann nicht, wenn der Leitungsschutzschalter nicht funktioniert und seine Kontakte geschlossen bleiben. Die Abweichung vom theoretischen Kurzschlußstrom ist um so grösser, je kleiner der Nennstrom des Schalters ist. So wird z.B. bei einem Kurzschlußstrom von 10000 A_{eff} ($U = 220$ V; $Z = 22$ mΩ) ein Schalter mit einem Nennstrom von 25 A ($R_i \approx 4$ mΩ) den Strom auf 8460 A_{eff} reduzieren, auch wenn der Schalter geschlossen bleibt. Bei einem Schalter mit 10 A Nennstrom ($R_i \approx 18$ mΩ) kann der Strom auf keinen Fall 5500 A_{eff} überschreiten. Diese Stromreduktion wirkt sich auf die Durchlassenergie sehr stark aus, weshalb bei den Durchlassenergiekurven jeweils der Schalternennstrom angegeben sein sollte. Sämtliche in diesen Untersuchungen angegebenen Kurven beziehen sich auf Schalter mit einem Nennstrom von 16 A.

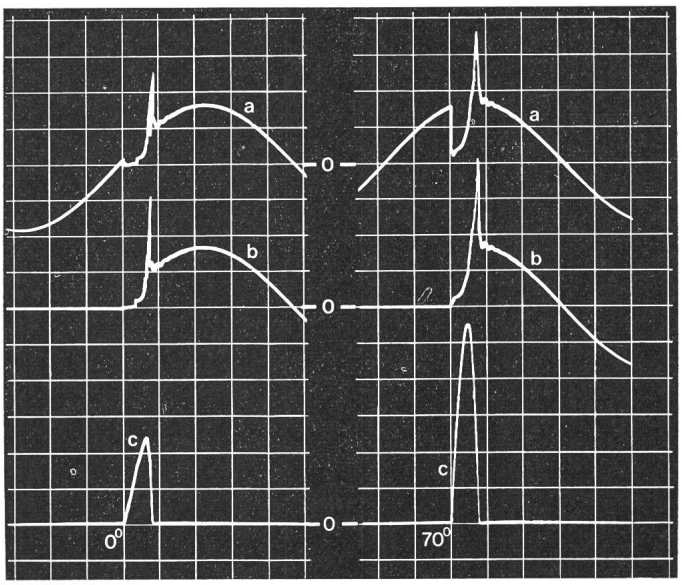
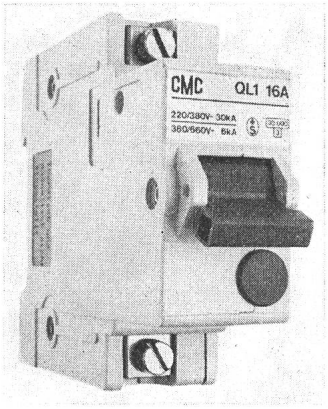


Fig. 10 Abschaltung eines Kurzschlußstromes von 10000 A ($\cos\varphi = 0{,}97$) durch einen Schalter mit einer Lichtbogenspannung von 800 V

a Netzspannung
b Spannung über dem Schalter
c Strom
links: Entstehung des Kurzschlusses bei 0° der Spannungshalbwelle
rechts: Entstehung des Kurzschlusses bei 70° der Spannungshalbwelle
Zeit: 2 ms/E; Spannungen: 200 V/E; Strom: 1000 A/E

Fig. 11
Hochleistungsautomat mit einer Abschaltleistung von 30 kA für Nennströme von 10...40 A



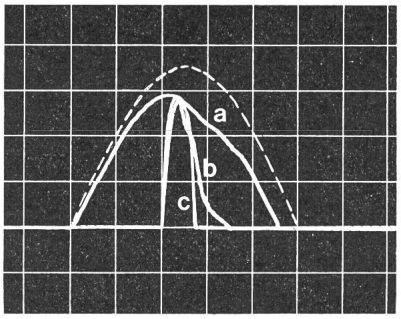


Fig. 13 Abschaltung eines Kurzschlußstromes von 2500 A ($\cos\varphi \approx 1$) durch Schalter verschiedener Lichtbogenspannung im für den betreffenden Schalter ungünstigsten Entstehungsmoment des Kurzschlusses
Lichtbogenspannungen (*a*) 150 V, (*b*) 350 V, (*c*) 700 V

Einfluss des Leistungsfaktors

Der Einfluss der Stromanstiegsgeschwindigkeit auf die Durchlassenergie ist deshalb ganz bedeutend, weil jeder Schalter eine bestimmte Eigenzeit hat, die nicht unterschritten werden kann. Dies hat zur Folge, dass beim Beginn der Kontaktöffnung bei einem hohen $\cos\varphi$ der Strom einen höheren Wert erreicht hat als beim an sich gleichen Kurzschlußstrom, aber einem tieferen $\cos\varphi$. Eine korrekte Angabe der Durchlassenergie sollte also auch den Leistungsfaktor enthalten.

5. Bestimmung der Selektivitätsgrenzen

Wenn die Durchlassenergie eines Schalters die Schmelzenergie der vorgeschalteten Sicherung überschreitet, besteht keine Selektivität zwischen der Sicherung und dem nachgeschalteten Schalter. Fig. 12 zeigt die Durchlassenergiekennlinien verschiedener Leitungsschutzschalter sowie das Schmelzenergiestreuband einer flinken 60-A-Normalleistungssicherung.

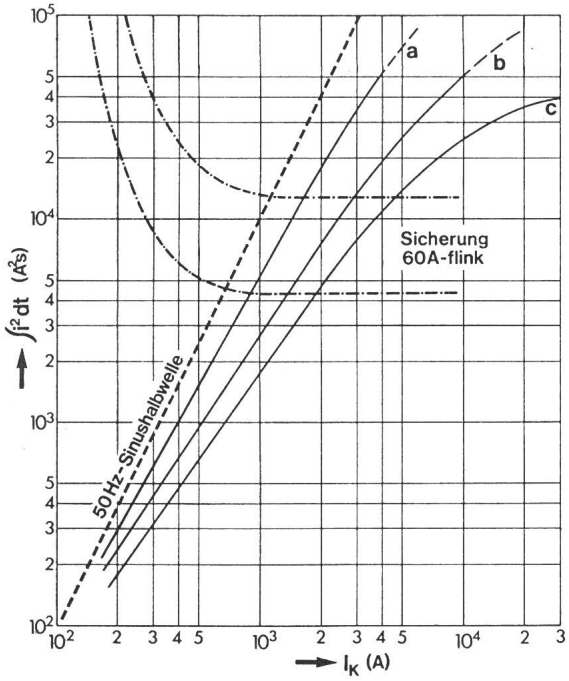


Fig. 12 Durchlassenergie in Funktion des Kurzschlußstromes verschiedener Leitungsschutzschalter gemäss Fig. 8 sowie Schmelzenergiestreuband der flinken Normalleistungssicherung 60 A
Die Schnittpunkte geben die Selektivitätsgrenzen an

Die Schnittpunkte ergeben die in Tab. I zusammengefassten Selektivitätsgrenzen.

Welcher Wert für Selektivitätsüberlegungen gewählt werden soll, d.h. die untere oder obere, oder eine mittlere Selektivitätsgrenze, ist abhängig davon, wie wichtig das Selektivitätsverhalten in einem bestimmten Fall ist. Es muss auch noch berücksichtigt werden, dass eine Vorbelastung der Sicherung ihre Schmelzenergie herabsetzt. So dürfte eine Vorbelastung von 70 % des Sicherungs-Nennstromes die minimale Schmelzenergie von 4400 A^2s (Fig. 12) um weitere 1000 A^2s herabsetzen. Die unteren Selektivitätsgrenzen verschieben sich dann auf die Werte von 780 A, 1150 A und 1580 A für die drei Schaltertypen.

6. Auslösekennlinie

Die mehr oder weniger wirksame Energiebegrenzung der verschiedenen Schaltertypen hat im Strombereich über der Ansprechgrenze der magnetischen Auslösung einen Einfluss auf den Verlauf der Auslösekennlinie. Obschon auf der Abszisse der Auslösekennlinie der theoretische Wert des Kurzschlußstromes aufgetragen ist (Fig. 13 gestrichelte Kurve) erreicht der tatsächliche, während der Abschaltung über den Schalter fliessende Strom diesen Wert gar nicht (Fig. 13a, b, c). Dieser Gegebenheit muss die Auslösekennlinie gerecht werden.

Ein Vergleich verschiedener Schaltertypen ist nur über die Durchlassenergie möglich. In der Auslösekennlinie $t = f(I_k)$ wird daher nicht die tatsächliche Abschaltzeit, sondern eine virtuelle Zeit t^* eingetragen. Diese errechnet sich nach der Formel:

$$t^* = \frac{\int i^2 \, dt}{I^2_k}$$

Tabelle I

Lichtbogenspannung	150 V	350 V	700 V
Untere Selektivitätsgrenze	900 A	1350 A	1900 A
Obere Selektivitätsgrenze	1650 A	2900 A	4700 A

Tabelle II

Lichtbogenspannung des Automaten	Durchlassenergie bei 2500 A	t*
100...150 V	27 000 A^2s	4,35 ms
300...350 V	10 700 A^2s	1,71 ms
700...800 V	6 400 A^2s	1,02 ms

Für die drei Schaltertypen ergibt dies bei einem Kurzschlußstrom $I_k = 2500$ A virtuelle Zeiten t^* nach Tab. II.

Die Auslösekennlinien der Leitungsschutzschalter müssen daher im Kurzschlussbereich richtig interpretiert werden. Die bei einem bestimmten Strom angegebene Zeit entspricht nicht der wirklichen Abschaltzeit. Andererseits erreicht aber auch der Strom nicht den auf der Abszisse angegebenen Wert. Da die Sicherungskennlinien nach den gleichen Überlegungen aufgezeichnet sind, ist es möglich, diese direkt mit den Kennlinien der Leitungsschutzschalter zu vergleichen (Fig. 14). Die Schnittpunkte ergeben wieder die Selektivitätsgrenzen.

Theoretischer und praktisch möglicher Kurzschlußstrom hinter einem 1000-kVA-Trafo mit $x = 7{,}4$ mΩ und $R = 2{,}1$ mΩ

Tabelle III

Kurzschlußstrom			Werte mit 16-A-Schalter	
Eff. Wert (A)	cos φ	Theor. Scheitelwert (A)	cos φ	Maximal möglicher Scheitelwert bei Einschaltphase 60° (A)
2 000	0,998	2 830	0,998	2 645
10 000	0,942	14 170	0,966	10 250
20 000	0,74	29 840	0,898	16 155
28 600	0,273	58 040	0,779	22 812

7. Strombegrenzung

Obwohl für Selektivitätsbetrachtungen die Stromscheitelwerte von untergeordneter Bedeutung sind, sollen – weil sehr oft von Strombegrenzung gesprochen wird – die tatsächlich auftretenden Stromscheitelwerte etwas näher untersucht werden.

Tab. III zeigt die theoretisch maximal möglichen Scheitelwerte des Kurzschlußstromes hinter einem 1000-kVA-Trafo mit einer Kurzschlußspannung von 5% sowie die praktisch möglichen Scheitelwerte des Stromes, wenn im Stromkreis ein 16-A-Leitungsschutzschalter ($R_i = 7$ mΩ) eingebaut ist und der Kurzschluss bei 60° der Spannungshalbwelle eintritt. Fig. 15b zeigt diese Werte. Wie man sieht, ergibt sich eine beträchtliche Strombegrenzung ganz unabhängig von der Qualität und dem Aufbau der Löschkammer. Den Einfluss der Löschkammer selbst geben die Kurven c, d und e der gleichen Figur. Es zeigt sich, dass von einer durch die Löschkammer verursachten Strombegrenzung erst bei relativ hohen Kurzschlussströmen gesprochen werden kann.

Zusammenfassend ist deshalb festzuhalten, dass für den Einsatz von Leitungsschutzschaltern die folgenden Kriterien – aufgeführt in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit – massgebend sind: Abschaltvermögen, Durchlassenergie sowie evtl. Abschaltzeit und Strombegrenzung.

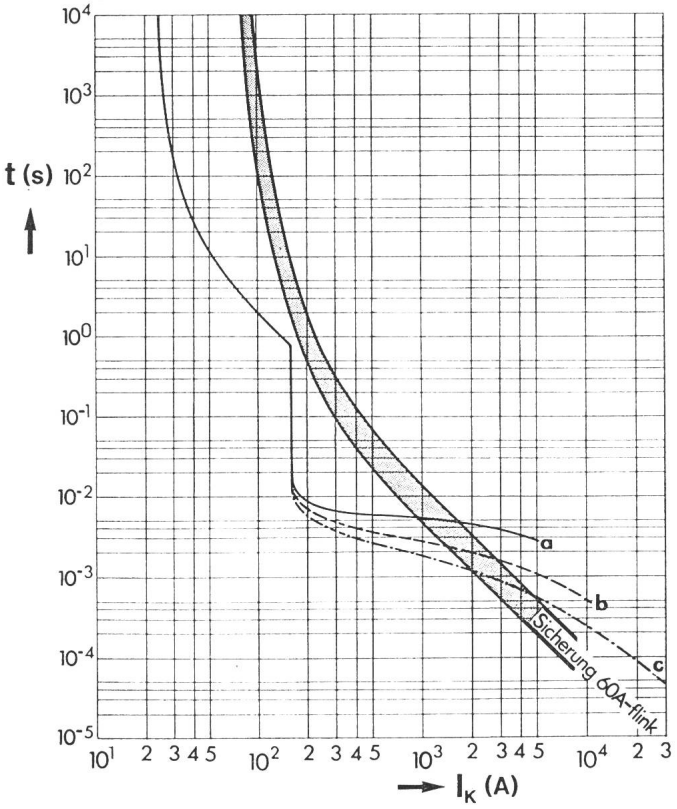


Fig. 14 **Auslösekennlinie von 16-A-Leitungsschutzschaltern mit verschiedenen Lichtbogenspannungen sowie Auslösekennlinie der flinken Normalleistungssicherung 60 A**
Lichtbogenspannung (*a*) 150 V, (*b*) 350 V, (*c*) 700 V

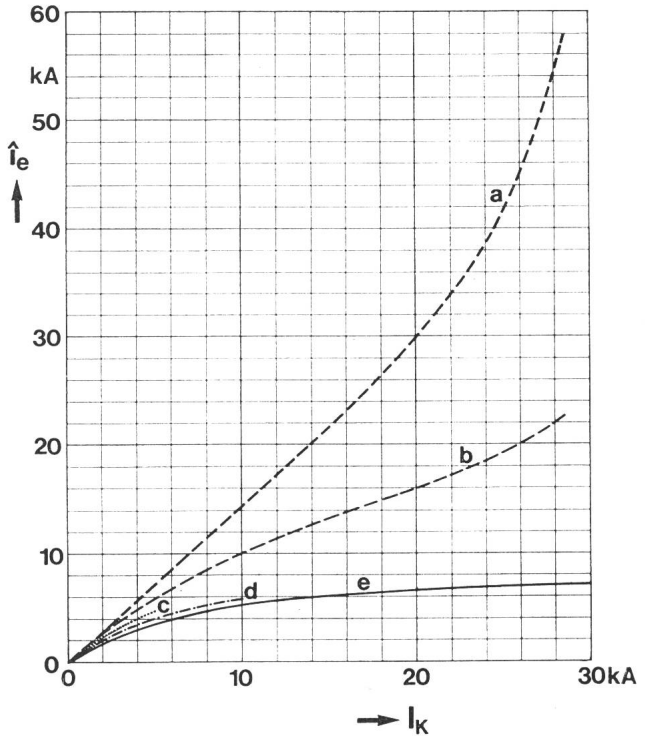


Fig. 15 **Grösstmögliche Scheitelwerte von Kurzschlußströmen in Abhängigkeit des Effektivwertes des Kurzschlußstromes**
a Theoretisch möglicher Wert bei überbrücktem Leitungsschutzschalter
b Begrenzung durch den Innenwiderstand eines 16-A-Leitungsschutzschalters
c Begrenzung durch Leitungsschutzschalter mit Lichtbogenspannung 150 V
d Begrenzung durch Leitungsschutzschalter mit Lichtbogenspannung 350 V
e Begrenzung durch Leitungsschutzschalter mit Lichtbogenspannung 700 V

8. Schlussfolgerung

Schalter mit tiefer Lichtbogenspannung (Nullpunktlöscher) haben ein Abschaltvermögen von 4000...5000 A und können ohne Vorsicherung an Stellen eingebaut werden, wo der mutmassliche Kurzschlußstrom diese Werte nicht überschreitet. Werden solche Schalter hinter einer Vorsicherung gemäss Angabe des Herstellers installiert, so können sie an jeder beliebigen Stelle ohne Rücksicht auf die Höhe des Kurzschlussstromes eingebaut werden. Da praktisch in jeder Feinverteilung irgendwo Vorsicherungen mit Nennströmen unter 100 A eingebaut sind, braucht in den seltensten Fällen auf den nachgeschalteten Leitungsschutzschalter Rücksicht genommen zu werden.

Schalter mit mittlerer Lichtbogenspannung können ohne Vorsicherung an Stellen eingebaut werden, wo der Kurzschlußstrom die auf den Schaltern angegebene Abschaltleistung nicht überschreitet. Bei höheren Kurzschlußströmen sind auch diese Apparate mit entsprechenden Sicherungen zu schützen.

Mit *Schaltern mit hoher Lichtbogenspannung* sind Abschaltleistungen von 30 kA und mehr im 380/220-V-Netz möglich. Dies bringt den Vorteil, dass sie praktisch an jeder beliebigen Stelle, also auch in Haupt- und Unterverteilungen direkt an die Sammelschiene angeschlossen werden können. Darüber hinaus hat ein solcher Hochleistungsautomat noch die folgenden Vorteile:

1. Da ein solcher Apparat höchstens eine Durchlassenergie von 30000...60000 A^2s je nach Nennstrom zulässt, ist er in der Lage, nachgeschaltete schwächere Automaten einwandfrei zu schützen. Damit kann eine vollständig sicherungslose Verteilung aufgebaut werden.

2. Dank der hohen Lichtbogenspannung erreicht ein solcher Apparat auch im 660/380-V∼-Netz eine grosse Abschaltleistung. Sie liegt etwa bei 6 kA. Dies bedeutet, dass damit die gesamte Kurzschlussleistung eines Transformators von 400 kVA, 660/380 V abgeschaltet werden kann.

3. Wegen der hohen Lichtbogenspannung und der damit verbundenen kurzen Abschaltzeit wird die Schaltleistung von der Frequenz nicht beeinflusst. Der Schalter wird also auch z. B. bei $16^2/_3$ Hz oder Gleichstrom seine volle Abschaltleistung erreichen. Bei Gleichstrom sind je nach Spannung mehrere Pole in Serie zu schalten.

4. Wenn ein solcher Schalter hinter einem Leistungsschalter mit höherem Nennstrom eingebaut ist, ergeben sich sehr gute Selektivitätsverhältnisse, auch dann, wenn die magnetische Auslösung des vorgeschalteten Leistungsschalters keine zeitliche Verzögerung hat. Der Grund dafür ist die sehr kurze Abschaltzeit. Der im Kurzschlussfall über den vorgeschalteten Leistungsschalter fliessende Stromimpuls von nur 1,6...1,8 ms Dauer genügt meist nicht, die magnetische Auslösung des vorgeschalteten Automaten zum Auslösen zu bringen. Versuche haben gezeigt, dass zu Leistungsschaltern mit Nennströmen von 200 A und mehr absolute Selektivität besteht.

5. Dank der limitierten Durchlassenergie arbeiten solche Hochleistungsautomaten zu Niederspannungshochleistungssicherungen von 150 A, Trägheitsgrad 2 und 200 A, Trägheitsgrad 1, absolut selektiv.

6. Dank seiner hohen Abschaltleistung und geringen Durchlassenergie eignet sich der Hochleistungsautomat vorzüglich als Ersatz für die Bezügersicherung. Bei einem Kurzschlussstrom am Hauseingang von z. B. 10 kA arbeitet dieser Automat selbst bei einem satten Kurzschluss schon absolut selektiv zu einer flinken 100-A-Schraubsicherung.

Literatur

[1] *J. Kirchdorfer:* Selektiver Leitungsschutz in der Hausinstallation. Bull. SEV/VSE 67(1976)24, S. 1329...1335.

[2] Vorschriften für Schraub- und Stecksicherungen mit geschlossenen Schmelzeinsätzen. Publikation des SEV No. 153(1948).

[3] Sicherheitsvorschriften für Schraub- und Stecksicherungen mit geschlossenen Schmelzeinsätzen. Publikation des SEV No. 1010(1959).

[4] Vorschriften für Leitungsschutzschalter. Publikation des SEV No. 181(1948), Änderungen und Ergänzungen 1950 und 1955.

[5] Sicherheitsvorschriften für Leitungsschutzschalter. Publikation des SEV No. 1008(1959).

Adresse des Autors

Rudolf Bächtold, El. Ing. HTL, CMC Carl Maier + Cie AG, 8201 Schaffhausen.