



(10) **AT 517323 A2 2016-12-15**

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 262/2016
(22) Anmeldetag: 24.05.2016
(43) Veröffentlicht am: 15.12.2016

(51) Int. Cl.: **H02P 9/10** (2006.01)

(30) Priorität:
04.06.2015 US 14/731,102 beansprucht.

(71) Patentanmelder:
GENERAL ELECTRIC COMPANY
12345 Schenectady (US)

(74) Vertreter:
Schober E. Dipl. Ing. Dr. techn., Fox T. Dipl. Dr.,
Noske W. Dipl. Ing.
Wien

(54) **Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer stabilen Betriebszone**

(57) Ein Verfahren hält eine Synchronmaschine in einer stabilen Betriebszone während großer transients Spannungsausschläge in einem Energieversorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist. Es wird der Lastwinkel der Maschine, d. h. die Position des Rotorflusses in Bezug auf die Position des Statorflusses, berechnet. Wenn der Lastwinkel nicht innerhalb eines vordefinierten Bereiches von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb liegt, wird die Felderregung der Maschine angepasst, um den Lastwinkel der Maschine in den definierten Bereich von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb zu bringen.

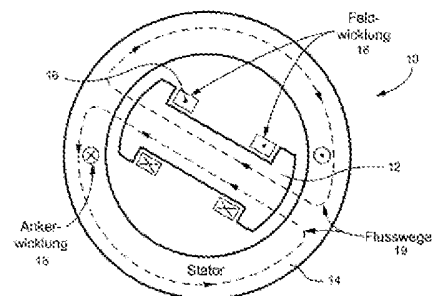
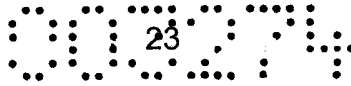


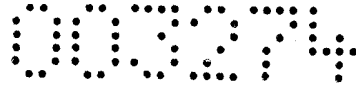
FIG. 1



Zusammenfassung:

Ein Verfahren hält eine Synchronmaschine in einer stabilen Betriebszone während großer transients Spannungsausschläge in einem Energieversorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist. Es wird der Lastwinkel der Maschine, d. h. die Position des Rotorflusses in Bezug auf die Position des Statorflusses, berechnet. Wenn der Lastwinkel nicht innerhalb eines vordefinierten Bereiches von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb liegt, wird die Felderregung der Maschine angepasst, um den Lastwinkel der Maschine in den definierten Bereich von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb zu bringen.

(Fig. 1)



SCHÜTZ u. PARTNER

PATENTANWÄLTE KG
EUROPEAN PATENT AND TRADEMARK ATTORNEYS
A-1200 WIEN, BRIGITTENAUER LÄNDE 50

DIPL.-ING. DR. TECHN. ELISABETH SCHOBER
DIPL.-PHYS. DR. PHIL. TOBIAS FOX
DIPL.-ING. WOLFGANG NOSKE

TELEFON: (+43 1) 532 41 30 - 0
TELEFAX: (+43 1) 532 41 31
E-MAIL: MAIL@PATENT.AT

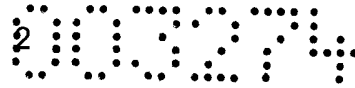
HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft Synchronmaschinen und im Spezielleren ein Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer stabilen Betriebszone während großer transientscher Spannungs- oder Frequenzausschläge.

Synchronmaschinen sind rotierende elektromechanische Maschinen, die entweder als Motoren oder Generatoren verwendet werden können. Synchronmaschinen werden üblicherweise als Generatoren verwendet, die mittels Dampf- oder Gasturbinen gedreht werden, um in Stromversorgungssystemen verwendet zu werden, die Teil eines Stromversorgungsnetzes sind.

Synchronmaschinen weisen zwei mechanische Teile auf, d. h. einen Rotor und einen Stator. Sie weisen auch zwei elektrische Teile auf, d. h. eine Feldquelle und eine Ankerwicklung. Die Feldquelle befindet sich in der Regel auf dem Rotor der Maschine, während sich die Ankerwicklung in der Regel auf dem Stator der Maschine befindet. Die Ankerwicklung kann eine Dreiphasenwicklung sein.

Die Feldquelle produziert ein Magnetfeld mit einem Magnetfluss, der mit der Ankerwicklung in Wechselwirkung steht, um so eine AC (Wechselstrom)-Spannung in der Ankerwicklung zu induzieren. Die Feldquelle kann entweder aus Permanentmagneten oder einer Feldwicklung mit einem dadurch fließenden DC (Gleichstrom) bestehen. Permanentmagnete werden üblicherweise in kleinen Maschinen verwendet,



während Feldwicklungen üblicherweise in großen Maschinen verwendet werden. Eine Feldwicklung produziert ein Magnetfeld infolge des durch sie hindurchfließenden Gleichstromes. Die Felderregung in der Rotor-Feldwicklung durch den Feld-Gleichstrom ist von konstanter Stärke und rotiert mit der Drehzahl des Rotors durch eine Antriebsquelle um die Maschine. Die Größe dieser Felderregung und des durch sie produzierten Magnetfeldes ist direkt proportional zu dem Feld-Gleichstrom, solange der Magnetkreis der Rotor- und Statorwicklungen nicht gesättigt ist.

Wenn eine Synchronmaschine als ein Generator arbeitet, wird der Rotor der Maschine von einer äußeren Antriebsquelle, wie z. B. einer von einer Gas- oder Dampfturbine angetriebenen mechanischen Welle, gedreht. Wenn der Feld-Gleichstrom durch die mit dem Rotor der Maschine rotierende Feldwicklung fließt, produziert die rotierende Feldwicklung ein rotierendes Magnetfeld. Dieses rotierende Magnetfeld induziert eine Wechselstromspannung innerhalb der Stator-Ankerwicklung. Wenn die Wechselstromspannung bewirkt, dass ein Wechselstrom durch die Dreiphasen-Ankerwicklung zu fließen beginnt, wird ein Magnetfeld erzeugt, das mit der gleichen Geschwindigkeit rotiert wie das durch den durch die rotierende Feldwicklung auf dem Rotor hindurchfließenden Strom erzeugte Magnetfeld, wobei das Feld mit der Synchrongeschwindigkeit der Maschine rotiert. Somit induziert das durch die rotierende Feldwicklung erzeugte rotierende Magnetfeld eine Dreiphasenspannung innerhalb der Dreiphasen-Statorwicklung. Die Statorwicklungen sind die Wicklungen, wo die hauptsächlich elektromotorische Kraft (EMK) oder Spannung in einem Generator induziert wird.

In einem Synchrongenerator ist ein „Lastwinkel“ δ als der Winkel zwischen der in dem Generator (E) induzierten elektromotorischen Kraft (EMK) und der Klemmenspannung (V) des Generators definiert. Der „Lastwinkel“ ist auch als der Winkel zwischen dem durch die Rotor-Feldwicklung erzeugten rotierenden Magnetfeld und dem



durch den Statoranker induzierten rotierenden Magnetfeld definiert. Für einen Synchrongenerator rotiert das Rotor-Magnetfeld mit Synchrongeschwindigkeit, und das rotierende Magnetfeld wird in dem Statoranker erzeugt.

Die beiden Felder sind nicht vollständig ausgerichtet. In der Regel eilt das Rotor-magnetfeld dem rotierenden Statorfeld nach. Dieser Verzug kommt in einem Winkel zum Ausdruck, der der Lastwinkel ist. Der Lastwinkel für einen Synchrongenerator wird sich verändern, wenn sich der Generator von einem lastfreien Zustand in einen Lastzustand bewegt.

Der Leistungsfaktor ist definiert als der Cosinus des Winkels zwischen Strom und Spannung. Der Leistungsfaktor ist auch das Verhältnis zwischen der an eine Last gelieferten Wattleistung und der an die Last gelieferten Scheinleistung. Die Scheinleistung ist das Produkt des RMS (vom engl. root mean square = quadratischen Mittelwert)-Stromes und der RMS-Spannung.

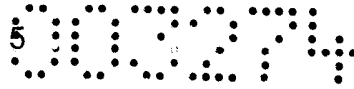
Der Lastwinkel ist bedeutend für das Aufrechterhalten der Stabilität eines Generators. Wenn der Lastwinkel neunzig Grad (90°) überschreitet, wird der Generator instabil. Dies kann geschehen, wenn eine plötzliche Änderung einer großen Last stattfindet oder wenn eine Störung in dem Energieversorgungsnetz über lange Zeit andauert. Jüngst und in Zukunft kann eine Zunahme bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen die Fähigkeit großer Synchronmaschinen, die mit dem Energieversorgungsnetz verbunden sind, beeinflussen, während großer Spannungsausschläge synchronisiert zu bleiben. Ein Synchrongenerator arbeitet in einem nachteiligen oder Leistungsfaktor-Eins-Modus infolge einer induktiven Last. Mit wachsenden erneuerbaren Energiequellen könnte die Notwendigkeit, Maschinen bei voreilenden Leistungsfaktoren zu betreiben, größer werden, um die Systemspannung nahe bei Sollwerten zu halten.



Die transiente Stabilität einer Synchronmaschine ist zum Großteil durch den Betriebspunkt der Maschine auf ihrer Lastwinkelkurve definiert. Die Leistungssystem-Stabilität ist von der Fehlerbehebungs-dauer für eine Störung in dem Übertragungssystem abhängig. Eine langsamere Fehlerbehebung gestattet es dem Rotor, soweit auf der Leistungskurve zu beschleunigen und könnte eine Synchronmaschine dazu bringen, dass sie desynchronisiert wird. Die Fähigkeit der Maschine, über eine große Transiente synchronisiert zu bleiben, ist durch den Betriebslastwinkel der Maschine, d. h. den Winkel zwischen dem rotierenden Magnetfeld des rotierenden Rotors, und dem in der Rotorwicklung induzierten rotierenden Magnetfeld definiert. Das verbesserte Felderregungs-Steuerungsmerkmal der vorliegenden Erfindung sieht eine Steuerung des Maschinen-Lastwinkels mit einer Fähigkeit vor, minimale transiente und dynamische Stabilitätsgrenzen sicherzustellen.

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungsaus-schläge in einem Leistungsversorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist.

Gemäß einer ersten exemplarischen Ausführungsform der Erfindung umfasst ein Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer stabilen Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge, wobei die Maschine einen Erreger umfasst, dass ein Lastwinkelbereich vordefiniert wird, in dem ein stabiler Betrieb der Maschine stattfindet, eine Lastwinkelberechnung für die Maschine basierend auf einem Generatorklemmenparameter durchgeführt wird, bestimmt wird, ob der berechnete Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches für die Maschine liegt, wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, die Lastwinkelberechnung für die Maschine und die Bestimmung, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, wiederholt werden, bis der Lastwinkel nicht



mehr innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, und wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, die Maschinen-Felderregung modifiziert wird, um den Maschinenlastwinkel zurück in den vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereich zu bringen, wobei die Synchronmaschine während großer transienter Ausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.

Gemäß einer anderen exemplarischen Ausführungsform der Erfindung umfasst ein Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge, wobei die Maschine einen Erreger umfasst, dass ein Lastwinkelbereich definiert wird, in dem ein stabiler und synchronisierter Betrieb der Maschine stattfindet, der Erreger eine Lastwinkelberechnung für die Maschine durchführt, eine Lastwinkelsteuerung vorgesehen wird, die bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches liegt, in dem der stabile und synchronisierte Betrieb der Maschine stattfindet, wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Erreger die Durchführung der Lastwinkelberechnung für die Maschine wiederholt und die Lastwinkelsteuerung bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Werten liegt, bis der Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, und wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Maschinenerreger die Werte an einem automatischen Erreger-Sollwert (ASP_EX) modifiziert, der einen automatischen Spannungsregler-Sollwert (AVR SP) in vordefinierten Grenzen moduliert, um die Maschinen-Felderregung entweder zu erhöhen oder zu verringern, wobei die Synchronmaschine während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.

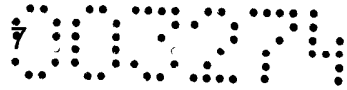


Gemäß einer weiteren exemplarischen Ausführungsform der Erfindung umfasst ein Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge in einem Energieversorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist, dass eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Steuern eines Betriebes der Maschine verwendet wird, um einen Lastwinkelbereich zu definieren, in dem ein stabiler und synchronisierter Betrieb der Maschine stattfindet, der Erreger eine Lastwinkelberechnung für die Maschine durchführt, eine Lastwinkelsteuerung vorgesehen wird, die bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb eines vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, die in einem automatischen Maschinenerreger-Sollwertblock (EXASP) gespeichert sind, wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Erreger die Durchführung der Lastwinkelberechnung für die Maschine wiederholt und die Lastwinkelsteuerung die Bestimmung, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Werten liegt, wiederholt, bis der Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, und wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Maschinenerreger die Werte an einem automatischen Erreger-Sollwert (ASP_EX) modifiziert, der einen automatischen Spannungsregler-Sollwert (AVR SP) in vordefinierten Grenzen moduliert, um die Maschinen-Felderregung entweder zu erhöhen oder zu verringern, wobei die Synchronmaschine während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.

Fig. 1 ist ein Grundriss-Prinzipschaubild eines einfachen Synchrongenerators.

Fig. 2 ist ein seitliches Aufriss-Prinzipschaubild eines Synchrongenerators.

Fig. 3 ist ein Prinzipschaubild einer Generatorerregungssteuerung, welche eine Erregerschaltung umfasst, die verwendet wird, um einen Generator-Feldstrom zu steu-



ern, und einen Spannungsregler umfasst, der verwendet wird, um die Höhe der Generator клемmenspannung zu regeln.

Fig. 4 ist ein Zeigerdiagramm für einen Synchrongenerator, der in einem Modus mit nachteilendem Leistungsfaktor infolge einer induktiven Last arbeitet.

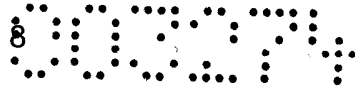
Fig. 5 ist ein Blockdiagramm des Schaltschemas, das eine Generatorerregungssteuerung umfasst.

Fig. 6 ist ein detaillierteres Blockdiagramm des Automatischen Spannungsregler-Sollwertblockes (EXASP) von Fig. 5.

Fig. 7 ist ein Flussdiagramm der Schritte des Verfahrens der vorliegenden Erfindung zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungsausschläge.

Synchronmaschinen werden üblicherweise als Generatoren verwendet, die durch Turbinen, wie z. B. Dampfturbinen, Gasturbinen, und durch andere Arten von Maschinen, wie z. B. Brennkraftmaschinen, rotiert werden. Synchronmaschinen erzeugen Elektrizität, die über ein Leistungsverorgungsnetz eines Landes an Verbraucher geliefert wird. Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen, ob sich der Lastwinkel einer Synchronmaschine innerhalb definierter Grenzen befindet, um die Maschine selbst während großer transienter Spannungsausschläge in dem Leistungsverorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist, in einer stabilen und daher sicheren Betriebszone zu halten.

Die Fähigkeit einer Synchronmaschine, während einer großen Spannungs- oder Frequenz-Transienten synchronisiert zu bleiben, ist durch den Betriebslastwinkel der

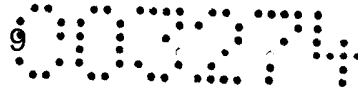


Maschine, d. h. dem Winkel zwischen dem rotierenden Magnetfeld des rotierenden Rotors und dem in der Statorwicklung induzierten rotierenden Magnetfeld, definiert. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung berechnet mathematisch den Lastwinkel der Maschine, d. h. die Position des Rotorflusses in Bezug auf die Position des Statorflusses, und ermöglicht die Beibehaltung des Lastwinkels der Maschine innerhalb eines definierten Bereiches von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb durch Anpassen der Felderregung der Maschine.

Die Felderregung wird aufrechterhalten, um eine größere Maschinenbetriebsstabilität zu erreichen, die den zuverlässigen Betrieb von Gas- und Dampfturbinen, die mit einem Synchrongenerator in dem Energieversorgungsnetz verbunden sind, selbst während großer Spannungs- oder Frequenzausschläge verbessert. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung gestattet eine sorgfältige Überwachung eines Lastwinkels der Maschine, um stabile Maschinenbetriebszustände aufrechtzuerhalten, unabhängig davon, ob die Maschine unter einer VAR- oder einer PF-Steuerung steht. Bedeutsamerweise verleiht diese Stabilität dem zuverlässigen Betrieb für Verbraucher einen Mehrwert, um dadurch zusätzliche Einnahmen zu generieren.

Derzeit gibt es keine direkten Verfahren zum Bestimmen des Lastwinkels einer Synchronmaschine. Er kann nur mathematisch berechnet werden. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung definiert sichere Lastwinkel-Betriebsgrenzen basierend auf einer Berechnung eines Lastwinkels, um die Maschine selbst während großer transienter Ausschläge in einer sicheren, stabilen Betriebszone zu halten.

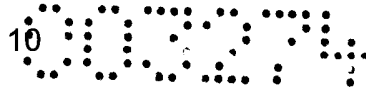
Die Fähigkeit einer Synchronmaschine, während einer großen Spannungs- oder Frequenz-Transienten synchronisiert zu bleiben, ist durch den Betriebslastwinkel der Maschine definiert. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung bestimmt mathematisch die Position des Maschinenrotorflusses in Bezug auf den Statorfluss, um den



Lastwinkel der Maschine innerhalb eines bestimmten Bereiches von Referenzwerten zu halten, die durch die Fähigkeit der Maschine, in einer stabilen Weise zu arbeiten, bestimmt sind. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung hält den Maschinenlastwinkel durch Anpassen der Maschinen-Felderregung innerhalb des bestimmten Bereiches von Referenzwerten, während sichergestellt wird, dass die Maschine in einer stabilen Weise arbeitet. Wenn die Felderregung/stärke aufrechterhalten wird, um eine größere Maschinenstabilität zu erreichen, verbessert dies den zuverlässigen Betrieb der Gas- oder Dampfturbine, welche die Maschine in dem Energieversorgungsnetz antreibt. Mit zunehmenden Anforderungen, Synchronmaschinen bei voreilenden Leistungsfaktoren zu betreiben, sieht das verbesserte Felderregungs-Steuerungsmerkmal der vorliegenden Erfindung eine Steuerung des Maschinen-Lastwinkels mit einer Fähigkeit vor, minimale transiente und dynamische Maschinen-Stabilitätsgrenzen sicherzustellen.

Fig. 1 ist ein Grundriss-Prinzipschaubild eines einfachen Synchrongenerators 10, das seinen Rotor 12 und Stator 14 und deren entsprechende Wicklungen zeigt. Die Wicklungen umfassen eine Feldwicklung 16, die auf dem Rotor 12 angeordnet ist, und eine Ankerwicklung 18, die auf dem Stator 14 angeordnet ist. Die Feldwicklung 16 erzeugt ein Magnetfeld mit einem Magnetfluss 19 infolge eines durch die Feldwicklung 16 fließenden Gleichstromes. Fig. 2 ist ein seitliches Aufriss-Prinzipschaubild des Synchrongenerators 10, das auch den Rotor 12 und den Stator 14 sowie Schleifringe 20 und Bürsten 22 zeigt, mit deren Hilfe der Gleichstrom zu dem Rotor 12 fließt.

Wenn der durch die Feldwicklung 16 erzeugte Magnetfluss 19 mit der Ankerwicklung 18 in Wechselwirkung tritt, wird eine Wechselstromspannung in der Ankerwicklung 18 induziert. Wenn der durch die Gleichstrom-Feldwicklung entwickelte Magnetfluss einen Luftspalt zwischen der Rotor- und der Statorwicklung überquert, wird eine Si-

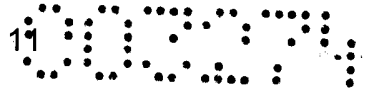


nussspannung an den Generatorausgangsklemmen mithilfe eines Prozesses entwickelt, der als elektromagnetische Induktion bezeichnet wird.

Die Höhe der erzeugten Wechselstromspannung ist durch die Menge des der Feldwicklung 16 zugeführten Gleichstromes gesteuert. Bei großen Generatoren werden Erreger verwendet, um den Gleichstrom zu erzeugen, der verwendet wird, um die Generatorklemmenspannung zu steuern.

Fig. 3 ist ein Prinzipschaubild, das eine Generatorerregungssteuerung zeigt, welche einen Erreger 24 umfasst, der verwendet wird, um die Generator-Felderregung zu steuern, und einen Spannungsregler 26 umfasst, der verwendet wird, um die Höhe der Generatorklemmenspannung zu steuern. Stromwandler (CTs) 28 überwachen den Statorstrom, während Spannungswandler (PTs) 30 die Generatorklemmenspannung überwachen. Mit dem Leistungsspannungswandler (PPT)-Regler 29 kann die Erregungssteuerung die Wirkung der Erreger-Zeitkonstante durch Einbauen einer direkten Messung der/des Generator-Feldspannung und -Feldstromes desensibilisieren, um die Geschwindigkeit eines Ansprechens auf Systemtransienten zu verbessern.

Ein „Zeiger“ ist eine skalierte Linie, die als ein „Vektor“ bezeichnet wird und deren Länge eine Wechselstrommenge darstellt, die sowohl eine Größe („Spitzenamplitude“) als auch eine Richtung („Phase“) an einem bestimmten fixen Zeitpunkt aufweist. In einem rotierenden Synchrongenerator wird ein Zeigerdiagramm von rotierenden Vektoren in der Regel in dem rotierenden, synchronen dq -Rahmen des Rotors des Generators gezeigt. In dem rotierenden, synchronen dq -Rahmen wird die Achse der Feldwicklung in der Richtung des Gleichstromfeldes als die Rotor-Längsachse oder die d -Achse bezeichnet. Neunzig (90) Grad nach der d -Achse befindet sich die Querachse oder die q -Achse. Da ein Zeigerdiagramm gezeichnet werden kann, um jeden



Augenblick und damit jeden Winkel darzustellen, wird der Referenzzeiger oder -vektor einer wechselnden Größe entlang der horizontalen Achse des Zeigerdiagrammes gezeichnet. Alle Vektoren sind in einer Richtung gegen den Uhrzeigersinn rotierend gezeichnet. Alle Vektoren vor den Referenzvektoren werden als „voreilend“ bezeichnet, während alle Vektoren nach dem Referenzvektor als „nacheilend“ bezeichnet werden.

Fig. 4 ist ein Zeigerdiagramm für einen Synchrongenerator, der in einem Modus mit nacheilendem Leistungsfaktor infolge einer induktiven Last arbeitet. Die Klemmenspannung \check{E}_t ist entlang der horizontalen Achse des Zeigerdiagrammes gezeichnet und ist somit der Referenzvektor in dem Zeigerdiagramm von Fig. 3. Der Klemmenstrom \check{I}_t ist in Fig. 3 als der Klemmenspannung \check{E}_t um einen Winkel Φ nacheilend gezeigt, der dem Phasenunterschied, d. h. dem Phasenwinkel zwischen der Klemmenspannung \check{E}_t und dem Klemmenstrom \check{I}_t entspricht.

Die in der Generator-Statorwicklung \check{E}_q induzierte innere Spannung wird durch das mit der Statorwicklung in Wechselwirkung stehende Rotor-Magnetfeld erzeugt. In der Regel ist die in einem Synchrongenerator \check{E}_q innen induzierte Spannung nicht die an den Klemmen des Generators auftretenden Spannung \check{E}_t , da die innen induzierte Generatorspannung der Klemmenspannung des Generators nur entspricht, wenn kein Ankerstrom in der Maschine vorhanden ist. Somit ist der Lastwinkel δ_i der Winkel zwischen der inneren Spannung \check{E}_q und der Klemmenspannung \check{E}_t .

Der „Leistungsfaktor“ ist definiert als der Cosinus des Phasenwinkels Φ ($\cos \Phi$) zwischen der Klemmenspannung E_t und dem Klemmenstrom \check{I}_t . Der Phasenwinkel Φ kann in einem Bereich zwischen -90° und $+90^\circ$ liegen, so dass er als voreilend oder nacheilend bezeichnet werden kann. Ein nacheilender Leistungsfaktor liegt vor, wenn der Strom der Spannung nacheilt. Im Kontext der Stromerzeugung bedeutet dies,

dass der Generator Blindleistung in das Energieversorgungsnetz einspeist. Ein voreilender Leistungsfaktor liegt vor, wenn der Strom der Spannung voreilt. Das bedeutet, dass der Generator die Blindleistung aus dem Energieversorgungsnetz aufnimmt.

Induktive Lasten, wie z. B. Motoren, weisen nacheilende Leistungsfaktoren auf, so dass industrielle Anlagen dazu neigen, dass sie aufgrund der großen Anzahl von elektrischen Induktionsmotoren, deren Wicklungen, wie an der Stromversorgung zu sehen, als Induktoren wirken, einen „nacheilenden Leistungsfaktor“ aufweisen.

Die mathematische Gleichung zum Berechnen des Lastwinkels einer Synchronmaschine, die in einem Modus mit einem nacheilenden Leistungsfaktor arbeitet, dessen Zeigerdiagramm in Fig. 3 gezeigt ist, lautet wie folgt:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{X_q I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right)$$

wobei X_q die Statoranker-Reaktanz ist und R_a der Statoranker-Widerstand ist. Als solches definiert das Produkt $X_q \check{I}_t$ die Abnahme der inneren induzierten Spannung \check{E}_q in der Generator-Statorwicklung infolge der Stator-Reaktanz, während das Produkt $R_a \check{I}_t$ die Abnahme der inneren induzierten Spannung \check{E}_q in der Generator-Statorwicklung infolge des Stator-Widerstandes definiert.

Der Lastwinkel δ_i ist der Kehrwert des Tangens dieses Winkels, der der Seite des in dem Zeigerdiagramm von Fig. 4 gezeigten Dreiecks gegenüber dem Lastwinkel δ_i gebrochen durch die Seite des in dem Zeigerdiagramm von Fig. 4 gezeigten Dreiecks benachbart zu dem Lastwinkel δ_i entspricht. Aus dem Zeigerdiagramm von Fig. 4 ist ersichtlich, dass die Seite des Dreiecks gegenüber dem Lastwinkel δ_i als $X_q \check{I}_t \cos \phi$ minus $R_a \check{I}_t \sin \phi$ definiert ist. Gleichermäßen ist aus dem Zeigerdiagramm von

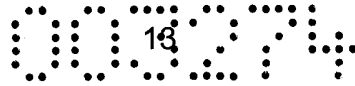


Fig. 4 ersichtlich, dass die Seite des Dreiecks benachbart zu dem Lastwinkel δ_i als die Klemmenspannung \check{E}_t plus $R_a \check{I}_t \cos \Phi$ plus $X_q \check{I}_t \sin \Phi$ definiert ist.

Fig. 5 ist ein Blockdiagramm eines Steuerungssystems, das eine Erregungssteuerung für den Generator 10 umfasst. Die Erregungssteuerung umfasst einen Automatischen Spannungsregler (AVR) 40, der die Generatorklemmenspannung über Änderungen bei Last- und Betriebszuständen konstant aufrechterhält. Der AVR 40 erzeugt einen FVR-Verfolgungswert-Sollwerteingang 41 in einen Feldspannungsregler (FVR) 42, welcher die Generator-Feldspannung steuert. Der FVR 42 ist ein manueller Regler, der die Generator-Feldspannung 43 als einen Rückkoppelungseingang verwendet. Ein Automatischer Spannungsregler-Sollwertblock (EXASP) 44 kombiniert eine Anzahl von Funktionen, um einen Referenzeingang (AVR-Sollwert und -verfolgungswert) 45 an den AVR 40 zu erzeugen. Der AVR-Sollwert wird mit anderen unterstützenden Stabilisierungs- und Schutzsignalen in dem EXASP-Block 44 kombiniert, um die Referenz 45 an den AVR 40 zu bilden. Ein Autoregler-Referenz (AUTO REF)-Block 46, der externe Bedienerbefehle, wie z. B. das Erhöhen und Verringern von Eingängen, von direkten Eingängen oder über eine Datenverbindung von einer Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS)-Bedienerstation empfängt, erzeugt eine Autosteuerungs (AC)-Sollwertvariable für den EXASP 44. Allerdings wird gemäß der vorliegenden Erfindung der Sollwerteingang an den EXASP-Block von dem AUTO REF 46 durch die Lastwinkelsteuerung 48 hindurchgeleitet, die den Sollwerteingang 47 an den EXASP 44 basierend auf einer Berechnung eines Lastwinkels für die Maschine 10 mithilfe der oben dargelegten mathematischen Lastwinkelberechnungsgleichung und auf einer Bestimmung, ob der berechnete Lastwinkel innerhalb des definierten Lastwinkelbereiches für einen synchronisierten Betrieb für die Maschine 10 liegt modifiziert (oder nicht). Die (nicht) modifizierten Vorgabewerte 47 werden in einen automatischen Maschinenspannungsregler-Summierknoten 49 durch einen zusätzlichen Eingang 50, wie in Fig. 6 gezeigt, hindurch eingegeben, wie in Fig. 6



gezeigt, wobei die Maschinen-Felderregung entweder erhöht oder verringert wird. Die Komponenten, wie z. B. 40, 42, 44, 46 und 48, der Erregungssteuerung können mithilfe eines oder mehrerer Prozessoren, welche/r in einer nicht flüchtigen Speichervorrichtung gespeicherte Ausführungsanweisungen ausführt/en, implementiert werden.

Fig. 6 ist ein detaillierteres Blockdiagramm des Automatischen Spannungsregler-Sollwertblockes (EXASP) 44 von Fig. 5 und zeigt den Summierknoten 49 und den (nicht) modifizierten Vorgabewert ASP_EX 50- Eingang in den Summierknoten 49.

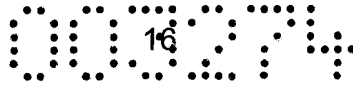
Fig. 7 ist ein Flussdiagramm 60 für einen Rotorwinkel-Steuerungsalgorithmus, das die Schritte eines Verfahrens zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer stabilen Betriebszone während großer transienter Spannungsausschläge zeigt. Damit die Maschine während einer großen Spannungs- oder Frequenztransienten synchronisiert bleibt, wird der Betriebslastwinkel der Maschine, d. h. der Winkel zwischen dem rotierenden Magnetfeld des rotierenden Rotors und dem in der Statorwicklung induzierten rotierenden Magnetfeld berechnet. Nachdem der Lastwinkel der Maschine berechnet wurde, erfolgt eine Bestimmung, ob der Lastwinkel innerhalb eines definierten Bereiches von Lastwinkelwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb liegt. Wenn nicht, wird der Lastwinkel durch Anpassen der Felderregung modifiziert, um sicherzustellen, dass der Betrieb der Maschine innerhalb ihrer Fähigkeit liegt, in einer stabilen Weise zu arbeiten. Der definierte Bereich von Lastwinkelwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb kann in einem Bereich von null bis neunzig Grad (0° und 90°) liegen.

Wendet man sich dem Flussdiagramm von Fig. 7 zu, aktiviert nach dem Start-Schritt 60 der nächste Schritt 61 die Lastwinkelsteuerung 48 und definiert dann vorab den Lastwinkelbereich für einen stabilen Betrieb des Generators 10. Diese Schritte wer-

den über eine MMS ausgeführt, die von dem Bediener des Generators verwendet wird, um seinen Betrieb zu steuern. Wenn bei Schritt 62 keine Maschinenstörungen oder PT-Defekte detektiert werden und der Erreger 24 sich in einem automatischen (AUTO) Betriebsmodus befindet, wird bei Schritt 63 eine Rückmeldung an die MMS gesendet, dass die „LASTWINKELSTEUERUNG AKTIV“ ist. Auch wird, wenn bei Schritt 62 keine Maschinenstörungen oder PT-Defekte detektiert werden und der Erreger sich in dem AUTO-Modus befindet, bei Schritt 64 eine Lastwinkelberechnung in dem Erreger 24 aus den Statorparametern durchgeführt, die in Bezug auf die oben dargelegte mathematische Gleichung zum Berechnen des Lastwinkels einer in einem Modus mit einem nacheilenden Leistungsfaktor arbeitenden Synchronmaschine definiert sind. Die Lastwinkelberechnung kann in der Lastwinkelsteuerung 48 durchgeführt werden. Die Lastwinkelsteuerung kann auch die Steuerung des Erregers umfassen.

Wenn bei Schritt 62 eine Maschinenstörung oder ein PT-Defekt detektiert wird oder wenn der Erreger sich nicht in dem AUTO-Modus befindet, wird der Rotor-Steuerungsalgorithmus bei Schritt 67 beendet.

Bei Schritt 65 erfolgt in der Lastwinkelsteuerung 48 eine Bestimmung, ob der Maschinen-Lastwinkel δ_i innerhalb des vordefinierten Bereiches von Werten liegt. Wenn ja, wird der Schritt 64 zum Berechnen des Lastwinkels wiederholt und die Schleife, die diesen Schritt enthält, wird wiederholt, es sei denn, dass und bis der Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten Bereiches von Lastwinkelwerten liegt. Wenn bei Schritt 65 eine Bestimmung erfolgt, dass der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten Bereiches von Lastwinkelwerten liegt, modifiziert die Lastwinkelsteuerung 48 bei Schritt 66 die Werte an ASP_EX 50, die den AVR-Sollwert modulieren, so dass ein Lastwinkel in vordefinierten Grenzen gehalten wird, wozu das Steuerungssystem die Maschinen-Felderregung entweder erhöhen oder verringern würde. Die

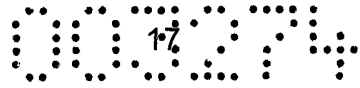


Modifizierung der Werte an ASP_EX ist ein zusätzlicher Eingang in den AVR-Summierknoten 49. Außerdem könnten, wenn die Modulation des AVR-Sollwerts stattfindet, die externen ERHÖHEN/SENKEN-Befehle, die verwendet würden, in einem Anwendungsschalter verhindert werden, wenn der Betriebspunkt auf die Grenzen des vordefinierten Bereiches von Lastwinkelwerten trifft. In jedem Fall wird, nachdem Schritt 66 der Lastwinkelsteuerung zum Modifizieren der Werte bei ASP_EX ausgeführt wurde, der Schritt 65 zum Bestimmen, ob der Lastwinkel innerhalb eines vordefinierten Bereiches von Werten liegt, durch die Lastwinkelsteuerung 48 wiederholt. Danach ist der nächste Schritt das Ende 67.

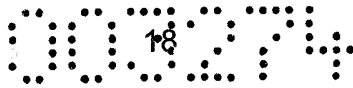
Somit berechnet das Verfahren der vorliegenden Erfindung mathematisch einen Lastwinkel einer Maschine, d. h. die Position des Rotorflusses in Bezug auf die Position des Statorflusses, und ermöglicht die Beibehaltung des Lastwinkels der Maschine innerhalb eines definierten Bereiches von Referenzwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb durch Anpassen der Felderregung der Maschine.

Die Feldstärke wird aufrechterhalten, um eine größere Maschinenbetriebsstabilität zu erreichen, die den zuverlässigen Betrieb von Gas- und Dampfturbinen, die mit einem Synchrongenerator in dem Energieversorgungsnetz verbunden sind, selbst während großer Spannungs- oder Frequenzausschläge verbessert. Das Verfahren der vorliegenden Erfindung gestattet eine sorgfältige Überwachung eines Lastwinkels einer Maschine, um stabile Maschinenbetriebszustände aufrechtzuerhalten, unabhängig davon, ob die Maschine unter einer VAR- oder einer PF-Steuerung steht. Bedeutensamerweise verleiht diese Stabilität dem zuverlässigen Betrieb für Verbraucher einen Mehrwert, um dadurch zusätzliche Einnahmen zu generieren.

Während die Erfindung in Verbindung damit beschrieben wurde, was gegenwärtig als praktikabelste und bevorzugte Ausführungsform betrachtet wird, sollte verständlich

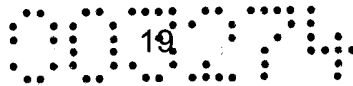


sein, dass die Erfindung nicht auf die offenbarte Ausführungsform begrenzt ist, sondern vielmehr verschiedene Abwandlungen und gleichwertige Einrichtungen abdecken soll, die innerhalb des Geistes und des Schutzzumfanges der beigefügten Ansprüche liegen.



Patentansprüche:

1. Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer stabilen Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge, wobei die Maschine einen Erreger umfasst, wobei das Verfahren umfasst, dass:
 - ein Lastwinkelbereich vordefiniert wird, in dem ein stabiler Betrieb der Maschine stattfindet;
 - eine Lastwinkelberechnung für die Maschine durchgeführt wird;
 - bestimmt wird, ob der berechnete Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches für die Maschine liegt;
 - wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, die Lastwinkelberechnung für die Maschine und die Bestimmung, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, wiederholt werden, bis der Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt; und
 - wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, die Maschinen-Felderregung modifiziert wird, um den Maschinenlastwinkel zurück in den vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereich zu bringen;
 - wobei die Synchronmaschine während großer transienter Spannungs- und Frequenzausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Durchführen der Lastwinkelberechnung für die Maschine in dem Erreger durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Vordefinieren eines Lastwinkelbereiches, in dem ein stabiler Betrieb der Maschine stattfindet, an einer



Mensch-Maschine-Schnittstelle stattfindet, die verwendet wird, um den Betrieb der Maschine zu steuern.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Ändern der Maschinen-Felderregung durch Modifizieren des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches und Eingeben des modifizierten vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches in einen automatischen Maschinenerreger-Spannungsregler durchgeführt wird, um die Maschinen-Felderregung zu ändern.
5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Bestimmen, ob der Maschinenlastwinkel innerhalb eines vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt, durch Vorsehen einer Lastwinkelsteuerung durchgeführt wird, die bestimmt, ob der berechnete Lastwinkel innerhalb des vordefinierten stabilen Betriebslastwinkelbereiches liegt.
6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der vordefinierte stabile Betriebslastwinkelbereich in einem automatischen Maschinenerreger-Sollwertblock gespeichert wird, der Teil einer Maschinen-Erregungssteuerung ist.
7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Modifizieren der Maschinen-Felderregung durch Modifizieren eines Maschinenfeldstromes durchgeführt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der definierte Bereich von Lastwinkelwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb zwischen null und 90 Grad liegt.
9. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Synchronmaschine als ein Generator oder ein Synchronkondensator oder -motor arbeitet.

10. Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge, wobei die Maschine einen Erreger umfasst, wobei das Verfahren umfasst, dass:
- ein Lastwinkelbereich definiert wird, in dem ein stabiler und synchronisierter Betrieb der Maschine stattfindet;
 - der Erreger eine Lastwinkelberechnung für die Maschine durchführt;
 - eine Lastwinkelsteuerung vorgesehen wird, die bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches liegt, in dem der stabile und synchronisierte Betrieb der Maschine stattfindet;
 - wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Erreger die Durchführung der Lastwinkelberechnung für die Maschine wiederholt und die Lastwinkelsteuerung bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Werten liegt, bis der Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt; und
 - wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Maschinenerreger die Werte an einem automatischen Erreger-Sollwert modifiziert, der einen automatischen Spannungsregler-Sollwert in vordefinierten Grenzen moduliert, um die Maschinen-Felderregung entweder zu erhöhen oder zu verringern;
- wobei die Synchronmaschine während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei der Schritt zum Vordefinieren eines Lastwinkelbereiches, in dem ein stabiler Betrieb der Maschine stattfindet, an einer Mensch-Maschine-Schnittstelle stattfindet, die verwendet wird, um den Betrieb der Maschine zu steuern.



12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei der automatische Erreger-Sollwertblock Teil eine Maschinen-Erregungssteuerung ist.
13. Verfahren nach Anspruch 10, wobei der Schritt zum Modifizieren der Maschinen-Felderregung durch Modifizieren eines/r Maschinenfeldstromes oder -spannung durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 10, wobei der definierte Bereich von Lastwinkelwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb zwischen null und neunzig Grad liegt.
15. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Synchronmaschine als ein Generator arbeitet.
16. Verfahren zum Halten einer Synchronmaschine innerhalb einer sicheren Betriebszone während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge in einem Energieversorgungsnetz, mit dem die Maschine verbunden ist, wobei die Maschine einen Erreger umfasst, wobei das Verfahren umfasst, dass:
 - eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Steuern eines Betriebes der Maschine verwendet wird, um einen Lastwinkelbereich zu definieren, in dem ein stabiler und synchronisierter Betrieb der Maschine stattfindet;
 - der Erreger eine Lastwinkelberechnung für die Maschine durchführt;
 - eine Lastwinkelsteuerung vorgesehen wird, die bestimmt, ob der Lastwinkel innerhalb eines vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, die in einem automatischen Maschinenerreger-Sollwertblock gespeichert sind;
 - wenn der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Erreger die Durchführung der Lastwinkelberechnung für die Maschine wiederholt und die Lastwinkelsteuerung die Bestimmung wiederholt, ob der Lastwinkel innerhalb des vordefinierten Bereiches von Werten liegt, bis der

Lastwinkel nicht mehr innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt; und

wenn der Lastwinkel nicht innerhalb des vordefinierten Bereiches von Sollwerten liegt, der Maschinenerreger die Werte an einem automatischen Erreger-Sollwert modifiziert, der einen automatischen Spannungsregler-Sollwert in vordefinierten Grenzen moduliert, um die Maschinen-Felderregung entweder zu erhöhen oder zu verringern;

wobei die Synchronmaschine während großer transienter Spannungs- oder Frequenzausschläge innerhalb einer sicheren Betriebszone gehalten wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der automatische Erreger-Sollwertblock Teil einer Maschinen-Erregungssteuerung ist.
18. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Schritt zum Modifizieren der Maschinen-Felderregung durch Modifizieren eines/r Maschinenfeldstromes oder -spannung durchgeführt wird.
19. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der definierte Bereich von Lastwinkelwerten für einen stabilen Maschinenbetrieb zwischen 0° und 90° liegt.
20. Verfahren nach Anspruch 16, wobei die Synchronmaschine als ein Generator oder Motor arbeitet.

00374

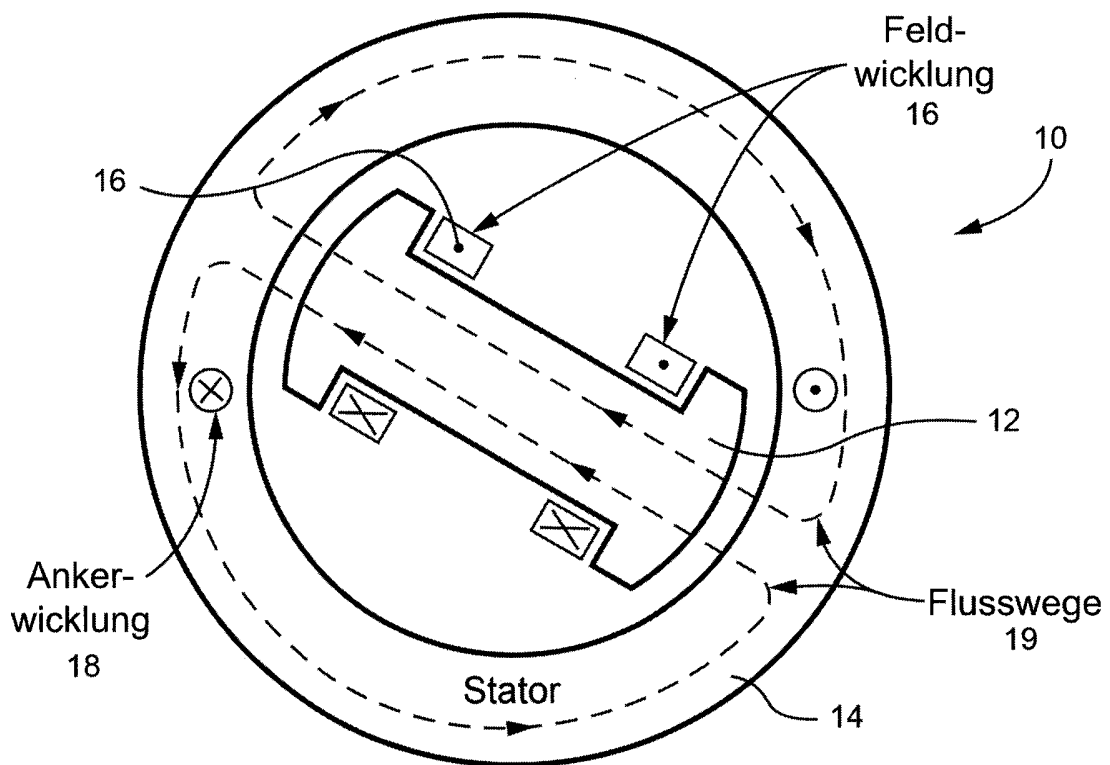


FIG. 1

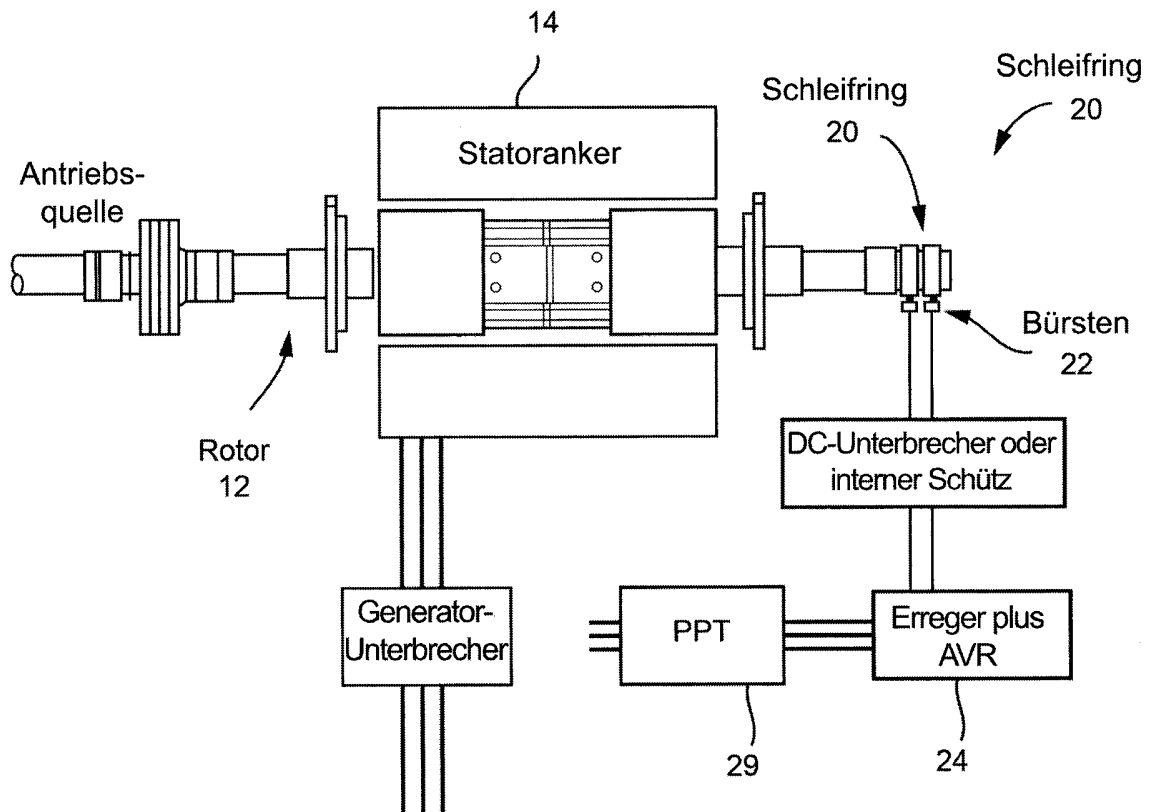
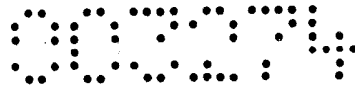
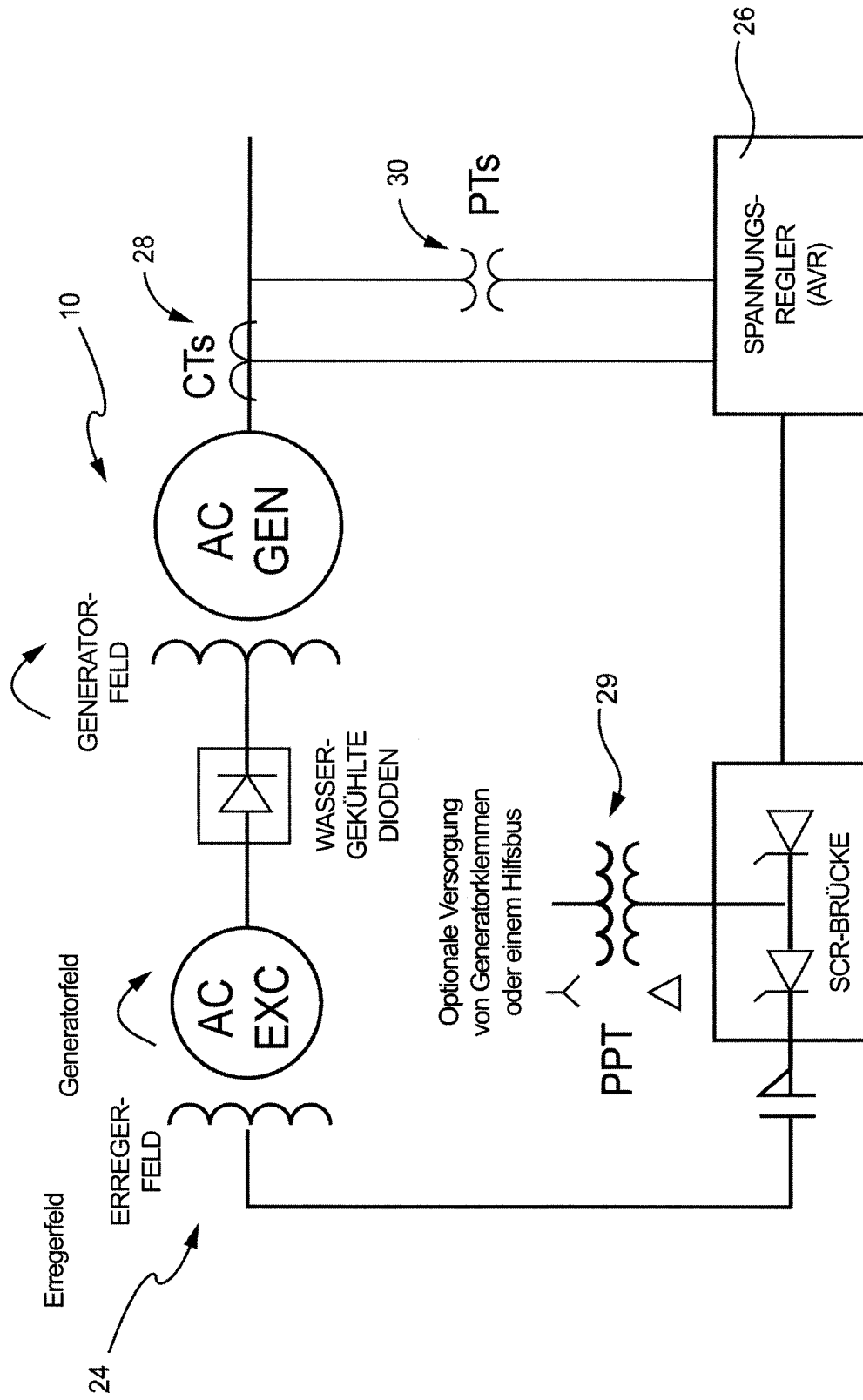


FIG. 2



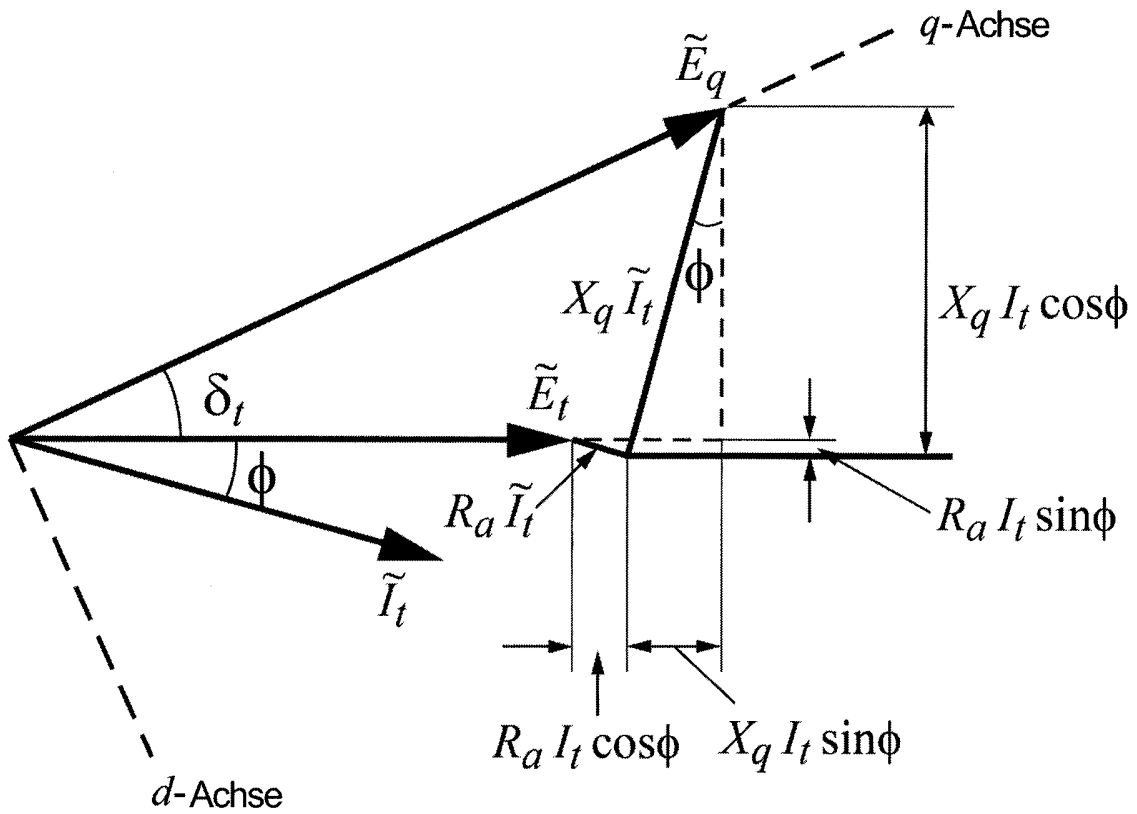


FIG. 4

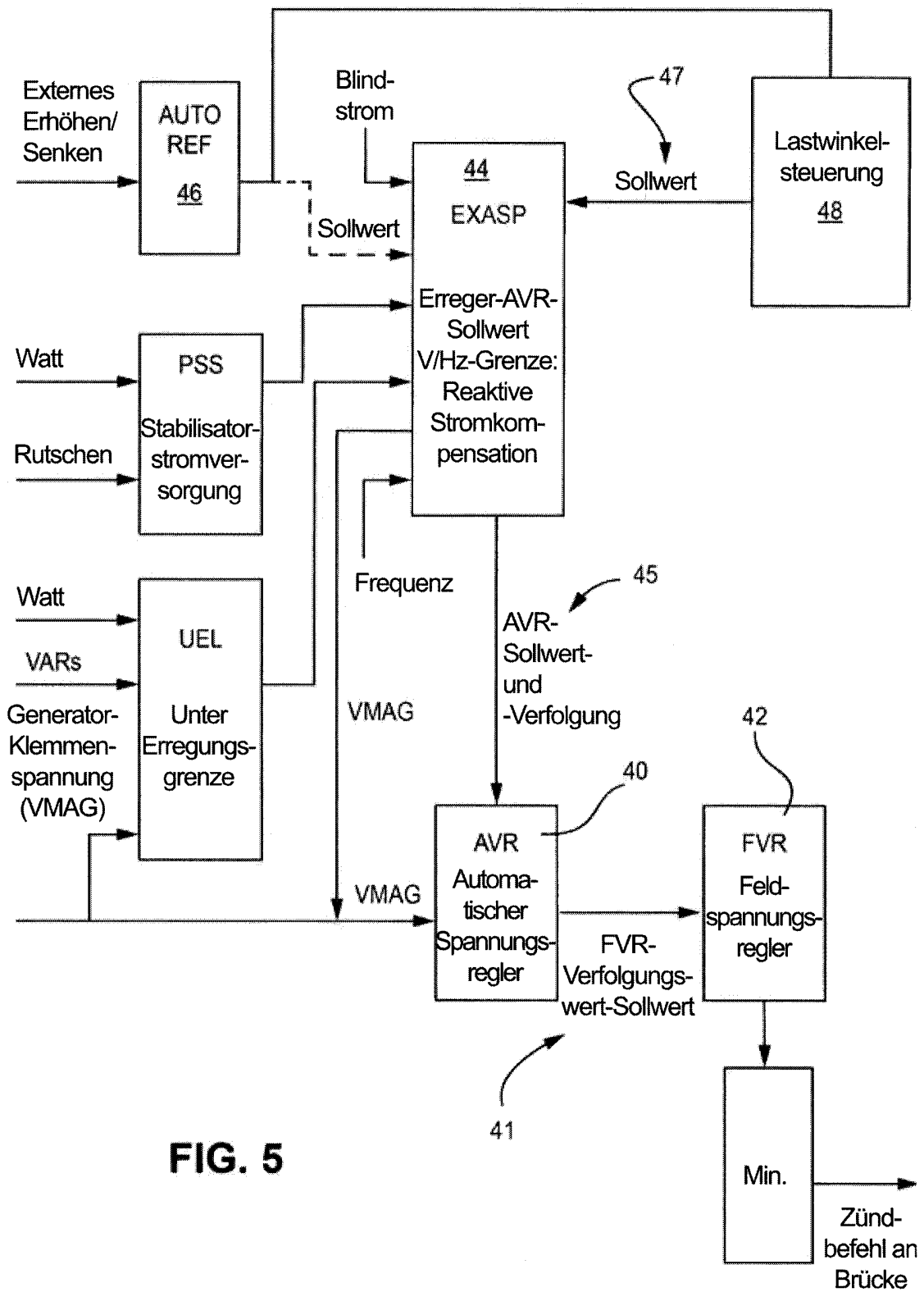
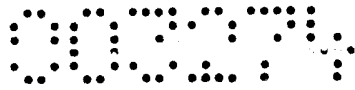


FIG. 5

40

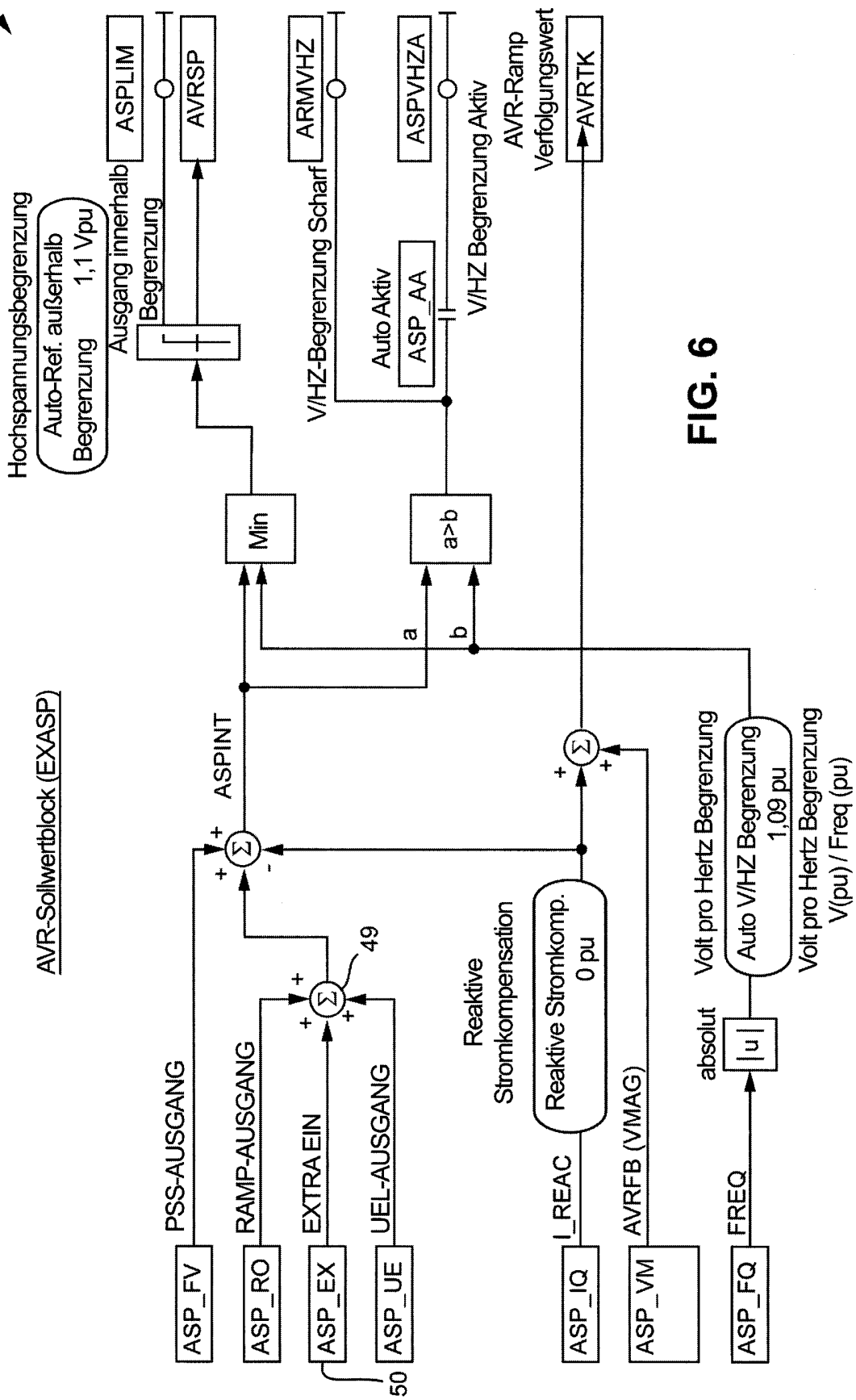


FIG. 6

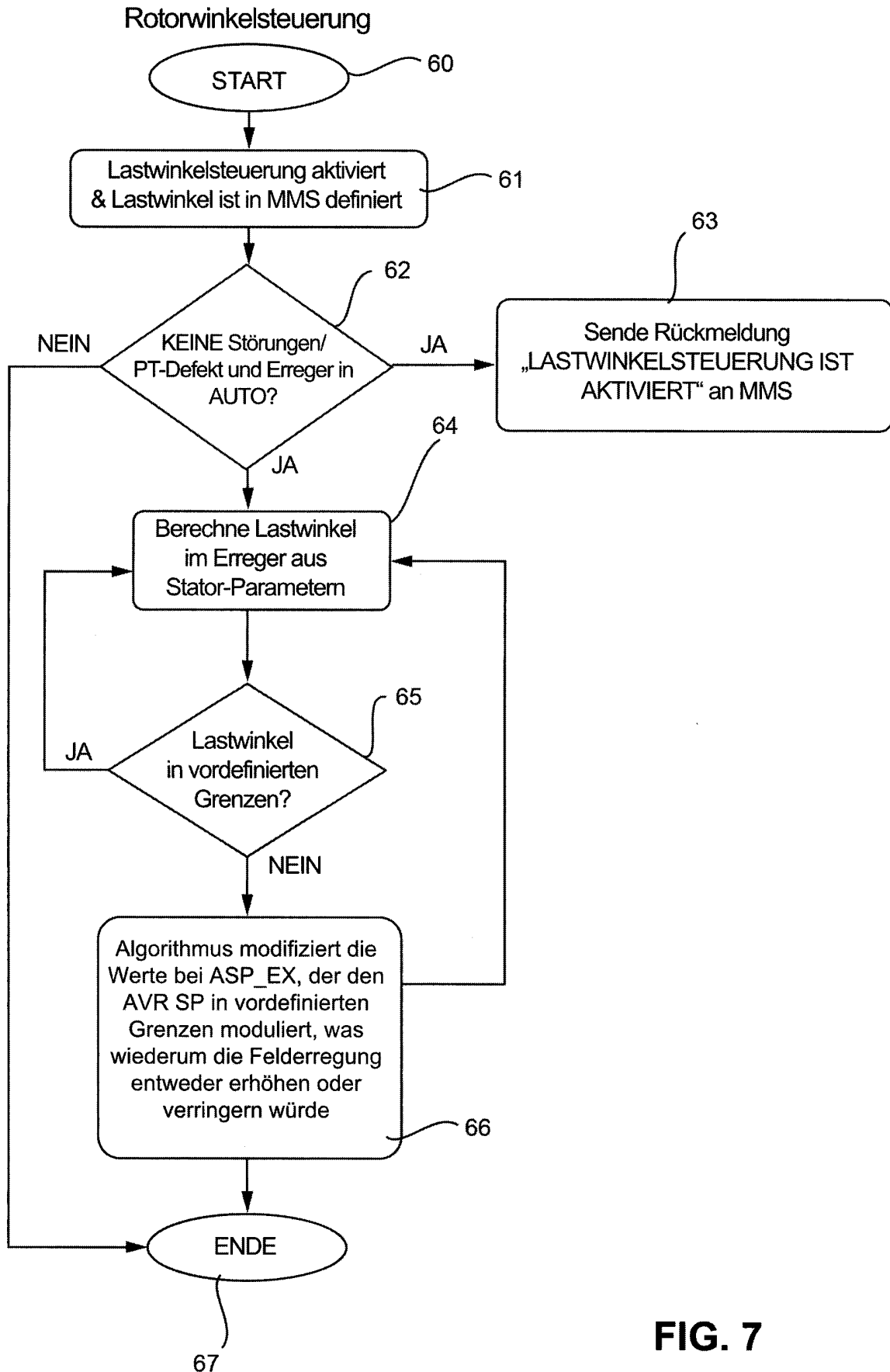
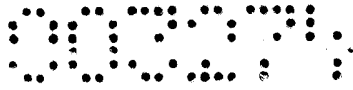


FIG. 7