Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 52 (1961)

Heft: 5

Artikel: Sonderprobleme beim Betrieb von Generatoren am Netz in untererregtem Zustand in hydraulischen Kraftwerken

Autor: Frey, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916819

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: 09.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Sonderprobleme beim Betrieb von Generatoren am Netz in untererregtem Zustand in hydraulischen Kraftwerken

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 19. Januar 1961 in Bern,

von *W. Frey*, Baden

621.313.322-82.072.2 : 621.316.722.1

Untererregte Betriebszustände von Synchronmaschinen ergeben sich bei der Aufladung langer leerlaufender Leitungen, oder beim Betrieb auf ein Netz, in dem zu Zeiten schwachen Wirklastumsatzes ein Überschuss an Blindleistung entsteht. Im ersten Fall besteht die Gefahr der Selbsterregung, während im zweiten Fall die Stabilität gefährdet ist. Wenn die Maschinen von Spannungsreglern mit guten dynamischen Eigenschaften geregelt werden, so können in beiden Fällen innerhalb bestimmter Grenzen Betriebszustände durchgehalten werden, die ohne Spannungsregler entweder zu Selbsterregung oder zum Verlust der Stabilität führen würden. Es kann so vermieden werden, dass mit Rücksicht auf ausserordentliche und nur selten auftretende Betriebszustände Maschinen mit unwirtschaftlich kleiner Synchronreaktanz beschafft werden. Wenn aus den Spannungsreglern in dieser Hinsicht voller Nutzen gezogen werden soll, muss die Regelung durch spezielle Schutzvorrichtungen ergänzt werden.

Le régime sous-excité des machines synchrones apparaît lorsque celles-ci alimentent, en régime stationnaire, de longues lignes à vide, ou débitent dans un réseau qui, en cas de faibles échanges de puissance active, produit un excès de puissance réactive. Il en résulte alors, dans le premier cas, le risque d'auto-excitation, dans le second cas celui d'instabilité.

L'emploi d'un régulateur de tension, ayant de bonnes caractéristiques dynamiques, permet, dans une certaine mesure, d'envisager l'exploitation de ces machines pour des régimes qui conduiraient, en l'absence d'un régulateur, soit à l'auto-excitation, soit à la perte de stabilité.

On peut ainsi éviter de prévoir des machines ayant des réactances synchrones plus petites, ce qui est onéreux, uniquement pour des régimes extraordinaires et se produisant rarement.

Si l'on veut, dans ce but, obtenir le meilleur rendement des régulateurs de tension, il faut compléter le réglage par des appareils de protection spéciaux.

1. Einleitung

Die Generatoren in den Kraftwerken müssen nicht nur Wirkleistung abgeben, man muss von ihnen auch die Aufnahme oder die Abgabe von Blindleistung fordern. Fragen, die mit der Abgabe von Blindleistung zusammenhängen, sind im allgemeinen älter und auch besser bekannt als die Probleme der Blindlastaufnahme, wobei die Generatoren im untererregten Zustande fahren müssen.

Man wird sich zuerst überlegen, unter welchen Umständen die Betriebsleitungen in die Lage kommen, den Maschinen die Aufnahme von Blindleistung zuzumuten. Es sind dabei zwei Fälle zu unterscheiden, welche auch verschiedenartige Probleme aufwerfen:

Fall A.

Eine Maschine oder die Maschinen eines Werkes müssen eine leerlaufende Leistung oder ein Kabel aufladen.

Fall B.

Bei der heutigen Ausdehnung der Netze, die u. U. auch Hochspannungskabel enthalten, ist es leicht möglich, dass zu Zeiten schwachen Wirklastumsatzes ein Überschuss an Blindleistung absorbiert werden muss. Man kann diese Aufgabe ganz oder teilweise den Synchronmaschinen eines Netzes auferlegen.

In dieser Arbeit soll von Fall A nur der theoretische Aspekt berücksichtigt werden.

2. Ergebnisse der Theorie der Selbsterregung

Wenn ein Generator auf eine leerlaufende Leitung arbeitet, so kann man die Leitung — mit gewissen Annäherungen — durch eine Kapazität C darstellen. (Fig. 1).

Ob sich die Synchronmaschine in diesem Betriebszustande normal verhält oder nicht, hängt vom Verhältnis der kapazitiven Reaktanz X_C zu den Synchronreaktanzen X_d und X_q in der Haupt- und Querachse ab Wenn $X_C > X_d$ und damit auch grösser als X_q

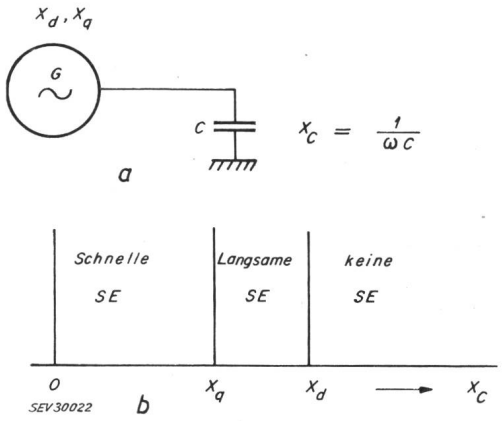

Fig. 1

Selbsterregung einer Synchronmaschine beim Aufladen einer Leitung oder eines Kabels

Je nach der Grösse von X_c im Verhältnis zu X_d und X_q tritt keine Selbsterregung SE, langsame Selbsterregung oder schnelle Selbsterregung auf. Die langsame Selbsterregung kann durch einen Spannungsregler mit guten dynamischen Eigenschaften verhindert werden

a Prinzipschaltbild; *b* Darstellung der verschiedenen Betriebszustände

X_c kapazitive Reaktanz; X_d Synchronreaktanz in der Längsachse; X_q Synchronreaktanz in der Querachse; C Ersatzkapazität; ω Kreisfrequenz

ist, verhält sich die Maschine normal (Fig. 1). Liegt X_C zwischen den beiden Reaktanzen, so tritt langsame Selbsterregung auf. Dies will heissen, dass die betriebsfrequente Spannung verhältnismässig langsam ansteigt bis ein Überschlag auftritt oder der Vorgang dank der Sättigung stationär wird. Für die Praxis der Werke ist es jedoch äusserst wichtig, dass ein guter Spannungsregler dieses Ansteigen verhindern kann. Die langsame Selbsterregung kann also dank dem Spannungsregler unterdrückt werden.

Dies ist im dritten Bereich der Fig. 1 b grundsätzlich nicht mehr der Fall. Wenn X_C kleiner als die Synchronreaktanz X_q in der Querachse ist, verläuft die Selbsterregung sehr schnell und man kann zeigen, dass sich in diesem Bereich zwei unstabile Vorgänge überlagern [1]). Diese doppelte Unstabilität macht eine Beherrschung der schnellen Selbsterregung durch den Spannungsregler prinzipiell unmöglich, wobei vorausgesetzt wird, dass der Regler nicht zusätzlich vom ersten und zweiten Differentialquotienten der Klemmenspannung beeinflusst wird.

3. Betrieb im untererregten Zustande am Netz

Übergehend zum Fall B zeigt Fig. 2 eine typische Situation, bei welcher Unterregung und damit eine Gefährdung der Stabilität eintreten kann. Die Maschine arbeitet über eine Leitung mit der Reaktanz X_e auf ein starres Netz N. Der Begriff «starres Netz» ist natürlich eine Fiktion und will bedeuten, dass der Spannungsvektor des Netzes weder nach Grösse noch Phasenlage durch die einspeisende Synchronmaschine beeinflusst wird. Man kann sich etwa vorstellen, dass die Leitung in eine Unterstation mit sehr grosser Kurzschlussleistung einmündet. Um dem endlichen Werte der Kurzschlussleistung Rechnung zu tragen, kann man zu X_e noch die entsprechende Kurzschlussreaktanz hinzuschlagen und wird dann auf das prinzipielle Schema von Fig. 2 geführt.

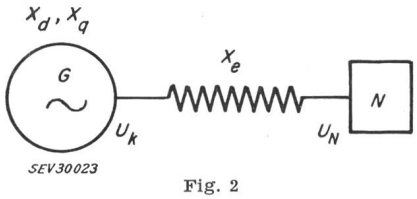

Fig. 2
Synchronmaschine, welche über eine Leitung mit der Reaktanz X_e auf ein starres Netz N arbeitet
U_N Spannung des starren Netzes; U_k Klemmenspannung; X_e Leitungsreaktanz; X_d Synchronreaktanz

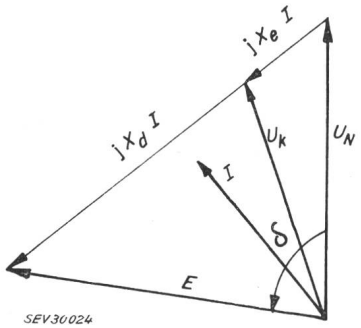

Fig. 3
Zeigerdiagramm für den Fall, dass die Spannung U_n des starren Netzes grösser ist als die vom Spannungsregler gehaltene Klemmenspannung U_k
Der Einfachheit halber wird eine Vollpolmaschine angenommen
E Polradspannung der Maschine; δ Polradwinkel der Maschine
Weitere Bezechnungen siehe Fig. 2

[1]) Mathematisch ausgedrückt: Die charakteristische Gleichung des Vorganges hat zwei Wurzeln mit positiven Realteilen. Wenn X_e in der Grössenordnung von X_d (transiente Reaktanz) ist, können sich die Verhältnisse erneut ändern.

Wenn nun als Folge eines Blindleistungsüberschusses die Spannung U_N des Netzes über ihren Nennwert ansteigt, so ergibt sich eine Situation entsprechend dem Vektordiagramm Fig. 3. Dabei wurde vorausgesetzt, dass der Sannungsregler die Klemmenspannung auf ihren Nennwert regelt. Der Einfachheit halber wurde eine Vollpolmaschine angenommen. Man sieht, dass sich in diesen Betriebsfällen sehr grosse Polradwinkel δ ergeben können. Dazu ist zu bemerken, dass für die Stabilität der Maschine der Phasenverschiebungswinkel δ zwischen der induzierten EMK E und der festen Spannung U_N massgebend ist und nicht etwa der Winkel zwischen E und U_k.

Zur Beurteilung solcher Betriebszustände hat sich eine bestimmte Art von Diagrammen eingebürgert.

In einem rechtwinkligen Koordinatensystem wird der Betriebszustand der Synchronmaschine wie folgt dargestellt (Fig. 4):

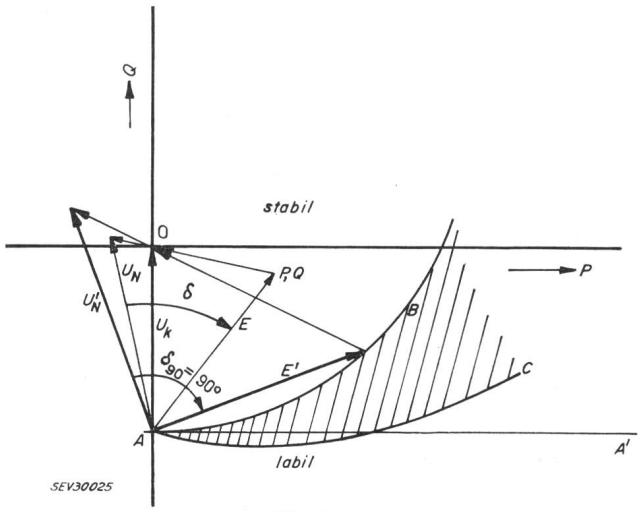

Fig. 4
Darstellung der Stabilitätsverhältnisse im untererregten Betriebe nach den Fig. 2 und 3
P abgegebene Werkleistung bei der Klemmenspannung U_k; Q abgegebene Blindleistung; $OA = 1 : X_d$; B Stabilitätsgrenze für kontanten Rotorstrom; C theoretische Stabilitätsgrenze für eine geregelte Maschine
Im schraffierten Bereich ist die Maschine nur dank dem Spannungsregler stabil

Auf der x-Achse wird die an den Klemmen abgegebene Wirkleistung und auf der y-Achse die abgegebene Blindleistung aufgetragen. Das Diagramm ist gültig für eine bestimmte Klemmenspannung. Jedem Punkte der Ebene entspricht eindeutig ein bestimmter Betriebszustand. Die Leistungen werden dabei auf die Nennleistung der Maschine bezogen, sind also dimensionslose Grössen. Wenn die äussere Reaktanz X_e bekannt ist, entspricht jedem Punkte der Ebene ein statisch stabiler oder labiler Zustand. Die Grenzkurve zwischen den beiden Zuständen hängt natürlich von der äusseren Reaktanz und den Synchronreaktanzen der Maschine ab. Zur Bestimmung der Grenzkurve zeichnet man in der in Fig. 4 angegebenen Weise das Vektordiagramm der Spannungen ein. Wie leicht einzusehen ist, muss dabei der Vektor der Klemmenspannung U_k so genormt werden, dass er von A mit der

y-Koordinate $-1 : X_d$ nach dem Ursprung O zeigt. Der vom A nach dem Betriebspunkte P, Q zeigende Vektor stellt dann die induzierte EMK dar. Der Vektor der starren Netzspannung U_N lässt sich nun leicht einzeichnen. Wenn die Maschine direkt auf ein starres Netz arbeitet, so fällt U_N mit U_k zusammen und man erkennt unmittelbar, dass die Gerade AA' die Stabilitätsgrenze darstellt, da auf dieser Geraden der Polradwinkel δ gleich 90° wird. Der stabile Bereich liegt in der oberen Halbebene. Wenn X_e nicht Null ist, so ist die Grenze durch eine Kurve AB gegeben. Man kann zeigen, dass bei Vollpolmaschinen diese Kurve ein Kreis ist.

Diese Stabilitätsgrenze bezieht sich auf konstanten Rotorstrom, unter dieser Voraussetzung ist die Stabilitätsgrenze bei $\delta = 90°$ erreicht (Fig. 4). Die Theorie und die Erfahrung zeigen jedoch, dass dank dem Spannungsregler, sofern er gute dynamische Eigenschaften hat, diese Grenze in bestimmte Masse überschritten werden kann. Kurve AC zeigt eine zweite Stabilitätsgrenze, welche von Spannungsreglern, die nicht zusätzlich auf die Änderungsgeschwindigkeit der Klemmenspannung oder der Änderungsgeschwindigkeit des Polradwinkels ansprechen, nicht überschritten werden kann.

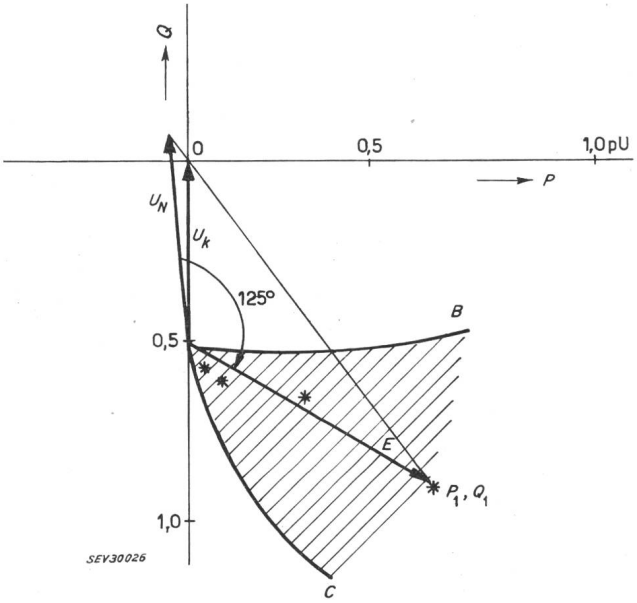

Fig. 5
Versuchsresultate eines 80-MW-Generators
Die Sterne bezeichnen Betriebszustände, welche während längerer Zeit durchgehalten wurden. Im Betriebszustand P_1, Q_1 betrug der Polradwinkel 125 °
Bezeichnungen siehe Fig. 4

In der gleichen Darstellungsart zeigt Fig. 5 Ergebnisse von Versuchen, welche im Ausland mit einer 80 MVA Turbogeneratorgruppe durchgeführt wurden. Im schraffierten Bereich ist die ungeregelte Maschine nicht stabil, kann jedoch grundsätzlich mit einem guten Spannungsregler stabilisiert werden. Die Sterne geben die Betriebszustände an, welche während den Versuchen längere Zeit aufrechterhalten wurden. Sie liegen im unstabilen Bereich der ungeregelten Maschine. In P_1, Q_1 betrug der Polradwinkel 125°. Die Maschine wurde mit einem elektromechanischen Hochleistungsregler ohne besondere Zusatzeinrichtungen geregelt.

Die Versuche wurden nicht so weit getrieben, dass ein Aussertrittfallen der Maschine zu riskieren war. Hätte man dieses Risiko auf sich genommen, so wäre es möglich gewesen, noch weiter in den unstabilen Bereich der ungeregelten Maschine einzudringen. Die theoretische Grenze kann jedoch praktisch nie erreicht werden, da dann die kleinste Störung oder Unregelmässigkeit im Antriebsmoment die Maschine ausser Tritt werfen würde.

Solche Versuche können nur sehr selten durchgeführt werden, da sie für die Kraftwerke mit grossen Umtrieben und Kosten verbunden sind. Es liegt hier ein weiterer Fall vor, wo dank einem Regler ein an sich unstabiler Betrieb stabilisiert werden kann.

Selbstverständlich ist ein Betrieb bei 90 oder mehr Grad nicht sehr erfreulich; man wird solche Zustände nur in Ausnahmezuständen zulassen. Die genaue Kenntnis der Zusammenhänge kann gelegentlich verhindern, dass allein mit Rücksicht auf die Blindleistungsaufnahme Maschinen mit unwirtschaftlich kleiner Synchronreaktanz beschafft werden.

Es ist noch angezeigt zu bemerken, dass die Probleme der untererregten Maschine am Netz zuerst bei Turbogeneratoren aktuell wurden, da die Turbogeneratoren im allgemeinen weniger stabil sind als die Einzelpolmaschinen. Wenn auch vielleicht in gemilderter Form treten diese Probleme ebenso bei Wasserkraftgeneratoren in Erscheinung.

Wenn der untererregte Zustand in einem Kraftwerk in Frage kommt, so ist es für die Betriebsleitung sicher eine gewisse Beruhigung, wenn die Stabilitätsverhältnisse dank dem gezeigten Diagramm bekannt sind. In vielen Fällen weiss man jedoch nicht sicher, wie weit vielleicht in ganz extremen Fällen die Anforderungen gehen werden. Es wird wünschenswert sein, die Stabilitätsverhältnisse automatisch zu überwachen und nötigenfalls einzugreifen.

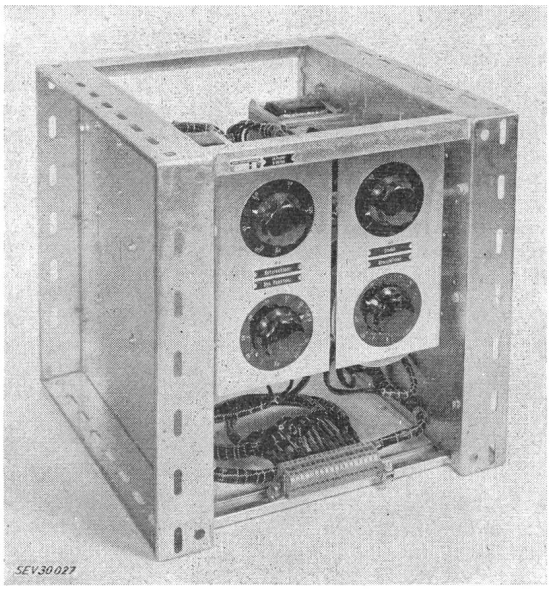

Fig. 6
Apparatekasten eines Lastwinkelbegrenzers
An den Knöpfen können X_e, X_q, δ_{max} und die Stärke des Korrekturflusses eingestellt werden. (Bei Einzelpolmaschinen ist X_q für die Grösse des Polradwinkels massgebend)

Ein Mittel dazu besteht darin, den Winkel δ laufend zu messen und, wenn er einen gewissen einstellbaren Betrag δ_{max} überschreitet, einzugreifen. Wenn δ_{max} überschritten wird, so wird in dem Sinne eingegriffen, dass der Sollwert des Spannungsreglers im Sinne einer erhöhten Klemmenspannung modifiziert wird. Man

verzichtet also zugunsten der Stabilität auf die genaue Einhaltung der Klemmenspannung.

Fig. 6 zeigt eine als Polradwinkelbegrenzer (stability limiter) bezeichnete Apparatur, welche die beschriebene Überwachung und eventuelle notwendige Korrektur vollautomatisch durchführt.

Der Winkel δ wird bestimmt, indem mit dem Klemmenstrom und der Klemmenspannung Abbilder der Maschine und der Reaktanz X_e gespeist werden. Die Synchronreaktanz der Maschine, die äussere Reaktanz X_e sowie der maximal zugelassene Polradwinkel können an den im Bilde sichtbaren Knöpfen eingestellt werden. Ein im Bilde nicht sichtbarer statischer Sektorregler gibt beim Überschreiten von δ_{max} ein Signal an den Spannungsregler im Sinne einer Erhöhung der Sollspannung.

Die hier kurz dargelegte Technik des untererregten Betriebes lassen zwei wichtige Merkmale erkennen:

1. In bestimmten Fällen kann ein erstklassiger Spannungsregler einen Betrieb stabilisieren, der ohne Regler nicht durchführbar wäre. (Langsame Selbsterregung, grosser Polradwinkel). Wenn diese Tatsache nicht beachtet wird, so besteht die Gefahr, dass unwirtschaftlich ausgelegte Maschinen beschafft werden müssen und dies lediglich im Hinblick auf seltene ausserordentliche Betriebszustände.

2. Jeder Regler, auch ein idealer Regler, hat wie gezeigt wurde, Grenzen seiner Wirksamkeit. Um zu verhüten, dass im Betrieb diese Grenzen ungewollt überschritten werden, sind Schutzvorrichtungen vorzusehen, welche solche Zwischenfälle verhindern. Für den unterregten Betrieb am Netz dient der kurz erwähnte Lastwinkelbegrenzer. Selbstverständlich wird auch der Betrieb auf leerlaufende Leitungen in passender Weise vor Überforderung der Regler geschützt; dieses Problem überschreitet jedoch den Rahmen dieses Referates.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *W. Frey*, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Problèmes relatifs au fonctionnement des groupes générateurs sur des lignes et des câbles à haute tension à vide

Conférence donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE le 19 janvier 1961 à Berne,
par *R. Comtat*, Genève

621.313.322-82 072.2 : 621.315.2.027.3

Il arrive fréquemment que des lignes à haute tension raccordées à des centrales électriques se trouvent à vide pour diverses raisons d'exploitation. Or, ces lignes constituent des capacités non négligeables qui obligent les alternateurs à débiter des courants capacitifs. A ce régime de puissance capacitive correspond un régime de sous-excitation à l'alternateur, voire même un régime d'excitation négative, si la réactance capacitive X_c de la ligne est plus faible que la réactance synchrone longitudinale X_d de l'alternateur. Ce régime d'excitation négative peut être maintenu en toute stabilité, sans devoir surdimensionner les alternateurs, si l'on prend le soin d'équiper ceux-ci avec des régulateurs de tension appropriés, capables d'exciter négativement la machine en un temps extrêmement court. La stabilité de marche de l'alternateur n'est toutefois plus maintenue si la capacité de la ligne est trop élevée (ligne trop longue). Ce régime instable, qui entraîne le décrochage de l'alternateur, apparaît sitôt que la réactance capacitive de la ligne Xc est plus faible que la réactance synchrone transversale X_q de l'alternateur. Ce cas de fonctionnement instable peut arriver principalement lorsqu'une longue ligne est déclenchée en charge à l'extrémité réceptrice.

Il existe toutefois des dispositifs appropriés de protection qui permettent de déclencher l'alternateur avant l'apparition du régime $X_c < X_q$, tout en permettant la pleine utilisation de la marge négative de la machine pour assurer en toute stabilité la marche à $X_c > X_q$.

Aus betrieblichen Gründen befinden sich die von Kraftwerken ausgehenden Hochspannungsleitungen häufig im Leerlauf. Solche Leitungen zwingen die Generatoren zur Abgabe beträchtlicher kapazitiver Leistungen. Diesem Zustand entspricht ein untererregter, unter Umständen sogar ein Zustand negativer Erregung des Generators, nämlich dann, wenn die kapazitive Reaktanz X_c der Leitung kleiner ist als die synchrone Längs-Reaktanz X_d des Generators. Der Zustand der negativen Erregung kann stabil erhalten werden, ohne dass man die Generatoren überdimensionieren muss, wenn sie mit geeigneten Spannungsreglern versehen sind, welche die Maschine in kürzester Zeit negativ zu erregen vermögen. Allerdings ist ein stabiler Lauf des Generators nicht mehr möglich, wenn die Leitungskapazität zu hoch ist (bei einer sehr langen Leitung). Dieser unstabile Zustand, welcher das Aussertrittfallen des Generators zur Folge hat, tritt ein, sobald die kapazitive Reaktanz X_c der Leitung kleiner wird als die synchrone Quer-Reaktanz X_q des Generators, und erscheint gewöhnlich dann, wenn eine lange Leitung am Verbrauchsende unter Last abgeschaltet wird.

Es bestehen indessen geeignete Schutzvorrichtungen, welche den Generator abschalten, bevor $C_c < X_q$ wird, aber trotzdem die volle Ausnützung des negativen Bereiches der Maschine erlauben, damit der stabile Lauf unter der Bedingung $X_c > X_q$ gewährleistet ist.

1. Introduction

Alors que le turbinier est occupé aux problèmes de la fourniture de puissance active, son collègue électricien, par contre, est préoccupé par les problèmes relatifs à la fourniture de 3 puissances distinctes aux bornes de ses alternateurs. Il s'agit, rappelons-le, de la puissance active, de la puissance réactive inductive due au courant magnétisant des consommateurs inductifs, et enfin, de la puissance réactive capacitive, nécessitée par les lignes et les câbles à haute tension (HT). Ce sont les différents aspects de cette dernière puissance, dite capacitive, que nous nous proposons d'examiner durant ces quelques minutes, sous l'angle plus particulier des lignes à HT. En effet, il est opportun de rappeler ici la nature de cette puissance capacitive, qui, contrairement aux composantes actives et inductives, présente, comme nous allons d'ailleurs le constater, une nature fort capricieuse.

2. Régime capacitif d'une ligne HT

Examinons en premier lieu quelles sont les raisons qui imposent, aux grandes centrales hydro-électriques raccordées sur les réseaux à très haute tension, la fourniture de puissance réactive capacitive.

Une ligne de transport est caractérisée par 4 paramètres électriques, à savoir:

a) la résistance ohmique R' par km qui provoque une absorption de puissance active Ri^2 et une chute de tension Ri.

b) l'inductance par km L', qui occasionne sans absorption de puissance active une chute de tension inductive ωLi.

c) la perditance par km G' due aux fuites et aux pertes diélectriques dans les isolants qui entraîne une absorption de puissance active Gu^2 et une perte de courant Gu.