

# SUPRALEITER IM NETZ

Resistive supraleitende Strombegrenzer bieten ein hohes Maß an Sicherheit bei Kurzschlüssen. Aufgrund der individuell gestaltbaren Komponenten und des modularen Aufbaus eignen sie sich für die Eigenversorgung in einem Kraftwerk ebenso wie für den Einsatz im Verteilnetz.

**TEXT:** Dr. Joachim Bock, Dr. Robert Dommerque, Achim Hobl, Nexans Superconductors **FOTOS/GRAFIKEN:** Nexans Superconductors

Die zunehmende dezentrale Einspeisung, zum Beispiel durch Windparks, die stärkere Vermaschung der Netze und eine größere zu transportierende Leistung führen dazu, dass höhere Kurzschlussleistungen in Stromnetzen auftreten können. Eine Anpassung der Infrastruktur wird daher unumgänglich. Doch oft sind die Budgets begrenzt und der Ausbau der Netze – im Sinne einer Leistungsverstärkung der Kabel und Betriebsmittel – kann dem Bedarf nicht immer folgen. Der Energiebranche sind deswegen Lösungen, die eine bessere Kurzschlussfestigkeit der Infrastruktur bieten, hoch willkommen. Nur so kann hohen Fehlerströmen, zum Beispiel bei Blitzschlag oder durch den Ausfall von Anlagenteilen, begegnet werden, ohne die eigentliche Netzstruktur weiter zu verstärken.

Der supraleitende Strombegrenzer ist ein solches Betriebsmittel. Im Gegensatz zu einer „Sicherung“ trennt er den Stromkreis bei einem Kurzschluss nicht auf, sondern limitiert die sehr hohen Ströme auf definierte Werte. Er reduziert durch die Strombegrenzung die thermischen Belastungen und dynamischen Kräfte sowie die Störlichtbogen-Beanspruchungen auf Folgekomponenten und gestattet Verschaltungen bestehender Anlagen, die ohne Begrenzer so nicht möglich wären. Insbesondere arbeitet der Strombegrenzer im Betrieb fast verlustlos, das heißt im Normalbetrieb ist er „elektrisch unsichtbar“. Daher stellt der supraleitende Strombegrenzer ein Betriebsmittel dar, das heute verfügbaren Alternativen überlegen ist: Drosseln sind bereits im Normalbetrieb „elektrisch wirksam“ und verursachen so permanente ohmsche Verluste. Sie stellen zudem eine Induktivität dar, die vom Netz durch kapazitive Blindleistung kompensiert werden muss. Im Unterschied dazu arbeiten die sogenannten  $I_s$ -Begrenzer wie eine Sicherung: Bei

ihnen wird der Strompfad aufgesprengt. Das Aufrechterhalten eines – für das Netz ungefährlichen und für die Selektivität nötigen – Stromflusses ist somit unmöglich und das pyrotechnische Element des  $I_s$ -Begrenzers muss nach dem Auslösen ersetzt werden.

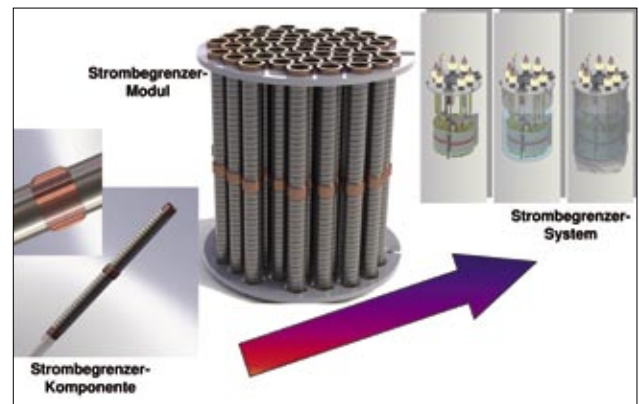
## Wirkungsweise supraleitender Strombegrenzers

Die Kernkomponenten des supraleitenden Strombegrenzers bestehen aus supraleitenden Materialien, die unterhalb einer gewissen Temperatur quasi keinen elektrischen Widerstand aufweisen. Bei Hochtemperatur-Supraleitern, die für Strombegrenzer verwendet werden, liegt die kritische Temperatur bei etwa  $-180\text{ °C}$ , so dass sie sich mit flüssigem Stickstoff ( $-196\text{ °C}$ ) einfach und kostengünstig auf Betriebstemperatur kühlen lassen. Gleichstrom passiert das Material im normalen Betrieb verlustfrei und Wechselstrom transportiert der Supraleiter mit vernachlässigbaren Verlusten.

Es sind allerdings zwei weitere Bedingungen einzuhalten, damit die Supraleitung funktioniert: Der Einfluss äußerer magnetischer Felder darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten und die Stromtragfähigkeit des Leiters ist nicht unbegrenzt. Das bedeutet, dass die Stromdichte unterhalb eines bestimmten Wertes bleiben muss, wenn die elektrische Energie das Gerät ohne Widerstand durchströmen soll. Während beim resistiven Strombegrenzer der Einfluss magnetischer Felder keine Rolle spielt, wird die maximal zulässige Stromdichte durch die Dimensionierung der Bauteile eingestellt.

Das Prinzip des resistiven supraleitenden Strombegrenzers beruht darauf, dass ein zu hoher Strom – auch bei einer ausreichenden Kühlung und Abwesenheit von Magnetfeldern – den

Flexibel: Der modulare Aufbau von Strombegrenzern gestattet es, die Geräte in Spannung und Strom anzupassen sowie für verschiedene Einsatzgebiete zu verwenden.



Supraleiter zum „Quenchen“ zwingt. Mit Quenchen wird ein Vorgang bezeichnet, bei dem der Supraleiter den supraleitenden Zustand verlässt, die Supraleitung also „ausgeschaltet“ wird. Übersteigt der zu transportierende Strom beispielsweise aufgrund eines Kurzschlusses den Auslegungswert des Begrenzers, wechselt das Material seine Eigenschaft und wird vom idealen Leiter zu einem hohen Widerstand.

Wie viel höher der Fehlerstrom als der kritische Strom ist, spielt für den Begrenzungseffekt keine Rolle, da der Auslegungswert als Schwellenwert angesehen werden kann. Der spezifische Widerstand des Materials ist nach dem Quenchen um Größenordnungen höher als der von gängigen Widerstandsdrähten wie zum Beispiel Konstantan. Dadurch wird der Stromfluss wirksam begrenzt. Die überschüssige Energie des Kurzschlusses wird im Gerät in Wärme umgewandelt. Bei einem Kurzschlussfall wird der Strom also nicht wie bei einem Schalter oder einer Sicherung vollständig unterbrochen, weswegen bestehende Schutzkonzepte beim supraleitenden Strombegrenzer beibehalten werden können. Je nach Größe und Auslegung des Begrenzers kann das Gerät den Kurzschluss typischerweise über einhundert oder mehrere hundert Millisekunden begrenzen, bevor eine Abschaltung oder eine Umschaltung erforderlich wird. Das reicht meist aus, um die Fehlerquelle zu lokalisieren.

## Eigensicher und wartungsfrei

Da die Funktionsweise ausschließlich auf den Materialeigenschaften basiert, sind Supraleiter selbstauslösende strombegrenzende Elemente. Sie reagieren auf Fehlerströme in wenigen Millisekunden (innerhalb der ersten Halbwelle des Kurzschlussstroms) und benötigen weder für die Begrenzung noch für die „Erholung“ nach Beseitigung des Fehlers eine Steuerung oder Ersatzteile. Sie sind somit komplett eigensicher. Nach einem Kurzschluss muss der Begrenzer nur kurzzeitig

stromlos geschaltet werden, damit er durch die Kühlung wieder in Betriebsbereitschaft zurückkehrt. Nach einigen Sekunden oder Minuten ist das Gerät wieder in der Lage, den Nennstrom aufzunehmen und Kurzschlussströme zu begrenzen. Eine Vor-Ort-Freischaltung nach einem Kurzschluss ist nicht erforderlich. Ein Kurzschluss verursacht daher auch keine zusätzlichen Betriebskosten. Die Schutzwirkung wird durch das Auslösen der Begrenzung nicht beeinflusst, denn das Material reagiert verschleißfrei.

Das schnelle Ansprechverhalten und die zuverlässige Begrenzungswirkung bieten bei vielen Anwendungen einen hohen Nutzen. Im Strompfad hinter dem Strombegrenzer liegende Betriebsmittel können ohne Abstriche bei der Sicherheit kleiner dimensioniert werden oder es lassen sich Netze koppeln, ohne dass sich die Kurzschlussströme addieren.

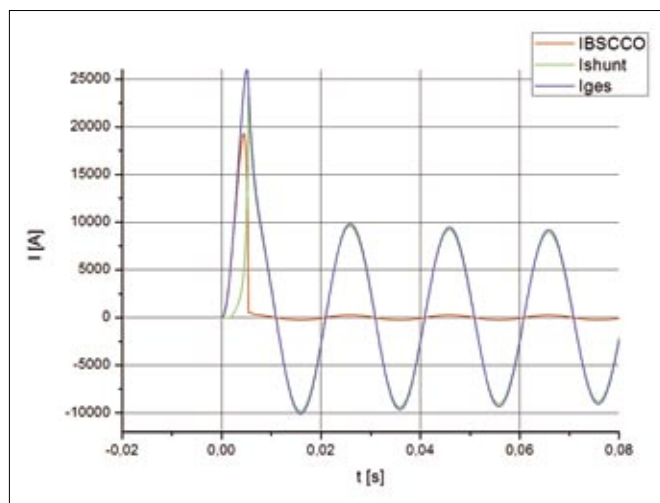
Die folgenden Beispiele zeigen Einsatzmöglichkeiten supraleitender Strombegrenzer:

- Sammelschienenkupplung unter Beibehaltung der Schaltanlagen
- Schutz im Transformatorabgang
- Schutz von lokalen Netzen in Industrie- oder Chemieparks
- Schutz von Anlagen der Kraftwerkseigenversorgung
- Kopplung von Netzen zur Reduktion von Oberwellen

## Flexible Dimensionierung

Die Anforderungen an die Fehler- oder Kurzschlussstrombegrenzung variieren je nach Netz und Einsatzgebiet, und auch Nennspannung und -stromstärke unterscheiden sich von Fall zu Fall. Die Auswahl des Materials, die Fertigung der Komponenten sowie der modulare Aufbau der Geräte erlauben es, auf die jeweiligen Einsatzbedingungen einzugehen.

Resistive supraleitende Strombegrenzer werden aus einzelnen Komponenten aufgebaut, die jeweils für eine Phase zu



**Schlagartige Begrenzung:** Bereits in der zweiten Halbwelle fließt hier im Falle eines Kurzschlusses nur noch der Strom, der über den Shunt – ein den Supraleiter umhüllender Widerstand – gelangt. Der Reststrom im Supraleiter ist praktisch vernachlässigbar.

einem Begrenzer-Modul zusammengesetzt werden. Anzahl und Verschaltung der Elemente (Reihen- oder Parallelschaltung) gestatten es, das Modul an die gewünschte Spannung und Stromstärke anzupassen. Ein einphasiges System besteht aus dem Modul, peripheren Komponenten und einem Kryostat (Behälter für den tiefkalten Stickstoff). Für die in der Praxis verwendeten dreiphasigen Geräte werden drei Systeme parallel aufgebaut, gegebenenfalls in einem Gehäuse angeordnet und von einer gemeinsamen Peripherie (Kühlsystem und -steuerung) versorgt. Durch diesen Aufbau wird auch nur diejenige Phase im Kurzschlussstrom begrenzt, die den Kurzschlussstrom trägt (im Falle einer Sternschaltung).

Neben der Reihen- und Parallelschaltung besteht eine weitere wichtige Möglichkeit, die Wirkungsweise des Begrenzers zu beeinflussen: durch Design und Fertigung der Komponenten. Eine besonders effiziente Methode ist es, die röhrenförmigen Körper aus BiSrCaCuO-Pulver (kurz BSCCO) herzustellen, das durch ein Schmelzverfahren mit Schleudergusstechnik zu Keramik-Massivteilen verarbeitet werden kann. Das sehr flexible Produktionsverfahren erlaubt es, Wandstärke, Durchmesser und Länge der Supraleiter-Rohre festzulegen und somit über den Querschnitt unter anderem auch den maximalen Strom je Rohr zu definieren. Die schmelzgegossene Keramik ist relativ weich und lässt sich mit gängigen Werkzeugen bearbeiten, zum Beispiel durch Sägen oder Fräsen. Dies eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade für die Gestaltung der Komponenten, denn durch das Einschneiden von Wendeln kann das benötigte Stromtragvermögen der Komponente sehr exakt eingestellt werden. Außerdem wird so ein längerer supraleitender Strompfad pro Komponente und damit ein sehr kompakter Aufbau ermöglicht.

Ein das Rohr konzentrisch umschließender Widerstand (Shunt), beispielsweise aus einer Kupfer-Nickel-Legierung, dient als Schutz des Supraleiters. Er verhindert, dass beim Be-

ginn des Quenchens lokale Überhitzungen im Supraleiter auftreten, indem er einen Großteil des Stroms aufnimmt, und er wirkt eventuellen Überspannungen beim Quenchen entgegen. Der Shunt wird im Normalbetrieb – also wenn das BSCCO-Material supraleitend ist – nicht vom Strom durchflossen.

Im Begrenzungsfall ist der resultierende maximale Strom davon abhängig, wie hoch der Widerstand von Supraleiter und Shunt ist. Die Gesamtlänge der hintereinander geschalteten Supraleiter-Komponenten entscheidet darüber, wie lange der Kurzschlussstrom anliegen darf, also wie viel Energie das System insgesamt aufzunehmen in der Lage ist. Typischerweise können Strombegrenzer, die auf dem zuvor beschriebenen Prinzip basieren, den Kurzschlussstrom bereits in der ersten Halbwelle etwa auf den zehnfachen Nennstrom begrenzen. Auch eine Begrenzung auf den fünffachen Nennstrom ist möglich. Dies wird nur durch die Materialeigenschaften des Supraleiters bestimmt und ist dadurch unabhängig von dem prospektiven Kurzschlussstrom und damit von der Energie des Kurzschlusses. Der sich danach einstellende sogenannte Folgestrom kann mit Hilfe des Shunt-Materials exakt dem gewünschten Niveau angepasst werden.

Durch die Auslegung ist es möglich, resistive Strombegrenzer verschiedenen Anforderungen anzupassen. Ihr Einsatz im Netz hat sich schon an verschiedenen Stellen bewährt. So arbeitet ein nach dem obigen Prinzip aufgebautes Gerät in der Eigenversorgung eines Braunkohlekraftwerks und schützt die Versorgung von Kohlebrechern vor hohen Kurzschlussströmen.

Da die Maschinen ein Mehrfaches des Nennstroms als Anlaufstrom benötigen, wurde der Begrenzer hier derart dimensioniert, dass die Einschaltströme die Begrenzerfunktion nicht auslösen und darüber hinaus auch bis zu 15 Sekunden lang der etwa doppelte Nennstrom fließen darf, ohne dass der Supraleiter quencht. □

> [MORE@CLICK E2K11652](#)