

1 Einführende Betrachtungen

Bei Leitungsschutzschaltern und Motorschutzschaltern kommt das Prinzip des strombegrenzenden Schaltens zur Anwendung. Im Folgenden wird dieses Prinzip erläutert. Der Aufbau eines strombegrenzenden Schalters wird dargestellt und der Lichtbogen als zentrales Schaltelement beschrieben. Abschließend wird die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

1.1 Strombegrenzendes Schalten

Gegenüber Schaltern, die nur im Stromnulldurchgang abschalten (Nullpunktlöschern), haben strombegrenzende Schalter Vorteile. Dadurch, dass ein Kurzschlussstrom nicht erst im natürlichen Stromnulldurchgang gelöscht wird, sondern deutlich früher, sinkt neben der thermischen Belastung

$$Q = \int_0^{t_K} i_K(t)^2 dt$$

Q – Wärmedurchlasswert

t_K – Kurzschlussdauer

die dynamische Beanspruchung

$$\vec{F}_{\max} = i_D \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) = \text{const} \cdot i_D^2$$

F_{\max} – max. Lorentzkraft auf ein Leiterstück

i_D – Durchlassstrom

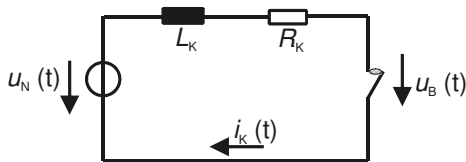
l – Länge des Leiterstücks

B – magn. Induktion am Ort des Leiterstücks

und die im Schaltgerät umgesetzte Arbeit

$$W = \int_0^{t_K} u_B(t) \cdot i_K(t) dt.$$

Prinzipiell kann die Dauer des Kurzschlusses t_K nur dadurch verringert werden, dass die Lichtbogenspannung über die Netzspannung angehoben wird.



$u_N(t)$: treibende Spannung

$u_B(t)$: Lichtbogenspannung

$i_K(t)$: Kurzschlussstrom

L_K : Induktivität des Kurzschlusskreises

R_K : Widerstand des Kurzschlusskreises

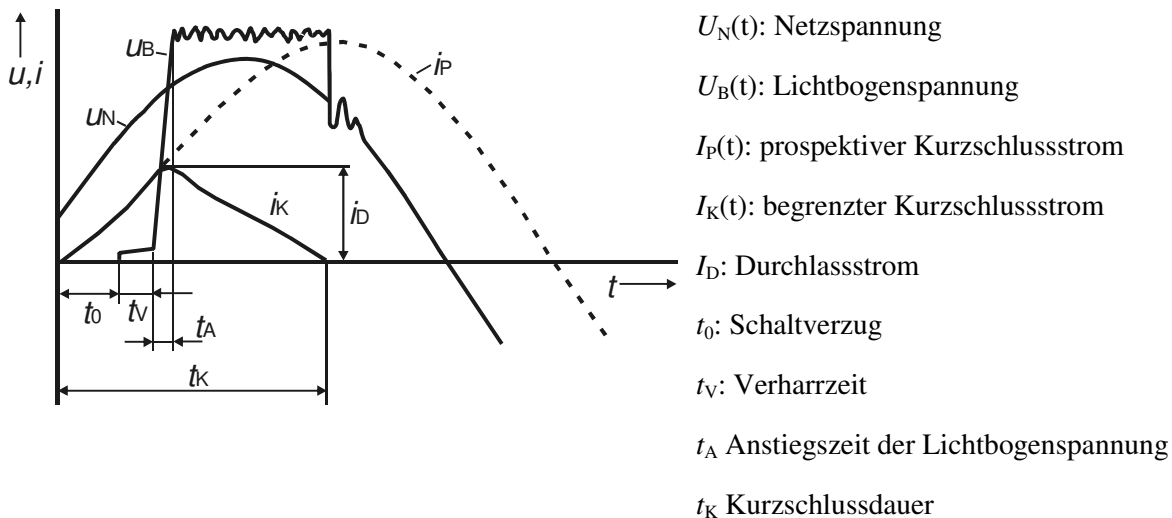
Bild 1.1: Kurzschlussstromkreis

Bild 1.1 zeigt einen induktiven Kurzschlusskreis, für den gilt:

$$u_N(t) = L_K \cdot \frac{di_K(t)}{dt} + R_K \cdot i_K(t) + u_B(t)$$

Der Term $L_K \cdot di_K(t)/dt$ wird negativ, sobald die Summe aus Lichtbogenspannung und ohmschem Spannungsfällen die treibende Spannung übersteigt. Der maximale Kurzschlussstrom tritt auf, wenn $di_K(t)/dt = 0$ ist. Er

ist umso niedriger, je früher die treibende Spannung erreicht wird. Die Wirkung des strombegrenzenden Verhaltens ist in Bild 1.2 dargestellt.



$U_N(t)$: Netzspannung

$U_B(t)$: Lichtbogenspannung

$I_P(t)$: prospektiver Kurzschlussstrom

$I_K(t)$: begrenzter Kurzschlussstrom

I_D : Durchlassstrom

t_0 : Schaltverzögerung

t_V : Verharrzeit

t_A : Anstiegszeit der Lichtbogenspannung

t_K : Kurzschlussdauer

Bild 1.2: Strom und Spannungsverläufe bei strombegrenzender Kurzschlussabschaltung

Wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ ein Kurzschluss auftritt, öffnen nach der Schaltverzögerungszeit t_0 die Kontakte, es bildet sich ein Lichtbogen, der für eine gewisse Zeit t_V an den Kontakten verweilt. Die Zeit t_V wird als Verharrzeit bezeichnet. Nachdem die Kontaktstellen vom Lichtbogen aufgeheizt worden sind, bewegt sich der Lichtbogen aufgrund des Magnetfeldes von der Kontaktstelle weg. Der Lichtbogen weitet sich auf, wandert in das Löschblechpaket und teilt sich. Zu

diesem Zeitpunkt ist die Lichtbogenspannung größer als die treibende Spannung (Netzspannung) und der Strom folgt nicht mehr dem prospektiven Verlauf, sondern wird begrenzt. Nach der Zeit t_K ist der Strom Null und die Spannung am Schalter schwingt auf die treibende Spannung ein.

Der schnelle Anstieg der Lichtbogenspannung kann durch folgende konstruktive Maßnahmen begünstigt werden:

- Schnelles Öffnen der Kontakte
- Geringe Verharrzeit des Bogens auf den Kontakten
- Rasche Verlängerung des Lichtbogens durch divergierende Laufschiene
- Beschleunigung der Bogenwanderung durch Verstärkung des Blasfeldes
- Kühlung des Lichtbogens durch schnelle Bogenbewegung, durch Kontakt mit Kammerwänden und Löschblechen und durch gasende Wandmaterialien
- Aufteilung des Bogens in mehrere Teilbögen durch Löschbleche

1.2 Kompakte strombegrenzende Schaltkammer

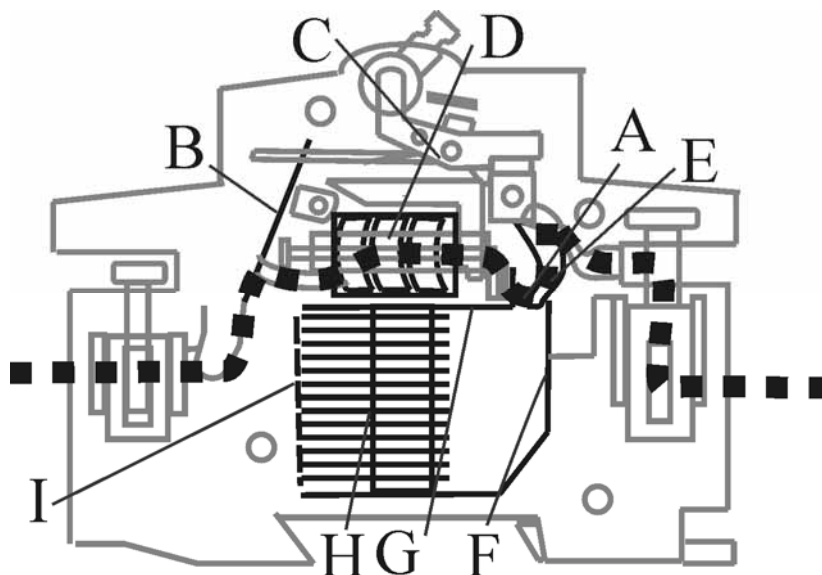


Bild 1.3: Aufbau eines strombegrenzenden Schalters

Strombegrenzende Schalter sind prinzipiell so aufgebaut, wie in Bild 1.3 am Beispiel eines Leitungsschutzschalters gezeigt. Die wichtigsten Komponenten sind das feste Kontaktstück (A) und das bewegliche Kontaktstück (E). Im geschlossenen Zustand fließt der Strom (gestrichelte Linie) über die Kontakte, durch den Bimetallauslöser (B) und durch die Spule des Magnetauslösers (D). Wird der Strom geringfügig über den Auslösestrom erhöht (Überlast), erwärmt sich der Bimetallauslöser so, dass er durch seine Biegung den Auslösemechanismus (C) betätigt. Bei höheren Überströmen (Kurzschluss) wird in der Auslösespule ein Magnetfeld erzeugt, das den Schlaganker im Inneren der Spule bewegt und wiederum den Auslösemechanismus (C) betätigt. Der Auslösemechanismus öffnet die Kontakte und es entsteht an der Kontaktstelle ein Lichtbogen. Das Öffnen wird vom Schlaganker zusätzlich beschleunigt, indem er mit hoher Geschwindigkeit auf das bewegliche Kontaktstück schlägt. Der Öffnungsbeginn und die Öffnungsgeschwindigkeit nehmen bei steigendem Kurzschlussstrom zu. Der Lichtbogen wird von dem Magnetfeld in der Schaltkammer beeinflusst und wandert aufgrund der Magnetkräfte von den Kontaktstellen ab. Die Wanderung erfolgt auf den Laufschienen (F und G). Vom beweglichen Kontaktstück wechselt der Lichtbogen auf die untere feste Laufschiene (F). Um diesen Vorgang zu beschleunigen, kann das Magnetfeld in der Schaltkammer verstärkt werden. Dieses kann durch Eisenhinterlegung der Kammerwände im Bereich der Laufschienen oder durch so genannte Blasschleifen erreicht werden. Bei seiner Wanderung wird der Lichtbogen in das Löschblechpaket (H) von dem Magnetfeld hineingedrückt und durch die ferromagnetische Wirkung der Löschbleche hineingezogen. Das Löschblechpaket besteht aus mehreren in einem festen Abstand parallel angeordneten Blechen. Hier teilt sich der Lichtbogen auf mehrere kurze Lichtbögen auf. Am Ende der Schaltkammer gibt es Ausblasöffnungen (I), die das Abströmen des heißen Gases ermöglichen.

Alle Bauteile des Schalters werden dahingehend optimiert, ein schnelles, effektives strombegrenzendes Schalten zu ermöglichen.

1.3 Der Lichtbogen

In den hier untersuchten Schaltkammern übernimmt der Lichtbogen die Aufgabe des Abschaltens. Der Lichtbogen besteht zum größten Teil aus heißem, ionisiertem Gas, der Plasmasäule (l_B) in Bild 1.4 [lind87]. Da die Plasmasäule aus Elektronen und Ionen besteht, ist sie quasineutral. In Bild 1.4 ist zu sehen, dass im Bereich der Plasmasäule eine in etwa konstante Feldstärke herrscht. In der Literatur sind Werte von ca. $2 \cdot 10^3$ V/m [lind87] angegeben.

Vor den Elektroden bilden sich durch das Abwandern von Ladungsträgern die Elektrodengebiete. An der Anode bildet sich das Anodenfallgebiet, an der Kathode das Kathodenfallgebiet. Die Breite ist mit 10^{-7} bis 10^{-6} m gering, aber die Fallgebiete (u_A und u_K) haben jeweils eine Spannung von ca. 10 V und spielen damit für das strombegrenzende Schalten eine wichtige Rolle, da die Lichtbogen­spannung erhöht wird.

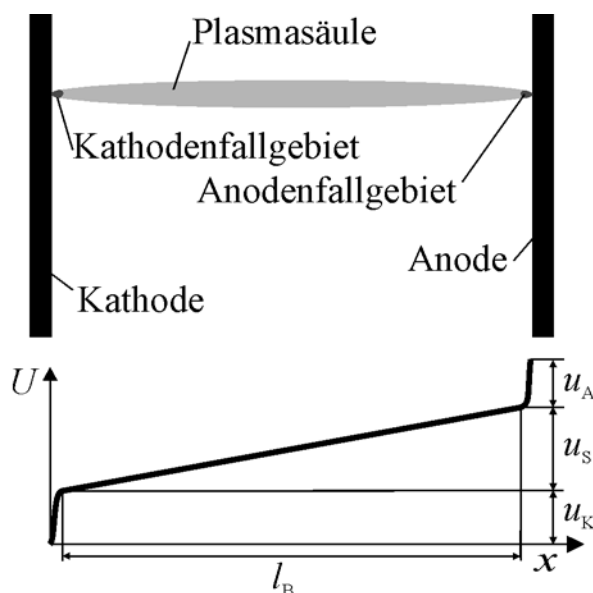


Bild 1.4: Prinzipieller Aufbau einer Lichtbogensäule mit Spannungsverlauf entlang der Säule

1.4 Ziel der Arbeit

Am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen ist eine Komplettsimulation eines Lichtbogens erstellt worden [kare98]. Diese Simulation wird in wichtigen Punkten erweitert, um sie der Realität von Lichtbogenlöschsystemen in elektrischen Energieanlagen anzunähern. Im Vordergrund stehen dabei zunächst Systeme mit Größenverhältnissen entsprechend kleiner Leistungsschalter bzw. Leitungsschutzschalter [lind01a/lind01b]. Folgende Punkte werden hierfür bearbeitet:

- Einfügen von ferromagnetischen Materialien (Stahlhinterlegungen der Laufschienen, Löschbleche)
- Integration von Löschbarrieren oder Löschblechen
- Entwicklung eines Fußpunktmodells für die Aufteilung des Lichtbogens an den Löschblechen

Die aus den Simulationen gewonnenen Parameter sollen mit Messungen an Modellschaltkammern verglichen werden, die in ihrer Einfachheit und den Abmessungen denen der Simulation entsprechen. Folgende Parameter werden hierfür benötigt:

- Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens
- Einfluss der Verdämmung auf die Bogenwanderung
- Druckentwicklung in der Schaltkammer
- Wanderwellenvorgänge in der Schaltkammer
- Elektrische Potentiale im Plasma vor den Fußpunkten
- Einfluss des Druckes auf die Lichtbogenbewegung
- Ströme und Teilströme durch ein Löschblech
- Lichtbogen Spannungserhöhung durch ein Löschblech/Löschbarriere. Als Löschbarriere wird eine isolierte Platte bezeichnet, an der sich der Lichtbogen verlängert.