

1 Einleitung

Der stetig steigende Bedarf an elektrischer Energie und der damit verbundene kontinuierliche Netzausbau gehen einher mit erhöhten Anschlussleistungen und einer engeren Vermaschung des Energieversorgungsnetzes. Diese Entwicklung führt gleichzeitig zu höheren Stoß- und Dauerkurzschlussströmen. Mit diesem Anwachsen der maximalen Kurzschlussströme steigen im Fehlerfall auch die thermischen und mechanischen Belastungen der Netze und der darin enthaltenen Betriebsmittel. Des Weiteren nimmt die mögliche Störlichtbogenbeanspruchung zu, da sich durch die Zunahme der Kurzschlussleistungen auch die maximale Lichtbogenleistung an den Netzknoten erhöht. Die gewaltige Energiemenge, die beim Auftreten eines Lichtbogens umgesetzt wird, stellt ein sehr hohes Gefahrenpotential für Menschen und elektrische Anlagen dar.

Dem gestiegenen Schadenspotential, das im Fehlerfall aufgrund höherer Temperatur- und größerer Druckentwicklungen sowie in Folge gesteigerter Störlichtbogenrisiken herrscht, kann auf konventionellem Wege nur eingeschränkt bzw. nur unter Inkaufnahme hoher Kosten begegnet werden. Beispielsweise bringt der Einsatz von Seriendrosseln zur Fehlerstrombegrenzung große Verluste während des fehlerfreien Betriebes mit sich. Dagegen sind geeignete, kostengünstige Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtungen in der Lage, die genannten negativen Begleiterscheinungen von Fehlern in elektrischen Netzen zu beherrschen. Kurzschlussstrombegrenzer können demnach zur Senkung der Gefahren von Kurzschlüssen und zur Vermeidung hoher Kosten durch zusätzliche Netzausbaumaßnahmen eingesetzt werden.

Die cigré-Arbeitsgruppe A 3.10 (vgl. [13]) definiert einen Kurzschlussstrombegrenzer als eine Vorrichtung, die im Fehlerfall den Strom im kritischen Netzzweig begrenzt, so dass es nicht zu einer Überlastung der Systemkomponenten kommt. Zum einen wird von Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtungen gefordert, dass sie im fehlerfreien Normalbetrieb alle betrieblichen Vorgänge kaum beeinträchtigen, und die elektrische Energie mit hoher Güte bereitgestellt werden kann. Zum anderen muss beim Auftreten eines Fehlers der Kurzschlussstrom schnell und sicher begrenzt werden. Diese Anforderungen können auf sehr unterschiedliche Arten umgesetzt werden, so dass eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten existiert. Während es in der Mittelspannungsebene unter anderem bereits pyrotechnische, leistungselektronische und PE-Kurzschlussstrombegrenzer gibt,

stehen für die Hochspannungsebene hybrid aufgebaute und supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer zur Verfügung. Bei letzteren wird wiederum zwischen induktiven und resistiven supraleitenden Strombegrenzern unterschieden. Da alle Konzepte zwar die an eine Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtung (kurz: KSBE) gestellten Anforderungen erfüllen, aber immer noch an der Schwelle zur Praxiserprobung stehen, werden derzeit oftmals noch konventionelle Betriebsmittel wie der I_s -Begrenzer (vgl. [29]) oder eine in den zu schützenden Kreis in Reihe geschaltete Induktivität in Form einer Luftspule zur Strombegrenzung verwendet.

Grundsätzlich gibt es zwei Begrenzungsstrategien, die zu den prinzipiellen Kurzschlussströmen $i_{KSBE,1}$ und $i_{KSBE,2}$ führen, wie sie in Abbildung 1.1 zusammen mit dem unbegrenzten Fehlerstrom $i_{ohne\ KSBE}$ dargestellt sind. Die Ströme sind darin auf die Amplitude des unbegrenzten Dauer Kurzschlussstromes normiert.

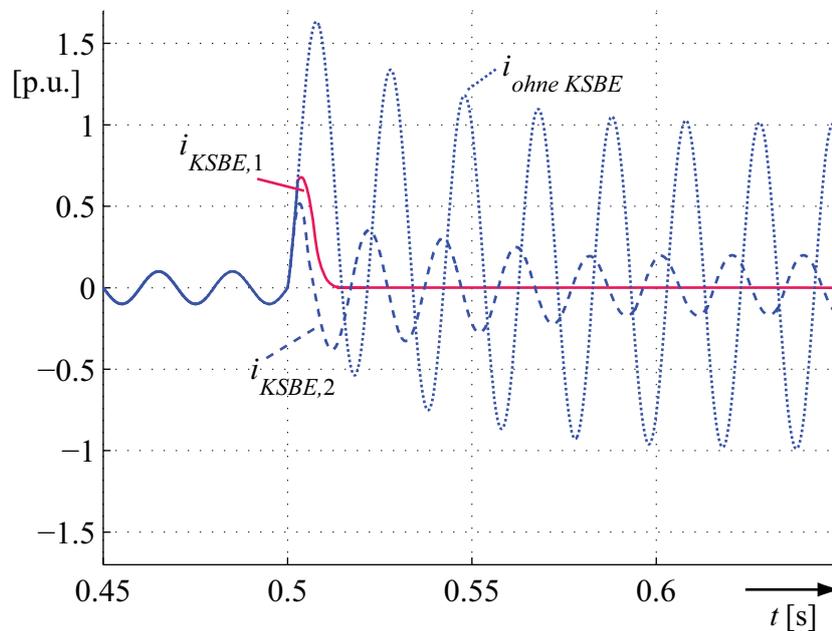


Abbildung 1.1: Prinzipielle Begrenzungsstrategien für Kurzschlussströme

Einerseits wird durch eine schnelle Kurzschlussstromunterbrechung verhindert, dass der resultierende Kurzschlussstrom $i_{KSBE,1}$ den maximalen Wert erreichen kann, den der unbegrenzte Kurzschlussstrom $i_{ohne\ KSBE}$ zeigt. Nach der Begrenzung ist somit der gesamte Stromfluss unterbrochen und kann im Normalfall erst wieder nach Behebung der Fehlerursache eingeschaltet werden. Ein typisches Beispiel hierfür ist der schon genannte I_s -Begrenzer, der mit einer Sprengkapsel arbeitet, die nach deren Auslösung erst ausgetauscht werden muss, damit der Strombegrenzer wieder einsatzfähig ist.

Andererseits wird durch eine schnelle Impedanzhöhung der Anstieg des Kurzschlussstromes unterdrückt und zudem gewährleistet, dass weiterhin ein begrenzter Dauer Kurz-

schlussstrom $i_{KSBE,2}$ im Netz fließen kann. Während das geschützte Netz weiterbetrieben wird, ist der Fehler zu lokalisieren und zu beheben. Üblicherweise treten bei einer derartigen Kurzschlussstrombegrenzung hohe mechanische und thermische Belastungen des Strombegrenzers selbst auf. Diese Art der Strombegrenzung ohne Kurzschlussstromunterbrechung wird zum Beispiel durch resistive hochtemperatursupraleitende Strombegrenzer erreicht, wie in [49] beschrieben wird. Bei Begrenzung mit supraleitenden Prinzipien kann oftmals kein wirklicher Dauerbetrieb im Fehlerfall aufrecht erhalten werden. Vielmehr muss die KSBE nach kurzer Zeit abgeschaltet werden und kann erst nach einer kurzen Erholzeit wieder eingesetzt werden.

Ein weiterer signifikanter Unterschied der Kurzschlussstrombegrenzer ergibt sich aus einer Betrachtung des Auslöseverhaltens. Manche Strombegrenzer begrenzen den Kurzschlussstrom selbständig und andere müssen erst von extern getriggert werden. Von den beiden zuvor genannten Strombegrenzern ist der resistive hochtemperatursupraleitende Begrenzer selbstauslösend, wogegen es beim I_s -Begrenzer erst durch ein externes Auslösesignal zur Zündung der Sprengkapsel kommt.

Die in dieser Arbeit untersuchte Dynamische Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtung auf Stromrichterbasis, die im Weiteren mit DKSBE abgekürzt wird, kann demgegenüber sehr flexibel auf Kurzschlussströme reagieren und zeigt ein günstiges zweiteiliges Auslöseverhalten. Zu Beginn des Kurzschlussvorganges begrenzt sie durch eine vorhandene Drosselspule den Stoßkurzschlussstrom selbständig. Im weiteren Verlauf der Kurzschlussstrombehandlung kann dann mittels einer Steuerung vorgegeben werden, ob der Kurzschlussstrom annähernd ungehindert weiterfließen oder unterbrochen werden soll. Unter Inkaufnahme eines mehr oder weniger verzerrten Stromverlaufes kann man ferner den Kurzschlussstrom auch stufenlos in seiner Höhe regeln.

Bei der Beschreibung der DKSBE wird am Anfang des zweiten Kapitels das Schaltbild der DKSBE vorgestellt und ihr Einbauort erläutert. Anschließend werden die verschiedenen Begrenzungsstrategien anhand der Wirkung auf ein- und dreipolige Kurzschlüsse aufgezeigt.

In Kapitel drei wird das Betriebsverhalten der DKSBE analytisch beschrieben, wobei man von einer vereinfachten Schaltung ausgeht, die im Laufe der Darstellung erweitert wird. Zur Berechnung der verschiedenen Betriebsweisen der DKSBE werden zwei mathematische Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe am Kapitelende wichtige Aussagen zur Steuerung des Strombegrenzers getroffen werden können.

Um komplexe Netzstrukturen untersuchen zu können, wird im vierten Kapitel ein Simulationsmodell der DKSBE in MATLAB[®]/Simulink[®] vorgestellt und anhand der mathe-

matischen Modelle verifiziert. Wie die DKSBE auf unsymmetrische Fehler wirkt, wird anschließend auf Basis dieses Simulationsmodelles gezeigt.

Die praktische Umsetzung einer DKSBE am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung ist in Kapitel fünf beschrieben. Mit der realisierten Testanlage können sowohl die mathematische Beschreibung als auch das Simulationsmodell durch Versuche bestätigt werden. Im sechsten Kapitel wird auf die verschiedenen Parameter der DKSBE eingegangen sowie deren Auswirkungen auf die erreichbare Kurzschlussstrombegrenzung dargelegt. Außerdem wird begründet, wie mit Hilfe der DKSBE die mechanische und thermische Kurzschlussstrombeanspruchung gemindert werden kann, und wie über die Begrenzungsdrossel die Herabsetzung der Wirkleistung von Lichtbögen möglich ist.

Um zu analysieren, wie sich das strombegrenzende Betriebsmittel in einem elektrischen Versorgungsnetz verhält, behandelt Kapitel sieben die Verwendung der DKSBE in einem vereinfachten 690-V-Eigenbedarfsnetz. Für die Netzuntersuchungen wird das gesamte Niederspannungsnetzwerk in MATLAB[®]/Simulink[®] modelliert und dessen Verhalten mit und ohne DKSBE-Einsatz betrachtet. Abschließend werden im achten Kapitel die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Die Dynamische Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtung (DKSBE)

Die hohe Flexibilität erreicht die Dynamische Kurzschlussstrombegrenzungseinrichtung, kurz DKSBE, dadurch, dass sie auf einer steuerbaren Halbleiterbrückenschaltung beruht. Sie kann im Fehlerfall den Kurzschlussstrom entweder ausschalten, auf einen vorgegebenen Wert regeln oder stationär nahezu unbeeinflusst weiterfließen lassen. In diesem Kapitel wird der schaltungstechnische Aufbau des Strombegrenzers vorgestellt und dargestellt, wo die DKSBE installiert wird. Anschließend wird ihr Verhalten im fehlerfreien Betrieb und die Funktionsweise der Begrenzung im Kurzschlussfall beschrieben. Dabei wird vor allem auf die verschiedenen Möglichkeiten verwiesen, die durch die Steuerbarkeit für den Betrieb während des Fehlers zur Verfügung stehen. Hierfür werden schon einige Ergebnisse vorweggenommen, die nachfolgend noch erarbeitet werden.

2.1 Schaltbild und Einsatzort

Die Basis der DKSBE, deren Schaltbild Abbildung 2.1 zeigt, stellt eine sechspulsige Drehstrombrückenschaltung aus den Thyristoren T1 bis T6 dar. Neben den drei Thyristorzweigen der Halbleiterbrücke, mit denen die Stränge R , S und T verbunden sind, ist ein vierter Ventilzweig aus zwei Dioden vorhanden, in dessen Mitte der Neutralleiter N angeschlossen wird. Parallel zur Thyristorbrücke sind zudem eine Freilaufdiode und die Begrenzungsdrossel mit einem ohmschen Anteil R_d und einem induktiven Anteil L_d geschaltet. Die Reaktanz $X_d = \omega L_d$ der Spule ist dabei deutlich größer als ihre Resistanz R_d . Auf der Drehstromseite sind im Schaltbild nach Abbildung 2.1 die Leiterströme i_R , i_S , i_T und der Neutralleiterstrom i_N eingezeichnet. Mit $i_1 \dots i_8$ sind die Ströme durch die sechs Thyristoren und die beiden parallelen Dioden bezeichnet und $u_1 \dots u_8$ stehen für die Spannungen über diesen Halbleiterventilen. Als Größen sind auf der Gleichstromseite der drehstromseitige Gleichstrom i_{dn} , der Freilaufstrom i_F , der Gleichstrom durch die Begrenzungsdrossel i_d und die Spannung u_d über ihr aufgeführt.

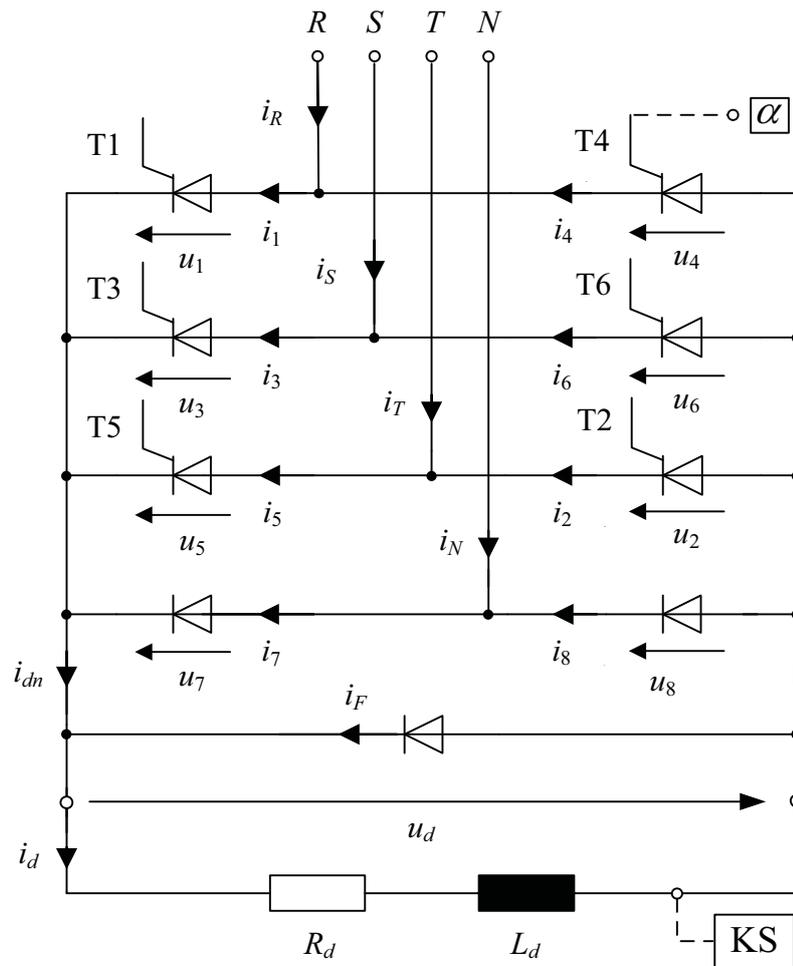


Abbildung 2.1: Schaltbild der DKSBE

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde darauf verzichtet, in das Schaltbild sämtliche Thyristorsteuerleitungen einzutragen. Stattdessen ist stellvertretend für alle steuerbaren Halbleiterelemente nur an Thyristor T4 gekennzeichnet, dass an diesen über die Steuerleitung abhängig vom Steuerwinkel α Zündimpulse gesendet werden. Ist gleichzeitig mit dem Auftreten des Zündimpulses die Spannung u_4 ausreichend positiv, beginnt Thyristor T4 zu leiten. Wenn der Strom i_4 durch ihn wieder zu null wird, kehrt er in den Sperrzustand zurück. Weiterhin ist mit dem Block 'KS' an der Begrenzungsdrossel angedeutet, dass die Kurzschluss erfassung über die Auswertung von gleichstromseitigen Strömen und Spannungen erfolgt. Die Messleitung ist dabei ebenso wie die Steuerleitung gestrichelt dargestellt.

Der Einsatzort der DKSBE ist in Abbildung 2.2 wiedergegeben. Sie bildet demnach über die aus dem Transformator kessel herausgeführten Wicklungsenden den Sternpunkt eines Transformators, wobei sie im vorliegenden Fall auf der Transformatorseite angeschlossen ist, auf der auch das zu schützende Drehstromnetz mit dem Transformator verbunden ist.

In Abbildung 2.2 kann die DKSBE auf die Kurzschlussströme in 'Drehstromnetz 2', das üblicherweise ein Verbrauchernetz darstellt, einwirken. Damit die DKSBE im Sternpunkt eines Transformators eingesetzt werden kann, müssen beim verwendeten Transformator auf einer Spannungsebene alle sechs Wicklungsanschlüsse zugänglich sein, d.h. eine der Dreiphasenwicklungen muss als III- bzw. iii-Schaltung ausgeführt werden. Die übrigen Anschlüsse des Transformators auf der anderen Spannungsebene können dagegen entweder in Stern oder Dreieck verschaltet sein. Eine Anbindung der DKSBE ist also generell sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterspannungsseite eines Transformators möglich. Zur eindeutigen Kennzeichnung der Verschaltung der Transformatorwicklungen wird im Folgenden neben den bekannten Kennbuchstaben D, d, Y, y, III und iii auch die Kennziffer N der Schaltgruppe verwendet. Diese gibt die Phasendrehung zwischen der Ober- und Unterspannungsseite für den Fall an, dass keine DKSBE am Transformator angeschlossen ist und die offenen Wicklungen der III- bzw. iii-Schaltung zu einem Sternpunkt verschaltet sind. Beispielsweise stellt demnach ein Transformator der Schaltgruppe Diii5 einen Dy5-Transformator mit offenen sekundärseitigen Sternpunktwicklungen dar.

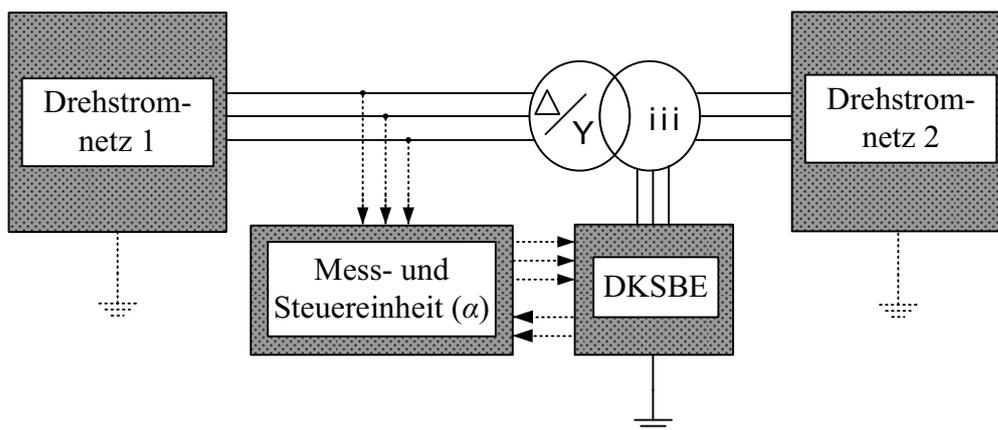


Abbildung 2.2: Einsatzort der DKSBE

Neben den beiden Drehstromnetzen, dem Transformator und der DKSBE ist in Abbildung 2.2 noch die Mess- und Steuereinheit eingezeichnet. Die gestrichelten Linien zu ihr hin und von ihr weg deuten dabei entsprechend Mess- und Steuerleitungen an. Auf der Transformatorseite des speisenden Netzes werden direkt an den Klemmen die verketteten Spannungen gemessen. Diese dienen als Referenz für die Zeitpunkte, zu denen die Steuerung Zündimpulse an die Thyristoren der Drehstrombrücke schickt. Die Zündimpulsausendung selbst ist abhängig vom Steuerwinkel α , der das Verhalten der Thyristorbrücke und damit der DKSBE bestimmt. Ferner sind die Messleitungen zwischen der Steuerung und der DKSBE gestrichelt gekennzeichnet, wobei die Pfeilspitzen die Richtung des Datenstromes angeben.