

# Massnahmen zur Verbesserung der Kurzzeitstabilität in elektrischen Energieversorgungssystemen

Autor(en): **Handschin, Edmund / Wohlfarth, Herbert**

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): **81 (1990)**

Heft 7

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903098>

## **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.

# Massnahmen zur Verbesserung der Kurzzeitstabilität in elektrischen Energieversorgungssystemen

Edmund Handschin und Herbert Wohlfarth

**Die vorliegende Arbeit zeigt die grundsätzliche Wirkung von Pendeldämpfungsgeräten (Power System Stabilizer, PSS). Ausgehend von den vorhandenen Eingangssignalen Drehzahl, Frequenz, elektrische Wirkleistung und Beschleunigungsleistung wird die Tauglichkeit des PSS unter drei verschiedenen Betriebsbedingungen (Schaltmassnahmen, Auswirkungen von Netzfehlern, Teilnetzbildung) geprüft. Dabei zeigt sich, dass der PSS mit der Beschleunigungsleistung als Eingangssignal im Hinblick auf Dämpfung und Spannungsabweichung die günstigsten Eigenschaften aufweist.**

**Le présent travail montre l'effet principal de stabilisateurs PSS (Power System Stabilizer). Se basant sur les signaux d'entrée présents vitesse, fréquence, puissance active, puissance accélératrice, on étudie l'aptitude du PSS sous trois différentes conditions de fonctionnement (mesures sur le couplage, répercussions des défauts de réseau, formation de réseaux partiels). Il se montre qu'avec la puissance accélératrice comme signal d'entrée le PSS présente les meilleures propriétés en vue de l'amortissement et des variations de tension.**

Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Edmund Handschin, Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung, Universität Dortmund, D-4600 Dortmund

Dr.-Ing. Herbert Wohlfarth, Abteilung Planung, Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Wielandstrasse 82, D-4630 Bochum

Periodische Drehzahlabweichungen einzelner Generatoren oder Generatorgruppen stellen unter dem Begriff *Polradpendelungen* oder *Leistungspendelungen* ein bekanntes Problem dar, das seit jeher mit dem Netzbetrieb verknüpft ist. Es kann sich in unterschiedlichster Ausprägung von für den Verbraucher kaum wahrnehmbaren Spannungsschwankungen über eine erhebliche mechanische Beanspruchung der Turbosatzwellen bis hin zur Auftrennung des Verbundes, unter Umständen mit dem Zusammenbruch von Teilnetzen, auswirken. Die mit Polradpendelungen verbundenen Fragestellungen und Abhilfemassnahmen haben zunehmend an Bedeutung und Aufmerksamkeit seitens der Kraftwerkshersteller und Netzbetreiber gewonnen. Als Gründe hierfür sind zu nennen:

- Die heute verwendeten Spannungsregler und Erregersysteme wirken sich in der Regel anfachend auf Polradpendelungen aus.
- Die aufgrund der Kostendegression bei höheren Einheitsleistungen gestiegenen Blockgrößen sind überproportional zur netzseitigen Kurzschlussleistung an den Einspeisepunkten der Kraftwerke gewachsen.

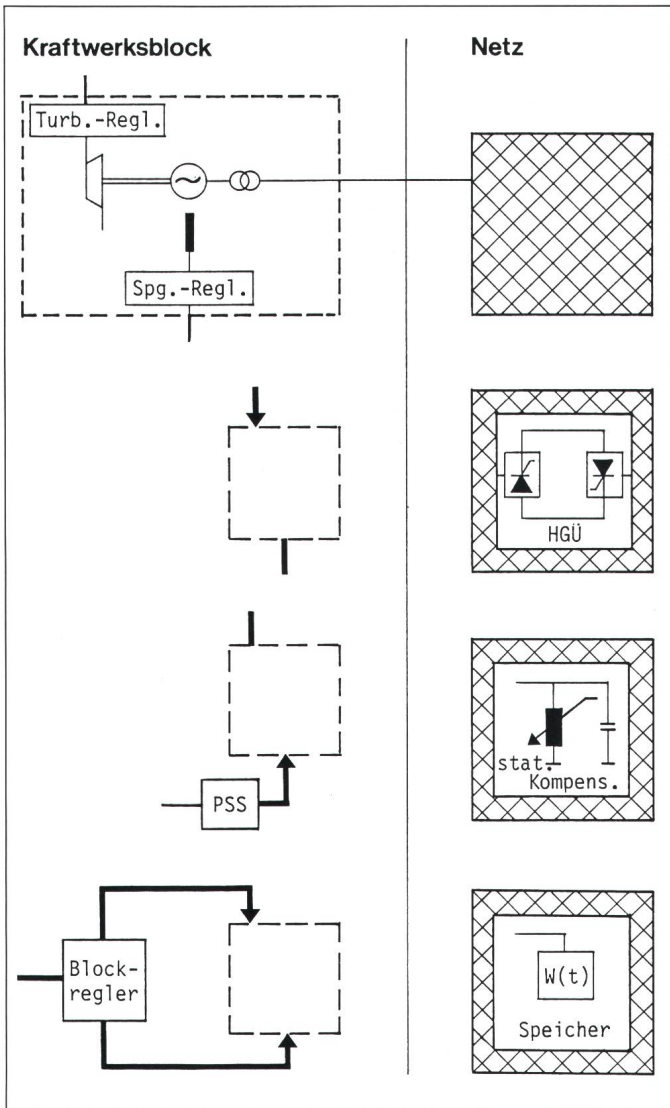
Mit dem Fortschritt der Halbleitertechnologie entwickelten sich netz- und kraftwerksseitige Gegenmassnahmen regelungstechnischer Art (Bild 1). Die netzseitigen Möglichkeiten zur besseren Dämpfung von Leistungspendelungen erstrecken sich auf die geeignete Ansteuerung von Thyristorbrücken bei Hochspannungsgleichstrom (HGÜ)-Verbindungen oder bei statischen Kompensatoren [1]. Jüngste Untersuchungen berücksichtigen auch die Dämpfungseigenschaften von Energiespeichern [2]. Aus wirtschaftlichen Gründen lassen sich die genannten Betriebsmittel allerdings nur dann zur Dämpfung von Leistungspendelungen anwenden, wenn ihr Einsatz

ohnein aus übergeordneten Gründen, z.B. der Blind- und/oder Wirkleistungssteuerung im Netz, sinnvoll ist. Kraftwerksseitige Dämpfungsmassnahmen beeinflussen die im Turbosatz wirksamen Drehmomente. Ein Ansatzpunkt hierfür bietet prinzipiell die Turbinenregelung, deren praktische Verwendung sich für diesen Zweck jedoch wegen der dynamischen Eigenschaften der mechanischen Komponenten nicht durchgesetzt hat.

Das weitaus kostengünstigste, praktisch leicht realisierbare und daher meistverwendete zielgerichtete Verfahren zur Dämpfung von Polradpendelungen greift über den Spannungsregler durch Bildung eines dämpfend wirkenden elektrischen Drehmomentanteils im Generator ein. Diese elektronische Zusatzschaltung wird als Pendeldämpfungsgerät oder Power System Stabilizer (PSS) bezeichnet. Das Wirkungsprinzip des auch heute überwiegend mit fester Struktur arbeitenden PSS wurde in den 60er Jahren entwickelt und hat in etwa 25jährigem Einsatz zahlreiche Modifikationen erfahren [1...4]. Der vorliegende Beitrag soll die bislang fehlende Klassifizierung der PSS-Konzepte mit fester Struktur in wenige Grundtypen und eine darauf basierende vergleichende Analyse konzeptbedingter Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren ermöglichen. Damit soll eine bestehende Lücke bezüglich der von Kraftwerks- und Netzbetreibern zu beachtenden PSS-Auswahlkriterien geschlossen werden.

Adaptive Verfahren haben als nur in Ausnahmefällen realisierte Konzepte bei vergleichenden Simulationsrechnungen lediglich geringfügige Verbesserungen gezeigt. Meist wurden zudem idealisierte Modelle zugrunde gelegt. Dabei wird die grundsätzliche Problematik deutlich, die zahlreichen Möglichkeiten der gerade im Zusammenhang mit Netzstörungen stark veränderlichen System-Parameter im adap-





**Bild 1**  
Massnahmen zur  
Dämpfung von  
Leistungs-  
pendelungen

stark ausgeprägte Leistungspendelungen auf. Die Linearisierung bei der zuvor beschriebenen Vorgehensweise würde hier zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Stark nichtlineare Einflüsse wie der Beschleunigungsschutz des Turbosatzes, die Generatorhauptfeldsättigung und die Reglerbegrenzungen erfordern die Simulation im Zeitbereich. Neuere Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass die Funktionstüchtigkeit von PSS auch im dynamischen Prozess betrieblicher Ausnahmesituationen, z.B. dem generatornahen Fehler mit Teilnetzbildung und Lastabwurf, zu überprüfen ist [7].

Die Ergebnisse des vorliegenden Beitrages beschreiben die Eignung der verschiedenen PSS-Typen hinsichtlich der genannten Anforderungen.

## Wirkungsmechanismen

Bild 2 verdeutlicht stark vereinfacht die funktionalen Zusammenhänge. Ausgangspunkt ist die maschineninterne Bilanzierung der beteiligten mechanisch-elektrischen Drehmomente  $\Delta m$ , die über die Bewegungsgleichung des Turbosatzes eine Polradwinkeländerung  $\Delta\theta$  bewirken. Von hier aus ergeben sich Rückkopplungen auf das elektrische Moment, das sich zweckmässig in zwei Anteile aufspalten lässt:

- einen maschineninternen, durch die Polradwinkeländerung entstehenden Anteil  $\Delta m_i$ , der durch die elektrischen Maschinenparameter und den aktuellen Betriebspunkt bestimmt ist, und aufgrund seiner Phasenlage dämpfend auf Polradpendelungen wirkt;
- einen Anteil  $\Delta m_a$ , der durch äusseren Eingriff des Spannungsreglers eine gezielte Änderung des zeitlichen Momentenverlaufs über die Erregerspannung erlaubt, jedoch entdämpfend wirkt.

Die Wirkungsweise des PSS besteht in der Erzeugung eines dämpfenden Signalanteils  $\Delta m_s$  aus einer geeigneten Grösse des periodisch pendelnden Turbosatzes.

Grundsätzlich gehört zur Funktion des PSS (Bild 3) ein Eingangssignal, ein Eingangsfiler zur Ausblendung des stationären und Erfassung lediglich des pendelnden Anteils des Eingangssignals, eine geeignet gewählte Übertragungsfunktion und eine Ausgangsbegrenzung. Das Ausgangssignal des PSS wirkt als Eingangssignal auf den Spannungsregler und erzeugt ein Zusatzsignal  $\Delta m_s$ , das den entdämpfenden Effekt des Spannungsreg-

tiven Modell zu erfassen [5] (siehe hierzu Abschnitt «Wirkungsmechanismen»).

Für die Bewertung einer weiteren – heute zumindest als Gedankenmodell existierenden – Lösung der Integration von Spannungs- und Turbinenreglern im Sinne einer Blockregelung wird auf die Zusammenfassung verwiesen.

## Problemumfang

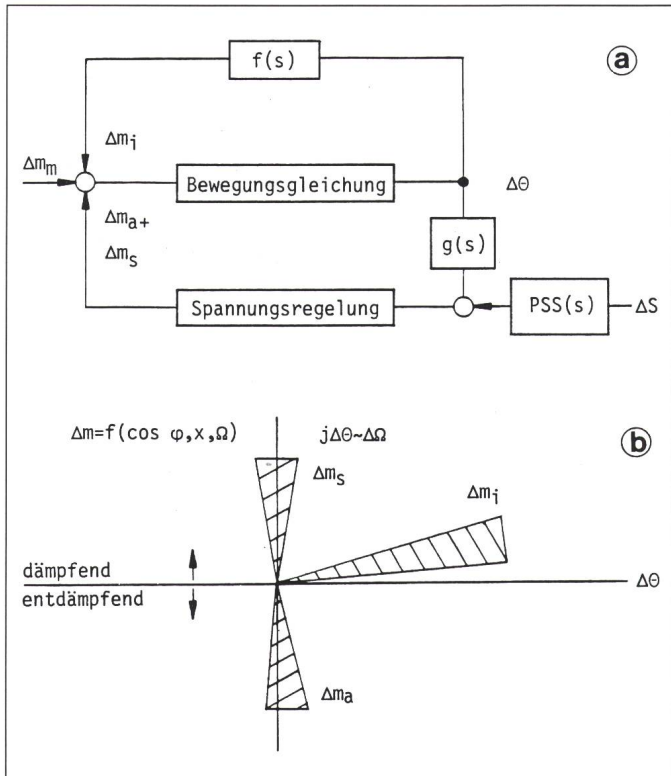
Zwei gegensätzliche Randbedingungen bestimmen den zur Problemlösung erforderlichen Untersuchungs- und Modellumfang:

- Das Bestreben nach besserer Übersichtbarkeit und Handhabung bei der grundsätzlichen Erarbeitung technisch-physikalischer Wirkungsmechanismen und Regelungsstrategien im Zusammenhang mit Polradpendelungen.
- Die Notwendigkeit der praktischen und zuverlässigen Funktionsfähigkeit

der Verfahren im Zusammenwirken mit unter Umständen schnell und stark veränderlichen Systemstrukturen des realen Netzbetriebes.

Die Bandbreite der genannten Anforderungen hat auf der einen Seite zur Erarbeitung linearisierter Modelle geführt, die neben ihrem grundsätzlichen Erkenntniswert ihre praktische Entsprechung in den Polradpendelungen durch nur geringfügige Änderungen des Betriebszustandes, z.B. die Schalthandlung in ausgedehnten Netzen geringer Kurzschlussleistung, finden. Die Modellbildung umfasst hierbei üblicherweise die linearisierte Bewegungsgleichung des Generators unter Berücksichtigung des Hauptfeldflusses sowie des Spannungsreglers als beteiligte Reglerkomponente.

Aber auch in stark vermaschten Netzen mit hoher synchronisierender Kurzschlussleistung treten bei entsprechender Störanregung, z.B. dem generatornahen 3poligen Kurzschluss,



**Bild 2**  
Einflussgrößen bei  
Leistungs-  
pendelungen

**PSS-Typen**

Einen Überblick über die im folgenden zu vergleichenden PSS-Konzepte zeigt Bild 3.

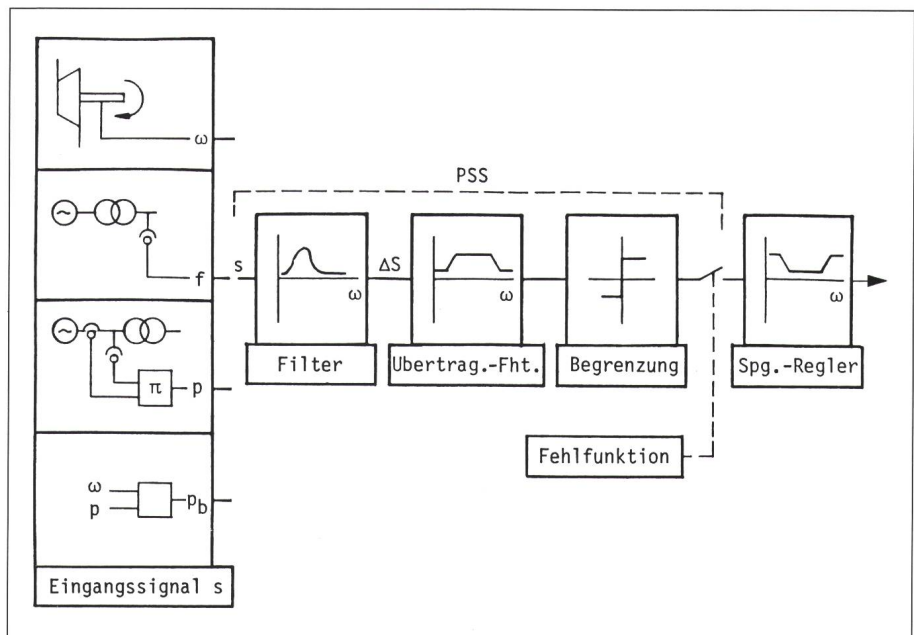
**PSS mit Drehzahlabweichung ( $\omega$ -PSS)**

Bei dem PSS mit Drehzahlabweichung ( $\omega$ -PSS) wird die Generator-drehzahl über ein Eingangsfiler zur Ausblendung des stationären und Weiterleitung lediglich des pendelnden Anteils geführt. Über ein nachfolgendes Übertragungsglied erfolgt eine Phasenvordrehung, so dass die nahezu 90° Phasennacheilung bewirkende Charakteristik der Übertragungsstrecke «Spannungsregler-Erreger-Generatorhauptfeld» im Bereich der Pendelfrequenzen kompensiert wird. Um das bei reiner Phasenvordrehung verbundene und Störsignale verstärkende differenzierende Verhalten der Übertragungsfunktion zu entschärfen, wird die Phasenvordrehung bei höheren Frequenzen durch integrierende Faktoren wieder rückgängig gemacht. Das durch die Drehzahlabweichung gebildete Zusatzmoment  $\Delta m_s(s)$  ist gegenüber  $\Delta m_a$  um 180° vorgekehrt (Bild 2). Es leistet somit in Richtung der Drehzahlabweichung einen positiven dämpfenden Beitrag im Bereich der Frequenzen von Polradpendelungen zwischen 0,1 und 1,0 Hz.

- a funktionale Zusammenhänge
- b Phasenlage der Drehmomente
- $\Delta m_m$  mechanisches Moment
- $\Delta m_i$  maschineninternes Moment
- $\Delta m_a$  äusseres Moment durch Spannungsregelung
- $\Delta m_s$  Zusatzmoment durch PSS
- $\Delta \theta$  Polradwinkeländerung
- $\Delta S$  Eingangssignal PSS

lers kompensiert. Im allgemeinen wird das PSS-Ausgangssignal auf einen Maximalwert, z.B. entsprechend  $\pm 10\%$  des Spannungssollwertes, begrenzt, um zu starke Auswirkungen des PSS auf den Blindleistungshaushalt zu vermeiden, und durch einen Fehlfunktionsschutz überwacht.

In der durch die Polradwinkeländerung und der daraus resultierenden Pendelfrequenz definierten Zustandsebene variieren die Momentenanteile in ihrer Phasenlage entsprechend dem Generatorleistungsfaktor, der maschineninternen und -externen Reaktanzen sowie der Pendelfrequenz. Hier ergibt sich der theoretische Ansatzpunkt für den eingangs erwähnten Einsatz adaptiver Verfahren bei der Festlegung der Übertragungsfunktion des PSS. Der beschränkte Gewinn im Dämpfungsverhalten bei gleichzeitig prinzipiellen Schwierigkeiten in der Ermittlung der einzustellenden Parameter scheint eine praxisnahe Verwendung aus heutiger Sicht kaum zu gewährleisten.



**Bild 3** PSS-Grundschemata

- $\omega$  Drehzahl
- f Frequenz
- p Wirkleistung
- $P_b$  Beschleunigungsleistung



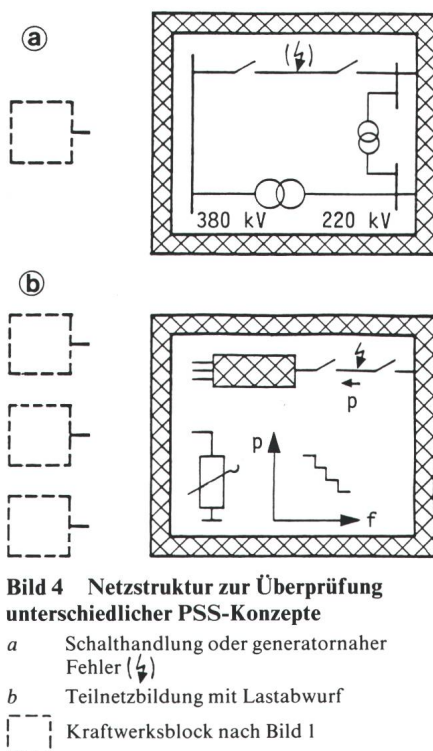
Ein wesentlicher Nachteil dieses PSS-Typs liegt bei höheren Frequenzen in seiner sehr hohen Verstärkung. Wenn auch die Frequenzen von Polradpendelungen in der Regel 1,5 Hz nicht überschreiten, können speziell nach Kurzschlüssen Torsionsschwingungen am Wellenstrang des betroffenen Turbosatzes auftreten. Deren niedrigste Frequenzen liegen je nach Auslegung der Turbine bei 10 bis 15 Hz. Diese Torsionsschwingungen entstehen durch die Elastizität des Wellenstranges mit seinen diskret angeordneten Teilmassen von Generator, Erreger und Turbine. Wegen der nicht eindeutig festgelegten Phasenlage der Torsionsschwingungen ist kein definierter Zusammenhang zwischen dem PSS-Einsatz und der Dämpfung oder Anfachung von Torsionsschwingungen anzugeben. Die mögliche Gefahr der Anfachung ist aufgrund der hohen Verstärkung der PSS-Übertragungsfunktion jedoch besonders gravierend. Um der damit verbundenen mechanischen Beanspruchung des Wellenstranges entgegenzuwirken und unter Umständen sogar ernsthaften Schäden bis hin zum Wellenbruch vorzubeugen, wurden zahlreiche PSS dieses Typs mit Kerbfiltern zur Eliminierung der Torsionsfrequenzen ausgerüstet. Offen bleibt jedoch das Risiko der Fehlfunktion der Filter und damit nachhaltiger Konsequenzen für die Lebensdauer des Turbosatzes.

### PSS mit Frequenzabweichung (f-PSS)

Um die Gefahr der Anfachung von Torsionsschwingungen bei dem vorgenannten PSS mit Eingang «Drehzahlabweichung» ohne zusätzliche Filter zu vermeiden, ist die Verwendung der Frequenz z.B. an der Oberspannungsseite des Maschinentransformators als Eingangssignal möglich. Dieses Eingangssignal wird mit zunehmender Entfernung vom Generatorläufer unempfindlich gegen Torsionsschwingungen.

### PSS mit elektrischer Wirkleistungsabweichung (p-PSS)

Die genannten Probleme der Anregung von Torsionsschwingungen bei der Wahl der Drehzahlabweichung als PSS-Eingangssignal können prinzipiell auch durch Vermeidung einer hohen Verstärkung der PSS-Übertragungsfunktion bei höheren Frequenzen umgangen werden. Um dennoch eine gleichwertige Verstärkung des dämpfenden Zusatzmoments  $\Delta m_s(s)$



**Bild 4 Netzstruktur zur Überprüfung unterschiedlicher PSS-Konzepte**

- a Schaltanordnung oder generatornaher Fehler (⚡)
- b Teilnetzbildung mit Lastabwurf
- ⊠ Kraftwerksblock nach Bild 1

zu erzielen, ist die Aufschaltung eines Eingangssignals mit anderer Phasenlage als der Drehzahlabweichung erforderlich. Hierzu bietet sich zunächst formal die der Drehzahlabweichung  $\Delta\omega$  um  $90^\circ$  vorausseilende Beschleunigung des Turbosatzes an, die jedoch als Messgröße üblicherweise nicht vorhanden ist und durch synthetische Erzeugung (etwa durch Differenzierung der Drehzahlabweichung) eher eine Verschlechterung in bezug auf Störsignale mit sich bringen würde. Unter der Annahme, dass

- keine Änderung der Turbinenleistung während der Polradpendelungen auftritt (d.h.  $\Delta m_m = 0$ ) und
- zahlenwertmässig geringe Drehzahlabweichungen auftreten,

kann die elektrische Wirkleistungsänderung  $\Delta p$  als eine der Beschleunigung äquivalente, gegenüber der Drehzahlabweichung um  $90^\circ$  phasenverschobene und in jedem Kraftwerk ohnehin vorhandene Messgröße als PSS-Eingangssignal Verwendung finden.

### PSS mit Beschleunigungsleistung ( $p_b$ -PSS)

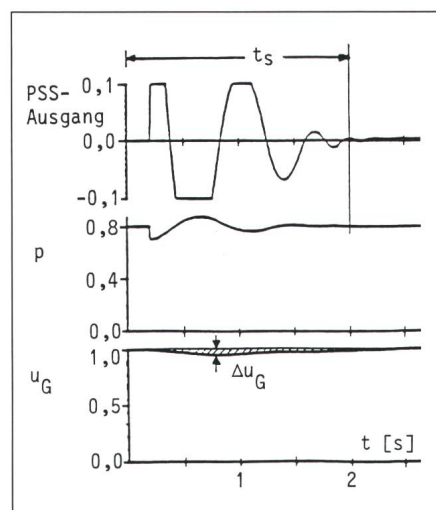
Bei dem PSS-Typ mit Eingang «Wirkleistungsabweichung» sind verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung der sich unter Umständen ändernden Turbinenleistung mit sehr unterschiedlichem Realisierungsaufwand gemacht worden. Eine einfache

Lösung besteht in der Erzeugung einer synthetischen, aus der Drehzahl und der Leistung gewonnen Beschleunigungsleistung  $p_b$ .

### Dynamik im Verbund

Eine vergleichende Wertung der vorgestellten PSS-Konzepte soll anhand der Verbundsituation nach Bild 4, Fall a, durchgeführt werden. Hierbei speist ein Kraftwerksblock in das 380-kV-Netz und parallel dazu über einen Kuppeltransformator in ein 220-kV-Netz. Bei einer Abschaltung der Verbundleitung ohne vorausgehenden Netzfehler entstehen Leistungspendelungen durch die nun schwächere Anbindung des Kraftwerksblockes. Die Auswirkungen auf den Kreis der Generatorspannungsregelung liegen aufgrund der geringen Störanregung in einer Grössenordnung, die eine lineare Betrachtungsweise erlaubt.

Als Vergleichsmerkmal für die Wirksamkeit der PSS-Typen sollen zwei Kenngrössen, die Zeit  $t_s$ , die die Zeitdauer bis zum Abklingen der Leistungspendelungen beschreibt, und die Grösse  $u_G$  als Mass für die Spannungsschwankungen während des transienten Vorganges, herangezogen werden (Bild 5). Ohne PSS kommt es nach der Abschaltung der Verbundlei-

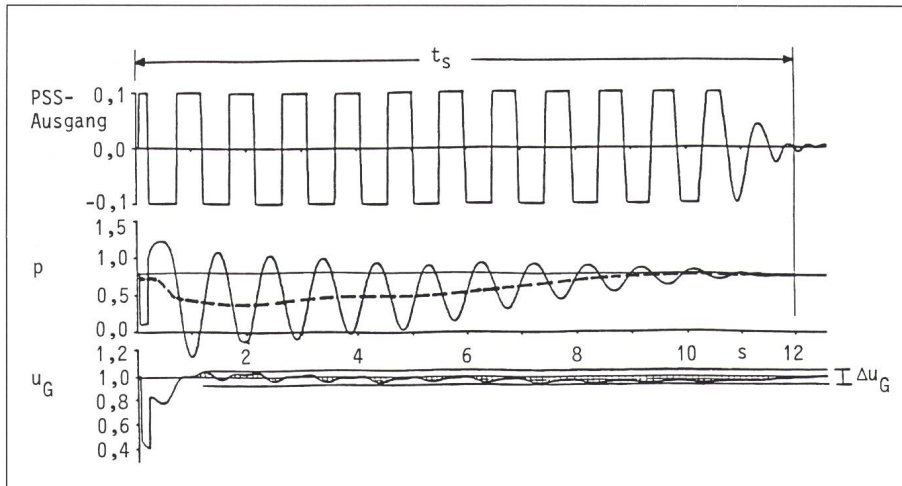


PSS	ohne	$p_b$	p	$f/\omega$
$t_s/s$	$\infty$	2	2	2
$\Delta u_G/\%$	-	5	5	5

**Bild 5 PSS-Verhalten unter linearen Verhältnissen (Verbund)**

- $p$  elektrische Wirkleistung, bezogen auf Nennscheinleistung
- $u_G$  Generatorspannung, bezogen auf Generatornennspannung





PSS	ohne	$P_b$	$p$	$f/\omega$
$t_s / s$	$\infty$	12	11	11
$\Delta u_G / \%$	-	12	19	11

**Bild 6 PSS-Verhalten bei nichtlinearen Einflussgrößen (Verbund)**

$p$  elektrische Wirkleistung, bezogen auf Nennscheinleistung  
 $u_G$  Generatorspannung, bezogen auf Generatornennspannung

zung zu lang anhaltenden angefachten Dauerpendelungen mit zunehmenden periodischen Spannungsschwankungen. Bei Verwendung eines PSS sind die Pendelungen sehr schnell abgeklungen.

Unabhängig vom eingesetzten PSS-Typ stellt sich ein gleichermassen positives Dämpfungsverhalten ein. Dieses Ergebnis rechtfertigt die Annahme der zwar aufgrund der geschilderten Erwägungen unterschiedlich gewählten, jedoch unter linearen Verhältnissen äquivalenten Eingangssignale. Somit zeigen aus solchen Testsituationen abgeleitete Vergleiche keine in einem bestimmten Grundkonzept liegenden Vor- oder Nachteile in der Effektivität der Pendeldämpfung.

Weiterführende Funktionsmerkmale sind aus Netzstörungen ersichtlich. Hierzu wird wiederum die Netzsituation nach Bild 4, Fall a, betrachtet. Diesmal erfolgt die Leitungsabschaltung jedoch durch Schutz auslösung nach 3poligem Kurzschluss. Neben der bisher wirksamen Reglerkomponente der Spannungsregelung greift hier die Turbinenregelung in den dynamischen Prozess ein.

Als Beschleunigungsschutz wird ein Lastsprungrelais wirksam, das eine kurzfristige Absenkung der mechanischen Antriebsleistung bewirkt (gestrichelte Linie in Bild 6). Hierdurch soll ein Asynchronlauf des Blockes vermieden werden. Ohne PSS stellen sich auch in diesem Fall lang anhaltende ungedämpfte Dauerpendelungen grosser Amplitude ein. Mit PSS nimmt die Dämpfung der Leistungspendelungen

aufgrund der stärkeren Störangeregung längere Zeit in Anspruch als im vorgenannten Fall.

Auffällig sind jedoch die Unterschiede in der Spannungsabweichung während des transienten Vorganges. Besonders der PSS mit dem Eingangssignal elektrische Wirkleistung, p-PSS, überträgt die zeitweise Absenkung der mechanischen Antriebsleistung über den Spannungsregler auf die Generator-Klemmenspannung. Dieses Verhalten kann sich auf den hier nicht untersuchten Kraftwerkseigenbedarf besonders ungünstig auswirken. Damit ist dieser PSS-Typ im praktischen Netzbetrieb nur eingeschränkt nutzbar.

### Teilnetzbildung

Aus den Untersuchungen des vorangegangenen Abschnittes verbleiben die PSS-Typen mit der Beschleunigungsleistung und der Frequenz oder Drehzahlabweichung als geeignetem Eingangssignal. Die Drehzahl wird wegen der formalen Gleichwertigkeit zur Frequenz (siehe hierzu auch Bilder 5 und 6), jedoch der praktisch ungünstigeren Handhabung aufgrund der Torsionsschwingungsprobleme bei den folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Bisher unbekannt Anforderungen an die Eignung von PSS können durch die Struktur des umgebenden Netzes und den gesamten Störungsablauf festgelegt werden [9]. Hierzu wird die Anordnung nach Bild 4, Fall b, betrach-

tet, in der drei Blöcke in einen Netzbereich mit regionaler Last und Anschluss an das Verbundnetz einspeisen. Ferner werden Leistungsimporte unterschiedlicher Grösse (15% und 50%) aus dem Verbund angenommen.

Für den Fall eines plötzlichen Ausfalls der Importleistung und einer entsprechenden Störung der Leistungsbilanz dieser Grössenordnung ist bei zahlreichen Energieversorgungsunternehmen ein frequenzabhängiger Lastabwurf vorgesehen [10]. Hierdurch soll die Gefahr einer Frequenzabsenkung unter 95% des Sollwertes und die hierbei durch Schutzabtrennung ausgelöste Abschaltung aller thermischen Kraftwerke mit der Konsequenz des vollständigen Netzzusammenbruches vermieden werden. Üblicherweise erfolgt der Lastabwurf stufenweise in Abhängigkeit von der Frequenz, um eine möglichst gute Anpassung der abgeworfenen Last an die ausgefallene Erzeugerleistung zu erzielen.

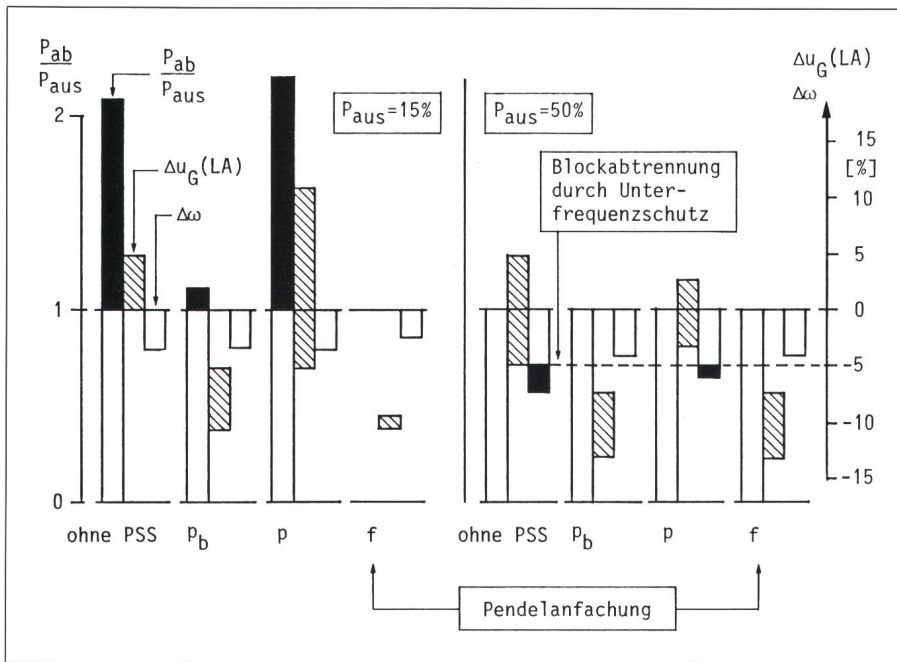
Im folgenden wird der Ausfall von Importleistungen und nach 3poligem generatormahem Kurzschluss auf der Verbindungsleitung zum Verbund angenommen. Das Ergebnis des daraus folgenden dynamischen Prozesses ist anhand der Kenngrössen

- Verhältnis abgeworfene Leistung zu Leistungsdefizit  $P_{ab}/P_{aus}$
- Spannungsschwankungen während des Lastabwurfs  $\Delta u_G(LA)$
- Drehzahlabweichung der Kraftwerke  $\Delta \omega$

in Bild 7 zusammengefasst. Im Fall ohne PSS führt die Absenkung der mechanischen Turbinenantriebsleistung durch den Beschleunigungsschutz zu einer Absenkung der Drehzahl weit unter die durch das Leistungsdefizit allein verursachte Frequenzabsenkung hinaus. Hierdurch wird im Vergleich zur ausgefallenen Leistung überschüssige Last abgeworfen.

Positiv wirkt sich der Einsatz eines PSS mit Beschleunigungsleistung  $p_b$  als Eingangssignal aus. Durch das PSS-Eingangssfilter zur Erzeugung des Signals «Beschleunigungsleistung» mit Hilfe der Drehzahl wird die negative Drehzahlabweichung über den PSS so auf den Soll/Ist-Vergleichswert des Spannungsreglers übertragen, dass eine Reduzierung der Generatorspannung erfolgt. Die dadurch verursachte zwischenzeitliche Verringerung der hier als Wirkwiderstand angenommenen Verbraucherlast wirkt soweit frequenzstützend, dass keine nennenswerte überschüssige Leistung abge-





**Bild 7 PSS-Verhalten bei nichtlinearen Einflussgrößen (Teilnetzbildung)**

$P_{ab}$  abgeworfene Leistung

$P_{aus}$  Leistungsdefizit

$\Delta u_G(LA)$  Spannungsschwankungen während Lastabwurf

worfen wird. Lediglich das Defizit an Importleistung wird ausgeglichen.

Ein gegensätzlicher Effekt tritt bei Verwendung des PSS mit Eingang «elektrische Wirkleistung» auf. Die Übertragung der durch den Beschleunigungsschutz ausgelösten Absenkung der Wirkleistung über den PSS auf den Spannungsregler führt hier zu einer Erhöhung der Generatorspannung und damit zur Verbraucherlast, so dass es zu einem überschüssigen Lastabwurf auch im Vergleich zum Fall ohne PSS kommt. Eine Vergrößerung des Leistungsdefizits auf die Auslegungsgrenze des Lastabwurfes von 50% der Netzlast führt wegen der gleichen Wirkungsmechanismen wie im vorher betrachteten Fall eines 15%-Ausfalls zu einer noch weiteren Absenkung der Drehzahl unter die Grenze der Schutzabtrennung aller thermischen Blöcke vom Netz im Falle ohne PSS und bei Verwendung des PSS mit Eingang «Wirkleistung».

Ein besonderes Verhalten zeigt der PSS mit Eingang «Frequenzabweichung». Hierbei wird die Drehzahlabsenkung im Verbund und damit der Frequenzabweichung über den PSS und den Spannungsregler im Sinne einer Spannungsreduzierung übertragen. Dies hat eine kurzzeitige Lastreduzierung und eine Verhinderung des Lastabwurfes zur Folge. Zudem führt

dieser Effekt zu einer stärkeren Entsynchonisierung der Blöcke, die die Verringerung der transienten Polradspannung auch eine Reduzierung des synchronisierenden Momentes zur Folge hat. Während die Blöcke im Verbund gegen das frequenzstarre Verbundnetz mit gleicher Phasenlage der Polradwinkel pendelten, treten im jetzt entstandenen Inselnetz nahezu gegenphasige Drehzahlabweichungen auf, da die Blöcke nun gegeneinander pendeln. Die Quellen der Eingangssignale der Frequenzabweichungen, hier von der Oberspannungsseite der Blocktransformatoren angenommen, weisen jedoch aufgrund der geringen elektrischen Entfernung nahezu gleiche elektrische Phasenlage auf, so dass die Eingangssignale nicht mehr dämpfend, sondern pendelanfächend wirken, wie die zugehörigen Simulationsrechnungen zeigten.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben verdeutlicht, dass die heute existierenden PSS-Konzepte zur Dämpfung von Leistungspendelungen unter linearen Bedingungen gleichermaßen gute Eigenschaften aufweisen. Konzeptbedingte Unterschiede sind demnach in Fällen einer nur geringfügigen Störangeregung nicht erkennbar.

Eine Einengung des Tauglichkeitspektrums ist jedoch unter dem Einfluss stark nichtlinearer Komponenten, z.B. Schutzeinrichtungen in der Turbinenregelung bei Netzfehlern, deutlich geworden. Hierdurch entsteht eine Kopplung zwischen den Regelkreisen der Spannungs- und Turbinenregelung und somit zwischen Wirk- und Blindleistung. Als Konsequenz hieraus muss bei der Untersuchung von PSS zur Dämpfung von Leistungspendelungen die häufig durchgeführte Trennung von Kurz- und Mittelzeitdynamik aufgehoben werden. Weiterführende Schritte könnten im Einsatz eines Blockreglers mit Integration aller regelungstechnischen Komponenten liegen.

Nach dem Erkenntnisstand der vorgelegten Untersuchungen zeigt lediglich der PSS-Typ mit dem Eingangssignal «Beschleunigungsleistung» unter allen betrachteten Systemzuständen ein befriedigendes Verhalten.

## Literatur

- [1] L. Petry: Ein Netzmodell zur Simulation dynamischer Vorgänge in elektrischen Versorgungsnetzen unter besonderer Berücksichtigung von statischen Kompensatoren. Dissertation der Universität Siegen, 1985.
- [2] E. Handschin und P. Stöber: Anforderungen an supraleitende Speicher aus der Sicht des Netzbetriebes. VDI-Tagung «Supraleitung in der Energietechnik» - Stand, Konzepte, neue Aspekte, Karlsruhe, 14. 16. Juni 1989. VDI-Berichte 733, S. 207. .218.
- [3] F. P. de Mello and C. Concordia: Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 88(1969)4, p. 316. .329.
- [4] K. Zollenkopf: Analyse von Leistungspendelungen eines grossen Kraftwerksblockes mittels vereinfachtem Blockschaltbild. VDE-ETG-Fachtagung «Dynamisches Verhalten elektrischer Maschinen und Antriebe». ETG-Fachberichte 5(1980), S. 203. .215.
- [5] K. Fork: Kraftwerkblöcke in Netzstörungen. Elektrotechnik 59(1981)2, S. 102. .111.
- [6] E. V. Larsen and D. A. Swann: Applying power system stabilizers. Part I/II and III. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 100(1981)6, p. 3017. .3046.
- [7] A. Ghosh a. o.: Power system stabilizer based on adaptive control techniques. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 103(1984)8, p. 1983. .1989.
- [8] H. Wohlfarth: Dämpfung von Leistungspendelungen in elektrischen Energieversorgungssystemen. Dissertation der Universität Dortmund, 1987.
- [9] F. P. de Mello, L. N. Hannett and J. M. Undrill: Practical approaches to supplementary stabilizing from accelerating power. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS 97(1978)5, p. 1515. .1522.
- [10] H.-J. Haubrich: Stabilitätsstützung im Mittelzeitbereich durch frequenzabhängigen Lastabwurf. Elektrizitätswirtschaft 83(1984)20, S. 860. .865.