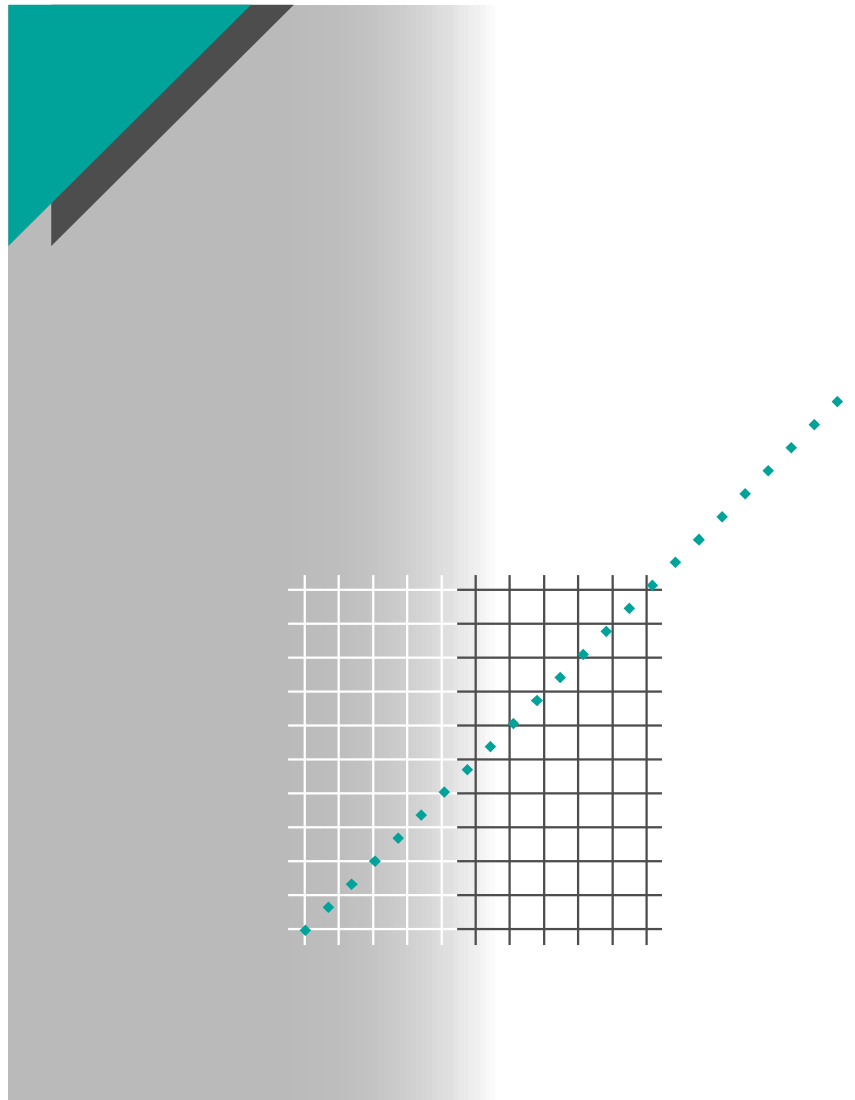


Technisches Heft Nr. 167

Energetische Selektivität in Niederspannungsnetzen



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique



Energetische Selektivität in Niederspannungs- netzen

Lexikon

Ec

Energie, welche die Schutzeinrichtung beim Abschalten durchlässt. Diese wird dargestellt durch $\int I_c^2 \cdot dt \approx I^2 \cdot t_c$.

ic

Kurzschlussstrom, der infolge der Strombegrenzung tatsächlich durch den Leistungsschalter fließt (der abgeschaltete Strom ist niedriger als I_p).

Ip

Prospektiver Kurzschlussstrom, der sich ohne Schutzeinrichtung entwickeln würde (Effektivwert).

Ir

Einstellstrom des Überlastschutzes.

tc

Tatsächliche Ausschaltzeit (Lichtbogenlöschung).

UT

Elektronische Verarbeitungseinheit.

Betätigungseinrichtung

Einrichtung, die eine mechanische Wirkung ausüben kann.

Bemessungsstrom

Entspricht dem maximalen Einstellstrom des Auslösers.

Schnellauslöser mit hohem Schwellwert (DIN)

Schnellauslöser, der verwendet wird, um die thermische Belastung im Kurzschlussfall zu begrenzen.

Schnellauslöser (INS)

Auslöser ohne Verzögerungseinrichtung, der bei wenigen Vielfachen von I_n anspricht (Schutz gegen Kurzschluss).

Auslöser mit langer Verzögerung (LR)

Auslöser mit Verzögerungseinrichtung für mehrere Sekunden (Überlastschutz).

Auslöser mit kurzer Verzögerung (CR)

Auslöser mit Verzögerungseinrichtung für einige zehn bis einige hundert Millisekunden.

Wenn die Verzögerung bei zunehmendem I_p abnimmt, spricht man von abhängiger Kurzverzögerung (CRD).

Strombegrenzender Leistungsschalter

Leistungsschalter, der beim Unterbrechen eines Kurzschlussstroms den Strom auf einen Wert begrenzt, der wesentlich niedriger ist als der prospektive Kurzschlussstrom (I_p).

Selektiv-Leistungsschalter

Leistungsschalter, der mit einer Verzögerungseinrichtung versehen ist (Zeitselektivität).

Teilselektivität

Teilselektivität liegt vor, wenn die Selektivität bis zu einem bestimmten Wert des Stroms I_p gewährleistet ist.

Vollständige Selektivität

Die Selektivität ist vollständig, wenn sie unabhängig vom Wert des prospektiven Kurzschlussstroms gewährleistet ist.

Baugröße

Entspricht der Aufteilung der Baureihe, z.B. Baugröße 160 A, 250 A, 630 A, 800 A usw.

Energieselektivität in Niederspannungsnetzen

Inhaltsverzeichnis

1. Selektivität in NS-Netzen	Definition	S. 4
	Beitrag zum Ziel der Sicherheit und Verfügbarkeit	S. 4
	Selektivitätsbereiche	S. 5
2. Techniken der Kurzschlussselektivität	Stromselektivität	S. 6
	Zeitselektivität	S. 6
	«SELLIM»-Selektivität	S. 7
	Logische Selektivität	S. 7
	Anwendung der verschiedenen Selektivitätsarten	S. 7
3. Energieselektivität	Darstellungsrahmen der Energien	S. 8
	Charakterisierung eines Leistungsschalters Compact Typ NS	S. 9
	Charakterisierung der Auslöser	S. 10
4. Vorteile und Verwirklichung der Energieselektivität	Strombegrenzender Leistungsschalter mit Druckauslöser	S. 12
	Selektivität mit den Leistungsschaltern Compact Typ NS	S. 13
	Verwendung zusammen mit herkömmlichen Schutzeinrichtungen	S. 14
5. Schlussfolgerung		S. 15
6. Anhang: Zur Erinnerung: Unterbrechung mit Strombegrenzung		S. 16

Der Zweck des vorliegenden Technischen Heftes besteht darin, eine neue Technik der Selektivität der Abschaltungen im Kurzschlussfall vorzustellen: die Energieselektivität. Sie ist einfacher und wirksamer als die herkömmlichen Selektivitätstechniken und wird bei der für die NS-Verteilung verwendeten Leistungsschalterreihe Compact Typ NS angewendet. Damit die Selektivität unabhängig vom prospektiven Kurzschlussstrom gewährleistet ist, genügt es, vor- und nachgeordnete Leistungsschalter verschiedener Baugrößen (Verhältnis $\geq 2,5$) mit Bemessungsströmen mit einem Verhältnis von $\geq 1,6$ vorzusehen.

Nach einer kurzen Übersicht über die herkömmlichen Selektivitätstechniken betrachten die Autoren das Verhalten der Leistungsschalter und der verschiedenen Auslöser unter einem energetischen Gesichtspunkt.

Hierauf zeigen sie auf, dass die vollständige Selektivität bis zum Ausschaltvermögen der Leistungsschalter über mehrere Ebenen möglich ist, ohne die Zeitselektivität anzuwenden.

1. Selektivität in NS-Netzen

Definition

In einer elektrischen Anlage sind die Verbraucher über eine Reihe von Schutz-, Schalt- und Steuereinrichtungen mit dem Stromerzeuger verbunden. Das vorliegende Technische Heft behandelt im wesentlichen die Schutzfunktion der Leistungsschalter.

Bei einer strahlenförmigen Verteilung (siehe Abb. 1) besteht das Ziel der Selektivität darin, den fehlerhaften Verbraucher oder Abgang, jedoch nur diesen, vom Netz zu trennen, um eine maximale Kontinuität des Betriebs aufrechtzuerhalten.

Bei fehlender oder mangelhafter Selektivitätsuntersuchung kann eine elektrische Störung mehrere Schutzeinrichtungen auslösen. In diesem Fall kann ein einziger Fehler einen mehr oder weniger grossen Teil der Anlage abschalten. Das Ergebnis ist ein unerwünschter Verlust der Verfügbarkeit elektrischer Energie an den intakten Abgängen.

Die in einer Anlage vorkommenden Überströme sind von verschiedener Art:

- Überlast,
- Kurzschluss,
- Einschaltstromspitzen, jedoch auch
- Fehlerströme gegen Erde,
- Ausgleichsströme infolge eines momentanen Tals oder Fehlens der Spannung.

Um eine maximale Kontinuität des Betriebs zu gewährleisten, müssen untereinander koordinierte Schutzeinrichtungen verwendet werden.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese Spannungstäler das ungewollte Öffnen der Leistungsschalter durch Unterspannungsauslöser bewirken können.

Beitrag zum Ziel der Sicherheit und Verfügbarkeit

Jeder Fehlerart entspricht eine bestimmte Schutzeinrichtung (Überlastschutz, Kurzschlusschutz, Erdschlussstromschutz, Unterspannungsschutz usw.). Ein Fehler kann jedoch direkt oder indirekt mehrere Arten von Schutzeinrichtungen auslösen.

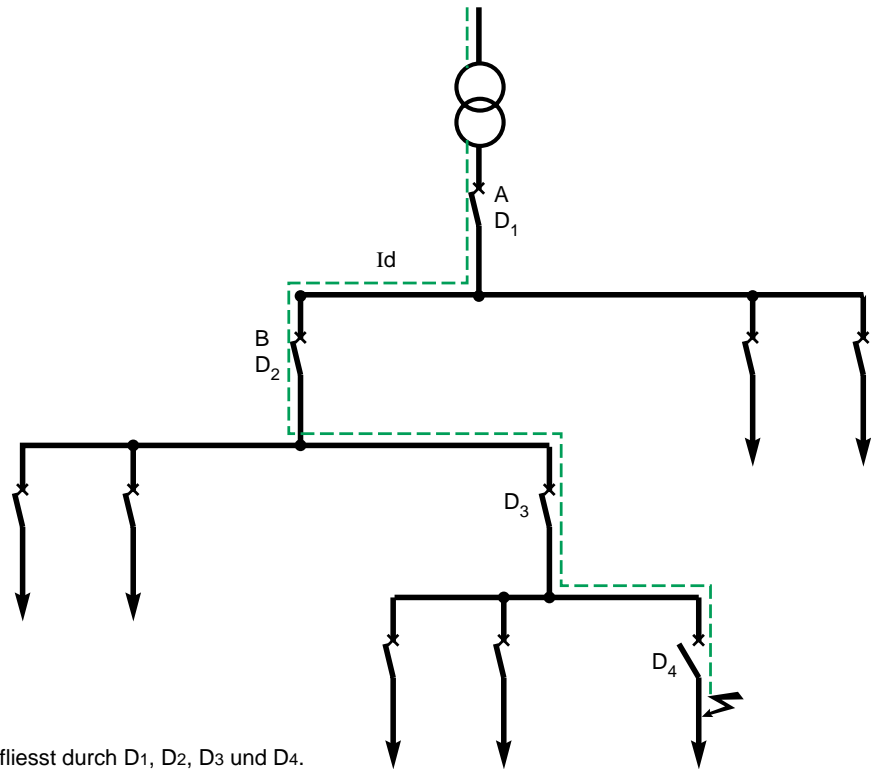


Abb. 1: Mehrere Leistungsschalter vom Fehler d betroffen.

Beispiele

- Ein hoher Kurzschlussstrom bewirkt ein Spannungstal und kann den Unterspannungsschutz auslösen.
- Ein Isolationsfehler kann gleichzeitig von einem Differentialschutz als einpoliger Kurzschluss und von einem Kurzschlusschutz als Überstromfehler erachtet werden (dies betrifft die Erdungsschemas TN und IT).
- Ein hoher Kurzschlussstrom kann (im Fall des Erdungsschemas TT) infolge von lokalen Sättigungen des Summenstrom-Wandler, wodurch ein falscher einpoliger Strom erzeugt wird, das Ansprechen des Erdschlussstromschutzes bewirken.

Für ein bestimmtes Netz werden für die Selektivitätsuntersuchung – oder allgemeiner gesagt, den Schutzplan einer Anlage – die von den Herstellern veröffentlichten Kennlinien der Schutzeinrichtungen verwendet.

Diese Untersuchung beginnt mit einer Analyse des Bedarfs an Schutzeinrich-

tungen für jede Fehlerart, gefolgt von einer Analyse der Koordination der verschiedenen Schutzeinrichtungen, die betroffen sein können. Dies bietet die Möglichkeit, die beste Kontinuität des Betriebs unter gleichzeitiger Gewährleistung des Personen- und Sachenschutzes zu erhalten.

Im folgenden Kapitel beschränken wir uns auf das Problem der Selektivität bei Überströmen (Überlast und Kurzschluss).

In diesem Rahmen zeigt sich die Selektivität sehr einfach am Öffnen oder nicht Öffnen von mehreren Leistungsschaltern (siehe Abb. 2).

Vollständige Selektivität

Die Verteilung wird vollständig selektiv genannt, wenn, und nur wenn, unabhängig vom Wert des Fehlerstroms von den vom Fehlerstrom betroffenen Schutzeinrichtungen sich nur die unmittelbar vorgeordnete öffnet und offen bleibt.

Teilselektivität

Die Selektivität wird Teilselektivität genannt, wenn die obige Bedingung von einem bestimmten Wert des Fehlerstroms an nicht mehr eingehalten wird.

Selektivitätsbereiche

In einer Verteileranlage können zwei Arten von Überstromfehlern angetroffen werden:

- Überlast,
- Kurzschluss.

Im allgemeinen werden Überströme zwischen dem 1,1- und 10fachen Wert des Betriebsstroms als Überlast bezeichnet.

Darüber hinaus handelt es sich um Kurzschlüsse, die in möglichst kurzer Zeit mit Hilfe von Schnellauslösern (INS) oder Auslösern mit kurzer Verzögerung (CR) des Leistungsschalters abgeschaltet werden müssen.

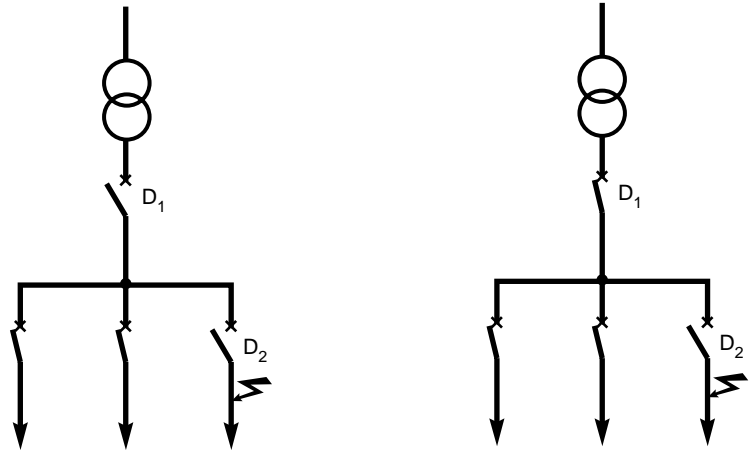
Die Selektivitätsuntersuchung unterscheidet je nach der Art des Fehlers:

Überlastbereich

Dieser Bereich liegt oberhalb der Auslöseschwelle I_{LR} des Auslösers mit langer Verzögerung (LR). Die Auslösekennlinie $t_c = f(I_p)$ wird in der Regel zur besseren Übereinstimmung mit der Kurve der thermischen Belastbarkeit der Kabel mit invertierter Zeitskala dargestellt.

Die bekannte und weitverbreitete Methode besteht darin, die Kennlinien der vom Fehler betroffenen LR-Auslöser in einem doppellogarithmischen System aufzuzeichnen (siehe Abb. 3).

Für einen beliebigen Wert des Überstroms ist die Überlast-Selektivität gewährleistet, wenn die Zeit für die Nichtausschaltung des vorgeordneten Leistungsschalters D_1 länger ist als die maximale Ausschaltzeit (einschliesslich der Lichtbogenzeit) des Leistungsschalters D_2 . Diese Bedingung wird in der Praxis erfüllt, wenn $I_{LR1}/I_{LR2} > 1,6$.



a) D_1 und D_2 öffnen.

⇒ Keine Selektivität: An den intakten Abgängen steht keine Energie zur Verfügung.

b) D_2 öffnet und D_1 bleibt geschlossen.

⇒ Selektivität: Die intakten Abgänge versorgen weiter mit Energie.

Abb. 2: Verhalten der Leistungsschalter beim Auftreten eines Fehlers.

Kurzschlussbereich

Hier wird die Selektivität durch Vergleich der Kennlinien des vorgeordneten und des nachgeordneten Leistungsschalters beurteilt.

Die Techniken zum Erzielen der Kurzschlussselektivität zwischen zwei Leistungsschaltern beruhen auf der Verwendung von Leistungsschaltern und/oder Auslösern verschiedener Art oder mit verschiedenen Einstellungen, um zu verhindern, dass sich die Kennlinien überdecken.

Diese Techniken sind zahlreich und werden im folgenden Kapitel beschrieben.

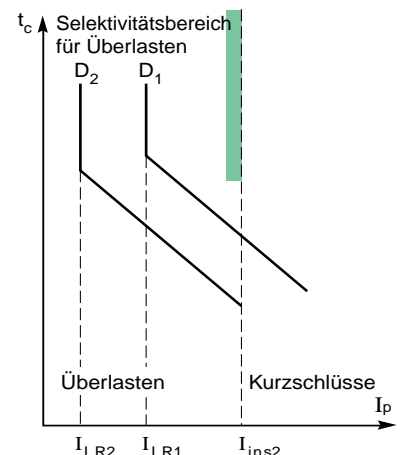


Abb. 3: Selektivität für Überlasten.

2. Techniken der Kurzschlussselektivität

Mehrere Techniken ermöglichen das Erreichen des Ziels der Selektivität zwischen zwei Schaltgeräten:

- Stromselektivität,
- Zeitselektivität,
- «SELLIM»-Selektivität,
- Logische Selektivität
- Energieselektivität (Gegenstand der Kapitel 3 und 4).

Stromselektivität

Die Stromselektivität ergibt sich aus der Abweichung zwischen den Schwellwerten der Schnellauslöser oder Auslöser mit kurzer Verzögerung aufeinanderfolgender Leistungsschalter.

Sie wird vor allem in der Endverteilung angewendet und erfordert schnelle Leistungsschalter ohne Abschaltverzögerung. Sie wird für Kurzschlüsse angewendet und bewirkt in der Regel eine Teilsselektivität.

Sie ist desto wirksamer, je verschiedener die Fehlerströme wegen des nicht vernachlässigbaren Widerstandes der Leitungen mit kleinem Querschnitt sind, je nachdem, wo sie im Netz auftreten, (siehe Abb. 4).

Der Selektivitätsbereich ist desto grösser, je grösser der Abstand zwischen den Schwellwerten der Schnellauslöser von D_1 und von D_2 ist, und je weiter die Fehlerstelle von D_2 entfernt ist (I_{cc} niedrig $< I_{ins}$ von D_1).

Das minimale Verhältnis zwischen I_{ins1} und I_{ins2} beträgt 1,5, um die Genauigkeit der Schwellwerte zu berücksichtigen.

Zeitselektivität

Um eine vollständige Selektivität gewährleisten zu können, dürfen sich die Auslösekennlinien der beiden Leistungsschalter unabhängig vom Wert des prospektiven Kurzschlussstroms an keiner Stelle überdecken. Für hohe Fehlerströme ist die vollständige Selektivität gewährleistet, wenn sich die beiden horizontalen Teile der Kennlinien rechts von I_{ins1} voneinander unterscheiden.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden mehrere Lösungen angewendet:

- Die klassische Lösung besteht darin, Selektiv-Leistungsschalter zu wählen, die mit einer Verzögerungseinrichtung versehen sind.

- Die zweite Lösung ist nur in der letzten Ebene einer Verteilung anwendbar und besteht darin, einen strombegrenzenden Leistungsschalter zu verwenden.

Anwendung von Selektiv-Leistungsschaltern

Der Begriff «Selektiv» hat zwei Bedeutungen:

- Der Auslöser des Leistungsschalters ist mit einer festen oder einstellbaren Verzögerungseinrichtung ausgerüstet.
 - Die Anlage und der Leistungsschalter sind in der Lage, den Kurzschlussstrom während der Dauer der Verzögerungszeit auszuhalten (thermisches und elektrodynamisches Verhalten).
- Einem Selektiv-Leistungsschalter wird normalerweise ein anderer Selektiv-Leistungsschalter vorgeschaltet, dessen Verzögerung grösser ist.

Die Anwendung dieser Art von Leistungsschaltern, die der Zeitselektivität entspricht, führt beim Auftreten eines Kurzschlussstroms zu Gesamt-Ausschaltzeiten von über 20 ms (eine Periode), wobei einige hundert Millisekunden erreicht werden können (siehe Abb. 5).

Wenn die Anlage (und eventuell der Leistungsschalter) nicht in der Lage ist, während der Verzögerungszeit einen hohen I_{cc} auszuhalten, muss der Leistungsschalter D_1 mit einem Schnellauslöser mit hohem Schwellwert (DIN) ausgerüstet werden.

In diesem Fall beschränkt sich der Selektivitätsbereich auf den Schwellwert des DIN des vorgeordneten Leistungsschalters (siehe Abb. 5).

Verwendung von strombegrenzenden Leistungsschaltern und «Pseudo-Zeitselektivität»

Diese Leistungsschalter sind gekennzeichnet durch:

- die Tatsache, dass sie den Kurzschlussstrom dank ihrer schnellen Kontaktöffnung und hohen Lichtbogen-spannung stark begrenzen,
- die Tatsache, dass sie desto schneller abschalten, je grösser der prospektive Kurzschlussstrom ist.

Somit ermöglicht die Wahl eines vorgeschalteten strombegrenzenden Leistungsschalters eine «Pseudo-Zeitselektivität» zwischen zwei Schutzebenen. Diese Lösung gestattet überdies wegen ihrer Strombegrenzung und Schnelligkeit der Abschaltung des

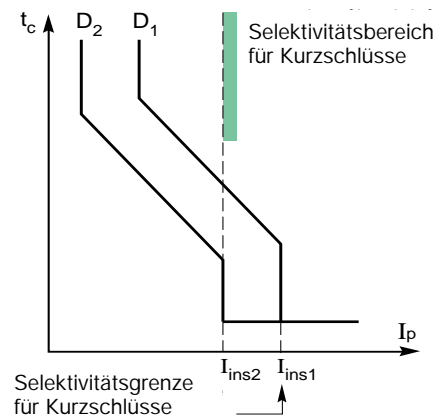
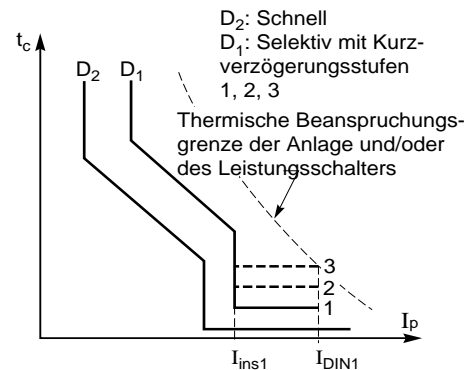
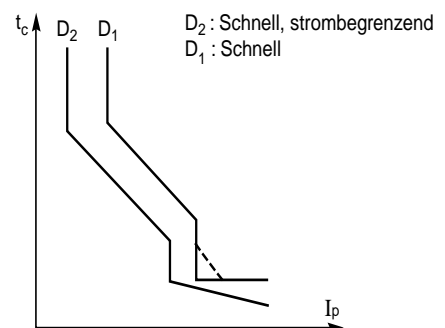


Abb. 4: Stromselektivität.



Anmerkung: Die Anwendung eines Schnellauslösers mit hohem Schwellwert DIN legt die Selektivitätsgrenze fest.

Abb. 5: Zeitselektivität.



Anmerkung: Die Anwendung von Auslösern mit abhängiger Kurzverzögerung (gestrichelt) an D_1 begünstigt die Selektivität.

Abb. 6: Pseudo-Zeitselektivität.

Fehlers eine Begrenzung der thermischen und elektrodynamischen Beanspruchungen der Anlage (siehe Abb. 6).

«SELLIM»-Selektivität

Das «SELLIM»-System bietet mehrere Vorteile:

- Selektivität
- Kaskadenschaltung
- Reduktion der Beanspruchungen der Anlage

Es besteht darin, einem schnellen Leistungsschalter D_2 einen ultrastrombegrenzenden Leistungsschalter D_1 vorzuschalten, der mit einem speziellen Auslöser ausgerüstet ist, der die Besonderheit hat, während der ersten Halbwelle des Fehlerstroms nicht anzusprechen (siehe Abb. 7)

Ein bei B anstehender Fehler wird von beiden Leistungsschaltern erfasst.

Der mit einem Schnellauslöser ausgerüstete D_2 öffnet sich, sobald der Kurzschlussstrom grösser als seine Auslöseschwelle ist, und schaltet den Fehler in weniger als einer Halbperiode ab.

D_1 stellt nur eine Stromwelle fest und spricht nicht an. Der Kurzschlussstrom

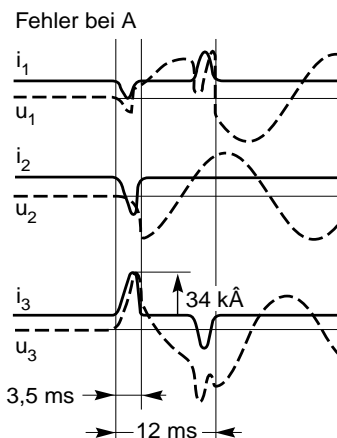
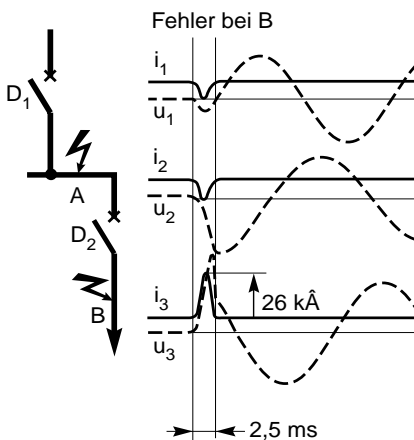


Abb 7: «SELLIM»-Selektivität.
(D_1 = Compact C250 L SB
 D_2 = Compact C125 N)

bewirkt jedoch das Abheben der Kontakte, was den Strom und die daraus entstehenden Beanspruchungen begrenzt. Diese Kurzschlussstrombegrenzung gestattet nachgeordnete Leistungsschalter, deren Ausschaltvermögen niedriger ist als der prospektive Kurzschlussstrom.

Ein Fehler bei A bewirkt ein Abheben der Kontakte des strombegrenzenden Leistungsschalters, was eine Begrenzung der Beanspruchungen durch den Kurzschlussstrom und das Öffnen von D_1 nach der zweiten Halbwelle des begrenzten Stroms zur Folge hat.

Logische Selektivität

Die logische Selektivität erfordert eine Informationsübermittlung zwischen den Auslösern der Leistungsschalter der einzelnen Ebenen der strahlenförmigen Verteilung.

Das Prinzip ist einfach (siehe Abb. 8):

- Alle Auslöser, die einen Strom feststellen, der höher ist als ihr Auslöse-

Schwellwert, senden an den unmittelbar vorgeordneten Auslöser einen logischen Wartebefehl.

- Der Auslöser des unmittelbar vor dem Kurzschluss angeordneten Leistungsschalters erhält keinen Wartebefehl und spricht sofort an.

Somit bleiben auf allen Ebenen der Verteilung die Zeiten für die Abschaltung eines Fehlers kurz.

Die logische Selektivität kann für NS-Selektiv-Leistungsschalter für hohe Ströme angewendet werden und gelangt insbesondere in industriellen HS-Netzen zum Einsatz. Für weitere Einzelheiten siehe Technisches Heft Nr. 2 «Protection des réseaux par le système de sélectivité logique».

Anwendung der verschiedenen Selektivitätsarten

Die oben vorgestellten verschiedenen Selektivitätsarten werden gewöhnlich miteinander kombiniert, um die beste Verfügbarkeit der elektrischen Energie zu erhalten. Ein Beispiel ist in der Abbildung 9 dargestellt.

Selektivitätsuntersuchungen werden heute mit Hilfe von Tabellen durchgeführt, die von den Herstellern geliefert werden. Diese zeigen für jede Leistungsschalterkombination und für jeden ihrer Auslöser die Selektivitätsgrenzen.

Die sich aus einer eventuell fehlenden Selektivität und der Gerätwahl ergebenden Kosten werden berücksichtigt.

Die im folgenden Kapitel vorgestellte Energieselektivität ist eine Neuerung, welche die Projektierung von NS-Verteilungen wesentlich vereinfacht und die Möglichkeit bietet, mit den niedrigsten Kosten über mehrere Ebenen eine vollständige Selektivität zu erhalten.

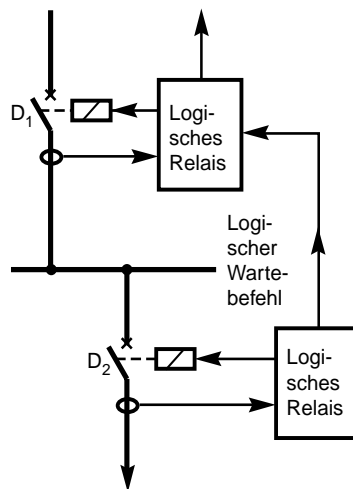


Abb. 8: Logische Selektivität.

Betroffener Stromkreis	Selektivitätsart				Leistungsschalter-Typ
	Log. Selektivität	Zeitselektivität	«SELLIM»-Selektivität	Pseudo-Zeitselektivität	
Einspeisung der NS-Anlage					Selektiv, logisch
Starkstromverteilung					Selektiv Schnell, limitierend «SELLIM» Schnell
Endverteilung					Schnell, limitierend

Abb. 9: Beispiel für die Anwendung der verschiedenen Selektivitätsarten.

3. Energieselektivität

Die Energieselektivität ist eine Verbesserung und Verallgemeinerung der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen «Pseudo-Zeitselektivität»: Die Selektivität ist vollständig, wenn für jeden I_p die Energie, die der nachgeordnete Leistungsschalter durchlässt, niedriger ist als die Energie, die erforderlich ist, damit der Auslöser des vorgeschalteten Leistungsschalters anspricht.

Die technische Verwirklichung des Prinzips der Energieselektivität ist der Gegenstand eines von Merlin Gerin angemeldeten Patentes und führte zur Entwicklung der Leistungsschalter Compact Typ NS.

Diese schnellen und stark strombegrenzenden Leistungsschalter entsprechen der Entwicklung des Bedarfs:

- Erhöhung der installierten Leistung, was eine Erhöhung der Kurzschlussströme und damit des Ausschaltvermögens mit sich bringt.

- Bestrebungen, die Beanspruchungen der Anlage minimal zu halten und den Kurzschlussstrom in bezug auf Stärke und Dauer zu begrenzen.

Um Energieüberlegungen anstellen und die Energieselektivität verstehen zu können, ist die Wahl des Darstellungsrahmens der Kennlinien ein wichtiger Faktor, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Hierauf werden wir das Energieverhalten des strombegrenzenden Leistungsschalter und der verschiedenen Auslöser untersuchen.

Darstellungsrahmen der Energien

Die gewöhnlich für Selektivitätsuntersuchungen verwendeten Kennlinien $t_c = f(I_p)$ sind für strombegrenzende Leistungsschalter unbrauchbar, wenn die Ströme höher sind als $25 I_n$ (was bei der Frequenz 50 Hz Ausschaltzeiten von weniger als 10 ms entspricht).

Die Selektivität muss aufgrund von Ausgleichsvorgängen untersucht werden und nicht mehr aufgrund von periodischen Vorgängen. Das Verständnis der Energieselektivität erfordert die Darstellung und Verwendung:

- der Stromwelle, die der Leistungsschalter bei der Unterbrechung durchlässt und durch ihr Joulesches Integral $\int i^2 \cdot dt$ (oft durch $I^2 \cdot t$ ausgedrückt)

dargestellt wird und der Ausschaltenergie entspricht (E_c).

- der Empfindlichkeit der Auslöser für die Energie, die dem Stromimpuls entspricht.

Logischerweise werden diese Charakteristiken durch die Kennlinien $I^2 \cdot t = f(I_p)$ anstelle von $t_c = f(I_p)$ dargestellt, (siehe Abb. 10).

Es ist zu bemerken, dass die Norm IEC 947-2 die Charakterisierung der Leistungsschalter durch diese Kennlinienart vorsieht.

Aus praktischen Gründen wird die Kennlinie $I^2 \cdot t = f(I_p)$ in einem doppelt-logarithmischen System dargestellt. Für die Selektivitätsuntersuchung liegen die Grenzen des Ausschalt- $I_2 \cdot t$ (E_c der Leistungsschalter) für prospektive Ströme zwischen 1 und 100 kA zwischen 10^4 und $10^7 A^2$. Somit erstreckt sich E_c über drei Dekaden und der Strom über zwei.

Wenn man berücksichtigt, dass die abgeschnittene Stromhalbwelle einer Sinus-Halbwelle mit derselben Neigung am Anfang wie der prospektive Strom entspricht, kann E_c mit den folgenden Ausdrücken in Funktion von I_p dargestellt werden (siehe Anhang «Unterbrechung mit Strombegrenzung»):

□ für $t \geq 10$ ms

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot t$$

□ für $t < 10$ ms

$$(3) \Rightarrow E_c = 4 \cdot f^2 \cdot I_p^2 \cdot t_{vc}^3$$

oder

$$(4) \Rightarrow E_c = \frac{3}{4\sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

Ausgehend von diesen Gleichungen ist es möglich, das Achsensystem $I^2 \cdot t / I_p$ zu verbessern, um zusätzliche Informationen zu erhalten: virtuelle Ausschaltzeit (t_{vc}) und begrenzter Scheitelwert von $i(i_c)$.

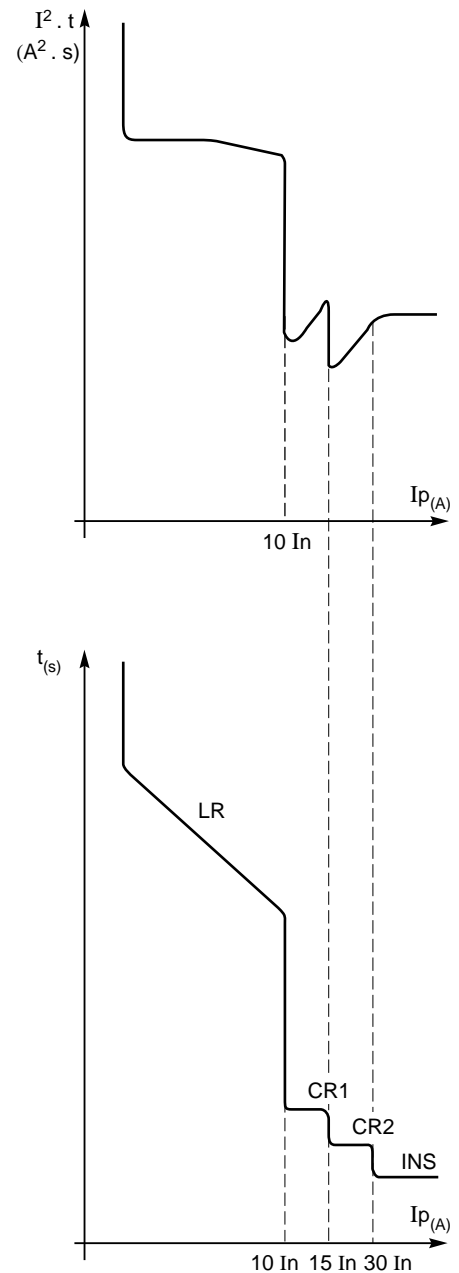


Abb. 10: Kennlinien $t_c = f(I_p)$ und $I^2 \cdot t = f(I_p)$ eines mit einem elektronischen Auslöser ausgerüsteten Leistungsschalters.

Zeitgeraden (siehe Abb. 11)

Für eine bestimmte Frequenz kann ein Netz von Geraden für konstante Ausschaltzeiten in das doppeltlogarithmische Gitter eingetragen werden.

Beispiel für $f = 50$ Hz:

■ Die Gerade für $t = 20$ ms entspricht der am meisten angetroffenen Ausschaltzeit, wenn I_p höher ist als der Schwellwert der Schnellauslöser und niedriger als der Wert für das Abheben der Kontakte:

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$$

■ $t = 10$ ms ist die Ausschaltzeit am Begrenzungsschwellwert:

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 10^{-2}$$

■ $t = 9$ bis 4 ms drücken das Strombegrenzungsverhalten des Leistungsschalters aus:

$$(3) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot t_{vc}^3 \cdot 10^4$$

Geraden der Scheitelströme

Ebenso kann aufgrund der Gleichung

$$E_c = \frac{3}{4\sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

ein Netz von Kurven für konstante Grenzscheitelströme in das Basisgitter eingetragen werden (siehe Abb. 11).

Es ist zu bemerken, dass dieser Darstellungsrahmen eine Charakterisierung der Leistungsschalter und Auslöser bei 50 Hz für dreipolige, zweipolige oder einpolige Kurzschlüsse gestattet.

Charakterisierung eines Leistungsschalters Compact Typ NS

Darstellung des Ausschalt $I^2 \cdot t$

Die Charakteristik des $I^2 \cdot t$, das ein Leistungsschalter durchlässt, geht aus genormten Typprüfungen oder numerischen Simulationen hervor, die für eine bestimmte Spannung und Frequenz durchgeführt werden.

Die folgenden Kennlinien entsprechen dreiphasigen Kurzschlüssen bei 400 V/ 50 Hz. Dieselben Kennlinien können für andere Spannungen oder Frequenzen aufgezeichnet werden.

Die eingetragenen Werte sind die erhaltenen Maximalwerte für verschiedene Einschaltwinkel (obere Grenzwerte) (siehe Abb. 12).

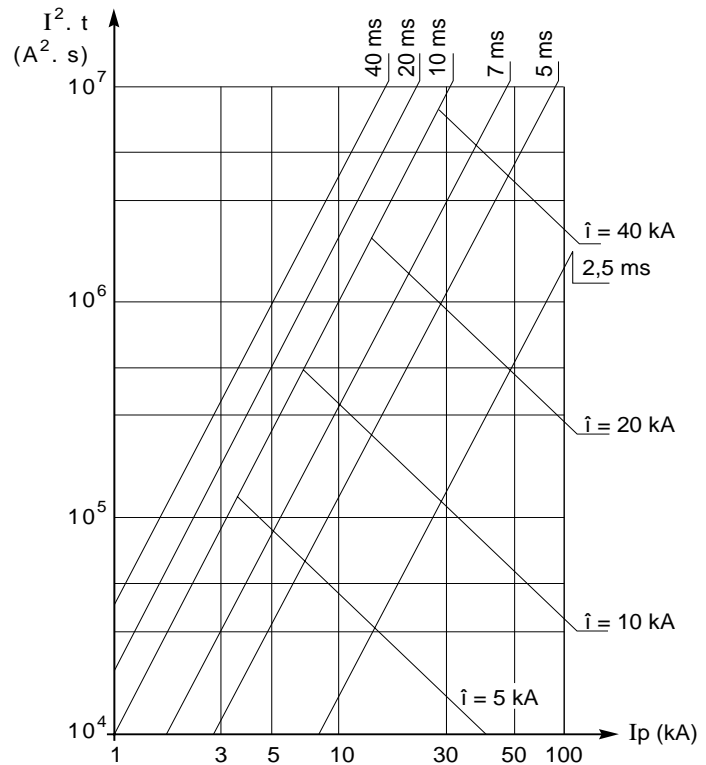


Abb. 11: Darstellungsraster für die Energien.

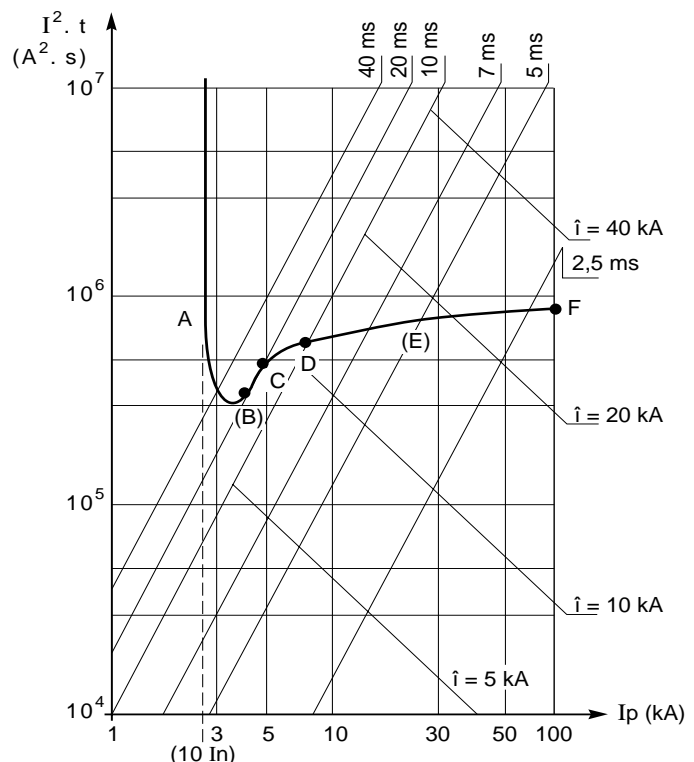


Abb. 12: Unterbreckungskennlinie eines strombegrenzenden Leistungsschalters.

Interpretation der Kennlinie

Der Kurve der Abbildung 12 zeigt einen Leistungsschalter Compact Typ NS, Baugröße 250 A, der mit einem elektromechanischen Auslöser mit abhängiger Kurzverzögerung (CRD), dessen Schwellwert 10 In beträgt, ausgerüstet ist, können verschiedene Informationen entnommen werden. Sie charakterisieren die einzelnen Phasen der Ausschaltverhaltens des strombegrenzenden Leistungsschalters in Abhängigkeit vom Wert des prospektiven Kurzschlussstroms I_p .

■ Punkt A: Wenn der Kurzschlussstrom die Auslöseschwelle des Auslösers erreicht, beträgt die Ausschaltzeit für einen INS- oder CRD-Auslöser typisch 50 ms.

■ Punkt B: Wenn der Kurzschlussstrom höher als der Schwellwert des Auslösers ist, nimmt die Ausschaltzeit ab und pendelt sich ab 16 In auf 20 ms ein.

■ Punkt C: Wenn der Kurzschlussstrom dem Schwellwert für das Abheben der Kontakte entspricht, beginnt die Strombegrenzung durch die Einfügung einer Lichtbogenspannung in den Stromkreis. Diese Begrenzung bewirkt eine Aufhebung der Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem Strom und damit eine Reduktion der Kurzschlussabschaltzeit von 20 auf 10 ms bei zunehmendem I_p .

■ Punkt D: Wenn der Kurzschlussstrom ungefähr dem 1,7fachen des Schwellwertes für das Abheben der Kontakte entspricht, genügt die Aufreissenergie der Kontakte, damit sie sich vollständig öffnen. Die Ausschaltzeit beträgt in diesem Fall typisch 10 ms.

Diese Unterbrechung vom Reflex-Typ ist autonom und benötigt nur einen Auslöser, um den ausgeschalteten Zustand des Leistungsschalters zu bestätigen und zu verhindern, dass sich die Kontakte ungewollt wieder schliessen.

■ Bereich E: Wenn sich der Kurzschlussstroms über den 2fachen Schwellwert für das Abheben der Kontakte entwickelt, wird die Begrenzung des Kurzschlussstroms zunehmend wirksam, was sich als immer kürzere Ausschaltzeiten auswirkt.

■ Punkt F: Das Ende der Kennlinie stellte den Grenzwert des Ausschaltvermögens des Leistungsschalters dar. Diese Kennlinie ist sehr reich an Informationen:

■ Schwellwert des Auslösers (I Schwellwert; Punkt A)

■ Ausschalt- $I^2 \cdot t$ in Funktion des prospektiven Stroms

■ Strom für den Beginn der Abhebens der Kontakte (I_r ; Punkt C)

■ Ausschaltvermögen (Punkt F)

■ Ausschaltzeit (t_{vc}) in Funktion des prospektiven Stroms

■ Begrenzter Scheitelwert (\hat{i}_c) in Funktion des prospektiven Stroms

■ Strom, über welchem $t_{vc} < 10$ ms (Beginn der Strombegrenzung)

Charakterisierung der Auslöser

Die Auslöser werden durch ihre Reaktionszeit auf einen bestimmten Strom (Welle, Halbwelle usw.) charakterisiert. Durch Variation der Dauer und des Scheitelwertes des Stroms, was verschiedenen von einem Leistungsschalter begrenzten Strömen entspricht, erhält man durch wiederholte Prüfungen eine Reihe von Punkten, die in den vorher beschriebenen Träger eingetragen werden können, um die Kennlinie eines Auslösers zu erhalten.

Magnetische Auslöser

■ Schnellauslöser

Dieser in der Regel aus einem magnetischen U und einer mech. Verzögerung bestehende Auslöser stellt den Kurz-

schlusschutz sicher. Seine Reaktionszeit beträgt bei seiner Ansprechschwelle (die zwischen dem 5- und 10fachen des Nennstroms liegt) weniger als 50 ms und nimmt mit zunehmendem Strom schnell unter 10 ms ab (siehe Abb. 13).

■ Schnellauslöser mit hohem Schwellwert (DIN)

Wie im Abschnitt «Zeitselektivität» erwähnt, haben die DIN im Rahmen der Anwendung der Zeitselektivität die Aufgabe, die thermische Beanspruchung der Anlage und des Schaltgerätes zu begrenzen (siehe Abb. 5).

Der DIN ist ein Schnellauslöser, dessen Schwellwert über dem 10fachen I_n liegt. Er kann elektromagnetisch oder elektronisch sein.

■ Auslöser mit konstanter Verzögerung

Es handelt sich um einen Schnellauslöser, der mit einer Verzögerungseinrichtung vom «Uhrwerk»-Typ ausgerüstet ist, um seine Auslösung in bezug auf den vorgeordneten Leistungsschalter selektiv zu machen.

Die Verzögerungen können zwischen 10 und 500 ms betragen und sind in der Regel in Stufen einstellbar. Die Abbildung 13 zeigt die einer kurzen Verzögerung entsprechende Kennlinie (Einstellung auf 20 ms).

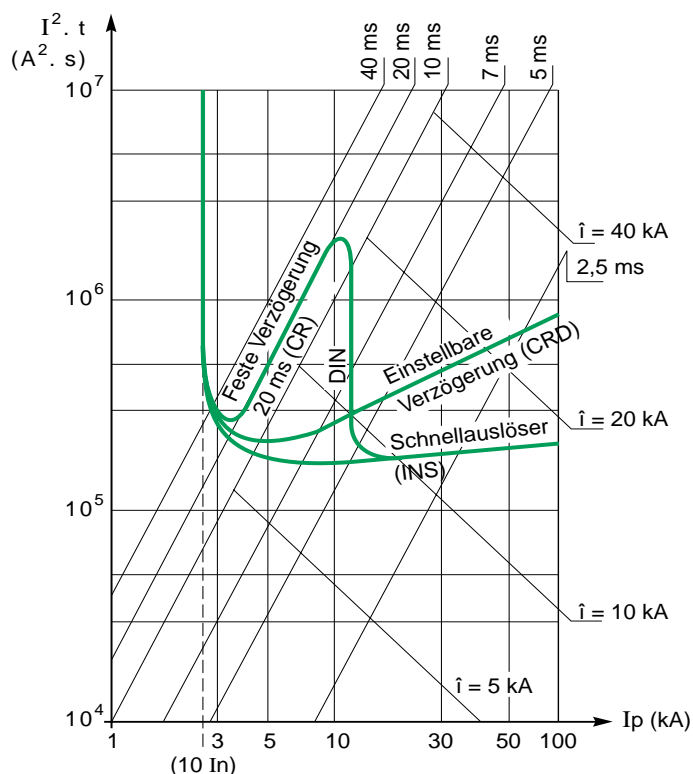


Abb. 13: Kennlinien verschiedener magnetischer Auslöser.

Wenn die thermische Beanspruchung ($I^2 \cdot t$) infolge einer grossen Verzögerung begrenzt werden muss, tritt der DIN in Aktion (siehe Abb. 13).

■ Auslöser mit in Funktion von I_p variabler Verzögerung (abhängige Kurzverzögerung, CRD).

Die Verzögerung erfolgt durch die Trägheit einer Masse und ist deshalb umgekehrt proportional zu I_p (siehe Abb. 13).

Elektronischer Auslöser

Die Momentanwerte der elektronischen Auslöser reagieren auf den Effektivwert oder den Scheitelwert des Stroms. Ihre $I^2 \cdot t$ -Charakteristik befindet sich für hohe Fehlerströme theoretisch auf einer Geraden $\hat{i}_c = \text{konstant}$.

In Wirklichkeit gilt dies für eine Stromimpulsdauer, die grösser ist als die Reaktionszeit des Betätigungsteils des Auslösers (typisch 4 ms), unter welchem Wert die Trägheit des mechanischen Teils des Auslösers bewirkt, dass für hohe I_p eine Charakteristik von der Art eines elektromagnetischen Schnellauslösers vorliegt.

Deshalb muss der Auslöser durch seine Kennlinie $E_c = f(I_p)$ charakterisiert werden, indem dieselben Prüfungen wie mit den magnetischen Auslösern durchgeführt werden.

Diese Auslöser können vom unverzögerten oder vom verzögerten Typ sein.

Es können verschiedene Typen von elektronischen Auslösern vereinigt werden, wie zum Beispiel:

- 10 bis 15 In CR (40 ms),
- 15 bis 30 In CR (10 ms)
- > 30 In INS.

Die Abbildung 14 zeigt dieses Beispiel. Die Kennlinien dieser Verbindung müssen für die Ausschaltenergie des Leistungsschalters mit denjenigen der Abbildung 10 in Zusammenhang gebracht werden.

Auslöser mit Lichtbogendetektor

Die im allgemeinen mit elektronischen Auslösern verbundenen Lichtbogendetektoren können eingesetzt werden:

- Um ein Schaltfeld zu schützen. Wenn in einem Feld ein Lichtbogen auftritt, bewirkt der Detektor das Öffnen des Einspeisungs-Leistungsschalters.
- Um einen Selektiv-Leistungsschalter zu schützen. Der in der Löschkammer angeordnete Lichtbogendetektor bewirkt über den elektronischen Auslöser eine Schnellauslösung des Leistungsschalters.

Damit ist der Selbstschutz der Schaltgerätes gewährleistet, der dessen Einsatz bis zur Grenze seiner elektrodynamischen Festigkeit gestattet.

Druckauslöser

Bei einem Leistungsschalter ist der in der Löschkammer auftretende Druck eine Folge der vom Lichtbogen entwickelten Energie.

Dieser Druck kann von einem bestimmten Kurzschlussstromniveau an zum Feststellen und Abschalten eines Lichtbogens verwendet werden.

Dies wird erreicht, indem die sich ausdehnenden Gase in der Löschkammer einem Kolben zugeführt werden, der das Öffnungssystem des Leistungsschalters ansteuert (siehe Abb. 15).

Der Druckauslöser kann eingesetzt werden:

- um (wie der Lichtbogendetektor) den

Selbstschutz eines Selektiv-Leistungsschalters zu gewährleisten,

- um das Ausschaltverhalten und die Betriebssicherheit eines strombegrenzenden schnellen Leistungsschalters zu verbessern.

Wenn mit jedem Leistungsschalter ein richtig eingestellter Druckauslöser verbunden ist, wird die Selektivität zwischen Leistungsschaltern verschiedener Baugrösse für alle Überströme über 20 In gewährleistet.

Es ist dieser Auslöser mit dem Energieverhalten ($I^2 \cdot t$ konstant), der die Grundlage der Energiselektivität bildet, die mit den strombegrenzenden Leistungsschaltern Compact Typ NS verwirklicht wird.

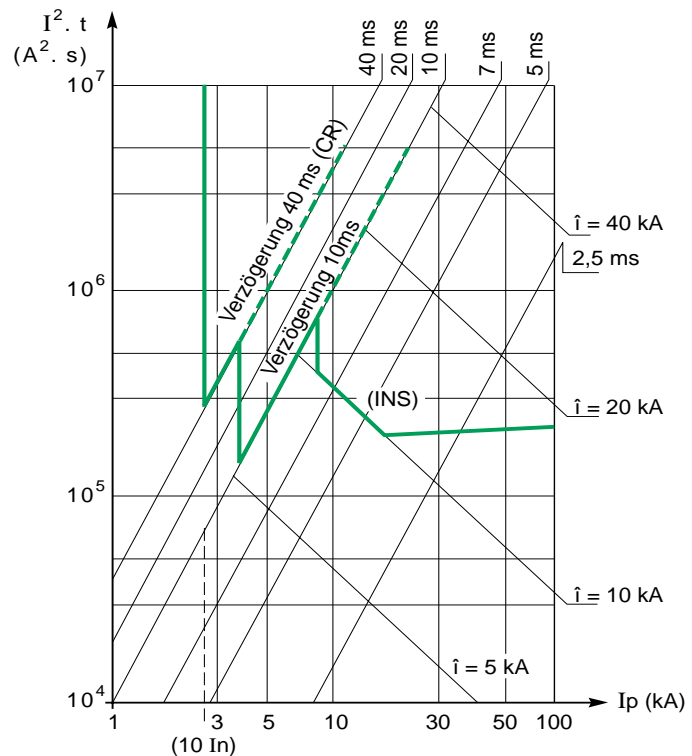


Abb. 14: Beispiele der Verbindung von Kennlinien elektronischer Auslöser.

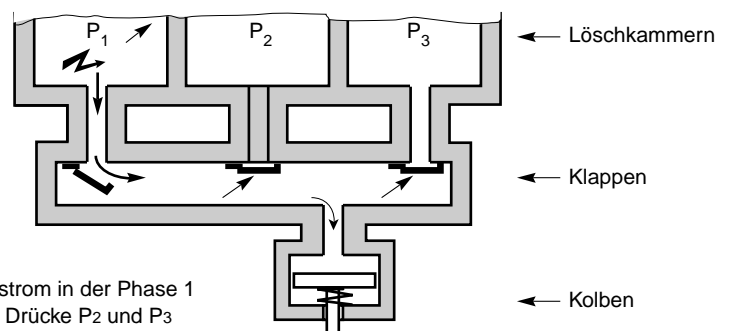


Abb. 15: Prinzip des Druckauslösers.

4. Vorteile und Verwirklichung der Energiselektivität

Es sei daran erinnert, dass das Auslösesystem eines Leistungsschalters unabhängig davon, ob es elektromechanisch, elektronisch oder gemischt ist, in bezug auf die folgenden Kriterien möglichst gut sein muss:

- Minimale Beanspruchung der Anlage (Begrenzung von \hat{i} und $I^2 \cdot t$).
- Ausschaltsicherheit.
- Minimale Beeinflussung des gesunden Teils der Anlage (Spannungstäler).
- Einfache Selektivitätsuntersuchungen.

Strombegrenzender Leistungsschalter mit Druckauslöser

Der mit einem elektromagnetischen oder elektronischen CRD-Auslöser mit doppelter Kurzverzögerung verbundene Druckauslöser erlaubt eine optimale Einhaltung der obigen Kriterien.

Die Abbildung 16 zeigt die «Energieempfindlichkeit» dieser Verbindung. Je grösser der prospektive Kurzschlussstrom ist, desto kürzer ist die Reaktionszeit, was zu einer Auslösung bei der praktisch konstanten Energie $I^2 \cdot t$ führt.

Die Energie, die der strombegrenzende Leistungsschalter beim Ausschalten durchlässt, folgt mit einer leichten Verschiebung demselben Gesetz.

Beanspruchungen der Anlage

Diese sind gegenüber denjenigen mit den strombegrenzenden Leistungsschaltern der vorhergehenden Generation reduziert. Im Beispiel der Abbildung 16 gilt für einen Leistungsschalter Compact Typ NS der Baugrösse 250 A und für einen I_p von 40 kA:

- die Ausschaltzeit beträgt 4 ms
- der Scheitelstrom beträgt 20 kA
- $I^2 \cdot t$ beträgt $8 \cdot 10^5 \cdot A^2 \cdot s$

Betriebssicherheit

Der Druckauslöser ist Bestandteil des Kurzschluss-Abschaltmechanismus und hängt somit von der Baugrösse des Leistungsschalters ab.

Der einstellbare CRD-Auslöser (Bemessungsstrom) ist unabhängig davon, ob er vom elektromagnetischen Typ (siehe Abb. 13) oder vom elektronischen Typ (siehe Abb. 14) ist, physisch unabhängig vom Druckauslöser.

Diese physische Trennung erhöht die Betriebssicherheit.

Spannungstäler

Spannungstäler in einer Anlage lösen die Unterspannungsauslöser der Leistungsschalter aus und bewirken ein Abfallen der Schütze.

Deren unbeabsichtigte Öffnung infolge eines durch einen Kurzschluss bewirkten Spannungstals hat einen Verlust der Kontinuität der Versorgung zur Folge.

Deshalb muss eine Selektivitätsuntersuchung auch das Verhalten der Schütze und Unterspannungsauslöser bei Spannungstälern erfassen.

Ein Spannungstal im Netz dauert so lange, bis die der Quellenspannung entgegengesetzte Lichtbogenspannung die Löschung des Stroms ermöglicht. Somit hängt das Spannungstal vom Typ des Leistungsschalters und/oder vom Typ des Auslösers ab.

■ Bei nicht strombegrenzenden Leistungsschaltern ist das Spannungstal gross und dauert ungefähr 10 bis 15 ms (siehe Abb. 17).

■ Bei strombegrenzenden Leistungsschaltern sorgt das schnelle Auftreten einer Lichtbogenspannung für ein in bezug auf Dauer und Amplitude minimales Spannungstal (siehe Abb. 17).

Bei Strömen in der Nähe des Kontaktabhebestroms dauert das Spannungstal etwa 5 ms und beträgt ungefähr 50% der Nennspannung.

Für höhere Ströme beträgt das Spannungstal etwa 30% der Nennspannung, dauert jedoch ungefähr 3 bis 4 ms.

Je höher der I_{cc} ist, desto kürzer ist das Spannungstal.

Eventuell mit den Leistungsschaltern verbundene Unterspannungsauslöser werden von solche Spannungstälern nicht betroffen.

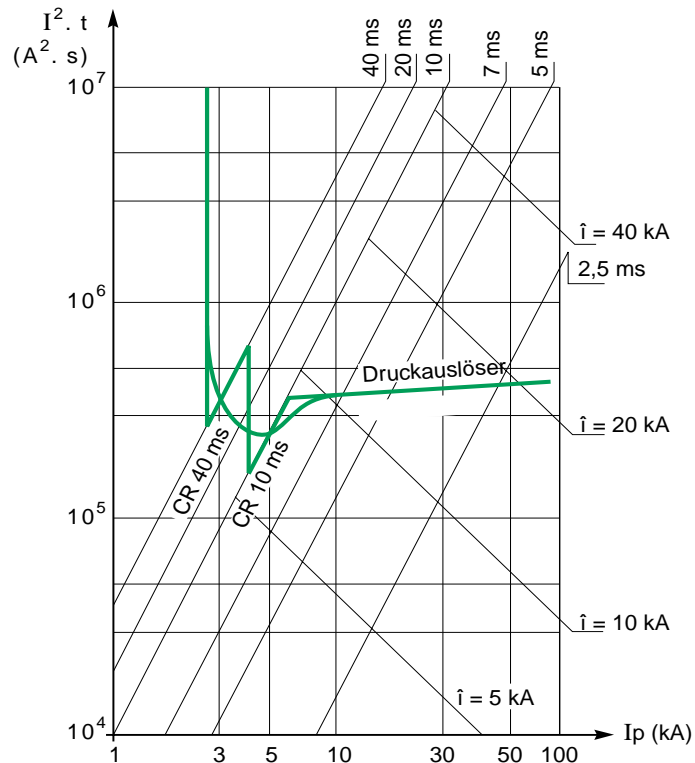


Abb. 16: Kennlinien für die Verbindung von Auslösern (elektromagnetisch und Druck oder elektronisch und Druck).

Selektivität

Da die Energie, die der unterbrechende Leistungsschalter durchlässt, stark begrenzt ist, genügt sie nicht, um den Auslöser des vorgeordneten Leistungsschalters zum Ansprechen zu bringen, so dass dieser geschlossen bleibt.

Selektivität mit den Leistungsschaltern Compact Typ NS

Die Leistungsschalterreihe Compact Typ NS, welche die Baugrößen 100, 160, 250, 400 und 630 A umfasst, gestattet durch die Anwendung der Energiselektivität je nach dem Verhältnis der Baugrößen und Bemessungsströme der eingesetzten Leistungsschalter bis zum Ausschaltvermögen eine Teilselektivität oder vollständige Selektivität.

Vollständige Selektivität

Die Abbildung 18 zeigt ein Beispiel einer vollständigen Selektivität bis 100

kA über drei Ebenen mit Leistungsschaltern der Baugrößen 100, 250 und 630 A, die mit verschiedenen Auslösern ausgerüstet sind.

Mit den Leistungsschaltern Compact Typ NS ist diese Selektivität bis 150 kA vollständig.

Damit die Selektivität vollständig ist, genügt es, dass die Energie, die ein Leistungsschalter durchlässt, niedriger ist als die Energie, die nötig ist, damit der Auslöser des vorgeordneten Leistungsschalters anspricht.

Praktische Regel

Die Selektivität ist vollständig und bedingungslos, wenn:

- die Baugrößen der aufeinanderfolgenden Leistungsschalter in einem Verhältnis von $\geq 2,5$ zueinander stehen
- und wenn die Bemessungsströme in einem Verhältnis von $> 1,6$ zueinander stehen.

Teilselektivität

Wenn die obige praktische Regel nicht eingehalten wird, ergibt sich eine Teilselektivität. Die Abbildung 19 zeigt, dass zwischen einem Leistungsschalter der Baugröße 160 A und einem solchen der Baugröße 250 A, der mit einem Auslöser mit dem Bemessungsstrom 250 ausgerüstet ist, die Selektivität bis zu einem prospektiven Kurzschlussstrom von 4800 A gewährleistet ist. Dieser Grenzwert ist höher als derjenige, der im gleichen Fall mit Leistungsschaltern der normalen Compact-Baureihe erhalten wird.

Kaskadenschaltung der Leistungsschalter Compact Typ NS

Es sei daran erinnert, dass eine Kaskadenschaltung, deren Verwendung in der Norm IEC 947-2 vorgesehen ist, es dem vorgeordneten Leistungsschalter ermöglicht, dem nachgeordneten Leistungsschalter zu helfen, hohe Kurzschlussströme auszuschalten. Dies jedoch, darauf muss hingewiesen wer-

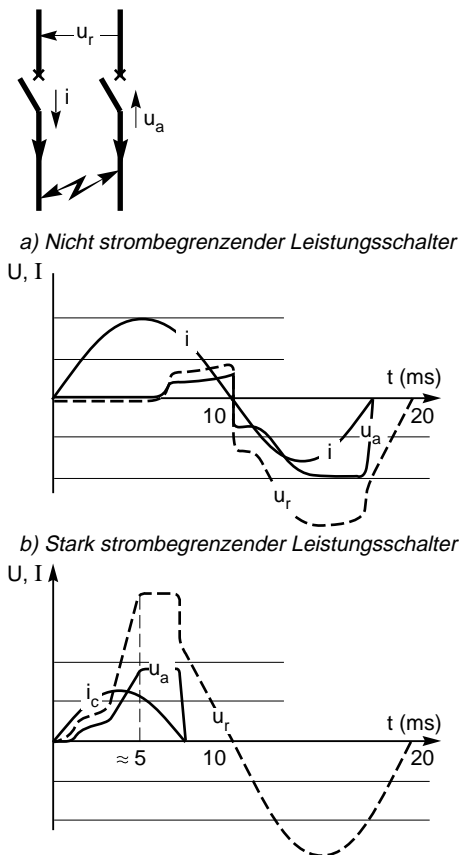
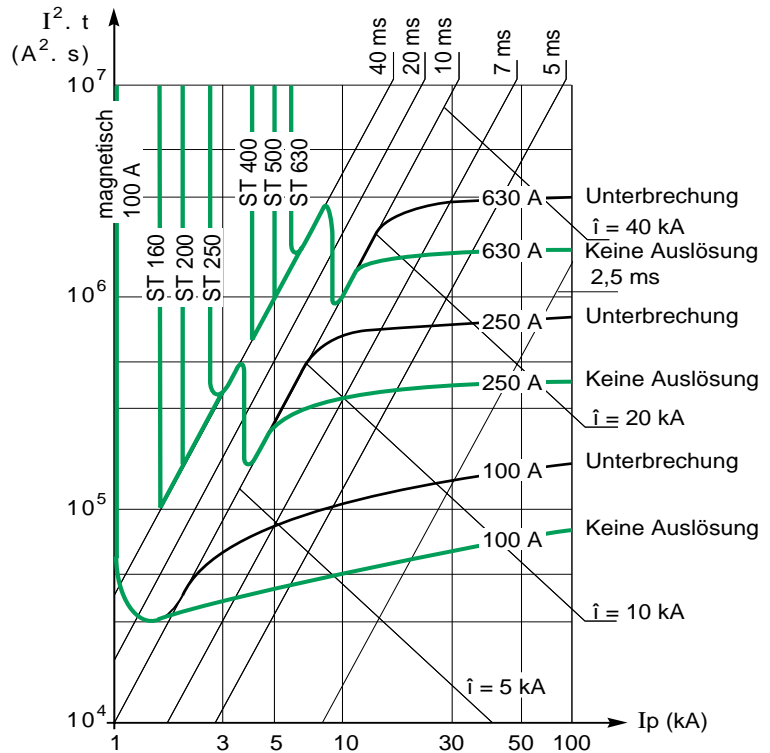


Abb. 17: Das Spannungstal im Netz hängt vom Typ des verwendeten Leistungsschalters ab.



Anmerkung:

ST 160, ST 200 und ST 250: Elektronische Auslöser für Leistungsschalter der Baugröße 250 A.
ST 400, ST 500 und ST 630: Elektronische Auslöser für Leistungsschalter der Baugröße 630 A.

Abb. 18: Vollständige Selektivität zwischen den Leistungsschaltern Compact Typ NS der Baugrößen 100, 250 und 630 A.

den, auf Kosten der Selektivität (ausser beim «SELLIM»-System).

Für die Leistungsschalter Compact Typ NS ändert eine Kaskadenschaltung in keiner Weise die obengenannten vollständigen und Teilselektivitäten.

Im Gegenteil kann ein Compact Typ NS immer einem vorgeordneten Leistungsschalter eines anderen Typs helfen, dessen Ausschaltvermögen ungenügend ist.

Verwendung zusammen mit herkömmlichen Schutzeinrichtungen

Gewöhnliche Leistungsschalter

In einer bestehenden Anlage können die stark strombegrenzenden Leistungsschalter Compact Typ NS als Erweiterung oder Ersatz eines bestehenden Leistungsschalters verwendet werden, ohne die ursprünglich erreichte Selektivitätsgrenze zu beeinträchtigen.

■ Wenn der neue Leistungsschalter nachgeordnet ist, kann sein hohes Strombegrenzungsvermögen die Selektivitätsgrenze nur verbessern, wobei die Selektivität sogar vollständig werden kann (siehe Abb. 20).

■ Wenn der neue Leistungsschalter vorgeschaltet ist, ist die Selektivitätsgrenze mindestens gleich wie vorher, wobei das hohe Strombegrenzungsvermögen des Leistungsschalters Compact Typ NS eventuell die Kaskadenschaltung verstärkt.

Sicherungen

Die (von den Sicherungsherstellern gelieferten) Kennlinien $I^2 \cdot t = f(I_p)$ betreffen:

■ die Energie, die für das Schmelzen nötig ist (Vorlichtbogen),

■ die Energie, die beim Unterbrechen durch die Sicherung fließt.

Damit zwischen einem vorgeordneten Leistungsschalter und einer Sicherung Selektivität besteht, darf der Auslöser dieses Leistungsschalters nicht auf die Summe dieser Energien ansprechen.

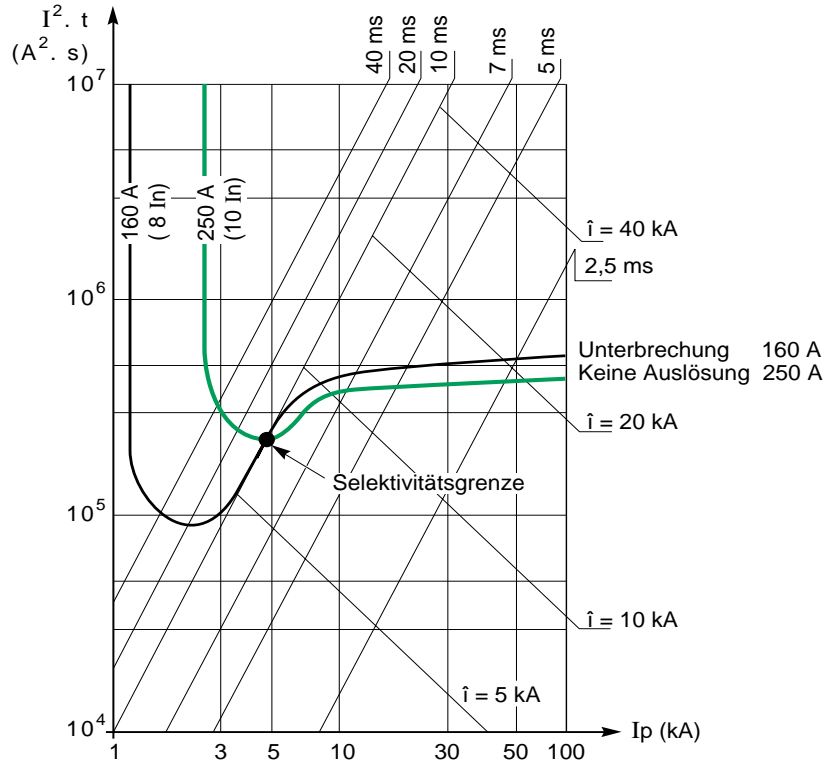


Abb. 19: Teilweise Selektivität zwischen Leistungsschaltern Compact Typ NS, 250 A und 160 A.

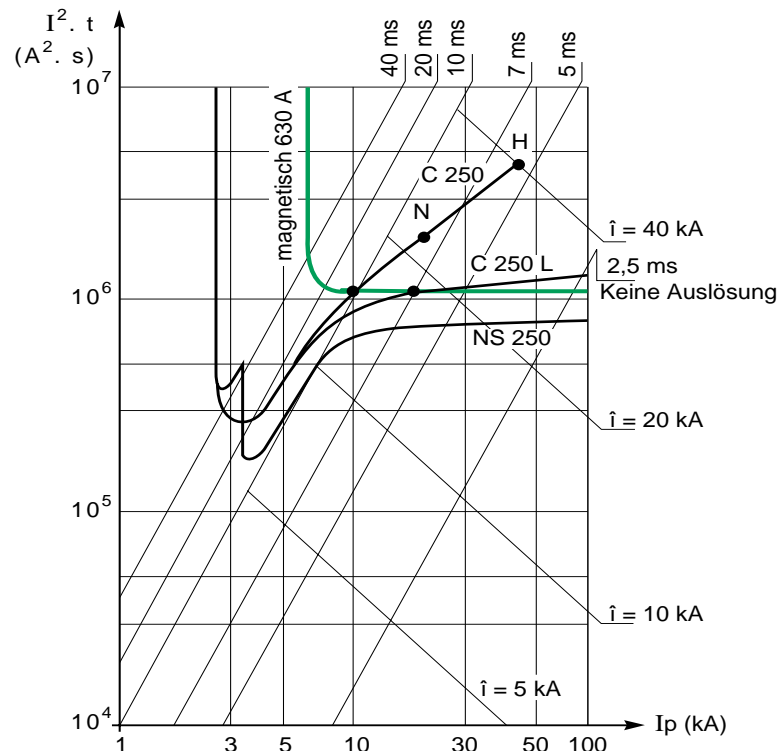


Abb. 20: Der Ersatz eines Leistungsschalters Compact Typ C250 N, H oder L durch einen Compact Typ NS 250 A ergibt eine bessere Selektivität. In diesem Beispiel wird sie vollständig.

5. Schlussfolgerung

Die stark strombegrenzenden Leistungsschalter, die umso schneller sind, je grösser der prospektive Kurzschlussstrom ist, bieten die Möglichkeit, unter Einhaltung einfacher Regeln eine vollständige Selektivität über mehrere Ebenen zu erhalten. Dies bevorzugen eventuell auf eine Zeitselektivität zurückgegriffen wird.

Dies ist eine technische Innovation, welche

- die Selektivitätsuntersuchungen wesentlich vereinfacht,
- die elektrodynamischen und thermischen Beanspruchungen sowie die Spannungstoleranz als Folge von Kurzschlüssen auf ein Minimum reduziert.

Dieses Energieselektivitätsprinzip, das dank perfekter Beherrschung der Energie, welche die Leistungsschalter beim Unterbrechen durchlassen, sowie der Empfindlichkeit der Auslöser für dieselbe Energie entwickelt worden ist, trägt zur Verbesserung der Verfügbarkeit der elektrischen Energie bei.

6. Anhang: Zur Erinnerung: Unterbrechung mit Strombegrenzung

Die Abbildung 21 zeigt den Verlauf der Ströme und Spannungen bei einer Strombegrenzung über eine Halbwelle. Die Gleichung, die den Verlauf des Kurzschlussstroms (i_c) bestimmt, lautet:

$$U_r - U_a = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \approx L \cdot \frac{di}{dt}$$

■ Zu Beginn des Kurzschlusses ist U_a gleich null. i_c und i_p sind gleich gross und haben die gleiche Neigung.

■ Wenn U_a gleich U_r ist, hat i_c sein Maximum (\hat{i}_c), da die Ableitung gleich null ist.

■ Wenn U_a grösser als U_r ist, nimmt i_c ab und wird bei t_c gleich null.

Man stellt fest, dass die unterbrochene Stromwelle gleich einer Sinus-Halbwelle ist, deren Periode dem Doppelten der virtuellen Ausschaltzeit (t_{vc}) entspricht.

Mit diesen Informationen ist es einfach, die in den Impedanzen des betreffenden Stromkreises umgesetzte Energie zu bestimmen.

Der reduzierte Ausdruck dieser Energie, der «Abschaltenergie» genannt wird, ist:

$$E_c = \int_0^{t_{vc}} i_c^2 \cdot dt$$

Da i_c eine Sinusfunktion ist:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_c^2 \cdot t_{vc} \quad (1)$$

Es ist vorteilhaft, E_c in Funktion von Ip und der Ausschaltzeit (t_{vc}) auszudrücken:

■ $t_{vc} \geq 10 \text{ ms}$

Diese Zeit bedeutet, dass der Kurzschlussstrom niedrig ist und deshalb die Kontakte des Leistungsschalters nicht abgehoben werden. Es entsteht keine Lichtbogen Spannung, somit:

$$\hat{i}_c = i_p \text{ et } \hat{i}_c = \sqrt{2} \cdot Ip ;$$

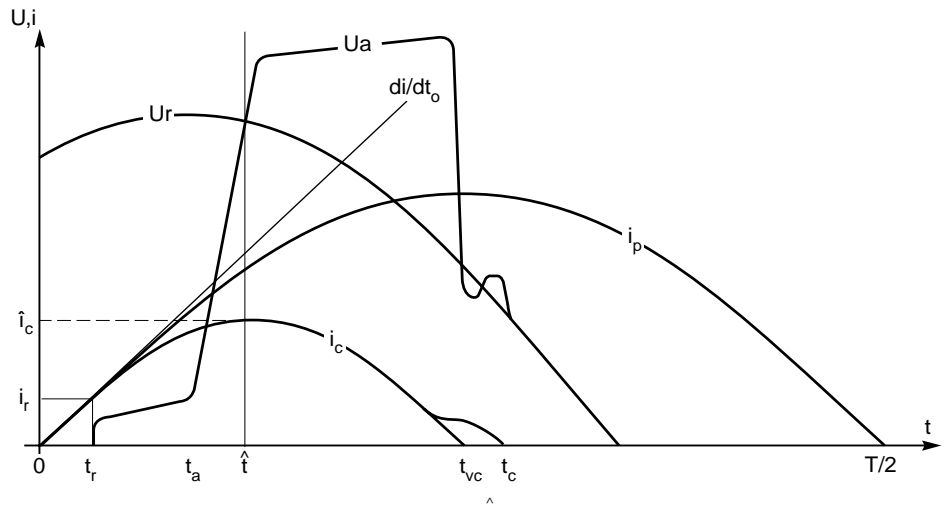
Der Ausdruck (1) wird:

$$E_c = Ip^2 \cdot t \quad (2)$$

■ $t_{vc} < 10 \text{ ms}$

Der Leistungsschalter begrenzt den Kurzschlussstrom.

i_c und i_p haben am Ursprung dieselbe Neigung, somit:



U_a : Lichtbogen-Spannung

U_r : Netzspannung

i_p : Prospektiver Kurzschlussstrom

i_c : Abgeschalteter (begrenzter) Strom

\hat{i}_c : Scheitelwert des abgeschalteten Stroms

i_r : Kontaktabschaltbestrom

\hat{t} : Moment von i_c

t_a : Moment des Anfangs des Lichtbogens

t_c : Ausschaltzeit

t_r : Moment der Kontaktabhebung

t_{vc} : Virtuelle Ausschaltzeit

ω : Kreisfrequenz der unterbrochenen Welle

Abb. 21: Unterbrechung mit Strombegrenzung.

woraus:

$$E_c = 4 \cdot f^2 \cdot Ip^2 \cdot t_{vc}^3 \quad (3)$$

Wiederum aus (1), jedoch um einen Ausdruck für \hat{i}_c zu erhalten, erhält man

$$t_{vc} = \frac{2 \cdot E_c}{\hat{i}_c^2} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot Ip \cdot \sqrt{2}}$$

woraus:

$$E_c = \frac{\hat{i}_c^3}{4 \sqrt{2} \cdot f \cdot Ip}$$

Die Ausdrücke (3) und (4) ermöglichen das Einzeichnen der Geraden für die Zeiten und die Scheitelströme.

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot Ip \cdot \sqrt{2} = \omega' \cdot \hat{i}_c$$

$$\text{wobei } \omega' = \frac{\pi}{t_{vc}}$$

$$t_{vc} \cdot \omega \cdot Ip \cdot \sqrt{2} = \pi \cdot \hat{i}_c$$

woraus:

$$\hat{i}_c = t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot Ip \cdot \sqrt{2}$$

oder

$$t_{vc} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot Ip \cdot \sqrt{2}}$$

Wenn man dem Ausdruck (1) entnimmt, erhält man:

$$\hat{i}_c^2 = \frac{2 \cdot E_c}{t_{vc}}$$

woraus:

$$\frac{2 \cdot E_c}{t_{vc}} = (t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot Ip \cdot \sqrt{2})^2$$

Schneider Electric

Hauptverwaltung Deutschland:

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

Hauptverwaltung Schweiz:

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