

Symposium über Optimale Erzeugung und Kompensation von Blindleistungen

Autor(en): **Zaengl, W. / Gertsch, G.A. / Cuénod, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **67 (1976)**

Heft 22

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915240>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Symposium über Optimale Erzeugung und Kompensation von Blindleistungen

061.3 : 621.3.016.25

Am 21. September 1976 führten der SEV und der VSE in Lausanne ein gemeinsames Symposium über Blindleistungsprobleme durch, das von rund 200 Teilnehmern aus 8 Staaten besucht wurde. Die in einem Symposiumsband zusammengefassten Beiträge waren den Teilnehmern Ende August zugestellt worden. An der Tagung selbst konnten sich die Berichtler deshalb auf einen kurzen Überblick über die Beiträge ihrer Themengruppe beschränken. Im folgenden berichten die Diskussionsleiter der drei Themengruppen über den Ablauf des Symposiums und fassen die wichtigsten der zahlreichen Diskussionsbeiträge zusammen.

1. Grundprobleme und Technologie

Zu dieser Themengruppe lagen 6 Beiträge mit den folgenden Titeln vor:

1. J.-J. Morf: Problèmes fondamentaux de la production et de la compensation des puissances réactives
2. E. Hamburger: Evolution de la notion de puissance réactive en régime périodique non sinusoïdal monophasé
3. C. Stadelmann: Compensateurs synchrones de grandes puissances
4. A. Bercu; B. Bolliger: Neue Konstruktionen von Kondensatoren für die Blindleistungskompensation
5. R. Rippstein: Kreisschaltung zur automatischen Steuerung von Kondensatorbatterien
6. G. Sharma: Mittel- und Hochspannungs-Leistungskondensatoren

1.1 Zur Definition der Blindleistung

Bekanntlich kann die eindeutige Definition der Blindleistung bei rein sinusförmigen Strömen und Spannungen im Ein- oder Dreiphasensystem nicht ohne weiteres auf nicht-sinusförmige Grössen übertragen werden. Während im ersten Beitrag diese Schwierigkeit durch die Vereinbarung umgangen wird, im Rahmen des Symposiums als Blindleistung nur diejenige der Grund-Harmonischen der drei Sternspannungen und der Grund-Harmonischen der drei Leiter-

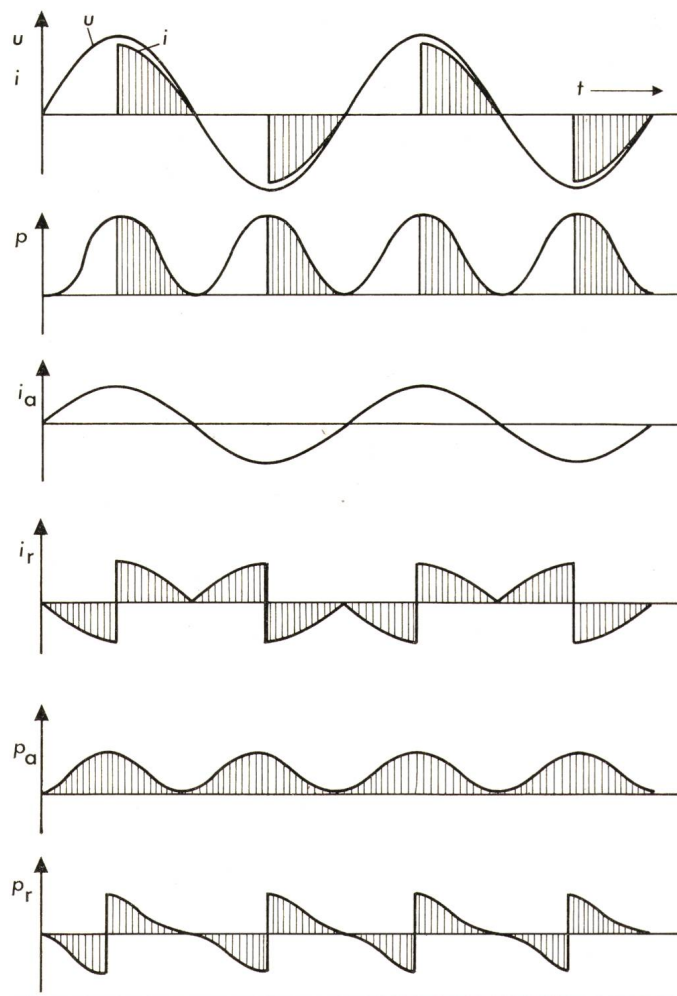


Fig. 1 Verlauf von Spannung, Strömen und Leistungen bei phasenangeschnittenem Strom

ströme aufzufassen, werden im zweiten Beitrag die Probleme der Blindleistung bei nicht-sinusförmigen Grössen eingehender analysiert. Diskutiert wird hierbei insbesondere die Frage, ob es nicht sinnvoller sei, die durch die Pendelleistungen der Summen- und Differenzfrequenzen bedingte «Verzerrungsleistung» mit in die Gesamt-Blindleistung einzubeziehen. Die Blindleistung Q wäre dann aus der Scheinleistung S und der Wirkleistung P gemäss der Beziehung $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ zu berechnen.

Um die in der Diskussion von der Verfasserin des zweiten Beitrages gemachten Ergänzungen auszugsweise darstellen zu können, seien die Verhältnisse bei nicht-sinusförmigen Grössen kurz erläutert.

Durch Fourier-Zerlegung werden die zeitabhängigen Werte von Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$:

$$u = U_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_1) + \dots + U_j \sqrt{2} \cos(j\omega t + \alpha_j) + \dots + U_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k) + \dots$$

$$i = I_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta_1) + \dots + I_j \sqrt{2} \cos(j\omega t + \beta_j) + \dots + I_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \beta_k) + \dots$$

Mit der Phasenverschiebung $\varphi = (\alpha - \beta)$ wird somit der zeitliche Verlauf der Leistung $p(t)$:

$$p = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \{ \cos \varphi_i [1 + \cos(2i\omega t + 2\alpha_i)] + \sin \varphi_i \cdot \sin(2i\omega t + 2\alpha_i) \}$$

$$+ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1, k \neq j}^{\infty} U_j I_k \{ \cos [(j-k)\omega t + \alpha_j - \beta_k] + \cos [(j+k)\omega t + \alpha_j + \beta_k] \}$$

Das erste Glied dieses Ausdrucks stellt den zeitlichen Verlauf der Wirkleistung dar, deren Momentanwerte stets ≥ 0 sind, und deren Mittelwert P definitionsgemäss

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cdot \cos \varphi_i$$

ist. Das zweite Glied ergibt eine pulsierende Scheinleistung, deren Mittelwert Null und deren Effektivwert Q in Anlehnung an rein sinusförmige Grössen aus

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} U_i I_i \cdot \sin \varphi_i$$

berechnet werden kann.

Die restlichen Glieder stellen Pendelleistungen dar, deren Effektivwert D auch aus der Beziehung

$$S^2 = \sum_{i=1}^{\infty} U_i^2 \sum_{i=1}^{\infty} I_i^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

ermittelt werden kann.

Man kann nun aber auch so vorgehen, dass, ähnlich wie im Fall rein sinusförmiger Spannungen und Ströme, der Strom in eine Wirkstromkomponente i_a und eine Blindstromkomponente i_r zerlegt wird. Der zeitliche Verlauf der Wirkleistung $p_a = u \cdot i_a$ wird dann stets ≥ 0 und pulsiert um seinen Mittelwert, während der Blindanteil $p_r = u \cdot i_r$ um den Mittelwert Null pulsiert. Aus mehreren gezeigten Beispielen sei der bekannte Fall eines phasenangeschnittenen Stromes bei rein sinusförmiger Spannung in Fig. 1 gezeigt, der keiner eingehenden Erläuterung bedarf. Dass der zeitliche Verlauf der Momentanleistung p nicht mit dem in dieser Art und Weise ermittelten Wirkleistungsverlauf p_a übereinstimmt, darf nicht verwundern, da

dieser Effekt ja auch bereits bei phasenverschobenen, rein sinusförmigen Grössen auftritt. Auch der Verfasser des ersten Beitrages macht am Beispiel eines gleichgerichteten Wechselstromes auf diese Erscheinungen aufmerksam.

1.2 Methoden der Blindleistungserzeugung und -kompensation

Der erste Beitrag vermittelt eine umfassende Übersicht über die Blindleistungsverbraucher und -erzeuger im Netzverband, über die Auswirkungen des Blindleistungsbedarfes auf den Netzbetrieb sowie über die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Kompensation der Blindleistung. Darüber hinaus werden die Vor- und Nachteile der Kompensationsmethoden gegenübergestellt, und es wird auf die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Gestehungskosten für die Blindleistung bzw. Blindenergie eingegangen. Übergeordnete Gesichtspunkte zur Optimierung des Blindleistungshaushaltes im Netzverband beschliessen diesen Beitrag.

Das in der Diskussion aufgeworfene Problem der Deckung des Blindleistungsbedarfes des Netzes durch Kraftwerks-Generatoren wird dahingehend ergänzt, dass die Blindleistungsproduktion (Abgabe oder Aufnahme) nicht nur von der Auslegung des Generators bzw. der Generatortype (Schenkel- oder Vollpolmaschine) abhängt, sondern auch sehr wesentlich von der Netz-Response beeinflusst wird (K. Reichert, BBC). Der durch Über- oder Untererregung der Generatoren erzielbare Regelbereich hängt stark vom Spannungsniveau und dem Innenwiderstand des Netzes ab, so dass sich die Blindleistungsproduktion je nach Netzzustand ändern kann. Eine Ausdehnung des Regelbereiches wäre zwar grundsätzlich durch den Einsatz von Stufentransformatoren erzielbar; die geringere Zuverlässigkeit dieser Transformatoren lässt aber diese Lösung als nicht wünschenswert erscheinen. Es können auch Instabilitäten bei Netzstörungen auftreten, wenn der Generator bei einer Spannungserhöhung zu stark in den untererregten Betrieb getrieben wird. Grundsätzlich ist daher eine Entkopplung der Wirkleistungs-Frequenz von der Blindleistungs-Spannungs-Regelung anzustreben; d. h. es wäre besser, die Kraftwerks-Generatoren von der Blindleistungsproduktion zu entlasten und diese durch andere Kompensationsmittel (Transformatoren, Kondensatoren usw.) vorzunehmen.

1.3 Synchron-Kompensatoren

Der dritte Beitrag behandelt zunächst allgemeine Dimensionierungsprobleme, die bei der Herstellung von Synchron-Kompensatoren grosser Leistungen (bis zu mehreren 100 Mvar) auftreten. Während luftgekühlte Einheiten schon ab Maschinenleistungen von mehreren 10 Mvar wegen der zu hohen Verluste unwirtschaftlich werden, sind H₂O/ölgelkühlte Kompensatoren ab Einheitsleistungen von ca. 200 Mvar einer Wasserstoffkühlung vorzuziehen. Eingehend werden auch die verschiedenen Möglichkeiten zum Anlassen der Kompensatoren diskutiert, wobei der statische Frequenzwandler eine zwar teure Anlassmethode darstellt, die aber beim gleichzeitigen Betrieb mehrerer Kompensatoren schnell wirtschaftlich wird. Am Beispiel eines im Jahre 1976 in Betrieb genommenen 160-Mvar-Kompensators werden schliesslich detaillierte Angaben über eine mit Wasserstoff gekühlte Maschine gemacht.

Die in der Diskussion aufgeworfenen Fragen, ob die Übertragung der Zündimpulse für den Fall, dass rotierende Thyristoren zur Erregung der Kompensatoren verwendet werden, schon technisch einwandfrei gelöst sei, wird vom Verfasser des Beitrages dahingehend beantwortet, dass verschiedene technische Möglichkeiten (z. B. induktive oder kapazitive Übertragung der Impulse) in Erprobung seien. Einzelheiten dieser technischen Lösungen konnten wegen der Aktualität dieser Entwicklungen jedoch nicht angegeben werden.

Das relativ hohe spezifische Gewicht des Kompensators wird durch die Forderungen der Kunden bezüglich der Stabilität verursacht, die wiederum vom Schwungmoment abhängt. Beim Vergleich von Maschinen gleicher Leistung muss man daher auch alle sonstigen Maschinendaten berücksichtigen, da diese das Gewicht beeinflussen.

1.4 Parallel-Kondensatorbatterien

Über die Verbesserungen und Fortschritte, die sowohl bei der Konstruktion von Blindlastkondensatoren als auch bei den Schaltanordnungen von Kondensatorbatterien gemacht wurden, berichten die drei letzten Beiträge. So konnte in den vergangenen 20 Jahren durch eine ständige Verbesserung der verwendeten Isolierstoffe das

spezifische Kondensatorvolumen etwa um das Fünffache verkleinert werden. Damit werden bei Betriebsspannungen unter 15 kV Kondensator-Einheiten von 200 kvar möglich. Diese Fortschritte resultieren im wesentlichen aus einer Verbesserung der Papierqualität, dem Einsatz der Mineralöle durch oftmals stabilisierte Chlordiphenyle, sowie der Einführung der Mischdielektrika unter Verwendung von Polypropylenfolien, insbesondere bei Hochspannungskondensatoren. In zwei Beiträgen wird auch auf den Einsatz von Kondensatorbatterien in stark oberwellenhaltigen Netzen – insbesondere in Niederspannungsnetzen – eingegangen. Obwohl die heute sehr verlustarmen Kondensatoren zusätzlichen Beanspruchungen durch Oberwellenströme standhalten, lassen sich gelegentlich Beschaltungen mit Drosselspulen zur Abblockung der Oberwellen nicht vermeiden. Wesentlich vorteilhafter ist aber eine Erweiterung der Kondensatorbatterien zu Saugkreisen, die die Netzverunreinigungen durch Oberwellen stark reduziert. – Im fünften Beitrag wird eine neuartige Schaltung zur automatischen Anpassung der Blindleistung einer Kondensator-Batterie an die Belastungsverhältnisse vorgestellt. Die Zu- und Abschaltung der gleich grossen Regulierstufen wird durch eine relativ einfache Schaltung so gesteuert, dass jede Kondensatorstufe gleich häufig geschaltet wird. Dadurch lassen sich sowohl die Schaltelemente als auch die Kondensatoren im Mittel gleichmässig beanspruchen, was eine bedeutende Steigerung der Lebensdauer erwarten lässt. Für Saugkreisanlagen ist diese Methode jedoch nicht ohne weiteres anwendbar.

In der Diskussion wird auch auf die vorzügliche Eignung von Metallpapier-Kondensatoren hingewiesen, deren Verluste durch die serienmässige Verwendung von Kunststoffolien als Dielektrikum auf 1,5 W/kvar herabgesetzt werden konnten. Wegen der Selbstheilung bei Durchschlägen benötigen derartige Kondensatoren keine Wicksicherungen und verursachen auch keine Umweltprobleme, da nur hochgereinigte Mineralöle als Imprägniermittel verwendet werden (Da Silva, Fabrimex AG). – W. Rozner (BICC) bestätigt die sehr guten Betriebserfahrungen mit imprägnierten Mischdielektrikums-Kondensatoren, deren Ausfallquote von 0,1 %/Jahr bei Ölpapierkondensatoren auf kleiner als 0,03 %/Jahr gesunken sei. – Die in den Beiträgen erscheinenden, sich widersprechenden Aussagen bezüglich der Zuverlässigkeit und Sicherheit dieser Kondensatoren bei kurzzeitigen Überspannungen werden vom Verfasser des letzten Beitrages darauf zurückgeführt, dass der Herstellungsprozess und insbesondere die Nachbehandlung der Kondensatoren einen stärkeren Einfluss auf die Lebensdauer ausüben. Strenge Langzeitprüfungen, auch unter Überspannungsbeanspruchungen, hätten keine Verschlechterung des Dielektrikums aufzeigen können.

Die im Rahmen der Diskussionen mehrfach angeschnittene Frage der Umweltschädlichkeit der Chlordiphenyle wurde sowohl unter dem Aspekt bereits bestehender gesetzlicher Vorschriften als auch hinsichtlich möglicher wirtschaftlicher Konsequenzen beleuchtet (P.L. Boyer, Condensateurs Fribourg). So könnte das bereits bestehende Verbot für die Anwendung dieser Stoffe in Japan auch auf andere Länder, insbesondere die USA, übergreifen, was auch für die europäischen Hersteller von Kondensatoren oder Transformatoren von grossem Nachteil wäre. Es bleibt zu hoffen, dass die intensive Suche nach gleichwertigen, aber umweltfreundlichen Ersatzstoffen bald erfolgreich sein wird.

Prof. Dr. W. Zaengl, ETHZ

2. Condensateurs série

Les trois rapports suivants ont été présentés:

- E. Pucher: Der Reihen Kondensator in Mittel- und Niederspannungsnetzen
- K. Frigg: Reihen Kondensatoren im Fahrleitungsnetz der Rätischen Bahn
- M. Aguet; J.F. Lutz: Protection de condensateurs série

La discussion a bien fait ressortir les particularités relatives à l'utilisation optimale des condensateurs série dans les réseaux. Elle a confirmé que ce type d'installation est spécialement bien adapté à la réduction des variations brusques et rapides de la tension à l'extrémité d'une ligne en antenne, du fait que le condensateur série modifie les caractéristiques du réseau tandis que le condensateur shunt modifie celles de la charge de ce réseau. La fig. 8 du rapport introductif du prof. J.J. Morf met également cette propriété en évidence en montrant de quelle manière l'adjonction de condensateurs série permet de faire varier la réactance de la ligne et ainsi de réduire les

chutes de tension en ligne (sous-compensation), voire même de les supprimer (surcompensation).

La question de la rentabilité de telles installations a été longuement discutée. Il n'a toutefois pas été possible de formuler des règles précises permettant une évaluation simple des différentes méthodes de compensation de la puissance réactive. *M. Crastan* (Technicum de Bienne) a donné plusieurs exemples comparant les coûts respectifs de batteries de condensateurs série et shunt ayant pour but de réduire les chutes de tension ou les pertes en ligne d'un réseau moyenne tension. Cette étude théorique montre que le choix de la solution la mieux appropriée ne dépend pas seulement du but poursuivi, mais également de divers paramètres tels que: caractéristiques de la ligne et de la charge, réseau plus ou moins fortement maillé ou ligne en antenne, etc. Dans tous les cas, l'installation de condensateurs série ne réduit que faiblement les pertes par effet Joule dans les lignes.

Ces indications ont été complétées par *M. Pucher* qui est arrivé à des conclusions analogues. En résumé, le fait qu'il n'y ait en Suisse que très peu d'installations de condensateurs série à 50 Hz n'est pas dû au hasard, mais est parfaitement fondé. En effet, ces installations, qui permettent de diminuer les chutes de tension en ligne, sont particulièrement bien adaptées au cas d'une charge fortement variable dans le temps, ce qui est l'une des caractéristiques typiques des lignes de chemin de fer telles que celles décrites dans le rapport Frigg, alors que des réseaux à 50 Hz fortement dimensionnés et à lignes relativement courtes posent moins de problèmes de tenue de tension. Pour diminuer les pertes, ce qui est déterminant pour les réseaux suisses à 50 Hz, il est clair que la compensation shunt est dominante.

L'utilisation de condensateurs série dans les réseaux maillés, qui serait intéressante, par exemple pour l'alimentation de fours à arc, se heurte à diverses difficultés, d'une part techniques (répartition de la charge des lignes, protection du réseau, etc.) et économiques d'autre part, du fait qu'il est nécessaire d'installer une batterie dans chaque ligne d'alimentation.

En ce qui concerne les différents éléments (condensateurs, disjoncteurs, dispositifs de protection des condensateurs contre les surtensions, etc.) composant une batterie de condensateurs série, il est à noter une différence fondamentale par rapport aux condensateurs shunt. En effet, tandis que pour ces derniers, en particulier pour les basses tensions, on trouve sur le marché des installations complètes et ne nécessitant aucune étude ou installation particulières de la part de l'utilisateur, les choses sont beaucoup plus compliquées pour les installations série, pour lesquelles il n'existe pratiquement pas de fournisseur offrant une batterie avec tous ses accessoires. Il faut également souligner que cette situation est due au fait que les installations shunt peuvent avoir des caractéristiques normalisées, contrairement à la batterie série qui doit être adaptée aux conditions particulières de chaque ligne et réseau dans laquelle elle sera mise en service.

Quelques batteries de condensateurs série installées à l'étranger ont été décrites par *M. Pucher* qui en a montré les avantages par rapport à d'autres solutions envisagées. Il a été insisté sur le fait que le choix des disjoncteurs destinés à shunter la batterie de condensateurs doit être fait très attentivement, ces disjoncteurs ayant à répondre à des caractéristiques inhérentes à leur utilisation qui est pratiquement inverse de celle habituelle. Les unités de condensateurs doivent également être choisies en fonction des caractéristiques du dispositif de protection contre les surtensions, d'où l'importance de pouvoir disposer d'un dispositif sûr, précis, stable et ayant une faible dispersion. La solution proposée par Aguet et Lutz semble prometteuse à cet égard, l'expérience de service ayant en effet confirmé qu'un éclateur non commandé pour des tensions de fonctionnement de l'ordre de quelques kV présente une grande dispersion, ce qui nécessite un surdimensionnement important des condensateurs. Il serait souhaitable que l'étude de cet éclateur à commande par thyristors puisse être poursuivie en laboratoire et si possible dans un réseau.

G. A. Gertsch, Zurich

3. Applications pratiques

- *K. Reichert*: Statische Blindleistungskompensation in Übertragungssystemen
- *F. Ariatti; D. Venturini*: Variation du module de tension d'un nœud
- *A. Calvaer*: Schémas équivalents et matrices de sensibilité relatives à la diffusion des variations de puissance réactive et aux variations de tensions associées
- *P. D. Panchaud*: Compensation de puissance réactive dans un réseau de distribution
- *M. Leibundgut*: Influence de la production et de la compensation de l'énergie réactive sur l'exploitation optimale d'un réseau de transport interconnecté
- *F. Schwab*: Blindleistungshaushalt im europäischen und schweizerischen Verbundnetz

Il est possible d'établir un parallèle entre, d'une part le réglage de la production des puissances actives et de la fréquence d'un réseau électrique, d'autre part le réglage de la production de ses puissances réactives et de sa tension. Toutefois ces deux types de réglage présentent les différences fondamentales suivantes:

Alors que la production d'énergie active fait pratiquement toujours appel à une turbine et à un générateur et que son coût de production peut être déterminé de façon assez précise, la production d'énergie réactive peut être assurée par des moyens divers et son coût de production, heureusement plus faible, est plus difficile à préciser et peut même devenir négatif à certains moments. D'autre part, alors que la fréquence est une grandeur univoque, commune à tout le réseau interconnecté, il n'en est pas de même de la tension, différente en toute rigueur en tous points du réseau. C'est pourquoi le problème de l'optimisation du mode de production de l'énergie réactive et de la localisation de cette production est un problème beaucoup plus complexe et difficile à cerner que celui de l'optimisation de la répartition de la production d'énergie active.

L'importance de ce problème est toujours mieux reconnue et ses différentes facettes furent éclairées par le rapport introductif du prof. *J. J. Morf* puis par six rapports qui furent présentés dans la 3^e partie de la journée et par la discussion qui les suivit:

Le rapport de *K. Reichert* présente les perspectives ouvertes par l'utilisation de compensateurs statiques de puissance réactive à action ultra-rapide pour l'élimination des variations de tension résultant des différentes perturbations susceptibles d'affecter un réseau, et pour l'amélioration de la stabilité d'une transmission électrique à grande distance. Il compare à cet égard les performances de l'utilisation d'inductances placées en parallèle, ajustables par thyristors, avec des condensateurs-série et montre les avantages et inconvénients de chacune de ces solutions.

Les contributions de *MM. Ariatti* et *Venturini* de la société ENEL à Rome et du prof. *Calvaer* de l'Université de Liège décrivent deux modèles de réseau permettant de déterminer les relations qui existent entre les variations de production de puissance réactive aux différents nœuds d'un réseau et les variations des valeurs des tensions dans ces différents nœuds. Ces programmes constituent des outils très utiles à disposition des exploitants pour évaluer les répercussions sur la tenue de la tension d'une variation de la structure du réseau (coupure d'une ligne, déclenchement d'une centrale) ou d'un déficit de production d'énergie réactive.

Les contributions de *MM. P. D. Panchaud, M. Leibundgut* et *F. Schwab*, présentent le résultat d'études de l'influence de la production d'énergie réactive sur l'exploitation d'un réseau de distribution, d'un réseau d'interconnexion à haute tension et, enfin dans le cadre de l'interconnexion internationale du réseau suisse.

La fig. 3 du rapport Panchaud indique les conclusions de l'une de ces études et met en évidence les économies annuelles réalisées par l'installation de condensateurs dans un réseau moyenne tension pour différents états de charge de ce réseau. Elle montre que l'optimum de compensation se situe pour une production d'énergie réactive égale à 7 à 8 % de la puissance installée du parc des transformateurs MT/BT du réseau en question.

La fig. 15 du rapport Schwab rend compte du résultat d'un essai mettant en évidence la relation entre la variation de la puissance réactive exportée de Suisse et celle de la tension en différents nœuds du réseau haute tension de Suisse. Il est à relever que les entreprises d'électricité font preuve d'une certaine réticence à l'égard d'une exploitation de leurs générateurs en régime sous-excité.

Tableau I

	Mvar	%
Générateurs ($\cos \varphi_{\text{moyen}} = 0,9$) 13 500 · 0,435	+ 5900	67
Lignes haute tension (60...380 kV)	+ 1500	17
Compensateurs et condensateurs	+ 1430	16
Production totale	+ 8830	100
Consommateurs basse tension (10765 MW, $\cos \varphi_{\text{moyen}} = 0,91$)	- 4350	49
Lignes haute tension	- 1900	21
Transformateurs de réseaux (380/220, 220/150, 150/60 kV)	- 1365	16
Transformateurs de centrales	- 1215	14
Consommation totale	- 8830	100

M. E. Wanner, BBC, montra, en complément de l'exposé Reichert, l'intérêt de compensations ultra rapides commandées par des thyristors pour éliminer l'influence défavorable de consommateurs à charge très variable, tels les fours à arc, sur la tenue de la tension du réseau qui les alimente, en particulier dans le cas de réseaux de faible puissance.

M. V. Crastan du Technicum de Bienne indiqua comment déterminer les matrices de sensibilité des réseaux aux variations de production ou de consommation d'énergie réactive, et comment optimiser la répartition de cette production en utilisant la méthode du coefficient de Lagrange.

M. Vesligaj, SGI Lausanne, indiqua le bilan des productions et de la répartition des productions et consommation d'énergie réactive en Suisse, établie un mercredi à 11 h du mois de novembre 1975 (Tableau I).

Ce tableau met en évidence, qu'en période de pleine charge, la consommation propre des réseaux électriques (lignes et centrales) constitue près de la moitié du besoin du réseau suisse en énergie réactive. M. Vesligaj relève que l'optimisation des productions d'énergie réactive doit se faire à l'échelle du pays, compte tenu en particulier du développement des centrales nucléaires.

Ces exposés et contributions, et la discussion qui suivit, ont permis de dégager quelques tendances concernant la recherche d'une optimisation de la production d'énergie réactive dans les réseaux électriques, recherche qui implique au préalable de préciser les définitions suivantes:

3.1 Définition des critères d'optimisation

Ces critères sont différents selon le type des réseaux et sont en partie contradictoires:

- pour les réseaux haute tension c'est le problème de la tenue des niveaux de tension qui prime, en particulier pendant les heures de faible charge par suite de la charge capacitive que constituent les lignes haute tension;

- pour les réseaux moyenne tension c'est le problème de la réduction des pertes de transmission qui paraît le plus important;

- pour des réseaux étendus et faiblement maillés, c'est le problème de la stabilité de la transmission qui est primordial.

La condition d'une tension égale dans tous les nœuds implique des échanges d'énergie réactive dans le sens inverse à celui des échanges d'énergie active, cette condition est contraire à celle d'une minimisation des pertes de transmission.

3.2 Définition des moyens de production d'énergie réactive

Ces moyens sont variés et doivent être adaptés à chaque cas particulier en fonction des critères retenus, des niveaux de tension et de la nature des réseaux:

- les condensateurs-séries ou les compensateurs statiques à réglage rapide s'imposent pour améliorer la stabilité des transmissions à longue distance;

- la compensation à l'aide de batteries de condensateurs en parallèle est indiquée dans les réseaux de distribution à moyenne et basse tension;

- l'utilisation de générateurs désaffectés, comme compensateurs ou des générateurs de centrales nucléaires ou de centrales de pompage est dans certains cas une solution avantageuse: en les sous-excitant, puis les sur-excitant, on peut passer, de façon continue, d'une absorption à une production d'énergie réactive, selon les besoins du réseau. Toutefois les pertes relativement importantes de ces machines dépassent en général la réduction des pertes de transport que permet leur utilisation.

3.3 Définition des méthodes d'analyse

La disposition d'ordinateurs permet le développement de modèles mathématiques des réseaux donnant la possibilité de déterminer la relation entre les production et consommation d'énergie réactive et les niveaux de tension dans les différents nœuds du réseau. L'utilisation de ces modèles implique la connaissance de la valeur numérique des paramètres caractéristiques du réseau et des puissances produites, consommées ou transmises; ces paramètres peuvent être mesurés, ce qui implique l'installation d'un système très complet de télémesure; ils peuvent être également déterminés par des estimateurs d'état du réseau ce qui est en général moins coûteux mais implique un investissement intellectuel qu'il ne faut pas sous-estimer.

Un des paramètres caractéristique des réseaux qui présente un intérêt particulier est le coefficient de sensibilité α exprimant la dépendance entre les variations de puissance réactive Q et de tension V du réseau.

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha$$

Q_0 et V_0 valeurs de référence.

Les valeurs numériques qui ont été mentionnées sont comprises entre 0 et 5. Il serait intéressant de faire une enquête pour comparer les valeurs obtenues expérimentalement dans différents réseaux.

Les modèles de réseau permettant de calculer les relations entre les tensions et les productions d'énergie réactive servent de base à des programmes de calcul plus complets, basés par exemple sur l'utilisation du théorème de Kuhn & Tucker, permettant d'optimiser la répartition des productions d'énergie active et réactive, tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes dues en particulier aux limites des capacités de production ou de transport ou des niveaux de tension. L'intérêt du développement d'un «Programme pour la Répartition Optimale des énergies actives et réactives» (PRORA) pour l'ensemble du réseau suisse a déjà été relevé dans les colonnes de ce bulletin¹⁾.

Cette recherche d'optimisation implique comme donnée de base, une connaissance précise des coûts des installations et des productions d'énergie réactive ainsi que de la valeur attribuée à une meilleure tenue de la tension; certains des chiffres donnés à ce sujet se répartissent sur une grande plage et mériteraient d'être encore précisés.

3.4 Localisation optimale des moyens de production d'énergie réactive

Il est rationnel d'éviter de transporter de l'énergie réactive ce qui implique de la compenser là où elle est consommée. Jusqu'à quel niveau faut-il effectuer cette compensation? Est-il souhaitable d'imposer par des mesures tarifaires à chaque client de produire sa propre énergie réactive?

En fait, cette dispersion des moyens de production est coûteuse. L'expérience prouve, de plus, que ces moyens sont souvent mal utilisés; en période de faible charge ils restent souvent enclenchés et sont une cause de pertes. En période de faible charge du réseau et pour un réseau urbain avec une forte proportion de transmissions par câbles, une charge inductive est au contraire favorable pour la marche du réseau, il n'est donc pas opportun d'inciter les consommateurs à la compenser.

Face à cet état de fait, ne pourrait-on pas envisager:

- un système central de réglage de production d'énergie réactive depuis le centre de dispatching du réseau,

¹⁾ M. Cuénod: Quelques aspects de la répartition des productions d'énergie réactive et active. Bull. ASE/UCS 66 (1975) 20, p. 1130 à 1135.

– un pilotage à distance des installations de production d'énergie réactive des clients de façon à améliorer le facteur de charge du réseau en fonction des différents niveaux de cette charge,

– une tolérance plus grande concernant la consommation d'énergie réactive chez les clients en prévoyant des installations de production d'énergie intégrées au réseau et ajustables automatiquement,

– une valorisation de la production d'énergie réactive en introduisant une définition et une mesure de «l'énergie de participation au maintien de la tension», en fonction du niveau de tension au moment considéré, de façon à concilier l'intérêt général de l'exploitant du réseau et l'intérêt particulier du producteur d'énergie réactive?

Conclusion

Le Symposium a mis en évidence que le problème de l'optimisation de la production d'énergie réactive dans les réseaux électriques n'a pas une solution unique mais des solutions multiples faisant intervenir de nombreuses considérations d'ordre à la fois technique et économique.

Les exposés et la discussion qui les complétèrent montrèrent comment le problème se pose en pratique, soulevèrent un certain nombre de questions et dégagèrent quelques lignes de recherche qui ouvrent un large domaine de fructueuse collaboration entre les exploitants des réseaux électriques et les instituts de recherche universitaires.

M. Cuénod, Genève

Bericht über die 13. Internationale Blitzschutzkonferenz

061.3 : 621.316.98

Wie die vorangehenden Konferenzen befasste sich auch die 13. Konferenz (21. bis 25. Juni 1976 in Venedig) einerseits mit den Resultaten der Blitzforschung und andererseits mit dem Blitzschutz von Bauten und Einrichtungen der verschiedensten Art, insbesondere auch jener Objekte, deren Blitzsicherheit von grosser Bedeutung ist. Überspannungs-Probleme kommen nicht zur Diskussion, da sie von der CIGRE und von der CEI behandelt werden. Der Stoff der Konferenz wurde nach dem üblichen Schema in 5 Gruppen unterteilt, nämlich:

1. Gruppe: Gewitter- und Blitzforschung
2. Gruppe: Theoretische Blitzschutzprobleme
3. Gruppe: Praktische Blitzschutzprobleme
4. Gruppe: Richtlinien und Normen für den Blitzschutz
5. Gruppe: Spezielle Blitzschutzprobleme

Für jede dieser 5 Gruppen stand je ein halber Tag zur Diskussion der Berichte zur Verfügung. Da die Anzahl Berichte pro Gruppe recht verschieden war, konnte diese Einteilung aber nicht streng durchgeführt werden. So finden sich einzelne Berichte leider nicht in der ihnen inhaltlich zukommenden Gruppe, was sowohl die Übersicht als auch die Diskussion erschwerte.

Gruppe 1: Gewitter- und Blitzforschung

Resultate der Blitzforschung wurden aus den neuern Forschungsstationen in Italien (Foligno und Monte Orsa), Frankreich (St-Privat d'Allier) und der USSR (Fernsehturm Ostankino in Moskau) mitgeteilt. Die italienischen Resultate sind mit denjenigen am Monte San Salvatore direkt vergleichbar. In Frankreich werden in Anlehnung an frühere amerikanische Versuche Blitze mittels Hagelraketen künstlich ausgelöst, die bis ca. 800 m steigen. In Moskau werden seit Jahren Blitzschläge in den 540 m hohen Fernsehturm und in dessen Umgebung fotografiert und die Blitzströme im oberen Teil des Turmes oszillographiert. An beiden Forschungsstellen wurde nun festgestellt, dass nach dem ersten Teilblitz, der als Aufwärtsblitz auftritt, oft Folgeblitze als Abwärtsblitze auftreten, die aber nicht in der Bahn des ersten Teilblitzes zur Rakete bzw. zum Turm hin verlaufen, sondern in deren Umgebung, oft in etwa 500 m Entfernung vom Turm oder bis 145 m von der Raketen-Abschussstelle. Die russischen Angaben betreffen genau genommen die Entfernung des Austrittspunktes des Blitzes aus der Wolkendecke von der Turmachse, wobei die Blitzbahn praktisch vertikal verlaufen soll. Daraus wird geschlossen, dass die Blitzeinschlagsdichte (Blitze pro km² und Jahr) neben dem Turm grösser ist als in seiner weitem Umgebung, dass also eine Art negativer Schutzwirkung resultiert. Jedenfalls bestätigen diese Beobachtungen die Fragwürdigkeit der alten Schutzraumtheorien, wenigstens für sehr hohe Blitzableiter.

Die mit Raketen künstlich ausgelösten Folgeblitze scheinen einen ähnlichen zeitlichen Stromverlauf aufzuweisen wie die natürlichen Folgeblitze, nämlich Frontdauern von etwa 1 μ s, und Scheitelwerte von höchstens 19 kA, bei einem 50-%-Wert von 11,5 kA. Auch bei den russischen Messungen liegen die grössten Stromwerte unterhalb 25 kA, mit nur 7 kA als 50-%-Wert für alle Aufwärtsblitze.

Eine interessante Diskussion ergab sich beim Begriff des «Wellenwiderstandes» des Blitzkanals im Zusammenhang mit der von C.F. Wagner gefundenen Beziehung zwischen Blitzstromstärke und Vorwachs-geschwindigkeit des Return Strokes.

Aus dem Kaukasus wurden Feldmessungen zur Zählung der Anzahl Teilblitze in Gesamtblitzen gezeigt, in Anlehnung an frühere Zählungen von Malan in Südafrika. Laboruntersuchungen über die Entwicklung der Vorentladungen langer Funken an negativen Spitzen wurden von Forschern der Universität Padua beschrieben, im Zusammenhang mit Messungen der «Renardières-Gruppe». An der ETHZ wurde eine Einrichtung entwickelt, die erlaubt, den Verlauf von Stoßströmen oder -spannungen automatisch digital auszumessen und auszuwerten. Eine entsprechende Messeinrichtung würde die automatische Ausmessung von Blitzströmen ohne Verwendung von Oszillografen erlauben.

Gruppe 2: Theoretische Blitzschutzprobleme

Theoretische Arbeiten wurden über folgende Probleme vorgelegt: Stromverdrängung in blitzstromdurchflossenen Leitern und Erdungen, entsprechende Scheinwiderstände, Schutzwirkung von Fangeinrichtungen, Berechnung von Induktionsspannungen. Nachstehende Folgerungen aus diesen theoretischen Betrachtungen dürften von praktischem Interesse sein:

1. Der gegenüber Blitzströmen wirksame Widerstand einer Erdung darf in erster Näherung ohne wesentlichen Fehler dem bei Gleichstrom oder 50 Hz gemessenen Wert gleichgesetzt werden. Das gilt insbesondere bei hohen spezifischen Bodenwiderständen, d. h. im Gebirge.

2. Die infolge starker positiver Blitzströme entstehende Erwärmung von Blitzableiterdrähten darf ohne wesentlichen Fehler unter Zugrundelegung des Gleichstromwiderstandes dieser Leiter aus dem Stromquadratimpuls ($\int i^2 dt$) berechnet werden. Dies gilt auch für Drähte aus Eisen.

3. Ein sog. Schutzbereich einer Blitzableiterstange oder einer andern Auffangeinrichtung lässt sich bei Modellversuchen im Labor mit Funkenlängen bis ca. 10 m ausmessen. Beim Blitzeinschlag ist der Begriff des Schutzraums zu ersetzen durch die Einschlags-Wahrscheinlichkeit bei bekannter Blitzeinschlagsdichte. Deren Bestimmung ist bisher nur möglich durch langdauernde Beobachtung von bestehenden Anlagen und durch statistischen Vergleich.

Gruppen 3 und 5:

Praktischer Blitzschutz und spezielle Blitzschutzprobleme

Zur Diskussion des praktischen Blitzschutzes, welche die Hauptaufgabe der Blitzschutzkonferenz bildet, lagen Berichte zu folgenden Themen vor:

1. Blitzschutz elektrischer Anlagen in Gebäuden
2. Blitzschutz von Sendeanlagen und Seilbahnen
3. Blitzschutz von Behältern (Tanks) mit explosiven Flüssigkeiten
4. Blitzschutz elektrischer Minenzünder beim Stollenbau
5. Einfluss von Feuchtigkeit und Stromdichte auf Erdungswiderstände, Verhalten von armiertem Beton bei Stoßstrom, Korrosion von