Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 44 (1953)

Heft: 1

Artikel: Verbesserung des Leistungsfaktors in elektrischen Hoch- und Niederspannungsnetzen

Autor: Jean-Richard, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059906

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

fahren in die Stangen gebracht werden könnte, dabei auf das Holz aufziehen und gegen alle Pilze ähnlich gute Wirkung ausüben würde. Dieses Schutzmittel gibt es aber noch nicht.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Salzgemische, ähnlich den U- und den UA-Salzen im Boucherieverfahren zu verwenden. Hier bieten aber die verschieden grossen Wanderungsgeschwindigkeiten der einzelnen Komponenten infolge des Filtereffektes der Zellwände die grösste Schwierigkeit. Diese Salzgemische könnten aber z. B. im Trogtränkungsverfahren, das vielleicht von den bisherigen Verfahren etwas abweichen könnte, in relativ gleichmässiger Verteilung in das Holz gebracht werden. Bei dieser Imprägnierungsart wären ebenfalls, ähnlich wie beim zusätzlichen Stockschutzverfahren, neue bauliche Einrichtungen nötig. Beim Trogtränkungsverfahren wäre nur ein Arbeitsgang nötig, beim Stockschutzverfahren aber deren zwei.

Es ist klar, dass es auf Grund dieser mehr theoretischen Erwägungen nicht möglich ist, zu entscheiden, welches Verfahren das günstigste ist. Dies kann nur durch sorgfältig durchgeführte Praxisversuche, welche sich über wenigstens einige Jahre erstrecken müssten, in Verbindung mit Laboratoriumsversuchen entschieden werden. Erst dann könnte festgestellt werden, ob der gegenwärtig relativ häufige vorzeitige Abgang an Stangen infolge Porenhausschwammbefalls vermieden und damit die mittlere Lebensdauer erhöht werden könnte.

Adresse des Autors:
Dr. sc. nat. *O. Wälchli*, Leiter der Biologischen Abteilung der Eidg. Materialprüfungsanstalt, St. Gallen.

Verbesserung des Leistungsfaktors in elektrischen Hoch- und Niederspannungsnetzen

Von *Ch. Jean-Richard*, Muri bei Bern

621.316.722:621.316.727

Technische Mittel zur Verbesserung des Leistungsfaktors werden angegeben, ferner eine einfache Methode, den Leistungsfaktor auf eindeutige Weise zu charakterisieren.

Des moyens techniques d'améliorer le facteur de puissance sont indiqués, ainsi qu'une méthode simple de caractériser le facteur de puissance d'une manière univoque. La terminologie employée satisfait le besoin d'exprimer les phénomènes physiques d'une manière cohérente.

1. Darstellung der Aufgabe

Der prächtige Aufschwung, welchen die Elektrotechnik genommen hat, ist sicher der ausserordentlichen Leichtigkeit zu verdanken, mit welcher der elektrische Strom, Träger von Wirkenergie, sich von den Kraftwerken bis in die äussersten Verästelungen der immer dichter werdenden Netze verteilt.

Dieser Strom wird vom Blindstrom [1]) begleitet, welcher eine Vergrösserung der Wirkenergieverluste hervorruft, bei gleicher verteilter Wirkenergie. Die Verbesserung des Leistungsfaktors besteht darin, den Blindstrom zum Verschwinden zu bringen. In den Hoch- und Niederspannungsnetzen hat diese Aufgabe mehr als einen Aspekt. Die Technik hat daher von Stufe zu Stufe eine Anzahl von Teilaufgaben lösen müssen, welche sich aus dem steten Bemühen ergeben, den Leistungsfaktor zu verbessern.

Der Blindstrom tritt einmal auf in Verbindung mit den Induktanzen, aus welchen das Netz besteht. So nehmen die Auf- und Abtransformatoren und alle Verteiltransformatoren im Betrieb Blindstrom auf. Im Leerlauf ist der Blindstrom zur Hauptsache abhängig von der Qualität der Bleche und von ihrem Zusammenbau. Bei Vollast ist der induktive Strom abhängig von der Kurzschlußspannung.

Die Bleche und ihr Zusammenbau konnten in erstaunlichem Masse verbessert werden, so dass der Leerlaufstrom heute rund 3...5 % des Nennstromes ausmacht.

Die Kurzschlußspannung lässt sich nicht so leicht beeinflussen. Während die Verteiltransformatoren eine Kurzschlußspannung von 3 % aufweisen, beträgt sie an den Auf- und Abtransformatoren mit grosser Leistung rund 10 %. Daraus folgt, dass die Netze wegen der Induktanz der Transformatoren bei Vollast nahezu mit 13 % des Wirkstromes durch Blindstrom belastet werden.

Eine weitere Ursache des Auftretens von Blindstrom bilden die Induktionsmotoren, welche in unübersehbarer Menge an ungezählten Orten Bewegung erzeugen. Im Leerlauf nehmen sie als Blindstrom nahezu 30 % des Nennwirkstromes auf. Dieser Betrag kann kaum verkleinert werden, wegen des notwendigen Luftspaltes. Bei Vollast kommt ein zweiter Betrag von etwa 30 % zum ersten, ebenfalls wegen des Luftspaltes. Wegen dieser bedeutenden Beträge ist es angezeigt, die Motoren möglichst genau dem gewünschten Betrieb anzupassen, jedoch ohne die immer mögliche Erweiterung der Unternehmung zu vernachlässigen.

Die Leitungen sind ebenfalls mit bedeutenden Induktanzen behaftet überall dort, wo es sich um Freileitungen handelt. Bei hohen Nennspannungen von mehr als 100 000 V ist der Prozentsatz der Induktanz einer Freileitung bei 50 Hz ungefähr dreimal so gross wie der Prozentsatz des Ohmschen Widerstandes. Sie ist jedoch nicht herabsetzbar wegen der notwendigen Isolation und, als Folge davon, der Sicherheit des Betriebes. Immerhin wurden in jedem Pol einer Freileitung mit der Nennspannung von 220 000 V Kondensatoren eingebaut, um die Induktanz der Leitung zu verkleinern.

Weiter ist die Kapazitanz der Hochspannungsfreileitungen zu erwähnen. Auch sie verursacht Blindstrom. Dieser wird jedoch abgegeben und nicht aufgenommen, wie die vorher genannten. Man nennt diesen Strom deshalb kapazitiven Blindstrom. Die Summe beider Blindströme ist somit kleiner als die grösste der beiden Komponenten. In dieser Beziehung kann also der kapazitive Blindstrom nützlich sein, um den Leistungsfaktor zu verbessern. Deshalb sind zwei parallele Leiter pro Pol verwendet worden für eine Leitung von 380 000 V Nennspannung, da diese Anordnung die Kapazitanz vergrössert. Nur sind die Netze nicht dauernd belastet, so dass es in Zeiten schwacher Belastung vorkommt, dass der kapazitive Strom überwiegt. Allein wirkt der kapazitive Strom nachteilig auf die Stabilität der Übertragung von Wirkstrom längs langen Hochspannungsleitungen, welche ein Kraftwerk mit einem gemischten Netz verbinden, an welches Verbraucher und Erzeuger angeschlossen sind. Das Kraftwerk muss die Erregung der Generatoren unter den Betrag reduzieren, welcher dem Leerlauf bei gleicher Spannung entspricht. Um dies zu vermeiden ist es angezeigt, den kapazitiven Strom der Leitung so aufzuteilen, dass nur ein Teil davon vom Kraftwerk übernommen wird, währenddem der andere, wenigstens gleich grosse Teil vom Netz übernommen wird.

2. Lösung der Aufgabe

Eine der Lösungen besteht darin, Synchronmaschinen zu verwenden, welche in der Lage sind, Blindstrom abzugeben und zu beziehen. Solche Maschinen werden durch den Eigentümer des Netzes an denjenigen Stellen installiert, welche

[1]) Die Wörter «Blindstrom» und «Blindleistung» sind gegenüber den Wörtern «Wirkstrom» und «Wirkleistung» physikalisch einwandfrei, wenn auch eine gewisse Symmetrie der Ausdrucksweise vermisst wird. Im französischen Sprachgebiet wird für die Wörter «Blindstrom» und «Blindleistung» bisher der Ausdruck «réactif» verwendet, im Gegensatz zu «actif» für «Wirkstrom» und «Wirkleistung». Diese Art der Darstellung wirkt verwirrend, da wegen des Ausdruckes «réactif» eine vektorielle Drehung um 180 ° vermutet wird, aber nur von 90 ° gemeint ist, gegenüber den mit «actif» bezeichneten Grössen. Daher schlägt der Verfasser vor, im französischen Sprachgebiet «Blindstrom» und «Blindleistung» wiederzugeben durch «courant inactif» bzw. «puissance inactive». Auf diese Weise sollte es möglich sein, die Drehung um 90 ° auch im Sprachgebrauch zum Ausdruck zu bringen.

ihm passen. Gewöhnlich geschieht dies am Ende von Hochspannungsübertragungsleitungen, an welchen Transformatoren für die Abtransformierung angeschlossen sind. Der Betrieb solcher Maschinen wird bestimmt durch die Spannung an ihren Klemmen. Wenn diese zunimmt, so wird die Erregung reduziert. Daraus folgt, dass die Maschine die Neigung haben wird, Blindstrom zu beziehen. Wenn dagegen die Spannung sinkt, wird die Erregung verstärkt, so dass die Maschine mehr Blindstrom abgibt. Im ersten Falle ist ihr Leistungsfaktor induktiv, im zweiten Fall kapazitiv.

Eine einfache Methode, den Leistungsfaktor zu charakterisieren, besteht darin, nach dem Dezimalbruch einen Buchstaben anzufügen, welcher die Betriebsart anzeigt: *G* für «Generator», *M* für «Motor», *C* für «Kapazitanz», *L* für «Induktanz» und zwei dieser Buchstaben für eine kombinierte Betriebsart, nämlich: *GC* für «Generator übererregt», *GL* für «Generator untererregt», *MC* für «Motor übererregt» und *ML* für «Motor untererregt».

Die Lösung, welche den Synchronkompensator verwendet, entlastet die Leitung aufwärts in Richtung zu den Generatoren, aber nicht abwärts in Richtung zu den Verbrauchern. Sie hat jedoch den Vorteil, ausschliesslich dem Betriebsinhaber zur Verfügung zu stehen.

Eine andere Lösung besteht darin, Kondensatoren als Batterien zu verwenden. Solche Batterien werden möglichst nahe beim Verbraucher aufgestellt. Ihre Abmessungen müssen so gewählt werden, dass sie den vom Verbraucher bezogenen Blindstrom kompensieren, ohne jemals selbst Blindstrom an das Netz zurückzuliefern. Deshalb müssen solche Batterien reguliert werden, wozu kräftige und schnell wirkende Schalter zu verwenden sind, welche von zuverlässigen Relais gesteuert werden, in Funktion entweder der Tageszeit, der Spannung oder des Blindstromes auf der Speiseleitung.

Je mehr solche Batterien unterteilt sind, desto mehr ist es möglich, sie näher bei den Verbrauchern anzuschliessen. Schliesslich kann jeder Induktionsmotor mit einem Kondensator derart versehen werden, dass der Kondensator den Leerlaufstrom des Motors kompensiert. Der Leistungsfaktor einer solchen Kombination wird im Leerlauf gleich 1,0 *M* sein und bei Vollast nahezu 0,95 *ML*. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es zweckmässig, die Hersteller von Werkzeugmaschinen auf diese Möglichkeit aufmerksam zu machen und sie zu veranlassen, entsprechend vorzugehen. Bei der Herstellung von Werkzeugmaschinen ist es mit wenig Kosten möglich, den Antriebsmotor mit dem entsprechenden Kondensator auszurüsten, welcher den Leerlaufstrom des Motors kompensiert. Bei diesem Vorgehen wird der Verbraucher der Sorge enthoben, seinen Leistungsfaktor ständig zu überwachen. Dabei wird ihm ein Leistungsfaktor garantiert von ungefähr 0,95 *ML*, unabhängig davon, welches seine momentane Belastung ist und welches die spätere Entwicklung seiner Unternehmung sein wird. Die gesamte Wirtschaft des Landes zieht daraus Nutzen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Kompensation des Leerlaufstromes im Betrage von 30 % des Nennwertes des Wirkstromes den Leistungsfaktor bei Vollast verbessert von 0,85 *ML* auf 0,95 *ML*, währenddem ein zweiter gleich grosser Betrag an Kompensation den Leistungsfaktor nur von 0,95 *ML* auf 1,0 *M* verbessern würde. Daraus ergibt sich, dass der erste Betrag an Kompensation fast die ganze Aufgabe erledigt und den Rückfluss von Blindstrom zur Speiseleitung verhindert. Es kommt hin und wieder vor, dass die Natur sich in solcher Weise freigebig erweist.

Eine andere Lösung besteht darin, die Transformatoren für Abtransformierung der Spannung mit Stufenschaltern auszurüsten, welche unter Last verstellbar sind.

Früher wehrten sich die Fabrikanten grundsätzlich dagegen, ihre Transformatoren mit Anzapfungen auszuführen. «Das Anbringen einer Anzapfung an einer Wicklung ist gleichbedeutend», sagten sie, «mit dem Einschlagen eines Nagels in eine tapezierte Wand». Aber die Bedürfnisse des Betriebes waren stärker. Heute haben die Farbikanten es gelernt, Transformatoren herzustellen mit Anzapfungen und Stufenschalter. Dank des unter Last veränderlichen Übersetzungsverhältnisses ist es möglich, dieses Verhältnis so zu regulieren, dass der Leistungsfaktor so gut als möglich verbessert wird. Diese Regulierung kann automatisch durchgeführt werden mit Hilfe eines Reglers für Blindleistung. Diese ist kapazitiv, wenn sie abgegeben wird und induktiv, wenn sie bezogen wird. Der Regler für Blindleistung stellt die Blindleistung ein in Funktion der Wirkleistung, welche durch den Transformator fliesst. Das Gesetz, welchem er untersteht, bestimmt eine erste Grundquote an Blindleistung, gleichgültig ob Wirkleistung transformiert wird oder nicht, und eine zweite Quote, proportional der Wirkleistung. Beide Quoten können beliebig eingestellt werden; so kann die Grundquote derart gewählt werden, dass die von der Kapazitanz der Hochspannungsleitung abgegebene Blindleistung zum Teil an das Netz mit einer weniger hohen Nennspannung abgegeben wird und so den Verbrauchern zufliesst. Die zweite Quote hingegen ist zu wählen mit Rücksicht darauf, dass der Leistungsfaktor bei Vollast durch den Verbraucher bestimmt wird, z. B. ungefähr 0,95 *ML*, bezogen auf den Verbraucher und etwas kleiner als 0,95 *GC*, bezogen auf die abgebende Seite des Transformators. Die zweite Quote wird somit etwa 25 % betragen, wenn die erste Quote 10 % ausmacht. Die Neigung von 25 % ist vorteilhaft, auch mit Rücksicht auf die Zahl der Stufenschalterverstellungen pro Tag. Diese Zahl sollte den Betrag von 35 nicht überschreiten, mit Rücksicht auf die Stufenschalterkontakte. Zu diesem Zweck wird jeder Steuerbefehl nur ausgeführt, wenn er nach einigen Sekunden Verzögerung noch besteht.

Die Regulierung der Blindleistung hängt davon ab, dass auf beiden Seiten des Transformators Generatoren vorhanden sind, welche die Spannung halten können. Für den Fall, dass sie auf der einen oder anderen Seite des Transformators ausfallen, wäre die Regulierung der Blindleistung nicht mehr möglich. In einem solchen Falle ist es notwendig, diese Regulierart zu verlassen und statt dessen die Spannung zu regulieren. Zu diesem Zwecke wird ein Relais «Delta» verwendet, welches auf die Änderung der Blindleistung anspricht beim Übergang des Stufenschalters von einer Stellung auf die benachbarte. Im normalen Betrieb ist diese Änderung gross, z. B. 3...5 % der Nennleistung des Transformators, während im anomalen Betrieb diese Änderung etwa 2 % beträgt. Für eine Änderung von 2,5 % und mehr wird das Relais «Delta» auf Regulierung der Blindleistung einstellen und bei einer Änderung von weniger als 2,5 % auf die Regulierung der Spannung. Eine kleine indifferente Zone von 1...2 ‰ über und unter den 2,5 % ist notwendig, um es dem Relais «Delta» zu ermöglichen, seine Wahl zu treffen.

Die angegebenen Zahlen bezwecken nur, das Verfahren zu schildern. Sie können in gewissen Grenzen abgeändert werden, je nach den Bedürfnissen des im Betriebe auftretenden besonderen Falles.

Dank der Blindleistungsregulierung kann nicht nur ein Teil der von der Kapazität der Leitung abgegebenen Blindleistung in Richtung der Verbraucher abgegeben werden, sondern es kann auch die Wirkleistung begleitet werden von einer vollkommen angepassten Quote von Blindleistung. Unter der Annahme, dass die Verluste, welche bei Anwendung der Regulierung der Blindleistung tatsächlich auftreten, gleich 1 seien, können die Verluste ohne Regulierung den Wert von 1,4 erreichen, immer dann, wenn die Energielieferung an einen Verbraucher nicht so erfolgt, dass auf der gleichen Leitung die vom Verbraucher benötigte Wirk- und Blindleistung übertragen wird.

Die Spannungsregulierung kann ebenfalls der Verbesserung des Leistungsfaktors dienstbar gemacht werden. Zu diesem Zwecke wird die Regulierung der Spannung abhängig gemacht von der Blindleistung in der Weise, dass der Sollwert der Spannung abnimmt, wenn die abgegebene Blindleistung zunimmt. So wird erreicht, dass der Bezug von Blindleistung abnimmt. Das Mittel dazu besteht darin, einen Ohmschen Widerstand in den «Spannungskreis» des Reglers einzuschalten und von einem Strom durchfliessen zu lassen, dessen Phase einen rechten Winkel bildet mit der «Spannung». Die kapazitive Komponente dieses Stromes ruft eine Erhöhung der Spannung an den Klemmen des Reglers hervor, so dass die regulierte Spannung um den gleichen Betrag niedriger ausfällt.

Natürlich kann die Spannungsregulierung nach dieser Methode unabhängig von der Blindleistungsregulierung angewendet werden. Beide Reguliermethoden liefern daher einen Beitrag zur Verbesserung des Leistungsfaktors.

Adresse des Autors:
Ch. Jean-Richard, dipl. Ingenieur ETH, Quartierweg 19, Muri bei Bern.