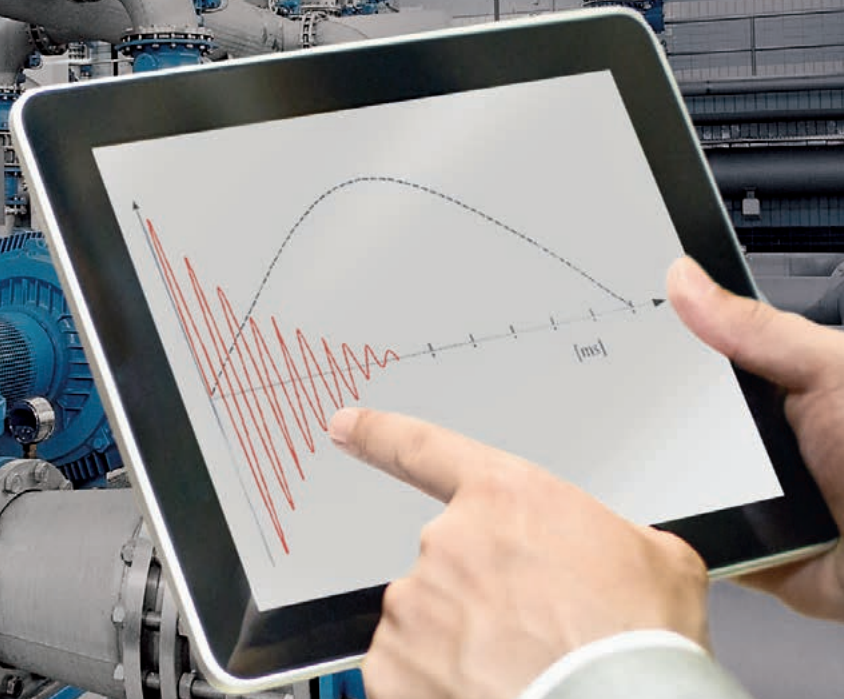


SIEMENS



Mittelspannungsschaltanlagen

Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen

Lösungen für die hohen Anforderungen an die Schalttechnik

White
Paper

Ausgabe
2015

siemens.de/mittelspannung

Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen

Hohe Anforderungen an die Schalttechnik

Dr. Dieter Sämann, Jörg Hilse, Martin Eiselt, Siemens AG

Abstract

Hohe Anforderungen für die Schalttechnik

Der Einsatz regenerativer Energieerzeuger und moderner Verbraucher nimmt immer mehr zu. Ein Umstand, der deutliche Auswirkungen auf die Qualität der Netzversorgung haben kann. Denn ob alternative Energiequelle einerseits oder moderne Verbraucher, sie alle beeinflussen die Netzqualität durch Oberschwingungen unterschiedlicher Ausprägung.

Dennoch verlangen Normen und Verbraucher eine gleichbleibend hohe Netzqualität. Um dies zu gewährleisten, werden zunehmend Kompensationsanlagen eingesetzt. Die aus Kondensatorbänken und Filterkreisen bestehenden Kompensationsanlagen müssen sicher versorgt und geschaltet werden. Die Folge sind zunehmend höhere Anforderungen an die Mittelspannungs-Schalttechnik. Die Mittelspannungsanlagen von Siemens mit Vakuum-Schalttechnik bieten beste Voraussetzungen, den hohen Anforderungen zu genügen.

Inhalt

Einführung	3
Warum werden Kondensatorbänke und Filterkreise benötigt?	4
Welche Beanspruchungen treten beim Schalten von Kondensatoren auf?	4
Wie wird die Eignung von Schaltgeräten für das Schalten von Kondensatorbänken und Filterkreisen nachgewiesen?	6
Welche Schaltgeräte können für das Schalten von Kondensatorbänken und Filterkreisen eingesetzt werden?	6
Welche Mittelspannungsschaltanlagen sind geeignet?	7

Einführung

Schaltanlagen in Mittelspannungsnetzen haben die Aufgabe, elektrische Energie zuverlässig und sicher zu verteilen. Eines der wichtigsten Elemente der Schaltanlagen sind die Leistungsschalter. Sie müssen alle auftretenden Belastungen beherrschen und dabei sowohl induktive und kapazitive Ströme als auch hohe Kurzschlussströme sicher führen und schalten können.

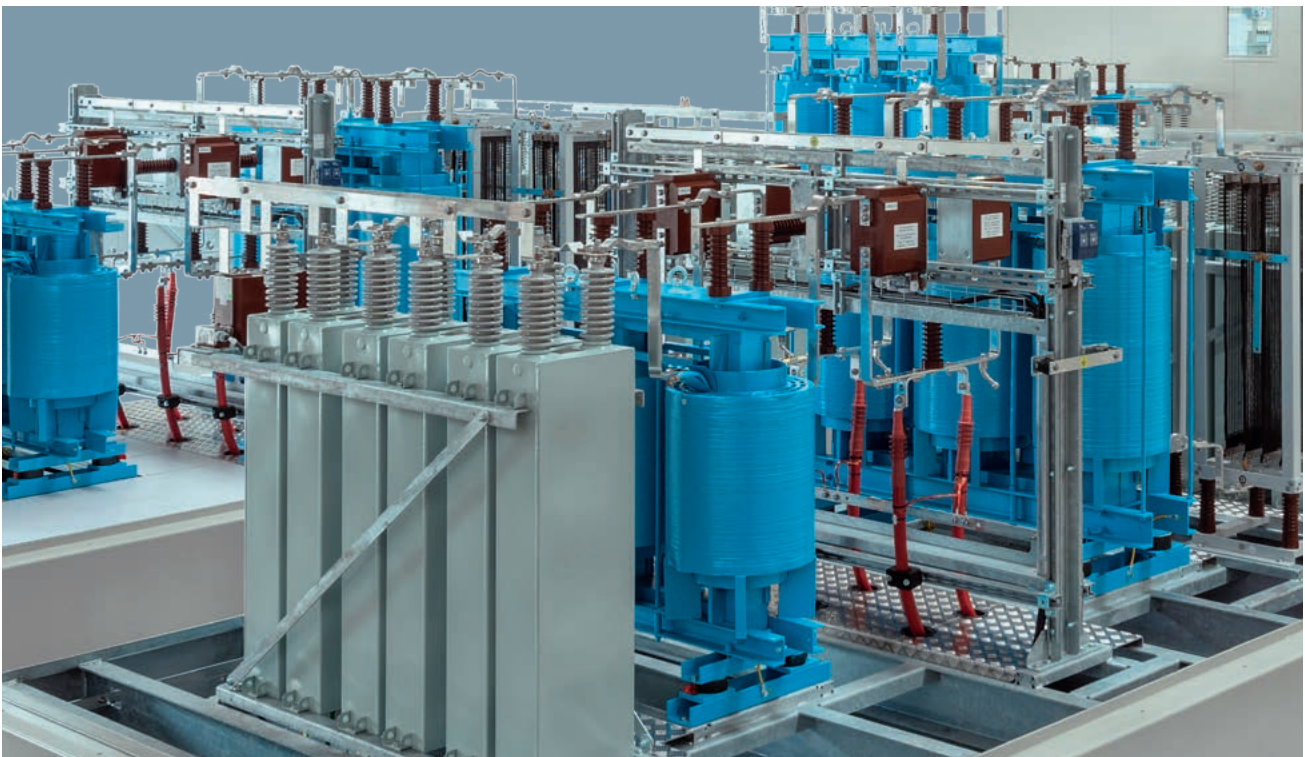
Die Anforderungen an die Leistungsschalter gehen mit den Anforderungen an die Netzqualität einher. Und diese wird einerseits von der Energieerzeugung und auf der anderen Seite von den Verbrauchern bestimmt. Die Zunahme des Einsatzes von regenerativen Energieerzeugern, zum Beispiel Windenergie, hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Qualität. Dasselbe gilt auch für die heutigen modernen Verbraucher: Je mehr Leistungselektronik zum Einsatz kommt, desto höher die Spannungsverzerrung durch Oberschwingungen. Andererseits ist die Empfindlichkeit von Geräten gegenüber Strom- und Spannungsverzerrungen in dem Maße gestiegen, wie diese Geräte Oberschwingungen erzeugen.

Die meisten Anlagen sind so konstruiert, dass sie bei (nahezu) sinusförmiger Spannung/Strom effizient arbeiten. Das heißt: Eine sehr hohe Netzqualität ist für einen zuverlässigen und effizienten Betrieb aller Geräte

unabdingbar. Das alles führt dazu, dass immer mehr Kompensationsanlagen, bestehend aus Kondensatoren und Spulen, eingesetzt werden, um die den Verbrauchern zugesagte Netzqualität zu gewährleisten.

Typische Einsatzgebiete von Kompensationsanlagen sind in der Energieerzeugung Windkraftanlagen, in der Industrie umrichter gesteuerte Motoren oder in Netzkonstellationen mit dezentraler Energieeinspeisung. Inzwischen finden Kompensationsanlagen aber auch Anwendung bei Leistungen kleiner als 10 MW.

Die Folge des vermehrten Einsatzes von Kompensationsanlagen, auch bei kleineren Leistungen, ist, dass die Leistungsschalter in den Mittelspannungsschaltanlagen immer häufiger hohe kapazitive Ströme führen und schalten können müssen. Was dies bedeutet und wie die Aufgabe beherrscht werden kann, wird im Folgenden beschrieben.



Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen

Warum werden Kondensatorbänke und Filterkreise benötigt?

Für elektrische Netze gibt es genaue Vorgaben zu Spannungs- und Frequenztoleranz und auch zur Höhe möglicher Oberschwingungen. Prozesse in der Industrie nutzen heute vielfach Automatisierungstechnik und Leistungselektronik. Bei Haushaltsabnehmern werden immer häufiger energiesparende Geräte eingesetzt, die Gleichrichter verwenden. All diese Verbraucher beeinflussen die Qualität der Netzversorgung durch Oberschwingungen unterschiedlicher Ausprägung. Oberschwingungen zeichnen sich durch hohe Frequenzen aus. Sie „verschmutzen“ nicht nur das Netz, sondern verursachen auch Verluste, die ihrerseits zu einer unerwünschten zusätzlichen thermischen Belastung der Geräte und Stromleiter führen. Die Konsequenz der höheren Verluste beziehungsweise der höheren Erwärmung sind größere Leiterquerschnitte und überdimensionierte Schaltanlagen. Um dem entgegen zu wirken, versucht man solche Oberschwingungen zu kompensieren. Als Kompensationselement werden entweder Spulen oder Kondensatoren eingesetzt oder eine Kombination aus beiden.

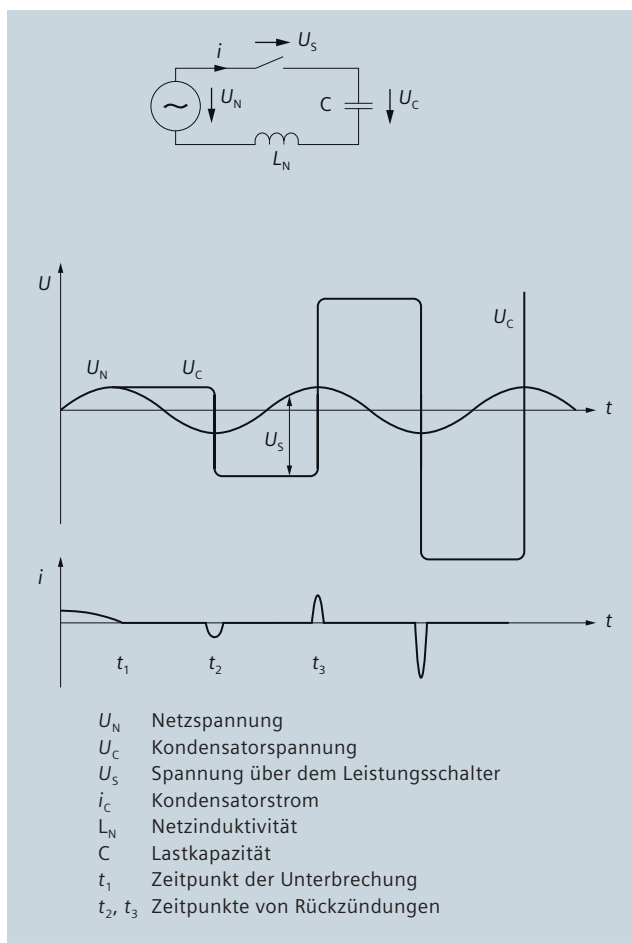
Die Leistungsschalter der Mittelspannungsanlagen müssen in der Lage sein, sowohl induktive als auch kapazitive Ströme sicher zu schalten. Das Schalten induktiver Ströme ist für heutige Leistungsschalter keine besondere Herausforderung, das Schalten kapazitiver Ströme hingegen schon. Daher soll im Folgenden nur die kapazitive Kompensation betrachtet werden. Dabei kann ein einzelner Kondensator eingesetzt werden, aber auch mehrere parallel geschaltete. Zur Vermeidung von Resonanzen werden Filterkreise bestehend aus einer Reihenschaltung von Kondensator und Induktivität eingesetzt.

Welche Beanspruchungen treten beim Schalten von Kondensatoren auf?

Ausschalten von Kondensatoren:

Beim Ausschalten im Stromnulldurchgang (Zeitpunkt t_1) bleibt der Kondensator auf den Scheitelwert der treibenden Spannung aufgeladen (U_C). Die Netzspannung (U_N) ändert sich weiter sinusförmig und erreicht nach 10 ms ihren entgegengesetzten Scheitelwert. Die wiederkehrende Spannung (Differenz zwischen U_C und U_N) steigt zunächst nur langsam an, die Beanspruchung ist also hier nicht die Steilheit, sondern der Absolutwert der Spannung. Bei einer Neuzündung innerhalb 5 ms nach Lichtbogenlöschung spricht man von einer Wiederezündung. Diese Art von Neuzündung ist ungefährlich. Bei Neuzündungen nach einer stromlosen Pause von mehr als 5 ms spricht man von Rückzündungen. Treten diese erst nach ungefähr 10 ms auf, können sie hohe Schaltüberspannungen verur-

sachen. Denn durch eine Rückzündung kommt es zur Umladung der im Kondensator verbliebenen Energie, und damit schwingt die Spannung theoretisch auf einen Wert entsprechend Kondensatorspannung plus Augenblickswert der Netzspannung (Zeitpunkt t_2). Wegen der vorhandenen Netzdämpfung ist dieser Wert jedoch nicht ganz so hoch. Durch mehrfaches Umladen (weitere Rückzündungen) können so hohe Schaltüberspannungen entstehen, dass es zu einer Überbeanspruchung der Anlagenisolation und damit zum Überschlag am Leistungsschalter oder auch an anderen Anlagenkomponenten kommen kann oder zum endgültigen Versagen und zur Zerstörung des Schalters.



Rückzündungen beim kapazitiven Schalten

Anforderung an die Schaltanlage:

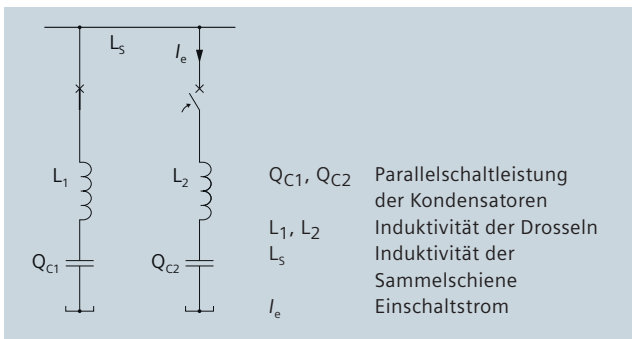
Sicheres Beherrschen der hohen Wiederkehrspannung, damit es nicht zu Rückzündungen und Überspannungen kommt.

Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen

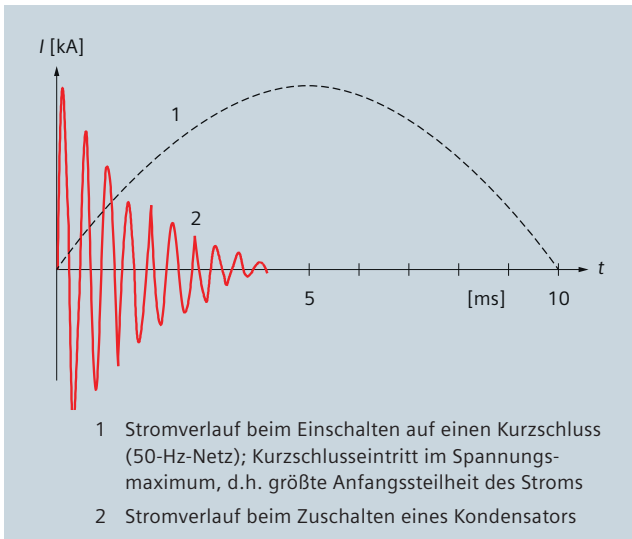
Parallelschalten von Kondensatoren:

Werden zur Kompensation mehrere Kondensatoren parallel verwendet und diese getrennt zu- und abgeschaltet, ist der zulässige kapazitive Einschaltstrom zu beachten. Wenn ein Kondensator ans Netz geschaltet ist und ein weiterer dazu geschaltet wird, können abhängig von der Größe der Kondensatoren und der Induktivität der Schaltanlage sehr hohe Einschaltströme auftreten.

Beim Annähern der Schaltkontakte kommt es vor der galvanischen Berührung der Kontakte zu einem Vorüberschlag über die offene Schaltstrecke. In diesem Augenblick erfolgt ein Ausgleichsvorgang zwischen dem Netz und



Parallelschalten von Kondensatoren



- 1 Stromverlauf beim Einschalten auf einen Kurzschluss (50-Hz-Netz); Kurzschlusseintritt im Spannungsmaximum, d.h. größte Anfangsteilheit des Stroms
- 2 Stromverlauf beim Zuschalten eines Kondensators

Strom beim Einschalten von Kondensatoren

Anforderung an die Schaltanlage:

Sicheres Beherrschen von sehr hohen Einschaltströmen bis zu 20 kA bei Frequenzen von einigen Kilohertz.

dem Kondensator. Dabei können Einschaltströme bis zu einigen zehn Kiloampere bei Frequenzen bis zu einigen Kilohertz auftreten. Da der Vorüberschlag etwa 1 bis 2 ms vor galvanischer Kontaktberührung erfolgt, fließt beim Einschalten von Kondensatoren der volle Ausgleichsstrom (2) über den Lichtbogen. Im Gegensatz dazu ist beim Einschalten auf einen (50 Hz) Kurzschluss (1) der Augenblickswert des Stromes zu diesem Zeitpunkt noch wesentlich kleiner. Das bedeutet, dass das Einschalten von Kondensatoren bei gleichen Werten der Stromamplitude wesentlich härter ist als das Einschalten auf einen Kurzschluss.

Um eine unzulässige Belastung der Schaltkontakte zu vermeiden, sind Grenzwerte des transienten Einschaltstroms zu beachten. Für Siemens-Leistungsschalter sind folgende Einschaltströme (Scheitelwert) zulässig:

- $I_e \leq 10 \text{ kA}$ für Vakuum-Leistungsschalter ohne Kenntnis der Abklingzeitkonstante bzw. Frequenz
- $I_e \leq 20 \text{ kA}$ für Vakuum-Leistungsschalter mit Kenntnis der Frequenz bis maximal 4250 Hz

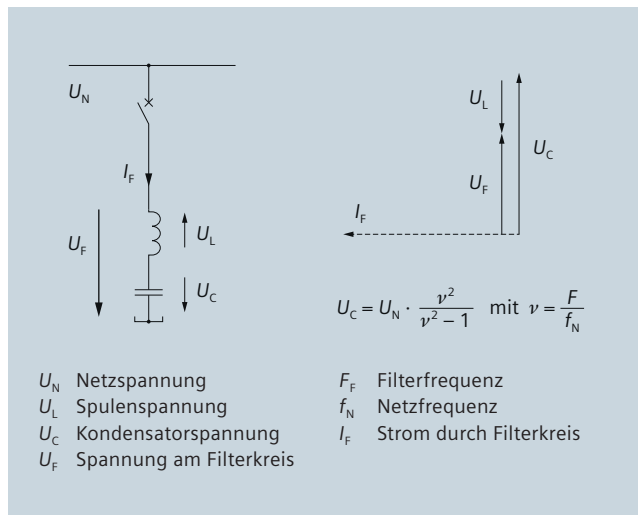
Für Plattenkontakte ist die Grenze begründet durch die Neigung zum Kontaktverschweißen, wenn der Einschaltstrom in der Vorlichtbogenzeit (1 bis 2 ms) der Einschaltbewegung nicht schnell genug abklingt. Liegt der Einschaltstrom über den genannten Grenzwerten, ist eine Absprache mit dem Leistungsschalterhersteller erforderlich. Bei schnellem Abklingen der Amplituden unter den Grenzwert sind auch größere Anfangswerte des Einschaltstroms zulässig.

Der Grenzwert 20 kA des Parallel-Einschaltstroms markiert den von der Leistungsschalternorm empfohlenen Bemessungseinschaltstrom für Parallelkondensatorbänke und kann optional als Bemessungswert herangezogen werden.

Filterkreise:

Beim Ausschalten von Filterkreisen oder verdrosselten Kondensatorbänken ist die Beanspruchung des Leistungsschalters mit der wiederkehrenden Spannung größer als bei reinen Kondensatoren. Der Grund dafür liegt in den Eigenschaften der Serienschaltung von Spule und Kondensator. Wenn durch beide Elemente derselbe Strom fließt, so sind die Spannungen an Kondensator und Spule um 180° phasenverschoben. Die Kondensatorspannung U_C ist also um den Betrag der Spulenspannung U_L größer als die treibende Netzspannung. Nach dem Ausschalten steht die höhere Spannung U_C am Leistungsschalter an, da der Kondensator die elektrische Ladung speichert. Die Kondensatorspannung – und damit auch die Beanspruchung des Leistungsschalters – hängt von der Frequenz des Filterkreises ab. Gegebenenfalls muss man einen Leistungsschalter einer höheren Bemessungsspannung verwenden.

Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen



Spannungen bei Filterkreisen

Anforderung an die Schaltanlage:

Sicheres Beherrschen von deutlich höheren Wiederkehrspannungen im Filterkreis.

Wie wird die Eignung von Schaltgeräten für das Schalten von Kondensatorbänken und Filterkreisen nachgewiesen?

Die Prüfanforderungen für das Schalten von kapazitiven Strömen sind in der IEC 62271-100 (Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen — Teil 100: Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter) angegeben. Danach sind Prüfungen unter anderem für folgende Anwendungen durchzuführen:

- Ausschalten von Kondensatorbänken
- Einschalten von Kondensatorbänken mit zugeschalteten Kondensatorbänken (back-to-back)

Ein wichtiges Kriterium beim Ausschalten von kapazitiven Strömen ist die Rückzündungswahrscheinlichkeit. Sie wird in zwei Klassen unterteilt:

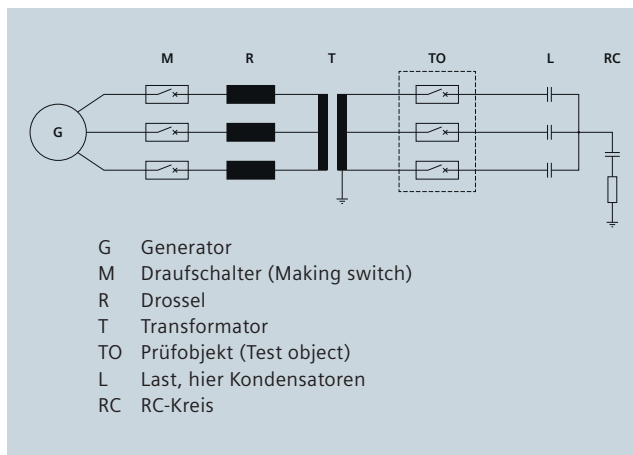
- Klasse C1: geringe Rückzündungswahrscheinlichkeit
- Klasse C2: sehr geringe Rückzündungswahrscheinlichkeit

Die genannten Prüfungen werden in der Regel an typischen Leistungsschaltern durchgeführt und von Schaltgeräten, die für solche Anwendungen vorgesehen sind, auch beherrscht.

Für das Schalten von Filterkreisen trifft die IEC keine Aussage. Deshalb hat Siemens hierfür eigene, aus der Praxis abgeleitete Prüfbedingungen vorgegeben:

Die höchsten Beanspruchungen beim Schalten von Filterkreisen treten auf, wenn die niedrigste Abstimmfrequenz zu schalten ist. Deshalb wurden die Kennwerte des Prüfobjekts auf die 2. Harmonische ($n = 2$; 120 Hz für ein 60-Hz-Netz) abgestimmt.

Die Nachbildung des Filterkreises erfolgte mit einer Kondensatorbank auf der Lastseite des Prüfobjekts. Die Drossel befand sich auf der Einspeiseseite zwischen Generator und Transformator. Auf diese Weise konnten vergleichbare Verhältnisse zum Schalten eines realen Filterkreises geschaffen werden.



Schaltbild für Filterkreisprüfung

Welche Schaltgeräte können für das Schalten von Kondensatorbänken und Filterkreisen eingesetzt werden?

Das Schalten von Kondensatoren zur Kompensation insbesondere bei mehreren Bänken an der Schaltanlage ist eine anspruchsvolle Aufgabe, für die nicht unbedingt jedes Schaltgerät geeignet ist. Zum einen sind hier die kapazitiven Ströme größer als bei den leerlaufenden Leitungen und Kabeln, zum anderen ist – abhängig von der Konstellation – ein Parallelschalten der Kondensatoren nicht ausgeschlossen. Schaltgeräte für diese Anwendung müssen entsprechend dieser Anforderungen geprüft sein.

Siemens Vakuum-Leistungsschalter sind für diese Beanspruchung bestens geeignet. Fast alle Leistungsschalter sind für das Schalten von Kondensatorbänken zugelassen, denn sie haben die Prüfungen nach der IEC 62271-100 für das kapazitive Schalten erfolgreich nach der Klasse C2 bestanden.

Schalten von Kondensatoren und Filterkreisen

Ein rückzündungsfreies Ausschalten von Kondensatoren setzt voraus, dass möglichst keine Partikel nach dem Stromnulldurchgang zu einem erneuten Rückzünden zwischen den Schaltkontakten führen. Durch geeignetes Kontaktmaterial und eine Reinraumfertigung sehr hoher Güte kann dieser Effekt nahezu eliminiert werden. Das Material des Schaltkontaktes hat Einfluss auf das Einschaltverhalten. So eignen sich z.B. Kontakte mit hohem Chromanteil besser.

Einen weiteren Einfluss auf das kapazitive Schaltverhalten hat die Betriebsspannung. Bei niedrigen Spannungen ist die dielektrische Beanspruchung zwischen den Kontakten wesentlich geringer als bei hohen Spannungen. Daher bedarf es bei sehr hohen Wiederkehrspannungen besonderer Maßnahmen an Vakuum-Schaltröhre und Leistungsschalterantrieb, um rückzündungsfrei zu schalten.

Die Fähigkeit eines Leistungsschalters, zwei oder mehrere Kondensatoren parallel zu schalten, ist im wesentlichen von dem kapazitiven Einschaltstrom, der Frequenz, aber auch vom Kontaktwerkstoff der Vakuum-Schaltröhre und dem Antriebsmechanismus abhängig. Durch die Vorlichtbögen beim Schließen der Kontakte kommt es immer zu einem partiellen Aufschmelzen des Kontaktwerkstoffes und birgt damit das Risiko eines Verklebens im geschlossenen Zustand. Das bedeutet, dass nach dem Parallelschalten von Kondensatoren die Kontakte immer mit einer gewissen Kraft aufgerissen werden müssen. Durch ein Kontaktmaterial, das eine spröde Komponente enthält, kann die Aufreißkraft verringert werden. Deshalb stellt Siemens das Kontaktmaterial für diese extremen Anforderung im eigenen Werk selbst her.

Neben dem Kontaktmaterial hat auch der Antrieb des Schaltgerätes einen großen Einfluss auf das Schaltverhalten. Um die Verschweißneigung zu reduzieren, ist eine angepasste Einschaltgeschwindigkeit notwendig, die ein Prellen oder Oszillieren der Kontaktkraft weitestgehend minimiert. Um eine leichte Verklebung, die sich nie vermeiden lässt, dennoch wieder zu öffnen, muss der Trennschlag beim Ausschalten ausreichend dimensioniert sein. Besonders bei solchen hohen Anforderungen ist das Zusammenspiel aller Leistungsschalterkomponenten von immenser Bedeutung.

Wie im theoretischen Teil beschrieben, ist das Schalten von Filterkreisen eine noch höhere Herausforderung als das reine Schalten von Kondensatoren. Abhängig von der Frequenz des Filterkreises kann die Wiederkehrspannung über den Schaltkontakten im ungünstigsten Fall um mehr als 30% ansteigen. Hier zeigt sich dann, wie gut die Isolationskoordination des Schaltgerätes umgesetzt wurde. Siemens ist es gelungen, diese Aufgabe bis zu Betriebsspannungen von 40,5 kV zu beherrschen. Die erfolgreiche Prüfung bei Wiederkehrspannungen von

mehr als 100 kV zeigt, dass durch konsequente Eliminierung von Effekten, die die Spannungsfestigkeit negativ beeinflussen, solch hohe Werte selbst mit einer Vakuum-Schaltröhre beherrscht werden können. Voraussetzung hierfür ist zunächst eine absolute Reinheit aller Bauteile in der Vakuum-Schaltröhre, eine ununterbrochene Prozesskette unter Reinraumbedingungen und natürlich besonders ausgewähltes und ebenfalls unter Vakuumbedingungen gefertigtes Kontaktmaterial. Eine Anpassung der Antriebseigenschaften an diese hohen Anforderungen ist selbstverständlich.

Welche Mittelspannungsschaltanlagen sind geeignet?

Für das Schalten leerlaufender Kabel und Freileitungen können grundsätzlich alle Siemens Mittelspannungsschaltanlagen eingesetzt werden. Werden Kondensatorbänke geschaltet, dann sollte der Leistungsschalter in den luft- oder gasisolierten Schaltanlagen für die höheren Beanspruchungen – insbesondere beim Parallelschalten der Kondensatorbänke – ausgelegt sein. Beim Schalten von Filterkreisen ist die Entscheidung abhängig von der Betriebsspannung des Netzes. Bis zu Betriebsspannungen von 24 kV können fast alle Siemens-Schaltanlagen verwendet werden, bei kleinen Filterfrequenzen, z.B. 100 Hz entsprechend der 2. Harmonischen kann es erforderlich sein, eine Schaltanlage der nächst höheren Spannungsreihe auszuwählen.

Genau diese Maßnahme wurde bisher angewendet im Spannungsbereich von 36 bis 40,5 kV. Bei niedrigen Filterfrequenzen wurden entweder zwei Felder in Reihe geschaltet oder es wurde sogar ein Hochspannungsschalter eingesetzt. Das ist jetzt nicht mehr notwendig. Denn mit der Siemens-Schaltanlage 8DA mit einer neu entwickelten Vakuum-Schaltröhre ist diese Maßnahme nicht mehr erforderlich. Das bedeutet weniger Platzbedarf und damit niedrigere Kosten. Diese Schaltanlage ist besonders gut geeignet, um Kondensatoren und Filterkreise in der Mittelspannung bis zu Betriebsspannungen von 40,5 kV sicher zu schalten. Damit steht eine Schaltanlage zur Verfügung, die auch die hohe Schalthäufigkeit bei solchen Kompensationsaufgaben erfüllt, nämlich 30.000 Schaltspiele.

Siemens ist es gelungen, diese Aufgabe bis zu Spannungen von 40,5 kV mit nur einer Vakuum-Schaltröhre zu beherrschen.

Herausgeber
Siemens AG 2015

Energy Management Division
Medium Voltage & Systems
Mozartstr. 31 C
91050 Erlangen

www.siemens.de/mittelspannung

Artikel-Nr. EMMS-T10028-00
Gedruckt in Deutschland
Dispo 30403
PU 14/73198 WP 10152.0

© 2015 Siemens. Änderungen und Irrtümer vorbehalten.
Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich
allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale,
welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der
beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch
Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die
gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich,
wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.