



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 049 861 B3 2010.06.02**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 049 861.0**
 (22) Anmeldetag: **01.10.2008**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **02.06.2010**

(51) Int Cl.⁸: **G01M 13/02 (2006.01)**
G01M 13/04 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Universität Bremen, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:
Fink Numrich Patentanwälte, 80634 München

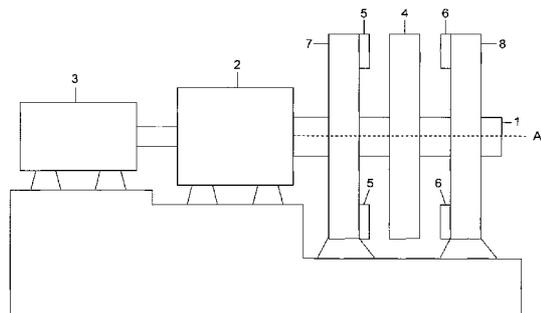
(72) Erfinder:
Orlik, Bernd, 27793 Wildeshausen, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

DD	18 206	A
WO	2004/0 42 227	A1
DE	10 2004 021412	A1
US	2008/01 64 697	A1
WO	2004/0 27 961	A1
EP	15 64 405	A1
WO	2007/1 14 003	A2

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zum Nachbilden der Kraffteinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente auf zumindest eine Antriebskomponente eines Antriebsstrangs**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Nachbilden der Kraffteinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente, insbesondere der Rotorblätter einer Windenergieanlage, auf zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) eines Antriebsstrangs. Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst einen Axialfeldmotor zum Antrieb einer Antriebswelle (1), welche mit der zumindest einen Antriebskomponente (2, 3) koppelbar ist, wobei der Axialfeldmotor zumindest einen Rotor (4) und zumindest einen Stator (5, 6) sowie zumindest eine Wicklung (501, 601) zur Erzeugung zumindest eines axialen Magnetfelds aufweist. Die Vorrichtung verfügt ferner über eine Stromspeisung (11a, 11b, 11c), mit der die zumindest eine Wicklung (501, 601) im Betrieb der Vorrichtung derart mit Strom oder Strömen gespeist wird, dass bei Kopplung der Antriebswelle (1) mit der zumindest einen Antriebskomponente (2, 3) die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) wirkenden Kräfte nachgebildet werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Nachbilden der Kraftereinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente, insbesondere der Rotorblätter einer Windenergieanlage, auf zumindest eine Antriebskomponente eines Antriebsstrangs, wie z. B. auf Getriebe, Motor, Lager, Bremse und dergleichen.

[0002] In technischen Anlagen, in welchen durch ein oder mehrere mechanische Antriebselemente ein Antriebsstrang angetrieben wird, kommt es durch diese zu hohen Kraftereinwirkungen auf den Antriebsstrang. Dabei interessieren insbesondere die durch die Antriebselemente auf weitere Antriebskomponenten des Antriebsstrangs wirkenden Kräfte, da diese bei falscher Kraftereinwirkung zu hohen mechanischen Belastungen dieser Komponenten und hierdurch zu verkürzter Lebensdauer des entsprechenden Antriebs führen. Dieses Problem tritt verstärkt in Windenergieanlagen auf, welche für immer größere Leistungen im Megawattbereich entwickelt werden. Hierbei werden in den mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs der Windenergieanlage, d. h. in den Rotorblättern, der Nabe, dem Getriebe und dem Generator, enorme Drehmomente und Axialkräfte erzeugt. Die Axialkräfte, die durch die Windströmung auf die Rotorblätter der Windenergieanlage verursacht werden, sind dabei nicht gleichförmig, sondern eine variable Funktion der Zeit und darüber hinaus im Regelfall an jedem Rotorblatt unterschiedlich. Durch die ungleichmäßig an den Rotorblättern angreifenden Axial- und Umfangskräfte kommt es somit zu Torsionsmomenten und biegeelastischen Verformungen bzw. Schwingungen in allen mechanischen Komponenten des Antriebsstrangs der Windenergieanlage. Besonders hohe Belastungen treten dabei in den Lagern sowie im Getriebe auf. Demzufolge erreichen insbesondere die Getriebe von Windenergieanlagen bei weitem nicht die geforderte Lebensdauer von 20 Jahren.

[0003] Die Druckschrift DD 18206 A offenbart eine Vorrichtung zur Erprobung von Drucklagern, bei der über einen Elektromagneten mit einer Ringwicklung axial gerichtete Kräfte auf eine Welle ausgeübt werden, um hierdurch ein an einem Ende der Welle angeordnetes Drucklager zu prüfen.

[0004] In dem Dokument WO 2004/042227 A1 ist eine Synchronmaschine mit permanenterregtem Axialfeld zur Verwendung in einer Windkraftanlage beschrieben.

[0005] Das Dokument DE 10 2004 021 412 A1 offenbart eine Vorrichtung zur Anregung einer Torsionsschwingung in einem rotierenden Antriebsstrang, welche einen Energiewandler und einen Stromrichter umfasst, über den dem Antriebsstrang ein Anregungs-

drehmoment aufgeprägt werden kann.

[0006] In dem Dokument US 2008/0164697 A1 ist ein Windturbinengenerator mit einem System zur Steuerung des Luftspalts zwischen Stator und Rotor beschrieben.

[0007] Die Druckschrift WO 2004/027961 A1 offenbart eine elektrische Maschine, bei der die Anzahl an Stator-Polkernen größer ist als die Anzahl an Rotor-Polschuhen.

[0008] In den Dokumenten EP 1 564 405 A1 und WO 2007/144003 A2 sind Vorrichtungen zum Testen von Windturbinen beschrieben, bei denen die Kraftereinwirkung auf die zu prüfende Anordnung mit Hilfe von hydraulischen Aktuatoren simuliert wird.

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Nachbildung der Kraftereinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente auf zumindest eine Antriebskomponente eines Antriebsstrangs zu schaffen, um hierdurch auf einfache Weise auftretende mechanische Belastungen ohne die die Kraftereinwirkung tatsächlich verursachenden mechanischen Antriebselemente zu untersuchen.

[0010] Diese Aufgabe wird durch die Vorrichtung gemäß Patentanspruch 1 bzw. das Verfahren gemäß Patentanspruch 22 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

[0011] Die erfindungsgemäße Vorrichtung dient zum Nachbilden der Kraftereinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente, insbesondere der Rotorblätter einer Windenergieanlage, auf zumindest eine Antriebskomponente eines Antriebsstrangs. Die Vorrichtung umfasst einen Axialfeldmotor in der Form einer Drehfeldmaschine zum Antrieb einer Antriebswelle, welche mit der zumindest einen Antriebskomponente koppelbar ist, wobei der Axialfeldmotor zumindest einen Rotor und zumindest einen Stator sowie zumindest eine Wicklung zur Erzeugung zumindest eines axialen Magnetfelds aufweist. Hier und im Folgenden bedeutet „axial“ die Richtung parallel der Achse der Antriebswelle. Die Vorrichtung verfügt ferner über eine Stromspeisung, mit der die zumindest eine Wicklung im Betrieb der Vorrichtung derart mit Strom oder Strömen gespeist wird, dass bei Kopplung der Antriebswelle mit der zumindest einen Antriebskomponente die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente wirkenden Kräfte nachgebildet werden.

[0012] Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, dass durch eine geeignete Konstruktion und Stromspeisung eines Axialfeldmotors auf einfache Weise reproduzierbar die Kraftereinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente auf Antriebs-

komponenten eines Antriebsstrangs nachgebildet werden kann.

[0013] Erfindungsgemäß kann somit basierend auf vorhandenen Messdaten über die Axialkräfte bzw. Drehmomente von realen Antriebselementen die Bestromung der zumindest einen Wicklung eines Axialfeldmotors derart gesteuert werden, dass die gleichen Kräfte bzw. Drehmomente wie bei Betrieb mit den realen Antriebselementen auftreten. Eine Anpassung der Bestromung zur Erzeugung der erwünschten Axialkräfte bzw. Drehmomente ist dabei für den Fachmann bei Kenntnis über den mechanischen und elektrischen Aufbau der Axialfeldmaschine für beliebige Antriebselemente problemlos realisierbar. Es können dabei sowohl dynamische, d. h. sich zeitlich verändernde, als auch statische Drehmomente und/oder Axialkräfte je nach Anwendungsfall generiert werden.

[0014] In einer besonders einfachen Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann der Axialfeldmotor eine Drehfeldmaschine mit lediglich einer einzelnen Wicklung auf einem Stator und einen zum Stator axial versetzten Rotor sein. Bei Bestromung der Wicklung wird ein axiales Magnetfeld zwischen Stator und Rotor erzeugt. Hierdurch wird ein Aufbau geschaffen, mit dem Kräfte nur auf einer Seite des Rotors wirken, wodurch entsprechende Axialkräfte generiert werden. Gegebenenfalls kann dieser Aufbau auch derart abgewandelt werden, dass die einzelne Wicklung nicht im Stator, sondern im Rotor vorgesehen ist.

[0015] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform umfasst der Axialfeldmotor zwei axial versetzte Wicklungen zur Erzeugung von axialen Magnetfeldern mit zumindest zwei unabhängigen axial versetzten Magnetkreisen. Zwei Magnetkreise sind dabei unabhängig, wenn die Magnetfeldlinien der Magnetkreise räumlich voneinander getrennt sind. Die axial versetzten Wicklungen sind in dieser Ausführungsform derart ausgestaltet, dass sie über die Stromspeisung mit unterschiedlich großen Strömen gespeist werden können, um bei Kopplung der Antriebswelle mit der zumindest einen Antriebskomponente die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente wirkenden Kräfte nachzubilden. Das heißt, die Stromstärke bzw. bei Wechselstrom die Amplitude und Phase in einer Wicklung kann sich von der Stromstärke bzw. Amplitude und Phase einer anderen Wicklung unterscheiden. Die geeignete Einstellung der Kraftereinwirkung wird dabei erst dadurch möglich, dass der Axialfeldmotor derart ausgestaltet ist, dass er im Betrieb unabhängige Magnetfelder mit zumindest zwei unabhängigen, axial versetzten Magnetkreisen generiert. Mit dieser Ausgestaltung des Axialfeldmotors werden zum einen entsprechende Tangentialkräfte und damit Drehmomente der Antriebselemente nachgebildet.

Zum anderen werden durch die unterschiedliche Bestromung der axial versetzten Wicklungen Axialkräfte generiert, welche entsprechend der nachzubildenden Kraftereinwirkung der Antriebselemente eingestellt werden können.

[0016] Für die erfindungsgemäße Vorrichtung können verschiedene Ausführungsformen von als Drehfeldmaschinen ausgestaltete Axialfeldmotoren eingesetzt werden. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform wird ein Synchronmotor mit Permanentterregung verwendet.

[0017] Insbesondere bei der Nachbildung der durch die Rotorblätter einer Windenergieanlage wirkenden Kräfte ist zu berücksichtigen, dass nicht die gleichen Axialkräfte entlang des Umfangs der Antriebswelle angreifen. Dies wird unter anderem durch die Befestigung der Rotorblätter an unterschiedlichen Stellen auf der Antriebswelle verursacht. Um auch sich in Umfangsrichtung verändernde Kraftereinwirkungen auf die Antriebswelle zu berücksichtigen, wird in einer besonders bevorzugten Ausführungsform der zumindest eine Rotor des Axialfeldmotors in mehrere Rotorsegmente aufgeteilt. Beispielsweise erfolgt die Aufteilung in drei Rotorsegmente, d. h. die Anzahl der Rotorsegmente entspricht der üblichen Anzahl von Rotorblättern in Windenergieanlagen. Jedes der Rotorsegmente ist dabei an unterschiedlichen Befestigungspositionen auf der Antriebswelle befestigt. Die Befestigungspositionen sind insbesondere derart gewählt, dass sie gleichmäßig um den Umfang der Antriebswelle verteilt sind. Vorzugsweise sind die Befestigungspositionen die gleichen wie bei Rotorblättern einer Windenergieanlage.

[0018] In einer bevorzugten Ausführungsform ist jedes Rotorsegment über eine oder mehrere Speichen an der Antriebswelle befestigt, wobei eine mechanisch stabile Befestigung insbesondere dann erreicht wird, wenn die Speichen gleichmäßig in Umfangsrichtung eines jeweiligen Rotorsegments verteilt sind.

[0019] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist der Aufbau des Axialfeldmotors derart, dass zwei axial versetzte Statoren mit dazwischen liegendem Rotor vorgesehen sind, wobei jeder Stator eine axial versetzte Wicklung enthält und der Rotor Permanentmagnete umfasst. Zur Erzeugung der beiden unabhängigen, axial versetzten Magnetkreise ist dabei der Rotor vorzugsweise derart ausgestaltet, dass er auf seinen axial gegenüberliegenden Seiten jeweils eine Vielzahl von Permanentmagneten mit Eisenrückschluss aufweist, wobei die axial gegenüberliegenden Seiten insbesondere durch ein magnetisch nicht leitendes und vorzugsweise auch elektrisch nicht leitendes Material voneinander getrennt sind. Als Material kann beispielsweise Glasfaser oder gegebenenfalls auch Aluminium verwendet werden. Die Permanentmagneten können in der an sich bekann-

ten Flachmagnetanordnung auf den gegenüberliegenden Rotorseiten befestigt sein. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, die Magnete in der sog. Sammleranordnung auf dem Rotor anzubringen. Die Sammleranordnung ist eine Anordnung der Magnete mit Flusskonzentration.

[0020] In einer weiteren, besonders bevorzugten Ausführungsform umfasst die Stromspeisung eine separate Wechselrichteranordnung für jede axial versetzte Wicklung, wobei jede Wechselrichteranordnung zumindest einen Wechselrichter mit zugehöriger Stromregelung aufweist. Durch die einzelnen separaten Wechselrichteranordnungen wird somit die gewünschte unterschiedliche Bestromung der beiden axial versetzten Wicklungen erreicht. Die Wechselrichter der Wechselrichteranordnung können dabei in dem Axialmotor integriert sein, sie können jedoch auch separat vom Axialmotor angeordnet sein.

[0021] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung kann eine Variation der Axialkräfte durch eine sich in Umfangsrichtung der Antriebswelle unterscheidende Bestromung umgesetzt werden. Dabei ist die zumindest eine Wicklung des Axialfeldmotors in Umfangsrichtung um die Antriebswelle in mehrere Wicklungssegmente unterteilt, welche mit verschieden großen Strömen gespeist werden können. Zur unterschiedlichen Bestromung wird vorzugsweise jedes Wicklungssegment über zumindest einen separaten Wechselrichter mit zugehöriger Stromregelung mit Strom gespeist.

[0022] In einer weiteren, besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Axialfeldmotor eine mehrpolige Drehfeldmaschine mit mehreren Wicklungssegmenten für die zumindest eine Wicklung, wobei jedes Wicklungssegment ein oder mehrere Polpaare umfasst. Je geringer die Anzahl der Polpaare pro Wicklungssegment, desto genauer können die Axialkräfte in Umfangsrichtung der Antriebswelle variiert werden. Die axial versetzten Wicklungen der Drehfeldmaschine können dabei eine Einschichtwicklung und/oder eine Mehrschichtwicklung und/oder eine Zahnspulenwicklung umfassen.

[0023] In einer weiteren, besonders bevorzugten Ausführungsform umfasst der Axialfeldmotor einen oder mehrere Sensoren zur Erfassung der mit dem Axialfeldmotor erzeugten Drehmomente und/oder Axialkräfte. Zur Generierung der nachzubildenden Kraftereinwirkung des oder der Antriebselemente wird in einer besonders bevorzugten Ausführungsform eine Kraft- und Drehmomentregelung verwendet, mit der die Ströme der Stromspeisung entsprechend den nachzubildenden Drehmomenten und Axialkräften eingestellt werden. Die Kraft- und Drehmomentregelung regelt dabei die Ströme vorzugsweise mit Hilfe der oben beschriebenen Sensoren, welche die Drehmomente bzw. Axialkräfte messen.

[0024] In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung umfasst die Vorrichtung einen oder mehrere Magnetfeldsensoren zur Erfassung eines oder mehrerer axialer Luftspalte zwischen dem zumindest einen Rotor und dem zumindest einen Stator des Axialfeldmotors.

[0025] Neben der oben beschriebenen Vorrichtung umfasst die Erfindung ferner ein Verfahren zum Nachbilden der Kraftereinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente, insbesondere der Rotorblätter einer Windenergieanlage, auf zumindest eine Antriebskomponente eines Antriebsstrangs unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Dabei wird die zumindest eine Wicklung über die Stromspeisung der Vorrichtung derart mit Strom oder Strömen gespeist, dass im gekoppelten Zustand der Antriebswelle mit der zumindest einen Antriebskomponente die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente wirkenden Kräfte nachgebildet werden.

[0026] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Figuren detailliert beschrieben.

[0027] Es zeigen:

[0028] Fig. 1 eine schematische Seitenansicht eines Prüfstands mit einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Nachbildung der Kraftereinwirkung von Rotorblättern einer Windenergieanlage auf eine Antriebswelle;

[0029] Fig. 2 eine Detailansicht des in der Ausführungsform der Fig. 1 verwendeten Axialmotors;

[0030] Fig. 3 eine Draufsicht auf den Axialmotor der Fig. 2; und

[0031] Fig. 4 eine schematische Darstellung von Teilen eines Rotors und einer Statorwicklung mit damit verbundenen Wechselrichtern gemäß einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0032] Die erfindungsgemäße Vorrichtung wird nachfolgend an einem Ausführungsbeispiel beschrieben, mit dem die Kraftereinwirkung von Rotorblättern einer Windenergieanlage nachgebildet wird. Nichtsdestotrotz kann die erfindungsgemäße Vorrichtung auch zur Nachbildung beliebiger anderer Antriebselemente, wie z. B. Turbinen, verwendet werden. Fig. 1 zeigt einen Prüfstand für eine Windenergieanlage mit einem Axialfeldmotor zur Nachbildung der durch die Rotorblätter der Windenergieanlage erzeugten Drehmomente und Axialkräfte. Der Prüfstand umfasst eine Antriebswelle **1**, durch welche die Axialrichtung A vorgegeben ist. Die Welle ist mit einem entsprechenden Getriebe **2** und einem Generator **3** einer Windenergieanlage gekoppelt. Anstatt die

Krafteinwirkung von realen Rotorblättern auf die Antriebswelle **1** zu analysieren, wird erfindungsgemäß die durch Wind verursachte Bewegung der Rotorblätter nachgebildet bzw. simuliert. Auf diese Weise können verschiedene Szenarien von Belastungen auf die Antriebswelle **1** und somit auf das Getriebe **2** und den Generator **3** der Windenergieanlage geprüft werden, ohne dass eine aufwändige Anbringung der Rotorblätter auf die Antriebswelle **1** erforderlich ist. Hierdurch können Kosten gespart werden.

[0033] Zur Nachbildung des Rotorblattantriebs wird gemäß der Ausführungsform der [Fig. 1](#) ein Axialfeldmotor in der Form eines permanentmagneterregten Synchronmotors verwendet. Der Motor umfasst einen sich mit der Antriebswelle **1** drehenden ringförmigen Rotor **4** sowie zwei in axialer Richtung links und rechts neben dem Rotor vorgesehene Statorn, welche ringförmige Aktivteile **5** und **6** und jeweilige Halterungen **7** und **8** für diese Aktivteile umfassen. Im Folgenden wird der Begriff „Stator“ als Synonym für die Aktivteile **5** bzw. **6** verwendet. Auf dem Rotor befinden sich auf jeder Seite eine Vielzahl von Permanentmagneten und jeder der Statorn **5** und **6** umfasst eine Drehfeldwicklung **501** bzw. **601** ([Fig. 2](#)), welche über eine separate Wechselrichtanordnung gespeist wird. Wenn die Statorwicklungen mit Strom durchflutet werden, bilden sich durch Wechselwirkung mit dem Permanentmagnetfeld des Rotors auf jeder Seite links und rechts vom Rotor sowohl magnetische Tangentialkräfte als auch Axialkräfte aus. Die Tangentialkräfte sind in Umfangsrichtung des Rotors gerichtet und bewirken das Drehmoment des Motors. Die Axialkräfte sind in Richtung der Achse **A** gerichtet und bilden den Axialschub. Die Kräfte werden durch axiale Magnetfelder verursacht, welche durch die Permanentmagnete des Rotors und den Stromfluss in den jeweiligen Statorwicklungen des Stators generiert werden.

[0034] In der Ausführungsform der [Fig. 1](#) ist der Rotor **4** derart ausgestaltet, dass sich links und rechts der in [Fig. 2](#) gezeigten Symmetrieachse **S** des Rotors zwei voneinander entkoppelte Magnetkreise ausbilden. Allgemein kann dies durch einen Rotor realisiert werden, bei dem entlang der Achse **S** ein feldfreier Raum ausgebildet ist. Beispielsweise kann die Ausbildung der entkoppelten Magnetkreise dadurch erreicht werden, dass die Permanentmagnete auf beiden Seiten des Rotors einen Eisenrückschluss aufweisen und entlang der Achse **S** ein magnetisch und vorzugsweise auch elektrisch nicht leitendes Material vorgesehen ist, wie z. B. ein Glasfasermaterial oder Aluminium. Erfindungsgemäß können die Ströme in den jeweiligen Statorwicklungen unabhängig voneinander eingestellt werden, wodurch aufgrund der sich hierdurch ausbildenden unterschiedlichen Magnetfelder auf jeder Seite des Rotors geeignet wirkende Axialkräfte erzeugt werden können, welche den Axialkräften eines realen Rotorblattantriebs ent-

sprechen. Bei einem herkömmlichen Axialfeldmotor ist eine derartige Erzeugung von Axialkräften unerwünscht. Im Unterschied hierzu wird erfindungsgemäß der Axialfeldmotor derart gesteuert, dass gezielt geeignete Axialkräfte generiert werden, um hierdurch einen Rotorblattantrieb nachzubilden.

[0035] Mit dem Axialfeldmotor der [Fig. 1](#) können sowohl statische Axialkräfte als auch sich zeitlich verändernde, dynamische Axialkräfte je nach nachzubildendem Szenario generiert werden. Bei der Nachbildung eines Rotorblattantriebs ist insbesondere auch die Befestigung der einzelnen Rotorblätter an der Antriebswelle **1** nachzubilden. Dies erfolgt in dem in [Fig. 1](#) wiedergegebenen Axialfeldmotor durch eine entsprechende Segmentierung des Rotors **4**, wie aus den vergrößerten Detailansichten gemäß [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) ersichtlich wird.

[0036] [Fig. 2](#) zeigt den Axialfeldmotor gemäß [Fig. 1](#) mit entsprechendem Rotor **4** sowie den beiden Statorringen **5** und **6**. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurden in [Fig. 2](#) die Halterungen **7** und **8** weggelassen. Die Statorn sind am oberen und unteren Ende geschnitten wiedergegeben, was durch eine entsprechende Schraffur angedeutet ist. Ferner sind schematisiert die Wicklungen **501** des Stators **5** bzw. **601** des Stators **6** angedeutet. Die Position des Rotors **4** gemäß [Fig. 2](#) ist derart gewählt, dass ersichtlich wird, dass der Rotor in mehrere Segmente aufgeteilt ist, wobei benachbarte Segmente in Umfangsrichtung mit dem Abstand **d** voneinander beabstandet sind.

[0037] [Fig. 3](#) verdeutlicht nochmals den segmentierten Aufbau des Rotors **4**. Diese Figur zeigt die Axialfeldmaschine der [Fig. 2](#) in Draufsicht, wobei zur Verdeutlichung des Aufbaus des Rotors der Stator **6** weggelassen wurde. Man erkennt, dass der ringförmige Rotor **4** aus drei Rotorsegmenten **4a**, **4b** und **4c** mit dazwischen liegendem Abstand **d** besteht. Hinter den durch die Abstände **d** gebildeten Spalten ist ein Teil des durchgehenden Statorrings **5** zu sehen, wie durch entsprechende Schraffuren in [Fig. 3](#) angedeutet ist. Jedes der Rotorsegmente **4a** bis **4c** ist mechanisch von den anderen Rotorsegmenten separiert und über gleichmäßig entlang des jeweiligen Rotorsegments verteilte Speichen **9** an der Antriebswelle **1** befestigt. Für jede Befestigung eines Segments werden dabei drei Speichen verwendet, welche an einem gemeinsamen radialen Befestigungsabschnitt auf der Antriebswelle **1** befestigt sind.

[0038] Die Ausführungsform gemäß [Fig. 3](#) dient dabei zur Nachbildung eines Antriebs einer Windkraftanlage mit drei Rotorblättern. Die drei Rotorsegmente entsprechen somit den drei Rotorblättern. Für Windenergieanlagen mit einer anderen Anzahl von Rotorblättern wird die Zahl der Rotorsegmente entsprechend angepasst. Durch die Nachbildung der Befestigung der Rotorblätter auf der Antriebswelle

können durch geeignete Ansteuerung der Wicklungen des Stators die in einem Rotorblattantrieb auftretenden Tangential- und Axialkräfte generiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Axialkräfte an unterschiedlichen Positionen entlang des Umfangs der Antriebswelle in Abhängigkeit von der Position des Rotorblatts unterscheiden können. Demzufolge können in der hier beschriebenen Ausführungsform in den Statorwicklungen nicht nur Ströme erzeugt werden, welche zwischen den Statorwicklungen unterschiedlich sind, sondern auch Ströme, welche innerhalb einer Statorwicklung in Umfangsrichtung des Stators variieren. Das heißt, in einer jeweiligen Statorwicklung kann die Stromverteilung über den Umfang des jeweiligen Stators unterschiedlich verteilt werden, wobei die Verteilung sich dynamisch in Abhängigkeit von der Position der jeweiligen Rotorsegmente verändern kann. Die Stromverteilung dreht sich somit synchron mit dem Rotor.

[0039] Um eine möglichst hoch auflösende und genau steuerbare Nachbildung von Axialkräften in Umfangsrichtung zu erreichen, ist die Wicklung des Stators vorzugsweise in eine große Anzahl an Wicklungssegmenten unterteilt, wobei jedes Segment aus einem eigenen Wechselrichter mit zugehöriger Stromsteuerung gespeist wird. Fig. 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit einer solchen Statorsegmentierung. In Fig. 4 ist schematisch eine Ausführungsform einer Drehfeldmaschine zur Verwendung in der erfindungsgemäßen Vorrichtung wiedergegeben. Es sind dabei schematisiert in Schnittdarstellung Teile eines Rotors **4** und eines Stators **6** gezeigt. Die dargestellte Ausführungsform des Rotors ist eine Flachmagnetaordnung, bei der flache Permanentmagnete **10** auf den Außenseiten des Rotors angeordnet sind, wobei aus Übersichtlichkeitsgründen nur die Permanentmagnete auf die zum Stator **6** weisende Seite des Rotors wiedergegeben sind. Man erkennt, dass der Stator **6** eine Einschichtwicklung umfasst, wobei drei Wicklungssegmente gezeigt sind, welche sich auf Statorsegmente **6a**, **6b** und **6c** aufteilen. Die Statorsegmente sind dabei mechanisch getrennt gezeigt, was jedoch nicht notwendigerweise der Fall ist. Die einzelnen Segmente können auch miteinander verbunden sein, d. h. der Stator kann auch einstückig ausgebildet sein. Die Wicklung des Stators ist eine dreiphasige Drehfeldwicklung, wobei jedem Wicklungssegment alle drei Phasen des Drehstroms zugeführt werden.

[0040] Beispielhaft sind die einzelnen Spulen des linken Wicklungssegments mit Bezugszeichen S1, S2 und S3 bezeichnet. Der Spule S1 wird dabei die erste Phase, der Spule S2 die zweite Phase und der Spule S3 die dritte Phase des Drehstroms zugeführt.

[0041] In der Ausführungsform der Fig. 4 enthält jedes Wicklungssegment lediglich ein Polpaar, welches über eine separate Stromerfassung und Strom-

regelung verfügt. Hierdurch kann eine sehr genaue Einstellung der Axialkräfte in verschiedenen Umfangspositionen des Stators erreicht werden. Gegebenenfalls ist es jedoch auch möglich, dass jedes Wicklungssegment mehrere Polpaare (geradzahlige Vielfache der Polteilung) umfasst. In der Ausführungsform gemäß Fig. 4 wird das Wicklungssegment auf dem Statorsegment **6a** durch drei einphasige Wechselrichter **11a**, das Wicklungssegment auf dem Statorsegment **6b** durch drei einphasige Wechselrichter **11b** und das Wicklungssegment auf dem Statorsegment **6c** durch drei einphasige Wechselrichter **11c** angesteuert. Die jeweiligen einphasigen Wechselrichter **11a**, **11b** und **11c** können gegebenenfalls auch durch einen einzelnen dreiphasigen Wechselrichter ersetzt werden. Die Wechselrichter sind dabei mit einer Gleichspannungsschiene verbunden, an welcher die Gleichspannung U_z anliegt. Diese Gleichspannung wurde durch einen (nicht gezeigten) Gleichrichter aus der Netzspannung generiert. Mit entsprechenden (nicht gezeigten) Stromreglern für die einzelnen Wechselrichter der Wicklungssegmente können nunmehr die gewünschten Ströme in den einzelnen Statorsegmenten generiert werden. Die Wechselrichter können dabei räumlich getrennt vom Axialfeldmotor angeordnet werden, sie können jedoch auch in dem Axialfeldmotor integriert sein.

[0042] Wie sich aus den obigen Ausführungen ergibt, können mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung beliebige Axialkräfte und Tangentialkräfte (d. h. Drehmomente) durch eine entsprechende Stromsteuerung bzw. Stromregelung der Wicklungen generiert werden. Es können dabei an einem Prüfstand die real auftretenden Kräfte gezielt nachgebildet werden. Die durch das nachzubildende Antriebselement zu erzeugenden Axialkräfte und Drehmomente sind dabei bekannt und eine entsprechende Stromregelung zur Generierung der Axialkräfte bzw. Drehmomente ist für den Fachmann problemlos realisierbar. Insbesondere verfügt der Axialfeldmotor gemäß der Erfindung über entsprechende Kraftsensoren zur Erfassung der Axialkräfte und/oder Drehmomente. Mit Hilfe der erfassten Sensordaten kann dann durch Rückkopplung mit der Stromregelung der Strom in den einzelnen Wicklungen bzw. Wicklungssegmenten derart eingestellt werden, dass die Krafteinwirkung eines Antriebselements auf die Antriebswelle simuliert wird. Die erfindungsgemäße Vorrichtung hat insbesondere den Vorteil, dass ein Prüfstand für einen Antriebsstrang realisiert werden kann, ohne dass die mechanischen Antriebselemente des Antriebsstrangs selbst am Prüfstand angebracht sind. Vielmehr können die an sich bekannten, auf die Antriebswelle wirkenden Drehmomente bzw. Axialkräfte durch geeignete Stromsteuerung eines Axialfeldmotors realisiert werden und basierend darauf entsprechende Prüfungen von weiteren Komponenten des entsprechenden Antriebsstrangs durchgeführt werden.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Nachbilden der Krafteinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente auf zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) eines Antriebsstrangs, umfassend:

- einen Axialfeldmotor in der Form einer Drehfeldmaschine zum Antrieb einer Antriebswelle (1), welche mit der zumindest einen Antriebskomponente (2, 3) koppelbar ist, wobei der Axialfeldmotor zumindest einen Rotor (4) und zumindest einen Stator (5, 6) sowie zumindest eine Wicklung (501, 601) zur Erzeugung zumindest eines axialen Magnetfelds aufweist;
- eine Stromspeisung (11a, 11b, 11c), mit der die zumindest eine Wicklung (501, 601) im Betrieb der Vorrichtung (11a, 11b, 11c) derart mit Strom oder Strömen gespeist wird, dass bei Kopplung der Antriebswelle (1) mit der zumindest einen Antriebskomponente (2, 3) die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) wirkenden Axialkräfte und Drehmomente nachgebildet werden.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung zum Nachbilden der Krafteinwirkung der Rotorblätter einer Windenergieanlage auf zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) eines Antriebsstrangs ausgelegt ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Axialfeldmotor zwei axial versetzte Wicklungen (501, 601) zur Erzeugung axialer Magnetfelder mit zumindest zwei unabhängigen axial versetzten Magnetkreisen aufweist und die axial versetzten Wicklungen (501, 601) über die Stromspeisung (11a, 11b, 11c) mit unterschiedlich großen Strömen gespeist werden können, um bei Kopplung der Antriebswelle (1) mit der zumindest einen Antriebskomponente (2, 3) die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente (2, 3) wirkenden Kräfte nachzubilden.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Axialfeldmotor ein Synchronmotor mit Permanentmagnetterregung ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Rotor (4) in mehrere Rotorsegmente (4a, 4b, 4c) aufgeteilt ist, wobei jedes Rotorsegment (4a, 4b, 4c) an unterschiedlichen Befestigungspositionen auf der Antriebswelle (1) befestigt ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Rotor (4) in drei Rotorsegmente (4a, 4b, 4c) aufgeteilt ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass jedes Rotorsegment (4a, 4b,

4c) über eine oder mehrere Speichen (9) an der Antriebswelle (1) befestigt ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Speichen (9) gleichmäßig in Umfangsrichtung eines jeweiligen Rotorsegments (4a, 4b, 4c) verteilt sind.

9. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wenn abhängig von Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Axialfeldmotor zwei axial versetzte Statoren (5, 6) mit dazwischen liegendem Rotor (4) aufweist, wobei jeder Stator (5, 6) eine axial versetzte Wicklung (501, 601) enthält und der Rotor (4) Permanentmagnete (10) umfasst.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Rotor (4) auf seinen axial gegenüberliegenden Seiten jeweils eine Vielzahl von Permanentmagneten (10) mit Eisenrückschluss aufweist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Permanentmagnete (10) in Flachmagnetanordnung und/oder in Sammleranordnung auf dem Rotor (4) angeordnet sind.

12. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wenn abhängig von Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromspeisung eine separate Wechselrichteranordnung für jede axial versetzte Wicklung (501, 601) umfasst, wobei jede Wechselrichteranordnung zumindest einen Wechselrichter (11a, 11b, 11c) mit zugehöriger Stromregelung aufweist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselrichter (11a, 11b, 11c) der Wechselrichteranordnungen in dem Axialfeldmotor integriert sind und/oder separat vom Axialfeldmotor angeordnet sind.

14. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine Wicklung (501, 601) des Axialfeldmotors in Umfangsrichtung um die Antriebswelle in mehrere Wicklungssegmente (6a, 6b, 6c) unterteilt ist, welche mit verschiedenen großen Strömen gespeist werden können.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass jedes Wicklungssegment (6a, 6b, 6c) über zumindest einen separaten Wechselrichter (11a, 11b, 11c) mit zugehöriger Stromregelung mit Strom gespeist werden kann.

16. Vorrichtung nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Drehfeldmaschine eine mehrpolige Drehfeldmaschine ist, wobei jedes Wicklungssegment (6a, 6b, 6c) ein oder mehrere

Polpaare umfasst.

17. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine Wicklung (**501**, **601**) eine Einschichtwicklung und/oder eine Mehrschichtwicklung und/oder eine Zahnspulenwicklung umfasst.

18. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung einen oder mehrere Sensoren zur Erfassung der mit dem Axialfeldmotor erzeugten Drehmomente und/oder Axialkräfte umfasst.

19. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung eine Kraft- und Drehmomentregelung umfasst, mit der die Ströme der Stromspeisung (**11a**, **11b**, **11c**) derart eingestellt werden können, dass die Krafteinwirkung des oder der Antriebselemente nachgebildet wird.

20. Vorrichtung nach Anspruch 18 und 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Kraft- und Drehmomentregelung die Ströme mit Hilfe der von dem oder den Sensoren erfassten Größen regelt.

21. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung eine oder mehrere Magnetfeldsensoren zur Erfassung eines oder mehrerer axialer Luftspalte zwischen dem zumindest einen Rotor (**4**) und dem zumindest einen Stator (**5**, **6**) umfasst.

22. Verfahren zum Nachbilden der Krafteinwirkung eines oder mehrerer mechanischer Antriebselemente auf zumindest eine Antriebskomponente (**2**, **3**) eines Antriebsstrangs mit Hilfe einer Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine Wicklung (**501**, **601**) über die Stromspeisung (**11a**, **11b**, **11c**) derart mit Strom oder Strömen gespeist wird, dass im gekoppelten Zustand der Antriebswelle (**1**) mit der zumindest einen Antriebskomponente (**2**, **3**) die durch das oder die Antriebselemente auf die zumindest eine Antriebskomponente (**2**, **3**) wirkenden Axialkräfte und Drehmomente nachgebildet werden.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass mit dem Verfahren die Krafteinwirkung der Rotorblätter einer Windenergieanlage auf zumindest eine Antriebskomponente (**2**, **3**) eines Antriebsstrangs nachgebildet wird.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

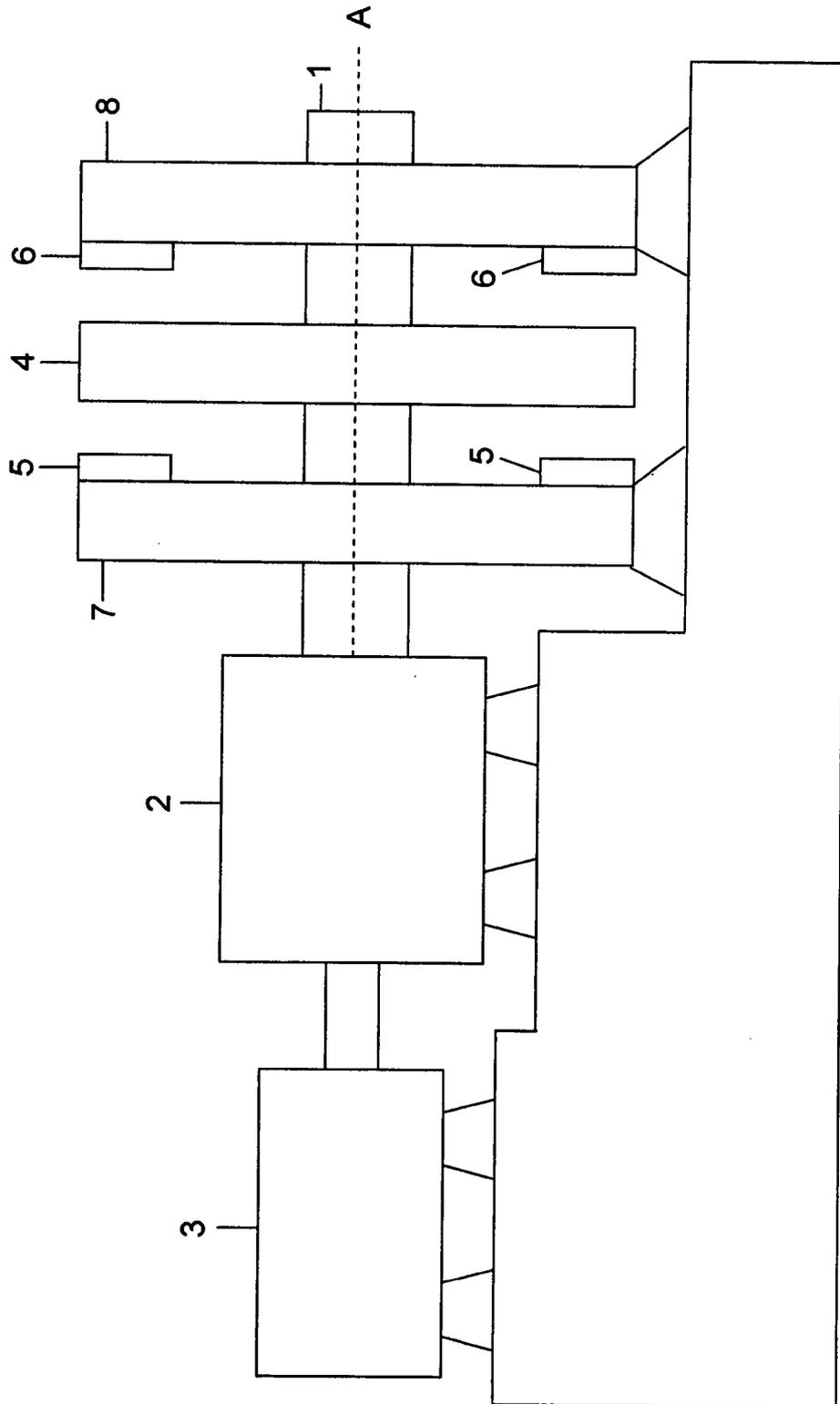


Fig. 1

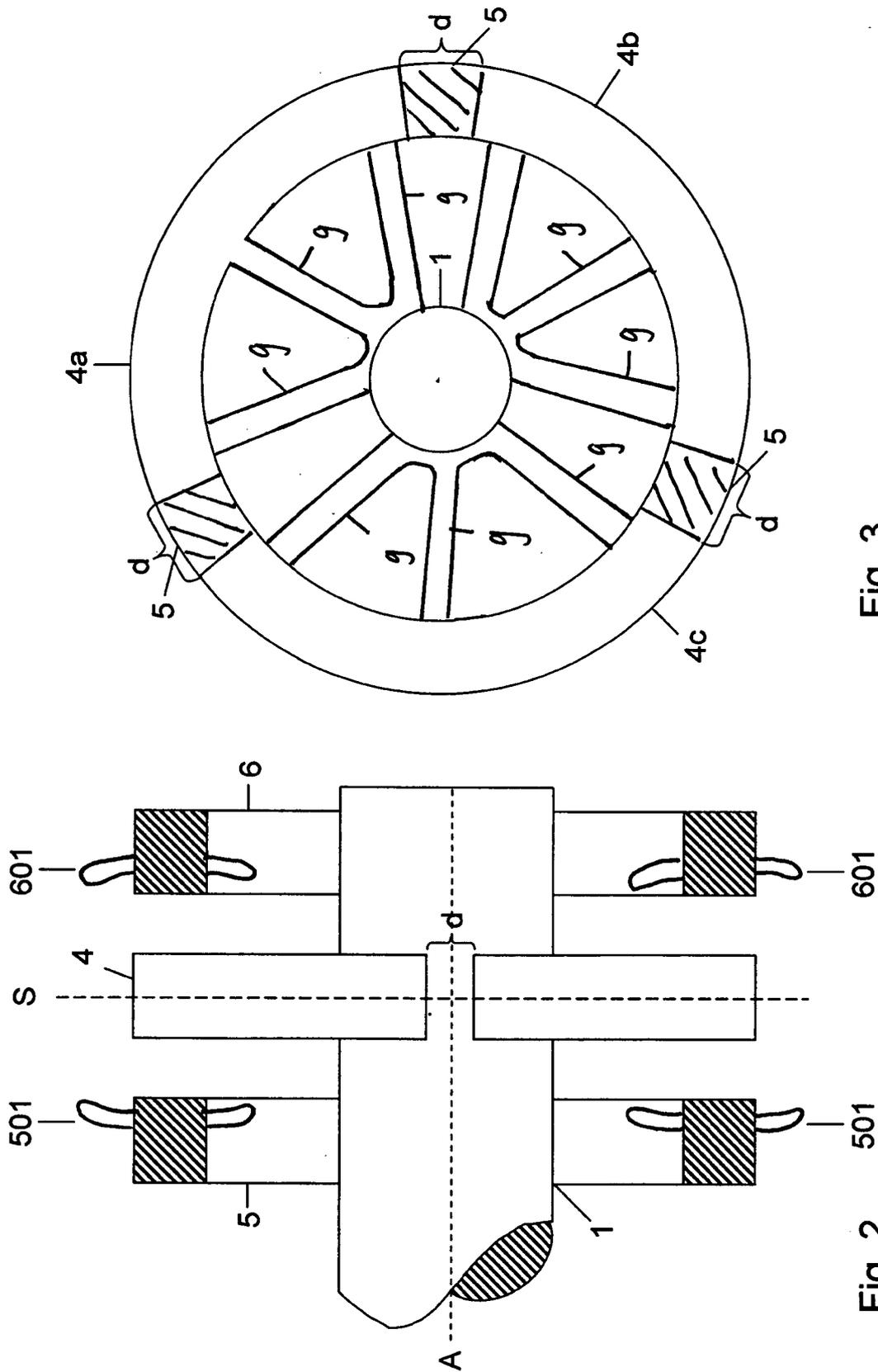


Fig. 3

Fig. 2

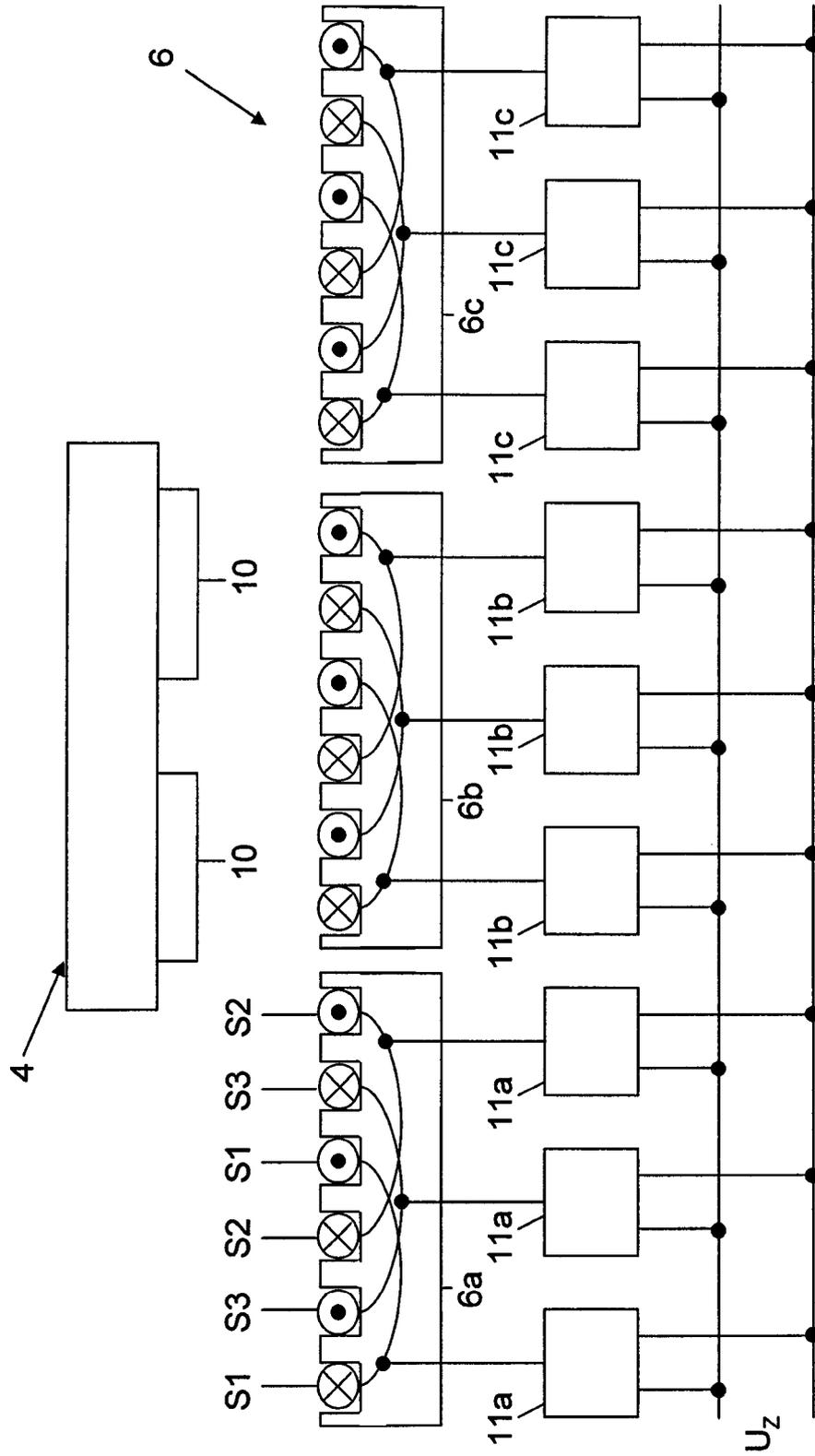


Fig. 4