

Ursachen von Netzpendelungen

H. Weber, Rostock

Einleitung

Nach der Zuschaltung des CENTREL-Systems (Netze der Länder Polen, Tschechien, Slowakei und Ungarn) zum UCPT-System im Oktober 1995 traten bei gewissen Ost-West-Lastflußkonfigurationen stehende oder gar aufklingende Frequenz- und Leistungs-pendelungen auf. Im vorherigen Beitrag wurden dazu beispielhaft Messungen vorgestellt, welche diese Pendelungen einmal als Leistungs-pendelung auf der Leitung Vigy-Uchtelfangen und einmal als Pendelung der Gesamtregelabweichung des Sekundärreglers des deutschen Regelblocks zeigen.

In diesem Beitrag sollen nun die prinzipiellen Zusammenhänge und Wirkungsketten aufgezeigt werden, welche in elektrischen Energieversorgungsnetzen zu derartig gefährlichen Pendelungen führen können.

Heutige Netz-situationen und Ersatzmodell

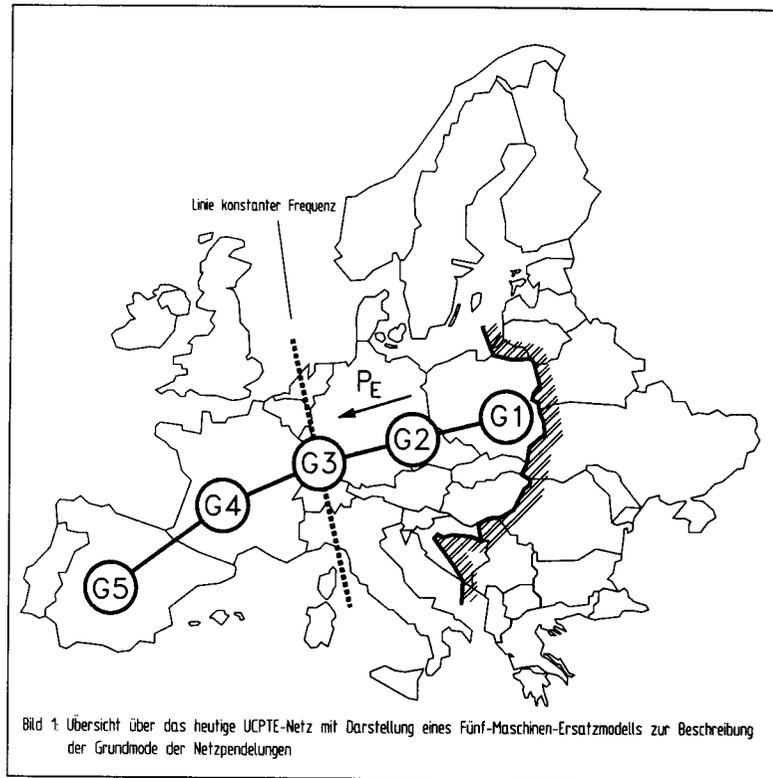
Mit der Zuschaltung des CENTREL-Systems und der Auftrennung des jugoslawischen Netzes hat das UCPT-Netz heute eine mehr longitudinale Ost-West-Grundstruktur angenommen, siehe Bild 1. In dieser Ost-West-Richtung ist deshalb heute auch mit dem Auftreten der langsamsten Grundpendelung des UCPT-Netzes zu rechnen, bei welcher die Generatorpolräder Spaniens nach einer Anregung in Gegenphase zu den CENTREL-Generatorpolrädern schwingen werden. Der größte Leistungsfluß durch das Netz wird sich dabei auf der sogenannten „Linie konstanter Frequenz“ immer dann einstellen, wenn die Generatorpolräder ihre jeweils größte Auslenkung erreicht haben (oder ihre Drehzahl gerade Null ist).

Diese langsamste und am wenigsten gedämpfte Grundpendelung des Netzes kann nun, wie in Bild 1 angegeben, durch ein einfaches langgestrecktes Analogon bestehend aus fünf Synchronmaschinen und vier Leitungselementen in erster Näherung nachgebildet werden. Anhand dieses Analogons sollen nun im folgenden die grundsätzlichen Zusammenhänge bei der Entstehung von Netzpendelungen aufgezeigt werden. Die erzielten Resultate sind dabei jedoch von allgemeingültiger Natur.

Neben der o. g. langsamsten Grundpendelung sind noch weitere Pendelmoden im Netz denkbar:

- Zum Beispiel könnte der Generator 1 (CENTREL) in Phase (!) mit dem Generator 5 (Spanien) gegen den Generator 3 (RWE-Bereich) pendeln; die Generatoren 2 und 4 bleiben dabei in Ruhe und bildeten zwei weitere „Linien konstanter Frequenz“ aus.

- Auch die Pendelung der nördlichen Polräder gegen diejenigen Italiens wäre als Pendelform denkbar, allerdings mit kleinerer Periodendauer und besser gedämpft.



In Bild 2 sind beispielhaft für die Ost-West-Grundpendelung, die nach einer Störung in Spanien aufgetretenen gemessenen Frequenzpendelungen einiger östlicher Länder sowie eine Kuppelleistung zwischen Deutschland und Frankreich dargestellt. In den Frequenzpendelungen ist deutlich die langsamste Ost-West-Grundmode des Netzes mit einer Periodendauer von $T_p = 3,68$ s zu erkennen, bei welcher die Linie konstanter Frequenz auf der deutsch-französischen Grenze liegt und die Generatorpolräder um so stärker pendeln, je weiter sie von dieser Linie entfernt sind. Die Kuppelleistung erreicht jeweils immer dann ihre Extremwerte, wenn die Frequenzen (oder Drehzahlen) gerade ihren Nulldurchgang haben und somit die Polradwinkel gerade ihre maximale Auslenkung erreichen.

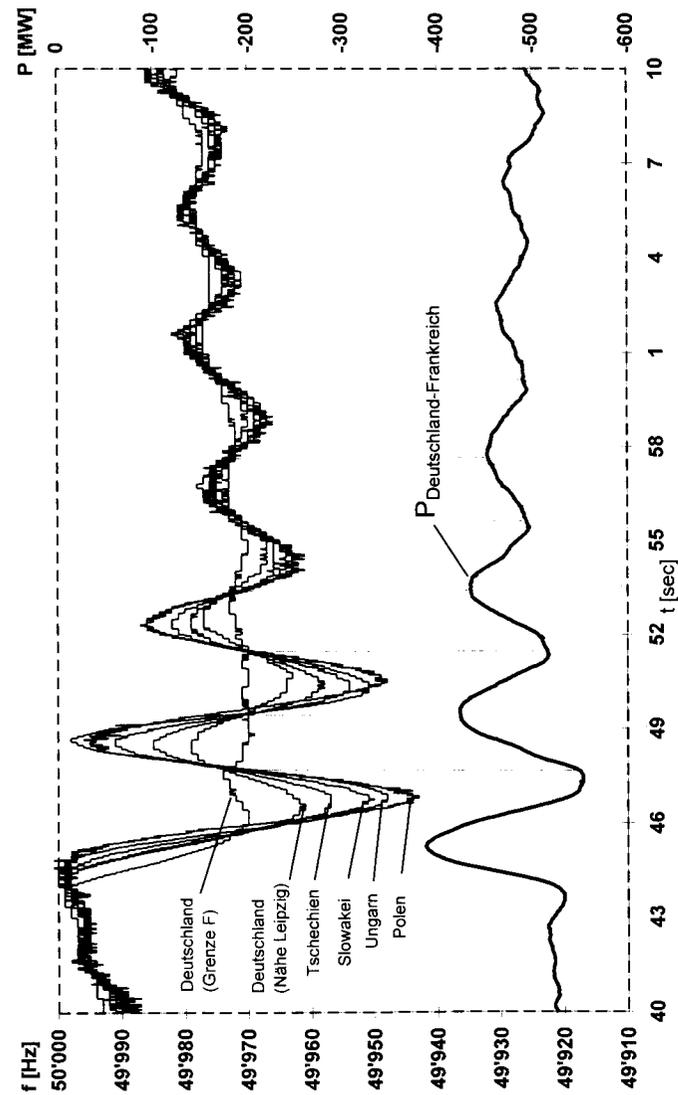


Bild 2: Frequenz- und Kuppelleistungspendelungen nach Kraftwerksausfall in Spanien

Entstehungsursachen stehender oder aufklingender Netzpendelungen

Damit Netzpendelungen ungedämpft oder gar aufklingend verlaufen können, bedarf es eines oder mehrerer Netzelemente (meist Regeleinrichtungen), welche dem System kontinuierlich mehr Pendelenergie zuführen, als die natürlichen Dämpfungseinrichtungen (Dämpferwicklungen) dem Netz entziehen können. Diese Regeleinrichtungen sind in der Regel die Generatorspannungsregelungen.

In Bild 3 ist dieser Zusammenhang anhand eines einfachen mechanischen Drehstab-Masse (Scheibe)-Analogons erläutert: Bleibt die Hand „H“ in Ruhe, so schwingt die Scheibe nach einer Auslenkung zum Punkt 1 ungedämpft gemäß Teilbild b. Die Brems- und Beschleunigungsflächen (Brems- und Beschleunigungsarbeit), welche von der Winkel-Momenten-Kennlinie gebildet werden, sind gleich groß und konstant. Im aufklingenden Fall c möge der Stab zunächst ebenfalls ungedämpft schwingen; in Punkt 1 jedoch verdreht die Hand den Stab zusätzlich um den Winkel δ_H . Damit wird das Moment und damit die neue Beschleunigungsfläche größer. Wiederholt die Hand in Punkt 2 diesen Vorgang in die andere Richtung, so schwingt die Scheibe auf und ist instabil. Im Fall d dagegen läßt die Hand in Punkt 1 nach und reduziert das Moment, wodurch die Beschleunigungsfläche kleiner und das System stabilisiert wird. Wichtig ist in diesem Analogon der Zusammenhang zwischen der Veränderung der Brems- und Beschleunigungsflächen und der Stabilität.

In Bild 4 ist dieser Zusammenhang auf ein elektrisches Ersatzsystem übertragen, bei welchem ein Generator über eine Leitung auf ein starres Netz speist, Ersatzschaltung siehe Bild 4 b. Dieses Ersatzsystem könnte z. B. bezüglich der langsamen Ost-West-Grundmode des UCPTE-Netzes eine Netzseite bis zur Linie konstanter Frequenz repräsentieren, wobei diese Linie selbst durch das starre Netz nachgebildet werden kann. In Bild 4 a ist der Generatorrotor im Arbeitspunkt 1 dargestellt, bei welchem er um den Polradwinkel φ_p aus der Leerlaufstellung ausgelenkt ist. Die Generatorklemmenspannung u_G bestimmt sich aus der transienten Polradspannung u_p' und der festen Spannung u_k über den Spannungsteiler der Reaktanzen x_d' und x_L . Bei Polradpendelungen muß als treibende Generatorspannung die transiente Polradspannung betrachtet werden, da diese direkt mit der Erregerflußverkettung verknüpft ist und diese wiederum im Zeitbereich der Pendelungen nahezu konstant bleibt. Lediglich bei Einsatz eines Spannungsreglers kann diese transiente Polradspannung im Zeitbereich der Pendelungen nennenswert beeinflusst werden.

Wird das Polrad nun durch eine Störung ausgelenkt und schwingt z. B. von Punkt 1 zum Punkt 2, so wird die Generatorklemmenspannung über den $x_d'-x_L$ -Spannungsteiler verkleinert und umgekehrt. Die Generatorklemmenspannung schwingt also in Gegenphase zum Generatorpolradwinkel. Dieser Sachverhalt ist auch im Bildteil c dargestellt, in welchem zusätzlich noch die sich bezüglich der φ_p-p_G' -Kennlinie ergebenden Brems- und Beschleunigungsflächen bei der Pendelung ohne Spannungsregelung (Fall a) angegeben sind. Die φ_p-p_G' -Kennlinie ergibt sich dabei ohne Verbraucher zu

$$p_G' = \frac{u_p' \cdot u_k}{x_d' + x_L} \cdot \sin \varphi_p \quad (1)$$

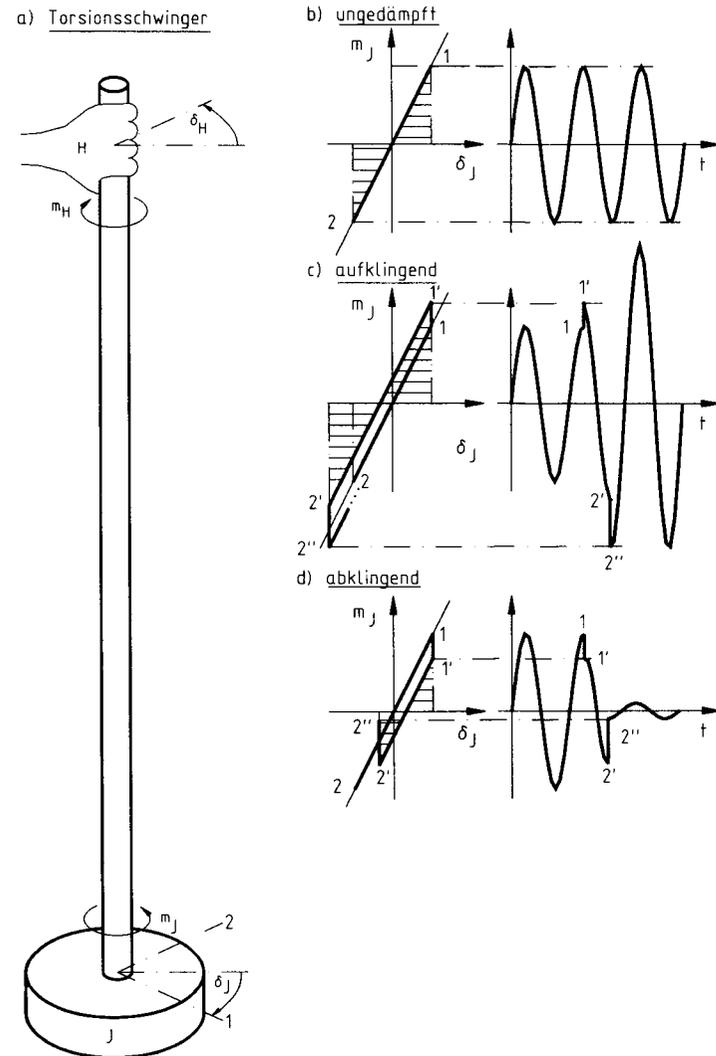


Bild 3: Entstehungsursachen auf- und abklingender Pendelungen dargestellt anhand eines Torsionsschwingers

Der Einfluß der Dämpferwicklungen ist hier der Einfachheit halber vernachlässigt, weswegen im **Bildteil c** eine ungedämpfte Schwingung dargestellt ist. Wird nun die Spannungsregelung eingeschaltet (Fall b), so ergeben sich - in Analogie zum mechanischen Stab-Masse-Analogon - die Verhältnisse wie in **Bildteil d** dargestellt:

1. Das Generatorpolrad schwingt - nach einer Anregung - z. B. vom Arbeitspunkt 1 zum Arbeitspunkt 2.
2. Mit dem vergrößerten Polradwinkel φ_p verringert sich die Generatorklemmenspannung u_G .
3. Die Spannungsregelung erhöht die transiente Polradspannung u_p' , um über den x_d' - x_L -Spannungsteiler die Klemmenspannung auszuregeln.
4. Damit wird die φ_p - p_G -Kennlinie gemäß Gl. (1) angehoben und das Polrad fährt oberhalb der alten φ_p - p_G -Kennlinie ($|y_p'| = \text{const.}$) zum neuen Arbeitspunkt 3'.
5. Durch das Anheben der φ_p - p_G -Kennlinie wird die Beschleunigungsfläche $A_1 > A_2$ wodurch auch die Bremsfläche $A_2 > A_2$ wird.
6. Damit liegt der Arbeitspunkt 3' unterhalb des Arbeitspunkts 3; das Polrad ist instabil.

In **Bild 5** ist zur besseren Veranschaulichung dieses Vorgangs eine sich im instabilen Fall ergebende simulierte φ_p - p_G -Trajektorie dargestellt. Wie man der Abbildung entnimmt, verläuft die Trajektorie im Gegenuhrzeigersinn zwischen den φ_p - p_G -Kennlinien für $|y_p'| = \text{const.}$ und $|y_G| = \text{const.}$ Man erkennt deutlich, wie der Spannungsregler versucht die Trajektorie auf die Kennlinie für $|y_G| = \text{const.}$ zu legen, wodurch er das System durch Veränderung der Brems- und Beschleunigungsflächen destabilisiert.

Einfluß von Leistungs transit und Verbraucherstruktur auf die Netzstabilität

Um den Einfluß des Leistungs transits auf die Netzstabilität herausarbeiten zu können, wird bei dem in **Bild 4b** dargestellten Modell "Generator über Leitung am starren Netz" die Generatorleistung so erhöht, daß der Polradwinkel von 40° auf 60° zunimmt. Bezüglich dieser Leistungszunahme werden dann die u_p' - u_G - Zeigerdiagramme berechnet und dargestellt für die beiden Grenzfälle:

- a) $|u_G| = \text{const.}$ (quasistationäres Verhalten),
- b) $|y_p'| = \text{const.}$ (Pendelverhalten).

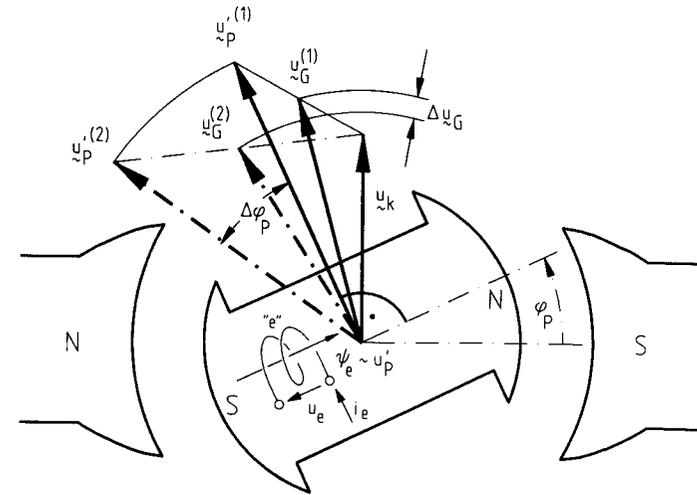
Gemäß **Bild 4b** gilt für die Spannungszeiger u_p' und u_G :

$$u_{-p}' = \left(1 + \frac{x_d'}{x_L}\right) \cdot u_{-G} - \frac{x_d'}{x_L} \cdot u_{-k} \tag{2a}$$

$$u_{-p}' = \alpha \cdot u_{-G} - \frac{x_d'}{x_L} \cdot u_{-k} \tag{2b}$$

$$u_{-p}' = R' + M' \tag{2c}$$

a) Generatorrotor als schwingungsfähiges System



b) Ersatzschaltbild eines Generators am starren Netz c) Keine Spannungsregelung, Fall a d) Mit Spannungsregelung, Fall b

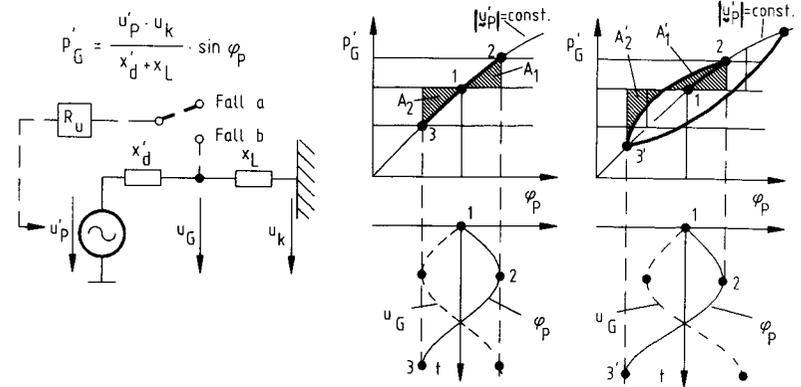


Bild 4: Darstellung der destabilisierenden Wirkung der Generatorspannungsregelung

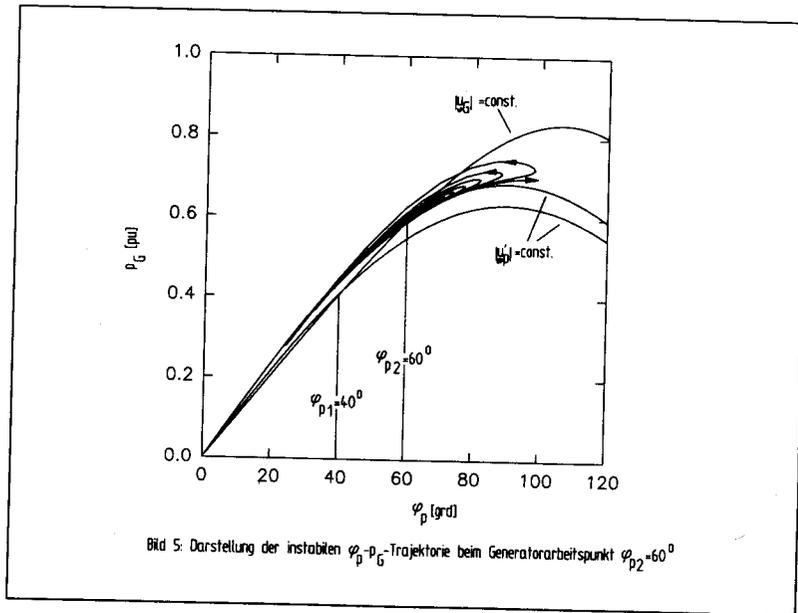
Stellt man die Gleichung um nach u_G , so folgt:

$$u_G = \frac{u_p'}{\alpha} + \frac{x_d'}{\alpha} \cdot u_k \quad (3a)$$

$$u_G = R' + M' \quad (3b)$$

Die Gl. (2) beschreibt hier den Verlauf der transienten Polradspannung u_p' um den Mittelpunkt M'' mit dem Radius R'' bei Veränderung des Lagewinkels der Generatorspannung u_G bei konstanter Amplitude (quasistationäres Verhalten).

Die Gl. (3) beschreibt den Verlauf der Generatorklemmenspannung u_G um den Mittelpunkt M' mit dem Radius R' bei Veränderung des Lagewinkels der transienten Polradspannung u_p' bei konstanter Amplitude (Pendelverhalten).



In Bild 6a sind diese beiden Gleichungen dargestellt für den Arbeitspunkt $\varphi_{p1}=40^\circ$. Der Winkel zwischen dem Verlauf der Spannungszeiger von u_G für den quasistationären Fall $|u_G|=const.$ und dem Pendelfall $|u_p'|=const.$ beträgt hier 11° . Mit diesem Winkel wird die Ge-

neratorklemmenspannung also im Pendelfall von ihrem stationären Wert abweichen und somit den Spannungsregler zur Gegenregelung veranlassen.

In Bild 6b ist dieses Verhalten dargestellt für den Arbeitspunkt $\varphi_{p2}=60^\circ$ (höherer Lastfluß). Hier hat sich dieser Änderungswinkel auf 15° erhöht; der Spannungsregler wird also bei der gleichen Polradpendelung zu größeren Gegenreaktionen veranlaßt und wird somit das System stärker destabilisieren. Dieser Sachverhalt kann gemäß Bild 6c auch aus den Schnittpunkten der φ_p - p_G -Kennlinien für den quasistationären und den Pendelfall für die beiden Arbeitspunkte $\varphi_{p1}=40^\circ$ und $\varphi_{p2}=60^\circ$ abgelesen werden; im zweiten Arbeitspunkt schneiden sich die Kennlinien dann steiler.

Wird an der Generatorklemme des Ersatzschaltbilds 4b nun noch eine Impedanz $Z_V = r + jx = 1 + j1$ eingefügt, so modifiziert sich in den Gleichungen (1) und (2) lediglich der reelle Faktor α zum komplexen Faktor

$$\alpha = 1 + \frac{x_d'}{x_L} + j \cdot \frac{x_d'}{Z_V} \quad (4)$$

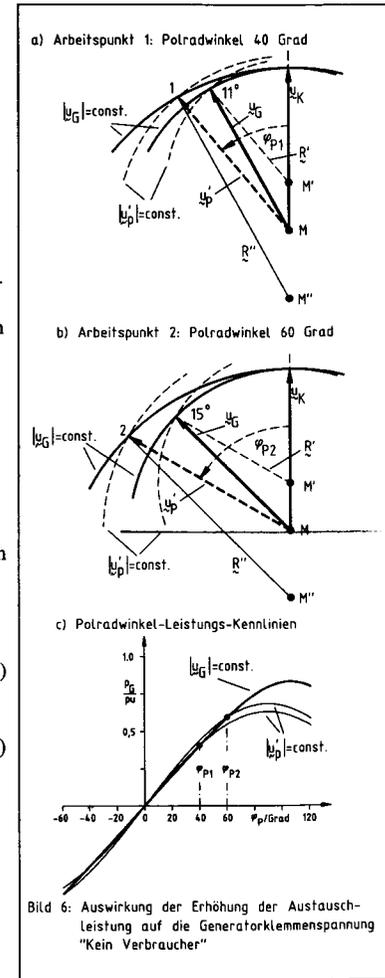
wodurch auch der Mittelpunkt M' (Pendelfall) komplex wird.

In den Bildern 7, 8 und 9 sind die Auswirkungen dieser Impedanz für die drei Fälle

- $Z_V = 1 + j1$ (induktiv, Starklast, Tag)
- $Z_V = 2$ (ohmsch, kompensiert)
- $Z_V = 1 - j1$ (kapazitiv, Schwachlast, Nacht)

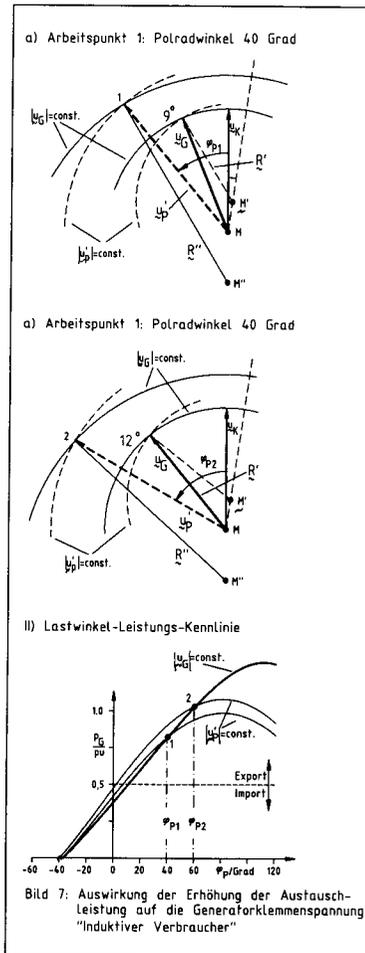
dargestellt.

Wie man den Abbildungen entnimmt, ergibt sich für den Abweichungswinkel der Generatorklemmenspannung folgende Tabelle:



	$\varphi_{P1} = 40^\circ$	$\varphi_{P2} = 60^\circ$
induktiv	9°	12°
ohmsch	11°	14°
kapazitiv	13°	18°

Tabelle 1: Abweichungswinkel der Generatorklemmenspannung im Pendelfall



Mit zunehmendem Abweichungswinkel wird dann das System instabiler.

Identifikation der Spannungsregler mit der größten destabilisierenden Wirkung im Netz

Beim Analogon von Bild 1 bilden fünf Generatoren eine Kette, wobei der Lastfluß von Ost nach West verläuft. Regt man die Generatoren durch Momentenstöße gerade so an, daß die langsamste Ost-West-Grundmode hervortritt, so ergeben sich die in Bild 10 dargestellten Polradwinkelabweichungen und Spannungsverläufe: Die Generatoren 1 und 2 pendeln in Gegenphase zu den Generatoren 4 und 5; der mittlere Generator 3 bleibt nahezu unbeeinflusst. Dieses Verhalten entspricht exakt der ersten Grundschiwingung des Netzes. Betrachtet man dazu die in Bild 10 b dargestellten Spannungsverläufe, so stellt man fest, daß diese untereinander alle in Phase schwingen und zudem noch in Phase mit den Generatoren 4 und 5 und in Gegenphase zu den Generatoren 1 und 2. Außerdem weist die Spannung am Generator 3 die größten Abweichungen auf, während die Spannungen der Generatoren 1 und 5 die geringsten Ausschläge aufweisen. Dieser Effekt beruht auf der Tatsache, daß die Leistungspendelung über die Leitungen von Ost nach West bis zur Linie konstanter Frequenz mit jedem weiteren pendelnden Generator zunimmt, wodurch die Spannungsänderungen über die Spannungsabfälle ebenfalls zunehmen. Westlich der Linie konstanter Frequenz nimmt dann mit jedem weiteren Generator der Leistungs-

fluß und damit die Spannungsänderung wieder ab, wodurch das Spannungs-Pendel-Profil gemäß Bild 10b entsteht.

In Bild 4c, d wurde gezeigt, daß der Spannungsregler immer dann stark destabilisierend wirkt, wenn Polradwinkel φ_p und Klemmenspannung u_G in Gegenphase sind; im anderen Fall muß er stabilisierend wirken.

In Bild 11 sind die Generator Drehzahlverläufe nach einem Momentensprung dargestellt für die Fälle:
w: kein Spannungsregler im System 1...5: je nur ein Spannungsregler am Generator 1...5.

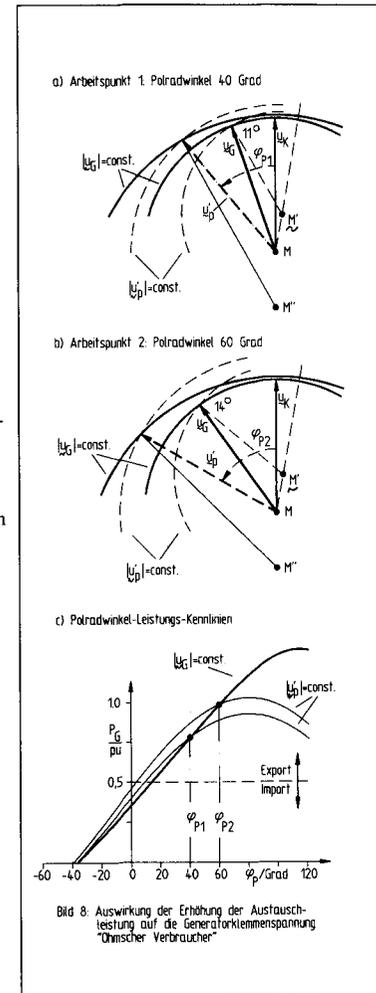
Wie man der Darstellung entnimmt, destabilisiert der Spannungsregler im Generator 2 tatsächlich am stärksten, während die Spannungsregler der Maschinen 4 und 5 am stärksten stabilisierend wirken.

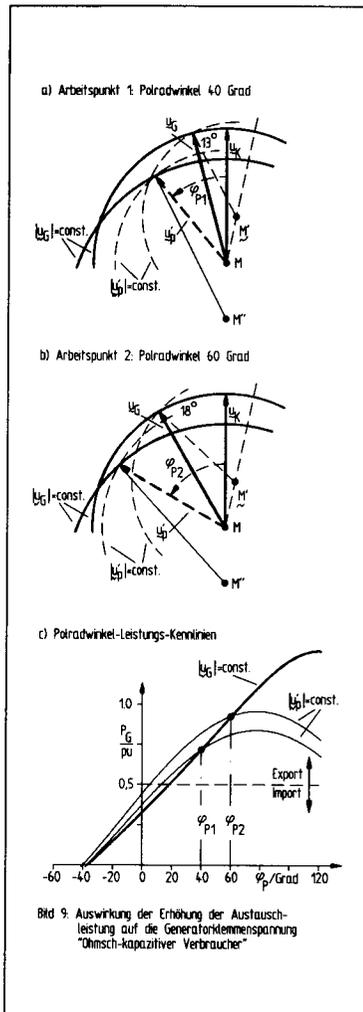
Übertragen auf das reale UCPT-Netz läßt sich somit - ausgehend von Bild 2 - sagen, daß bei starkem Ost-West-Lastfluß die Spannungsregler der Maschinen in Tschechien und der Slowakei das System wohl am stärksten destabilisieren werden, während die Spannungsregler Frankreichs stabilisierend wirken. Die Linie konstanter Frequenz wird sich dabei bezüglich der langsamen Grundmode in der Nähe der deutsch-französischen Grenze ausbilden.

Zusammenfassung

Anhand einfacher mechanischer und elektrischer Gedankenmodelle wurden die Ursachen von Netzpendelungen herausgearbeitet. Dabei ergaben sich folgende Resultate:

- Das elektrische Energienetz ist grundsätzlich ein schwingungsfähiges Gebilde mit unterschiedlichen Pendelmoden.
- Diese Pendelmoden sind ohne den Einsatz von Regeleinrichtungen im Netz stabil und unkritisch.
- Labile oder instabile Netzpendelungen werden von den Spannungsreglern verursacht.





- Bei zunehmenden Lastfluß wird das Netz instabiler.
- Bei kapazitiver Verbraucherstruktur (nachts) wird das Netz ebenfalls instabiler.
- In longitudinalen Netzen verursacht derjenige Spannungsregler die größte Instabilität, welcher an seinem Generator den Polradwinkel φ_P und die Klemmenspannung u_G in größtmöglicher Gegenphase "sieht".
- Stabilisierende Gegenmaßnahmen sind entweder die Reduktion der Spannungsreglerverstärkung bei diesen Generatoren und/oder
- die Installation von Pendeldämpfungsgeräten bei den Generatoren mit den größten Polradpendelungen (und Nennleistungen).

Literatur

/1/ **Zollenkopf, K.:** Analyse von Leistungs-pendelungen eines grossen Kraftwerksblocks mittels vereinfachtem Ersatzschaltbild ETG-Fachtagung 5, Berlin, 1979

/2/ **Weber, H.:** Stabilitätsuntersuchungen in ausgedehnten elektrischen Energieübertragungsnetzen mit Modalanalyse - Anwendung neuer Methoden und Verfahren Elektrizitätswirtschaft Jg. 90, 1991, Heft 21/22

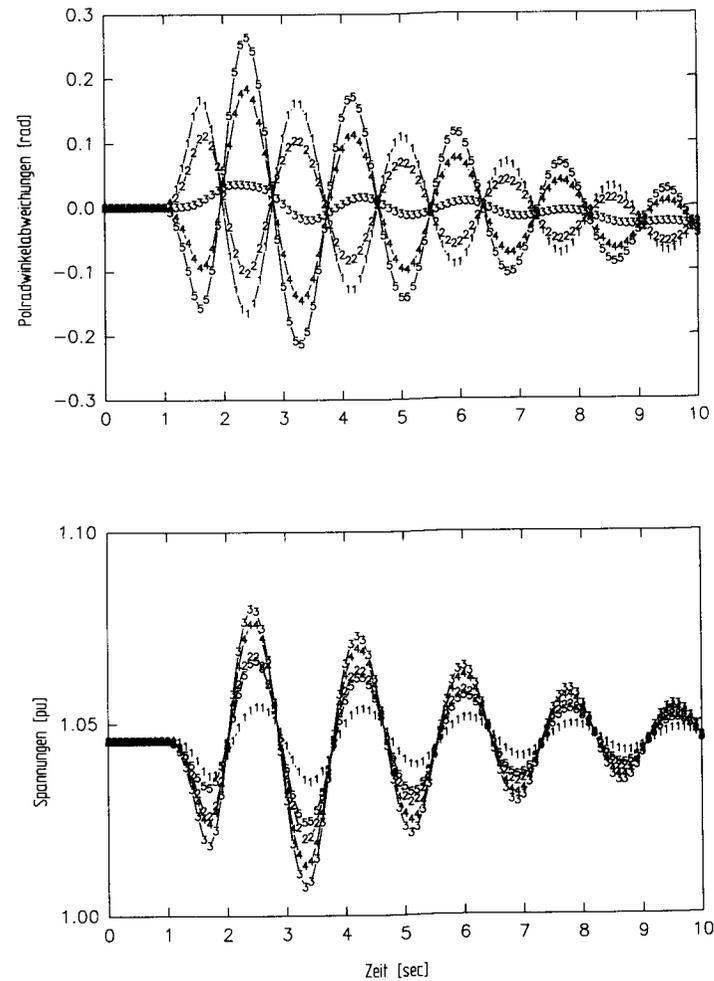


Bild 10: Polradwinkelabweichungen und Knotenspannungen ohne Spannungsregelung

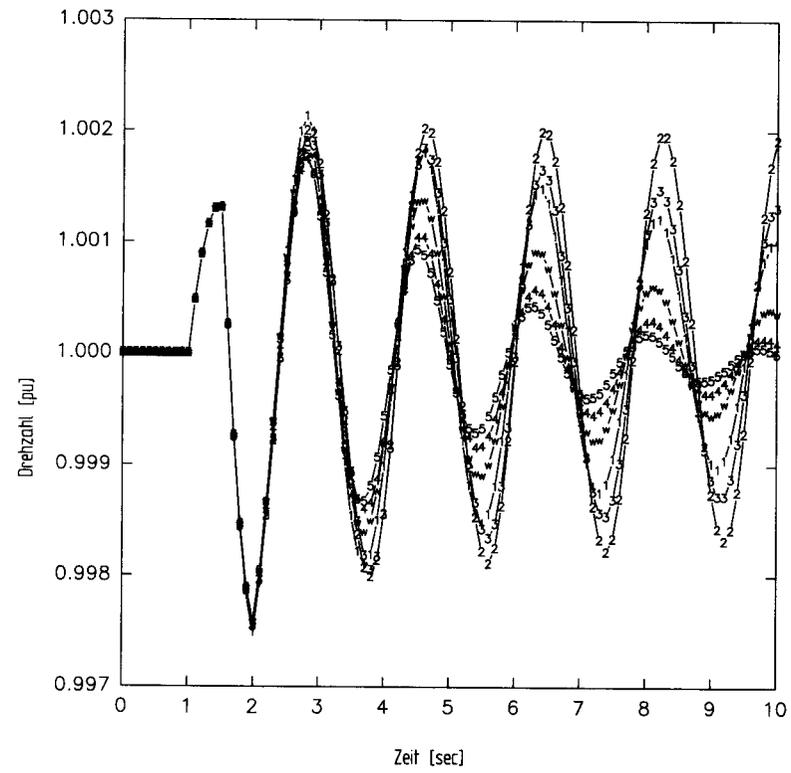


Bild 11: Drehzahlen des Fünf-Maschinen-Modells nach einer kurzen Momentenanregung
"w": kein Spannungsregler
"1..5": Spannungsregler jeweils im Generator Nr. 1..5 in Betrieb