



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 012 828 A1** 2006.10.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 012 828.1**

(22) Anmeldetag: **21.03.2006**

(43) Offenlegungstag: **05.10.2006**

(51) Int Cl.⁸: **H02P 9/48** (2006.01)
H02M 5/451 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
00571/05 **30.03.2005** **CH**

(71) Anmelder:
ALSTOM Technology Ltd., Baden, CH

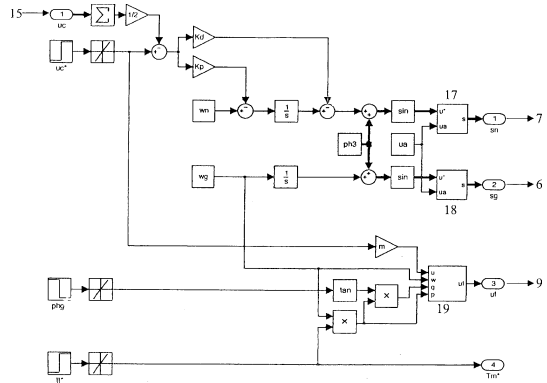
(74) Vertreter:
Rösler, U., Dipl.-Phys.Univ., Pat.-Anw., 81241 München

(72) Erfinder:
Veenstra, Martin, Lausanne, CH

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Steuerung eines Frequenzkonverters**

(57) Zusammenfassung: Beschrieben wird ein Verfahren zur Steuerung eines statischen Frequenzkonverters (5), bei welchem eine in einem Generator (3) erzeugte Wechselspannung (U_g) mit einer ersten Frequenz (ω_g) zunächst in einem geschalteten Gleichrichter (6) gleichgerichtet wird, und die so in einem Zwischenkreis (8) vorhandene Gleichspannung in einem geschalteten Wechselrichter (7) in Wechselspannung (U_n) mit einer Netzfrequenz (ω_n) gewandelt wird, wobei es sich beim Generator (3) um einen Generator mit wenigstens einer Erregerspule handelt, und wobei zur Steuerung der in das Netz (4) eingespeisten Leistung Mittel angeordnet sind, mit welchen wenigstens die Stärke des von der wenigstens einen Erregerspule erzeugten Erregerfeldes und ggf. zusätzlich die Phasenlage zwischen Frequenzkonverterspannung und Generator- respektive Netzspannung (U_n) geregelt wird. Eine einfache und stabile Steuerung des Frequenzkonverters ist möglich, indem die generatorseitige Wechselspannung (U_r) des Gleichrichters (6) in ihrer Frequenz (ω_r) auf einen im wesentlichen konstanten Wert der ersten Frequenz (ω_g) geregelt wird, und die Steuerung im Wechselrichter (7) auf Basis des gemessenen Wertes der Gleichspannung (u_c) im Zwischenkreis (8) geführt wird.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung eines statischen Frequenzkonverters, bei welchem in einem Generator erzeugte Wechselfspannung mit einer ersten Frequenz zunächst in einem geschalteten Gleichrichter gleichgerichtet wird, und die so in einem Zwischenkreis vorhandene Gleichspannung in einem geschalteten Wechselrichter in Wechselfspannung mit einer Netzfrequenz gewandelt wird, wobei es sich beim Generator um einen Generator mit wenigstens einer Erregerspule handelt.

[0002] Grosse Kraftwerke für die Erzeugung von Elektrizität umfassen normalerweise einen Synchrongenerator, welcher direkt mit dem elektrischen Netz verbunden ist. Der Generator wird durch eine Turbine angetrieben, wobei es sich dabei um eine Gasturbine, eine Dampfturbine oder um eine Wasserturbine handeln kann.

[0003] Infolge der Tatsache, dass der Generator direkt mit dem Netz verbunden ist, ist die Geschwindigkeit des Generators vorgegeben und konstant. Problematisch an dieser Tatsache ist, dass die optimale Geschwindigkeit der Turbine normalerweise nicht die gleiche ist wie jene des Generators, und entsprechend wird häufig zwischen Turbine und Generator ein mechanisches Getriebe angeordnet. Dies gilt insbesondere für Gasturbinen, deren optimale Betriebsgeschwindigkeit wesentlich höher ist als die Netzfrequenz. Im Falle von Wasserturbinen mit niedriger Geschwindigkeit kann eine wenigstens teilweise Anpassung durch die Verwendung eines Generators mit der entsprechenden Anzahl von Polen erreicht werden.

[0004] Ein solches Getriebe ist empfindlich und teuer in der Herstellung, wenn grosse Leistungen übersetzt werden sollen, und erfordert zudem aussergewöhnliche Unterhaltsaufwendungen. Ausserdem kann in den höchsten Leistungsbereichen kein Getriebe verwendet werden, weshalb die Auslegung der Turbine und deren Betriebsweise ausserhalb des Optimums gewählt werden muss. Weiterhin ist die optimale Geschwindigkeit der Turbine abhängig von der anliegenden Last, und die optimale Effizienz bei unterschiedlicher Last kann nur gewährleistet werden, wenn die Turbine bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben werden kann. Unglücklicherweise ist dies bei einer starren Anordnung nicht möglich.

Stand der Technik

[0005] Um diese Probleme zu umgehen, beschreibt beispielsweise die DE 103 30 473 A1 die Möglichkeit, die starre Verbindung unter Verwendung eines Getriebes durch eine flexible elektronische Lösung zu ersetzen. Die Turbine wird direkt an den Synchrongenerator angekoppelt, dieser ist aber über einen Frequenzkonverter mit dem Netz verbunden (vergleiche **Fig. 1** in DE 103 30 473 A1). Um Harmonische zwischen Generator und dem Netz effizient zu entkoppeln, wird ein vollständig geregelter Spannungszwischenkreis-Konverter (voltage source converter) mit einem gesteuerten Gleichrichter (maschinenseitiger Konverter), einem kapazitiven Zwischenkreis und einem gesteuerten Wechselrichter (netzseitiger Konverter) verwendet.

[0006] Um exzessive Schaltverluste zu vermeiden, wird der Konverter im Rechteckmodus betrieben, wobei die Schaltfrequenz der Grundfrequenz entspricht. In diesem Fall kann nur die Frequenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung variiert werden, nicht aber deren Amplitude (deshalb der Name Frequenzkonverter). Die Anpassung der Amplitude der Spannung kann durch die Erregung des Generators erreicht werden, wie dies bei der klassischen Anordnung mit einer direkten Verbindung zwischen Generator und Netz üblich ist.

[0007] Die erzeugte Wirkleistung und Blindleistung können durch die Erregung des Generators kontrolliert werden, genauso wie die Phasenverschiebung zwischen dem Generator und den Spannungen des Gleichrichters sowie zwischen dem Wechselrichter und den Netzspannungen. Obwohl in der DE 103 30 473 A1 diese grundsätzlichen Prinzipien der Betriebsweise eines solchen Konverters beschrieben werden, ist in diesem Dokument keine spezifische Strategie oder Struktur für die Ansteuerung des Konverters angegeben, da unterschiedliche Lösungen möglich sind.

Aufgabenstellung

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0008] Der Erfindung liegt demnach die Aufgabe zugrunde, eine stabile und einfache Möglichkeit der Steuerung eines statischen Frequenzkonverters zur Verfügung zu stellen. Dies im Zusammenhang mit einem Frequenzkonverter, bei welchem eine in einem Generator erzeugte Wechselfspannung mit einer ersten Frequenz

zunächst in einem geschalteten Gleichrichter gleichgerichtet wird, und die so in einem Zwischenkreis vorhandene Gleichspannung in einem geschalteten Wechselrichter in Wechselspannung mit einer Netzfrequenz gewandelt wird. Dabei weist der Generator wenigstens eine Erregerspule auf, welche geregelt angesteuert werden kann. Dies bedeutet, dass zur Steuerung der in das Netz eingespeisten Leistung Mittel angeordnet sind, mit welchen wenigstens die Stärke des von der wenigstens einen Erregerspule erzeugten Erregerfeldes und gegebenenfalls zusätzlich die Phasenlage zwischen Frequenzkonverterspannung und Generator- respektive Netzspannung geregelt wird.

[0009] Die Lösung dieser Aufgabe wird dadurch erreicht, dass die Steuerung des Frequenzkonverters im Gleichrichter derart geführt wird, dass die generatorseitige Wechselspannung des Gleichrichters in ihrer Frequenz auf einen im wesentlichen konstanten Wert der ersten Frequenz geregelt wird, und die Steuerung im Wechselrichter auf Basis eines gemessenen Wertes der Gleichspannung im Zwischenkreis geführt wird.

[0010] Gemäss der Erfindung wird somit der Frequenzkonverter gewissermassen zur Seite des Generators hin auf fixierter Frequenz gehalten, und die Regelung der Frequenz ausschliesslich zur Seite des Netzes vorgesehen. Weiter unten im Detail erläuterte Symmetrieüberlegungen zeigen, dass eine derartige Steuerung überraschend einfach möglich ist, indem als Regelparameter die Gleichspannung im Zwischenkreis verwendet wird, bevorzugt die im Zwischenkreis über den Kapazitäten anliegenden Spannungen.

[0011] Selbstverständlich kann die Frequenz der Turbine und/oder des Generators beispielsweise für Teillast eingestellt werden, um nach wie vor im optimalen Betriebsbereich fahren zu können. In dieser Situation steht für die Einstellung einer anderen Frequenz viel Zeit zur Verfügung. Dementsprechend kann die Steuerung des Gleichrichters bei einer solchen Umstellung der Frequenz der Turbine und/oder des Generators quasi-statisch (das heisst dynamisch, aber unter derart langsamen Veränderungen des Zustandes, dass man nahe beim stationären Zustand bleibt) angepasst werden.

[0012] Gemäss einer ersten Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung wird die Steuerung im Wechselrichter derart geführt, dass die netzseitige Frequenz des Wechselrichters nach folgender Funktion geregelt wird

$$\omega_i = \omega_n + \Delta\omega$$

wobei die Funktion $\Delta\omega$, die Frequenzdifferenz zwischen der Frequenz des Wechselrichters ω_i und des Netzes ω_n , gegeben ist durch

$$\Delta\omega \triangleq K_P(u_C - u_C^*) \quad (20)$$

wobei K_P eine vorgegebene, proportionale Kontrollverstärkung ist, und wobei u_C^* ein Referenzwert der Kapazitätsspannung ist, welcher in Abhängigkeit der gewünschten Blindleistung, ggf. dynamisch, gewählt wird. Der Referenzwert u_C^* kann dabei nach der unten angegebenen Formel (41) i.V.m. Formel (3) eingestellt werden, wobei in Formel (3) \hat{u}_1 durch U_i nach Formel (41) ersetzt wird.

[0013] Typischerweise ist somit im Gleichgewichtszustand der Wert von $\Delta\omega$ gleich null, da die Frequenz des Wechselrichters und des Netzes in diesem Zustand gleich sein sollte. Dabei kann die Funktion $\Delta\omega$, bevorzugt unter zusätzlicher Berücksichtigung der Dämpfung, mit einer vorgegebenen differentiellen Kontrollverstärkung K_D zur Steuerung im Wechselrichter verwendet werden, dies konkret nach der Formel:

$$\Delta\omega' \triangleq K_P(u_C - u_C^*) + K_D \frac{d}{dt}(u_C - u_C^*) = \Delta\omega + \frac{K_D}{K_P} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (21).$$

[0014] Eine weitere Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stärke des von der wenigstens einen Erregerspule erzeugten Erregerfeldes und dessen Phasenlage über eine Erregerspannung eingestellt wird, welche in Funktion der Generatorspannung, der Generatorfrequenz, der Wirkleistung und der Blindleistung des Generators gesteuert wird. Dies geschieht bevorzugt nach einer in [Fig. 8](#) visualisierten und aus den Formeln (25)–(38) ableitbaren Gleichung.

[0015] Gemäss einer weiteren Ausführungsform handelt es sich beim Frequenzkonverter um einen Dreistufenrichter, wobei zur Regelung bevorzugt die Gleichspannung im Dreiniveau-Zwischenkreis als Mittelwert der über den beiden Kapazitäten zwischen den beiden Niveaus + und 0 sowie den beiden Niveaus 0 und – anliegenden Spannungen ermittelt wird.

[0016] In einem weiteren Ausführungsbeispiel werden der gesteuerte Gleichrichter und/oder der gesteuerte Wechselrichter in Grundfrequenztaktung betrieben, wobei es sich beim gesteuerten Gleichrichter bevorzugt um einen Drei-Niveau-Gleichrichter und beim gesteuerten Wechselrichter bevorzugt um einen Drei-Niveau-Wechselrichter handelt, welche beide in Grundfrequenztaktung betrieben werden.

[0017] Typischerweise ist der statische Frequenzkonverter in einer Bauweise ausgebildet, welche geschaltete Thyristoren wie beispielsweise GTO's, IGBT's, MOSFET's, oder IGCT's, umfasst.

[0018] Eine weitere Ausführungsform ist dadurch gekennzeichnet, dass eine zentrale Steuerung angeordnet ist, welche über die Messung von Spannung und/oder Strom vor und/oder hinter dem statischen Frequenzkonverter eine Anpassung der ins Netz eingespeisten Amplitude der Wechselspannung durch eine entsprechende Ansteuerung der Mittel zur Steuerung der Stärke des von der Erregerspule erzeugten Erregerfeldes vornimmt.

[0019] Wie bereits erwähnt, umfasst die vorliegende Erfindung zudem eine Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens, wie es oben beschrieben wurde. Die Vorrichtung ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass ein Generator mit wenigstens einer regelbaren Erregerspule, einem statischen Frequenzkonverter umfassend wenigstens einen gesteuerten Gleichrichter in Grundfrequenztaktung und wenigstens einen gesteuerten Wechselrichter in Grundfrequenztaktung, sowie wenigstens einer Steuerung zur Regelung dieser Elemente ausgestattet ist. Zusätzlich sind Mittel zur Messung von Werten der Gleichspannung im Zwischenkreis angeordnet, wobei diese gemessenen Werte zur Steuerung im Wechselrichter verwendet werden. Die Ansteuerung der regelbaren Erregerspule weist Mittel zur Anpassung der Amplitude der zur Erregung verwendeten Wechselspannung an die Erfordernisse des Netzes auf.

[0020] Weitere bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen beschrieben.

Ausführungsbeispiel

KURZE ERLÄUTERUNG DER FIGUREN

[0021] Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigen:

[0022] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines Kraftwerkes unter Verwendung einer Getriebeanordnung;

[0023] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung eines Kraftwerkes unter Verwendung eines statischen Frequenzkonverters;

[0024] [Fig. 3](#) (a) ein Schaltbild und (b) eine Vektordarstellung von zwei Spannungsquellen mit den Spannungen U und E , die über eine Induktivität verbunden sind;

[0025] [Fig. 4](#) die Ausgangsspannungswellenform und die fundamentale Komponente eines im Rechteckmodus betriebenen Dreistufenumrichters;

[0026] [Fig. 5](#) ein schematisches Schaltbild des Kraftwerkes;

[0027] [Fig. 6](#) eine Schemadarstellung der Regelung nach der Erfindung;

[0028] [Fig. 7](#) einen Modulator, wie er in [Fig. 6](#) schematisch dargestellt ist, im Detail;

[0029] [Fig. 8](#) schematische Darstellung der Implementierung der gesteuerten Erregerspannung;

[0030] [Fig. 9](#) Resultate der Simulation: mechanischer Anteil des Generators;

[0031] [Fig. 10](#) Resultate der Simulation: elektrischer Anteil des Generators;

[0032] [Fig. 11](#) Resultate der Simulation: Netz; und

[0033] [Fig. 12](#) Resultate der Simulation: Wellenformen von Spannung und Strom auf der Seite des Generators und auf der Seite des Netzes.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

[0034] Wie bereits erläutert, wird in konventionellen Kraftwerken, wie beispielsweise in [Fig. 1](#) dargestellt, eine Turbine **1** mit einem Generator **3** über ein auf einer gemeinsamen Welle angeordnetes Getriebe **2** direkt verbunden. Der Generator ist anschliessend direkt oder über einen Transformator mit dem Netz **4** verbunden. Die Nachteile einer solchen Lösung sind bereits oben erläutert worden.

[0035] Im Gegensatz dazu verwendet die hier vorgeschlagene Lösung einen Aufbau, wie er in [Fig. 2](#) dargestellt ist. In diesem Fall ist die Turbine **1** über die Welle direkt und starr mit dem Generator **3** verbunden. Die vom Generator **3** erzeugte Wechselspannung (typischerweise drei Phasen) wird anschliessend in einem Frequenzkonverter **5** gewandelt und auf die Frequenz des Netzes **4** angepasst. Der Frequenzkonverter **5** besteht dabei aus einem Gleichrichter **6** (rectifier), welcher aus dem vom Generator zur Verfügung gestellten Wechselstrom einen Gleichstrom erzeugt. Dies erfolgt mittels Leistungselektronik, das heisst auf Basis von geschalteten Thyristoren, wie beispielsweise GTO's, IGBT's, MOSFET's, oder IGCT's.

[0036] Die im nachgeschalteten Zwischenkreis **8** anliegende Gleichspannung (zwischen den beiden Niveaus des Zwischenkreises ist dabei jeweils eine Kapazität C angeordnet) wird in einem nächsten Schritt in einem Wechselrichter **7** wiederum in Wechselspannung gewandelt, und zwar mit einer an das Netz angepassten Frequenz.

[0037] Die Eigenschaften und das Verhalten von elektrischen Maschinen werden ausführlich in der Literatur behandelt, so beispielsweise in C.-M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, 1st Ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998, oder in J. Chatelain, Machines electriques in Traites d'Electricite, 1st Ed. Lausanne (CH): Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1983, Vol. X. In der Folge soll nur das grundlegende Verhalten in vereinfachter Form und unter Vernachlässigung von Verlusten betrachtet werden, da dieses genügt, um die Prinzipien der vorgeschlagenen Strategie der Regelung eines Frequenzkonverters zu erläutern. Entsprechend wird vorliegend von Maschinen ausgegangen, in welchen eine vollständige Konversion von mechanischer Energie in elektrische Energie stattfindet, und die Leistungselektronik eine verlustfreie Umwandlung von Gleichstromenergie zu Wechselstromenergie (und umgekehrt) vornimmt.

[0038] Elektrische Maschinen und das Netz sind in der Hauptsache induktiv. Entsprechend kann die Wechselwirkung zwischen Maschine, Spannungszwischenkreis-Konverter (respektive Frequenzkonverter) und dem Netz durch zwei Spannungsquellen mit den Spannungen E und U modelliert werden, welche über eine Induktivität L miteinander verbunden sind. Diese Situation ist schematisch in [Fig. 3a](#)) dargestellt. Das in [Fig. 3b](#)) dargestellte Vektordiagramm zeigt die Beziehungen zwischen den beiden Spannungen E und U sowie dem Strom I, welcher durch die Induktivität L fliesst, dies für sinusförmige Signale mit einer Kreisfrequenz ω . Für einen Kreis mit einer einzigen Phase werden folgende Ausdrücke für die Wirkleistung P und die Blindleistung Q, wie sie bei der Spannungsquelle auftreten, erhalten:

$$P = UI \cos \varphi = \frac{UE \sin \delta}{\omega L} \quad (1)$$

$$Q = UI \sin \varphi = \frac{U(E \cos \delta - U)}{\omega L} \quad (2)$$

[0039] Das Vektordiagramm zeigt auch, wie der Vektor der Spannung E verändert werden muss, um die Wirkleistung P und/oder die Blindleistung Q zu verändern. Für kleine Werte des Verschiebungswinkels δ ist die Wirkleistung P im wesentlichen durch den Winkel δ bestimmt, während die Blindleistung Q hauptsächlich durch die Amplitude von E bestimmt wird.

[0040] In [Fig. 4](#) ist die von einem im Rechteckmodus betriebenen Dreistufenrichter erzeugte Wellenform der Ausgangsspannung dargestellt. Die Amplitude ist gleich der Spannung u_c über der Kapazität im Zwischenkreis. Die Amplitude \hat{u}_1 der Grundwelle u_1 ist proportional zur Spannung über der Kapazität, mit einem Modulationsindex m, welcher vom Kommutierungswinkel α abhängt:

$$\hat{u}_1 = m u_c, \quad (3)$$

$$m = 4/\pi \sin \alpha. \quad (4)$$

[0041] Ein Kommutierungsniveau u_α kann definiert werden, welches gleich der Grundwelle an den Momenten der Kommutierung ist:

$$U_\alpha = \hat{u}_1 \cos\alpha \quad (5)$$

[0042] Für den Kommutierungswinkel α sollte ein optimaler Werte in Bezug auf die erzeugten Harmonischen gewählt werden. Minimale Harmonische werden erhalten um einen Wert von

$$\alpha \approx \frac{5}{12}\pi = 75^\circ. \quad (6)$$

[0043] Dieses Minimum ist ziemlich flach, entsprechend geben Variationen im Bereich von $\pm 5^\circ$ immer noch eine gute Leistung.

[0044] Unter stationären Bedingungen des Betriebs ist die Wirkleistung P vollständig durch das mechanische Drehmoment T_m , welches von der Turbine geliefert wird, bestimmt. Das Verhalten wird durch die dynamische Bewegungsgleichung

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e, \quad (7)$$

bestimmt, wobei J das Trägheitsmoment, ω_m die mechanische Kreisfrequenz des Generators, und T_e das elektromagnetische Drehmoment sind. Die Beziehungen zwischen Leistung und Drehmoment sind wie folgt gegeben

$$P_m = \omega_m T_m, \quad (8)$$

$$P_e = \omega_m T_e. \quad (9),$$

wobei P_m die mechanische Leistung und P_e die elektromagnetische Leistung sind.

[0045] In einer zylindrischen Synchronmaschine kann das elektromagnetische Drehmoment im Gleichgewicht ausgedrückt werden als

$$T_e \approx \frac{3}{\omega_m} \frac{UE}{X_d} \sin \delta = T_k \sin \delta, \quad (10)$$

wobei X_d die synchrone Reaktanz der d-Achse ist, T_k das (von der Erregung abhängige) Kippmoment, und δ der Lastwinkel ist, welcher dem oben genannten Verschiebungswinkel zwischen Rotor und Netz entspricht. Die Blindleistung Q wird durch die Erregung bestimmt, hängt aber auch von der Wirkleistung P ab.

[0046] Das dynamische Verhalten der Maschine kann beschrieben werden als "Spannung hinter der transienten Reaktanz" mit einem Dämpfungsterm. Für kleine Werte der Variation der Geschwindigkeit ist das dämpfende Drehmoment näherungsweise proportional zur Geschwindigkeit, und das resultierende elektromagnetische Drehmoment kann angenähert werden als

$$T_e \approx \frac{3}{\omega_m} \frac{U \cdot E'}{X'_d} \sin \delta + D \Delta\omega = T'_k \sin \delta + D \Delta\omega \quad (11),$$

wobei X'_d die transiente Reaktanz der d-Achse ist, E' die entsprechende Spannung der Erregung, T'_k das dynamische Kippmoment und D der Dämpfungskoeffizient.

[0047] Verwendet man nun die Differenz der Frequenz von Rotor und Netz unter Berücksichtigung der Anzahl p von Polpaaren gemäss

$$\Delta\omega = p\omega_m - \omega_n \quad (12)$$

so kann der Lastwinkel oder Verschiebungswinkel δ ausgedrückt werden als

$$\delta = \int \Delta\omega dt \quad (13).$$

[0048] Die dynamische Bewegungsgleichung (7) kann nun geschrieben werden als

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + T'_k \sin \delta = T_m \quad (14).$$

[0049] Dieses Resultat ist bekannt als "Schwingungsgleichung" (swing equation).

[0050] Wendet man dieses Resultat nun auf einen Aufbau gemäss [Fig. 2](#) an, so sind folgende zusätzlichen Überlegungen erforderlich: im Aufbau gemäss [Fig. 2](#) ist ein Frequenzkonverter **5** zwischen den Generator **3** und das Netz **4** geschaltet. Infolge der Spannungszwischenkreis-Charakteristik des vorgeschlagenen Konverters **5** kann seine Ankopplung an den als Synchrongenerator ausgebildeten Generator **3** sowie jene an das Netz **4** gleichermaßen entsprechend [Fig. 3](#) dargestellt werden.

[0051] Im ersten Fall wirkt der Gleichrichter **6** gewissermaßen als Netz für den Generator. Wird der Gleichrichter bei einer konstanten Frequenz ω_r geregelt, so resultiert die gleiche Maschinendynamik und -betriebsweise wie oben erläutert. Die Frequenz des Gleichrichters kann aber in einer quasi-stationären Weise angepasst werden, um eine optimale Betriebsweise von Turbine und Generator zu erlauben. Auf der Wechselstromseite, das heisst zum Generator, erzeugt der Gleichrichter **6** eine Spannung, deren Wert U_r proportional ist zur Spannung u_C über der Kapazität C im Zwischenkreis **8**. Zur Gleichstromseite liefert der Gleichrichter einen Strom i_r , welcher der gewandelten Leistung P_r

$$P_r = U_C i_r = P_e \quad (15)$$

entspricht, welche der elektromagnetischen Leistung P_e , welche vom Generator zur Verfügung gestellt wird, entspricht.

[0052] Im zweiten Fall entspricht die Spannungsquelle E der Spannung des Wechselrichters **7** auf seiner Wechselstromseite. Seine Frequenz ω_i auf der Wechselstromseite kann vollständig geregelt werden, und die Grösse der Spannung U_i ist proportional zur Spannung u_C über der Kapazität im Zwischenkreis **8**. Die Spannungsquelle U entspricht dem Netz, dessen Spannung U_n sowie dessen Frequenz ω_n normalerweise fest vorgegeben sind. Die Induktivität L wird durch den Transformator **16** sowie Induktivitäten im Netz und gegebenenfalls zusätzliche Induktivitäten von Filtern gebildet.

[0053] Auf der Gleichstromseite zieht der Wechselrichter einen Strom i_i , welcher der gewandelten Leistung P_i

$$P_i = u_C i_i = 3 \frac{U_n U_i \sin \delta}{\omega_n L} \quad (16)$$

entspricht, welche an das Netz **4** abgegeben wird. Im Ausdruck für diesen Strom i_i

$$i_i = \frac{3}{u_C} \frac{U_n U_i}{\omega_n L} \sin \delta = I_k \sin \delta. \quad (17)$$

steht I_k für einen maximalen oder Durchbruchstrom.

[0054] Der Unterschied zwischen den Strömen (oder der Leistung) von Gleichrichter und Wechselrichter fliesst durch die Kapazität C im Zwischenkreis **8** und lädt ihn auf gemäss

$$C \frac{du_C}{dt} = i_r - i_i \quad (18).$$

[0055] Dieses Verhalten gemäss Formel (18) zusammen mit den Formeln (15), (16) und (17) hat die gleiche Form wie jenes, welches gemäss Formel (7), (8), (9) und (10) die Bewegung des Generators beschreibt. Entsprechend existiert eine Dualität zwischen der Spannung über der Kapazität C und der Frequenz des Generators **3**, zwischen dem Strom im Zwischenkreis **8** und dem Drehmoment, sowie zwischen Kapazität C und Trägheitsmoment.

[0056] Um ein solches System nun wie ein konventionelles System erscheinen zu lassen, kann eine neue

Strategie der Regelung verwendet werden, welche dem Frequenzkonverter ähnliche Eigenschaften verleiht wie einem Synchrongenerator. Folgt man der erwähnten Dualität, so kann dies erreicht werden, indem die Frequenzdifferenz $\Delta\omega$, welche definiert ist als

$$\Delta\omega = \omega_i - \omega_n \quad (19)$$

proportional zum Fehler respektive zu Abweichung der Spannung über der Kapazität C gesetzt wird, dies gemäss

$$\Delta\omega \triangleq K_P(u_C - u_C^*) \quad (20)$$

[0057] Dabei ist u_C^* ein Referenzwert für die Spannung über der Kapazität C.

[0058] Der Referenzwert u_C^* ist letzten Endes aus der vom Betreiber des Kraftwerks gewünschten Blindleistung abzuleiten, und kann auch dynamisch eingestellt werden. Zur Ermittlung von u_C^* kann beispielsweise folgende Formel, welche auf der Formel (3) in Kombination mit Formel (4) beruht, verwendet werden

$$u_C^* = U_i/m = \pi U_i/(4 \sin\alpha) \quad (20a)$$

[0059] Dabei kann als Kommutierungswinkel α ein Wert verwendet werden, welcher in Bezug auf die Harmonischen optimiert ist (vgl. Formel 6). Zur Bestimmung der Wechselspannung U_i des Wechselrichters 7 kann die weiter unten diskutierte Formel (41) eingesetzt werden, so dass dann der Referenzwert u_C^* als Funktion von α , U_n , ω_n , L , Q_n und P_n formuliert ist. Die Werte der Wechselspannung U_n des Netzes sowie der Kreisfrequenz ω_n des Netzes werden dabei vom Netz vorgegeben und können nicht frei gewählt werden. Die Blindleistung Q_n und die Wirkleistung P_n des Netzes können vom Kraftwerksbetreiber eingestellt werden, wobei insbesondere P_n von Netz- und Transformatorinduktivität (wie L), sowie vom Turbinendrehmoment beeinflusst ist. Ein im Prinzip gewünschter Zielwert von u_C^* wird also zunächst fix vorgegeben.

[0060] K_P ist eine proportionale Kontrollverstärkung und wird ebenfalls fix vorgegeben.

[0061] Um zusätzlich das System etwas zu dämpfen, kann ein entsprechender Term mit einer differentiellen Kontrollverstärkung K_D hinzugefügt werden:

$$\Delta\omega' \triangleq K_P(u_C - u_C^*) + K_D \frac{d}{dt}(u_C - u_C^*) = \Delta\omega + \frac{K_D}{K_P} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (21).$$

[0062] Auch der Wert von K_D wird fix vorgegeben, und die Werte für K_P und K_D werden derart gewählt, dass das System schnell reagiert, nach Übergängen keine starken Schwingungen zeigt und möglichst wenig Harmonische aufweist.

[0063] Der Ausdruck für den Verschiebungswinkel δ' kann nun geschrieben werden als

$$\delta' = \int \Delta\omega' dt = \int \Delta\omega dt + \frac{K_D}{K_P} \Delta\omega = \delta + \frac{K_D}{K_P} \frac{d\delta}{dt} \quad (22).$$

[0064] Für kleine Werte der Dämpfung K_D kann der Strom im Zwischenkreis gemäss Formel (17) angenähert werden durch

$$i_i = I_k \sin \delta' \approx I_k \left(\sin \delta + \cos \delta \frac{K_D}{K_P} \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (23).$$

[0065] Unter Verwendung dieser Gleichungen erhält man für das Verhalten gemäss Formel (18) im Zwischenkreis folgenden Ausdruck:

$$\frac{C}{K_P} \frac{d^2\delta}{dt^2} + I_k \cos \delta \frac{K_D}{K_P} \frac{d\delta}{dt} + I_k \sin \delta = i_r \quad (24)$$

was ein Resultat ist ähnlich dem der Schwingungsgleichungen des Generators gemäss Formel (14) ist:

[0066] Um die Regelung vorzunehmen, wird die Formel (20), respektive unter Berücksichtigung der Dämpfung die Formel (21), aufgelöst als

$$\omega_i = \omega_n + \Delta\omega$$

und der Wechselrichter **7** derart angesteuert, dass er eine Frequenz ω_i zum Netz zeigt. Der Gleichrichter **6** wird, wie oben erläutert, auf der festen Frequenz ω_i eingestellt.

[0067] Die Regelung soll nun an Hand der [Fig. 5–Fig. 8](#) erläutert werden.

[0068] In [Fig. 5](#) ist der elektrische Schaltkreis dargestellt, welcher als Basis für die nachfolgenden Überlegungen dienen soll. Dargestellt ist ein Generator **3**, dessen Erregerspannung über eine Erregerspeisung **9** eingestellt wird. Die Erregerspeisung **9** stellt eine Erregerspannung U_f sowie einen Erregerstrom i_f in geregelter Weise zur Verfügung. Der einzustellende Eingangswert der Erregerspannung U_f wird weiter unten erläutert werden.

[0069] Auf den Generator wirkt das mechanische Drehmoment T_m der Turbine, was zur Kreisfrequenz ω_m (in [Fig. 5](#) ω_m) des Generators **3**, zur Winkel-Position θ_{tm} im Rotor (Phase), zum elektromagnetischen Drehmoment T_e und zum Magnetfluss Y_{dq} führt.

[0070] Der Generator **3** übergibt die erzeugte elektrische Energie in Form von drei Phasen. Eine Messvorrichtung **10** stellt dabei die Werte der Spannung des Generators U_g sowie des Stroms des Generators i_g zur Verfügung. Die drei Phasen werden nun dem Gleichrichter **6** zugeführt. Der Gleichrichter **6** wird über ein Steuersignal s_g gesteuert. Dieser wandelt den Wechselstrom in Gleichstrom, wobei der Gleichstrom in diesem Dreistufenrichter im Zwischenkreis **8** auf drei Niveaus gehalten wird, nämlich auf dem (+)-Niveau gemäss Bezugszeichen **12**, dem (0)-Niveau gemäss Bezugszeichen **13** und dem (–)-Niveau gemäss Bezugszeichen **14** (vgl. auch [Fig. 4](#)). Zwischen den Niveaus **12** und **13** sowie **13** und **14** ist jeweils eine Kapazität C_1 beziehungsweise C_2 angeordnet. Die Spannungen über diesen beiden Kapazitäten werden an Messpunkten **15** abgegriffen und für die Regelung zur Verfügung gestellt.

[0071] Die drei Niveaus des Gleichstroms werden anschliessend im Wechselrichter **7**, welcher über ein Steuersignal s_n geregelt wird, in Wechselstrom überführt. Die drei Phasen dieses Wechselstroms werden mittels einer Messvorrichtung **11** überwacht, das heisst es wird die Wechselspannung U_n des Netzes sowie der an das Netz abgegebene Strom überwacht. Anschliessend folgt nach einem Transformator **16** das Netz **4**.

[0072] Die Regelung einer solchen Vorrichtung ist schematisch in [Fig. 6](#) dargestellt. Als einziger Parameter, auf welchen geregelt wird, wird der Messwert der Gleichspannung u_c im Zwischenkreis **8** verwendet, wobei es sich dabei, wie ganz oben ersichtlich, um den Mittelwert der beiden an den Messpunkten **15** abgegriffenen Spannungen handelt ($u_c = 1/2(u_{c1} + u_{c2})$). Fest (oder dynamisch) vorgegeben wird der Referenzwert der Kapazitätsspannung u_c^* , sowie der Wert von phg^* (Generatorphase, wird zur Einstellung der Blindleistung verwendet) und der Wert von tt^* (entspricht dem mechanischen Drehmoment T_m^* der Turbine, Einstellung der Wirkleistung).

[0073] Wie bereits weiter oben erläutert, wird der Gleichrichter **6** auf eine feste Frequenz eingestellt. Entsprechend kann in [Fig. 6](#) erkannt werden, wie die Steuerungssignale s_g für den Gleichrichter **6** auf Basis des fest vorgegebenen Wertes der Generatorfrequenz ω_g (entspricht in [Fig. 6](#) ω_g) nach entsprechender Einstellung der Phasenverschiebung $\text{ph}3$ ($-0, -120, -240$) für die drei vorhandenen Phasen und Auswertung einer Sinusfunktion in einem Modulator **18** erzeugt werden (zu den Details vergleiche weiter unten). Bei der Steuerung des Gleichrichters **6** wird also nicht auf den Regelparameter u_c Bezug genommen.

[0074] Auch die Einstellung der Erregerspannung U_f findet ohne Bezugnahme auf den Wert von u_c statt. Wie im unteren Teil von [Fig. 6](#) dargestellt, werden zur Einstellung der Erregerspannung U_f als Eingangswerte nur phg^* und tt^* , u_c^* sowie ω_g und U_g verwendet, wobei diese gemäss den weiter unten diskutierten Formeln (25)–(36), visualisiert in [Fig. 8](#), ausgewertet werden.

[0075] Mit anderen Worten wird die Erregerspannung U_f als Funktion der gewünschten Blindleistung Q , der Wirkleistung P , der Generatorspannung U_g und der Generatorfrequenz ω_g eingestellt. Zu den Details der Formel für die Erregerspannung U_f vgl. weiter unten, insbesondere [Fig. 8](#).

[0076] Der wesentliche Kern der Regelung findet nun in Bezug auf die Steuerung des Wechselrichters **7** statt. In diesem Fall wird der Messwert der Gleichspannung u_c im Zwischenkreis **8** mit den nach der Kreisfrequenz ω_i des Wechselrichters **7** aufgelösten integrierten Formeln (19)–(21) ausgewertet.

[0077] Dies bedeutet, dass zunächst die Differenz $u_c - u_c^*$ gebildet wird, diese Differenz anschliessend sowohl mit der proportionalen Kontrollverstärkung K_p als auch mit der differentiellen Kontrollverstärkung K_D multipliziert wird, und anschliessend das Produkt mit K_p integriert wird und der K_D -Ausdruck durch die Integration hindurchgeschoben wird, um den Phasenwinkel für die Steuerung des Wechselrichters **7** zu erhalten. Wiederum wird dafür am Ende die Phasenlage für die drei Phasen über die Phasenverschiebung $ph3$ eingestellt und der entsprechende Wert nach Auswertung mit einer Sinusfunktion einem Modulator **17** übergeben. Der Modulator **17** erzeugt daraus ein Steuersignal sn für den Wechselrichter **7**.

[0078] Die generelle Pulsbreite der Rechteckblöcke wird über einen Wert ua (commutation level) vorgegeben, wobei versucht wird, Oberwellen möglichst zu vermeiden (vgl. auch Formeln 3–6). Der Wert von ua entspricht also dem gewünschten Kommutierungswinkel.

[0079] Im Modulator **17** beziehungsweise im Modulator **18** werden die Signale sn beziehungsweise die Signale sg nach folgendem Schema (vergleiche [Fig. 7](#)) erzeugt:

$$u^* > ua \rightarrow s = 1$$

$$-ua \leq u^* \leq ua \rightarrow s = 0$$

$$u^* < -ua \rightarrow s = -1.$$

[0080] Die Regelung wurde auf Basis von typischen Referenzwerten für einen Turbogenerator und einen Transformator mit realistischen Werten für Kapazitäten im Zwischenkreis ermittelt, wobei die in den Tabellen 1 und 2 angegebenen Parameter verwendet wurden:

Tabelle 1: Systemparameter der Simulation

Beschreibung	Variable	Wert	Einheit
Maschine			
Scheinbare Leistung	S	73.8	MVA
Leistung	P	59.0	MW
Spannung	U	11.5	kV
Strom	I	3.705	kA
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	0.80	
Frequenz	f	85	Hz
Anzahl Polpaare	p	1	
Basisimpedanz	Z	1.792	Ω
Statorwiderstand	R_s	0.0035	p.u.
Stator-leck-reaktanz	X_{ls}	0.160	p.u.
d-Achsen synchrone Reaktanz	X_d	2.47	p.u.
q-Achsen synchrone Reaktanz	X_q	2.28	p.u.
d-Achsen transiente Reaktanz	X'_d	0.239	p.u.
q-Achsen transiente Reaktanz	X'_q	0.390	p.u.
d-Achsen subtransiente Reaktanz	X''_d	0.181	p.u.
q-Achsen subtransiente Reaktanz	X''_q	0.190	p.u.
Transiente Offenkreis-Zeitkonstante der d-Achse	T'_{do}	6.65	s
Transiente Offenkreis-Zeitkonstante der q-Achse	T'_{qo}	0.78	s
Subtransiente Offenkreis-Zeitkonstante der d-Achsen	T''_{do}	0.018	s
Subtransiente Offenkreis-Zeitkonstante der q-Achsen	T''_{qo}	0.027	s
Zeitkonstante des Trägheitsmomentes	T_J	0.80	s
Netz			
Spannung	U	11.5	kV
Frequenz	f	50	Hz
Transformator			
Wicklungsverhältnis	n	1	
Widerstand	R	0.005	p.u.
Induktivität	L	0.20	p.u.
Magnetisierungsinduktivität	L_m	100	p.u.
Umrichter			
Zwischenkreiskapazität ^(a)	C	25	p.u.
Steuerung			
Kommutierungswinkel	α	74	°
Proportionaler Verstärkungsfaktor	K_P	0.2	p.u.
Differentieller Verstärkungsfaktor	K_D	0.2	p.u.

Tabelle 2: Nominalwerte der Simulation im per unit-System^(b)

Beschreibung	Variable	Wert
Maschine		
Phasenspannungsamplitude	\hat{u}_g	1.0
Phasenstromamplitude	\hat{i}_g	1.0
Kreisfrequenz	ω_g	1.7
Scheinbare Leistung	S_g	1.5
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	0.80
Mechanisches Drehmoment	T_m	0.71
Netz		
Phasenspannungsamplitude	\hat{u}_n	1.0
Phasenstromamplitude	\hat{i}_n	1.0
Kreisfrequenz	ω_n	1.0
Scheinbare Leistung	S_n	1.5
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	0.80
Umrichter		
Spannung über Kapazität im Zwischenkreis	u_c	0.82

(b) im per unit System werden Grössen jeweils auf die nominale Basisgrösse bezogen, dies nach der Formel: Basiswert in p.u. = (Grösse in SI-Einheiten)/(Nominalwert von Spannung oder Leistung)

[0081] Die Erregung des Generators über die Spannung U_f wird unter Verwendung eines Standardmaschinenmodells (vergleiche dazu z. B. C.-M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, 1st ed. Upper Saddle River, N.J. (USA): Prentice Hall, 1998 und J. Chatelain, "Machines électriques," in *Traité d'Électricité*, 1st ed. Lausanne, CH: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1983, vol. X.) berechnet.

[0082] Die verschiedenen Operationspunkte werden über die Referenzwerte für Spannung, Frequenz und Blindleistung respektive Wirkleistung, und unter Verwendung der Formel (3) berücksichtigt.

[0083] Eine schematische Darstellung der Evaluation der Erregerspannung U_f ist in [Fig. 8](#) angegeben. Als Eingangswerte für die Berechnung dienen die Werte der Generatorspannung, U_g , Generatorfrequenz, ω_g , die gewünschte Blindleistung, Q_g und die gewünschte Wirkleistung, P_g , wie dies auf der linken Seite der [Fig. 8](#) als Eingang angegeben ist. Zudem wird L_{md} als fixer Wert vorgegeben, wobei L_{md} in [Fig. 8](#) mit -K-bezeichnet ist.

[0084] Die induzierte Spannung E_f ist proportional zum Feldstrom I_f , welcher wiederum proportional ist zur Feldspannung (Erregerspannung) U_f (Amplituden von Wechselstromgrössen werden verwendet):

$$U_f = R_f I_f, \quad (25)$$

$$E_f = X_{md} I_f. \quad (26)$$

[0085] Die Formel für die Statorseite, unter Verwendung von komplexen Vektoren, ist:

$$jE_f = (U_d + jU_q) + j(X_d I_d + jX_q I_q) \quad (27)$$

)

[0086] Dies kann geschrieben werden als

$$E_f = (U + X_q I \sin \varphi) \cos \delta + (X_d I \cos \varphi) \sin \delta, \quad (28)$$

wobei φ der Phasenwinkel zwischen U und I ist, und δ der Verschiebungs- oder Last-Winkel zwischen E_f und U . Es kann gezeigt werden, dass

$$(U + X_q I \sin \varphi) + j(X_d I \cos \varphi) = E'_d + jE'_q = E' e^{j\delta}, \quad (29)$$

und somit dass

$$\cos \delta = \frac{E'_d}{E'}, \quad (30)$$

$$\sin \delta = \frac{E'_q}{E'}, \quad (31)$$

was in Formel (28) eingesetzt werden kann. Da die Wirkleistung P und die Blindleistung Q in einem Dreiphasensystem ausgedrückt werden kann als

$$P = 3/2 UI \cos \varphi, \quad (32)$$

$$Q = 3/2 UI \sin \varphi, \quad (33)$$

kann man unter Verwendung der Amplitude von Ausgangsspannung U und Stromstärke I folgendes aufstellen

$$I \cos \varphi = \frac{2P}{3U}, \quad (34)$$

$$I \sin \varphi = \frac{2Q}{3U}, \quad (35)$$

was in die Formeln (28) und (29) eingesetzt werden kann. Alle Reaktanzen werden ausgedrückt als

$$X = \omega L, \quad (36)$$

da die Generatorfrequenz variieren kann. Die oben angegebenen Gleichungen gelten für stationäre Betriebsweise. Um das Verhalten bei schneller Dynamik zu verbessern, wird ein Beitrag

$$U'_f = L_{md} \frac{d(I_f - I_d)}{dt} \quad (37)$$

zum Ausgang hinzuaddiert, unter Verwendung von

$$I_d = I \sin \varphi \cos \delta + I \cos \varphi \sin \delta \quad (38)$$

als Stromkomponente der direkten Achse.

[0087] Aus den Formeln (25)–(38) kann die generelle Formel für die Erregerspannung U_f aufgestellt werden, wobei diese, wie schematisch in [Fig. 8](#) dargestellt, als Funktion von Generatorspannung, Generatorfrequenz, Wirkleistung und Blindleistung des Generators sowie der Konstante L_{md} ausgedrückt ist.

[0088] Die Steuerung hat drei Referenzpunkte, wobei jeder dieser Punkte eine Leistungsgröße im System beeinflusst: (I) das Turbinendrehmoment T_t^* für die Wirkleistung P, (II) der Leistungsfaktorwinkel φ_g für die Blindleistung Q_g des Generators, sowie (III) die Spannung u_c^* über der Kapazität im Zwischenkreis für die Blindleistung Q_n des Netzes **4**.

[0089] Die durch das Turbinendrehmoment auf die Generatorwelle übertragene mechanische Leistung wird bei stationärer Betriebsweise vollständig auf das Netz übertragen, was die Wirkleistung P überall im gesamten System bestimmt (I).

[0090] Der Leistungsfaktorwinkel des Generators wirkt auf das Erregersystem (II).

[0091] Die Spannung über der Kapazität im Zwischenkreis wirkt wie eine Generatorerregung für den Umrichter, welche an das Netz gekoppelt ist (III). Ihr Referenzwert u_c^* kann aus der Amplitude der Netzspannung sowie der gewünschten Wirk- und Blindleistung ermittelt werden. Die Rechnungen sind dabei wesentlich einfa-

cher als bei der Erregung durch den Generator, da es keinen Unterschied zwischen den Reaktanzen entlang der Achsen d und q gibt. Die Gleichung für die in Netzseite unter Verwendung von komplexen Vektoren ist gegeben durch:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_n + j\omega_n L \underline{I}_n. \quad (39)$$

[0092] Dies kann geschrieben werden als

$$U_i = \sqrt{(U_n + \omega_n L I_n \sin \varphi_n)^2 + (\omega_n L I_n \cos \varphi_n)^2}, \quad (40)$$

mit φ_n als Winkel zwischen U_n und I_n . Unter Verwendung der Gleichungen (34) und (35) für die Netzseite erhält man somit:

$$U_i = \sqrt{\left(U_n + \omega_n L \frac{2Q_n}{3U_n}\right)^2 + \left(\omega_n L \frac{2P_n}{3U_n}\right)^2}. \quad (41)$$

[0093] Dieser Ausdruck für U_i kann nun in Gleichung (20a) eingesetzt werden, was einen Ausdruck für u_c^* ergibt.

[0094] Es werden verschiedene Übergänge simuliert, wobei für jeden der Übergänge jeweils 1 Sekunde Zeit gegeben wurde. Die einzelnen Kenngrößen sind in den [Fig. 9–Fig. 12](#) grafisch zusammengestellt.

[0095] Dabei wird das System im Bereich zwischen 0 und 1 ohne Last gefahren. In diesem Fall sind das mechanische Drehmoment T_m sowie das elektromagnetische Drehmoment T_e und der Lastwinkel δ_m gleich null (vergleiche [Fig. 9](#)).

[0096] Im Bereich zwischen 1 und 2 wird nun ein erster Übergang simuliert. In diesem Übergang wird das Drehmoment der Turbine auf den Nominalwert geschoben. Mit anderen Worten wird in [Fig. 6](#) der Wert von tt^* auf den Nominalwert geschoben. Anschliessend wird das Drehmoment T_m der Turbine nicht mehr verändert und bleibt konstant (vergleiche [Fig. 9](#) ganz oben).

[0097] In Reaktion auf diesen Übergang nehmen der Erregerstrom i_f (vergleiche [Fig. 10](#) oben) und gleichermaßen der Generatorstrom i_g (vergleiche [Fig. 10](#) Mitte) zu. Auch die Blindleistung Q_g sowie die Wirkleistung P_g des Generators steigen an (vergleiche [Fig. 10](#) unten). In Reaktion darauf beobachtet man auch eine Zunahme des an das Netz abgegebenen Stromes i_n (vergleiche [Fig. 11](#) Mitte) und der an das Netz abgegebenen Wirkleistung P_n . Die an das Netz abgegebene Blindleistung Q_n bleibt bei diesem ersten Übergang im wesentlichen null. Die Spannung u_c im Zwischenkreis bleibt ebenfalls konstant, wie aus [Fig. 11](#) oben ersichtlich.

[0098] Der zweite Übergang findet im Bereich zwischen 3 und 4 statt. Bei diesem Übergang wird die Spannung u_c im Zwischenkreis **8**, welche wie die Erregung des Generators auf der Netzseite wirkt, ebenfalls angehoben, um den Nominalwert der Blindleistung im Netz zu erhalten. Mit anderen Worten wird der in [Fig. 6](#) dargestellte Referenzwert der Kapazitätsspannung von u_c^* etwas vom Nominalwert angehoben. Tatsächlich reagiert der Wert der an das Netz abgegebenen Blindleistung Q_n , wie in [Fig. 11](#) unten ersichtlich. Auf der Seite des Generators nimmt die Spannung U_g ebenfalls leicht zu, was zu einer Anpassung der Erregerspannung u_f Anlass gibt, um die Blindleistung aufrecht zu erhalten, dies aber bei einem anderen Betriebspunkt mit anderem Leistungsfaktor.

[0099] Beim dritten Übergang, welcher im Bereich zwischen 6 und 7 angeordnet ist, wird der Leistungsfaktor des Generators auf eins gesetzt, was bedeutet, dass die Erregung (vergleiche Feldstrom i_f in [Fig. 10](#) oben) angepasst wird. Mit anderen Worten wird in [Fig. 6](#) der Wert von phg^* vom Nominalwert etwas reduziert. Die Blindleistung Q_g auf der Seite des Generators kann durch diesen Schritt im wesentlichen eliminiert werden (vergleiche [Fig. 10](#) unten).

[0100] Der Vollständigkeit halber sind in [Fig. 12](#) sowohl auf der Generator- als auch auf der Netzseite die entsprechenden Wellenformen von Spannung (U_g bzw. U_n) und Strom (i_g bzw. i_n) angegeben.

Bezugszeichenliste

1	Turbine
2	Getriebe
3	Generator
4	Netz
5	Frequenzkonverter
6	Gleichrichter (rectifier)
7	Wechselrichter (inverter)
8	Zwischenkreis
9	Erregerspeisung
10,11	Messvorrichtung
12	(+)-Niveau des Dreistufenumrichters
13	(0)-Niveau des Dreistufenumrichters
14	(-)-Niveau des Dreistufenumrichters
15	Messpunkt von Spannung über C_1 und C_2
16	Transformator
17	Modulator für Ansteuerung von 7
18	Modulator für Ansteuerung von 6
19	Steuereinheit für Erregerspeisung
C	Kapazität in 8
C₁	Kapazität zwischen 12 und 13
C₂	Kapazität zwischen 13 und 14
E	Eingangsspannung der Spannungsquelle
U	Ausgangsspannung der Spannungsquelle
I	Strom
L	Induktivität
w	Kreisfrequenz
P	Wirkleistung bei U
Q	Blindleistung bei U
δ	Verschiebungswinkel, Lastwinkel
□	Phasenwinkel zwischen U und I
J	Trägheitsmoment
T_m	mechanisches Drehmoment der Turbine
T_e	elektromagnetisches Drehmoment
P_m	mechanische Leistung der Turbine
P_e	elektromagnetische Leistung
ω_m	mechanische Kreisfrequenz des Generators
X_d	synchrone Reaktanz der d-Achse
X_d'	transiente Reaktanz der d-Achse
E'	Erregungsspannung zu X' _d
T_k'	dynamisches Kippmoment
T_k	Kippmoment
D	Dämpfungskoeffizient
ω_r	Kreisfrequenz des Gleichrichters
U_r	Wechselspannung des Gleichrichters
i_r	Strom von Gleichrichter in Zwischenkreis geliefert
u_c	Gleichspannung im Zwischenkreis 8
P_r	Leistung hinter Gleichrichter
ω_i	Kreisfrequenz des Wechselrichters
U_i	Wechselspannung des Wechselrichters
U_n	Wechselspannung des Netzes
ω_n	Kreisfrequenz des Netzes
i_n	Wechselstrom des Netzes
i_i	Strom von Wechselrichter aus Zwischenkreis gezogen
P_i	gewandelte Leistung
I_k	Durchbruchstrom
u_c*	Referenzwert der Kapazitätsspannung

K_p	proportionale Kontrollverstärkung
K_D	differenzielle Kontrollverstärkung
U_f	Erregerspannung
i_f	Feldstrom
U_g	Spannung des Generators
i_g	Strom des Generators
sg	Steuersignal für Gleichrichter
sn	Steuersignal für Wechselrichter
\hat{u}_1	Amplitude der Grundwelle
u_1	Grundwelle
$\Delta\omega$	Frequenzdifferenz zwischen ω_i und ω_n
m	Modulationsindex
u_α	Kommutierungsniveau
θ_m	Winkelposition im Rotor (Phase)
Y_{dq}	Magnetfluss
phg^*	Generatorphase
tt^*	mechanisches Drehmoment der Turbine
ω_g	Generatorfrequenz
$ph3$	Phasenverschiebung
ua	Pulsbreite der Rechteckblöcke
Q_g	gewünschte Blindleistung
P_g	gewünschte Wirkleistung
L_{md}	Konstante für Zeitabhängigkeit gemäss Formel (37)
E_f	induzierte Spannung
R_f	Widerstand
X_{md}	Reaktanz
X	Reaktanz
P_n	Wirkleistung des Netzes
Q_n	Blindleistung des Netzes
T^*	Turbinendrehmoment
φ_n	Winkel zwischen U_n und I_n

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung eines statischen Frequenzkonverters (5), bei welchem eine in einem Generator (3) erzeugte Wechselspannung (U_g) mit einer ersten Frequenz (ω_g) zunächst in einem geschalteten Gleichrichter (6) gleichgerichtet wird, und die so in einem Zwischenkreis (8) vorhandene Gleichspannung in einem geschalteten Wechselrichter (7) in Wechselspannung (U_n) mit einer Netzfrequenz (ω_n) gewandelt wird, wobei der Generator (3) wenigstens eine Erregerspule aufweist, wobei zur Steuerung der in das Netz (4) eingespeisten Leistung Mittel angeordnet sind, mit welchen wenigstens die Stärke des von der wenigstens einen Erregerspule erzeugten Erregerfeldes geregelt wird, und wobei die Steuerung des Frequenzkonverters (5) im Gleichrichter (6) derart geführt wird, dass die generatorseitige Wechselspannung (U_1) des Gleichrichters (6) in ihrer Frequenz (ω_1) auf einen im wesentlichen konstanten Wert der ersten Frequenz (ω_g) geregelt wird, und die Steuerung im Wechselrichter (7) auf Basis des gemessenen Wertes der Gleichspannung (u_c) im Zwischenkreis (8) geführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Regelung der Stärke des Erregerfeldes auch die Phasenlage zwischen Frequenzkonverterspannung und Generator- respektive Netzspannung (U_n) über die Mittel geregelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichspannung (u_c) im Zwischenkreis (8) als Regelparameter über wenigstens einer Kapazität (C) im Zwischenkreis abgegriffen wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerung im Wechselrichter (7) derart geführt wird, dass die netzseitige Frequenz (ω_1) des Wechselrichters (7) nach folgender Funktion geregelt wird

$$\omega_1 = \omega_n + \Delta\omega$$

wobei die Funktion $\Delta\omega$ gegeben ist durch

$$\Delta\omega \triangleq K_P(u_C - u_C^*) \quad (16)$$

und wobei K_P eine vorgegebene, proportionale Kontrollverstärkung ist, und wobei u_C^* ein Referenzwert der Kapazitätsspannung ist, welcher u.a. in Abhängigkeit der gewünschten Blindleistung (Q), ggf. dynamisch, gewählt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktion $\Delta\omega$ zusätzlich unter Berücksichtigung der Dämpfung mit einer vorgegebenen differentiellen Kontrollverstärkung K_D zur Steuerung im Wechselrichter (7) verwendet wird, nach der Formel:

$$\Delta\omega' \triangleq K_P(u_C - u_C^*) + K_D \frac{d}{dt}(u_C - u_C^*) = \Delta\omega + \frac{K_D}{K_P} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (17).$$

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Stärke des von der wenigstens einen Erregerspule erzeugten Erregerfeldes und dessen Phasenlage über eine Erregerspannung (U_f) eingestellt wird, welche in Funktion der Generatorspannung (U_g), der Generatorfrequenz (ω_g), der Wirkleistung des Generators (P_g) und der Blindleistung des Generators (Q_g) gesteuert wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Erregerspannung (U_f) nach folgender Formel geregelt wird:

$$U_f = R_f I_f + U'_f$$

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass es sich beim Frequenzkonverter (5) um einen Dreistufenumrichter handelt, wobei die Gleichspannung (u_c) im Zwischenkreis (8) als Mittelwert der über den beiden Kapazitäten (C_1, C_2) zwischen einem (+)-Niveau und einem (0)-Niveau sowie dem (0)-Niveau und einem (-)-Niveau anliegenden Spannungen ermittelt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der gesteuerte Gleichrichter (6) und/oder der gesteuerte Wechselrichter (7) in Grundfrequenztaktung betrieben wird, wobei es sich beim gesteuerten Gleichrichter (6) bevorzugt um einen Drei-Niveau-Gleichrichter und beim gesteuerten Wechselrichter (7) bevorzugt um einen Drei-Niveau-Wechselrichter handelt, welche beide in Grundfrequenztaktung betrieben werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der statische Frequenzkonverter (5) geschaltete Thyristoren, wie beispielsweise GTO's, IGBT's, MOSFET's, oder IGCT's, umfasst.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine zentrale Steuerung angeordnet ist, welche über die Messung von Spannung (U_r, U_i) und/oder Strom (i_r, i_i) vor und/oder hinter dem statischen Frequenzkonverter (5) eine Anpassung der ins Netz (4) eingespeisten Amplitude der Wechselspannung durch eine entsprechende Ansteuerung der Mittel zur Steuerung der Stärke des von der Erregerspule erzeugten Erregerfeldes vornimmt.

12. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass ein Generator (3) mit wenigstens einer regelbaren Erregerspule, einem statischen Frequenzkonverter (5), umfassend wenigstens einen gesteuerten Gleichrichter (6) in Grundfrequenztaktung und wenigstens einen gesteuerten Wechselrichter (7) in Grundfrequenztaktung, sowie wenigstens einer Steuerung zur Regelung dieser Elemente ausgestattet ist, wobei zusätzlich Mittel zur Messung der Werte der Gleichspannung (u_c) im Zwischenkreis (8) angeordnet sind, und diese Werte zur Steuerung im Wechselrichter (7) verwendet werden.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass Mittel zur Regelung der Amplitude und/oder der Phasenlage der Erregerspannung für die die regelbare Erregerspule angeordnet sind, mit welchen die Stärke resp. Phasenlage des Erregerfeldes an die Erfordernisse des Netzes (4) angepasst werden kann.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

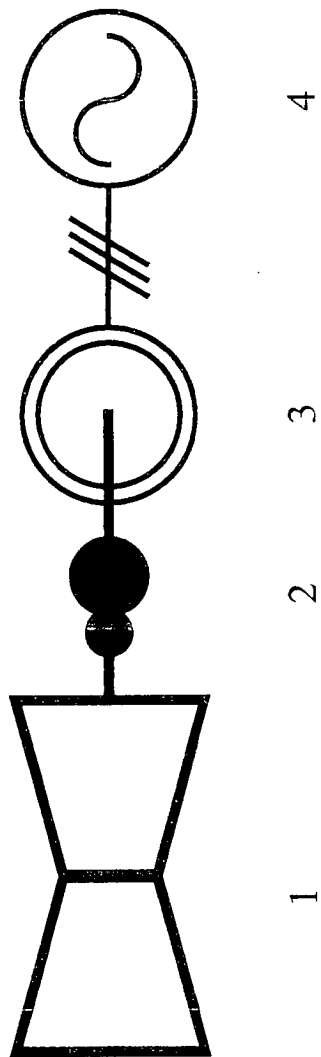


Fig. 1

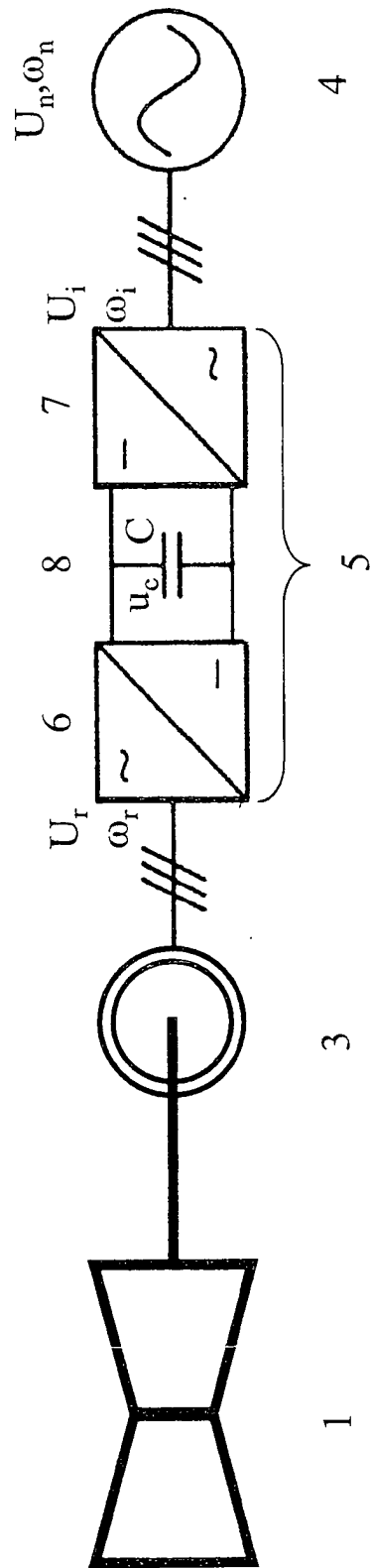


Fig. 2

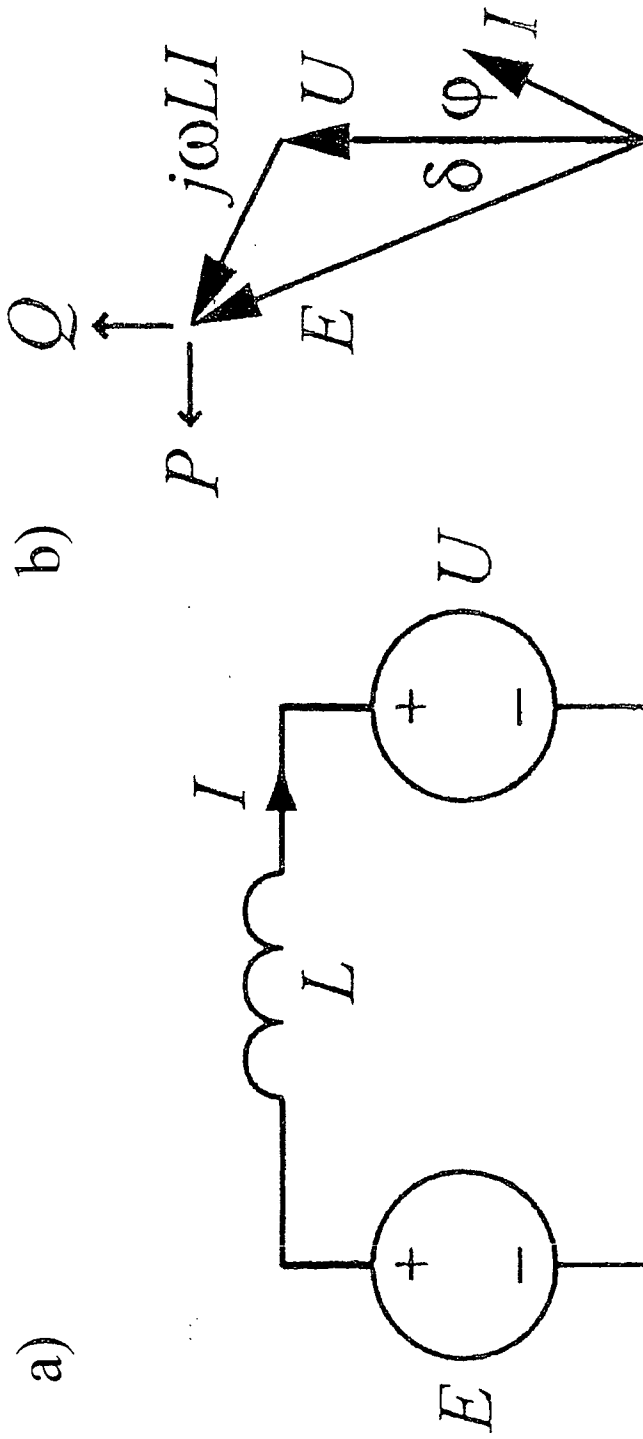


Fig. 3

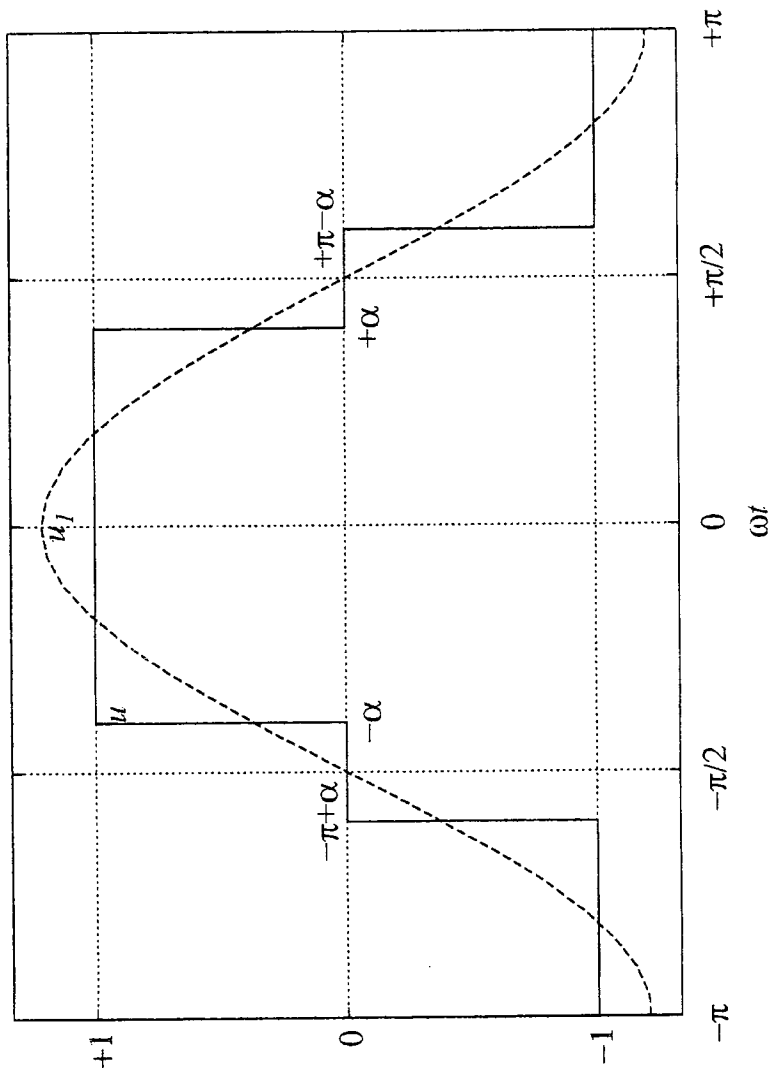


Fig. 4

Fig. 5

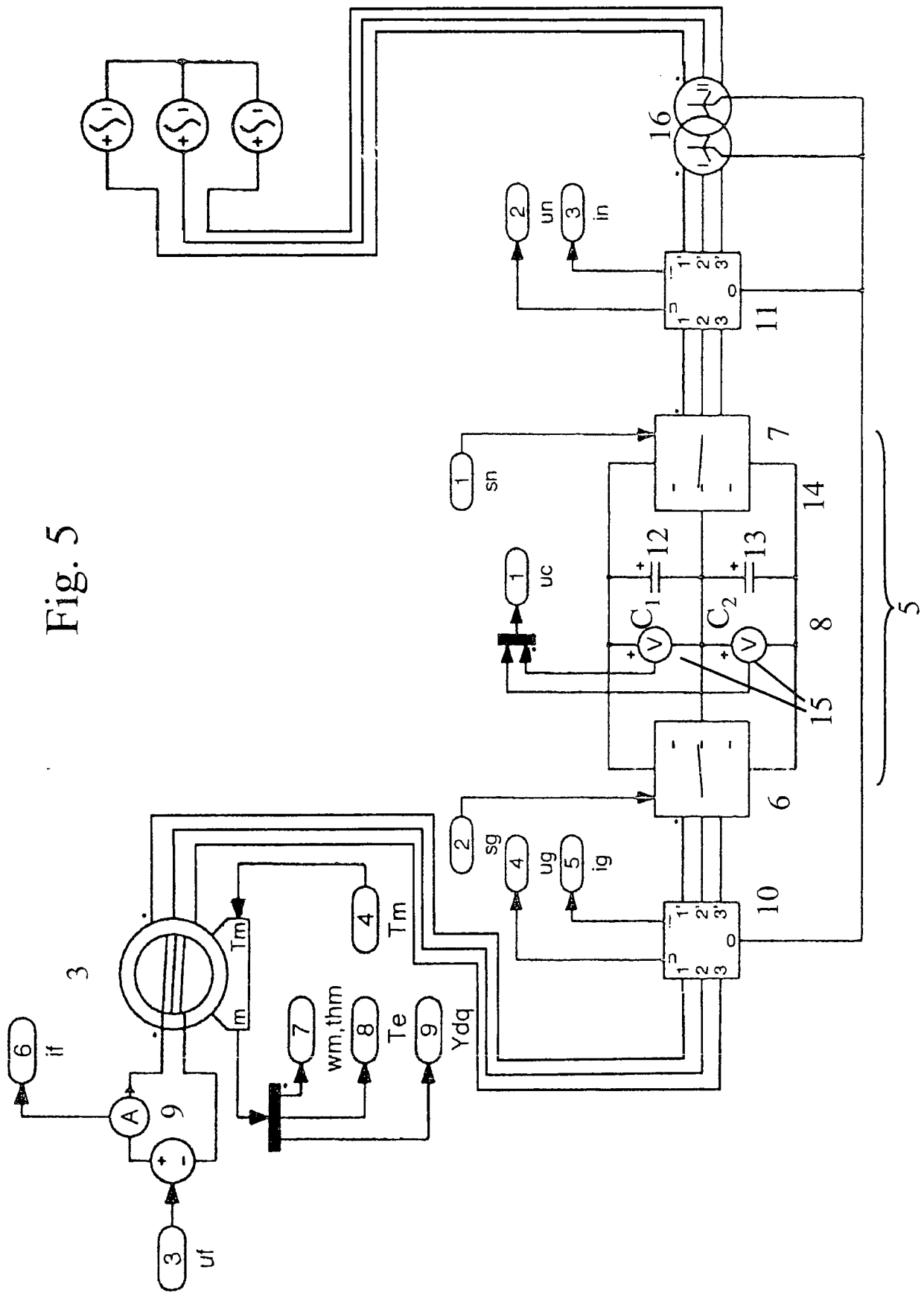
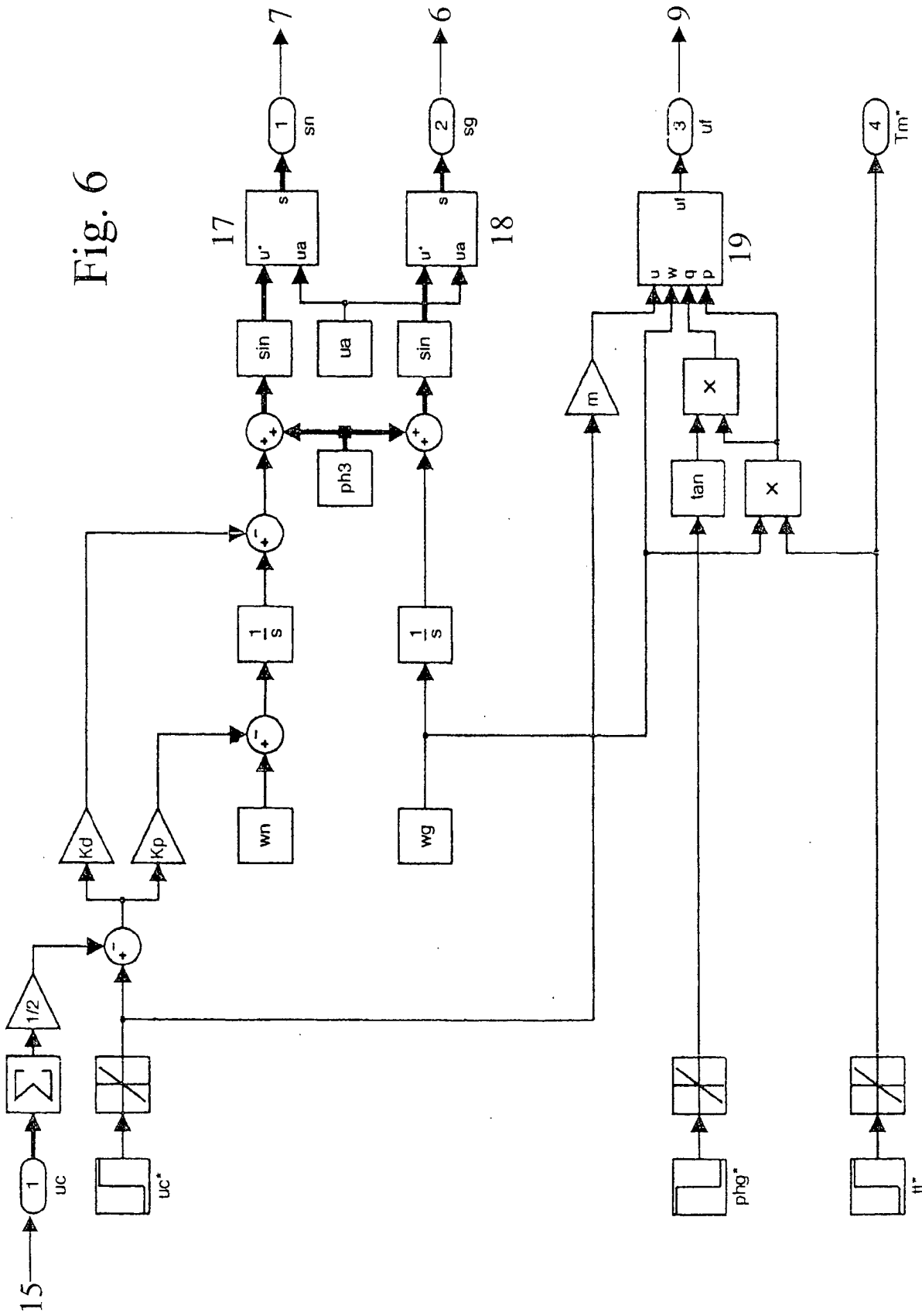
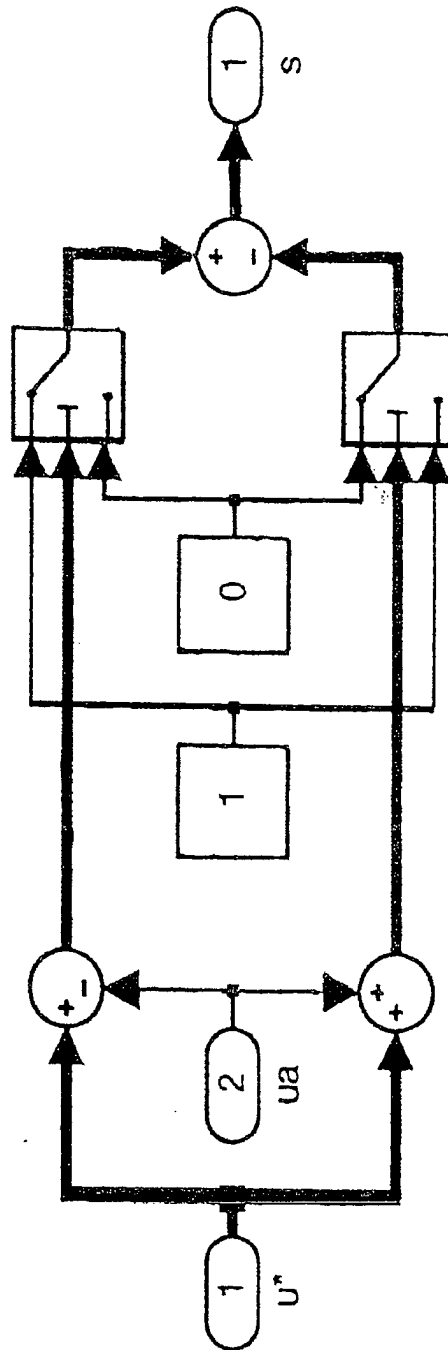


Fig. 6





17/18

Fig. 7

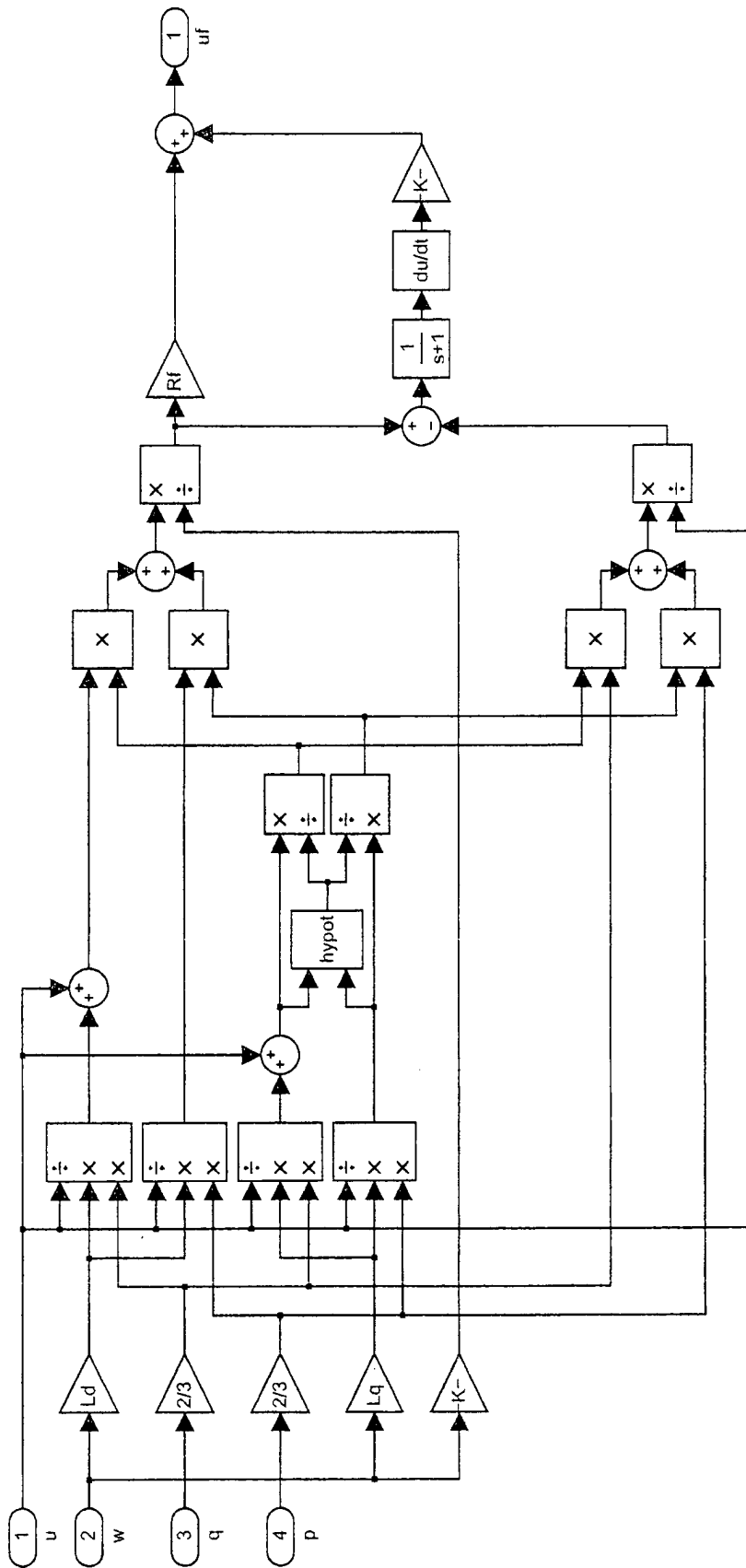


Fig. 8

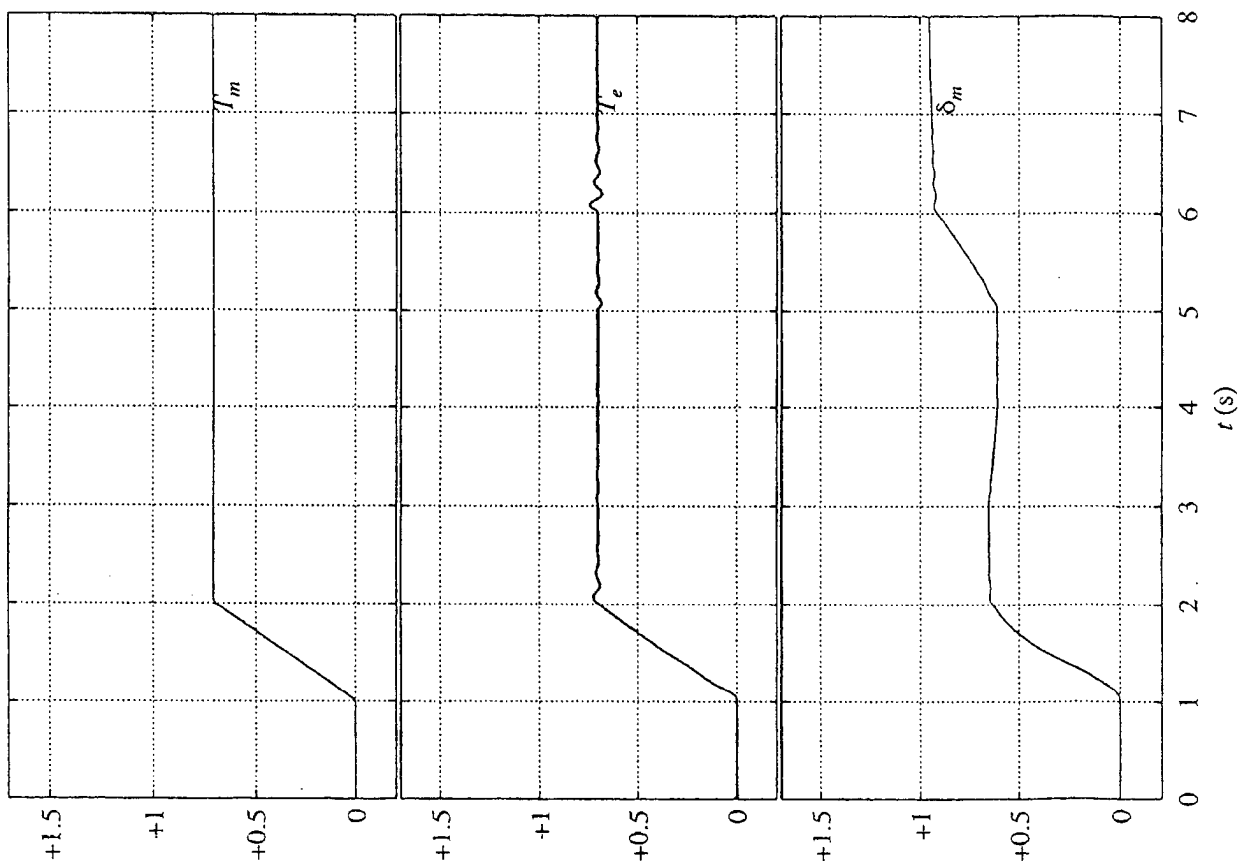


Fig. 9

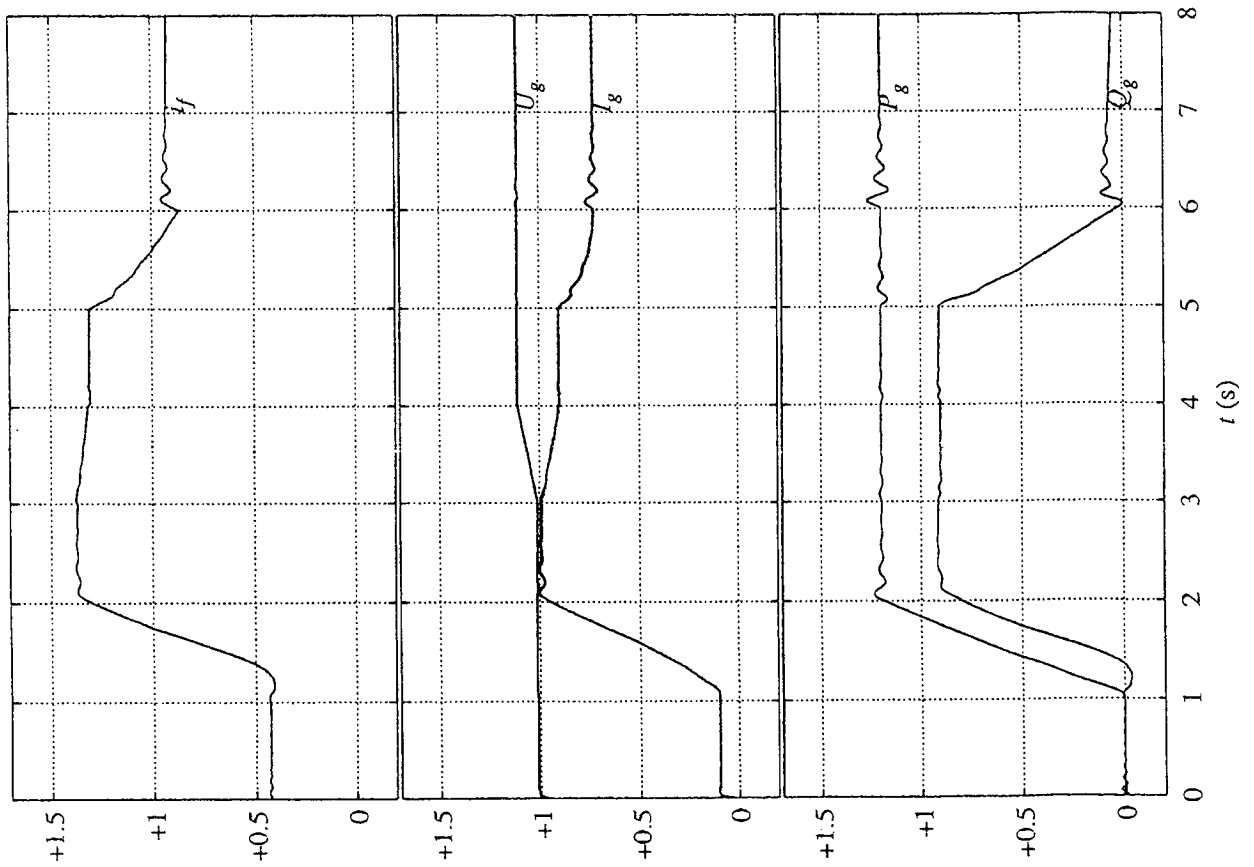


Fig. 10

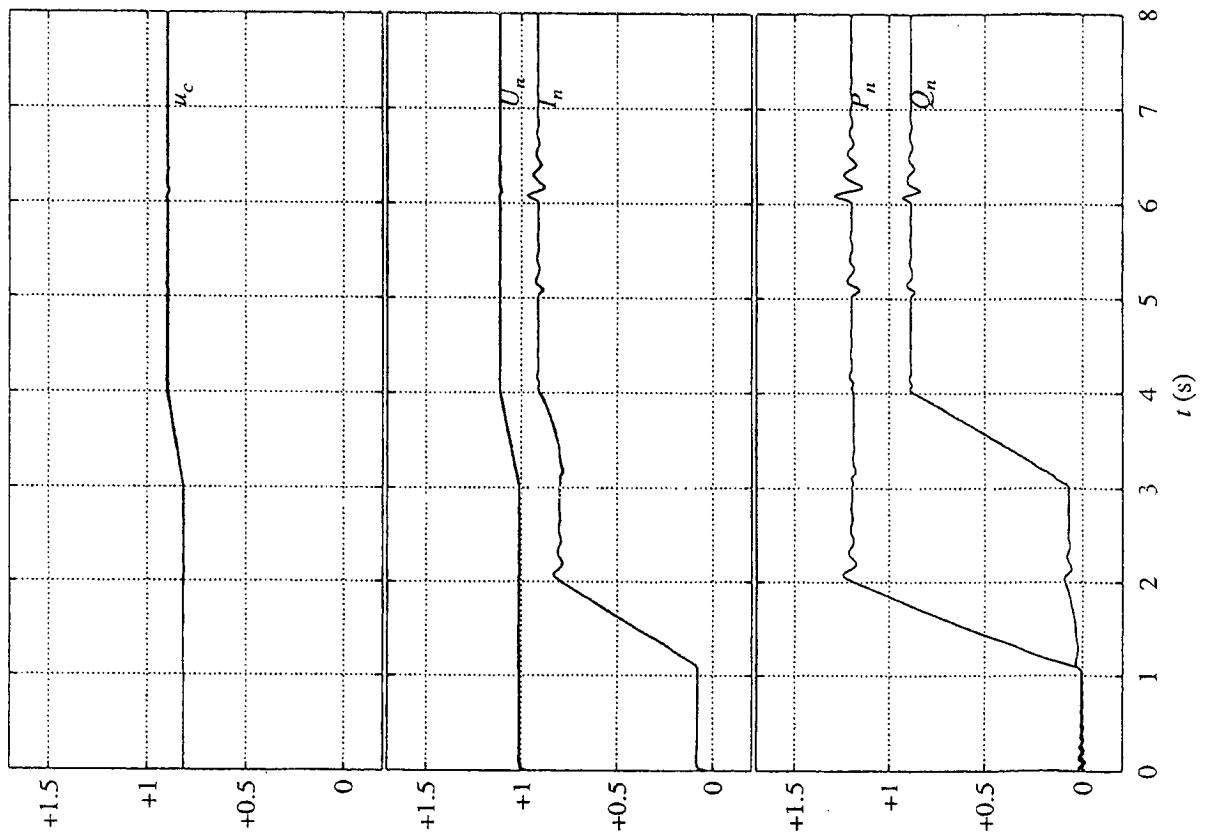


Fig. 11

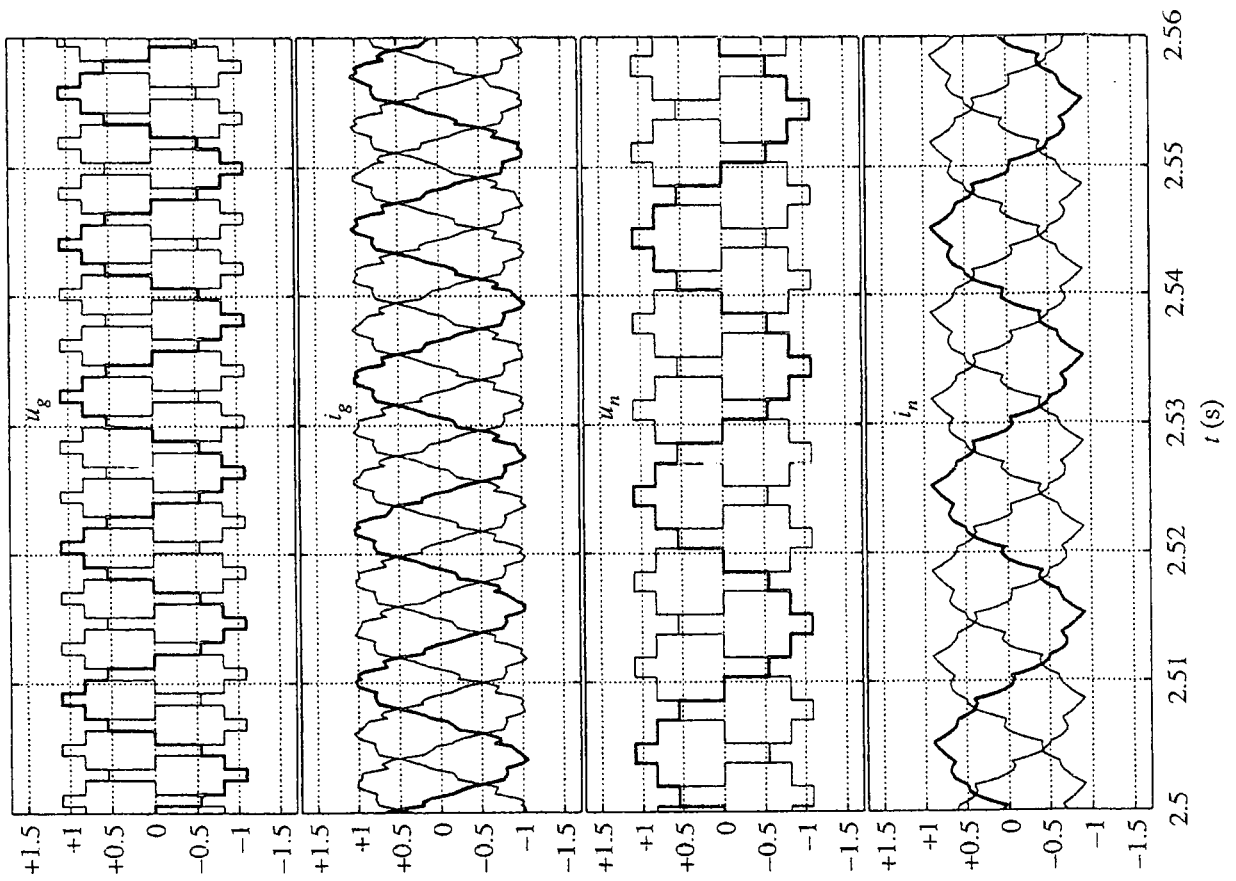


Fig. 12