Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 13

Artikel: Netzstromoberwellen und Leistungsfaktor bei Anlagen mit mehreren stromrichtergespeisten Gleichstrommotorantrieben

Autor: Lakota, J. / Rotz, R. von

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915709

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: 25.12.2025

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

Netzstromoberwellen und Leistungsfaktor bei Anlagen mit mehreren stromrichtergespeisten Gleichstrommotorantrieben

Von *J. Lakota* und *R. von Rotz*, Dierikon

621.313.2:621.3.018.32:621.3.018.14

Der Vorgang für die Berechnung der Netzstromoberwellen und des Leistungsfaktors für Mehrmotoranlagen wird angegeben. Wegen des grossen Rechenaufwandes wurde für die konkreten Berechnungen ein Digitalprogramm aufgestellt. Einige Berechnungsbeispiele zeigen quantitativ den Einfluss verschiedener Grössen und Betriebsbedingungen. Die Ergebnisse für einen Einzelantrieb und eine vereinfachte Anlage ermöglichen eine bessere Abschätzung der einfachen Fälle, als das aufgrund der oft anzutreffenden Annahme (ein Einzelantrieb mit grosser Induktivität im Ankerkreis) möglich war. Bei Grossanlagen können die genaueren Ergebnisse mit aufgestelltem Programm schnell berechnet werden.

On indique la manière de calculer les harmoniques du courant du réseau et le facteur de puissance dans les installations comportant plusieurs moteurs. Par suite de ces comptes très longs et fastidieux, on a établi pour des calculs concrets un programme numérique. Quelques exemples de calcul illustrent quantitativement l'influence des diverses grandeurs et conditions de service. Les résultats acquis pour un entraînement individuel et une installation simplifiée permettent, dans des cas simples, une meilleure évaluation que dans le cas d'une présomption très fréquente (entraînement individuel avec inductance élevée dans le circuit de l'induit). Dans les grandes installations, les résultats précis peuvent être calculés rapidement à l'aide des programmes établis.

Verwendete Buchstabensymbole

Bezeichnungen

t Zeit (s)

Motorgrössen:

Physikalische Grössen:

E Motor EMK (V);
I Ankerstrom, Mittelwert (A);
I_f Feldstrom (A);
U Ankerspannung, Mittelwert (V);
M_L Lastdrehmoment (Nm). $M_L > 0$ für motorischen, $M_L < 0$ für generatorischen Betrieb;
M_v Verlustdrehmoment (mechanische und elektrische Verluste). $M_v > 0$ (Nm);
n Drehzahl (U./min);
R Ohmscher Widerstand (Ω) im Ankerkreis;
L Induktivität (H) im Ankerkreis.

Basisgrössen:

I_s Nennankerstrom (A)
E_s Nenn-EMK (V)
I_{fs} Nennfeldstrom (A)
M_s Nenndrehmoment (Nm)
n_s Nenndrehzahl (U./min)

Dimensionslose (bezogene) Grössen:

$\overline{E}$ ist z. B. bezogene EMK: $\overline{E} = \dfrac{E}{E_s}$

$\overline{R}$ ist bezogener Ankerwiderstand: $\overline{R} = \dfrac{I_s R}{E_s}$

Stromrichtergrössen:

m Pulszahl des Stromrichters;
f Frequenz der Speisespannung (Hz);
$U_\sim$ Effektivwert der Speisespannung (V). (Die Phasenspannung für die Dreiphasen-Mittelpunktschaltung, die verkettete Spannung für die Dreiphasen-Brückenschaltung.)
$g_s = \dfrac{E_s}{\sqrt{2}\, U_\sim}$ Verhältnis der Nenn-EMK des Motors zur Amplitude der Speisespannung;
α Zündwinkel (rad);
γ Leitdauerwinkel im Lückenbetrieb (rad).

Hilfsgrössen:

$$\nu = \frac{2\pi}{m};\ \omega = 2\pi f;\ \vartheta = \omega \frac{L}{R};\ \psi = -\arctan \vartheta;$$

$$\varrho = e^{-\frac{\nu}{\vartheta}};\ g = \frac{E}{\sqrt{2}\, U_\sim} = g_s \overline{E}$$

Netzstrom:

k Ordnungszahl der Harmonischen;
a_{k_n}, b_{k_n} Cosinus- und Sinuskomponenten der k-ten Harmonischen des Netzstromes (s. Fig. 6);
$I_{k_n} = \dfrac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_{k_n}^2 + b_{k_n}^2}$ Effektivwert der k-ten Harmonischen (A);
$\cos \varphi_{k_n} = \dfrac{b_{k_n}}{\sqrt{2}\, I_{k_n}}$ Verschiebungsfaktor der k-ten Harmonischen;
$I_n = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{k_n}^2}$ Effektivwert des Netzstromes (A);
$K = \dfrac{1}{I_n} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{k_n}^2}$ Oberschwingungsgehalt (Klirrfaktor);
$\cos \varphi = \dfrac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}} = \dfrac{I_{1_n}}{I_n} \cos \varphi_{1n}$ Leistungsfaktor

1. Einleitung

Die im Ankerkreis stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine stellt für den Stromrichter eine Ohmisch-induktive Last (R, L-Last) mit Gegenspannung (E) dar. Bei einer grossen Ankerzeitkonstante ($T = L/R$) ist der Ankerstrom praktisch ein Gleichstrom. Meistens wird von dieser Annahme ausgegangen [1; 2; 3][1]). Ist I_{1_n} der Effektivwert der Grundwelle des Netzstromes und I_{k_n} der Effektivwert der Netzstromoberwelle der Ordnung k, so gilt in diesem Fall die Beziehung $I_{k_n} = I_{1_n}/k$. Das bedeutet z. B., dass der Effektivwert der 5-ten Netzstromoberwelle ($k = 5$) 20 % des Effektivwertes der Grundwelle des Netzstromes ausmacht. Bei oft anzutreffenden kleineren Werten der Ankerzeitkonstante kann jedoch der Ankerstrom vom Gleichstrom stark abweichen. Die Abweichung wird grösser bei kleinerer Pulszahl des Stromrichters, kleinerer Motor-EMK und kleinerem Mittelwert des Ankerstromes. Die einfache Beziehung für Netzstromoberwellen ($I_{k_n} = I_{1_n}/k$) liefert dann Ergebnisse, die auch für den Fall eines einzigen Antriebes mit relativ grossen Fehlern behaftet sein können. Meistens liegen Anlagen mit vielen Antrieben vor. Eine genauere Aussage über

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

die Netzstromoberwellen ist dann erschwert, besonders da einzelne Antriebe verschiedene Daten haben können und bei verschiedenen Betriebsverhältnissen arbeiten. So kann sich z. B. ein Teil der Antriebe im generatorischen Betrieb befinden. Je grösser die Anlagen sind, desto mehr ist man an einer genaueren Bestimmung der Netzstromoberwellen und der Effektivwerte der Ströme in der Anlage interessiert. Ebenso soll der Leistungsfaktor genauer bestimmt werden können.

Hier wird der Berechnungsvorgang für Mehrmotoranlagen gezeigt. Das aufgestellte Digitalprogramm wird dann zuerst für die Berechnung eines Antriebes bei Belastung mit Nennankerstrom, für verschiedene Werte der EMK und verschiedene Werte der Ankerzeitkonstante angewendet. Weiter folgt das Beispiel einer Anlage, bei der der Anteil der generatorisch arbeitenden Antriebe geändert wird. Am Ende sind die Ergebnisse für eine Grossanlage gegeben.

Diese Beispiele zeigen quantitativ den Einfluss verschiedener Grössen, Parameter und Betriebsbedingungen auf die Netzstromoberwellen und den Leistungsfaktor und ermöglichen, einfachere Fälle genauer abzuschätzen, als auf Grund der Ergebnisse für einen Antrieb mit grosser Induktivität im Ankerkreis möglich war. Die kompliziertesten Fälle lassen sich mit dem aufgestellten Digitalprogramm schnell berechnen.

2. Die Berechnungsgrundlagen

2.1 Voraussetzungen

Es sollen die Betriebsfälle wie motorisch-generatorisch, mit lückenlosem oder lückenhaftem Ankerstrom berücksichtigt werden. Dabei sollen die meistgebrauchte vollgesteuerte Dreiphasenbrückenschaltung ($m = 6$) und die (bei kleineren Leistungen mehr anzutreffende) vollgesteuerte Dreiphasenmittelpunktschaltung ($m = 3$) des Stromrichters betrachtet werden. Vorausgesetzt sind ein symmetrisches System der sinusoidalen Speisespannungen sowie die symmetrischen Steuerpulse des Stromrichters. Die Spannungsabfälle der Stromrichterventile sind vernachlässigt. Dasselbe gilt für die Kommutierungsimpedanzen. Die Vernachlässigung der Kommutierungsimpedanzen, die zu einer wesentlichen Vereinfachung der Berechnung führt, dürfte unter Umständen von allen getroffenen Vereinfachungen die grössten Fehler zur Folge

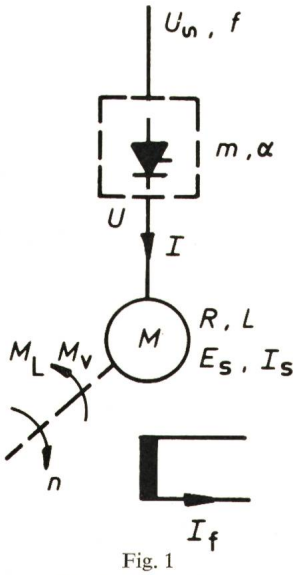

Fig. 1
Die Grundanordnung
Bezeichnungen siehe im Text

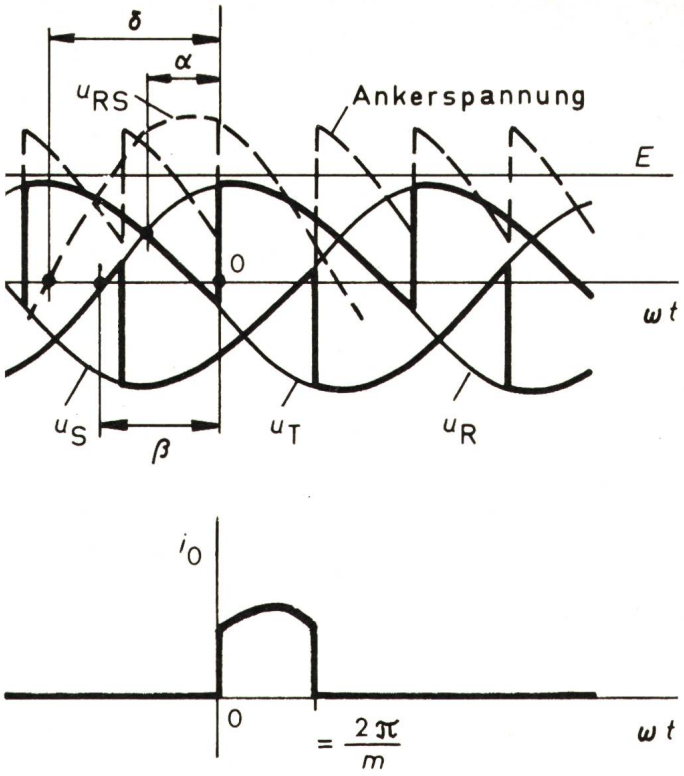

Fig. 2
Spannungs- und Stromverhältnisse des Stromrichters
(Dreiphasenbrückenschaltung)
Bezeichnungen siehe im Text

haben. Durch diese Vereinfachung folgt allgemein ein höherer Oberwellengehalt und ein höherer Leistungsfaktor des Netzstromes. Oft liegen jedoch so kleine Kommutierungsimpedanzen vor, dass diese Fehler nicht ausschlaggebend sind.

2.2 Die Grundanordnung

Die stationären Betriebsverhältnisse eines Antriebes werden mit Hilfe der Grundanordnung (Fig. 1) definiert. Gezeigt ist der Fall des motorischen Betriebes. Gegeben sind $U_\sim$, f, m, R, L, E_s, I_s als die Grössen, die den Stromrichter und den Motor bestimmen. Die Betriebsbedingungen werden zweckmässigerweise durch die bezogenen Grössen $\overline{M}_L$, $\overline{M}_V$, $\overline{n}$ und $\overline{I}_f$ gekennzeichnet.

Es gilt:

$$\overline{E} = \overline{I}_f \overline{n}$$

$$\overline{I} = \frac{\overline{M}_L + \overline{M}_V}{\overline{I}_f} \tag{1a}$$

$$U = \overline{E} E_s + \overline{I} I_s R$$

Die Art des Betriebes (motorisch oder generatorisch) wird durch

$$x = \operatorname{sign}(\overline{M}_L + \overline{M}_V) \tag{1b}$$

gekennzeichnet. Das ergibt $x = +1$ für motorischen und $x = -1$ für generatorischen Betrieb.

2.3 Teilstrom des Stromrichters

Fig. 2 legt den weiter angewendeten Beginn der Zeitrechnung ($\omega t = 0$) am Beispiel der Dreiphasenbrückenschaltung fest. $\omega t = 0$ entspricht hier dem Zündaugenblick des Thyristors, dessen Anode z. B. an die Phase R der Speisequelle angeschlossen ist. Mit u_R ist die Spannung der Phase R, mit u_{RS} jene zwischen den Phasen R, S bezeichnet. In Fig. 2 ist auch

ein Teil des Ankerstromes im Zeitintervall $0 \leqq \omega t \leqq 2\pi/m$ angegeben. Weiter wird dieser Strom als Teilstrom i_0 bezeichnet. Gezeigt ist der Fall, der dem lückenlosen Ankerstrom entspricht. Der Ankerstrom im Zeitintervall 0 bis 2π setzt sich aus m solchen um $2\pi/m$ gegeneinander verschobenen Teilströmen zusammen. Weiter sind in Fig. 2 die Winkel α, β und δ definiert. Im Falle eines lückenlosen Ankerstromes gilt für den Zündwinkel α unter gemachten Voraussetzungen:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U x}{U_\sim \frac{\sqrt{2}\, m}{\pi} \sin\frac{\pi}{m}}\right) \tag{2a}$$

$$i_0(\omega t) = \frac{\sqrt{2}\, U_\sim}{\omega L}\left[\cos\delta - \cos(\omega t + \delta) - g\,\omega t\right] \qquad 0 \leqq \omega t \leqq \gamma \tag{4a}$$

Für den Fall $\delta > \arcsin g$ soll der Leitwinkel γ als die Lösung der folgenden transzendenten Gleichung bestimmt werden:

$$\bar{I} I_s \nu \frac{\omega L}{\sqrt{2}\, U_\sim} = \left(1 - \frac{\gamma}{2}\cot\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sqrt{\left(2\sin\frac{\gamma}{2}\right)^2 - (g\,\gamma)^2} \tag{4b}$$

Aus so bestimmtem γ kann dann der Winkel δ berechnet werden:

$$\delta = \pi - x \arcsin\left(\frac{g\,\gamma}{\sqrt{2}\sqrt{1-\cos\gamma}}\right) - \arctan\left(\frac{1-\cos\gamma}{\sin\gamma}\right) + \frac{\pi}{2}(1-x) \tag{4c}$$

Für den Strom i_0 lässt sich der folgende Ausdruck ableiten:

$$i_0(\omega t) = a\sin(\omega t + \delta + \psi) + b\,e^{-\frac{\omega t}{\vartheta}} - c \qquad 0 \leqq \omega t \leqq \frac{2\pi}{m} \tag{2b}$$

wobei:

$$a = \frac{\sqrt{2}\, U_\sim}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\vartheta^2}}$$

$$b = \frac{a}{1-\varrho}\left[\sin(\nu + \delta + \psi) - \sin(\delta + \psi)\right]$$

$$c = \frac{\bar{E} E_s}{R} \tag{2c}$$

$$\beta = \alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2}(1-x)$$

$$\delta = \beta + \pi \cdot \frac{m-3}{3m}$$

Die Gl. (2) gelten für beide betrachteten Stromrichterschaltungen unter Voraussetzung, dass $U_\sim$ bei $m = 3$ dem Phasenwert und bei $m = 6$ dem verketteten Wert entspricht. Das Glied $\pi/2\,(1-x)$ im Ausdruck für β in Gl. (2c) und später für δ in Gl. (4c) berücksichtigt den Anschluss mit umgekehrter Polarität der Stromrichtereinheit für generatorischen Betrieb gegenüber jener für motorischen Betrieb.

Liefert Gl. (2b) für $\omega t = 0$ den Wert $i_0(0)$ und ist dabei,

$$i_0(0) \cdot x < 0 \tag{3}$$

so liegt ein Lückenbetrieb vor; dann können die Ergebnisse der Gl. (2) nicht angewendet werden.

Jetzt soll der Lückenbetrieb betrachtet werden. Dabei wird man den Spannungsabfall am Wirkwiderstand R im Ankerkreis vernachlässigen. Diese Annahme ist berechtigt, da der Mittelwert des Ankerstromes im Lückenbetrieb meistens klein ist. Dadurch verursachte Fehler in berechneten Oberwellen sind dann eher zulässig, da eine Teilbelastung des Antriebes vorliegt. Im Lückenbetrieb fliesst der Teilstrom i_0 während $0 \leqq \omega t \leqq \gamma$. Hier ist γ der Leitwinkel ($\gamma < \nu$). Im Zeitintervall $\gamma < \omega t < \nu$ ist die Spannung am Anker gleich dem EMK. Eine Leitung des Thyristors ist nur möglich, wenn Winkel $\delta \geqq \arcsin g$ ist (s. Fig. 2). Dabei ist $g = E/\sqrt{2}\, U_\sim$ und $g > 0$. Unter gemachter Voraussetzung ($R = 0$) kann man für den Teilstrom i_0 folgenden Ausdruck ableiten [1]:

Im Falle $\delta = \arcsin g$ ist der Winkel γ als die Lösung der transzendenten Gleichung gegeben:

$$\bar{I} I_s \nu \frac{\omega L}{\sqrt{2}\, U_\sim} = \frac{1}{g}(1-\cos\gamma) - g\frac{\gamma^2}{2} \tag{4d}$$

Für den Winkel β im Lückenbetrieb gilt wie früher Gl. (2c):

$$\beta = \delta - \pi\frac{m-3}{3m}$$

2.4 Stromrichterphasenstrom

Mit Gl. (2b) und Gl. (4a) ist der Teilstrom i_0 im Zeitintervall $0 \leqq \omega t \leqq \nu$, bzw. $0 \leqq \omega t \leqq \gamma$ bestimmt. Ausserhalb dieses Zeitintervalls ist $i_0 = 0$. Der Teilstrom i_r im Zeitintervall r, wobei $r\,\nu \leqq \omega t \leqq (r+1)\,\nu$ ist gleich:

$$i_r(\omega t) = i_0(\omega t - r\,\nu) \qquad r = 0, 1, \ldots, m-1. \tag{5a}$$

Der Phasenstrom i_R des Stromrichters im Zeitabschnitt 0 bis 2π setzt sich aus m Teilströmen $i_0, i_1, \ldots, i_{m-1}$ zusammen. Man kann schreiben:

$$i_R(\omega t) = \sum_{r=0}^{m-1} \varkappa_r\, i_r \tag{5b}$$

Für den in Fig. 3 als Beispiel dargestellten Phasenstrom für die Dreiphasenbrückenschaltung haben die Koeffizienten $\varkappa_r$ folgende Werte: $\varkappa_0 = 1$, $\varkappa_1 = 1$, $\varkappa_2 = 0$, $\varkappa_3 = -1$, $\varkappa_4 = -1$, $\varkappa_5 = 0$.

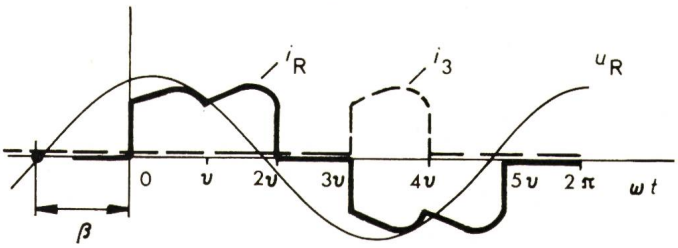

Fig. 3
Phasenstrom i_R und Teilstrom i_3 im Zeitintervall 3
($3\,\nu < \omega t < 4\,\nu$)
Dreiphasenbrückenschaltung im lückenlosen Betrieb
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

2.5 Die Harmonischen im Phasenstrom des Stromrichters

Der mit Gl. (5b) bestimmte Phasenstrom des Stromrichters lässt sich als Fourierreihe darstellen:

$$i_R(\omega t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega t} = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \tag{6a}$$

wobei:

$$C_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_R(\omega t) e^{-jk\omega t} d(\omega t)$$

bzw. (6b)

$$C_k = \frac{1}{2}(a_k - j b_k) \text{ für } k = 0, 1, 2, \ldots$$

Hier ist: k Ordnungszahl der Harmonischen
C_k komplexer Fourierkoeffizient
$j = \sqrt{-1}$

Weiter gilt:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}\ ;\ \tan \varphi_k = \frac{a_k}{b_k} \tag{6c}$$

wobei A_k, φ_k Amplitude und Phasenwinkel der k-ten Harmonischen darstellen.

Für den Fall des lückenlosen Ankerstromes erhält man mit Hilfe der Gl. (2b), (5) und (6b):

$$C_k = S_k [Q_{1k} + Q_{2k} + Q_{3k}] \tag{6d}$$

mit:

$$S_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=0}^{m-1} \varkappa_r e^{-jkr\nu} \tag{6e}$$

$$\begin{aligned}
Q_{1k} &= \frac{a}{2}\left[\frac{e^{j(\delta+\psi)}}{1-k}\left(1 - e^{j(1-k)\nu}\right) + \frac{e^{-j(\delta+\psi)}}{1+k}\left(1 - e^{-j(1+k)\nu}\right)\right] && \text{für } k = 2, 3, 4, \ldots \\
Q_{11} &= \frac{a}{2}\left[-j\nu e^{j(\delta+\Psi)} + \frac{1}{2}\left(1 - e^{-j2\nu}\right) e^{-j(\delta+\Psi)}\right] && \text{für } k = 1 \\
Q_{2k} &= \frac{b\vartheta}{1+(k\vartheta)^2}(1 - jk\vartheta) \cdot \left(1 - e^{-\frac{1+jk\vartheta}{\vartheta}\nu}\right) \\
Q_{3k} &= j\frac{c}{k}\left(1 - e^{-jk\nu}\right)
\end{aligned} \tag{6f}$$

Mit den Gl. (6b), (6c) und (6d) sind somit die Cosinuskomponente a_k und die Sinuskomponente b_k (bzw. die Amplitude A_k und Phasenwinkel φ_k) der k-ten Harmonischen bestimmt. Dabei gilt der in Fig. 2 festgelegte Koordinatensystembeginn ($\omega t = 0$).

Mit Hilfe von Gl. (6e) lässt sich zeigen, dass nur die Harmonischen mit $k = 1$ und $k = q\,m \pm 1$ im Phasenstrom möglich sind ($q = 1, 2, 3, \ldots$). Für alle anderen k-Werte ist $S_k = 0$. Bei $m = 6$ sind somit die Harmonischen 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... und bei $m = 3$ die Harmonischen 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, ... vorhanden.

Durch die Anwendung der Gl. (4a), (5) und (6b) lassen sich ähnliche Ausdrücke wie die Gl. (6d) bis (6f) für Lückenbetrieb ableiten.

2.6 Übertragung über den Transformator

Oft werden ein oder mehrere Stromrichter über einen Transformator gespeist. Es interessiert jetzt, wie die einzelnen Harmonischen, enthalten im Sekundärstrom des Transformators, auf die Primärseite übertragen werden. Hier wird als Beispiel die oft angewendete Transformatorschaltung Dy5 genommen (Fig. 4). Der Sekundärstrom der Phase R sei gegeben durch:

$$i_R = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin[k(\omega t - \varphi_T) + \varphi_k]$$

Jener der Phase T ist dann:

$$i_T = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left[k\left(\omega t - \varphi_T - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_k\right]$$

Die Werte A_k, φ_k sind bekannt aus dem vorherigen Abschnitt und φ_T ist die Phasenverschiebung des Transformators. Es folgt aus Fig. 4 für den Primärstrom der Phase R (Magnetisierungsstrom vernachlässigt):

$$I_R = -\frac{\ddot{u}}{\sqrt{3}}(i_R - i_T)$$

$$I_R = \sum_{k=1}^{\infty} A_k B_k \sin[k\omega t + \varphi_k - (k\varphi_T - X_k)] \tag{7a}$$

wobei:

$$B_k = \frac{\ddot{u}}{\sqrt{3}}\sqrt{2\left[1 - \cos\left(k\frac{4\pi}{3}\right)\right]}$$

$$\tan X_k = \frac{-\sin\left(k\frac{4\pi}{3}\right)}{1 - \cos\left(k\frac{4\pi}{3}\right)} \tag{7b}$$

2.7 Anlagestrom (Netzstrom)

Fig. 5 stellt einen allgemein möglichen Aufbau der Anlage dar. Diese besteht aus zwei Gruppen und jede Gruppe wiederum aus mehreren Sektionen (Antrieben). Für irgendwelche Sektion 1N der Gruppe 1 z. B. ist der Strom I'_{1N} durch folgende Beziehung gegeben [s. Gl. (7a)]:

$$I'_{1N} = \sum_{k=1}^{\infty} A_{k_{1N}} B_{k_{1N}} \sin(k\omega t + \varphi_{k_{1N}} - \xi_{k_{1N}}) \tag{8a}$$

was die Sinuskomponente $b'_{k_{1N}}$ und Cosinuskomponente $a'_{k_{1N}}$ der k-ten Harmonischen ergibt:

$$\begin{aligned}
b'_{k_{1N}} &= B_{k_{1N}}(b_{k_{1N}} \cos \xi_{k_{1N}} + a_{k_{1N}} \sin \xi_{k_{1N}}) \\
a'_{k_{1N}} &= B_{k_{1N}}(a_{k_{1N}} \cos \xi_{k_{1N}} - b_{k_{1N}} \sin \xi_{k_{1N}})
\end{aligned} \tag{8b}$$

(Die Werte $a_{k_{1N}}$ und $b_{k_{1N}}$ sind im Abschnitt 2.5 bestimmte a_k, b_k Werte für die Sektion 1N.)

In den Gl. (8a) und (8b) ist für die Sektion ohne Transformator $B_{k_{1N}} = 1$; $\xi_{k_{1N}} = k\,\beta_{1N}$ zu setzen. Für die Sektion mit Transformator gilt

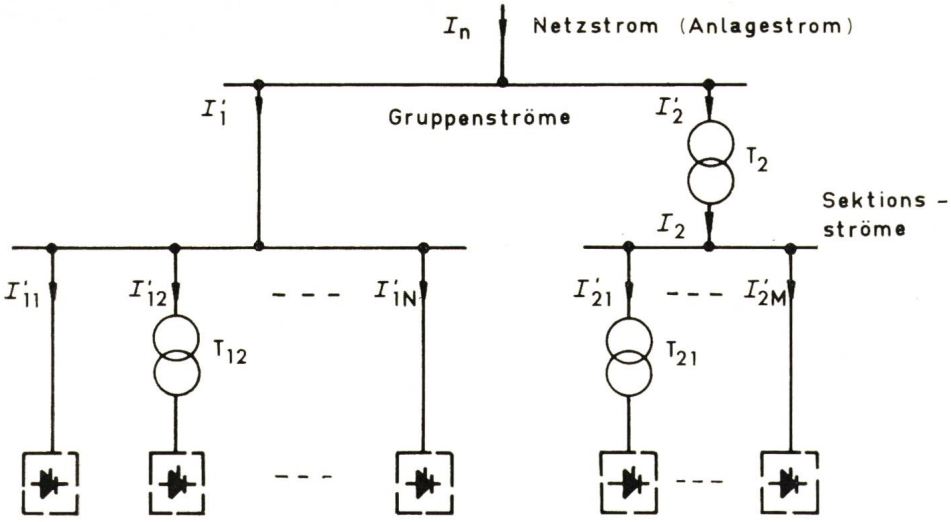

Fig. 5
Grundaufbau der Anlage
Bezeichnungen siehe im Text

$$\xi_{k_{1N}} = k\,(\beta_{1N} + \varphi_{T_{1N}}) - X_{k_{1N}}$$

Dabei ist β_{1N} die Phasennacheilung des Punktes $\omega\, t = 0$ (Fig. 2) gegenüber dem Nulldurchgang der Stromrichterphasenspannung für die betreffende Sektion.

Die Summe der Sinus- (Cosinus-) Komponenten der k-ten Harmonischen aller Sektionsströme einer Gruppe gibt die Sinus- (Cosinus-) Komponente der k-ten Harmonischen des Gruppenstromes. Ist ein Gruppentransformator wie T_2 (Fig. 5) vorhanden, folgen die Komponenten b'_{k_2}, a'_{k_2} des Gruppenstromes I'_2 aus den Komponenten b_{k_2}, a_{k_2} des Stromes I_2 durch die Anwendung von B_{k2} und $\xi_{k_2} = k\,\varphi_{T_2} - X_{k_2}$ für den Gruppentransformator T_2.

Das heisst:

$$\begin{aligned} b'_{k_2} &= B_{k_2}\,(b_{k_2} \cos \xi_{k_2} + a_{k_2} \sin \xi_{k_2}) \\ a'_{k_2} &= B_{k_2}\,(a_{k_2} \cos \xi_{k_2} - b_{k_2} \sin \xi_{k_2}) \end{aligned} \tag{8c}$$

Die Sinus- (Cosinus-) Komponente der einzelnen Harmonischen des Netzstromes folgt als die Summe der entsprechenden Komponenten der Gruppenströme:

$$\begin{aligned} b_{k_n} &= b'_{k_1} + b'_{k_2} + \ldots \\ a_{k_n} &= a'_{k_1} + a'_{k_2} + \ldots \end{aligned} \tag{8d}$$

Aus den bekannten a_{k_n}, b_{k_n} folgen dann der Effektivwert I_n des Netzstromes, der Leistungsfaktor $\cos \varphi$, der Oberschwingungsgehalt K, als auch die Effektivwerte I_{k_n} und Verschiebungsfaktoren $\cos \varphi_{k_n}$ der einzelnen Harmonischen. Fig. 6 zeigt die Phasenlage der Stromharmonischen I_{y_n} der Ordnung $k = y$ gegenüber der Netzphasenspannung u_n. (Gezeichnet ist der Fall bei dem die Stromharmonische nacheilt, bzw. $\varphi_{y_n} < 0$.)

3. Digitales Programm

In den vorangehenden Abschnitten sind alle wichtigen Beziehungen aufgeführt, welche man benötigt, um die Harmonischen im Netzstrom zu berechnen. Wollte man dies jedoch mit konventionellen Mitteln tun, so würde man sehr bald feststellen, dass der dazu notwendige Zeitaufwand enorm ist, selbst wenn man sich nur auf das Berechnen einer einzelnen Harmonischen von nur einer Sektion beschränkt. Die zu berechnenden Ausdrücke sind so kompliziert, dass sich auch leicht Fehler einschleichen können. Für Lückenbetrieb hat man die transzendenten Gleichungen mit Näherungsmethoden zu lösen. Um nun allen diesen Schwierigkeiten aus dem Weg zu gehen, wurde ein Computerprogramm in Fortran IV geschrieben. Es ist für den in Fig. 5 dargestellten allgemeinen Fall einer Anlage ausgelegt. Da die zu berechnenden Ausdrücke verschieden sind für gelückten und ungelückten Ankerstrom, besteht das Programm aus zwei Ästen, welche je nach Betriebsart durchlaufen werden. Die transzendenten Gleichungen werden durch Iterationen gelöst. Die phasenrichtige Umrechnung der Ströme von der Transformator-Sekundärseite auf die Primärseite besorgt eine Subroutine, welche von verschiedenen Stellen im Hauptprogramm aufgerufen werden kann.

3.1 Eingabedaten

Folgende Eingabedaten werden vom Programm benötigt:

Höchste Ordnung der zu berechnenden Oberwelle Anzahl der Gruppen Netzfrequenz Netzspannung	Einmal für ganze Anlage
Anzahl Sektionen der Gruppe Übersetzung des Gruppentrafos	Einmal pro Gruppe
Bezogenes Lastmoment Bezogenes Verlustmoment Bezogene Drehzahl Bezogener Feldstrom Nenn-EMK Nenn-Ankerstrom Ankerwiderstand Ankerinduktivität Übersetzung des Sektionstrafos Pulszahl (3 oder 6)	Einmal pro Sektion

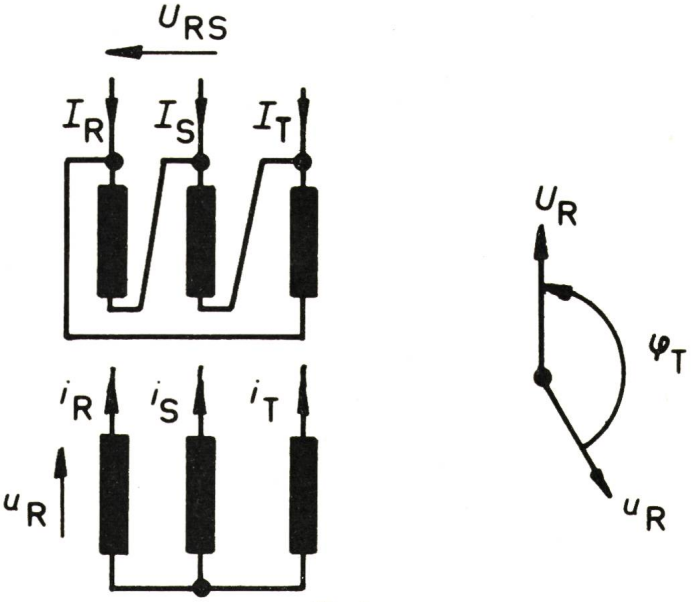

Fig. 4
Transformatorschaltung Dy5

Winkel $\varphi_T = +5\,\frac{\pi}{6}$

$\ddot{u} = \frac{\sqrt{3}\,u_R}{U_{RS}}$ Übersetzungsverhältnis bei Nennbelastung

3.2 Ausgabedaten

Folgende Grössen werden vom Computer berechnet und ausgedruckt:

Effektivwerte der Primärströme aller vorhandenen Transformatoren (nützlich für deren Dimensionierung)

Effektivwerte Verschiebungsfaktoren Prozentuale Anteile	der einzelnen Netzstrom-oberwellen	für ganze Anlage
Netzstrom-Effektivwert Klirrfaktor Wirkleistung Blindleistung Leistungsfaktor		

4. Beispiele

Es folgen einige mit dem aufgestellten Digitalprogramm berechnete Beispiele. Diese Beispiele sollen den Einfluss von meistinteressierten Grössen und Betriebsbedingungen zeigen.

4.1 Beispiel 1: Ein Antrieb.

Hier wird motorischer oder generatorischer Betrieb bei Nennankerstrom ($\bar{I} = 1$) und veränderlicher EMK ($\bar{E} = 0, 0{,}5, 1$) bei verschiedenen Werten für Ankerzeitkonstante ($T = 0{,}01, 0{,}02, 0{,}05, 0{,}1, 0{,}2, 1$ s) betrachtet. Damit die Ergebnisse allgemeine Gültigkeit erhalten, werden die bezogenen Grössen angewendet. Das gilt für die Daten des Antriebes als auch für die Ergebnisse. Als fest gelten die folgenden Daten eines «durchschnittlichen» Antriebes mit $m = 6$, $f = 50$ Hz: $\bar{R} = 0{,}05$, $g_s = 0{,}745$.

In Fig. 7 sind die Werte $\frac{I_n}{I}$ und $\frac{I_n}{I_n^1}$ als Funktion der Ankerzeitkonstante für verschiedene E-Werte gegeben. (Hier ist I_n = Effektivwert des Netzstromes, I = Mittelwert des Ankerstromes und I_n^1 = Effektivwert des Netzstromes bei $T = 1$ s [d. h. grosse Induktivität im Ankerkreis].) Die höchsten Werte $\frac{I_n}{I}$ und $\frac{I_n}{I_n^1}$ bei $T = 0{,}01$ s und $\bar{E} = 0$ betragen 0,86 und 1,05 gegenüber 0,816 und 1 bei grosser Induktivität im Ankerkreis. Es ist praktisch kein Unterschied zwischen den Werten für motorischen und generatorischen Betrieb festzustellen, so dass dieselben Kurven für beide Betriebsarten gelten.

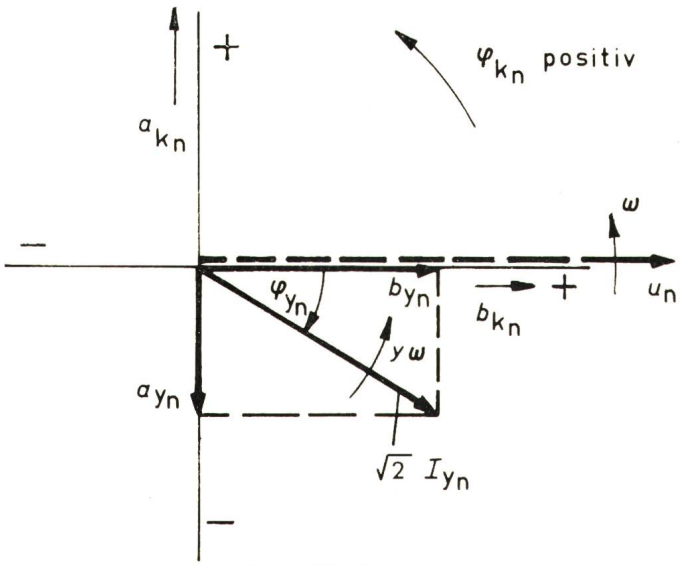

Fig. 6
Phasenverhältnisse für Netzstromharmonische ($k = y$)
u_n Netzphasenspannung

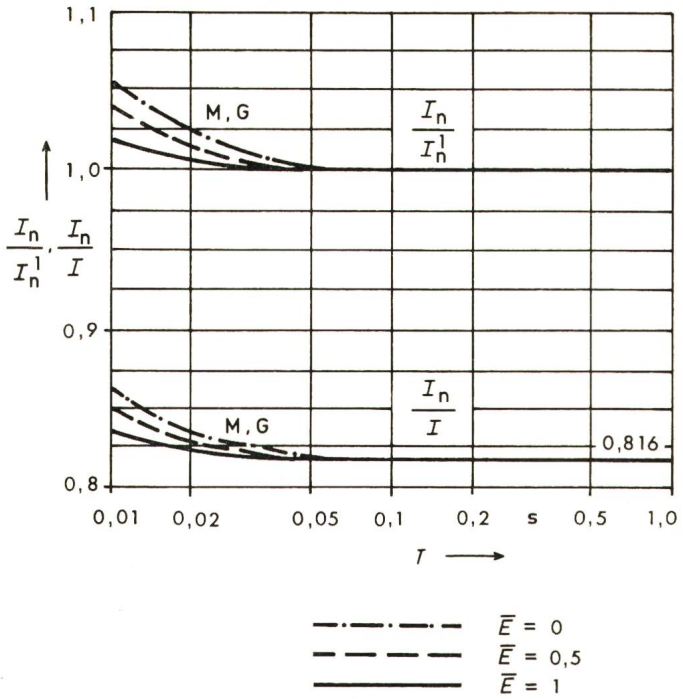

Fig. 7
Die Werte $\frac{I_n}{I_n^1}$ und $\frac{I_n}{I}$ als Funktion der Ankerzeitkonstante T und EMK $\bar{E}$ (Beispiel 1)
Motorischer (M) oder generatorischer (G) Betrieb mit Nennankerstrom
Daten des Antriebes: $m = 6$; $f = 50$ Hz; $\bar{R} = 0{,}05$; $g_s = 0{,}745$
I_n Effektivwert des Netzstromes
I Mittelwert des Ankerstromes
I_n^1 Effektivwert des Netzstromes bei grosser Induktivität im Ankerkreis ($T = 1$ s)

In den Fig. 8 und 9 sind die Werte $\frac{I_{k_n}}{I_{1_n}^1}$ angegeben. (Dabei ist I_{k_n} = Effektivwert der Harmonischen der Ordnung k des Netzstromes, $I_{1_n}^1$ = Effektivwert der Grundwelle [$k = 1$] des Netzstromes bei $T = 1$ s [grosse Induktivität im Ankerkreis].)

Fig. 8 gilt für die Grundwelle und 5-te und 7-te Harmonische; Fig. 9 für $k = 11, 13, 17, 19$. Der Wert $\frac{I_{1_n}}{I_{1_n}^1}$ für die Grundwelle bleibt praktisch konstant (Maximalwert 1,015). Die 5-te Oberwelle steigt bei kleineren T-Werten stark an und hat bei $T = 20$ ms etwa 50 % höheren Wert als bei grosser Induktivität im Ankerkreis. Die 11-te Harmonische bleibt praktisch unverändert. Alle restlichen Oberwellen (bis $k = 19$) fallen mit kleiner werdender Ankerzeitkonstante stark ab. Wieder ist hier ein praktisch unbedeutender Unterschied zwischen motorischem und generatorischem Betrieb festzustellen. In Fig. 8 sind einige Fälle für generatorischen Betrieb eingetragen, für welche der Unterschied zwischen motorischem und generatorischem Betrieb am grössten ist.

Im Gegensatz dazu besteht ein Unterschied in den Phasenwinkelwerten φ_{k_n}. Dieser Unterschied kommt mit steigender EMK stärker zum Vorschein. In Fig. 10 ist φ_{k_n} für $\bar{E} = 1$ für motorischen und generatorischen Betrieb gegeben. Fig. 11 gibt noch den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und den Klirrfaktor K des Netzstromes an. Der Klirrfaktor bleibt etwa konstant für $T > 0{,}05$ s und beträgt etwa 0,28. Bei $T = 0{,}02$ s gilt etwa $K = 0{,}3$, und bei $T = 0{,}01$ s $K = 0{,}33$ bei $\bar{E} = 1$, $K = 0{,}4$ bei $\bar{E} = 0$ (Harmonische bis $k = 19$ berücksichtigt). Bei generatorischem Betrieb liegen etwas höhere K-Werte als bei motorischem Betrieb vor.

Der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ hängt stark von $\overline{E}$ ab. Die Abhängigkeit von T kann vernachlässigt werden. Im motorischen Betrieb liegt ein höherer Leistungsfaktor vor. Das ist auf die $I^2 R$-Verluste im Ankerkreis zurückzuführen, die im motorischen Betrieb von der Netzseite, im generatorischen Betrieb von der Wellenseite gedeckt werden. (Unter Umständen muss für den generatorischen Betrieb aus Schutzgründen ein kleinerer Wert $g_s = \frac{E_s}{\sqrt{2}\,U_\sim}$ gewählt werden. Dadurch kann $\cos\varphi$ für generatorischen Betrieb noch ungünstiger liegen.)

4.2 Beispiel 2: Anlage mit teilweise generatorischem Betrieb.

In Anlagen geschieht oft, dass ein Teil aller Antriebe im generatorischen Betrieb arbeiten. Das ist z. B. bei Abwicklerantrieben der Fall. In diesem Beispiel werden die vereinfachten Verhältnisse angenommen. Vorausgesetzt wird, dass alle generatorisch arbeitenden Antriebe durch einen Antrieb zusammengefasst werden können. Dasselbe gilt für die motorisch arbeitenden Antriebe. Beide der so resultierenden Antriebe bilden eine Anlage. Die bezogenen Kenndaten sollen gleich

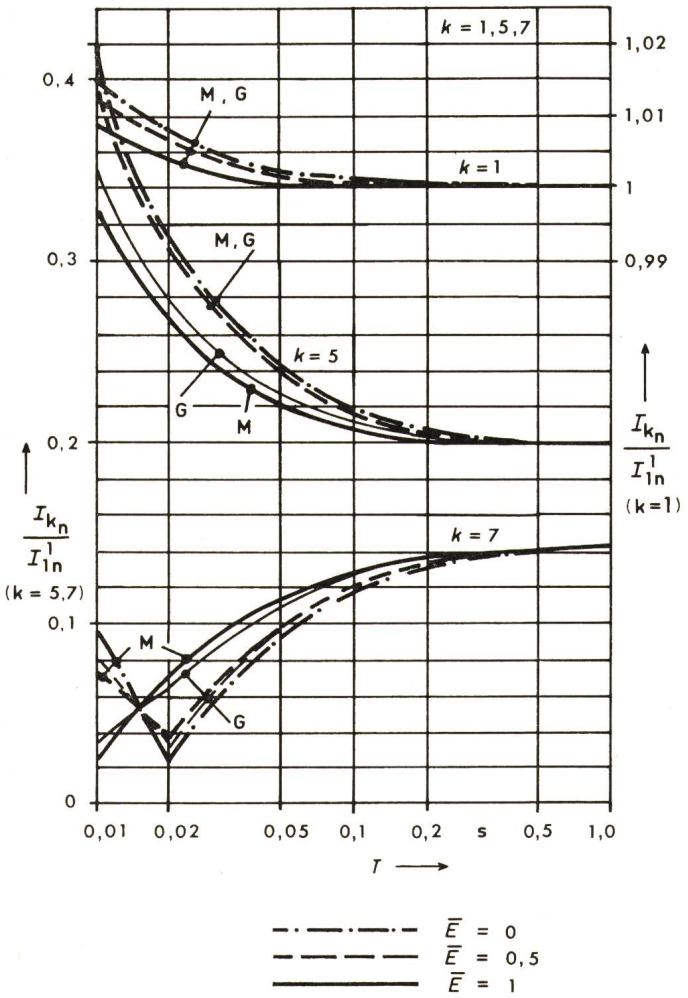

Fig. 8

Die Werte $\frac{I_{kn}}{I^1_{1n}}$ für k = 1, 5, 7 (Beispiel 1)

Motorischer (M) bzw. generatorischer (G) Betrieb mit Nennankerstrom
I_{kn} Effektivwert der Netzstromharmonischen der Ordnung k
I^1_{1n} Effektivwert der Grundwelle des Netzstromes bei T = 1 s
Daten des Antriebes wie in Fig. 7

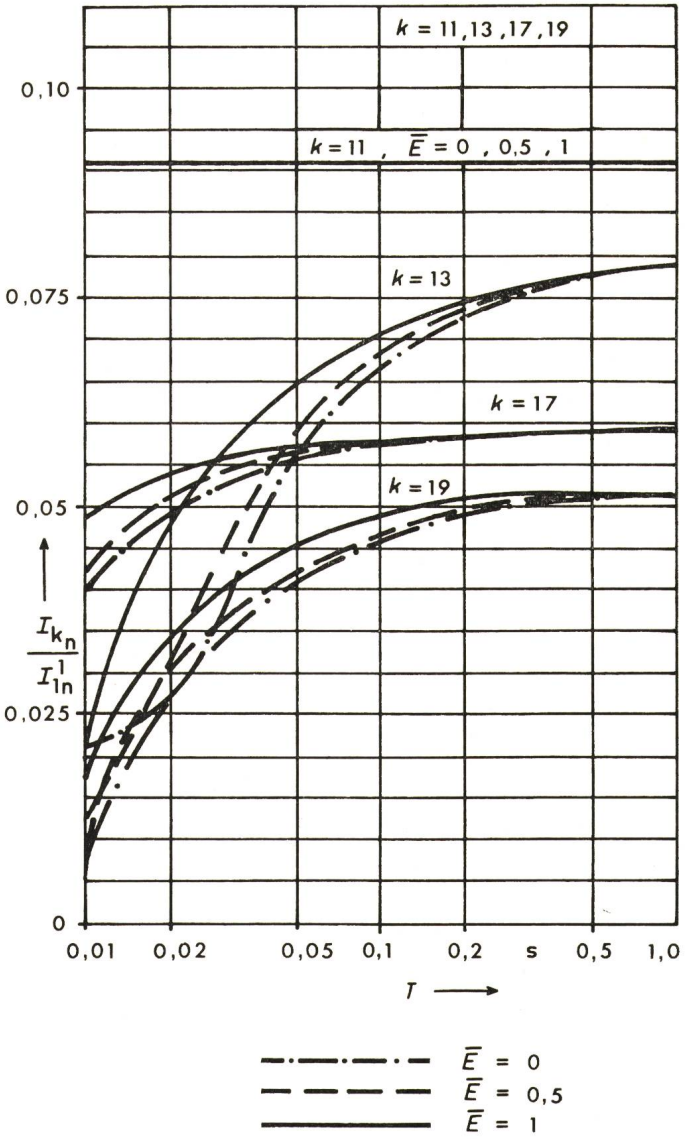

Fig. 9

Die Werte $\frac{I_{kn}}{I^1_{1n}}$ für k = 11, 13, 17, 19 (Beispiel 1)

Motorischer bzw. generatorischer Betrieb mit Nennankerstrom
Daten des Betriebes wie in Fig. 7
Bezeichnungen siehe Fig. 8

sein. Aus Vergleichsgründen seien die Daten des Beispieles 1 angenommen ($m = 6$, $f = 50$ Hz, $\overline{R} = 0{,}05$, $g_s = 0{,}745$) mit Ankerzeitkonstante $T = 0{,}05$ s. Beide Antriebe sollen mit derselben EMK $\overline{E} = 1$ arbeiten. Der motorisch arbeitende Antrieb soll den konstanten Ankerstrom $\overline{I} = 1$ haben. Dagegen wird angenommen, dass der generatorisch arbeitende Antrieb bei verschiedenen Ankerstrom-Werten arbeitet ($\overline{I} = 0, -0{,}1, -0{,}25, -0{,}5, -0{,}75, -1$), d. h. der Anteil der generatorisch ins Netz zurückgespeisten Wirkleistung wird 0 bis etwa 100 % der von den motorisch arbeitenden Antrieben vom Netz bezogenen Wirkleistung betragen. Nur die tieferen Werte, etwa um 25 %, liegen praxisnahe. Die höheren Werte für generatorischen Anteil sind weniger realistisch. Diese werden jedoch angenommen, um den Einfluss des generatorischen Betriebes auf die Netzstromoberwellen und den Leistungsfaktor besser zum Vorschein zu bringen.

Fig. 12 zeigt die Werte für den Klirrfaktor K, den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ und die bezogene Wirk- und Blindleistung $\frac{P_W}{P_s}$,

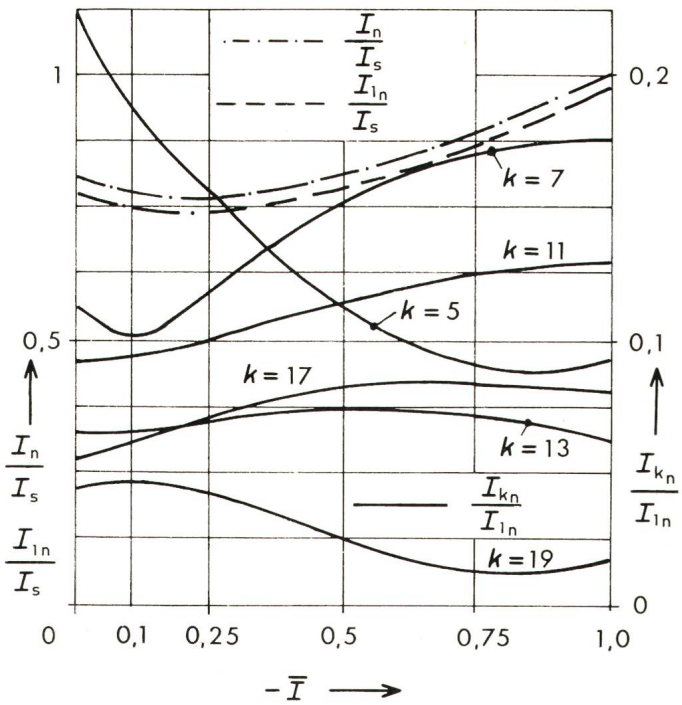

Fig. 10
Der Phasenwinkel φ_{kn} der einzelnen Stromharmonischen für $\bar{E} = 1$ in Abhängigkeit von der Ankerzeitkonstante T (Beispiel 1)
Motorischer (M) bzw. generatorischer (G) Betrieb mit Nennankerstrom
Daten des Antriebes wie in Fig. 7

$\frac{P_B}{P_s}$ der Anlage in Abhängigkeit vom Ankerstrom des generatorisch arbeitenden Antriebes. Hier ist $P_s = E_s I_s$ (E_s = Nenn-EMK, I_s = Nennankerstrom). In Fig. 13 sind die Werte $\frac{I_n}{I_s}$, $\frac{I_{1n}}{I_s}$ und $\frac{I_{kn}}{I_{1n}}$ angegeben. (I_n = Effektivwert des Netzstromes, I_{1n} = Effektivwert der Grundharmonischen des Netzstromes, I_{kn} = Effektivwert der k-ten Harmonischen des Netzstromes.)

Aus Fig. 12 sieht man, dass der Oberschwingungsgehalt K beim Vorhandensein des generatorischen Betriebes kleiner ist. Dies ist vor allem auf die stark abfallende 5-te Harmonische zurückzuführen (Fig. 13). Der $\cos\varphi$ wird schlechter, was einerseits durch das Absinken der aus dem Netz bezogenen Wirkleistung P_W und anderseits durch die stark anwachsende Blindleistung P_B bei grösserem generatorischen Anteil bedingt ist.

Ergebnisse für eine Grossanlage (Beispiel 3)
Nennzug, 10% Nenngeschwindigkeit

Tabelle I [1])

Effektivwerte, Verschiebungsfaktoren und prozentuale Anteile der Netzstrom-Oberwellen

Ordnung	A (eff.)	cos phi	phi (Grad)	Prozent
1	331.00	.078	–85.5	100.0
2	2.05	.944	19.3	.6
4	.07	.697	45.8	.0
5	75.47	.435	–64.2	22.8
7	22.45	–.596	126.6	6.8
8	.12	–.263	–105.2	.0
10	.01	.020	88.8	.0
11	25.06	–.794	142.5	7.6
13	13.14	.898	–26.1	4.0

Effektivwert Strom	341 A (eff.)
Klirrfaktor	.2451
Wirkleistung (3-phasig)	491525 Watt
Blindleistung (3-phasig)	6486261 Var
Leistungsfaktor cos phi	.0756

[1]) Abschrift eines Computerstreifens

4.3 Beispiel 3: Eine Grossanlage.

Hier seien noch die Ergebnisse der Berechnung einer Grossanlage angegeben. Die Tabellen I und II stellen die vom Rechner ausgegebenen Ergebnisse dar (Zwischenergebnisse wie Effektivwerte der Transformatorströme usw. sind nicht gezeigt). Es handelt sich um ein aus zwei Gruppen (je ein Gruppentransformator) bestehendes Walzwerk mit insgesamt 18 Sektionen. Die totale installierte Leistung aller Antriebe beträgt 3750 kW (davon 3715 kW mit $m = 6$ und nur 35 kW mit $m = 3$). Die Einheiten, die generatorisch arbeiten sollen, haben eine Gesamtleistung von 750 kW. Die Netzspannung beträgt 11 kV. Es gilt: $T = 0{,}03$ bis $0{,}06$ s; $\bar{R} = 0{,}04$ bis $0{,}08$; $g_s = 0{,}7$ für $m = 6$, und $0{,}5$ für $m = 3$. Die Berechnung wurde bis $k = 13$ durchgeführt und zwar für Nennbandzug ($\bar{I} = 1$). Im Falle von Tabelle I gilt 10 % der Nennbandgeschwindigkeit ($\bar{E} = 0{,}1$), für Tabelle II gilt Nennbandgeschwindigkeit ($\bar{E} = 1$). Man sieht, dass sich bei kleinerer Bandgeschwindigkeit ein höherer Effektivwert des Netzstromes (17 % höher als bei Nennbandgeschwindigkeit) und ein schlechterer Leistungsfaktor ergibt. Interessant ist, dass bei kleinerer Bandgeschwindigkeit ein kleinerer Klirrfaktor resultiert. Dies ist auf einen stärkeren Anstieg des Effektivwertes der Grundwelle (331 A gegenüber 280,16 A) gegenüber den Effektivwerten der Oberwellen zurückzuführen.

5. Schlussfolgerungen

a) Die Ergebnisse für einen *Einzelantrieb* (Pulszahl $m = 6$, $f = 50$ Hz, Belastung mit Nennankerstrom) zeigen, dass die Annahme einer grossen Induktivität im Ankerkreis bei etwa $T < 0{,}1$ s zu relativ grossen Fehlern führen kann. Dabei ist dies für die Effektivwerte der Oberwellen ($k = 5, 7, \ldots$) und den Klirrfaktor vor allem der Fall. Für die Zeitkonstante $T = 0{,}02$ s z. B. sind die Effektivwerte der einzelnen Oberwellen gegenüber denselben Werten bei grosser Induktivität im Ankerkreis $\left(I_{k_n} = \frac{I_{1_n}}{k}\right)$ um etwa 50 % bei $k = 5$ höher und um etwa 60 % bei $k = 7$ tiefer. Bei $k = 11$ besteht kein Unterschied, bei $k = 13, 17, 19$ sind diese um 20 bis 70 % tiefer. Was den Oberwellengehalt betrifft, so gilt etwa $K = 0{,}28$ für $T \geqq 0{,}05$ s für alle Werte von EMK. Bei $T = 0{,}02$ s gelten die Werte um $K = 0{,}3$. Bei $T = 0{,}01$ s ist $K = 0{,}33$ bei $\bar{E} = 1$, und $K = 0{,}4$ bei $\bar{E} = 0$ (hier sind die Oberwellen bis inkl. 19 berücksichtigt).

Ergebnisse für eine Grossanlage (Beispiel 3)
Nennzug, Nenngeschwindigkeit

Tabelle II [1])

Effektivwerte, Verschiebungsfaktoren und prozentuale Anteile der Netzstrom-Oberwellen

Ordnung	A (eff.)	cos phi	phi (Grad)	Prozent
1	280.16	.588	–54.0	100.0
2	1.87	.002	89,9	.7
4	.21	.697	45.8	.1
5	65.66	–.782	141.5	23.4
7	27.78	.289	73.2	9.9
8	.19	–.884	–152.1	.1
10	.10	–.616	128.0	.0
11	25.87	–.056	–93.2	9.2
13	15.74	–.945	160.8	5.6

Effektivwert Strom	291 A (eff.)
Klirrfaktor	.2665
Wirkleistung (3-phasig)	3138714 Watt
Blindleistung (3-phasig)	4562776 Var
Leistungsfaktor cos phi	.5668

[1]) Abschrift eines Computerstreifens

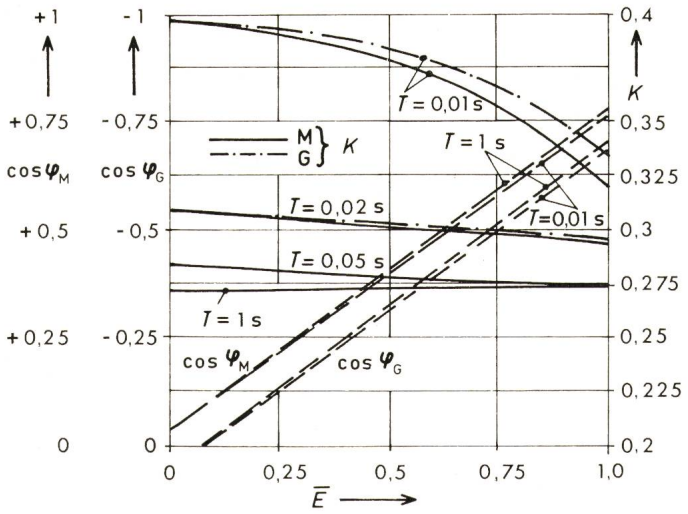

Fig. 11

Leistungsfaktor cos φ und Klirrfaktor K des Netzstromes in Abhängigkeit von EMK $\bar{E}$ und Ankerzeitkonstante T (Beispiel 1)

Motorischer (M) oder generatorischer (G) Betrieb bei Nennankerstrom
Daten des Antriebes wie in Fig. 7

Effektivwert des Netzstromes und seiner Grundwelle hängt dagegen wenig von T ab. Bei $T = 0{,}01$ s ist der erste Wert um etwa 5 %, der zweite um etwa 1,5 % höher als bei grosser Induktivität im Ankerkreis. Alle bis jetzt erwähnten Grössen (Effektivwerte des Netzstromes, Effektivwerte der einzelnen Harmonischen des Netzstromes und der Klirrfaktor) sind

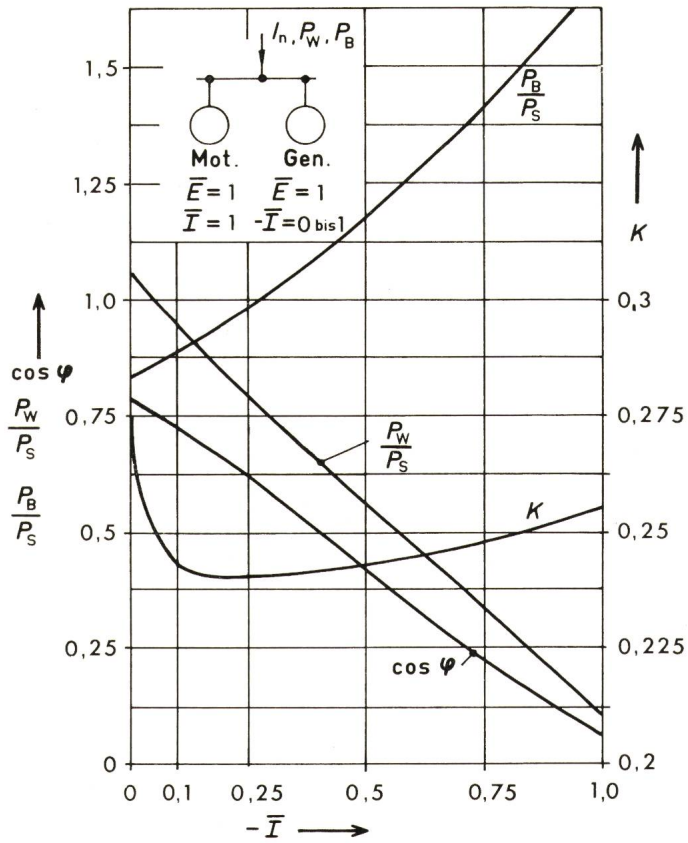

Fig. 12

Klirrfaktor K, Leistungsfaktor cosφ, bezogene Wirkleistung $\frac{P_W}{P_S}$ und bezogene Blindleistung $\frac{P_B}{P_S}$ in Abhängigkeit vom Ankerstrom des generatorisch arbeitenden Antriebes ($P_S = E_S I_S$) (Beispiel 2)

Für beide Antriebe ist $\bar{E} = 1$, für motorisch arbeitenden Antrieb gilt $\bar{I} = 1$. Daten beider Antriebe: $m = 6$; $f = 50$ Hz; $\bar{R} = 0{,}05$; $T = 0{,}05$ s; $g_S = 0{,}745$

praktisch gleich für motorischen und generatorischen Betrieb. Die Phasenwinkelwerte φ_{k_n} der einzelnen Harmonischen können dagegen in motorischem und generatorischem Betrieb stark unterschiedlich sein.

Der Leistungsfaktor cos φ hängt relativ wenig von der Ankerzeitkonstante ab (auch wenig vom Ankerstrom — hier nicht behandelt). Dagegen ist cos φ stark von $\bar{E}$ abhängig. Allgemein gilt bei gleicher EMK $\bar{E}$ und gleichem Ankerstrom $\bar{I}$ im motorischen Betrieb ein höherer Leistungsfaktor. Der Unterschied gegenüber dem Leistungsfaktor im generatorischen Betrieb ist desto höher, je höher die Verluste im Ankerkreis sind und je tiefer das Verhältnis $g_S = \frac{E_S}{\sqrt{2}\,U_\sim}$ für den generatorisch arbeitenden Antrieb gegenüber jenem für motorisch arbeitenden Antrieb liegt. Der ganzen Berechnung

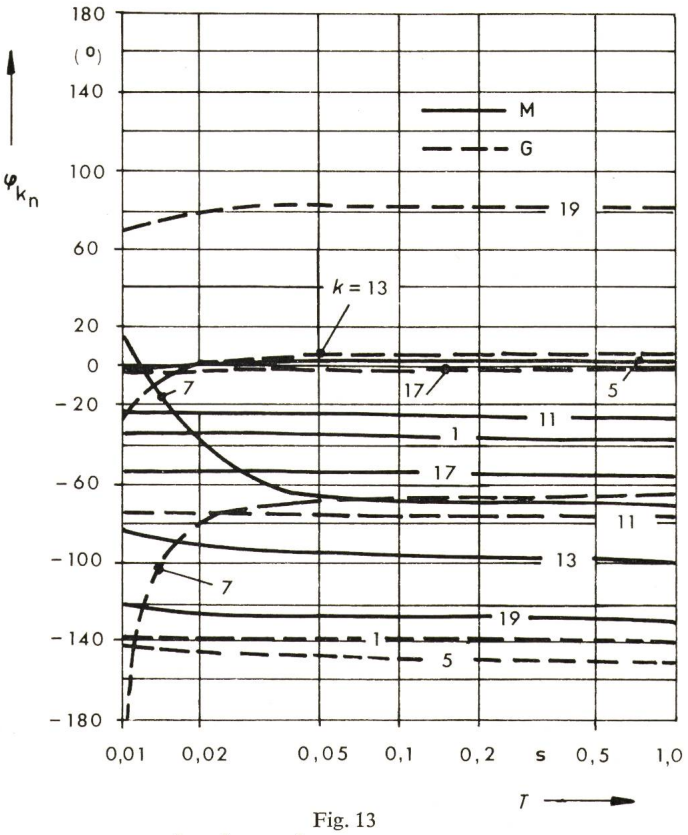

Fig. 13

Die Werte $\frac{I_n}{I_S}$, $\frac{I_{1n}}{I_S}$ und $\frac{I_{kn}}{I_{1n}}$ in Abhängigkeit vom Ankerstrom des generatorisch arbeitenden Antriebes (Beispiel 2)

I_n Effektivwert des Netzstromes
I_{1n} Effektivwert der Grundwelle des Netzstromes
I_{kn} Effektivwert der k-ten Harmonischen des Netzstromes
I_S Nennankerstrom

wurde die Annahme der vernachlässigbaren Kommutierungsimpedanzen zugrunde gelegt, was die höheren Zahlenwerte für die Effektivwerte der Oberwellen, den Klirr- und Leistungsfaktor zur Folge haben kann.

b) Bei *Anlagen,* in welchen ein *Teil der Antriebe generatorisch* arbeitet, ist mit einem kleineren Oberwellengehalt und einem schlechteren (kleineren) Leistungsfaktor zu rechnen. Für erste Abschätzungen können die Ergebnisse des Beispieles 2 dienen.

c) Bei einer gegebenen Anlage liegt der «*kritische Fall*» bei der Nennbelastung (Nennankerkreisströme) und bei der minimalen Geschwindigkeit (Drehzahl). In diesem Fall liegen

die grössten Oberwellenströme und der kleinste Leistungsfaktor vor. Ebenso erreichen die Effektivwerte der Ströme (Netzstrom, Sammelschienenströme, Transformatorwicklungsströme usw.) in diesem Fall ihre höchsten Werte.

d) Bei *grösseren Anlagen mit vielen Antrieben* dürfte nur eine Berechnung, die die Daten und Arbeitsbedingungen der einzelnen Antriebe berücksichtigt, die massgebenden Ergebnisse liefern.

Literatur

[1] *T. Wasserrab:* Schaltungslehre der Stromrichtertechnik. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.

[2] *W. Schulz:* Oberschwingungen in Industrienetzen mit Stromrichterbelastung. ETZ-B 23(1971)12, S. 288...292.

[3] *S. Ivner:* Die Netzrückwirkung von Thyristorstromgleichrichtern. ASEA Z. 16(1971)3, S. 71...74.

Adresse der Autoren:

Dipl.-Ing. *Josip Lakota* und *René von Rotz,* dipl. Ing. ETHZ, Reliance Electric AG, Dierikon.

Spaniens Elektrizitätsversorgung [1])

621.31(46)

Auch für das Jahr 1971 hat die Unidad Eléctrica SA (UNESA) als die anerkannte Repräsentanz der spanischen Elektrizitätsversorgung ihre Memoria Estadística Eléctrica in hervorragender Aufmachung herausgebracht und darin einen umfassenden Überblick über die Aktivitäten des abgelaufenen Jahres gegeben. Wie zu erwarten war, hat sich der Stromverbrauch weiterhin im Zehnjahresrhythmus verdreifacht, so dass im Berichtsjahr insgesamt 62,3 Mrd. kWh – entsprechend einer Prokopfquote von 1760 kWh – bereitgestellt werden mussten, wobei 52 % auf hydraulische Energie, 44 % auf thermische Energie und die restlichen 4 % auf Kernenergie entfallen sind. An besonderen Anlagen wurde der erste 460-MW-Block des im Norden gelegenen Kernkraftwerkes Santa Maria de Geroña in Betrieb genommen und im Ölkraftwerk Santurce (Fig. 1) konnte ein 550-MW-Block nahezu fertiggestellt werden. Rund 30 % der allspanischen Stromerzeugung sind im Rahmen interprovinzialer Lastverschiebungen und rund 4 % im internationalen Stromclearing, vorzugsweise mit Frankreich, abgedeckt worden. Die gesamte Kraftwerkleistung ist mit rund 19 000 MW ausgewiesen, woraus sich, wie in den Vorjahren, eine mittlere Jahresbenutzungsdauer von rund 3300 h ergibt. Die bestehenden 100- bis 380-kV-Netze konnten um 730 km vergrössert werden, so dass Ende 1971 rund 28 000 Streckenkilometer an Hochspannungsleitungen zur Verfügung standen. Dabei sei besonders vermerkt, dass sich das 220 kV-Netz, wie auch in anderen Ländern, mehr und mehr zu einem Verteilungsnetz entwickelt. Es ist klar, dass der zunehmende Stromverbrauch in einem erhöhten Kapitalbedarf sichtbaren Ausdruck gefunden hat, der im Jahre 1970 Aufwendungen in Höhe von 50 Mrd. Peseten (rund 3 Mrd. sFr.) erforderlich machte, woraus sich Ausbaukosten für Kraftwerke und Netze in Höhe von 3000 sFr./kW errechnen lassen.

Was die zukünftige Elektrizitätsversorgung anbelangt, so enthält die UNESA-Schrift in verantwortungsbewusster Denkweise

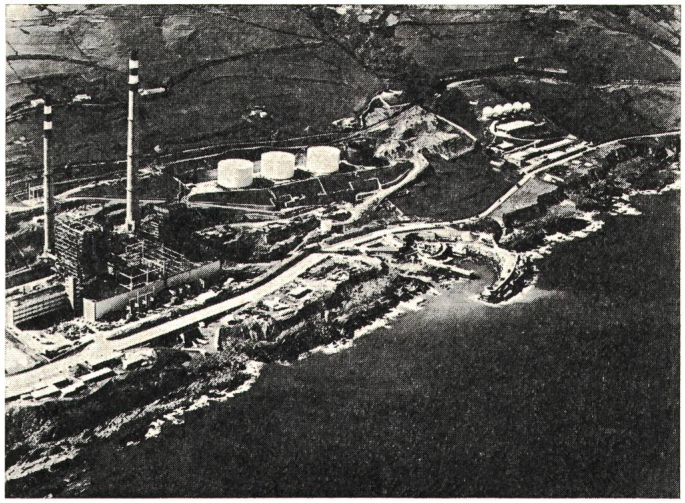

Fig. 1
Ölkraftwerk Santurce mit zwei Turbosätzen von 377 und 550 MW

eine Art Zehnjahresplan für die Jahre 1973/1983, der davon ausgeht, dass der bisherige Trend weiterhin anhalten wird, so dass gegen Ende dieses Planes rund 220 Mrd. kWh aus einer allspanischen Kraftwerkleistung von etwa 65 000 MW bereitgestellt werden müssen. Davon werden rund 60 % hälftig auf hydraulische und thermische Energie entfallen und die verbleibenden 40 % müssen aus Kernenergie abgedeckt werden. Für die Versorgung der Ballungsräume Madrid und Barcelona werden spätestens in fünf Jahren 380-kV-Ringe notwendig sein, um dem schnell ansteigenden Energiebedarf folgen zu können.

Bei einem so wohl durchdachten Konzept kann zuversichtlich damit gerechnet werden, dass Spanien auch weiterhin erfolgreich mit Elektrizität versorgt wird. Prof. Dr. *H. Prinz,* München

[1]) siehe auch Bull. SEV 62(1971)6, S. 330...331