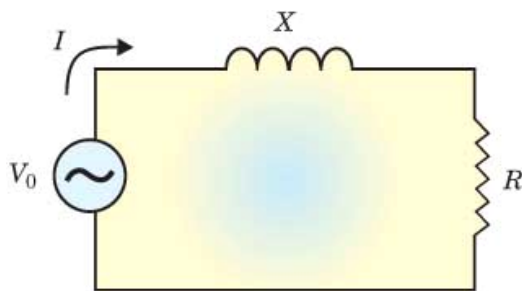


## Stabilisierung des Stromnetzes

ALEX MALOZEMOFF | JOCHEN MANNHART | DOUGLAS SCALAPINO

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Hochtemperatur-Supraleiter in der Technik“ in **Physik in unserer Zeit**, 37. Jahrgang 2006, Nr. 4, S. 162.

Ein überraschender Ableger der Motoren und Generatoren aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) ist der Synchronmotor zur dynamischen Regelung der Blindleistung. Im Wesentlichen ist er, wie ein Generator, eine rotierende Maschine. Er ist jedoch nicht an eine äußere mechanische Energiequelle gekoppelt, die den Rotor antreibt. Ein solcher Synchronmotor stellt dem Netz Ströme mit einstellbarer Phasenlage zur Verfügung.



**Abb. 1** Ein Ersatzschaltbild, in dem eine Spannungsquelle  $V_0$  an einen Widerstand  $R$  und an eine Induktivität  $X$  gekoppelt ist, beschreibt charakteristische Eigenschaften der Stromübertragung in einem Hochspannungsnetz.

Das Problem, zu dessen Lösung der Synchronmotor beiträgt, kann mithilfe einer einfachen  $R$ - $X$ -Schaltung veranschaulicht werden (Abbildung 1). Eine Wechselstromquelle mit effektiver Spannung  $V_0$  und Frequenz  $\omega$  ist über einen Übertragungsweg, der Leitungen, Transformatoren und andere Elemente enthält, an eine ohmsche Last  $R$  gekoppelt. Der Übertragungsweg wird durch einen effektiven Serienblindwiderstand, der hauptsächlich induktive Reaktanz  $X = \omega L$ , beschrieben. Der Effektivstrom  $I$  hat damit einen Real- (in Phase) und einen Imaginärteil (außer Phase):

$$I = V_0 / (R + iX) = I_0 (\cos \theta - i \sin \theta)$$

mit  $I_0 = V_0 / \sqrt{R^2 + X^2}$  und  $\cos \theta = R / \sqrt{R^2 + X^2}$ . Der phasengleiche Realteil bestimmt die durchschnittliche Leistung, die der Last zugeführt wird, die so genannte Wirkleistung  $P = V_0 I_0 \cos \theta$ . Elektroingenieure sprechen aber auch von einer „imaginären“ Leistung oder

---

von einer Blindleistung  $Q = V_0 I_0 \sin \theta$ , die von der Stromkomponente außer Phase herrührt. Für induktive Blindwiderstände beschreibt  $Q$  die mittlere Rate, mit der in jedem Zyklus magnetische Feldenergie zunächst aufgenommen und dann wieder an die Quelle abgegeben wird.

Die Blindleistung spielt für die Belastung des Netzes eine wichtige Rolle. Der Minimalstrom, der für eine am Verbraucher abzugebende Wirkleistung benötigt wird, entspricht der Phasenverschiebung  $\theta = 0$  und damit einer verschwindenden Blindleistung. Wenn  $\theta$  ansteigt, ist zusätzlicher Strom notwendig, um dieselbe Leistung an den Verbraucher zu liefern. Wenn zudem viele Verbraucher gleichzeitig Leistung entnehmen, bedeutet dies eine Parallelschaltung ohmscher Widerstände, wodurch der Gesamtwiderstand  $R$  reduziert wird.

Als Folge wächst der Strom und mit ihm der Spannungsabfall am induktiven Blindwiderstand  $X$ . Dadurch verringert sich die Spannung am Verbraucher. Sobald sie dabei einen kritischen Wert unterschreitet, wird das System instabil: die Spannung bricht zusammen. Ein solcher Zusammenbruch war ein entscheidendes Glied in der Ereigniskette, die zum Stromausfall am 14. August 2003 in den USA und in Kanada geführt hat.

Bei induktiven Blindwiderständen hinkt der Strom der Spannung hinterher. Bei kapazitiven Blindwiderständen hingegen eilt der Strom der Spannung voraus. Das zeitweise Einfügen kapazitiver Elemente kann so den Zusammenbruch der Spannung verhindern oder deutlich abschwächen. Das Fehlen einer „dynamischen Blindleistungskompensation“ ist ein kritischer Mangel des heutigen US-Stromnetzes. Die Stromversorger wenden zwar zahlreiche konventionelle Methoden der Blindleistungskompensation an, der HTS-Synchronmotor verspricht jedoch viele Vorteile. Dazu zählen eine große Ausgangsblindleistung, ein hoher Wirkungsgrad, schnelle, dynamische Reaktion, ein großer Dynamikbereich, ein Minimum an Einschaltstromstößen und langfristige Zuverlässigkeit, die von der stabilen Betriebstemperatur der HTS-Spulen herrührt.

Um sich die bemerkenswerte Fähigkeit des HTS-Synchronmotors zur Regelung der Blindleistung zu veranschaulichen, stelle man sich einen C-förmigen Elektromagneten vor, der mit  $n$  Windungen umwickelt ist, die einen Strom  $I$  führen. Der im Spalt induzierte magnetische Fluss ist proportional zu  $nI$  und umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Der magnetische Kreis eines konventionellen Motors besteht sowohl im Rotor als auch im Stator aus Eisenlamellen, die möglichst dicht einander gegenüber stehen. Dadurch wird der

Zwischenraum minimiert und der Fluss vergrößert. Eine HTS-Maschine ohne Eisenlamellen nutzt einen viel größeren Abstand zwischen dem Rotor und dem Eisen, das die Statorspulen stützt. Aufgrund der hohen Stromdichte des HTS-Drahtes, die einen geringen Drahtdurchmesser und damit eine große Windungszahl im HTS-Rotor ermöglicht, erzeugt die HTS-Maschine dennoch einen größeren magnetischen Fluss als ihr konventionelles Gegenstück.


Wenn sich die HTS-Rotorspulen drehen, erzeugen sie einen zeitlich veränderlichen Fluss  $\Phi$ , der gemäß dem Faradayschen Gesetz  $V = -d\Phi/dt$  eine Erregerspannung  $V_e$  in den Statorspulen induziert. Der Wechselstrom im Stator  $I_a$  induziert seinerseits in den Statorspulen eine entgegengesetzte elektromagnetische Kraft, die proportional und gegenphasig zum Stator-Wechselstrom  $I_a$  ist, und die zusätzlich zur Erregerspannung wirkt. Die Proportionalitätskonstante  $X_s$ , die kontinuierlicher Blindwiderstand genannt wird, ist aufgrund des relativ großen magnetischen Rotor-Stator-Abstands in HTS-Maschinen um einiges kleiner als die in konventionellen Maschinen. Die Summe der beiden in den Rotorwicklungen induzierten Spannungen muss an den Klemmen der Statorspulen gleich der Netzspannung  $V_g$  sein, sodass der ins Netz ausgekoppelte, gegenphasige Blindstrom des Stators

$$I_a = \frac{V_e - V_g}{X_s}$$

beträgt.

Diese einfache Gleichung hat bemerkenswerte Konsequenzen. Wenn die Netzspannung unter den Wert fällt, der durch  $V_e$  gegeben ist, gibt der HTS-Synchronmotor im Wesentlichen ohne Verzögerung kapazitiven Strom ans Netz ab – und davon sehr viel, weil  $X_s$  klein ist. Wenn  $V_g$  über  $V_e$  hinauswächst, gibt der Synchronmotor induktiven Strom ab. Umgekehrt kann man  $V_e$  innerhalb von Sekunden anpassen, indem man den Strom in der HTS-Rotorwicklung ändert. Diese Regelung von  $V_e$  erlaubt es, auf die Anforderung des Netzes nach Blindleistungskompensation dynamisch zu reagieren.

Unter Verwendung von HTS-Draht der ersten Generation hat American Superconductor einen Synchronmotor zur dynamischen Regelung der Blindleistung hergestellt, der zurzeit im Stromnetz der Tennessee Valley Authority (TVA) getestet wird. Dieser kann bis zu 8 MVA sowohl kapazitive als auch induktive Blindleistung liefern. Darüber hinaus ist er so kompakt,



dass er in einen Lastwagenanhänger passt, und somit nach Bedarf an beliebigen Verteilerstationen eingesetzt werden kann. Eine Bestellung von TVA über fünf weitere Synchronmotoren – abhängig vom erfolgreichen Test des Prototyps – ist der weltweit erste kommerzielle Auftrag für HTS-Energieanlagen.