Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 50 (1959)
Heft: 2

Artikel: Prinzipielle Anforderungen an Netzkommandoanlagen für extrem tiefe Steuerfrequenzen

Autor: Grob, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057778

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: 16.12.2025

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

Prinzipielle Anforderungen an Netzkommandoanlagen für extrem tiefe Steuerfrequenzen

Von *O. Grob*, Uster

621.398.2

Mit Rücksicht auf die in ihren Netzen vorhandenen Phasenschieberkondensatoren prüfen viele Elektrizitätswerke den Einsatz von extrem tiefen Steuerfrequenzen (unter 300 Hz) für die von ihnen geplanten Netzkommandoanlagen (Rundsteuerungsanlagen). Im folgenden sollen nun die speziellen technischen Anforderungen an die auszusteuernden Netze einerseits und an die Empfangsapparate anderseits bei der Anwendung von extrem tiefen Steuerfrequenzen eingehend dargelegt werden.

I. Anforderungen an die Hoch- und Zwischenspannungsnetze

Was die Einspeisung der Steuerimpulse in die Netze anbetrifft, ist vor allem darauf hinzuweisen, dass bei Steuerfrequenzen unter 300 Hz in der Praxis nur die sogenannte Serieeinspeisung zu technisch und wirtschaftlich vernünftigen Lösungen

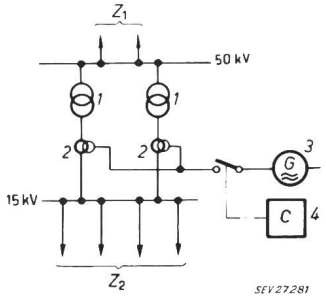

Fig. 1
Prinzipschema der Serieeinspeisung
1 Transformatoren 50/15 kV; *2* Serie-Einspeise-Transformatoren; *3* Tonfrequenzgenerator; *4* Kommandogerät; Z_1 zum übergeordneten Netz; Z_2 zum auszusteuernden Netz

führt (Fig. 1). Die Paralleleinspeisung (Fig. 2) scheidet bei extrem tiefen Steuerfrequenzen aus, weil sie erstens viel zu grosse Kopplungskondensatoren erfordert und zweitens fast immer den Einsatz von Sperrkreisen in die Verbindungsleitungen zu den benachbarten und übergeordneten Netzen notwendig macht.

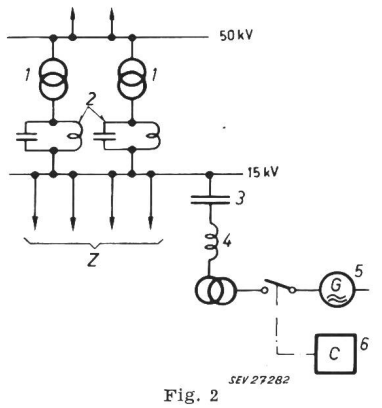

Fig. 2
Prinzipschema der Paralleleinspeisung mit Sperrkreis
1 Transformatoren 50/15 kV; *2* Sperrkreise; *3* Kopplungskondensator; *4* Abstimmspulen; *5* Tonfrequenzgenerator; *6* Kommandogerät; *Z* zum auszusteuernden Netz

Diese Sperrkreise sind für extrem tiefe Steuerfrequenzen sehr voluminös und teuer, weil es aus physikalischen Gründen sehr schwierig ist, dieselben so zu realisieren, dass sie den Starkstrom mit einer Frequenz von 50 Hz — auch bei grossen Durchgangsleistungen — praktisch verlustlos passieren lassen, während gleichzeitig Steuerimpulse mit einer nur wenig höheren Steuerfrequenz von beispielsweise 175 Hz gesperrt werden müssen. Auf jeden Fall sind solche Sperrkreise sowohl in bezug auf ihre Ausmasse als auch in bezug auf ihre Kosten den bei der Serieeinspeisung benötigten Serieeinspeisetransformatoren praktisch gleichzusetzen. Dadurch werden Anlagen mit Paralleleinspeisung und Sperrkreisen beinahe doppelt so teuer wie Anlagen mit Serieeinspeisung. Die Serieeinspeisung ihrerseits kann aber nur dann befriedigen, wenn Garantie dafür besteht, dass die Steuerimpulse nicht in unzulässigem Masse in benachbarte oder übergeordnete Netze abfliessen und an in diesen Netzen installierten Empfängern keine Fehlschaltungen verursachen. Serieeinspeisung ist deshalb ohne besondere Massnahme nur dann anwendbar, wenn die Impedanz Z_1 des übergeordneten Netzes für die Steuerfrequenz immer — heute und in Zukunft, sonntags und werktags — mindestens zehnmal kleiner ist, als die Impedanz Z_2 des auszusteuernden Netzes. Bei Erfüllung dieser Bedingung sind nämlich die Reststeuerspannungen in den benachbarten

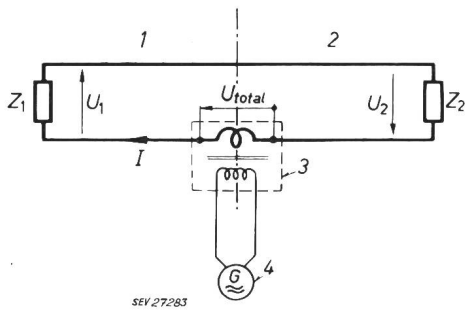

Fig. 3
Einphasiges vereinfachtes Schema der Serieeinspeisung zur Berechnung der Steuerspannungen im auszusteuernden und im übergeordneten Netz
1 übergeordnetes Netz; *2* auszusteuerndes Netz; *3* Serie-Einspeise-Transformator; *4* Tonfrequenzgenerator

und übergeordneten Netzen auch zehnmal kleiner als die Steuerspannungen im auszusteuernden Netz. Dies ist aus Figur 3 und den nachfolgenden Berechnungen für die Aufteilung der total aufgedrückten Steuerspannungen im auszusteuernden und im übergeordneten Netz klar ersichtlich.

Es bedeuten:

- Z_1 Gesamtimpedanz des übergeordneten Netzes für die Steuerfrequenz
- Z_2 Gesamtimpedanz des auszusteuernden Netzes für die Steuerfrequenz
- U_1 Steuerspannung im übergeordneten Netz
- U_2 Steuerspannung im auszusteuernden Netz
- U_3 totale eingespeiste Steuerspannung an den netzseitigen Klemmen des Serie-Einspeisetransformators
- I totaler eingespeister Steuerstrom

Nach dem Ohmschen Gesetz lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$\bar{U}_2 = I\bar{Z}_2 \quad (1)$$

$$\bar{U}_1 = I\bar{Z}_1 \quad (2)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{U}_2 + \bar{U}_1 \quad (3)$$

ferner aus den Gl. (1) und (2):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4)$$

oder wenn:

$$Z_1 \leqq 0{,}1\, Z_2 \quad (5)$$

dann ist auch

$$U_1 \leqq 0{,}1\, U_2$$

Die in der Literatur [1] und [5] [1]) meist angegebene Faustregel, dass lediglich die Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes etwa 35mal grösser sein müsse als diejenige des auszusteuernden Netzes, ist leider nicht immer hinreichend. Diese Faustregel gilt vielmehr nur, wenn die übergeordneten Netze reine Freileitungsnetze sind, welche zudem nicht mit grösseren Phasenschieberkondensatoren belastet sein dürfen. Sind die übergeordneten Netze ganz oder teilweise verkabelt, oder mit grösseren Phasenschieberkondensatoren belastet, so sind auch bei extrem tiefen Steuerfrequenzen Resonanzerscheinungen zwischen den genannten Kapazitäten und Streuinduktivitäten von Transformatoren möglich, welche die Impedanz Z_1 des übergeordneten Netzes wesentlich beeinflussen können. Die aufgeführte Faustformel ist damit nicht mehr anwendbar [2].

Um spätere Schwierigkeiten zu vermeiden, müssen deshalb die Impedanzverhältnisse des auszusteuernden Netzes bei der Planung von Netzkommandoanlagen sehr sorgfältig untersucht werden. Dabei bereitet die Berechnung der Impedanz Z_2 des auszusteuernden Netzes meist keinerlei Schwierigkeiten. Es gilt nämlich mit genügender Genauigkeit

$$Z_2 = \frac{U^2}{P_{max}}$$

wobei U die Spannung und P_{max} die maximale Leistung des auszusteuernden Netzes bedeuten.

Viel Kopfzerbrechen verursacht aber meistens die Berechnung der Impedanz Z_1 des übergeordneten Netzes. Dabei sind diese Schwierigkeiten nicht etwa rechnungstechnischer Natur. Was aber oft fast unüberwindbare Hindernisse bietet, ist die Tatsache, dass die übergeordneten Netze meist sehr eng mit Netzen gekoppelt — oder sogar galvanisch verbunden — sind, welche nicht mehr einer Gesellschaft allein gehören. Es ist deshalb nicht verwunderlich, wenn den Betriebsingenieuren der Aufbau und die Betriebsweise der übergeordneten Netze mit allen möglichen Varianten nicht einmal in der Gegenwart und noch viel weniger für die Zukunft bekannt sind. Ohne solide Unterlagen über den Netzaufbau ist aber leider, auch mit den besten Netzmodellen, keine seriöse Impedanzberechnung möglich. Es ist deshalb sehr ratsam, zum vorneherein Massnahmen zu treffen, durch welche man von diesen Impedanzen unabhängig wird, wenn in bezug auf die Impedanz Z_1 des übergeordneten Netzes nicht ganz klare und eindeutige Verhältnisse vorliegen.

In dieser Beziehung gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich:

1. Den Einbau von auf die Steuerfrequenz abgestimmten Saugkreisen ins übergeordnete Netz (Fig. 4). Durch solche — allerdings ausserordentlich teure — Saugkreise kann ein genügend kleiner Wert von Z_1 erzwungen werden. Der Einsatz von Saugkreisen ist leider wirtschaftlich nur dann tragbar, wenn er mit dem Einsatz von grossen Phasenschieberbatterien kombiniert werden kann.

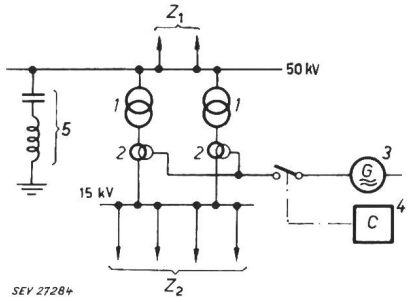

Fig. 4
Prinzipschema der Serieeinspeisung mit Saugkreis im übergeordneten Netz
1 Transformatoren 50/15 kV; *2* Serie-Einspeise-Transformatoren; *3* Tonfrequenzgenerator; *4* Kommandogerät; *5* Saugkreis; Z_1 zum übergeordneten Netz; Z_2 zum ausgesteuerten Netz

2. Die galvanische Auftrennung des auszusteuernden Netzes in zwei Teilnetze, welche dann in bezug auf die Steuerimpulse gegenphasig auszusteuern sind (Fig. 5). Als Variante kommt auch eine Aufteilung in drei Netzteile in Frage, welche dann jeweils mit 120 ° Phasenverschiebung auszusteuern sind. Mit Hilfe dieser speziellen Einspeise-

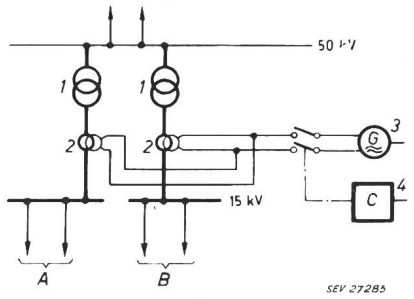

Fig. 5
Prinzipschema der gegenphasigen Serieeinspeisung mit galvanisch aufgetrennten Zwischenspannungsnetzen
1 Transformatoren 50/15 kV; *2* Serie-Einspeise-Transformatoren; *3* Tonfrequenzgenerator; *4* Kommandogerät
Die 15-kV-Netze *A* und *B* müssen galvanisch getrennt sein

art gelingt es immer ohne grosse Investitionskosten auf der Netzkommandoseite, eine Ausbreitung der Steuerimpulse in benachbarte Netze zu verhindern. Anderseits entstehen durch die unbedingt notwendige Auftrennung der Zwischenspannungsnetze vermehrte Investitions- und Betriebskosten auf der Starkstromseite, weil aus Gründen der Reservehaltung immer mindestens drei gleiche Transformatoren Hochspannung—Zwischenspannung pro Un-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

terwerk vorgesehen werden müssen. Von diesen total drei Transformatoren sind immer mindestens 2 in Betrieb zu halten, was erhöhte Leerlaufverluste zur Folge hat. Die notwendige Netzauftrennung vermindert zudem die Freizügigkeit des Betriebes in bezug auf Netzvermaschungen und Notschaltungen bei Störungen.

II. Anforderungen an die Empfangsapparate

Die speziellen technischen Anforderungen an Netzkommandoempfänger für extrem tiefe Steuerfrequenzen hängen vor allem vom Oberwellengehalt der Netze ab. Es ist eine selbstverständliche Forderung, dass Netzkommandoempfänger aller Steuerfrequenzen nicht durch praktisch vorkommende Oberwellen zu Fehlschaltungen veranlasst werden dürfen. Diesbezüglich ergeben sich aber in der Praxis wesentliche Unterschiede zwischen Netzkommandoanlagen mit extrem tiefen und solchen mit mittleren und höheren Steuerfrequenzen. Bei Anlagen mit mittleren und höheren Steuerfrequenzen können nämlich abnorm starke Oberwellen sendeseitig durch sog. Absaugschaltungen auf einfachste Art und Weise, praktisch ohne Mehrkosten unschädlich gemacht werden [3].

Die Wirkungsweise solcher Absaugschaltungen sei an Hand eines Beispiels in Fig. 6 kurz rekapituliert:

Diese Figur zeigt beispielsweise ein Hochspannungsnetz von 70 kV, welches über 3×20 MVA-Transformatoren ein 15-kV-Zwischenspannungsnetz speist. An dieses Zwischenspannungsnetz sei ein grösserer Gleichrichter (z. B. für einen elektrischen Bahnbetrieb) angeschlossen. Ein solcher Gleichrichter erzeugt bekanntlich Oberwellen, welche unter Umständen einen Netzkommandobetrieb empfindlich beeinträchtigen können [4].

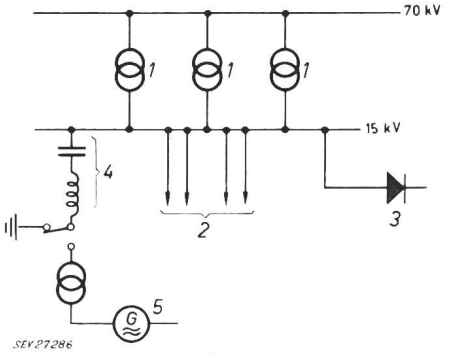

Fig. 6
Prinzipschema der Paralleleinspeisung, kombiniert mit Absaugschaltung
1 Transformatoren 70/15 kV (3 × 20 MVA); *2* abgehende Leitungen; *3* Gleichrichter (Vollbahngleichrichter 15 MW); *4* Saugkreis; *5* Tonfrequenzgenerator

Bei Paralleleinspeisung und bei der Anwendung von mittleren und höheren Steuerfrequenzen können nun diese Oberwellen durch die Sendeanlage selbst — praktisch ohne Mehraufwand — absolut unschädlich gemacht werden. Zu diesem Zwecke wird lediglich durch den Kopplungskreis, bestehend aus dem Kopplungskondensator C und der Abstimmspule L die 15-kV-Sammelschiene in allen Sendepausen für die Steuerfrequenz und ihr benachbarte Frequenzen ja kurzgeschlossen. Da nun Gleichrichter ihrer physikalischen Struktur entsprechend Ströme [4], nicht aber direkt Störspannungen erzeugen, können diese Ströme an den kurzgeschlossenen 15-kV-Sammelschienen keine Störspannungen erzeugen, womit automatisch das ganze 15-kV-Netz von Störspannungen verschont bleibt.

Diese Entstörung ist selbstverständlich auch dann voll wirksam, wenn der störende Gleichrichter an das übergeordnete 70-kV-Netz oder an ein mit diesem Netz verbundenes Netz angeschlossen ist.

Die beschriebene Absaugschaltung hat sich in der Praxis bereits mehrfach bewährt; unter anderem in Antwerpen bei der EBES (Sociétés Réunies d'Energie du Bassin de l'Escaut) und in Bruck-Fusch bei der SAFE (Salzburger A.-G. für Elektrizitätswirtschaft).

Im 15-kV-Netz Wilrijk von Antwerpen konnten z. B. die durch einen 15-MW-Vollbahngleichrichter erzeugten Störspannungen der 23., 25. und 29. Harmonischen von ursprünglich je 1,5 bis 2 V (bezogen auf 220 V) durch die Absaugschaltung auf weniger als je 0,3 V reduziert werden.

Im 15-kV-Netz Bruck-Fusch der SAFE wurden im Jahre 1953 Oberwellenspannungen der 19. und 23. Harmonischen von bis zu 4 V (bezogen auf 220 V) gemessen. Eine Untersuchung ergab, dass diese ganz abnorm hohen Oberwellen ihren Ursprung im 34 km entfernten Aluminiumwerk Lend hatten. In diesem Aluminiumwerk — welches übrigens nicht von der SAFE, sondern von der OKA (Oberösterreichische Kraftwerke A.-G.) mit elektrischer Energie versorgt wird — werden Gleichrichter mit einer totalen Spitzenleistung von 23 MW betrieben. Die störenden Oberwellen gelangten auch auf einem sehr komplizierten Wege vom 5-kV-Netz der Aluminiumwerke Lend (OKA) ins 15-kV-Netz Bruck-Fusch der SAFE; nämlich von Lend vorerst über eine 24 km lange 60-kV-Leitung ins Bärenwerk; im Bärenwerk selbst über Transformatoren hinunter auf eine 5-kV-Sammelschiene und von dieser 5-kV-Sammelschiene wieder über Transformatoren hinauf in einen Strang des 15-kV-Netzes Bruck-Fusch. Durch die Absaugschaltung in Bruck-Fusch konnten die Oberwellenspannungen der 19. und 23. Harmonischen ohne weiteres auf ein Zehntel ihres ursprünglichen Wertes reduziert werden.

Bei extrem tiefen Steuerfrequenzen ist nun leider die beschriebene Absaugschaltung nicht wirksam, weil sich in der Praxis für die extrem tiefen Steuerfrequenzen nicht genügend niederohmige Kurzschlusswege bereitstellen lassen. Bei Serieeinspeisung ist die Absaugschaltung schon aus rein theoretischen schaltungstechnischen Gründen nicht realisierbar.

Die Frequenzfilter der Empfänger *müssen* deshalb im Bereich der extrem tiefen Steuerfrequenzen so trennscharf gebaut werden, dass die maximal möglichen Oberwellenspannungen die eigentlichen Empfängerrelais nicht mehr zu betätigen vermögen.

Die Selektivitätskurve eines Netzkommandoempfängers gibt nun die zum effektiven Ansprechen des eigentlichen Relais minimal notwendige Steuerspannung in Funktion der Frequenz an. Ideale Selektivitätskurven haben die Form eines Troges mit

einem möglichst flachen Minimum bei der Nennfrequenz und möglichst steilen Flanken nach ± 2 % Abweichung von der Nennfrequenz.

Um die aus dem Oberwellengehalt sich ergebenden Anforderungen an diese Selektivitätskurve zahlenmässig festlegen zu können, müssen selbstverständlich zunächst die maximal möglichen Oberwellengehalte der Netze bekannt sein. Für den Bau von Empfängern gibt die Electricité de France konkrete Angaben über den maximal zu erwartenden Gehalt der Netze an 3. und 5. Harmonischer [5]. Gemäss diesen Angaben muss in Frankreich mit einer dritten Harmonischen gerechnet werden, deren Spannungsamplitude 10 % der Netzspannung beträgt. Der entsprechende Wert der fünften Harmonischen beläuft sich nach französischen Normen auf 17 %. Diese Zahlen scheinen eher zu niedrig als zu hoch gegriffen zu sein. Auf jeden Fall wurden im Netz eines schweizerischen Kraftwerkes schon fünfte Harmonische mit einer Amplitude von 20 % der Netzspannung gemessen.

Für die 4., 6. und 8. Oberwelle bestehen zur Zeit leider erst sehr wenig offizielle Angaben. Im allgemeinen scheinen sich diese gradzahligen Oberwellen nur wenig bemerkbar zu machen. Theoretisch sollten sie gleich null sein. Trotzdem dürfen sie nicht ausser acht gelassen werden. Dem Bericht Nr. 324 der CIGRE [6] ist beispielsweise zu entnehmen, dass in Schweden ein 12phasiger Grossgleichrichter von 14 MW Leistung auf dem speisenden 132-kV-Netz die in Tabelle I aufgeführten prozentualen Oberwellenspannungen erzeugt. Es ist selbstverständlich, dass sich diese Oberwellen im ganzen Versorgungsgebiet des betreffenden 132-kV-Netzes ausbreiten, wobei angenommen werden muss, dass auf dem Weg vom Entstehungsort der Oberwellen bis zu den einzelnen Abonnenten die Oberwellenspannung sowohl gedämpft als auch erhöht werden kann. Oberwellenspannungserhöhungen durch Resonanzerscheinungen sind namentlich bei schwach und gleichzeitig kapazitiv belasteten Netzen zu befürchten.

Prozentuale Oberwellenspannungen eines schwedischen Netzes

Tabelle I

Frequenz	Ohne Filter %	Mit Filter %
50	100	100
100	0,05	0,07
150	0,46	0,76
200	0,66	0,42
250	1,23	0,59
300	1,46	0,20
350	0,91	0,46
400	1,05	0,20
450	0,49	0,25
500	0,26	0,05
550	8,1	2,4
600	0,79	0,14
650	5,3	1,1
700	0,26	0,12
750	0,44	0,17
800	0,42	0,12
850	0,23	0,27
900	0,46	0,12
950	0,14	0,20
1 000	0,09	0,05
1 250	0,09	0,19
1 350	0,14	0,05
1 400	0,33	0,05
1 450	0,23	0,07
1 500	0,56	0,03
1 550	0,21	0,05
1 600	0,19	0,03
1 750	0,74	0,10
2 050	0,14	0,10
2 300	0,14	0,08
2 350	0,30	0,08

In Fig. 7 sind nun die möglichen Oberwellenspannungen in Prozenten der 50-Hz-Nennspannung in Funktion der Frequenz anschaulich dargestellt. Dabei wurde angenommen, dass die Grundfrequenz mit all ihren Oberwellen um maximal ± 2 % von ihrem Nennwert abweichen kann. Die für gute Empfängerselektivitätskurven verbotenen Gebiete zeigen sich deshalb in Fig. 7 in Form von schraffierten Säulen.

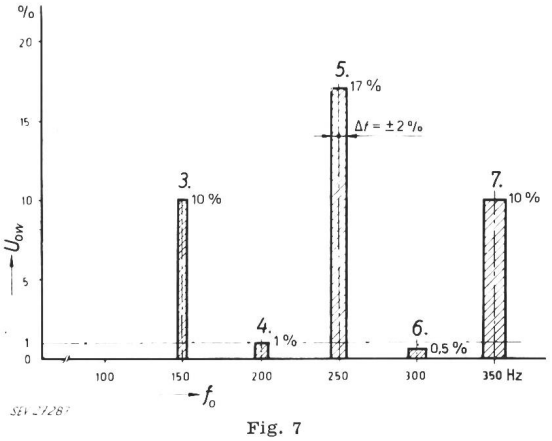

Fig. 7

Maximaler Oberwellengehalt von Starkstromnetzen gemäss [6; 7]

Dritte bis siebente Harmonische

$\Delta f = \pm 2\,\%$ entsprechend den möglichen Frequenzschwankungen der Grundfrequenz von 50 Hz

U_{ow} Oberwellengehalt in Prozenten der 50-Hz-Netzspannung; f_o Frequenz der Oberwellen

Die gemäss den aufgeführten Angaben und Berichten maximal zu erwartenden Spannungen der Netzharmonischen seien im folgenden kurz rekapituliert:

a) Die Spannung der 3. Harmonischen kann maximal 10 % der Grundwellenspannung (also 22 V bei 220 V) erreichen.

b) Die Spannung der 4. Harmonischen kann maximal 1 % der Grundwellenspannung erreichen.

c) Die Spannung der 5. Harmonischen kann maximal 17 % der Grundwellenspannung erreichen.

d) Die Spannung der 6. Harmonischen kann maximal 0,5 % der Grundwellenspannung betragen.

e) Die Spannung der 7. Harmonischen kann maximal 10 % der Grundwellenspannung betragen.

In Frankreich ist man der — vielleicht berechtigten — Auffassung, dass die 4. und 6. Harmonische stärker, als nur mit 1 bzw. 0,5 % auftreten kann. Aus diesen Gründen hat die Electricité de France mit voller Absicht für ihre Netze eine Steuerfrequenz von 175 Hz vorgeschrieben, welche genau *zwischen* der 3. und 4. Harmonischen liegt. Verwendet man nun für diese Steuerfrequenz genügend selektive Empfangsapparate, so ist ein für allemal sichergestellt, dass dieselben nicht fälschlicherweise auf Oberwellen ansprechen können.

Leider lässt sich die für 175-Hz-Empfänger geforderte Selektivität heute nicht mit rein elektri-

schen Filtern wirtschaftlich realisieren. Dies zeigt Fig. 8. In ihr sind zwischen den durch Netzharmonische «verbotenen Gebieten» Selektivitätskurven von verschiedenen Netzkommandoapparaten für 175 Hz eingezeichnet.

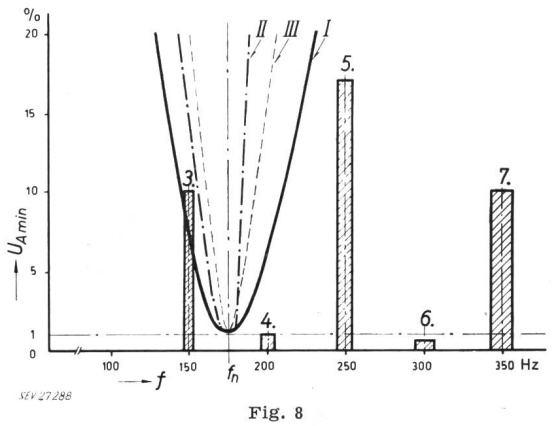

Fig. 8
Selektivitätskurve von Netzkommandoempfängern mit verschiedenen Arten von Frequenzfiltern
Dritte bis siebente Harmonische
I Empfänger mit zweikreisigem elektrischem Filter; *II* Empfänger mit zweikreisigem elektromechanischem Filter; *III* Empfänger mit einkreisigem mechanischem Filter
$U_{A\,min}$ minimal notwendige Ansprechspannung in Prozenten der 50-Hz-Netzspannung; f Frequenz
f_n Nennfrequenz = 175 Hz

Im folgenden sollen diese Selektivitätskurven kurz kommentiert werden:

1. Kurve *I* in Fig. 8 stellt die Selektivität eines Prototyps eines schweizerischen Empfängers für 175 Hz dar, welcher mit einem *zweikreisigen elektrischen* Filter ausgerüstet ist. Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass dieses Filter mindestens auf seiner unteren Seite zu wenig steil ist. Eine Spannung von ca. 6 % der dritten Harmonischen (150 Hz) verursacht damit an einem entsprechenden Empfänger bereits Fehlschaltungen. Man darf anderseits nicht ausser acht lassen, dass in den Netzen schlimmstenfalls mit einem Gehalt von 10 % der dritten Harmonischen zu rechnen ist.

Ein solcher Empfänger ist deshalb für Steuerfrequenzen von 175 Hz unbrauchbar. Es soll jedoch später gezeigt werden, dass genau der gleiche Empfängertyp für Steuerfrequenzen zwischen 190 und 200 Hz unter gewissen Voraussetzungen recht gute Dienste leisten kann.

2. Die Selektivitätskurve *II* in Fig. 8 gehört zu einem Empfangsapparat ebenfalls schweizerischen Ursprungs, welcher mit einem *zweikreisigen elektromechanischen Filter* (Fig. 9, 10) ausgerüstet ist. Die Selektivitätskurve ist in ihrem Durchlassbereich bewusst flach gehalten, so dass Abweichungen der Steuerfrequenz bis zu 2 % von ihrem Nennwert die Empfängerempfindlichkeit nicht beeinflussen und deshalb ohne weiteres in Kauf genommen werden können. Dies gestattet durch das Weglassen von Frequenzregelmechanismen nicht nur eine Vereinfachung auf der Sendeseite, sondern vor allem auch eine wesentliche Erhöhung der Betriebssicherheit des Senders.

Die Flankensteilheit des zweikreisigen elektromechanischen Filters genügt allen theoretischen und praktischen Anforderungen. Leider sind Empfangsapparate mit zweikreisigen elektromechanischen Filtern teurer als solche mit zweikreisigen elektrischen Filtern.

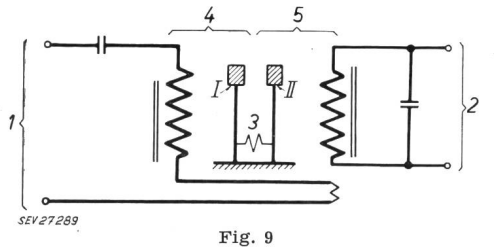

Fig. 9
Schema eines zweikreisigen elektromechanischen Filters mit elektromechanischen Wandlern und elektrischen Vorkreisen
1 Eingang, 50 Hz + Steuerfrequenz; *2* Ausgang, nur Steuerfrequenz; *3* Bandfilterkopplung; *4* elektrisch-mechanischer Wandler; *5* mechanisch-elektrischer Wandler; *I* 1. mechanische Schwingzunge; *II.* 2. mechanische Schwingzunge

3. Selektivitätskurve *III* in Fig. 8 bezieht sich auf in Frankreich viel verbreitete Empfangsapparate mit einem *einkreisigen mechanischen Filter* (Fig. 11). Die Flankensteilheit dieser Kurve entspricht ohne Zweifel den gestellten Anforderungen, hingegen ist die Selektivitätskurve im Durchlassbereich

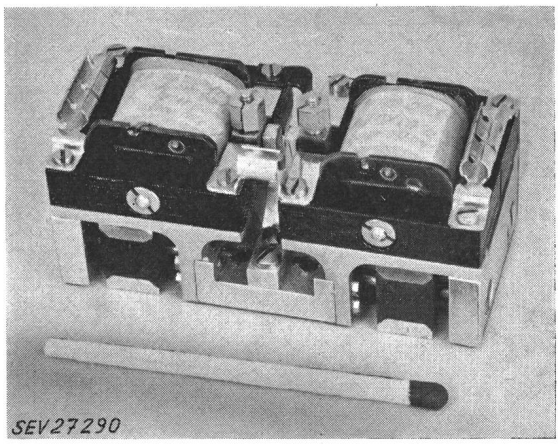

Fig. 10
Zweikreisiges elektromechanisches Filter mit zugehörigen elektromechanischen Wandlern

sehr spitz, so dass sendeseitig unbedingt in bezug auf die abgegebene Steuerfrequenz regulierte Tonfrequenzumformergruppen verwendet werden müssen. Der hiedurch erforderliche Regelmechanismus verteuert und kompliziert die Sendeanlage nicht unbedeutend.

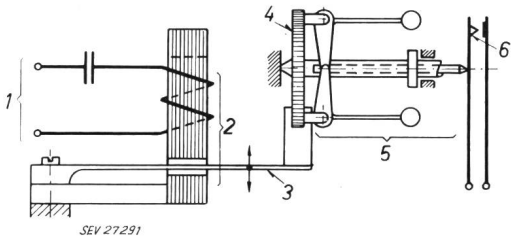

Fig. 11
Schema eines einkreisigen elektromechanischen Filters
1 Eingang; *2* elektromechanischer Wandler; *3* mechanische Schwingzunge; *4* durch Schwingzunge angetriebenes Klinkenrad; *5* durch Fliehkraft gesteuerte Kontaktbetätigung; *6* Steuerhilfskontakt

Anhand von Fig. 12 soll nun gezeigt werden, dass ein Empfänger mit einem zweikreisigen elektrischen Filter gegen durch die 3. und 5. Harmonische verursachte Fehlschaltungen gefeit ist, wenn man seine Nennfrequenz auf 190 Hz festlegt.

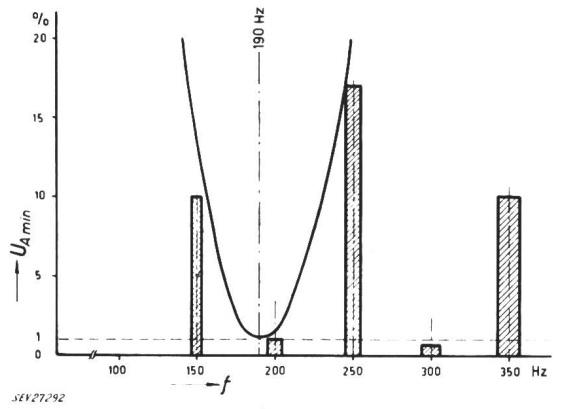

Fig. 12
Selektivitätskurve eines Empfängers mit zweikreisigem elektrischem Filter für 190 Hz Netzfrequenz

$U_{A\,min}$ minimal notwendige Ansprechspannung in Prozenten der 50-Hz-Netzspannung; f Frequenz

In der Tat schneidet die entsprechende Selektivitätskurve die verbotenen Gebiete der 3. und 5. Harmonischen nicht mehr an. Ein solcher Empfänger verträgt auch gut 1 % Oberwellenspannung der vierten Harmonischen. Eine Steuerfrequenz von 190 Hz kann also überall dort, aber auch nur dort empfohlen werden, wo einerseits Sicherheit darüber besteht, dass die vierte Netzharmonische spannungsmässig 1 % der Netzspannung nie überschreitet und wo anderseits durch die gegebenen Netzimpedanzen oder durch gegenphasige Einspeisung der Steuerimpulse Gewähr dafür geboten ist, dass die Steuerspannungen nicht in unzulässiger Weise in benachbarte Netze eindringen.

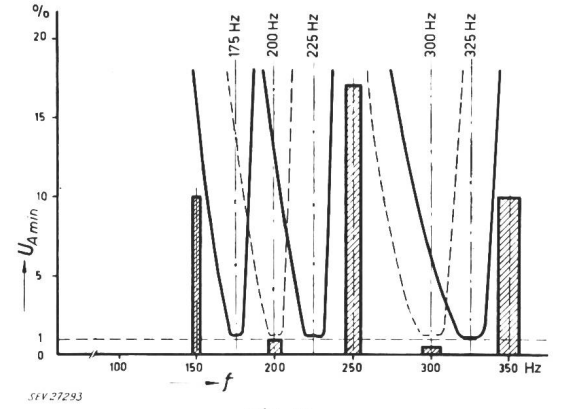

Fig. 13
Mögliche Placierung von 3 bzw. 5 voneinander unabhängigen Steuerkanälen im Frequenzbereich von 175...325 Hz

$U_{A\,min}$ minimal notwendige Ansprechspannung in Prozenten der 50-Hz-Netzspannung; f Frequenz

Oberwellengehalt

Sofern es sich in gewissen komplizierten Konglomerationen von eng vermaschten Netzen verschiedener Gesellschaften mit vernünftigen wirtschaftlichen und technischen Mitteln nicht vermeiden lässt, dass Steuerimpulse von einem Netz ins andere übertreten, besteht die Möglichkeit, den Netzen der verschiedenen Gesellschaften verschiedene Steuerfrequenzen zuzuteilen. Da die brauchbaren Frequenzbänder im Bereich extrem tiefer Frequenzen wegen des hohen Gehaltes an Harmonischen sehr knapp sind, bringt man jedoch in diesen speziellen Fällen eine genügende Anzahl von Kanälen (es sollten mindestens deren drei sein) nur unter, wenn man hochselektive Empfänger vorsieht. Fig. 13 zeigt, dass beispielsweise mit den Steuerfrequenzen von 175, 225 und 325 Hz in benachbarten Netzen gearbeitet werden kann, ohne dass gegenseitige Störungen zu befürchten sind. Allerdings müssen für solche Projekte verhältnismässig teure Empfänger mit mindestens zweigliedrigen mechanischen Filtern vorgesehen werden. Unter besonderen Umständen, d. h. wenn Gewähr dafür besteht, dass die 4. und 6. Harmonische immer unter 1 % bleiben, können zwei weitere Kanäle mit den Steuerfrequenzen von 200 und 300 Hz geschaffen werden (in Fig. 13 gestrichelt eingezeichnet).

III. Schlussbemerkungen

Die vorliegenden Ausführungen zeigen, dass es leider für Netzkommandoanlagen keine ganz ideale Steuerfrequenz gibt und dass man bei keiner Steuerfrequenz darum herumkommt, im Netz bestimmte Massnahmen zu treffen, um einen einwandfreien Betrieb der eigenen und benachbarter Netzkommandoanlagen sicherzustellen.

Bei mittleren und höheren Steuerfrequenzen liegen diese Massnahmen in Richtung der Verdrosselung gewisser Kondensatoren, bei extrem tiefen Steuerfrequenzen betreffen sie meist den Aufbau der Zwischen- und Hochspannungsnetze selbst. Die Anpassung der Hoch- und Zwischenspannungsnetze an die speziellen Erfordernisse von Netzkommandoanlagen mit extrem tiefen Frequenzen lässt sich am leichtesten bei sehr grossen Elektrizitätsgesellschaften realisieren. Als Musterbeispiel möge in dieser Beziehung die Electricité de France dienen, welche über sämtliche Netze eines ganzen Landes gebietet. Hier können alle notwendigen Massnahmen einfach befohlen und dann durchgeführt werden.

Grössere Schwierigkeiten entstehen aber meist dann, wenn für das ordnungsgemässe Funktionieren einer Netzkommandoanlage eines mittleren oder kleineren Elektrizitätswerkes Eingriffe im Netzaufbau benachbarter fremder Werke notwendig werden. Es ist deshalb vornehmste Aufgabe der verantwortlichen Persönlichkeiten der einzelnen Werke, in enger Zusammenarbeit mit den Fachleuten von Herstellern von Netzkommandoanlagen für jedes Netz die günstigste Steuerfrequenz und die technisch und wirtschaftlich beste Lösung zu finden. Dass mit dieser Lösung der Betrieb von bestehenden und für später geplanten Netzkommandoanlagen in Nachbarnetzen nicht beeinträchtigt werden darf, ist selbstverständlich.

Literatur

[1] *Hochrainer, H.:* Neueste Entwicklung auf dem Gebiet der Rundsteuerung. ÖZE Bd. 9(1956), Nr. 2, S. 56...58.

[2] *Kniel, R.:* Diskussionsbeitrag nach dem Referat «La télécommande centralisée à 175 Hz de l'Electricité de France» von *Henri Prigent.* Bull. Soc. franç. Electr., 7. Série, Bd. 6 (1956), Nr. 71, S. 740...746.

[3] *Grob, O.:* Die Planung von Netzkommandoanlagen mit überlagerten tonfrequenten Steuerimpulsen für grosse und grösste Netze. E u. M Bd. 73(1956), Nr. 13, S. 340...345.

[4] *Demontvignier, M.:* Conditions de coexistence locale de mutateurs et de dispositifs de télécommande «Actadis». Rev. gén. Electr. Bd. 57(1948), Nr. 6, S. 241...245.

[5] *Cahen, F.,* et *H. Prigent:* Le nouveau système de télécommande centralisée à 175 hertz adopté par Electricité de France. Rev. gén. Electr. Bd.64(1955), Nr. 10, S. 475...484.

[6] *Pettersson, G. A., L. Ahlgren* und *H. Forssell:* Perturbations téléphoniques et autres effets dus à la ligne de transport en courant continu du Gotland. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension (CIGRE), Paris 1958, Rapp. 324, 25 S.

Adresse des Autors:
O. Grob, Zellweger A.-G., Apparate- und Maschinenfabriken, Uster (ZH).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Aperçus sur une étude théorique générale du réglage de la fréquence et de la puissance d'échange des réseaux d'énergie électrique

621.311.161.072

[D'après *B. Favez:* Aperçus sur une étude théorique générale du réglage de la fréquence et de la puissance d'échange des réseaux d'énergie électrique. Bull. techn. Suisse rom. t. 84(1958), n° 13, p. 221...229]

Introduction

Il n'est pas question ici de reprendre la description des dispositifs de réglage des réseaux interconnectés, mais de donner quelques aperçus sur les méthodes employées au cours d'une étude théorique générale de réglage réalisée par la Direction des études et recherches de l'Electricité de France. L'exposé présenté traite le problème du réglage puissance–phase–énergie et définit les méthodes propres à fixer les valeurs des paramètres caractéristiques qui assurent le meilleur réglage.

Description succincte des circuits de réglage

A toute variation de charge consommée dans les réseaux équipés de régulateurs de vitesse à caractéristique statique correspond une variation corrélative de fréquence et de puissance d'échange. Afin de maintenir la fréquence et les puissances d'échange à des valeurs constantes compatibles avec les exigences de l'exploitation, il est nécessaire de superposer au réglage primaire réalisé par les régulateurs de vitesse des turbines, un réglage centralisé: le réglage secondaire. Le réglage puissance–phase–énergie représente une solution avantageuse qui rend aisé la mise en réglage secondaire d'un grand nombre de machines. Il permet ainsi d'améliorer la qualité du réglage tout en diminuant les efforts de réglage exigés à chaque machine réglante.

Une installation de réglage du type puissance–phase–énergie comprend deux équipements distincts: d'une part les organes centralisés qui élaborent les ordres de réglage ou paramètre de réglage $\Delta\psi$ à partir des écarts de fréquence Δf et de puissance d'échange ΔP_I et d'autre part les dispositifs individuels de chaque groupe réglant, assurant l'exécution des ordres de réglage $\Delta\psi$. Ce paramètre $\Delta\psi$ est défini par la relation bien connue:

$$\Delta\psi = \left(\beta + \frac{\varkappa}{p}\right)\left(\Delta f + \frac{\Delta P_I}{\lambda}\right)$$

où
p opérateur
β coefficient de stabilisation
$\varkappa$ pente de réglage
λ énergie réglante.

Chaque machine réglante est asservie par le dispositif individuel à l'ordre de réglage $\Delta\psi$ qui est envoyé à celles-ci depuis le régulateur centralisé par un réseau approprié de télémesures.

Mise en équation. Définition des paramètres caractéristiques

L'augmentation de la rapidité d'action du réglage secondaire ne permet plus de séparer dans le temps les actions des réglages primaires et secondaires. La mise en équation du système de réglage en tenant compte de toutes les caractéristiques différentes des machines, régulateurs primaires et réseaux, conduit à des expressions très complexes. On se contentera ici de considérer deux réseaux interconnectés alimentés par des groupes de même nature participant tous au réglage secondaire. Dans ces conditions, l'ensemble des groupes est assimilé à une seule machine et il est possible d'établir un système d'équations régissant le réglage de deux réseaux A et B, de puissance respective P_A et P_B avec une puissance d'échange de P_I. Ce système d'équations après développement comporte les 4 relations suivantes représentées en notation symbolique (p = opérateur):

1. Equation des masses tournantes rapportée à $P = P_A + P_B$:

$$[(N_A T_A + N_B T_B)\,p + N_A\gamma_A + N_B\gamma_B]\,\Delta f = \Delta C_m - \Delta C_r$$

où

$N_A = P_A/P$
$N_B = P_B/P$

T_A, T_B temps de lancer des réseaux
γ_A, γ_B coefficients d'autoréglage global
ΔC_m, ΔC_r variations des couples moteur et résistant

2. Equation du couple résistant ΔC_r:

$$\Delta C_r = \Delta\Pi_A + \Delta\Pi_B$$

où

$\Delta\Pi_A$, $\Delta\Pi_B$ variations respectives des puissances des réseaux A et B

3. Equation du couple moteur des turbines ΔC_m:

$$\Delta C_m = \frac{F_A}{1 - F_A/M_p}\left[\Delta f\left(\frac{N_A}{\delta} - \frac{T_A\,N_A}{M}\right) + \frac{N_A(1+\alpha_{mA})}{Mp}\Delta f + \frac{1}{Mp}\left(\frac{N_A\,\alpha_A}{p} + N_A\beta_A\right)\left(\Delta f + \frac{\Delta P_I}{\lambda_A}\right)\right] + \frac{F_B}{1 - F_B/Mp}\left[\Delta f\left(\frac{N_B}{\delta} - \frac{T_B\,N_B}{M}\right) + \frac{N_B(1+\alpha_{mB})}{Mp}\Delta f + \frac{1}{Mp}\left(\frac{N_B\,\varkappa_B}{p} + N_B\beta_B\right)\left(\Delta f + \frac{\Delta P_I}{\lambda_B}\right)\right]$$

4. Equation de la puissance d'échange ΔP_I:

$$\Delta P_I = \Delta C_{mA} - \Delta\Pi_A - [N_A\,T_A\,p + N_A\gamma_A]\,\Delta f$$

Ces équations comprennent un grand nombre de paramètres. Le réglage primaire est caractérisé par les termes suivants:

F_A, F_B fonctions de transfert des régulateurs primaires
δ statisme permanent
T_A, T_B temps de lancer des réseaux.

Le réglage secondaire de son côté est défini par les paramètres suivants:

λ_A, λ_B énergie réglante de réglage
$\varkappa_A$, $\varkappa_B$, α_{mA}, α_{mB} pente de réglage
β_A, β_B coefficients de stabilisation
M temps caractéristique du réglage secondaire.

Le comportement du système de réglage est parfaitement défini par les 4 relations ci-dessus.

Méthodes d'étude de la qualité du réglage

A l'aide de ces 4 relations, il est possible d'étudier les critères qui conduisent à une bonne qualité de réglage. Si l'on retient comme facteur de qualité du réglage la valeur de l'erreur quadratique moyenne $\sqrt{\varepsilon^2}$ des écarts de fréquence Δf et de puissance d'échange ΔP_I, la qualité du réglage sera d'autant meilleure que l'erreur quadratique moyenne est réduite. Dans les grands réseaux c'est le réglage des puissances d'échange qui importe, car les variations de fréquence sont réduites par l'ampleur des réseaux. L'erreur type $\sqrt{\Delta P_I^2}$ de la puissance d'échange peut être calculée par la connaissance de la densité spectrale des variations de charge des deux réseaux $A_A(\nu)$ et $A_B(\nu)$ (la charge varie selon une fonction aléatoire) et de la caractéristique harmonique $g(\nu)$ de la chaîne de réglage selon la relation: