Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 1

Artikel: Grundlagen über Entstehung und Ausbreitung niederfrequenter Störeinflüsse

Autor: Schadegg, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915249

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: 16.07.2025

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

Beiträge zu Fragen der niederfrequenten Netzrückwirkungen

Die niederfrequenten Netzrückwirkungen haben in den letzten Jahren infolge der starken Entwicklung in der Halbleitertechnik zugenommen. Verschiedene Gremien, so die Kommission des SEV zum Studium niederfrequenter Störeinflüsse mit ihren verschiedenen Arbeitsgruppen, die Kommission des VSE für Fragen der Rundsteuertechnik mit ihrer Arbeitsgruppe für niederfrequente Netzeinflüsse sowie internationale Gremien, befassen sich deshalb in letzter Zeit intensiv mit den anfallenden Problemen. Im November 1974 orientierten der SEV und der VSE an einer zweitägigen Versammlung eingehend über die verschiedenen Gesichtspunkte. Die erwähnte VSE-Kommission und insbesondere deren Arbeitsgruppe befassen sich seit 1969 mit den Auswirkungen der oberwellenerzeugenden Apparate auf die Verteilnetze. Die nachstehenden Berichte stützen sich weitgehend auf die bisher gemachten Erfahrungen und stellen einen Beitrag zum Problem der niederfrequenten Netzbeeinflussungen dar.

Contributions aux problèmes des répercussions à basse fréquence sur les réseaux

Les répercussions à basse fréquence sur les réseaux de distribution ont augmenté ces dernières années, suite à la forte expansion de la technique des semi-conducteurs. C'est pourquoi divers groupements, tels que la Commission de l'ASE pour l'étude des perturbations à basse fréquence, avec ses différents groupes de travail, la Commission de l'UCS pour les questions de télécommande centralisée, avec son groupe de travail pour les problèmes des perturbations à basse fréquence dans les réseaux électriques de distribution, enfin d'autres groupements internationaux, s'occupent intensément depuis peu des problèmes qui se présentent. Au mois de novembre 1974, lors d'une assemblée de deux jours, l'ASE et l'UCS ont renseigné en détail sur les différents points de vue en présence. Depuis 1969 la commission susmentionnée de l'UCS et en particulier son groupe de travail s'occupent des effets des appareils qui engendrent des harmoniques dans les réseaux de distribution. Les rapports qui suivent sont une contribution à la solution des problèmes relatifs aux perturbations à basse fréquence dans les réseaux.

Grundlagen über Entstehung und Ausbreitung niederfrequenter Störeinflüsse

Von W. Schadegg

Unter den elektronischen Leistungsregelungen sind die Phasenanschnitt- und die Schwingungspaketsteuerungen stark verbreitet. Diese sind nachstehend kurz beschrieben. Im weitern werden die grundsätzlichen Auswirkungen und Verlustverhältnisse der Phasenanschnittsteuerung erläutert.

Parmi les réglages électroniques de la puissance, les commandes par trains d'alternance et par déplacement du point d'allumage sont très répandues. Elles sont brièvement décrites ci-après. L'auteur explique les effets fondamentaux et les pertes résultant du réglage par déplacement du point d'allumage.

Die Forschung auf dem Gebiet der Halbleiter-Werkstoffe hat in den letzten Jahren Bauelemente mit immer höheren Sperrspannungen und besserer Durchlass-Leitfähigkeit hervorgebracht. Durch Rationalisierung der Fabrikation sind Preisreduktionen erzielt worden, welche die Anwendung von Halbleiter-Bauteilen auch in der Starkstromtechnik stark gefördert haben. So können gesteuerte Halbleiter als nahezu ohne Verlust arbeitende Wechselstromschalter benützt werden, deren Einschaltzeitpunkt in bezug auf die Spannungs-Sinuskurve frei gewählt und deren Ausschaltzeitpunkt für einen der folgenden Strom-Nulldurchgänge vorgegeben werden kann.

Dies führt zu den zwei folgenden, grundsätzlich verschiedenen Steuerungsarten.

1. Die Schwingungspaket-Steuerung (Fig.1)

Hier wird der Stromdurchgang während einer bestimmten Anzahl von Perioden freigegeben und während einer bestimmten Anzahl der folgenden Perioden gesperrt. Mit der Variation der Durchgangs- und der Sperrzeit kann die Energieaufnahme des Verbrauchergerätes verändert werden. Diese Art der Steuerung hat eine stossweise Stromaufnahme zur Folge, welche rhythmische Spannungsabsenkungen hervorruft. Solche Schwankungen können je nach Leistung des gesteuerten Verbrauchers und der Impedanz der Speiseleitung besonders bei Beleuchtungen für das Auge unangenehme Helligkeitsschwankungen hervorrufen, die als Flicker bezeichnet werden.

2. Die Phasenanschnitt-Steuerung (Fig.2)

Hier wird der Stromfluss gegenüber dem Spannungs-Nulldurchgang verzögert freigegeben. Durch Variation der Verzögerungszeit kann die Energieaufnahme des Verbrauchers verändert werden. Der der Verzögerungszeit entsprechende elektrische Winkel wird allgemein als Anschnittwinkel α bezeichnet.

Bei einer Strom-Kurvenform, welche die schraffierte Fläche umschliesst, setzt sich der Strom nicht mehr nur aus der Grundschwingung, sondern noch aus einer grossen Zahl von Strömen höherer Frequenz, den sogenannten Oberschwingungen, zusammen, denen wir uns im folgenden speziell zuwenden wollen.

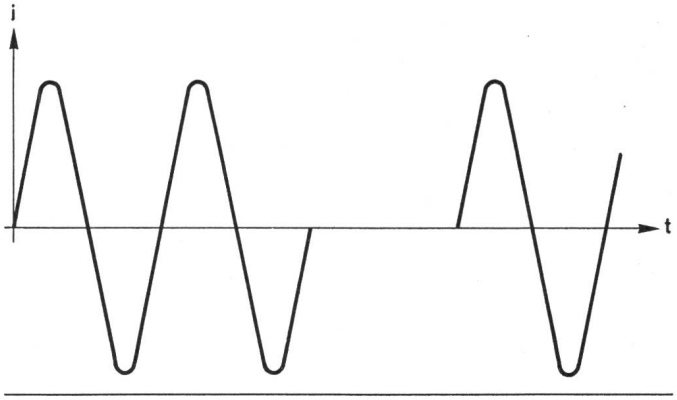

Fig. 1 Schwingungspaket-Steuerung

2.1 Berechnungsgrundlagen

Der französische Mathematiker Jean Baptiste Fourier hat bewiesen, dass jede periodische Funktion durch folgende Reihe dargestellt werden kann:

$$y = f(x) = a_0 + a_1 \cos x + a_2 \cos 2x + a_3 \cos 3x + \ldots + b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + b_3 \sin 3x + \ldots$$

Die Bestimmung der Koeffizienten a_0, a_1, a_2, a_3 ..., b_1, b_2 b_3, ... ergibt als Resultat:

Bei gleichem Anschnitt der positiven und der negativen Halbwelle, dem sogenannten *symmetrischen Anschnitt,* treten nur *ungeradzahlige Vielfache* der Grundschwingung auf.

Bei *Anschnitt von nur einer Halbwelle* ergeben sich *ein Gleichstromglied* und *gerad- und ungeradzahlige Vielfache* der Grundschwingung.

In Fig. 3 sind die bei symmetrischem Anschnitt und ohmscher Belastung entstehenden Oberschwingungen und der Verlauf von Amplitude und Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$ der Grundschwingung in Funktion des Anschnittwinkels α dargestellt.

Es ist daraus ersichtlich, dass bei der 3. und 7. Oberschwingung der Maximalwert bei einem Anschnittwinkel 90°, bei der 5. und 9. Oberschwingung je zwei Maximalwerte bei einem Anschnittwinkel symmetrisch zu 90° auftreten.

Bei der Grundschwingung erkennt man, dass bei einem Anschnittwinkel von 90° die Amplitude auf etwa 59 % des ursprünglichen Wertes und der Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$ auf 0,84 gesunken ist. Bei einem Anschnittwinkel von 135° betragen der Amplitudenwert noch etwa 18 % und der Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$ noch 0,48.

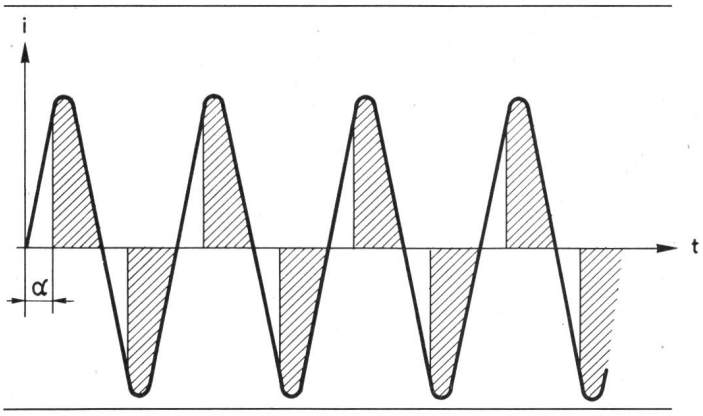

Fig. 2 Phasenanschnitt-Steuerung

2.2 Oberschwingungen bestimmter Ordnungszahlen

2.2.1 Oberschwingungsströme
mit durch 3 teilbarer Ordnungszahl

Fig. 4 zeigt, dass in einem symmetrischen Drehstromsystem die Ströme der 3. Oberschwingung und aller weiteren, in Fig. 4 nicht eingezeichneten mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen mit jedem Phasenstrom in Phase sind. Es können sich deshalb zwischen den Phasenleitern auch keine Oberschwingungsspannungen dieser Ordnungszahlen ausbilden. Hingegen fliessen alle Oberschwingungs-Phasenströme mit durch 3 teilbarer Ordnungszahl gemeinsam über einen vorhandenen Nulleiter zum Transformator und über die entsprechenden Wicklungen und Phasenleiter zurück zum Erzeuger.

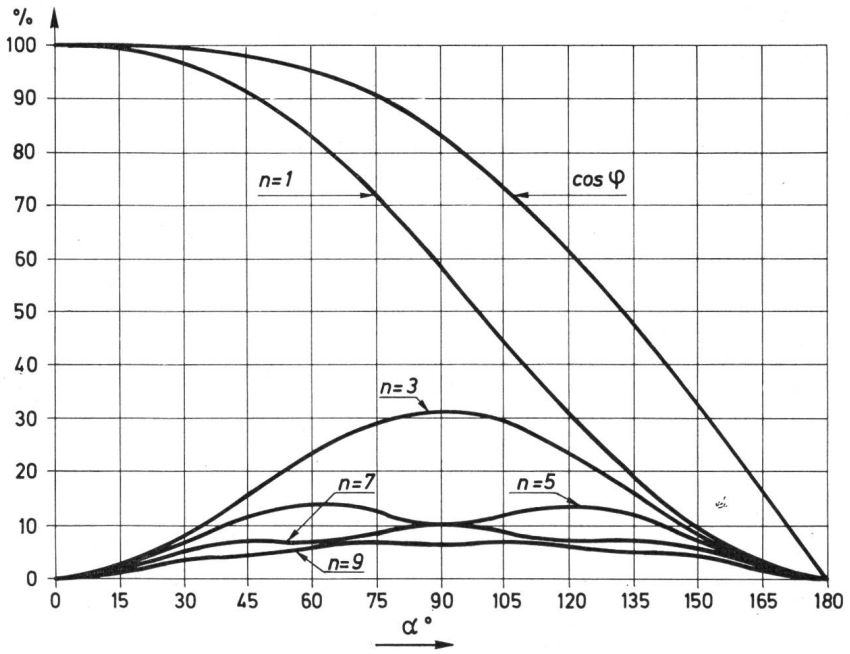

Fig. 3
Amplitude der bei symmetrischem Anschnitt und ohmscher Belastung entstehenden Oberschwingungen und Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$ in Abhängigkeit des Anschnittwinkels α
n Ordnungszahl (Vielfaches von 50 Hz)

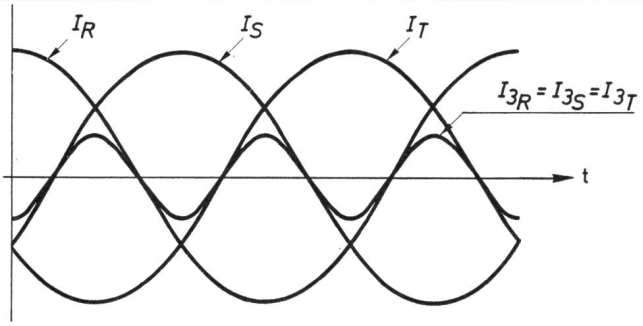

Fig. 4
Symmetrisches Drehstromsystem:
Alle durch drei teilbaren Oberschwingungen heben sich auf
(nur 3. Harmonische der drei Phasen eingetragen)

2.2.2 Oberschwingungsströme
bei Gleichrichtern mit verschiedenen Pulszahlen

Mit der Erhöhung der Pulszahl (= Zahl der pro Periode der Grundschwingung gezündeten Ventile) reduziert sich auch die Zahl der Oberschwingungsfrequenzen. Aus Fig. 5 ist ersichtlich, dass durch Betrieb eines Zweiweg-Gleichrichters mit Drehstrom, entsprechend einer sechspulsigen Schaltung, die Oberschwingungen mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen eliminiert werden. Aus Fig. 6 geht hervor, dass sich z. B. durch Zusammenschaltung von zwei symmetrischen Drehstrombrücken, gespiesen von je einem Transformator in Schaltung Stern/Stern und Dreieck/Stern mit entsprechenden Übersetzungsverhältnissen zu einer zwölfpulsigen Schaltung, weitere Oberschwingungen mit bestimmten Ordnungszahlen aufheben.

3. Schwingungsausbreitung

3.1 Ausbreitung im Niederspannungsnetz

Für die Betrachtung der Oberschwingungsausbreitung in einem Niederspannungsnetz kann man sich an das zweipolige Ersatzschema nach Fig. 7 halten.

Die vom Phasenanschnittgerät als Oberschwingungsgenerator erzeugten Ströme fliessen hauptsächlich über die speisende Leitung und den Netztransformator, die naturgemäss gegenüber den Verbrauchern den relativ kleinsten Widerstand aufweisen. Für die Berechnung der Spannungsabfälle kann die Impedanz des speisenden Hochspannungsnetzes praktisch vernachlässigt werden, und die Impedanz Z_T des Transformators kann unter Vernachlässigung der ohmschen Verluste auf dessen Kurzschluss-Reaktanz X_{TK} zurückgeführt werden.

Die Impedanz Z_L der Leitung unter Vernachlässigung des Ableitwiderstandes (als sehr hohem Parallelwiderstand) und der zwischen den Leitern vorhandenen Kapazität (im Tonfrequenzbereich bei Niederspannungskabeln ohne Einfluss) weist ebenfalls induktiven Charakter auf.

Die Reaktanz, d. h. der Blindwiderstand, der Leitung und des Netztransformators nehmen also mit steigender Frequenz zu.

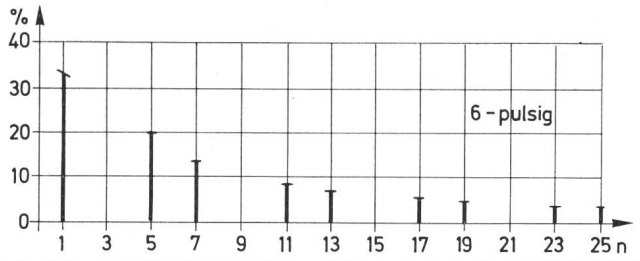

Fig. 5 Zweiweggleichrichter mit Drehstrom (6pulsige Schaltung): Die Oberschwingungen mit durch drei teilbaren Ordnungszahlen treten nicht auf
n Ordnungszahl

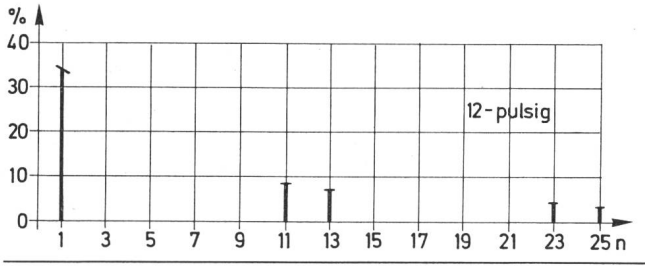

Fig. 6 Durch Zusammenschaltung von zwei symmetrischen Drehstrom-Brücken heben sich weitere Oberschwingungen bestimmter Ordnungszahlen auf (in Fig. die 5., 7., 17. und 19. Harmonische)
n Ordnungszahl

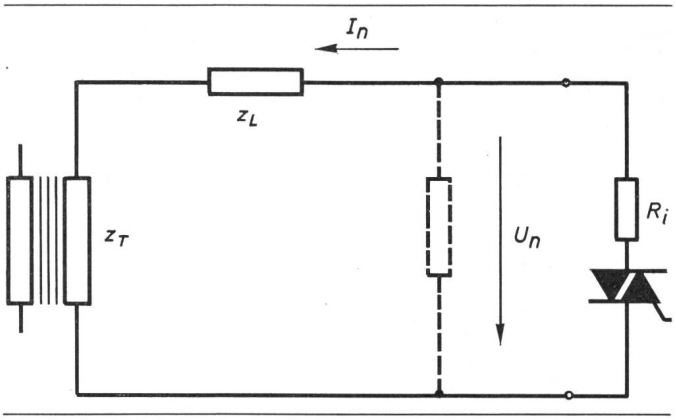

Fig. 7 Zweipoliges Ersatzschema des Niederspannungsnetzes mit Verbraucher
z_T Transformator-Impedanz
z_L Leitungs-Impedanz
R_i Innenwiderstand des Verbrauchers
$U_n = I_n (z_L + z_T)$
$z_T \approx X_{TK} = j\omega L_{TK}$
$z_L = R + j\omega L_L$

3.1.1 Einfluss eines gesperrten Kondensators
auf die Netz-Reaktanz

Um die Ausbreitung der von einem Phasenanschnittgerät erzeugten Oberschwingungsströme über die speisende Leitung zu verhindern, wäre es am naheliegendsten, parallel dazu einen Kondensator einzubauen. Da dessen Reaktanz X_c ja bekanntlich mit steigender Frequenz abnimmt, würde er die Oberschwingungsströme praktisch kurzschliessen. Damit aber die Wirksamkeit der von der Rundsteueranlage ausgesendeten Steuerimpulse nicht beeinträchtigt wird, muss dem Kondensator mindestens eine Sperrdrossel, besser aber noch ein auf die Steuerfrequenz abgestimmter Sperrkreis vorgeschaltet sein.

In Fig. 8 ist eine Niederspannungs-Freileitung von 300 m Länge dargestellt, welche von einem Transformator von 400 kVA und $\varepsilon = 4\,\%$ gespiesen wird. An deren Ende ist zur Kompensation des Blindstromes ein Kondensator mit einem auf die Sendefrequenz von 750 Hz abgestimmten Sperrkreis angeschlossen. Beide Schaltelemente weisen zusammen eine Serieresonanzfrequenz von 515 Hz auf.

In Fig. 9, welche den Reaktanzverlauf der Schaltung nach Fig. 8 zeigt, sind die Reaktanzwerte bei diesen beiden Frequenzen ersichtlich.

515 Hz Widerstand von Sperre und Kondensator = 0
Gesamtreaktanz = 0

750 Hz Widerstand von Sperre und Kondensator = ∞
Gesamtreaktanz = Transformator- und Leitungsreaktanz

Die beiden vom Nullpunkt ausgehenden Geraden geben zum Vergleich den Betrag der Transformator- und Leitungsreaktanz für sich allein an.

Fig. 9 zeigt noch zwei weitere Parallelresonanz- oder Sperrstellen, welche sich ebenfalls mathematisch und physikalisch erklären lassen.

Der ganze Reaktanzverlauf wurde aufgezeichnet unter Annahme verlustloser Schaltelemente, d. h., bei den bezeichneten Frequenzen *können* sich Resonanzen ausbilden. Ist aber die Dämpfung der Schwingkreise zu gross, oder mit andern Worten: sind die ohmschen Widerstände, mit denen besonders die Induktivitäten behaftet sind (z. B. der ohmsche Leitungswiderstand), relativ gross, so ist es möglich, dass diese Resonanz-

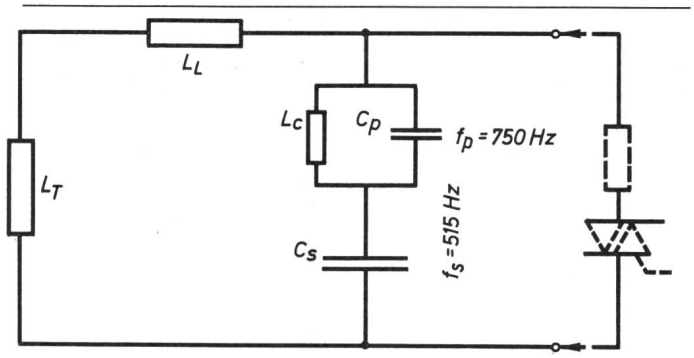

Fig. 8 Einfluss eines gesperrten Kondensators auf die Netz-Reaktanz
Zweipoliges Ersatzschema

L_T Transformator-Induktivität
L_L Leitungs-Induktivität
L_c Sperren-Induktivität
C_p Sperren-Kapazität
C_s zu sperrender Kondensator

stellen in der Praxis nicht stark in Erscheinung treten. In Fig. 9 ist diese Tatsache durch die gestrichelten Linien angedeutet, welche in der Nähe der Resonanzstellen von der ausgezogenen Kurve abzweigen.

3.2 Ausbreitung im Hochspannungsnetz

Beim vorhergehend betrachteten Fall im Niederspannungsnetz wurde die Leitungsreaktanz als an einem Ort konzentriert angenommen. Diese Annahme ist für Berechnungen im Hochspannungsnetz mit meist bedeutend längeren Leitungen nicht mehr zulässig. Man muss sich hier der Vierpolgleichungen mit den Begriffen Wellenwiderstand, Übertragungsmass, Reflexionsfaktor usw. bedienen.

Tabelle I

P/P_0	$a=0$	$a=0{,}1$	$a=0{,}25$	$a=0{,}5$	$a=1$
1,0	1	1	1	1	1
0,75	1	1	1,02	1,08	1,33
0,50	1	1,01	1,06	1,25	2,0
0,25	1	1,03	1,19	1,75	4,0
0,20	1	1,04	1,25	2,0	5,0
0,15	1	1,06	1,35	2,42	6,66
0,10	1	1,10	1,56	3,25	10

4. Verluste bei Belastungsregulierung durch Phasenanschnitt

4.1 Verluste ohne Phasenanschnitt-Steuerung

Bei diesem Belastungsfall sind die Verluste bei sinusförmigem Strom quadratisch von der dem Netz entnommenen Leistung P_0 abhängig.

4.2 Verluste bei Phasenanschnitt-Steuerung

Erfolgt die Leistungsregulierung durch Phasenanschnitt, so beginnt erst vom Anschnittzeitpunkt an ein Strom zu fliessen. Bildet man das Verhältnis zwischen der Leistung bei Phasenanschnitt und ursprünglicher Leistung, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang von Verlusten und Belastung.

4.3 Verluste bei teils angeschnittenem, teils sinusförmigem Strom

Bezeichnet man den Anteil des angeschnittenen Stromes als $a \cdot i$ und den Anteil des sinusförmigen Stromes als $(1-a) \cdot i$, so kann ein Zusatz-Verlustfaktor fz berechnet werden:

$$fz = \frac{1 - (1 - a^2)(1 - g)}{g} \qquad g = \frac{P}{P_0}$$

Dieser Zusatzfaktor fz ist in der Tabelle I für verschiedene Leistungs-Reduktionsverhältnisse P/P_0 in Abhängigkeit des Anteils a der angeschnittenen Last angegeben (z. B. Last 100 %, aufgeteilt in 50 % sinusförmige und 50 % angeschnittene Last, auf total 20 % reduziert, ergibt bereits den Zusatzfaktor 2; also doppelte Verluste).

Diese Berechnungen beziehen sich aber rein auf die Grundschwingungsverluste. Die Zusatzverluste durch die bei Phasenanschnitt entstehenden Oberschwingungen und die Nulleiterverluste der Oberschwingungen mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen sind dabei nicht berücksichtigt worden.

Die für den Energiebezüger mit grossen Annehmlichkeiten verbundene stufenlose Leistungsregulierung führt auf der Seite des Energielieferanten zu verschiedenen Problemen. Dies war deshalb ein kleiner Überblick über die Gesetzmässigkeiten, welche für die Erzeugung und Ausbreitung von Oberschwingungen sowie für die dabei entstehenden Verluste gelten.

Adresse des Autors:
W. Schadegg, Leiter der Zähler- und Uhrenabteilung des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich, Postfach, 8023 Zürich.

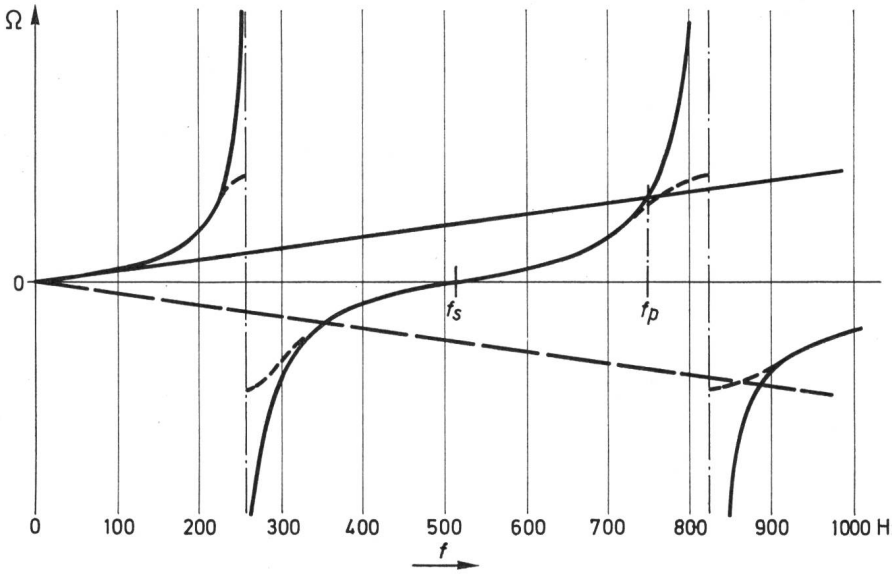

Fig. 9
Einfluss eines gesperrten Kondensators auf die Netz-Reaktanz – Reaktanzverlauf der Schaltung nach Fig. 8
f_s Serieresonanz-Frequenz
f_p Parallelresonanz-Frequenz