

# Dämpfung von Torsionsschwingungen mittels einer leistungselektronischen Netzkomponente

## Damping of torsional vibrations by a power electronic grid component

Dipl.-Ing. Thomas Zöller, Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried und Prof. Dr.-Ing. Amir M. Miri

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe, zoeller@ieh.uni-karlsruhe.de

### Kurzfassung

Torsionsschwingungen entstehen in mechanischen Wellen, wenn diese rotierende Massen miteinander koppeln. Insbesondere bei Wellen-Massen-Systemen mit großen Massenträgheitsmomenten und ausgedehnten Wellen, wie z. B. in Turbosätzen von Kraftwerken oder in Antrieben, können diese Schwingungen, aufgrund der schwachen natürlichen Dämpfung und der scharfen Resonanzstellen dieser Systeme, ein bedeutendes Problem darstellen. Eine wünschenswerte Bedämpfung dieser Torsionsschwingungen ist in ausgedehnten Systemen auf mechanischem Wege unmöglich. Der folgende Beitrag stellt die Forschungsarbeit an einem aktiven elektrischen Dämpfungssystem auf Basis einer leistungselektronischen Netzkomponente vor.

### Abstract

Torsional vibrations occur in mechanical shafts whenever they couple rotating masses. Especially shaft assemblies with large inertias and long shafts, e.g. in turbo-generating sets of power plants or in drives, these oscillations can be a major problem due to the weak natural damping and the sharp resonance points of these systems. It is impossible to obtain a desirable damping of these torsional vibrations by means of a mechanical method. The following paper illustrates the research of an active electrical damping system based on a power electronic grid component.

## 1 Torsionsschwingungen in Turbosätzen

Der Generator bildet zusammen mit den Turbinen und der Welle den Kraftwerksturbosatz. Es handelt sich dabei um ein mechanisches Schwingungssystem bestehend aus großen trägen Massen, z.B. dem Generatorrotor oder den Turbinenläufern, und elastischen Federn, z.B. den Wellenschenkeln. In Abhängigkeit der Massenanzahl  $N$  erhält man  $N-1$  dominierende Eigenfrequenzen des Schwingungssystems. Diese Eigenfrequenzen weisen oftmals eine scharfe Charakteristik auf und unterliegen darüber hinaus einer nur schwachen natürlichen Dämpfung. Das Spektrum der Eigenfrequenzen liegt dabei in den allermeisten Fällen unterhalb der Netzfrequenz (subsynchron).

Zur Modellierung eines Wellenstranges kann auf unterschiedliche Methoden zurückgegriffen werden. Bei einem Einzelmassenmodell werden lediglich die diskreten Turbinen- bzw. Rotormassen sowie die entsprechenden Federsteifigkeiten berücksichtigt. Modelle höherer Ordnung rep-

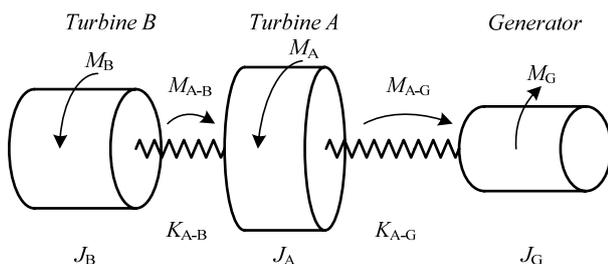
räsentieren darüber hinaus weitere Einflüsse am Wellenstrang wie z.B. den schalenförmigen Aufbau des Läufers oder die Auswirkungen der Turbinenschaufeln. Zur Modellierung von Torsionsschwingungen genügt in der Regel die Abbildung mit einem Einzelmassenmodell (Bild 1). Zudem veranschaulicht dieses die Entstehung von Torsionsschwingungen. Ein Ungleichgewicht zwischen den Turbinenmomenten (Antriebsmomente) und dem Gegenmoment des Generators (Abtriebsmoment)

$$M_G \neq M_A + M_B \quad (1)$$

führt unweigerlich zu einem Ausgleichsvorgang, in dessen Folge die Drehmomente  $M_{A-B}$  und  $M_{A-G}$  eine Drehmomentschwingung ausführen, deren Frequenzanteile die mechanischen Eigenfrequenzen abbilden. Der Ausgleichsvorgang dauert solange bis sich ein neues stationäres Gleichgewicht gefunden hat. Aufgrund der Generatoranbindung an das Energienetz handelt sich dabei um einen gekoppelten mechanisch-elektromagnetischen Ausgleichsvorgang.

### 1.1 Anregung von Torsionsschwingungen

Zu einem Ungleichgewicht zwischen den Antriebsmomenten und dem Abtriebsmoment kann es durch eine Vielzahl von Ereignissen kommen. Dabei sind grundsätzlich zwei Arten zu unterscheiden. Zum Einen sind dies Anregungen ausgehend von der mechanischen Seite des Gesamtsystems. Diese können z.B. durch einen Störfall im Dampferzeugungssystem des Kraftwerkes verursacht werden. Zum Anderen ist die Mehrzahl der Schwingungsauslöser auf der elektrischen Seite zu suchen. Jeder Störfall im elektrischen



**Bild 1** Einzelmassenmodell eines Turbosatzes

Energienetz, in dessen Folge es zu einer Lastschwankung am Generator kommt, führt zu einer Torsionsschwingungsanregung am Turbosatz [1]. Mögliche Störfälle sind unter anderen folgende:

- Klemmenkurzschlüsse
- Kurzunterbrechungen nach Netzkurzschlüssen
- Blitzeinschläge in Freileitungen
- Netzumschaltungen mit Fehlsynchronisation
- Abschaltung von 2- und 3-poligen Netzkurzschlüssen
- Lastabwürfe

Die genannten Störungen stellen allesamt transiente Anregungsfälle des Turbosatzes dar. Darüber hinaus bilden sogenannte periodische Anregungen ein erhebliches Gefährdungspotential für den Turbosatz. In diesem Fall kann die anregende Störleistung sehr gering sein [3]. Sobald diese aber Frequenzanteile im Bereich einer oder mehrerer Eigenfrequenzen des mechanischen Wellenstranges beinhaltet, führt dies zu einem kontinuierlichen Ansteigen der Torsionsschwingungsamplitude; man spricht hierbei von Subsynchrone Schwingungen (Subsynchronous Oscillations, SSO). In Extremfällen können so innerhalb von Sekunden kritische Materialgrenzwerte überschritten werden. Eine besondere Art von SSO bilden Subsynchron Resonanzen (SSR). Hier kommt es zu einer Interaktion zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Schwingungssystem einer serienkompensierten Übertragungsleitung.

## 1.2 Auswirkungen von Torsionsschwingungen

Die Höhe der angeregten Torsionsschwingungsmomente ist abhängig von der Art des Fehlerfalls, der räumlichen Distanz der Störung zum Turbogenerator, der Störungsdauer sowie dem Lastzustand des Generators vor Fehlertritt. Das Gesamtgefährdungspotential der einzelnen Störungstypen berechnet dabei aus dem Produkt dreier Faktoren: der Häufigkeit der Störung, der Schwere der Störung und der Wahrscheinlichkeit für das Erreichen der Maximalbeanspruchung. In [2] ist dazu ein Störfallkatalog zu finden, in dem zum jeweiligen Störfall die Gefährdung entnommen werden kann.

Nach einer erfolgten Störanregung reduzieren sich die Amplituden der Torsionsmomente entsprechend der vorhandenen natürlichen (vor allem mechanischen) Dämpfung des Turbosatzes. Dabei weisen die einzelnen Eigenfrequenzen unterschiedliche Dämpfungsfaktoren auf. Die Torsionsbeanspruchung der Welle führt dabei zu einer zunehmenden Wellenermüdung. Man definiert eine 100-prozentige Wellenermüdung als den vollständigen Verbrauch der Lebensdauer. Der Verbrauch von Lebensdauer wird von drei Größen beeinflusst:

- Amplitudenhöhe des Wechselanteils der Torsionsmomente
- Mittelwert dieser Torsionsspannung
- Anzahl der Schwingungsperioden

Die auftretenden Torsionsschwingungen verursachen nicht nur eine Schädigung der eigentlichen Welle, sondern beanspruchen noch weitere Teile des Turbosatzes wie z.B. die Schaufeln und die Kupplungen. Torsionsschwingungen bilden

also ein erhebliches Gefährdungspotential für den sicheren Betriebs eines Kraftwerkes. Es ist daher notwendig den Turbosatz im Hinblick auf Störfälle sorgfältig auszulegen. Des Weiteren wurden in den letzten Jahrzehnten Torsionserfassungsgeräte entwickelt, deren Aufgabe es ist gemessene Torsionsschwingungen zu bewerten und Aussagen über den Beanspruchungsgrad zu treffen. Teilweise sind diese mit dem Generatorschutz gekoppelt und veranlassen bei Bedarf entsprechende Notmaßnahmen. Darüber hinaus erlauben diese Geräte einen optimierten Einsatz von Revisionsmaßnahmen am Turbosatz.

## 1.3 Dämpfung von Torsionsschwingungen

Der Verlauf der Torsionsschwingung, insbesondere deren Zeit zum Abklingen, wird nahezu ausschließlich von der vorhanden mechanischen Dämpfung bestimmt. Eine zusätzliche Bedämpfung des Turbosatzes würde einige Vorteile mit sich bringen. Zum Einen wäre eine effizientere, kostengünstigere Konstruktion des Turbosatzes vorstellbar und zum Anderen könnten Revisionsintervalle vergrößert werden. Zusätzlich könnte die Einsatzbereitschaft des Generators im Störfalle erhöht werden. Die bisherigen Ansätze zur Verbesserung der Torsionsproblematik konzentrieren sich hauptsächlich auf die Vermeidung von Anregungen und deren Unterdrückung [6]. Dieses Forschungsprojekt untersucht die Möglichkeiten der Anwendung von aktiven Dämpfungssystemen.

Torsionsschwingungen in Turbosätzen können gemäß dem erläuterten Einzelmassenmodell durch das folgende n-dimensionale Gleichungssystem beschrieben werden.

$$\mathbf{J} \ddot{\phi}(t) + \mathbf{D} \dot{\phi}(t) + \mathbf{K} \phi(t) = \mathbf{B} u(t) \quad (2)$$

mit:

$\phi(t)$	Winkel der Trägheitsmassen
$u(t)$	Externes Drehmoment
$\mathbf{J}$	Matrix der Trägheitsmomente
$\mathbf{D}$	Matrix der vorhandenen Dämpfung
$\mathbf{K}$	Matrix der Steifigkeit
$\mathbf{B}$	Matrix des externen Drehmoments

Mechanische Torsionsdämpfer werden teilweise in Antriebssystemen mit kleiner Leistung eingesetzt, jedoch ist dies bei Turbosätzen unmöglich. Gemäß Gleichung (2) kann der Turbosatz durch ein externes Drehmoment  $u(t)$  beeinflusst werden. Dabei legt die Matrix  $\mathbf{B}$  den Ort des Eingriffes fest. Ziel ist es, die vorhandene Dämpfung, repräsentiert durch die Matrix  $\mathbf{D}$ , zu vergrößern. Hierzu kommen zwei Möglichkeiten in Frage. Die erste Möglichkeit ist ein Eingriff am Generatorrotor. Das mechanische Gegenmoment des Generators  $M_G$  kann gemäß

$$M_G(t) = \frac{p_G(t)}{\omega_G(t)} \quad (3)$$

durch die Wirkleistung  $p_G$  des Generators beeinflusst werden. Eine zweite Möglichkeit besteht darin ein dämpfendes Drehmoment an einem Ende des Turbosatzes durch eine drehmomentgeregelte Maschine einzuprägen. Dies ist ein

weiterer Teilaspekt dieses Forschungsgebiets, das im Folgenden allerdings nicht weiter betrachtet wird.

## 2 Dämpfungssystem – Parallel Connected Damper Circuit (PCDC)

Eine dynamische Regelung der elektrischen Wirkleistung eines Synchrongenerators ist auf einfachem Wege nicht möglich. Eine Komplettregelung ist nur möglich, falls der Generator über einen Umrichter ans Energienetz angeschlossen wird. Da dieser jedoch dann für die gesamte Leistung des Generators ausgelegt sein muss, ist eine solche Lösung unwirtschaftlich. Die Lösung dieses Problems stellt ein Stromrichter dar, der parallel zum Generator angeschlossen wird. Diese zusätzliche Netzkomponente (Parallel Connected Damper Circuit – PCDC) hat die Aufgabe die notwendige Dämpfungsleistung am Knotenpunkt Generator/Netz einzuspeisen. Einen schematischen Überblick des Gesamtsystems gibt Abbildung 2.

Im ersten Schritt ist es notwendig die aktuelle Torsionsschwingungen am Turbosatz zu messen. Nach einer Signalaufarbeitung berechnet die sogenannte Dämpfungsregelung daraus die notwendige Dämpferleistung  $p_{\text{damp\_soll}}$ . Diese wird der Stromrichterregelung zugeführt. Der Leistungsstromrichter hat nun die Aufgabe die vorgegebene Leistung  $p_{\text{damp}}$  an den Generator abzugeben. Dabei handelt es sich in Abhängigkeit der zu dämpfenden Torsionsschwingung um eine ein- oder mehrfrequente mittelwertfreie Wirkleistung. Da der Stromrichter sowohl Leistung abgeben als auch aufnehmen muss, wird ein elektrischer Energiespeicher benötigt. Die Tatsache, dass das Dämpfungssystem durch die Messung des aktuellen Torsionsmoments stets eine Dämpfungsleistung bzw. ein Gegenmoment mit einer Frequenz erzeugt, die genau der mechanischen Resonanzfrequenz entspricht, sorgt für eine hohe Effizienz dieses Systems. Die Leistungsklasse bzw. Baugröße des benötigten Stromrichters ist von der gewünschten Gesamtleistung des Dämpfungssystems abhängig. Zur Dämpfung von periodischen Anregungen genügen Leistungen unter einem Promille der Generatormennleistung. Bei der Dämpfung von transient-angeregten Torsionsschwingungen werden höhere Leistungen benötigt. Computersimulationen haben gezeigt, dass hier mit kurzzei-

tigen Dämpfungsleistungen im Bereich von 10% der Generatormennleistung sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Des Weiteren ist zu bemerken, dass dieses System nach einmaliger Systemanpassung unabhängig von Lastverhalten, Erregung und Drehzahl der Maschine arbeitet. Es ist vorstellbar das System als ständige Überwachungseinheit zu betreiben, welche bei Bedarf auftretende Torsionsschwingungen dämpft. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Systemkomponenten, insbesondere die Stromrichterkonzepte genauer erläutert.

### 2.1 Dämpfungsregelung

Das regelungstechnische Kernstück des Dämpfungssystems ist in der Dämpfungsregelung implementiert. Hier wurden in der Vergangenheit verschiedene Regelkonzepte auf ihre Tauglichkeit überprüft. Der ursprüngliche Regelansatz geht auf die Dämpfung von Torsionsschwingung bei einem Schwunggenerator (SR) zurück [4]. Bei dieser Konfiguration besitzt das mechanische System lediglich eine einzige Resonanzstelle. Die Übertragungsfunktion zwischen dem Generatormoment ( $M_G$ , Stellgröße) und dem Torsionsmoment ( $M_{T-G}$ , Regelgröße) hat dabei folgende Struktur:

$$G(s) = \frac{M_{SR-SG}}{M_G} = \frac{K_{SR-SG} \cdot J_{SR}}{J_{SG} \cdot J_{SR} \cdot s^2 + K_{SR-SG} \cdot (J_{SG} + J_{SR})} \quad (4)$$

Im Resonanzpunkt weist der Phasengang eine 90°-Verschiebung auf. Zur Dämpfung der Schwingung wird daher das gemessene Drehmomentsignal um 90° phasenverschoben und amplitudengeregelt als Stellgröße aufgeschaltet. Diese Methode hat sich sowohl simulativ als auch in der Praxis als sehr geeignet erwiesen [5].

Bei Mehrmassensystemen, wie diese in Turbosätzen anzutreffen sind, stößt dieser Ansatz allerdings an Grenzen. Zwar wurde der Regelansatz dahingehend erweitert, dass sämtliche Eigenfrequenzen des Systems phasenverschoben und, nach dem Prinzip der Superposition, der Stellgröße zugeführt wurden, allerdings müssen dazu zuerst die Frequenzanteile der Drehmomente separiert werden. Dies ist z.B. durch Bandpassfilter möglich. Schwierigkeiten bereiten dabei die geringen Abstände der Resonanzfrequenzen zueinander. Eine deutliche Verbesserung liefert der Einsatz von Kalman-Filtern. Dennoch zeigt das Regelkonzept Schwächen, insbesondere dann, wenn nicht sämtliche Drehmomente des Turbosatzes erfasst werden können.

Daher wurden weitere Regelansätze untersucht, bei der

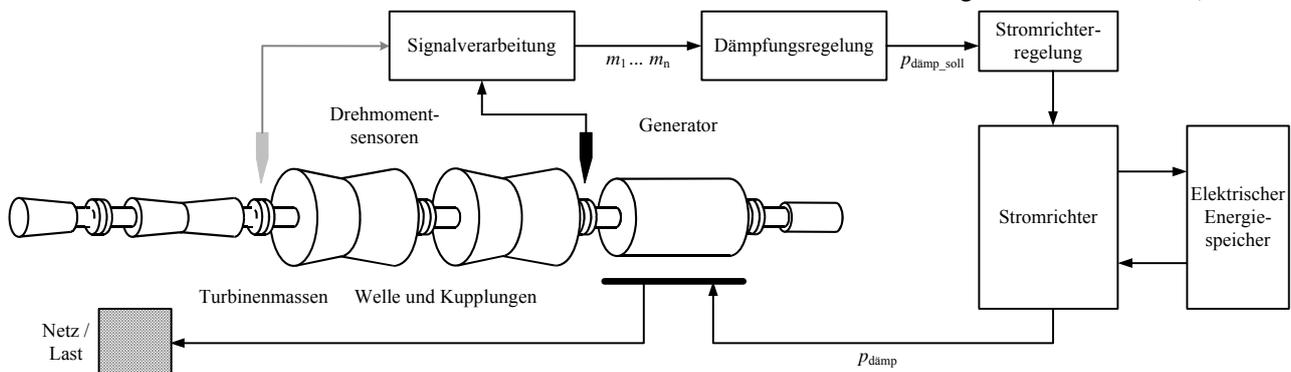
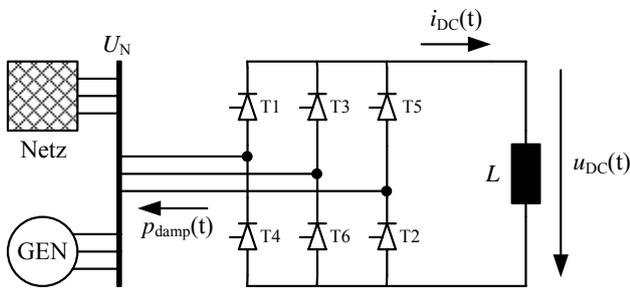


Bild 2 Schematischer Aufbau des Gesamtsystems

sich ein Linearer-Quadratischer-Gausscher-Regulator (LQG) als besonders geeignet erwies. Der LQG-Regulator besteht aus einem Beobachter und einem Zustandsregler. Als Beobachter wird ein Kalman-Bucy-Filter verwendet, der mit einem Zustandsregler, berechnet über die Lösung der Riccatingleichung, gepaart wird. Beim Reglerentwurf wurde besonderer Wert auf die Robustheit des Reglers gelegt. Diese muss auch bei Modellfehlern unter allen Umständen gesichert werden. Die derzeitigen Forschungsarbeiten auf diesem Teilgebiet analysieren die Eignung eines  $H_\infty$ -Reglers zur Torsionsschwingungsdämpfung.

## 2.2 Netzkomponenten zur Erzeugung der Dämpferleistung

Das Ausgangssignal der Dämpfungsregelung ist das Eingangssignal der Stromrichterregelung, die den verwendeten Stromrichter entsprechend steuert. Zur Erzeugung der Dämpferleistung sind prinzipiell mehrer Stromrichtervari-



**Bild 3** Sechspulsbrücke mit induktivem Energiespeicher

anten einsetzbar. Dabei richtet sich die Wahl immer auch nach dem verwendeten Energiespeichers.

### 2.2.1 Stromrichter mit induktivem Energiespeicher

Bei der Anwendung eines induktiven Energiespeichers empfiehlt sich der Einsatz einer Sechspulsbrücke. Diese wird parallel an die Stator клемmen der Maschine angeschlossen (Bild 3). Die Sechspulsbrücke gehört zur Klasse der netzgeführten Stromrichter und ist mit nicht abschaltbaren Thyristoren aufgebaut. Die Ausgangsgleichspannung  $u_{DC}(t)$  lässt sich über den Steuerwinkel  $\alpha$  gemäß

$$u_{DC}(t) = \frac{\sqrt{18}}{\pi} \cdot U_N \cdot \cos(\alpha(t)) = U_{DCi} \cdot \cos(\alpha(t)) \quad (5)$$

einstellen. Für die abgegebene bzw. aufgenommene Wirkleistung der Brücke erhält man demnach

$$p_{damp}(t) = i_{DC}(t) \cdot u_{DC}(t) \quad (6)$$

Abhängig davon, wie groß die Induktivität  $L$  bzw. der Gleichstrom  $i_{DC}$  gewählt wird, kann dieser als konstant angenommen werden. Somit ergibt sich für die Leistung

$$p_{damp}(t) = \hat{P}_{damp} \cdot \cos(\alpha(t)), \quad (7)$$

wobei  $\hat{P}$  lediglich eine Funktion der Nennspannung  $U_N$  sowie des konstanten Stromes  $I_{DC}$  ist. Durch eine geeignete Regelung des Steuerwinkels  $\alpha$  lässt sich nun die vorgegebene Dämpferleistung  $p_{damp\_soll}$  durch die Sechspulsbrücke

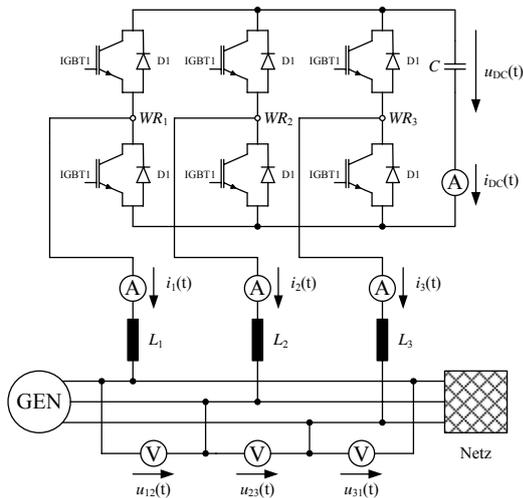
erzeugen. Dazu ist jedoch zu bemerken, dass Dämpferleistungen nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich erzeugt werden können. Grund dafür ist die Netzführung des Stromrichters. Es zeigt sich, dass maximal eine Aussteuerung bis zur Netzfrequenz möglich ist. Mit zunehmender Frequenz wird zusätzlich das Verhältnis zwischen gewünschter Dämpferleistung und der tatsächlichen Wirkleistung des Stromrichters, immer schlechter. Es ist daher festzustellen, dass Dämpferleistungen mit akzeptabler Qualität mit Frequenzen  $f_{damp}$  bis zur halben Netzfrequenz erzeugt werden können. Bei Einsatz eines höherpulsigen Stromrichters, z.B. einer Zwölfpulsbrückenschaltung, könnte der Frequenzbereich des Dämpfungssystems entsprechend erweitert, in diesem Beispiel verdoppelt werden. Allerdings würde dies das System deutlich komplizieren und verteuern. Darüber hinaus ist der Blindleistungsbedarf ein weiterer Nachteil. Um eine möglichst hohe Dynamik des Dämpfungssystems jederzeit gewährleisten zu können, müsste die Spule stets magnetisch geladen also stromführend ( $I_{DC}$ ) sein. In diesem Standby-Betrieb nimmt die Brücke stets erheblich Blindleistung auf und verursacht Wirkverluste im Stromrichter sowie in der Spule.

### 2.2.2 Stromrichter mit kapazitivem Energiespeicher

Bei der Wahl einer Kapazität als Energiespeicher ist der Einsatz der beschriebenen Sechspulsbrücke nicht möglich. Es bietet sich an auf die Grundstruktur eines STACOMS zurückzugreifen. Dieser wird in diesem Fall nicht zu Blindleistungsabgabe genutzt, sondern zu Wirkleistungsabgabe bzw. -aufnahme. In Bild 4 ist der prinzipielle Aufbau eines dreiphasigen selbstgeführten Wechselrichters mit kapazitivem Energiespeicher gezeigt. Der Wechselrichter wird über die Phasendrosseln  $L_1$  bis  $L_3$  parallel zu den Stator клемmen angeschlossen.

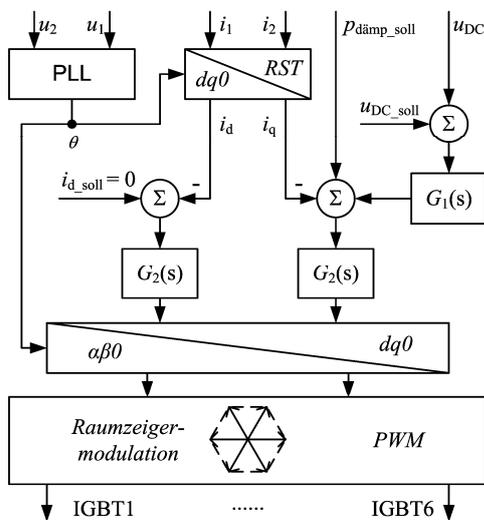
Zur Regelung der abgegebenen Dämpferleistung bietet sich eine Stromregelung der Ströme  $i_1(t)$  bis  $i_3(t)$  an. Werden diese phasensynchron zu den jeweiligen Phasenspannungen eingespeist, so erhält man eine reine Wirkleistungsabgabe am Kopplungspunkt. Da damit auch zum Zeitpunkt eines Spannungsmaximums der jeweiligen Phasenspannung ein Stromfluss vom Stromrichter (Leistungsabgabe) benötigt wird, ist es notwendig die Kondensatorspannung um ca. 30% über den Scheitelwert der Außenleiterspannung  $U_N \cdot \sqrt{2}$  zu erhöhen und zu entsprechend zu regeln.

Zur Ansteuerung eines selbstgeführten Wechselrichters wurden in der Vergangenheit verschiedenste Verfahren entwickelt. Für diesen Zweck bietet sich die Anwendung der Raumvektormodulation an. Bei diesem Verfahren ist es sinnvoll die komplette Regelung mittels der Park-Transformation in das dq0-System zu überführen. Eine Übersicht des Regelungssystems gibt dazu Abbildung 5. Den Netzwinkel  $\theta$ , der für die Park-Transformationen benötigt wird, erhält man mit Hilfe eines Phasenregelkreises (PLL), der auf die Generatorspannungen angewendet wird. Bei der Regelung reiner Wirkströme ergibt sich die d-Komponente des Stromes zu null.



**Bild 4** Aufbau des selbstgeführter Wechselrichters

Die q-Komponente spiegelt daher, in Abhängigkeit des Vorzeichens, die abgegebene bzw. aufgenommene Leistung wider und kann somit direkt an die Ausgangsgröße der Dämpfungsregelung gekoppelt werden. Die Spannungsregelung greift am selben Punkt in die Regelung ein. Nach einem Soll-Istwert-Vergleich und einem Regelglied  $G_1(s)$  gibt sie eine weitere Sollwirkleistung vor, die der Dämpfungsleistung überlagert wird. Für die eigentliche Stromregelung genügt der Einsatz eines PI-Regler  $G_2(s)$ , der in Abhängigkeit der Phasendrossel und der Impedanz-



**Bild 5** Schematischer Überblick der Stromrichterregelung

verhältnisse am Einspeisepunkt parametrisiert werden muss.

Der Vorteil dieses Stromrichterkonzeptes im Vergleich zur Schelpulsbrücke mit induktivem Energiespeicher ist vor

allem die hohe Bandbreite der Dämpfungsleistung die damit erzeugt werden kann. Des Weiteren erfolgt hier keine Blindleistungsaufnahme. Auch im Standby-Betrieb ist entstehende Verlustleistung deutlich geringer.

### 3 Experimentelles Versuchsfeld

Mit Hilfe von Computersimulationen wurde in der Vergangenheit die prinzipielle Funktion des Dämpfungssystems untersucht. Dabei wurden insbesondere verschiedene Stromrichterkonzepte und Regelansätze analysiert. Grundlage der Simulationen waren dabei stets in der Literatur veröffentlichte sogenannte Benchmark-Modelle. Um zukünftig das Dämpfungssystem realitätsnäher untersuchen und weiterentwickeln zu können, wurde mit dem Aufbau eines experimentellen Versuchsfeldes begonnen.

#### 3.1 Mechanischer Aufbau

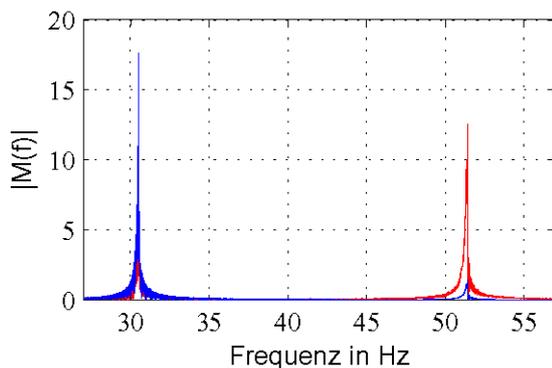
Der Modellturbosatz basiert dabei auf einem mechanischen Dreimassenschwinger. Die rotierenden Massen werden repräsentiert durch den Rotor des Synchrongenerators (SG, Bild 6, links) und den der Asynchronmaschine (AM, Bild 6, rechts) sowie einem Schwungrad (SR). Die Asynchronmaschine und das Schwungrad bilden in diesem System die Turbinen des Turbosatzes nach. Die mechanischen Abmaße, also die Trägheitsmomente und die Wellensteifigkeiten, wurden so dimensioniert, dass der Modellturbosatz ein ähnliches Schwingungsverhalten im Vergleich zu einem Kraftwerksturbosatz aufweist. Das System besitzt so Resonanzstellen bei Frequenzen von ca. 30 Hz und 52 Hz auf. Die Drehmomentmesswellen (Bild 6, Komponenten in blau) haben eine Messbereich von 0-1000 Nm, was ungefähr einem vierfachen des Nennmoments des Generators entspricht. Die einzelnen Komponenten des Wellenstranges sind mit sogenannten Balgkupplungen, die eine sehr hohe Torsionssteifigkeit aufweisen, verbunden. Die Gesamtmasse der Anlage, bestehend aus dem Maschinenbett und den Aufbauten, beträgt ca. 8000 kg.

#### 3.2 Elektrische Komponenten

Bei dem verwendeten Generator handelt es sich um eine 52 kVA Synchronmaschine mit eingebauter Erregermaschine und rotierenden Dioden. Diese kann sowohl netzparallel als auch in einem Inselnetz betrieben werden. Die Asynchronmaschine mit einer Leistung von 55 kW wird über einen Antriebsumrichter drehzahl- oder drehmomentgeregt angesteuert. Eine selbstentwickelte Synchronisationseinrichtung erlaubt die Zuschaltung des Generators ans Netz mit einem einstellbaren Phasenfehlin-



**Bild 6** Mechanischer Aufbau des experimentellen Versuchsfeldes



**Bild 7** Amplitudenspektrum des mechanischen Systems in rot  $M_{SR-AM}$  in blau  $M_{SG-SR}$

kel zur Generierung von kontrollierten Fehlsynchronisationen.

Die einzelnen elektrischen Komponenten können über Leistungsschütze modular zugeschaltet und umkonfiguriert werden. So können zusätzliche diskrete Impedanzen zur Nachbildung elektrischer Übertragungsleitungen eingefügt werden.

Die überlagerte Führung des Versuchstandes erfolgt mittels einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und eine PC-basierten Eingabeschnittstelle (WinCC). Unterlagerte, zumeist zeitkritische, Steuer- und Regelaufgaben übernehmen analoge und digitale Regler. Die Kommunikation erfolgt dabei über den Profibus und den CAN-Bus.

### 3.3 Dämpfungssystem

Aufgrund der zuvor genannten Vorteile des Stromrichterkonzeptes mit kapazitivem Energiespeicher wurde am Versuchstand diese Variante umgesetzt. Als Wechselrichter wird ein Kompletmodul der Firma Semikron (Skiip292GD170) eingesetzt, bei dem bereits Treiber- und Schutzeinrichtungen implementiert sind. Mit diesem Umrichter ist eine Dämpfungsleistungsabgabe bei einer maximalen Schaltfrequenz der IGBTs ( $f = 20$  kHz) von 10 kW (Dauerleistung) bzw. 50 kW (10s - Kurzzeitleistung) möglich, der somit den gesamten Leistungsbereich der Synchronmaschine abdeckt. Die Regelung des Stromrichters sowie die eigentliche Dämpfungsregelung wurden auf einem digitalen Signalprozessor (DSP) implementiert.

### 3.4 Aktueller Stand und Ziele

Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Konstruktion und Fertigung des mechanischen Aufbaus ist dieser soweit abgeschlossen. Derzeit erfolgt eine komplette Identifizierung des mechanischen Systemverhaltens, um damit die Dämpfungsregelung aber auch begleitende Computersimulationsmodelle parametrisieren zu können. Die Identifizierung erfolgt dabei durch eine Störmomentaufschaltung, die sowohl von der Generatorseite (über das Dämpfungssystem) als auch über die Asynchronmaschine (Antriebsumrichterregelung) erfolgen kann. Bild 7 zeigt dazu das gemessene Spektrum des Torsionsmoments ( $M_{SR-AM}$  und  $M_{SG-SR}$ ) an den beiden Wellen. Es zeigt deutlich die unterschiedlich starke Gewichtung der beiden Resonanzfre-

quenzen in den beiden Wellen. Der eigentliche Dämpfungsumrichter bzw. dessen Regelung arbeitet derzeit schon zufriedenstellend. Sobald alle Einzelkomponenten des Versuchstandes implementiert sind kann mit dem eigentlichen Experimentierbetrieb begonnen werden. Dazu ist insbesondere geplant reale Anregungsszenarien nachzubilden und die Leistungsfähigkeit des Dämpfungssystems daran zu verifizieren. Darüber hinaus soll weitere Regelansätze um Versuchsfeld getestet und überprüft werden.

## 4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigte sich mit der Torsionsschwingungsproblematik in Kraftwerksturbosätzen. Torsionsschwingungen werden hauptsächlich durch Störfälle im elektrischen Energienetz ausgelöst und haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer des Turbosatzes. Bisher werden Torsionsschwingungen lediglich durch eine robuste mechanische Konstruktion begegnet. Hier wurde nun ein System zur aktiven Dämpfung von Torsionsschwingungen vorgestellt. Als Stellgröße zur Schwingungsdämpfung dient das Generatormoment. Dieses wird wiederum durch eine leistungselektronische Netzkomponente, die parallel am Knotenpunkt Netz/Generator angreift, über die Wirkleistung des Generators beeinflusst. Prinzipiell sind dazu verschiedene Stromrichtervarianten einsetzbar, deren Wahl sich hauptsächlich nach der Art des benutzten Energiespeichers richtet. Das Dämpfungssystem hat seine grundsätzliche Einsatzfähigkeit in zahlreichen simulativen Untersuchungen auf Basis von Computermodellen bewiesen. Zukünftig soll ein experimentelles Versuchsfeld eine weitere realitätsnahe Analyse und Weiterentwicklung ermöglichen.

## 5 Literatur

- [1] Humer, M.: Erfassung und Bewertung von Torsionsschwingungen in Wellsträngen von Kraftwerksturbosätzen. dissertation.de, 2003
- [2] Kulig, S.: Über die Auswirkungen von Störfällen in Energieübertragungsnetzen auf Kraftwerksturbosätze: Habilitation an der FU Hagen, 1987
- [3] Joswig, F. Kulig, S. Preceptions about new kinds of subsynchronous resonances: in Proc. 4th IPSPT, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 228-233, 2001
- [4] Sihler, C. Miri, A. M. Harada, A. and ASDEX Upgrade Team: Damping of Torsional Resonances in Generator Shafts Using a Feedback Controlled Buffer Storage of Magnetic Energy: Proc. 5th IPST, New Orleans, LA 2003
- [5] Miri, A.M. Sihler, C. Zöller, T. Suppression of Subsynchronous Resonance by a Parallel Connected Damper Circuit: Proc. 6th IPST, Paper IPST05-22, 2005
- [6] IEEE, Subsynchronous Resonance Working Group: Countermeasure to subsynchronous resonance problems: IEEE, 1980