

Symmetrierung einphasiger Bahnstromlast direkt auf das Drehstrom-Landesnetz

Autor(en): **Gutt, Hans-Joachim**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **82 (1991)**

Heft 19

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903017>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Symmetrierung einphasiger Bahnstromlast direkt auf das Drehstrom-Landesnetz

Hans-Joachim Gutt

Mit dem Einsatz leistungsfähiger Halbleiter-Gleichrichter entfiel die Notwendigkeit, die Bahnfrequenz auf ein Drittel von 50 Hz auf 16⅔ Hz zu reduzieren. Die Bauleistungen und Investitionskosten der 16⅔-Hz-Generatoren, -Transformatoren, -Drosseln usw. sowie die höheren Verluste können durch Direktspeisung des Bahnnetzes aus 50-Hz-Drehstromnetzen reduziert werden. Es werden Methoden vorgestellt, stets verbleibende Leistungspulsationen der 50-Hz-Bahnlast aufwandarm auf das Drehstromnetz zu symmetrieren.

L'utilisation de redresseurs performants à semi-conducteurs a rendu superflu de réduire la fréquence de traction à un tiers de 50 Hz à 16⅔ Hz. Les frais des constructions et des investissements pour les générateurs 16⅔ Hz, transformateurs, selfs, etc. ainsi que les pertes plus élevées peuvent être réduits par l'alimentation directe du réseau de traction à partir de réseaux triphasés 50 Hz. On présente des méthodes permettant, à faible coût, d'équilibrer sur le réseau les pulsations de puissance toujours restantes de la charge de traction 50 Hz.

Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gutt, Institut und Lehrstuhl für elektrische Maschinen und Antriebe, Universität Stuttgart, D-7000 Stuttgart 1.

Mit Hilfe leistungsfähiger Halbleiter-Gleichrichterbrücken liess sich in den Reihenschluss-Kommutatormotoren der Bahntriebe die Stromwelligkeit auf rund ein Drittel gegenüber dem vorherigen reinen Wechselstrombetrieb verringern. Hierdurch entfiel die technische Notwendigkeit, die Bahnfrequenz auf ein Drittel von 50 Hz auf 16⅔ Hz zu reduzieren.

Die verschärfte Wettbewerbslage gegenüber dem Auto- und Flugverkehr veranlasst den schienengebundenen Verkehr zur Verkürzung der Fahrzeiten, zu höheren Fahrgeschwindigkeiten und -leistungen und damit zu erheblichen Investitionen. Dabei erweisen sich die durch die auf 16⅔ Hz reduzierte Bahnfrequenz überkommenen Nachteile – rund dreifache Bauleistungen und Kosten der speisenden Generatoren, der Netz- und Lokomotiv-Transformatoren sowie der ebenfalls mit den letzteren stets mitzubeschleunigenden Drosselspulen vor allem der modernen Umrichterlokomotiven – als nicht länger verantwortbare Wettbewerbshemmnisse. Dies gilt in gleicher Weise für die höheren Energieverluste und damit höheren Betriebskosten in der Energiezuführung oder der mit doppelten Verlusten verbundenen zweimaligen Energieumformung bereits erzeugter 50-Hz-Energie in mechanische und von dort in elektrische Bahnenergie von 16⅔ Hz. Es ist daher an der Zeit, zumindest im internationalen durchgehenden Fern- und Schnellbahnverkehr auf die Direktspeisung von 50-Hz-Wechselstrom-Bahnnetzen aus 50-Hz-Drehstromnetzen überzugehen.

Hierbei besteht das grundsätzliche Problem, die mit Fahrdrabt und Schiene, das heisst mit einem Zweileiter-System nur *pulsierend* zu übertragende Einphasen-Wechselstromlei-

stung des Bahnnetzes zu einem zeitlich *konstanten* Leistungsverlauf des normalen Drehstromnetzes auszugleichen. Fehlt dieser Ausgleich, würden zwei der drei Ströme des einphasig belasteten Drehstromnetzes unsymmetrische Spannungsabfälle im ursprünglich symmetrischen Drehspannungssystem zur Folge haben, die nicht nur die speisenden Drehstromgeneratoren, sondern vor allem auch am Netz laufende Drehstrom-Asynchronmotoren durch entsprechende unsymmetrische Laststromkomponenten thermisch gefährden können. Anstelle dieser *unsymmetrischen Last* spricht man daher auch von *Schieflast*. Im folgenden sollen die Zusammenhänge zwischen einphasiger Leistungspulsation, Strom- und Spannungssymmetrien und daraus die möglichen Gefährdungen der Maschinen quantifiziert werden. Daraus werden verschiedene Methoden der *Symmetrierung*, das heisst des Ausgleichs der einphasigen Leistungspulsationen, abgeleitet.

Symmetrierungsaufgabe

Schliesst man einen beliebigen Verbraucher von Einphasen-Wechselstromenergie (z.B. Bahnenergie), dargestellt durch den komplexen Scheinwiderstand Z_E , an zwei der drei Anschlüsse eines symmetrischen Drehstromnetzes an, so ruft die anliegende Wechselspannung u_E

$$u_E = \sqrt{2} U_E \cos \omega t \quad (1)$$

einen Einphasenstrom i_E

$$i_E = \sqrt{2} I_E \cos(\omega t - \varphi_E) \quad (2)$$

hervor. Beide setzen die Einphasenleistung p_E

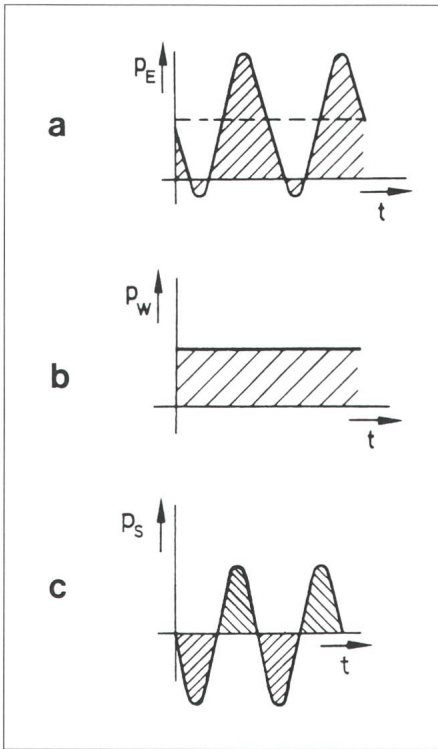


Bild 1 Zeitliche Leistungsverläufe bei Einphasenschluss

- a pulsierende Einphasenlast p_E
- b konstanter Wirklastanteil p_W
- c schwingender Lastanteil p_S
- t Zeit

$$p_E = U_E I_E \cos \varphi_E + U_E I_E \cos(2\omega t - \varphi_E) = p_W + p_S \quad (3)$$

(vgl. Bild 1, a) um. Sie besteht aus der linearen Überlagerung eines zeitlich konstanten Wirkanteils

$$p_W = U_E I_E \cos \varphi_E = \text{const} \quad (4)$$

(vgl. Bild 1, b) und eines mit doppelter Netzfrequenz um den Nullwert schwingenden Leistungsanteils

$$p_S = U_E I_E \cos(2\omega t - \varphi_E) \quad (5)$$

(vgl. Bild 1, c). Die Amplitude dieses schwingenden Leistungsanteils p_S ist gleich dem Effektivwert der Scheinleistung $S_E = U_E I_E$, wenn U_E der Effektivwert der Einphasenspannung und I_E der Effektivwert des Wechselstromes ist. Die Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ ist hier natürlich stets gleich der Frequenz des speisenden Drehstromnetzes.

Die einfachste Methode, ein Drehstromnetz symmetrisch zu belasten, besteht darin, die einphasig zu speisenden Verbraucher in möglichst viele gleich grosse separate Teilverbraucher zu untergliedern, die jeweils einpha-

sig, aber in zyklisch vertauschter Folge an jedesmal zwei der drei Klemmen des Drehstromnetzes angeschlossen werden. Durch Unterteilung der Fahrstrecken in gegeneinander isolierte Streckenabschnitte und deren zyklisch vertauschte Direktspeisung aus dem Drehstromnetz lässt sich ein statistisch schwankender Lastanteil p_{Zykl} der gesamten Einphasenlast p_E symmetrieren, so dass insgesamt von dem gesamten schwingenden Anteil p_S der Gl. (5) nur noch ein Restanteil p_{Rest} zusätzliche Symmetrierungsmassnahmen erfordert:

$$p_{Rest} = (U_E I_E - p_{Zykl}) \cdot \cos(2\omega t - \varphi_E - \psi), \quad (5.1)$$

wobei ψ ein statistisch wechselnder Winkel zwischen 0 und 2π ist. Die im folgenden zu lösende Symmetrieraufgabe besteht demnach darin, diesen verbleibenden schwingenden Anteil p_{Rest} , der nur noch einen Bruchteil der gesamten Einphasen-Bahnlast p_E beträgt, gezielt auf ohnehin schon im Netz vorhandene Energiespeicher (wie z.B. Drehstrom-Synchrongeneratoren entsprechend dem Mass ihrer Schiefbelastbarkeit) aufzuteilen.

Falls jedoch die verfügbare Schiefbelastbarkeit der Generatoren in der Umgebung der einphasigen Einspeisestelle nicht ausreicht, besteht eine weitere Teilaufgabe darin, zusätzliche – möglichst mobile – Energiespeicher zu schaffen, die die darüber hinausgehenden schwingenden Leistungsanteile aufnehmen und dadurch vom dann symmetrischen Drehstromnetz fernhalten. Der letztgenannte Fall könnte beispielsweise an den Enden längerer, gegebenenfalls submariner Tunnelstrecken auftreten.

Lösungsansatz

Das vorgestellte Symmetrierverfahren wird am leichtesten anhand der Methode der symmetrischen Komponenten [1] verständlich: Demnach wird ein symmetrisches Drehspannungssystem dargestellt durch drei gleich grosse, je um $2\pi/3$ zeitlich gegeneinander phasenverschobene Sinusspannungen der Phasenfolge 1, 2, 3, die in der komplexen Zeigerdarstellung ein symmetrisches Dreieck bilden (s. Bild 2). Diese Spannungen $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$ stellen zugleich das mitlaufende Spannungssystem, auch Mitsystem (Index m) genannt, dar. Mit dem Drehzeiger

$$\underline{a} = \exp(j 2\pi/3) \quad (6.0)$$

und dem Ausgangszeiger

$$\underline{U}_J = \underline{U}_m \quad (6.1)$$

ist

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_m \underline{a}^2 \quad (6.2)$$

sowie

$$\underline{U}_3 = \underline{U}_m \underline{a}. \quad (6.3)$$

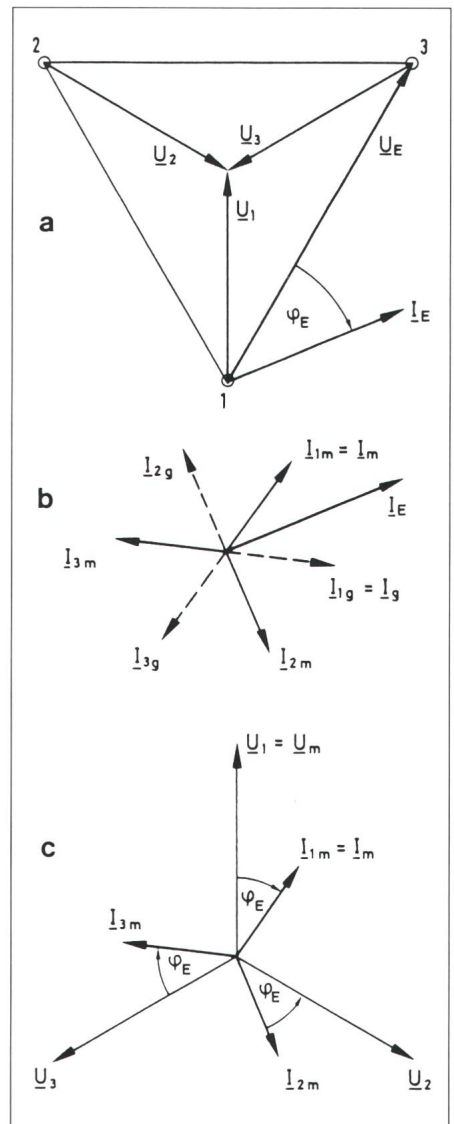


Bild 2 Symmetrische Komponenten des Einphasensystems

- a Zeitzeiger des symmetrischen Drehspannungssystems (Indices 1, 2, 3) und des Einphasensystems (Index E)
 - b zerlegen des Einphasenstroms I_E in mit- (Index m) und gegen- (Index g) laufende Stromkomponenten
 - c zugehöriges symmetrisches mitlaufendes System: zeitlich konstante Wirkleistung $3 U_m I_m \cos \varphi_E$ und Blindleistung $3 U_m I_m \sin \varphi_E$
- φ_E Phasenwinkel

Definitionsgemäss sind das gegenlaufende Spannungssystem (Index g) sowie das Nullspannungssystem (Index 0) des symmetrischen Drehstromsystems stets gleich Null.

Wird eine Einphasenlast – dargestellt durch den komplexen Scheinwiderstand

$$\underline{Z}_E = Z_E \exp(-j \varphi_E) \quad (7.0)$$

– an zwei der drei Drehstromnetz-klemmen (z.B. 1 und 3 in Bild 2, a) angeschlossen, so liegt an \underline{Z}_E die Wechselspannung der Gl. (1), hier dargestellt durch den komplexen Zeiger

$$\underline{U}_E = \underline{U}_1 - \underline{U}_3. \quad (7.1)$$

Durch \underline{Z}_E fliesst der Wechselstrom

$$\begin{aligned} \underline{I}_E &= (\underline{U}_E / \underline{Z}_E) \\ &= (\underline{U}_E / Z_E) \exp(-j \varphi_E). \end{aligned} \quad (7.2)$$

Dieser lässt sich nach der obengenannten Methode der symmetrischen Komponenten zerlegen (siehe Bild 2, b) in je ein mitlaufendes Stromsystem:

$$\underline{I}_{1m} = \underline{I}_m = (\underline{I}_E / \sqrt{3}) \exp(j\pi/6) \quad (7.3)$$

$$\underline{I}_{2m} = \underline{a}^2 \underline{I}_m \quad (7.4)$$

$$\underline{I}_{3m} = \underline{a} \underline{I}_m \quad (7.5)$$

und ein gegenlaufendes Stromsystem, auch *Inverssystem* genannt:

$$\underline{I}_{1g} = \underline{I}_g = (\underline{I}_E / \sqrt{3}) \exp(-j\pi/6) \quad (7.6)$$

$$\underline{I}_{2g} = \underline{a} \underline{I}_g \quad (7.7)$$

$$\underline{I}_{3g} = \underline{a}^2 \underline{I}_g \quad (7.8)$$

Das mitlaufende Stromsystem belastet das Drehstromnetz symmetrisch (Bild 2, c): Es setzt mit dem symmetrischen Netzspannungssystem $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$ resultierend eine zeitlich konstante Scheinleistung

$$S = 3 U_m I_m = \text{const} \quad (8.0)$$

um. Ihr Wirkanteil P_W (vgl. Gl. (4)) addiert sich zu

$$\begin{aligned} P_W &= p_W = 3 U_m I_m \cos \varphi_m \\ &= U_E I_E \cos \varphi_E = \text{const}, \end{aligned} \quad (8.1)$$

während sich die drei Blindleistungsanteile des mitlaufenden Spannungs- und Stromsystems – wie ja auch die Momentenwerte der symmetrischen Spannungs- und Stromkomponenten –

jederzeit zu Null addieren, aber das Drehstromnetz insgesamt mit der Blindleistung P_B belasten:

$$\begin{aligned} P_B &= 3 U_m I_m \sin \varphi_m \\ &= U_E I_E \sin \varphi_E. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Das gegenlaufende Stromsystem $\underline{I}_{1g}, \underline{I}_{2g}, \underline{I}_{3g}$ setzt dagegen gemeinsam mit dem symmetrischen, mitlaufenden Spannungssystem $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$ den mit doppelter Netzfrequenz um den Nullwert schwingenden Anteil p_S (s. Gl. (5)) der insgesamt pulsierenden Einphasenlast p_E (vgl. Gl. (3)) um. Hier von subtrahiert sich der durch Unterteilen von p_E und zyklisches Verteilen auf das Drehstromnetz statistisch schwankende Anteil p_{Zykl} gemäss Gl. (5.1).

Die Symmetrieraufgabe lässt sich jetzt so formulieren, dass ohnehin am

Drehstromnetz vorhandene elektromechanische Energiespeicher – einen solchen stellen alle Drehstromgeneratoren mit Dämpferkäfig dar – veranlasst werden, einen zeitsynchronen und in der Summe betragsgleichen schwingenden Leistungsanteil

$$\begin{aligned} p_{Sy} &= -p_{Rest} \\ &= (U_E I_E - p_{Zykl}) \\ &\quad \cos(2\omega t - \varphi_E - \psi) \end{aligned} \quad (8.3)$$

mit einer exakten Phasenverschiebung von π (d.h. negativen Vorzeichens) zu p_{Rest} zu erzeugen, so dass resultierend für das gesamte Drehstromnetz nur der symmetrierte, zeitkonstante Lastanteil p_W der Einphasenlast verbleibt:

$$\begin{aligned} (p_E - p_{Zykl}) + p_{Sy} \\ &= (p_W + p_{Rest}) + p_{Sy} \\ &= p_W = \text{const}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

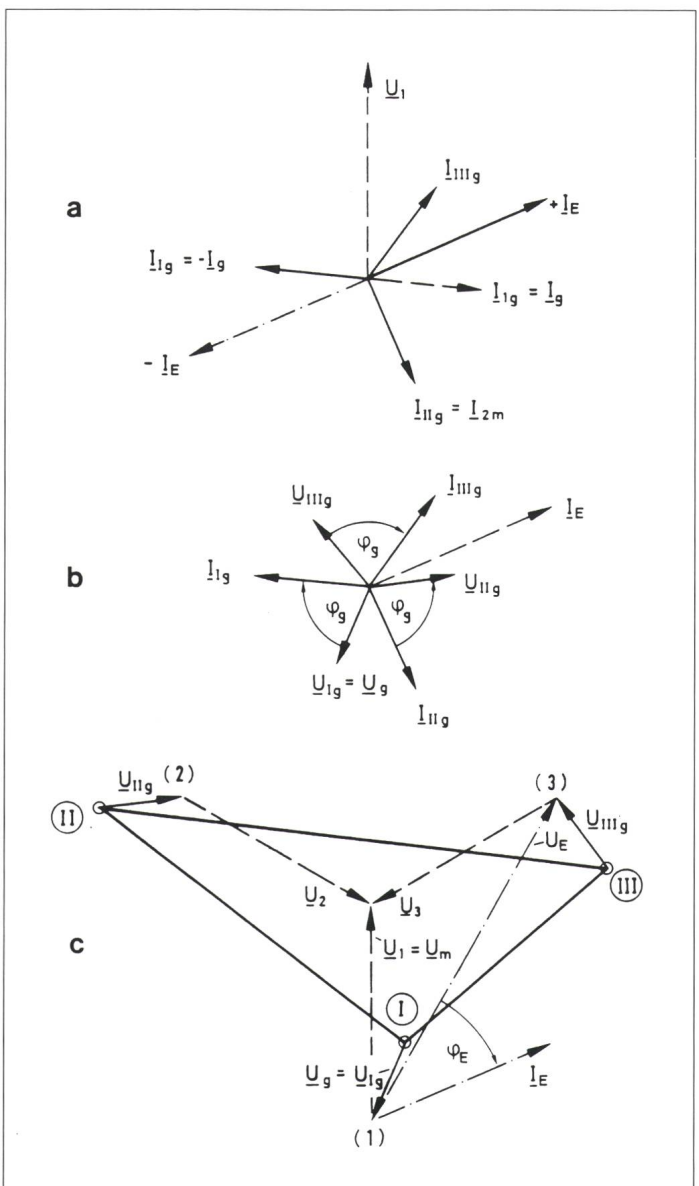
Bild 3 Erforderliche Maschinenstromkomponenten und Maschinenspannungskomponenten

Maschinenkomponenten: Index in römischen Zahlen; mitlaufende Komponenten: Index m ; gegenlaufende Komponenten: Index g

a erforderliche gegenlaufende Maschinenstromkomponenten

b zugehörige erforderliche gegenlaufende Maschinenspannungskomponenten

c resultierend erforderliches unsymmetrisches Maschinenspannungssystem (I, II, III)



Die folgenden Überlegungen sollen der besseren Übersichtlichkeit halber für den ungünstigsten Fall, dass $p_{Zykl} = 0$ ist, durchgeführt werden: Da für das Drehstromnetz gemäss den Gl. (6.1) bis (6.3) nur mitlaufende Spannungskomponenten zugelassen sind, bedeutet die Erfüllung der Gleichung (8.4), dass von den Symmetriermaschinen das zum Inverssystem der Gl. (7.6) bis (7.8) entgegengesetzt gleich grosse gegenlaufende Stromsystem (mit römischen Ziffern bezeichnet) erzeugt werden muss (vgl. Bild 3, a):

$$I_{Ig} = -I_{Ig} = -I_g \quad (9.1)$$

$$I_{IIg} = -I_{2g} = I_{2m} \quad (9.2)$$

$$I_{IIIg} = -I_{3g} \quad (9.3)$$

Natürlich könnte dieses Stromsystem auch von schalt- oder steuerbaren statischen Energiespeichern wie Kondensatorbatterien und Drosselspulen aufgebracht werden [2], was jedoch eine Verschwendung der durch den Übergang auf 50-Hz-Bahnstromnetze eingesparten Investitionsmittel bedeuten würde, da am Drehstromnetz bereits genügend elektromechanische Energiespeicherfähigkeit vorhanden ist: Jeder Drehstromnetzgenerator ist in der Lage, zwischen 5% und 15%, im Schnitt also rund 10%, seines Nennstromes zusätzlich als Inversstrom aufzunehmen. Letzterer beansprucht in erster Linie den Dämpferkäfig mit Strömen doppelter Netzfrequenz, deren Beherrschung jedoch in jedem Einphasen-Generator Stand der Technik ist, wobei in Einphasen-Generatoren das Inversstromsystem nicht 10%, sondern 100% des Mitstromsystems beträgt.

Da die Synchrongeneratoren jedoch eine endliche Inversimpedanz Z_g besitzen, die bei kleineren bis mittleren Maschinen in der Grössenordnung von 10% der Nennimpedanz Z_N liegt, addieren sich an den Maschinenklemmen beim Fließen der nach den Gl. (9.1) bis (9.3) zur Symmetrierung erforderlichen Inversströme zu den ursprünglich symmetrisch mitlaufenden Netzspannungssystem der Gl. (6.1) bis (6.3) jetzt zusätzliche gegenlaufende Spannungskomponenten (vgl. Bild 3, b)

$$U_g = I_g Z_g \quad (9.4)$$

Resultierend stellt sich also zwangsläufig ein unsymmetrisches Spannungssystem

$$U_M = U_m + U_g \quad (9.5)$$

(mit dem Index M für Maschine) an den Klemmen ein. Nach einem Gedanken von E. Kübler [3] ist es umgekehrt mittels der gezielten Einstellung der nach Gl. (9.5) genau vorausberechenbaren Spannungsunsymmetrie an den Klemmen grosser Drehstrommaschinen mit geeigneten Dämpferkäfig möglich, diese exakt auf die Abgabe des Inversstromsystems

$$I_{Mg} = -I_g = U_g / Z_g \quad (9.6)$$

einzustellen, das benötigt wird, damit die Maschine ihren Anteil p_{MSy} zur Kompensation des noch verbleibenden schwingenden Anteils p_{Rest} der Einphasen-Bahnlast übernimmt. (s. Gl. (8.4)).

Unter Beachtung der Zusammenhänge gemäss den Gl. (6.1) bis (6.3) und (7.6) bis (7.8) berechnet sich das jeweils erforderliche unsymmetrische Maschinenspannungssystem nach Einsetzen der Gl. (9.4) und (9.6) in Gl. (9.5):

$$U_M = U_m + (I_{Mg} Z_g) = U_m - I_g Z_g \quad (9.7)$$

Dieses resultierend unsymmetrische Maschinenspannungssystem ist in Bild 3, c dargestellt – zur besseren Verdeutlichung mit übertrieben grossen Inverskomponenten.

Technische Ausführung

Mit Hilfe der modernen digitalen Mess-, Rechen- und Steuerelektronik

[4] können die nach Gl. (8.3) verbleibenden und daher durch die beschriebenen Zusatzmassnahmen noch auszugleichenden schwingenden Leistungsanteile p_{Rest} nach Betrag und Phasenlage rasch und genau erfasst werden. Daraus lassen sich nach den Gl. (7.6) bis (7.8) die insgesamt zur Symmetrierung der Leistung p_{Rest} erforderlichen Inversströme in den vorgenannten Mikrorechnern berechnen. Nach einem dort ebenfalls gespeicherten Schlüssel werden sie entsprechend der Schiefbelastbarkeit der benachbarten Drehstromsynchrongeneratoren über deren unsymmetrische Klemmenspannungseinstellung nach Gl. (9) auf die verschiedenen, im Drehstromnetz vorhandenen Synchrongeneratoren verteilt.

Die Einstellung der jeweils erforderlichen unsymmetrischen Maschinenklemmenspannungen können beispielsweise über entsprechend in den einzelnen Strängen mit ungleicher Windungszahl angezapften Maschinentransformatoren [5] erfolgen. Sie sind als Stelltransformatoren mit voneinander unabhängiger Stufeneinstellbarkeit in den drei Strängen auszuführen. Zur Aufrechterhaltung des Durchflutungsgleichgewichts (d.h. um Kesselwandmagnetisierungen durch Nulldurchflutungsflüsse zu vermeiden) ist mindestens eine Transformatorwicklung – erforderlichenfalls eine Tertiärwicklung – in Dreieck zu schalten.

Selbstverständlich kann dieselbe – in der eben beschriebenen Weise ermittelte – Maschinenspannungsunsymmetrie anstelle eines Stelltransformators auch mit vorgeschalteten, lei-

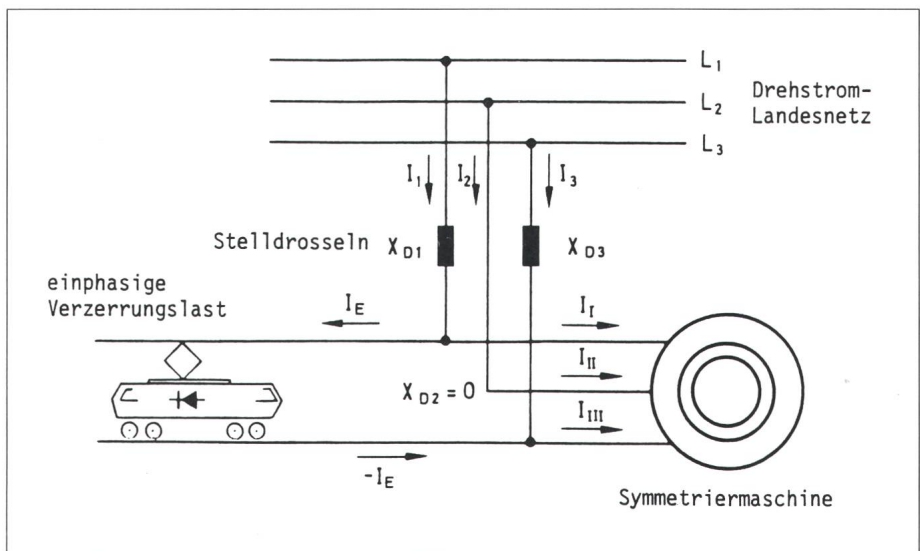


Bild 4 Zusätzliche Symmetriereinrichtung für kritische Einspeisungsstellen

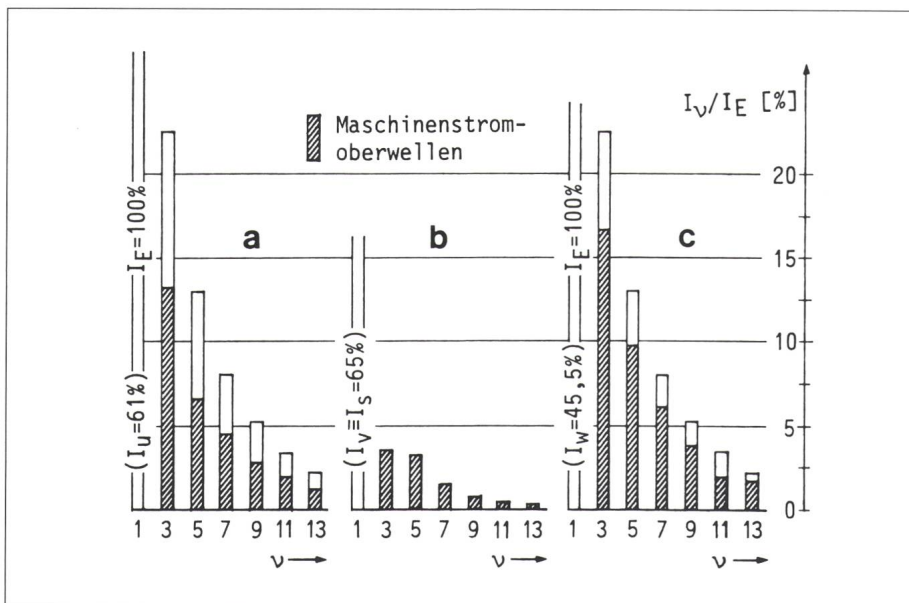


Bild 5 Gemessene Aufteilung der Oberschwingungen des Einphasenstromes

- I_E Effektivwert des Einphasen-Wechselstromes
 I_U, I_V, I_W Effektivwerte der Motorstromoberwellen
 I_l Stromoberschwungung der Ordnung v ($v=1$: Grundschwungung)
 v Ordnungszahl der Schwungung
 a Strang 1
 b Strang 2
 c Strang 3

stungselektronisch verstellbaren Blindwiderständen [2] eingestellt werden. Deren Bauleistung beträgt nur einen Bruchteil der Maschinenleistung und richtet sich nach der Inversimpedanz der Drehstromsynchronmaschine: Bei $Z_g = 9\%$ per unit beträgt die in die Blindwiderstände als Stellglieder zu installierende Leistung maximal nur 9% der Maschinenbauleistung.

Zusätzliche automatische Symmetriereinrichtungen

In Ausnahmefällen (z.B. im Eingangsbereich längerer beispielsweise submariner Tunnel oder an Neubaustellen der Bahnelektrifizierung) kann es sein, dass die in direkter Nachbarschaft zur einphasigen Einspeisestelle vorhandene Symmetrieleistung der Drehstromgeneratoren nicht ausreichend ist. In diesen Fällen ist es zweckmässig, zusätzliche automatische Symmetriereinrichtungen gemäss Bild 4 – sie können auch fahrbar ausgeführt werden – zur Verfügung zu haben. Sie bestehen aus einer selbstanlaufenden ungekuppelten Drehstrom-Synchronmaschine mit einem Dämpferkäfig, der genauso stark be-

messert ist wie der von Einphasengeneratoren. Im Unterschied zu letzteren erzeugt die synchrone Symmetriemaschine jedoch nur den schwingenden Anteil p_S der Einphasenlast (vgl. Bild 1, c), das heisst sie führt das gegenlaufende Stromsystem gemäss Gl. (9.1) bis (9.3). Die Bauleistung dieser 50-Hz-Symmetriemaschine beträgt weniger als ein Viertel derjenigen eines leistungsgleichen 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahngenerators: Aufgrund der höheren Synchronzahl verringert sich ihre Grösse bereits auf ein Drittel, und da sie keinen Einphasenstrom, sondern ein symmetrisches, gegenlaufendes Stromsystem führt, geht ihre Baugrösse nochmals auf zwei Drittel, das heisst insgesamt auf 22% zurück!

Ausführliche Berechnungen [5] zeigen, dass es bei einem üblicherweise um 0,8 liegenden Leistungsfaktor der Einphasenlast genügt, zwei feste Drosselspulen gemäss Bild 4 in die gemeinsamen Zuleitungen zum Einphasenverbraucher und der parallelen Symmetriemaschine zu schalten, deren Induktivität jeweils der Grösse der Inversimpedanz der Maschine entspricht. In diesem Fall erzeugen die beim Fliessen des Einphasenstromes entstehenden unsymmetrischen Spannungsabfälle automatisch nach Betrag und Phasenlage das zur Symmetrie-

benötigte gegenlaufende Maschinenstromsystem. Diese Einrichtung ist sehr betriebssicher, da bei Ausfall der Maschine in jedem Fall die Einphasen-Stromversorgung sichergestellt ist.

Die in den Drosseln zu installierende Bauleistung beträgt – da sie fest nur in zwei der drei Netzleitungen benötigt wird – auch nur $\frac{2}{3}$ der im Beispiel am Ende des Abschnitts über die technische Ausführung erforderlichen Werte, das heisst bei einer Inversimpedanz von ebenfalls 9% per unit beträgt die Bauleistung beider Stelldrosselspulen zusammen nur 6% (statt 9%) der Maschinenbauleistung.

Da diese Stelldrosseln weder geschaltet noch sonstwie geregelt oder verstellt werden müssen, handelt es sich insgesamt um eine äusserst kostengünstige und äusserst robuste betriebssichere Symmetriereinrichtung höchster Verfügbarkeit und Lebensdauer, zumal die Synchronmaschine bürstenlos ausgeführt wird. Die besonderen Vorteile des Überganges von der 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnfrequenz auf 50 Hz werden aus folgendem Vergleich deutlich:

Da die Symmetriemaschine gegenüber dem bisherigen 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Generator mit dreifacher Frequenz und damit dreifacher Synchronzahl betrieben wird, gibt sie nicht nur die dreifache Leistung – also 30 MVA statt bisher 10 MVA – ab. Vielmehr kann sie darüber hinaus dauernd um weitere 50% höher belastet werden, da – im Unterschied zum Einphasengenerator – bei der Symmetriemaschine alle drei Stränge von gleich grossen Inversströmen gleichmässig belastet sind. Dieselbe Baugrösse des bisherigen 10-MW-Generators erbringt jetzt 45 MVA Symmetrieleistung, wobei zusätzlich der bisherige Antriebsmotor mit Kaskade entfällt und damit die zusätzlichen Verluste der doppelten Energieumformung ebenfalls entfallen.

Messergebnisse

Die vorstehend hergeleiteten Verhältnisse wurden an einer 24-kVA-Modellversuchsanlage messtechnisch im Betrieb einer entsprechenden einphasigen Gleichrichterlast – die die Gleichrichter-Lokomotivlast nachbildete – am öffentlichen 50-Hz-Drehstromnetz betrieben. Sämtliche Messergebnisse stimmten im Rahmen der auch im öffentlichen Netz unvermeid-

baren, statistisch auftretenden Netzspannungsunsymmetrien von 1% der Nennspannung mit den Berechnungen sowohl der Transformatoranzapfungen als auch der Drosselstellungen überein. Erwartungsgemäss wirkten die Stelldrosseln als Sperrdrosseln für die durch den einphasigen Gleichrichterbetrieb hervorgerufenen Stromüberschwingungen. Wie in Bild 5 dargestellt, übernimmt die Symmetriermaschine die Oberschwingungen im Verhältnis der Drosselreaktanz zu ihrer Inversreaktanz.

Zusammenfassung

Die sich ständig verschärfende Wettbewerbslage des Bahnverkehrs erzwingt den Übergang vom überkommenen 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnstrom auf 50-Hz-Strom, zumal die technischen Gründe für die Frequenzreduzierung entfallen sind: Die physikalisch bedingten und daher unvermeidbaren Nachteile des 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Betriebes – höhere Betriebskosten und bis zum Fak-

tor drei höhere Investitionskosten an Generatoren, Transformatoren, Drosseln usw. – bedeuten schwerste, auf Dauer nicht zu kompensierende Wettbewerbsnachteile vor allem für den anstehenden Ausbau des internationalen durchgehenden Fern- und Schnellverkehrs.

Es wird eine äusserst aufwandsarme Methode beschrieben, am Netz vorhandene Drehstrom-Synchronmaschinen entsprechend ihrer Schiefbelastbarkeit zur Symmetrierung von 50-Hz-Einphasen-Bahnlasten auf das Drehstrom-Landesnetz heranzuziehen. Dieses kann durch in den drei Strängen einzeln, das heisst unsymmetrisch verstellbare Stufentransformatoren oder eleganter durch stetig verstellbare Blindwiderstände in den Maschinenzuleitungen – automatisiert durch entsprechende Mikrorechnersteuerungen – erfolgen.

Abschliessend wird für besonders kritische Einspeisepunkte in das 50-Hz-Bahnnetz (z.B. an den Enden langer submariner Tunnelstrecken) eine kostengünstige, auch mobil ausführ-

bare Symmetriermaschine bis 45 MVA Leistung vorgestellt, die mittels fest installierter Drosselpulen von 6% der Maschinenbauleistung selbsttätig die jeweils anfallende Bahnlast auf das Drehstromnetz symmetriert und gleichzeitig Stromüberschwingungen des Einphasennetzes vom Drehstromnetz fernhält.

Literatur

- [1] A. Hochrainer: Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Berlin. Springer Verlag, 1957.
- [2] G.H. Thumm und B. Walther: Geregelter Parallel- und Reihenkompensation. *Elektrie* 45(1991)3. S. 88–90.
- [3] T. Blydt-Hansen: Symmetrierung von Einphasenstrom auf das Drehstromnetz mittels leerlaufender Synchronmaschine mit vorgeschalteten Drosselpulen. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1957.
- [4] J. Siebert: Simadyn D – A High-Speed Digital Closed-Loop and Open-Loop Control System. Siemens Power Engineering & Automation VIII(1986)3. S.172–175.
- [5] H.-J. Gutt: Stellgrössenberechnung für Synchronmaschinen mit Spannungssteuerung zur Symmetrierung von Schiefelasten auf das Drehstromnetz. Dissertation der Technischen Hochschule Braunschweig, 1962.