

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:	65 (1974)
Heft:	3
Artikel:	Transiente Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlichen Laständerungen an drei Drehstrom-Synchronmaschinen im Parallelbetrieb
Autor:	Webs, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-915346

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: 22.02.2026

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



Transiente Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlichen Laständerungen an drei Drehstrom-Synchronmaschinen im Parallelbetrieb

Von A. Webs

Mit Hilfe von Zeigerbildern und durch Beachten des Theorems der Flusskonstanz beim Einleiten von Ausgleichsvorgängen in elektrischen Maschinen wurden Gleichungen hergeleitet, die ohne Verwendung der d - q -Komponenten nach Park zum Berechnen der transienten Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlichen Laständerungen an drei Drehstrom-Synchronmaschinen im Parallelbetrieb geeignet sind. An vier numerischen Beispielen wird das Anwenden des angegebenen Verfahrens gezeigt.

621.313.32:621.3.015.33
A l'aide de diagrammes vectoriels et en tenant compte du théorème de la constance du flux, lors de l'amorçage de phénomènes transitoires dans des machines électriques, on en tire des équations qui conviennent, sans employer les composantes directes et transversales d'après Park, pour calculer les conditions transitoires de courant et de tension, dans le cas de brusques modifications de charge à trois machines triphasées synchrones en parallèle. L'application de ce procédé est ensuite indiquée par quatre exemples numériques.

1. Einleitung

In der Literatur [1]¹⁾ wurde ein Berechnungsverfahren zum Ermitteln der Spannungseinbrüche im Netz beim plötzlichen Ausfall grosser Maschineneinheiten angegeben. Dabei wurde beschrieben, wie mit Hilfe von Zeigerbildern und Grundgleichungen die transienten Spannungs- und Stromverhältnisse beim Parallelbetrieb zweier Dreiphasen-Synchronmaschinen im Stosslastbetrieb ermittelt werden können. Neben den transienten Strom- und Spannungsänderungen an der Lastschiene und den Klemmen der Synchronmaschinen können auch die transienten Änderungen der inneren Polradspannungen u_i und der damit verbundenen Polradspannungen u_P erfasst werden.

Das Verfahren gibt dem Netzplaner und Netzberechnner einen sehr anschaulichen Einblick in das elektromagnetische Geschehen bei derartigen Ausgleichsvorgängen, obwohl dieser Einblick nur für einen Zeitaugenblick vermittelt wird. In vielen Fällen sind diese Aussagen jedoch von besonderem Wert, da sie Entscheidungen für die Planung und Gestaltung des Netzes oder über den Anschluss von Stosslastverbrauchern beeinflussen können.

Im vorliegenden Beitrag werden Gleichungen und Zeigerbilder hergeleitet, die auf den Parallelbetrieb dreier Dreiphasen-Synchronmaschinen anwendbar sind. An vier Beispielen wird das Anwenden des Verfahrens demonstriert, wobei in Erweiterung des Verfahrens nach [1] auch die tatsächlichen elektrischen Bedingungen im Vorlastzustand unter Berücksichtigung

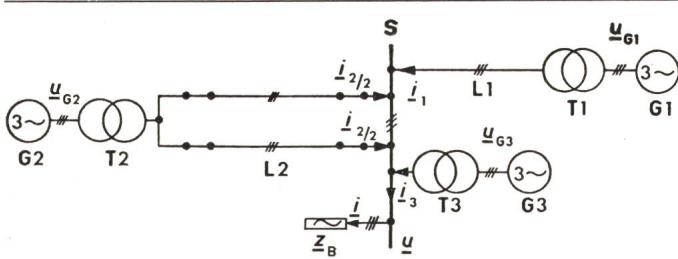
der Übersetzungsverhältnisse für die Transformatoren einbezogen werden.

Hinsichtlich der physikalischen Vereinfachungen und des Standortes des hier verwendeten Näherungsverfahrens im Rahmen der Dynamik der Synchronmaschine sei auch auf [4] verwiesen.

2. Strom- und Spannungsgleichungen für drei Generatoren im Parallelbetrieb und ihre Zeigerbilder

Bei den Untersuchungen wird vom Grundschatzbild des Drehstromnetzes nach Fig. 1 mit den angegebenen Kenndaten der elektrischen Betriebsmittel ausgegangen. Für den stationären Vorlastzustand wird angenommen, dass die drei Generatoren ihre Nennleistungen bei ihren Nennspannungen und Nennleistungsfaktoren an den Klemmen abgeben und ins Lastzentrum liefern. Alle Berechnungen werden im Hinblick auf ein übersichtliches Darstellen der Zeigerbilder mit bezogenen Grössen (per units) durchgeführt, wobei die Nenndaten des Generators 2 die Bezugswerte sind. Die elektrischen Grössen des übrigen Netzes werden entsprechend umgerechnet, wobei insbesondere der Einfluss der Übersetzungsverhältnisse der Transformatoren zu beachten ist. In Tabelle I sind die so bestimmten bezogenen Parameter zusammengestellt. Aus diesen Grössen wurde das Zeigerbild für den stationären Vorlastzustand nach Fig. 2 entwickelt [2]. Darin sind auch die Grössen bezeichnet, die zum Ermitteln der transienten Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlichen Laständerungen erforderlich sind. Um die recht umfangreichen Erläuterungen und Voraussetzungen für diese Grössen und Betrachtungen aus

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



Buchstaben-symbol	Einheit	Generator 1 G 1	Generator 2 G 2	Generator 3 G 3
S_{NG}	MVA	235,0	235,0	235,0
u_{NG}	kV	15,0	15,0	15,0
$\cos \varphi_{NG}$		0,85	0,9	0,75
x_d	%	170,0	91,5	179,0
x_d'	%	23,0	34,5	25,0
x_q	%	145,0	65,0	152,0
		Transformator 1 T 1	Transformator 2 T 2	Transformator 3 T 3
S_{NT}	MVA	235,0	235,0	235,0
u_{OS}	kV	250,0	245,0	240,0
u_{US}	kV	15,0	15,0	15,0
u_k	%	11,0	13,0	11,33
		Leitung 1 L 1	Leitung 2 L 2	
x'	Ω/km	0,32	0,32	
l	km	122,14	273,55	
		je Leiter	je System und Leiter	
Index G für Generator		Index T für Transformator		

Fig. 1 Netzschatzung und Kenndaten der elektrischen Betriebsmittel

S_{NG}	Nennscheinleistung	U_{NG}	Nennspannung
$\cos \varphi_{NG}$	Nennleistungsfaktor	x_d	Syncronreaktanze der Längsachse
x_d'	Transfrentreaktanze der Längsachse	x_q	Syncronreaktanze der Querachse
S_{NT}	Nennscheinleistung	u_{OS}	Transformator-Oberspannung
u_{US}	Transformator-Unterspannung	u_k	Kurzschlußspannung
x'	längenbezogene Leitungsreaktanze	l	Leitungslänge
Index G für Generator		Index T für Transformator	

Platzgründen weitgehend einzuschränken, werden in diesem Beitrag die Definitionen aus [1] verwendet, so dass hier nur neu eingeführte Größen zusätzlich erklärt werden.

Es sei hier besonders erwähnt, dass der Vorlastzustand und damit auch die Wahl der Übersetzungsverhältnisse für die Transformatoren durch eine vorausgehende Lastflussuntersuchung ermittelt werden müssen, wobei mehrere Iterations-schritte erforderlich sind. Nur so ergibt sich der Ausgangszustand für die weiteren Untersuchungen, die schliesslich im numerischen Auswerten der hergeleiteten Beziehungen ihre praktische Bedeutung erhalten.

Nach Fig. 1 ist der Vorbelastungsstrom der Sammelschiene S:

$$\mathbf{i}_B = \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 \quad (1a)$$

oder

$$\frac{\mathbf{u}}{z_B} = \frac{\mathbf{u}}{z_1} + \frac{\mathbf{u}}{z_2} + \frac{\mathbf{u}}{z_3} \quad (1b)$$

Die Impedanz z_B der Gesamtbelastung ergibt sich aus der Beziehung:

$$z_B = \frac{z_1 z_2 z_3}{z_1 z_2 + z_2 z_3 + z_3 z_1} \quad (1c)$$

Die inneren Polradspannungen sind nach Fig. 2:

$$\mathbf{u}_{11} = \mathbf{u} + j x_{q1r} \mathbf{i}_1 = u_{11} e^{j\Delta_{13}} \quad (2a)$$

$$\mathbf{u}_{12} = \mathbf{u} + j x_{q2r} \mathbf{i}_2 = u_{12} e^{j\Delta_{23}} \quad (2b)$$

$$\mathbf{u}_{13} = \mathbf{u} + j x_{q3r} \mathbf{i}_3 = u_{13} e^{j0^\circ} \quad (2c)$$

Bei dem gewählten Koordinatensystem fällt die Richtung der reellen Achse mit der Richtung der inneren Polradspannung u_{13} zusammen. Diese Vereinbarung weicht von der sonst üblichen Darstellung des rechtwinkligen Koordinatensystems ab. Da beim beschriebenen Verfahren auch ein Aufspalten in die d -, q -Komponenten nach Park [3] nicht erforderlich ist, führt diese Wahl zu einer wesentlichen Vereinfachung des Berechnungsverfahrens.

Die in den Gln. (2a, b, c) enthaltenen Winkel Δ sind die charakteristischen Differenzwinkel zwischen den Polradspannungen der einzelnen Synchronmaschinen. Sofern diese Synchronmaschinen generatorisch arbeiten, gelten nachstehende Definitionen:

$$\Delta_{12} = \vartheta_1 - \vartheta_2 \quad (3a)$$

$$\Delta_{13} = \vartheta_1 - \vartheta_3 \quad (3b)$$

$$\Delta_{23} = \vartheta_2 - \vartheta_3 \quad (3c)$$

Für die nach Fig. 1 und 2 betrachteten drei Synchrongeneratoren können die resultierenden Reaktanzen für die Gln. (2a, b, c) von der Lastschiene S aus gesehen ermittelt werden:

$$x_{d1r} = x_{d1} + x_{T1} + x_{L1}$$

$$x'_{d1r} = x'_{d1} + x_{T1} + x_{L1}$$

$$x_{q1r} = x_{q1} + x_{T1} + x_{L1}$$

$$x_{d2r} = x_{d2} + x_{T2} + x_{L2}$$

$$x'_{d2r} = x'_{d2} + x_{T2} + x_{L2}$$

$$x_{q2r} = x_{q2} + x_{T2} + x_{L2}$$

$$x_{d3r} = x_{d3} + x_{T3}$$

$$x'_{d3r} = x'_{d3} + x_{T3}$$

$$x_{q3r} = x_{q3} + x_{T3}$$

Aus Fig. 2 lassen sich die folgenden geometrischen Verhältnisse ableiten, wobei $v = 1, 2, 3$:

$$\frac{u_{iv} - u'_{Hv}}{u_{iv} - u \cos \vartheta_v} = \frac{x_{qvr} - x'_{dvr}}{x'_{dvr}} \quad (4a)$$

$$\frac{u_{Pv} - u_{iv}}{u_{iv} - u \cos \vartheta_v} = \frac{x_{dvr} - x_{qvr}}{x_{qvr}} \quad (4b)$$

Die zum Untersuchen der transientes Ausgleichsvorgänge wichtigen Hauptfeldspannungen u'_{Hv} ergeben sich durch Umformen der Gl. (4a):

$$u'_{Hv} = u_{iv} \frac{x'_{dvr}}{x_{qvr}} + \frac{x_{qvr} - x'_{dvr}}{x_{qvr}} u \cos \vartheta_v \quad (5a)$$

Aus Gl. (4b) wird der Ausdruck für die Polradspannungen entwickelt:

$$u_{Pv} = u_{iv} \frac{x_{dvr}}{x_{qvr}} - \frac{x_{dvr} - x_{qvr}}{x_{qvr}} u \cos \vartheta_v \quad (5b)$$

Eine plötzliche Laständerung mit dem Übergang von der Last-impedanz z_B auf z'_B führt auch zum Verändern der inneren Polradspannungen u_{iv} , der Polradspannungen u_{Pv} , der Teilströme i_v und der Spannung u an der Lastschiene S in die entsprechenden transientes Größen u'_{iv} , u'_{Pv} , i'_v und u' . Dagegen

bleiben nach dem Theorem der Flusskonstanz die Hauptfeldspannungen \mathbf{u}'_{Hv} für die hier untersuchten transienten Strom- und Spannungsverhältnisse in ihren Begräßen und Richtungen bestehen, wobei wie in [1] der subtransiente Zustand ausser Betracht bleibt.

Für die transienten Bedingungen können die transienten inneren Polradspannungen der drei Generatoren aus Gl. (5a) hergeleitet werden:

$$u'_{i1} = u'_{\text{H1}} \frac{x_{q1r}}{x'_{d1r}} - \frac{x_{q1r} - x'_{d1r}}{x'_{d1r}} u' \cos \vartheta_1' \quad (6a)$$

$$u'_{i2} = u'_{\text{H2}} \frac{x_{q2r}}{x'_{d2r}} - \frac{x_{q2r} - x'_{d2r}}{x'_{d2r}} u' \cos \vartheta_2' \quad (6b)$$

$$u'_{i3} = u'_{\text{H3}} \frac{x_{q3r}}{x'_{d3r}} - \frac{x_{q3r} - x'_{d3r}}{x'_{d3r}} u' \cos \vartheta_3' \quad (6c)$$

Zum Lösen dieser Gleichungen sind noch die Beziehungen für die unbekannten Ausdrücke $u' \cos \vartheta'$ erforderlich. Hierzu werden die Gleichungen für die transienten Belastungsströme herangezogen. Beim Beachten der Gl. (2a, b, c) und Auflösen nach den Strömen werden die erforderlichen Ausdrücke für den transienten Zustand erhalten:

$$\mathbf{i}'_v = \frac{\mathbf{u}'_v - \mathbf{u}'}{j x_{qvr}} \quad (7a)$$

$$\mathbf{i}'_B = \sum_{v=1}^3 \mathbf{i}'_v = \frac{\mathbf{u}'}{z'_B} \quad (7b)$$

Elektrische Kenndaten der Betriebsmittel in p. u.
(G 2 ist der Bezugsgenerator)

Tabelle I

	Generator 1 G 1	Generator 2 G 2	Generator 3 G 3
s_G	1,0	1,0	1,0
u_G	1,02040816	1,0	0,97959183
$\cos \varphi_G$	0,85	0,9	0,75
x_d	1,77009579	0,915	1,71768429
x'_d	0,23948354	0,345	0,23990004
x_q	1,50978758	0,65	1,45859225
	Transformator 1 T 1	Transformator 2 T 2	Transformator 3 T 3
s_T	1,0	1,0	1,0
u_{0S}	1,02040816	1,0	0,97959183
u_{US}	1,02040816	1,0	0,97959183
u_K	0,11453561	0,13	0,10871525
	Leitung 1 L 1	Leitung 2 L 2	
x_L	0,15301386	0,171353654 Doppel- system je Phase	
x'_L		0,342706308 Einfach- system je Leiter	
x_{dr}	2,03764527	1,21635365	1,82639955
x'_{dr}	0,50703302	0,64635365	0,34861529
x_{qr}	1,77733706	0,95135365	1,56730750
Die Berechnungen wurden mit einer Datenverarbeitungsmaschine durchgeführt.			

Mit Hilfe des Überlagerungsgesetzes wird der Ausdruck der transienten Spannung an der Lastschiene für das Dreimaschinenproblem aus den Gl. (7a, b) bestimmt.

$$\mathbf{u}' = \frac{(\mathbf{u}'_{i1} x_{q2r} x_{q3r} + \mathbf{u}'_{i2} x_{q1r} x_{q3r} + \mathbf{u}'_{i3} x_{q1r} x_{q2r}) z'_B}{j x_{q1r} x_{q2r} x_{q3r} + z'_B (x_{q1r} x_{q2r} + x_{q2r} x_{q3r} + x_{q3r} x_{q1r})} \quad (8a)$$

$$\mathbf{u}' = (\mathbf{u}'_{i1} x_{q2r} x_{q3r} + \mathbf{u}'_{i2} x_{q1r} x_{q3r} + \mathbf{u}'_{i3} x_{q1r} x_{q2r}) k e^{j\beta} \quad (8b)$$

wobei

$$k e^{j\beta} = \frac{z'_B}{j x_{q1r} x_{q2r} x_{q3r} + z'_B (x_{q1r} x_{q2r} + x_{q2r} x_{q3r} + x_{q3r} x_{q1r})} \quad (9)$$

Aus Gl. (8b) werden die unbekannten Ausdrücke $u' \cos \vartheta_v'$ entwickelt:

$$u' \cos \vartheta_1' = u'_{i1} x_{q2r} x_{q3r} k \cos \beta + u'_{i2} x_{q1r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{12} - \beta) + u'_{i3} x_{q1r} x_{q2r} k \cos (\vartheta_{13} - \beta) \quad (10a)$$

$$u' \cos \vartheta_2' = u'_{i1} x_{q2r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{12} + \beta) + u'_{i2} x_{q1r} x_{q2r} k \cos \beta + u'_{i3} x_{q1r} x_{q2r} k \cos (\vartheta_{23} - \beta) \quad (10b)$$

$$u' \cos \vartheta_3' = u'_{i1} x_{q2r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{13} + \beta) + u'_{i2} x_{q1r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{23} + \beta) + u'_{i3} x_{q1r} x_{q2r} k \cos \beta \quad (10c)$$

Die Gl. (10a, b, c) werden in die Gl. (6a, b, c) eingeführt, so dass letztere ausser den unbekannten und gesuchten transienten inneren Polradspannungen nur bekannte Koeffizienten enthalten. Zum Lösen des Gleichungssystems mit Hilfe der Determinantenrechnung werden die Gl. (6a, b, c) in folgende Form gebracht:

$$A_1 = (1 + A_2 a_1) u'_{i1} + A_2 a_2 u'_{i2} + A_2 a_3 u'_{i3} \quad (11a)$$

$$B_1 = B_2 b_1 u'_{i1} + (1 + B_2 b_2) u'_{i2} + B_2 b_2 u'_{i3} \quad (11b)$$

$$C_1 = C_2 c_1 u'_{i1} + C_2 c_2 u'_{i2} + (1 + C_2 c_3) u'_{i3} \quad (11c)$$

In diesen Gleichungen sind:

$$A_1 = u'_{\text{H1}} \frac{x_{q1r}}{x'_{d1r}} \quad A_2 = \frac{x_{q1r} - x'_{d1r}}{x'_{d1r}}$$

$$B_1 = u'_{\text{H2}} \frac{x_{q2r}}{x'_{d2r}} \quad B_2 = \frac{x_{q2r} - x'_{d2r}}{x'_{d2r}}$$

$$C_1 = u'_{\text{H3}} \frac{x_{q3r}}{x'_{d3r}} \quad C_2 = \frac{x_{q3r} - x'_{d3r}}{x'_{d3r}}$$

$$a_1 = x_{q2r} x_{q3r} k \cos \beta$$

$$a_2 = x_{q1r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{12} - \beta)$$

$$a_3 = x_{q1r} x_{q2r} k \cos (\vartheta_{13} - \beta)$$

$$b_1 = x_{q2r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{12} + \beta)$$

$$b_2 = x_{q1r} x_{q3r} k \cos \beta$$

$$b_3 = x_{q1r} x_{q2r} k \cos (\vartheta_{23} - \beta)$$

$$c_1 = x_{q2r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{13} + \beta)$$

$$c_2 = x_{q1r} x_{q3r} k \cos (\vartheta_{23} + \beta)$$

$$c_3 = x_{q1r} x_{q2r} k \cos \beta$$

Das Gleichungssystem (11a, b, c) wird nun nach den gesuchten transienten inneren Polradspannungen u'_{iv} für das Dreimaschinenproblem aufgelöst:

$$u'_{i1} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{N_1 - N_2} \quad (12a)$$

$$u'_{i2} = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{N_1 - N_2} \quad (12b)$$

$$u'_{i3} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{N_1 - N_2}$$

(12c)

$$E_1 = A_1 [(1 + B_2 b_2)(1 + C_2 c_3) - B_2 b_3 C_2 c_2]$$

$$E_2 = B_1 A_2 [C_2 a_3 c_2 - a_2 (1 + C_2 c_3)]$$

$$E_3 = C_1 A_2 [B_2 a_2 b_3 - a_3 (1 + B_2 b_2)]$$

$$F_1 = B_1 [(1 + A_2 a_1)(1 + C_2 c_3) - A_2 a_3 C_2 c_1]$$

$$F_2 = A_1 B_2 [C_2 b_3 c_1 - b_1 (1 + C_2 c_3)]$$

Die Ausdrücke für die einzelnen Glieder der Zähler und des gemeinsamen Nenners haben folgende Bedeutung:

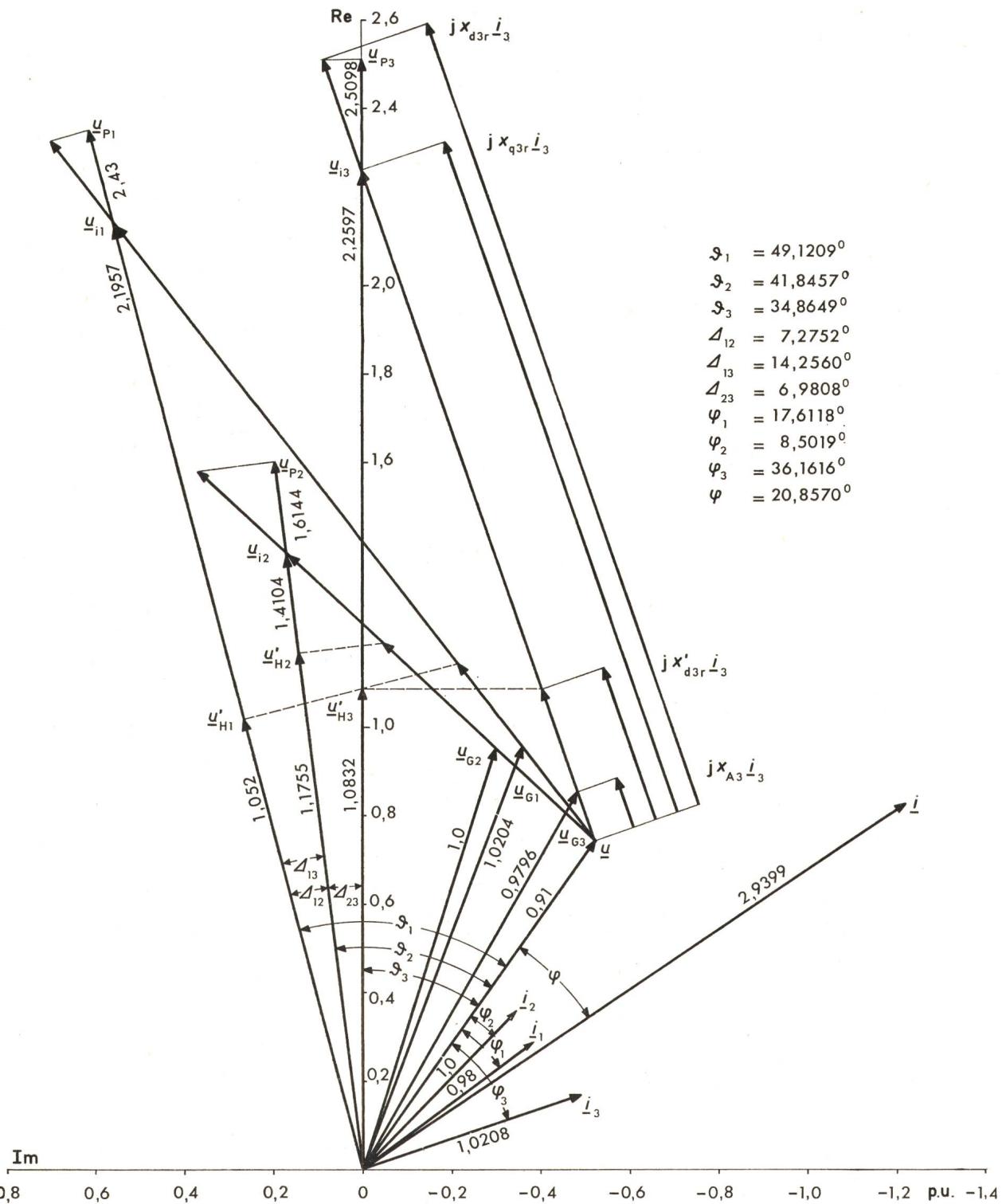


Fig. 2 Zeigerbild für drei Drehstrom-Synchrongeneratoren im Parallelbetrieb bei Nennbelastung (Netzschaltung nach Fig. 1)

Der Maßstab der Spannungszeiger ist doppelt so gross wie der Maßstab der Stromzeiger

— Vorlastzustand; --- transienter Zustand.

91 äusserer Polradwinkel für Generator 1

93 äusserer Polradwinkel für Generator 3

Δ_{13} Differenzwinkel zwischen Generator 1

φ_1 Phasenwinkel für Laststrom i_1
 φ_2 Phasenwinkel für Laststrom i_2

φ_3 Phasenwinkel für Laststrom i_3

X_A Aussenreaktanz

9.2 äusserer Polradwinkel für Generator 2

4.12 Differenzwinkel zwischen Generator 1 und 2

\angle_{23} Differenzwinkel zwischen Generator 2 und 3

φ_2 Phasenwinkel für Laststrom i_2

φ Phasenwinkel für Laststrom i

$$\begin{aligned}
F_3 &= C_1 B_2 [A_2 a_3 b_1 - b_3 (1 + A_2 a_1)] \\
G_1 &= C_1 [(1 + A_2 a_1) (1 + B_2 b_2) - A_2 a_2 B_2 b_1] \\
G_2 &= A_1 C_2 [B_2 b_1 c_2 - c_1 (1 + B_2 b_2)] \\
G_3 &= B_1 C_2 [A_2 a_2 c_1 - c_2 (1 + A_2 a_1)] \\
N_1 &= (1 + A_2 a_1) (1 + B_2 b_2) (1 + C_2 c_3) + \\
&\quad + A_2 B_2 C_2 (a_2 b_3 c_1 + a_3 b_1 c_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_2 &= (1 + A_2 a_1) B_2 b_3 C_2 c_2 + (1 + B_2 b_2) A_2 a_3 C_2 c_1 + \\
&\quad + (1 + C_2 c_3) A_2 a_2 B_2 b_1
\end{aligned}$$

Nach Kenntnis der transienten inneren Polradspannungen u'_{iv} lassen sich auch die transienten Polradspannungen aus der Gl. (5b) ableiten und berechnen:

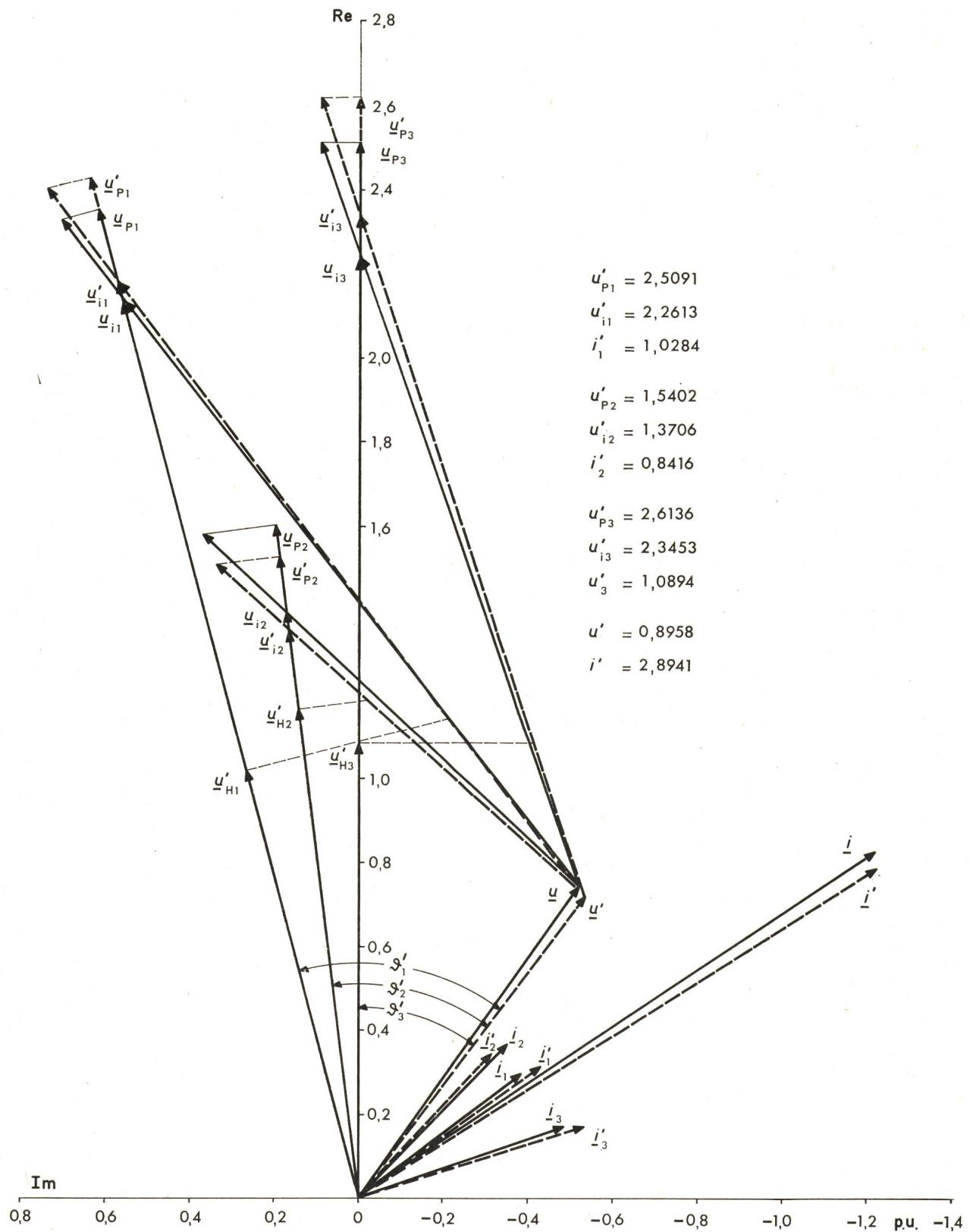


Fig. 3 Zeigerbild beim dreipoligen Abschalten eines Freileitungssystems zwischen dem Generator 2 und der Lastschiene S (Netzschaltung nach Fig. 1)
Der Maßstab der Spannungszeiger ist doppelt so gross wie der Maßstab der Stromzeiger
— Vorlastzustand; --- transienter Zustand

$$u'_{Pv} = u'_{iv} \frac{x_{dvr}}{x_{qvr}} - \frac{x_{dvr} - x_{qvr}}{x_{qvr}} u' \cos \vartheta_v' \quad (13)$$

Das Anwenden der hergeleiteten Gleichungen zum Ermitteln der transienten Strom- und Spannungsverhältnisse wird nun an vier Beispielen gezeigt, wobei plötzliche Laständerungen für die drei Synchrongeneratoren im Parallelbetrieb nach Fig. 1 untersucht werden. Sinngemäss lassen sich diese Gleichungen auf den Parallelbetrieb dreier beliebiger Synchronmaschinen anwenden, wobei z. B. Synchronmotoren oder Blindleistungsmaschinen einbezogen werden können.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Dreipoliges Abschalten eines Freileitungssystems

Beim Nennlastzustand der drei im Parallelbetrieb arbeitenden Dreiphasen-Synchrongeneratoren nach Fig. 1 wird eines

der beiden Freileitungssysteme zwischen dem Generator 2 und der Lastschiene S dreipolig abgeschaltet. Durch diesen Schaltvorgang wird zunächst eine Änderung der elektromagnetischen Verhältnisse in den drei beteiligten Generatoren eingeleitet, die mit der transienten Änderung der Ströme und Spannungen im Netz verbunden ist. Im weiteren Verlauf des Ausgleichsvorganges geht die elektromagnetische Änderung in eine elektromechanische über. Den Voraussetzungen entsprechend [1] seien hier nur die Strom- und Spannungsverhältnisse im ersten transienten Zustand betrachtet.

Das dreipolare Abschalten des einen Freileitungssystems führt zur Verdoppelung der Leitungsreaktanz zwischen dem Generator 2 und der Lastschiene S. Die im Normalzustand vorhandene bezogene Leitungsreaktanz $x_{L2} = 0,17135$ wird nun zu $x'_{L2} = 0,3427$, die resultierenden Reaktanzen des Generators 2 ändern sich wie folgt.

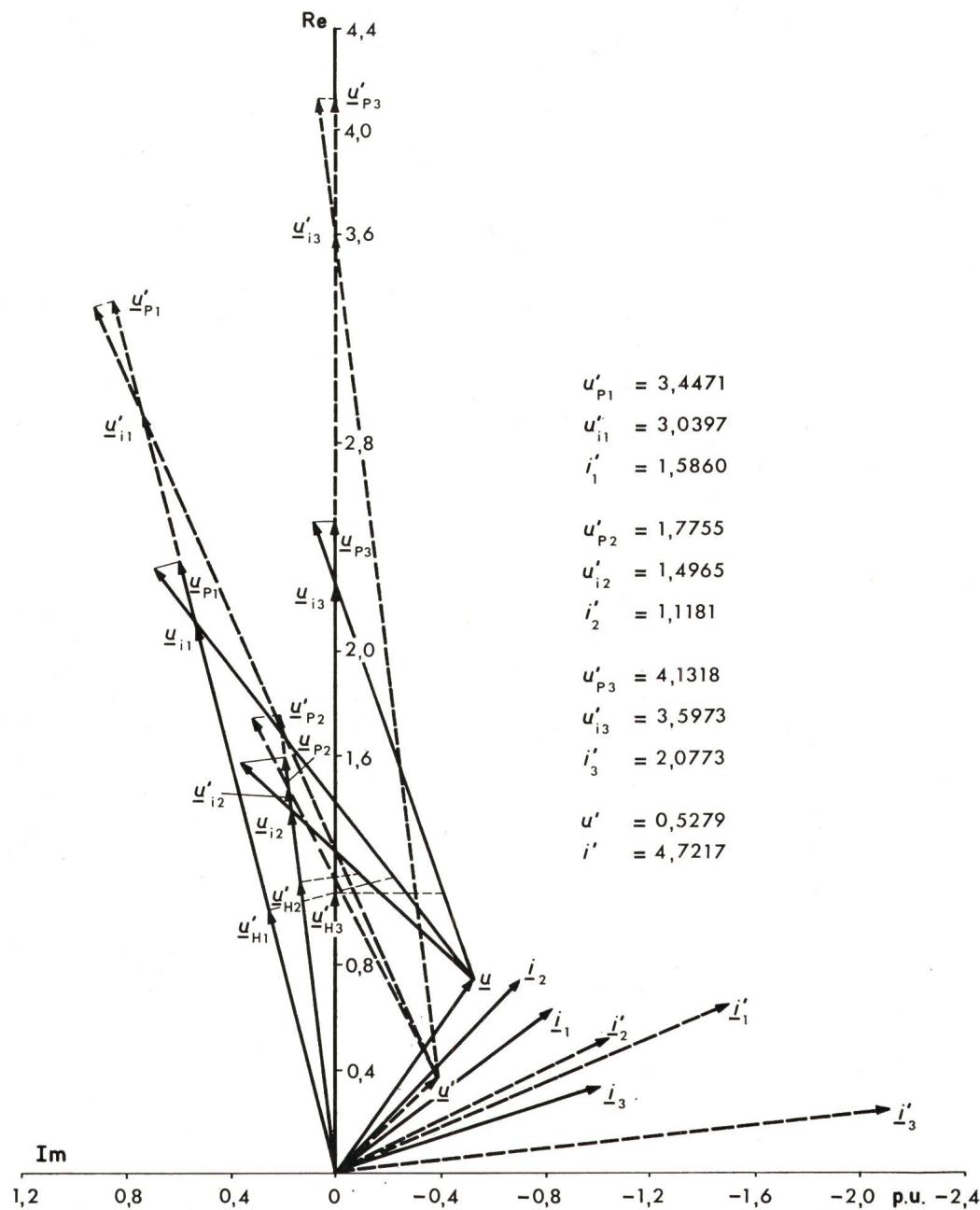


Fig. 4 Zeigerbild bei plötzlicher Änderung der Lastimpedanz z_B in z'_B
— Vorlastzustand; --- transienter Zustand

Normalbetrieb	transienter Zustand
$x_{d2r} = 1,21635$	$x_{d2r} = 1,3877$
$x'_{d2r} = 0,64635$	$x'_{d2r} = 0,8177$
$x_{q2r} = 0,95135$	$x_{q2r} = 1,1227$

Die plötzliche Erhöhung der Reaktanzen des Generators 2 führt nach Fig. 3 zu seiner plötzlichen Entlastung, dagegen liefern die Generatoren 1 und 3 plötzlich höhere Ströme. Durch den Effekt der Eigenkompondierung vermindert sich für den Generator 2 die innere Polradspannung $u_{i2} = 1,410\ 37$ auf den transienten Wert $u'_{i2} = 1,370\ 68$ und die Polradspannung $u_{P2} = 1,6144$ auf den Wert $u'_{P2} = 1,5402$. Die beiden anderen Generatoren zeigen eine Erhöhung dieser Werte. Es werden $u_{i1} = 2,195\ 69$ zu $u'_{i1} = 2,261\ 32$, $u_{P1} = 2,43$ zu $u'_{P1} = 2,5091$, $u_{i3} = 2,259\ 69$ zu $u'_{i3} = 2,3453$ und $u_{P3} = 2,5098$ zu $u'_{P3} = 2,613\ 67$. Die Spannung an der Lastschiene S sinkt vom

Normalwert $u = 0,91$ auf den transienten Wert $u' = 0,8958$. Die absoluten Polradwinkel ϑ_v' der einzelnen Generatoren lassen nach Fig. 3 gegenüber den Werten von ϑ_v eine Vergrößerung erkennen.

3.2 Plötzliche Änderung der Lastimpedanz

Die Lastimpedanz des Normalbetriebes $z_B = 0,289\ 25 + j 0,1102$ geht plötzlich in $z_B' = 0,1 + j 0,05$ über. Das entsprechende transiente Zeigerbild ist zusammen mit dem Zeigerbild des Vorlastzustandes in Fig. 4 dargestellt. Alle drei Generatoren lassen eine erhöhte Stromabgabe i_v' und eine Erhöhung der Werte für u_{iv} und u_{Pv} gegenüber den Vorlastwerten u_{iv} und u_{Pv} erkennen. Die Spannung u an der Lastschiene sinkt sehr stark auf den Wert u' ab, wobei sich die absoluten Polradwinkel ϑ_v' gegenüber den Normalwerten von ϑ_v vergrößern. Die Zahlenwerte sind in Fig. 4 eingetragen.

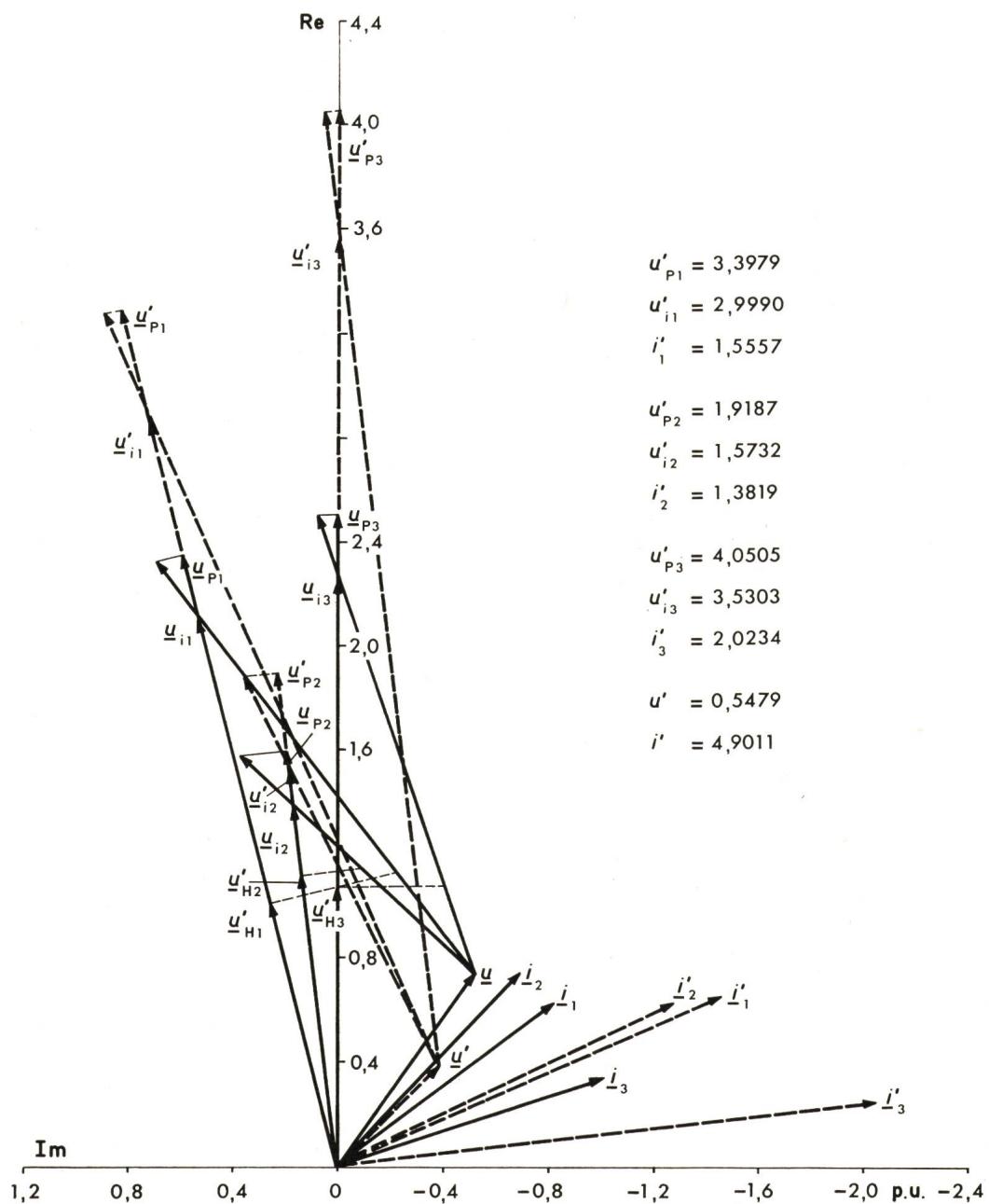


Fig. 5 Zeigerbild bei plötzlicher Änderung der Lastimpedanz z_B in z_B' und gleichzeitigem dreipoligem Abschalten eines Freileitungssystems zwischen dem Generator 2 und der Lastschiene S
(Netzschaltung nach Fig. 1)
— Vorlastzustand; - - - transienter Zustand

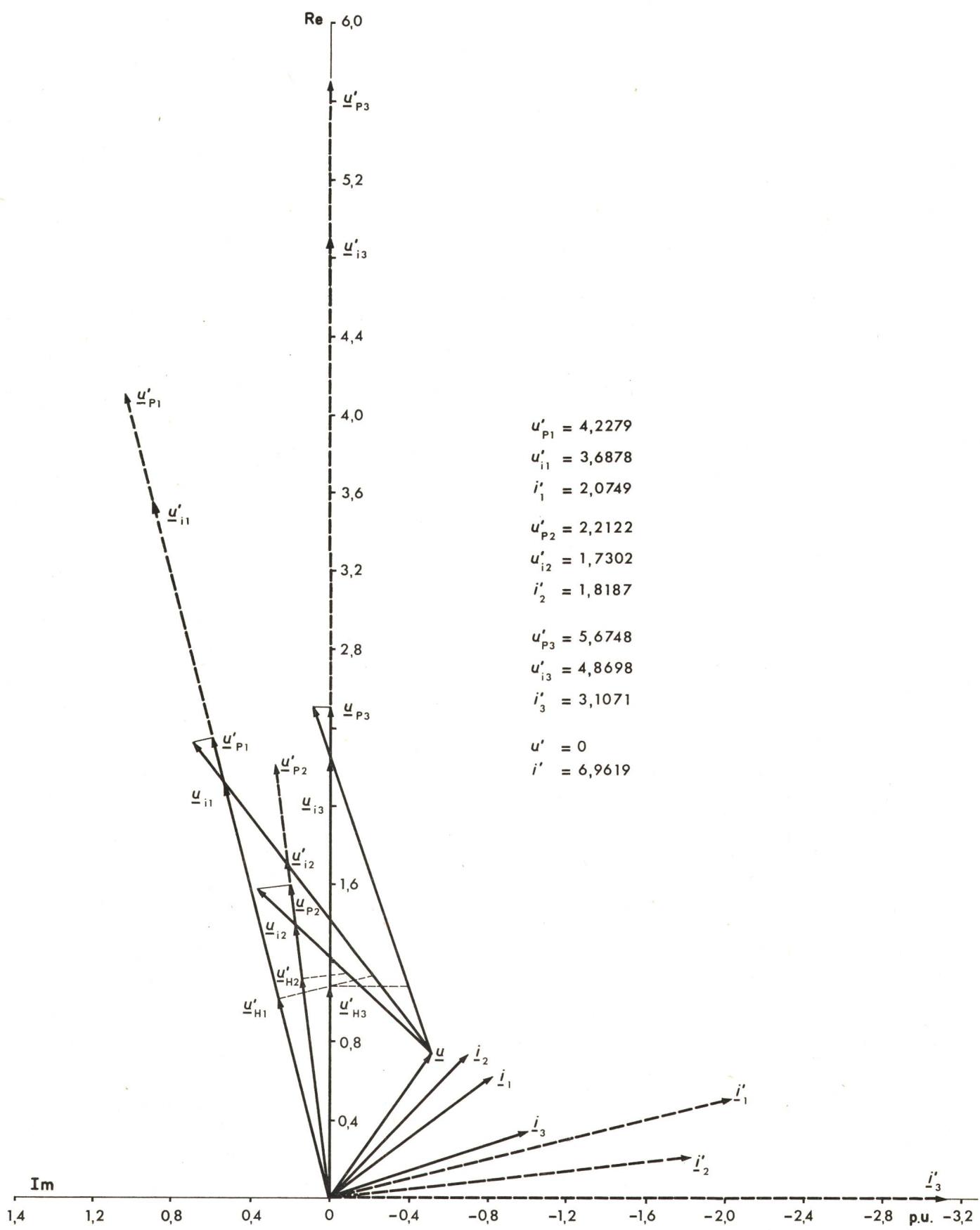


Fig. 6 Zeigerbild bei dreipoligem Kurzschluss an der Lastschiene S (Netzschaltung nach Fig. 1)
 — Vorlastzustand; --- transienter Zustand

3.3 Plötzliche Änderung der Lastimpedanz und simultanes Abschalten eines Freileitungssystems

Mit Hilfe der hergeleiteten Gleichungen lassen sich nicht nur die transienten Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlicher Änderung einer äusseren Impedanz berechnen, sondern auch simultane Änderungen der Impedanzen mehrerer Betriebsmittel in ihren Auswirkungen auf die transienten Verhältnisse erfassen. Als Beispiel sei angenommen, dass die Lastimpedanz des Normalbetriebes $z_B = 0,289 \ 25 + j 0,1102$ plötzlich in $z_B' = 0,1 + j 0,05$ übergeht und simultan ein Abschalten eines der Freileitungssysteme zwischen dem Generator 2 und der Lastschiene S erfolgt. Das entsprechende Zeigerbild des Vorlastzustandes und des transienten Zustandes ist in Fig. 5 ersichtlich. Die entsprechenden Zahlenwerte sind dieser Figur zu entnehmen.

3.4 Dreipoliger Kurzschluss an der Lastschiene S

Dieser Stosslastzustand stellt einen Grenzfall dar. Die Vorlastimpedanz z_B geht in die Impedanz $z_B' = 0$ über, und die Spannung an der Lastschiene bricht auf den Wert Null zusammen. Die entsprechenden Zeigerbilder des Vorlastzustandes und der transienten Kurzschlussverhältnisse sind in Fig. 6 dargestellt. Da in den einzelnen Kurzschlusspfaden nur induktive Reaktanzen vorhanden sind, eilen die transienten Teilkurz-

schlußströme den entsprechenden Hauptfeldspannungen u'_{Hv} um 90° el. nach. Die inneren Polradspannungen u'_{iv} und die Polradspannungen u'_{pv} nehmen infolge der Eigenkompoundierung besonders hohe Werte an.

4. Zusammenfassung

Mit Hilfe von Zeigerbildern und Grundgleichungen lassen sich die transienten Strom- und Spannungsverhältnisse bei plötzlichen Laständerungen an drei Drehstrom-Synchrongeneratoren im Parallelbetrieb berechnen und anschaulich darstellen. An vier numerischen Beispielen kann der Übergang vom Vorlastzustand in den transienten Ausgleichszustand verfolgt werden, wobei diese Beispiele nur einige Möglichkeiten für das Anwenden des Verfahrens aufzeigen.

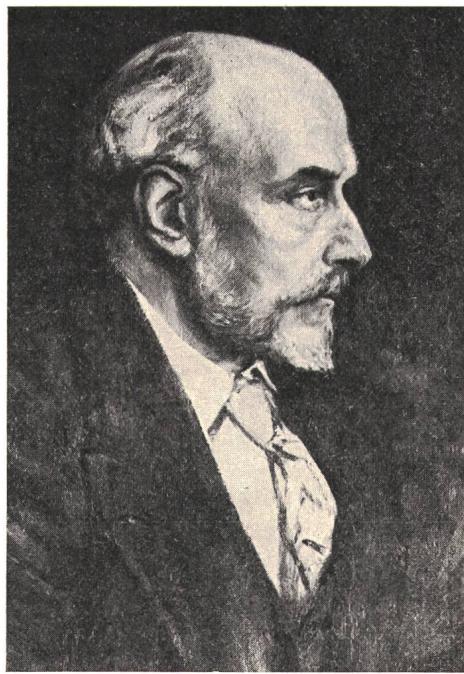
Literatur

- [1] J. Tittel: Der Spannungseinbruch im Netz beim plötzlichen Ausfall grosser Maschineneinheiten. ETZ-A 88(1967)11, S. 267...274.
- [2] K. Bonfert: Betriebsverhalten der Synchronmaschine. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.
- [3] R. H. Park: Two-reaction theory of synchronous machines. Generalized method of analysis. Part I. Trans. AIEE 48(1929)3, p. 716...730.
- [4] Handbuch der Elektrotechnik. Berlin/München, Siemens AG und Essen, Girardet, 1971.

Adresse des Autors:

A. Webs, Oberingenieur, Siemens AG, Bereich Energieversorgung, Erlangen.

Sir James Dewar 1842–1923



Scottish National Portrait Gallery

Die Supraleitung, bis dahin ein interessantes physikalisches Phänomen, ist im Begriff, eine neue Technik zu werden. Der Schotte Dewar hat Wesentliches zur Kältephysik beigetragen.

Tiefe Temperaturen spielten für James Dewar schon in der Jugend eine Rolle, allerdings eine schlimme. Er war als Knabe ins Eis eingebrochen und zog sich dabei eine arge rheumatische Erkrankung zu, derer wegen er lange Zeit am Schulbesuch verhindert war. In dieser Zeit bastelte er viel und brachte es zu einer grossen Handfertigkeit, die ihm später als Experimentator sehr zustatten kam.

Nach seiner Genesung durchlief der am 20. September 1842 in Kincardine-on-Forth in Schottland geborene Mann die Dollar-Academie und anschliessend die Edinburgh University, wo er Naturwissenschaft und Chemie studierte. 1869 wurde er Chemieprofessor am Veterinär-College. Sechs Jahre später berief ihn Cambridge auf den Lehrstuhl für experimentelle Naturwissenschaften. 1877 kam dazu noch die Chemie-Professur an der Royal Institution in London, Positionen, die er beide bis zu seinem Tode am 27. März 1923 inne hatte.

Dewars Stärke lag im Entdecken und dabei war er sehr vielseitig. Ausser chemischen Problemen, wie etwa die Entdeckung des neuen Sprengstoffes «Cordit», befasste er sich mit biologisch-chemischen Aufgaben aus dem Gebiet der Trink- und Abwassertechnik. Aber seine Vorliebe galt dem chemisch-physikalischen Grenzgebiet.

Nachdem er die von *Cailliet* für Sauerstoffverflüssigung entwickelten Apparate verbessert hatte, gelang ihm 1898 die Wasserstoffverflüssigung, und im darauffolgenden Jahr wies er durchsichtigen festen Wasserstoff vor. Mit einer mehrere Tonnen schweren, auf dem Prinzip des Joule-Thomson-Effektes beruhenden Maschine liess er hochkomprimiertes Gas expandieren. Dabei brachten speziell die von ihm erfundenen verspiegelten, vakuumisierten Gefässen Erfolg – wir alle verwenden sie im täglichen Leben heute als «Thermosflaschen». Die Heliumverflüssigung versuchte er zwar, aber sie gelang erst 1908 dem holländischen Gelehrten *Kamerlingh-Onnes* in Leyden.

Umfangreiche Untersuchungen Dewars galten der Erzeugung hoher Vakua. Wesentliche Verbesserungen gelangen ihm durch Verwendung speziell präparierter Holzkohlen, die Gasreste absorbieren und die es so gestatten, hohe Vakuen in robusten Metallbehältern lange Zeit aufrechtzuerhalten. Dies ermöglichte dann die Herstellung namhafter Quantitäten flüssiger Gase und damit weitere Studien im Tieftemperaturgebiet.

Erwähnt seien Untersuchungen über elektrische und magnetische Eigenschaften (Leitfähigkeit, Thermoelektrizität, Dielektrizitätskonstante und magnetische Permeabilität) bei tiefen Temperaturen, die er um 1896 zusammen mit Prof. *J. A. Fleming* durchführte. Interessant ist auch seine Entdeckung, dass flüssiger Sauerstoff und Ozon von Magneten angezogen werden.

Dewar, ein hie und da heftig werdender Mensch, war aber denen, die ihn um seinen Rat baten, ein williger Helfer. Er liebte Poesie und Musik, sammelte Kunstgegenstände und galt als Kenner von Tabak und Wein.

H. Wüger