



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 102 53 811 A1 2004.06.03

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 102 53 811.5
(22) Anmeldetag: 18.11.2002
(43) Offenlegungstag: 03.06.2004

(51) Int Cl.7: H02K 3/00
H02P 9/04, F03D 7/00

(71) Anmelder:
Lust Drive Tronics GmbH, z. Hd. Dr.-Ing. Andreas
Bünthe, 59425 Unna, DE

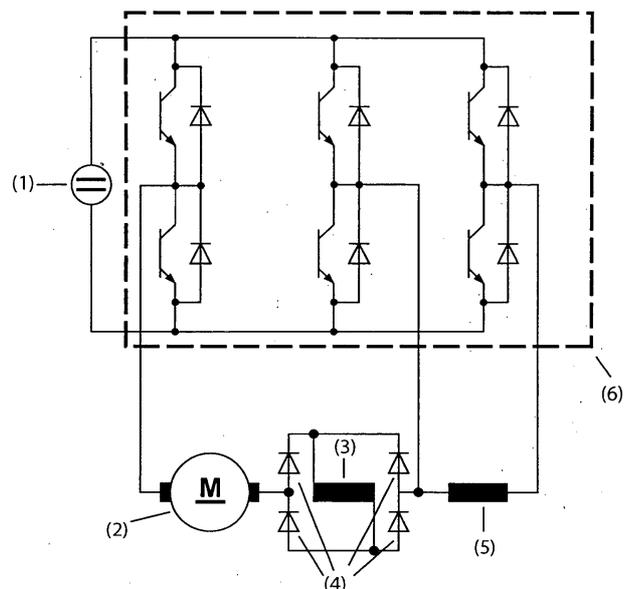
(72) Erfinder:
Bünthe, Andreas, Dr., 33378 Rheda-Wiedenbrück,
DE; Engelmann, Achim, 59199 Bönen, DE; Dicke,
Horst, 58730 Fröndenberg, DE; Palm, Kurt, 58708
Menden, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Antriebsvorrichtung für eine Windkraftanlage mit elektrisch verstellbaren Flügeln und deren Verwendung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Antriebsvorrichtung, die zum Verstellen der Flügel einer Windkraftanlage genutzt wird. Als Antrieb wird ein Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19) eingesetzt. Erfindungsgemäß wird der Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19) mit einem leistungselektronischen Wechselrichter, vorzugsweise einem Pulswechselrichter, betrieben, wobei sich die durch die transformatorische Kopplung von Reihenschluss- und Nebenschlusswicklung möglichen Überspannungen nicht auswirken können. Die Erfindung betrifft darüber hinaus die Verwendung dieser Vorrichtung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Antriebsvorrichtung, die zum Verstellen der Flügel einer Windkraftanlage genutzt wird. Als Antrieb wird ein Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19) eingesetzt. Erfindungsgemäß wird der Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19) mit einem leistungselektronischen Wechselrichter (6), vorzugsweise einem Pulswechselrichter (6), betrieben, wobei sich die durch die transformatorische Kopplung von Reihenschluss- und Nebenschlusswicklung (5) möglichen Überspannungen nicht auswirken können. Die Erfindung betrifft darüber hinaus Verfahren, die diese Vorrichtung verwenden.

[0002] Nach dem Stand der Technik werden die Flügel von Windkraftanlagen im Winkel so gestellt, dass sich die Windkraftanlage bezüglich Drehzahl, Drehmoment und abgegebene Leistung optimal den örtlich vorherrschenden Windverhältnissen anpasst. Dieser Vorgang wird auch als „Pitchen“ bezeichnet; der zugeordnete Antrieb für die Flügelverstellung heißt „Pitchantrieb“. Oft wird dieser Pitchantrieb mit elektrischen Antrieben realisiert. Die Flügelverstellung ist dabei extrem sicherheitskritisch, da bei einem falsch eingestellten Flügelwinkel eine unzulässig hohe Drehzahl der Windkraftanlage erreicht werden kann, die zur mechanischen Beschädigung der Windkraftanlage führt. In der Regel werden die Antriebssysteme deshalb auf eine maximale Zuverlässigkeit ausgelegt. Zu diesem Zweck werden beispielsweise Drehgeber redundant ausgeführt. Von besonderer Bedeutung ist, dass der Antrieb auch bei Störungen, wie zum Beispiel Netzausfall, die Flügel in eine sichere Position fahren können muss (Sicherheitsfahrt, bei der die Anlage aerodynamisch abgebremst wird). Aus diesem Grund ist ein Speicher für elektrische Energie, in der Regel ein Akkumulator, in der Windkraftanlage enthalten, der die für die Sicherheitsfahrt notwendige, netzunabhängige elektrische Energie liefert.

[0003] Als Motoren werden deshalb oft Asynchronmotoren eingesetzt. Sie erlauben mit einem einfachen, von dem Akkumulator gespeisten, Wechselrichter (6) ohne funktionsfähigem Drehgeber durch eine U/f-Steuerung eine Sicherheitsfahrt. Mehr Sicherheit bieten, insbesondere mit einer Reihenschlusscharakteristik, Gleichstrommotoren. Sie erlauben eine Sicherheitsfahrt ohne empfindliche leistungselektronische Komponenten, indem der Gleichstrommotor über mechanisch oder leistungselektronische Schalter mit dem Akkumulator verbunden wird. Kritisch ist dabei die Drehzahl-Drehmomentcharakteristik der Reihenschlussmaschine; im Leerlauf können unzulässig große Verstellgeschwindigkeiten des Flügelwinkels auftreten. Als ein weiterer Nachteil der Gleichstrom-Doppelschlussmaschine gestaltet sich allerdings der Normalbetrieb mit Stromrichter oder Pulswechselrichter (6) schwieriger, wenn ein 4-Quadranten-Betrieb des Antriebs möglich

sein muss. 4-Quadranten-Betrieb meint, dass der Antrieb in beiden Drehrichtungen mit positivem und negativem Drehmoment betrieben wird. Eine Gleichstrom-Reihenschlussmaschine erlaubt zunächst nur einen 2-Quadranten-Betrieb, da der Ankerstrom stets das gleiche Vorzeichen wie die Reihenschlusswicklung (3) hat. Für einen 4-Quadranten-Betrieb wird in der Regel ein Feldgleichrichter (4) eingesetzt, durch den das Vorzeichen des Reihenschlussstroms unabhängig von dem Vorzeichen der Ankerwicklung wird. Ein weiterer Nachteil der Reihenschlussmaschine ist, dass im Leerlauf eine Schätzung der mechanischen Drehzahl ω aus den elektrischen Größen Motorspannung und Motorstrom nur eingeschränkt möglich ist. Es gilt für den stationären Fall die folgende, vereinfachte Spannungsgleichung, bei der aus Gründen der Übersicht die Feldgleichrichtung nicht berücksichtigt wird:

$$u_m = R_{ges} \cdot i_a + k \cdot \omega \cdot i_a$$

$$\omega = \frac{u_m - R_{ges} \cdot i_a}{k \cdot i_a}$$

[0004] Im Leerlauf ist der Ankerstrom i_a gleich Null, so dass die Drehzahl nur durch eine Division durch Null zu bestimmen ist.

[0005] Erfindungsgemäß werden die Nachteile durch den speziellen Einsatz einer Gleichstrom-Doppelschlussmaschine vermieden. Durch die zusätzliche Nebenschlusswicklung (5) ändert sich das Betriebsverhalten des Motors und die maximale Leerlaufdrehzahl ist eindeutig begrenzt. Für einen 4-Quadranten-Betrieb sind beim Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19) bezüglich der Feldgleichrichtung beide Erregerwicklungen zu berücksichtigen. Allerdings verbietet sich der Einsatz eines zweiten Feldgleichrichters, da die beiden Erregerwicklungen transformatorisch gekoppelt sind und speziell in der Nebenschlusswicklung (5) aufgrund der hohen Windungszahl sehr hohe Spannungen induziert werden können, die einen Feldgleichrichter (4) zerstören können. Die Nebenschlusswicklung (5) muss deshalb unabhängig von der Schaltungskombination aus Ankerwicklung und Reihenschlusswicklung (3) mit Feldgleichrichter (4) betrieben werden.

[0006] In einer vorteilhaften Ausführungsform kann die Nebenschlusswicklung (5) zwischen zwei Strängen eines dreiphasigen Pulswechselrichters (6) geschaltet werden, während die Schaltungskombination aus Ankerwicklung und Reihenschlusswicklung (3) mit Feldgleichrichter (4) zwischen dem dritten Strang des Pulswechselrichters und einen bereits für die Nebenschlusswicklung (5) benutzten Strang geschaltet wird. Die Richtung des Flussaufbaus durch die Reihenschlusswicklung (3) ist konstant und die gleiche Richtung des Flussaufbaus kann für die Nebenschlusswicklung (5) eingestellt werden. Hohe, induzierte Spannungen in der Nebenschlusswicklung (5) werden so vermieden, da die Freilaufdioden des Wechselrichters die Spannung an der Nebenschluss-

wicklung (5) auf den Betrag der Zwischenkreisspannung begrenzen.

[0007] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform kann die Schaltungskombination aus Ankerwicklung und Reihenschlusswicklung (3) mit Feldgleichrichter (4) zwischen zwei Strängen des Pulswechselrichters geschaltet werden, während die Nebenschlusswicklung (5) zwischen dem dritten Strang und dem negativen, positiven oder dem Mittenpotential geschaltet wird. Auch hier kann eine einheitliche Richtung des Flussaufbaus der beiden Erregerwicklungen sichergestellt werden. Ebenfalls wird auch hier die Spannung durch die Freilaufdioden des Pulswechselrichters auf zulässige Werte begrenzt.

[0008] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform wird die Nebenschlusswicklung (5) unabhängig vom Pulswechselrichter (6) mit einem getrennten Netzteil oder einer anderen Gleichspannungsquelle versorgt. Durch die Spannungseinprägung werden Überspannungen sicher vermieden.

[0009] Durch die Trennung der Nebenschlusswicklung (5) von der Schaltungskombination aus Ankerwicklung und Reihenschlusswicklung (3) mit Feldgleichrichter (4) ergeben sich weitere Möglichkeiten, die in Windkraftanlagen vorteilhaft verwendet werden können. Der durch die Nebenschlusswicklung (5) aufgebaute Fluss kann unabhängig vom aktuellen Spannungsbedarf der Ankerwicklung eingestellt werden. Beispielsweise kann der durch die Nebenschlusswicklung (5) erzeugte Fluss auf einen Mindestwert begrenzt werden. Somit kann auch im Leerlauf aus der Ankerspannung ein Schätzwert für die mechanische Drehzahl bestimmt werden. Dieser Schätzwert erlaubt eine sensorlose Drehzahlregelung des Motors oder eine zuverlässige Überwachung des eingesetzten Drehgebers. Durch diese Redundanz kann ein Drehgeber eingespart werden und es ergibt sich ein Preisvorteil.

[0010] Die Qualität der Drehzahlschätzung kann weiter verbessert werden, indem durch ein Rechenwerk der an der Nebenschlusswicklung (5) wirksamen Spannung ein Testsignal überlagert wird. Die drehzahlabhängigen Auswirkungen des Testsignals auf die Ankerspannung und den Ankerstrom lassen sich mit mathematischen Modellen, wie digitale Filter, Beobachter, Kalman-Filter, Fourier-Analyse oder Korrelationsverfahren hochgenau bestimmen und lassen so einen Rückschluss auf die aktuelle mechanische Drehzahl des Motors zu. Für die Doppelschlussmaschine gilt im stationären Fall folgende vereinfachte Ankerspannungsgleichung:

$$u_m = R_{ges} \cdot i_a + k_1 \cdot \omega \cdot i_a + k_2 \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{u_m - R_{ges} \cdot i_a}{k_1 \cdot i_a + k_2}$$

[0011] Der Faktor k_2 ist dabei vom Erregerfluss der Nebenschlusswicklung (5) abhängig, so dass bei einer geeigneten Vorgabe für die Nebenschlusswicklung (5) eine Division durch Null sicher vermieden

wird.

[0012] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen sind der Zeichnung zu entnehmen.

[0013] Auf der Zeichnung ist ein Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt und zwar zeigen:

[0014] **Fig. 1** Den schematischen Aufbau eines Windkraftanlage.

[0015] **Fig. 2** Eine Realisierung des Pitchantriebes mit einem Gleichstrom-Reihenschlussmotor nach dem Stand der Technik.

[0016] **Fig. 3** Einen Pitchantrieb mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor, der an einem dreiphasigem Pulswechselrichter (6) angeschlossen wird.

[0017] **Fig. 4** Eine andere Ausführungsform des Pitchantriebs mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und dreiphasigem Pulswechselrichter (6).

[0018] **Fig. 5** Eine andere Ausführungsform des Pitchantriebs mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und unabhängiger Spannungsquelle.

[0019] **Fig. 6** Eine Ausführungsform des Pitchantriebs mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und sensorloser Drehzahlregelung.

[0020] **Fig. 7** Eine Ausführungsform des Pitchantriebs mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und Drehgeberüberwachung.

[0021] **Fig. 8** Eine Ausführungsform des Pitchantriebs mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor bei der Sicherheitsfahrt mit Akkumulator.

[0022] **Fig. 1** zeigt den schematischen Aufbau einer Windkraftanlage, bei der die Einbaulage des Pitchantriebes gekennzeichnet ist. Mit diesem Antrieb wird der Anstellwinkel der Flügel im Wind variiert.

[0023] **Fig. 2** zeigt die Schaltung für einen Pitchantrieb mit Gleichstrom-Reihenschlussmotor nach dem Stand der Technik. Er kann wie in der Zeichnung dargestellt mit einem Pulswechselrichter (6) oder alternativ mit einem netzgeführten Stromrichter oder anderen leistungselektronischen Schaltungen gespeist werden. Die für den 4-Quadrantenbetrieb notwendige Feldgleichrichtung wird vorteilhafterweise mit einem Feldgleichrichter (4), z. B. einer Brückenschaltung bestehend aus 4 Dioden, realisiert. Es sind aber auch andere Verfahren nach dem Stand der Technik zur Gleichrichtung möglich.

[0024] **Fig. 3** zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und dreiphasigem Pulswechselrichter (6). Die beiden Erregerwicklungen haben hier einen gemeinsamen Bezugspunkt am Pulswechselrichter (6). Die dargestellte Schaltung bietet die Möglichkeit eines 4-Quadrantenbetriebs, da die PWM des Pulswechselrichters (6) so vorgegeben werden kann, dass der Erregerfluss von der Richtung her mit der der Reihenschlusswicklung (3) übereinstimmt. Vorzugsweise wird der Betrag der Erregerspannung für die Nebenschlusswicklung (5) gleich dem Betrag der Ankerspannung gewählt. Alternativ zum Pulswechselrichter (6) können netzgeführte Stromrichter oder andere leistungselektronische Schaltungen eingesetzt werden.

[0025] **Fig. 4** zeigt eine erfindungsgemäße Vorrich-

tung mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und dreiphasigem Pulswechselrichter (6). Die beiden Erregerwicklungen haben hier keinen gemeinsamen Bezugspunkt am Pulswechselrichter (6). Die dargestellte Schaltung bietet die Möglichkeit eines 4-Quadrantenbetriebs, da die PWM des Pulswechselrichter (6) so vorgegeben werden kann, dass der Erregerfluss von der Richtung her mit der der Reihenschlusswicklung (3) übereinstimmt. Vorzugsweise wird der Betrag der Erregerstrom für die Nebenschlusswicklung (5) gleich dem Betrag der Ankerstrom gewählt. Alternativ zum Pulswechselrichter (6) können netzgeführte Stromrichter oder andere leistungselektronische Schaltungen eingesetzt werden.

[0026] Fig. 5 zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und dreiphasigem Pulswechselrichter (6). Die Nebenschlusswicklung (5) wird hier unabhängig vom Pulswechselrichter (6) für die Reihenschlusswicklung (3) mit einer eigenen Spannungs- oder Stromquelle betrieben. Die Schaltung bietet die Möglichkeit eines 4-Quadrantenbetriebs, da der Erregerfluss der Nebenschlusswicklung (5) in Übereinstimmung mit dem Erregerfluss der Reihenschlusswicklung (3) eingestellt werden kann.

[0027] Fig. 6 zeigt eine Anordnung für die sensorlose Regelung des Gleichstrom-Nebenschlussmotors. Ein Rechenwerk (15) erfasst die Istwerte von der, über der Reihenschlusswicklung (3) und Ankerwicklung abfallenden, Spannung und von dem Ankerstrom und bestimmt mittels mathematischer Modelle, Beobachter, Kalman-Filter, usw. einen Schätzwert für die mechanische Drehzahl und mit diesem Drehzahl-schätzwert wird der Drehzahlregler beaufschlagt. Vereinfacht wird die Drehzahlschätzung durch eine geeignete Vorgabe des Erregerflussanteils, der durch die Nebenschlusswicklung (5) hervorgerufen wird. Der Fall, bei der der Gesamt-Erregerfluss verschwindet und bei der die Schätzung der Drehzahl problematisch ist, kann so vermieden werden. Vorteilhafterweise kann durch das Rechenwerk (12) ein Testsignal, z. B. eine Gleichspannung mit überlagerter Sinus aufgeschaltet werden und im Rechenwerk (15) beispielsweise mit einem Korrelationsverfahren ausgewertet werden.

[0028] Fig. 7 zeigt eine ähnliche Anordnung wie Fig. 6, allerdings wird der Drehzahlschätzwert des Rechenwerks (16) nicht für eine sensorlose Regelung benutzt, sondern für eine Überwachung des an der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine (2) angekoppelten Dreh- bzw. Drehzahlgebers. Ein defekter Dreh- bzw. Drehzahlgebers kann so festgestellt werden und dieser Fehler an eine übergeordnete Steuerung ausgewertet werden. Die in Fig. 6 und Fig. 7 zum Einsatz kommenden Rechenwerke können analog oder digital realisiert und in einem gemeinsamen Rechenwerk kombiniert werden.

[0029] Fig. 8 zeigt eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit Gleichstrom-Nebenschlussmotor und dreiphasigem Pulswechselrichter (6), bei der der Gleich-

strom-Nebenschlussmotor mittels Schütze (8), (9) vom Pulswechselrichter (6) abgekoppelt werden und alternativ mit einer Notstromversorgung (10) verbunden werden kann.

Bezugszeichenliste

- | | |
|------|--|
| (1) | Gleichspannungsquelle des Wechselrichters |
| (2) | Ankerwicklung des Gleichstrommotors |
| (3) | Reihenschlusswicklung |
| (4) | Feldgleichrichter |
| (5) | Nebenschlusswicklung |
| (6) | Wechselrichter |
| (7) | Vom Wechselrichter unabhängige Gleichspannungsquelle |
| (8) | Schütz zum Trennen von Motor und Wechselrichter |
| (9) | Schütz zum Trennen von Motor und Gleichspannungsquelle |
| (10) | Netzunabhängige Gleichspannungsquelle |
| (11) | Gleichspannungsquelle |
| (12) | Rechenwerk zur Generierung des Testsignals |
| (13) | Stromregler |
| (14) | Drehzahlregler |
| (15) | Rechenwerk zur Drehzahlschätzung |
| (16) | Rechenwerk zur Drehzahlschätzung und Geberüberwachung |
| (17) | Drehgeber |
| (18) | Flügel der Windkraftanlage |
| (19) | Antrieb zur Pitchverstellung |

Patentansprüche

1. 1) Antriebsvorrichtung für eine Windkraftanlage, bestehend aus mindestens einem Flügel (18), dessen Anstellwinkel zum Wind mit einem Gleichstrom-Doppelschlussmotor (19), gegebenenfalls einem mechanischen Getriebe, mindestens einem Feldgleichrichter (4) und einem mindestens einphasigen Wechselrichter (6) variiert werden kann, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nebenschlusswicklung (5) des Gleichstrom-Doppelschlussmotors (19) unabhängig von der mit dem Wechselrichter (6) verbundenen Schaltungskombination, bestehend aus der Ankerwicklung (2), der Reihenschlusswicklung (3) sowie dem mindestens einen Feldgleichrichter (4), betrieben wird.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Wicklungsanschluss der Nebenschlusswicklung (5) und ein Anschluss der Schaltungskombination, bestehend aus der Ankerwicklung, der Reihenschlusswicklung (3) sowie dem mindestens einen Feldgleichrichter (4), mit einem gemeinsamen Strang des Wechselrichters (6) verbunden werden.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Nebenschlusswicklung (5)

unabhängig von der Schaltungskombination, bestehend aus der Ankerwicklung, der Reihenschlusswicklung (3) sowie dem mindestens einen Feldgleichrichter (4), mit einem Strang des Wechselrichters (6) verbunden ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Nebenschlusswicklung (5) unabhängig von der Schaltungskombination, bestehend aus der Ankerwicklung, der Reihenschlusswicklung (3) sowie dem mindestens einen Feldgleichrichter (4), mit einer vom Wechselrichter (6) unabhängigen Spannungsquelle (7) versorgt wird.

5. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Wicklungen des Gleichstromnebenschlussmotors durch Schalter, insbesondere Schütze (8), (9), von dem Wechselrichter (6) getrennt und mit netzunabhängigen elektrischen Energiespeichern (10), insbesondere Akkumulatoren, verbunden werden, wobei im netzunabhängigen Betrieb die Nebenschlusswicklung (5) und die Schaltungskombination, bestehend aus der Ankerwicklung, der Reihenschlusswicklung (3) und gegebenenfalls dem mindestens einen Feldgleichrichter (4), parallel geschaltet werden.

6. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der an der Nebenschlusswicklung (5) wirksamen Erregerspannung durch ein Rechenwerk (12) ein Testsignal überlagert wird, und dass die Auswirkungen von diesem Testsignal mittels eines weiteren Rechenwerkes (15) erfasst und für eine Schätzung der mechanischen Drehzahl des Gleichstrom-Doppelschlussmotors (19) genutzt wird.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der gewonnene Schätzwert der mechanischen Drehzahl des Gleichstrom-Doppelschlussmotors (19) in einem Rechenwerk (15) für die Drehzahlregelung (14) des Gleichstrom-Doppelschlussmotors (19) genutzt wird.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der gewonnene Schätzwert der mechanischen Drehzahl des Gleichstrom-Doppelschlussmotors (19) in einem Rechenwerk (16) für eine Überwachung eines Drehzahl- oder Drehwinkelgeber verwendet wird.

9. Verfahren, dadurch gekennzeichnet, dass Vorrichtungen nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8 zum Einsatz kommen.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

F161

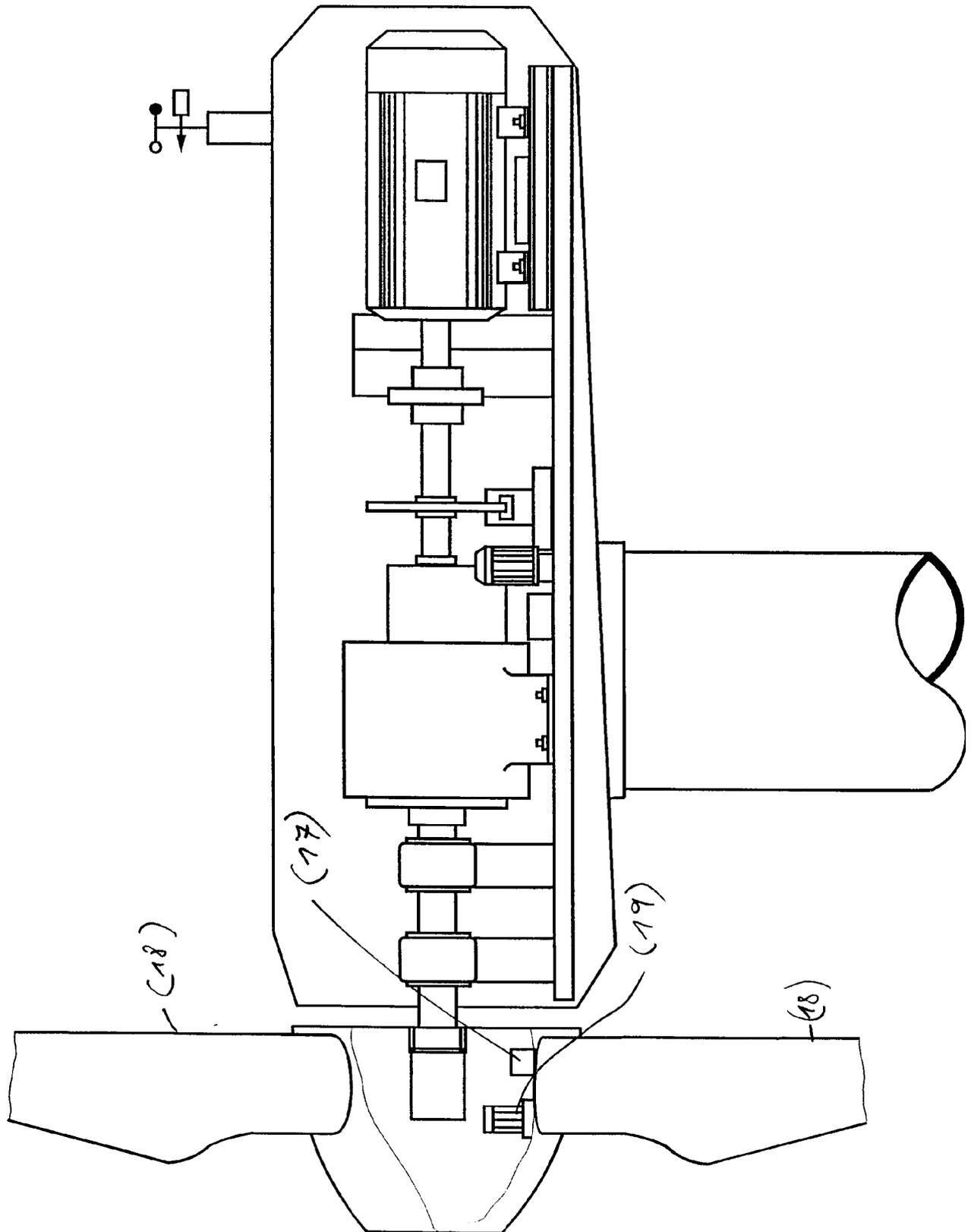


FIG. 2

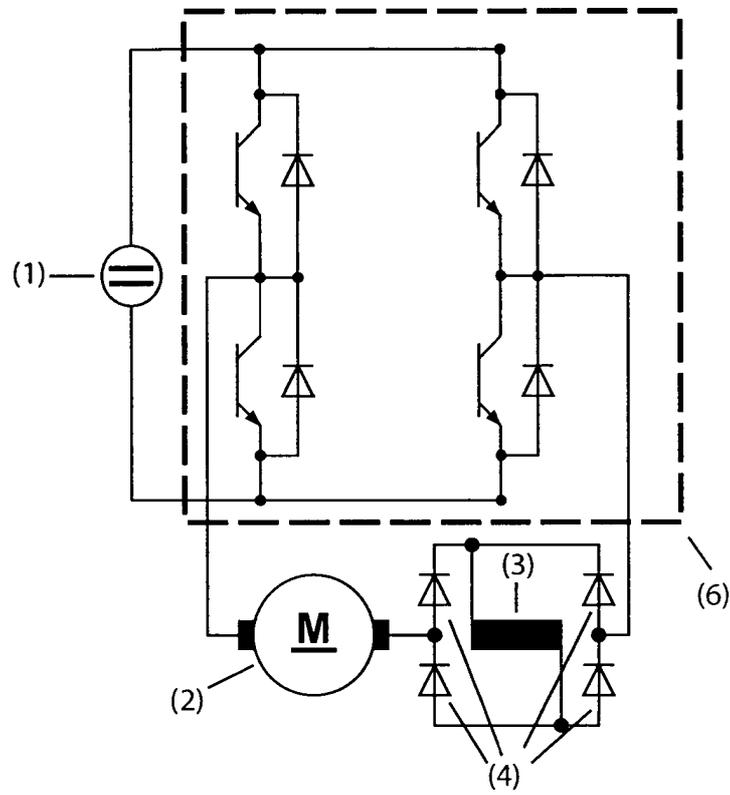


FIG. 3

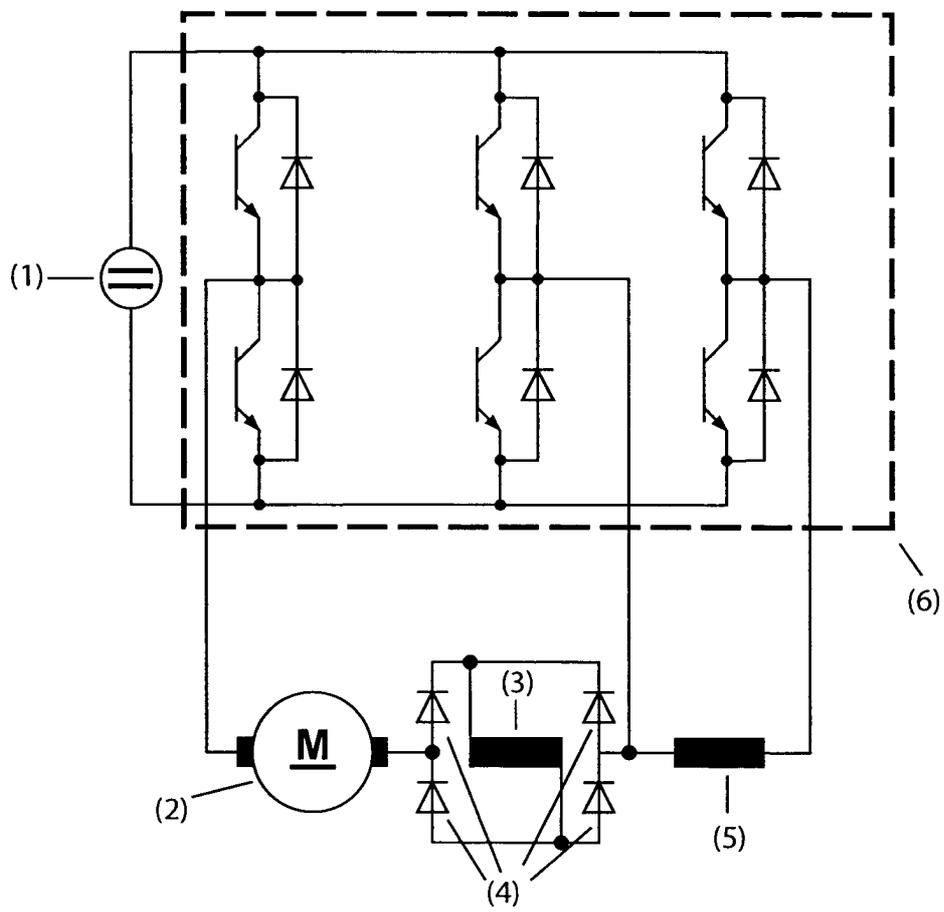


FIG. 4

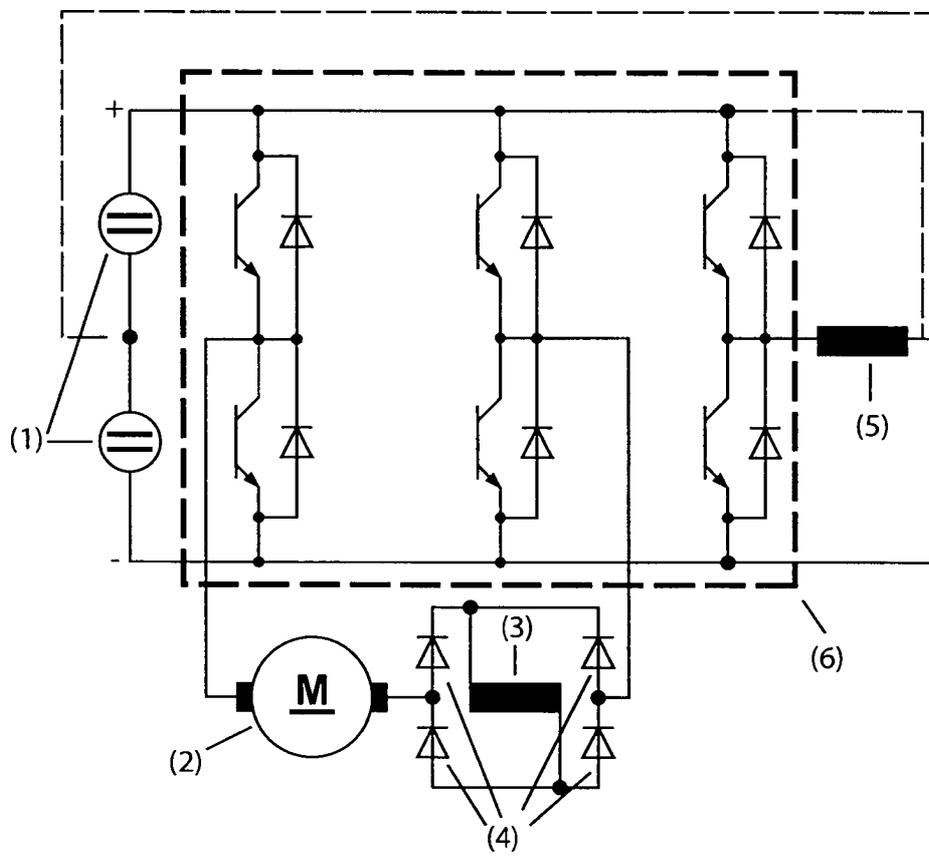
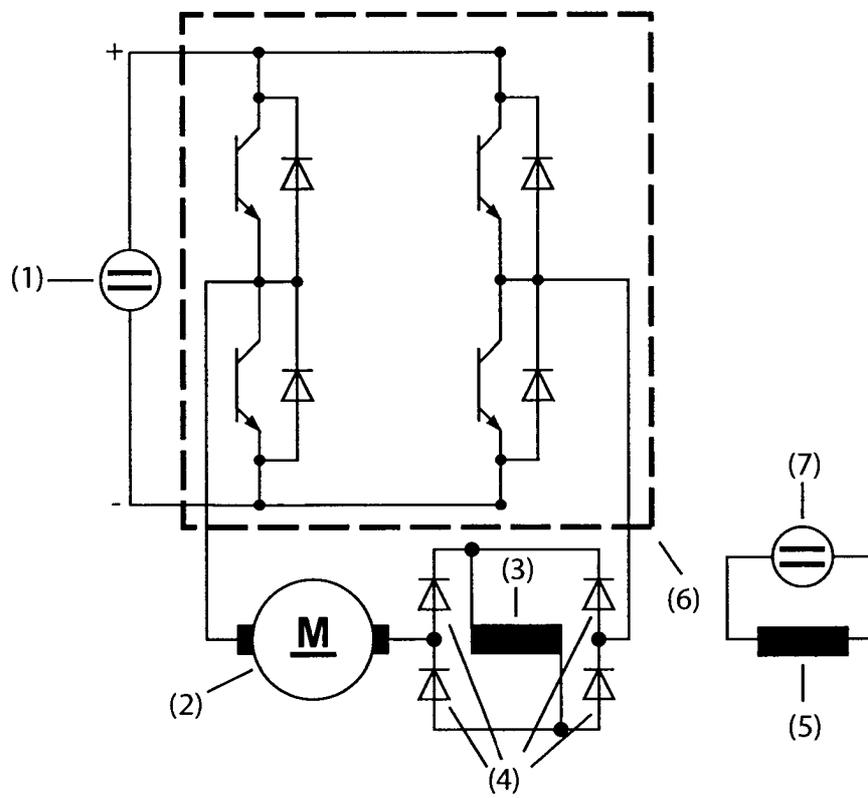
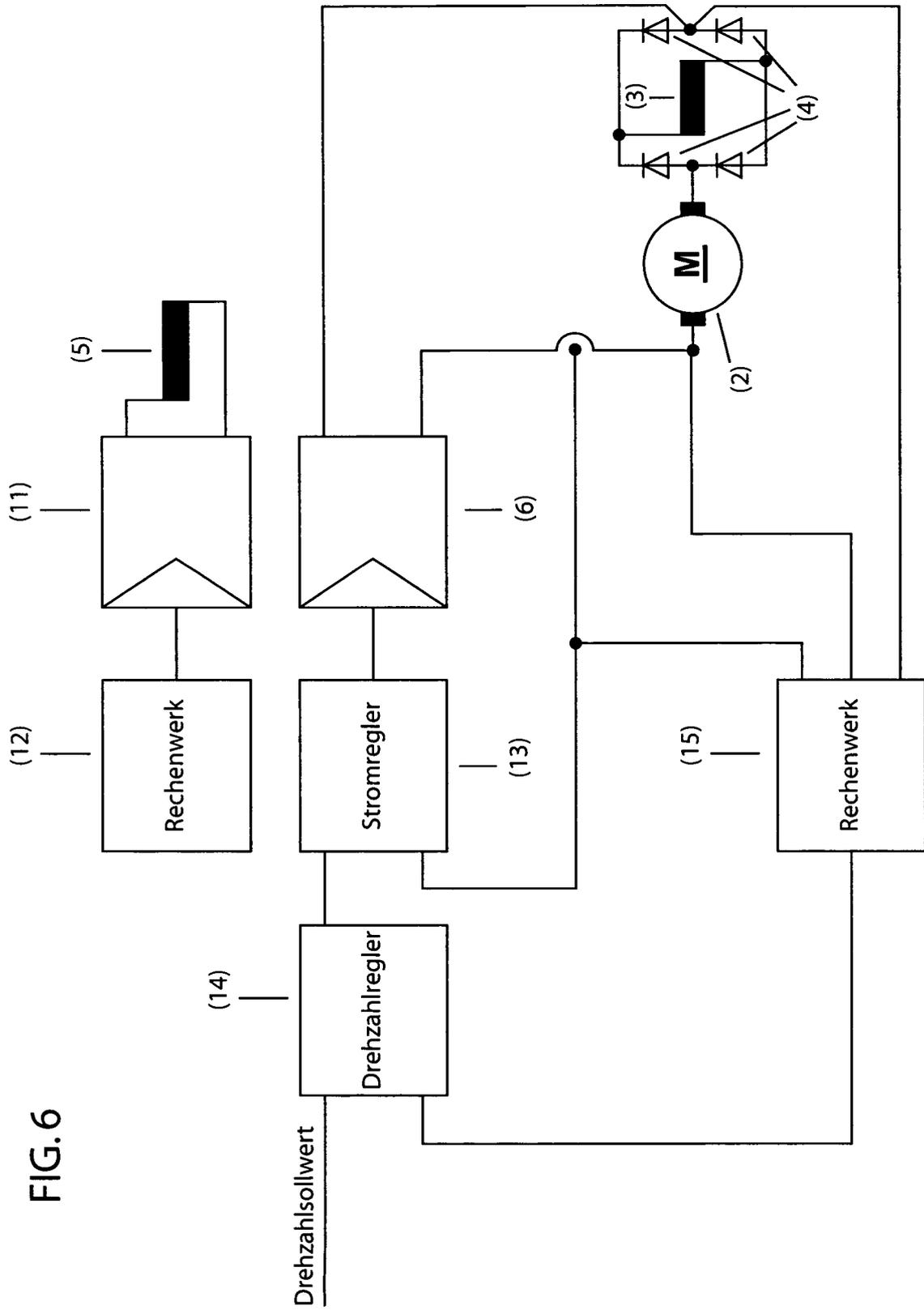


FIG. 5





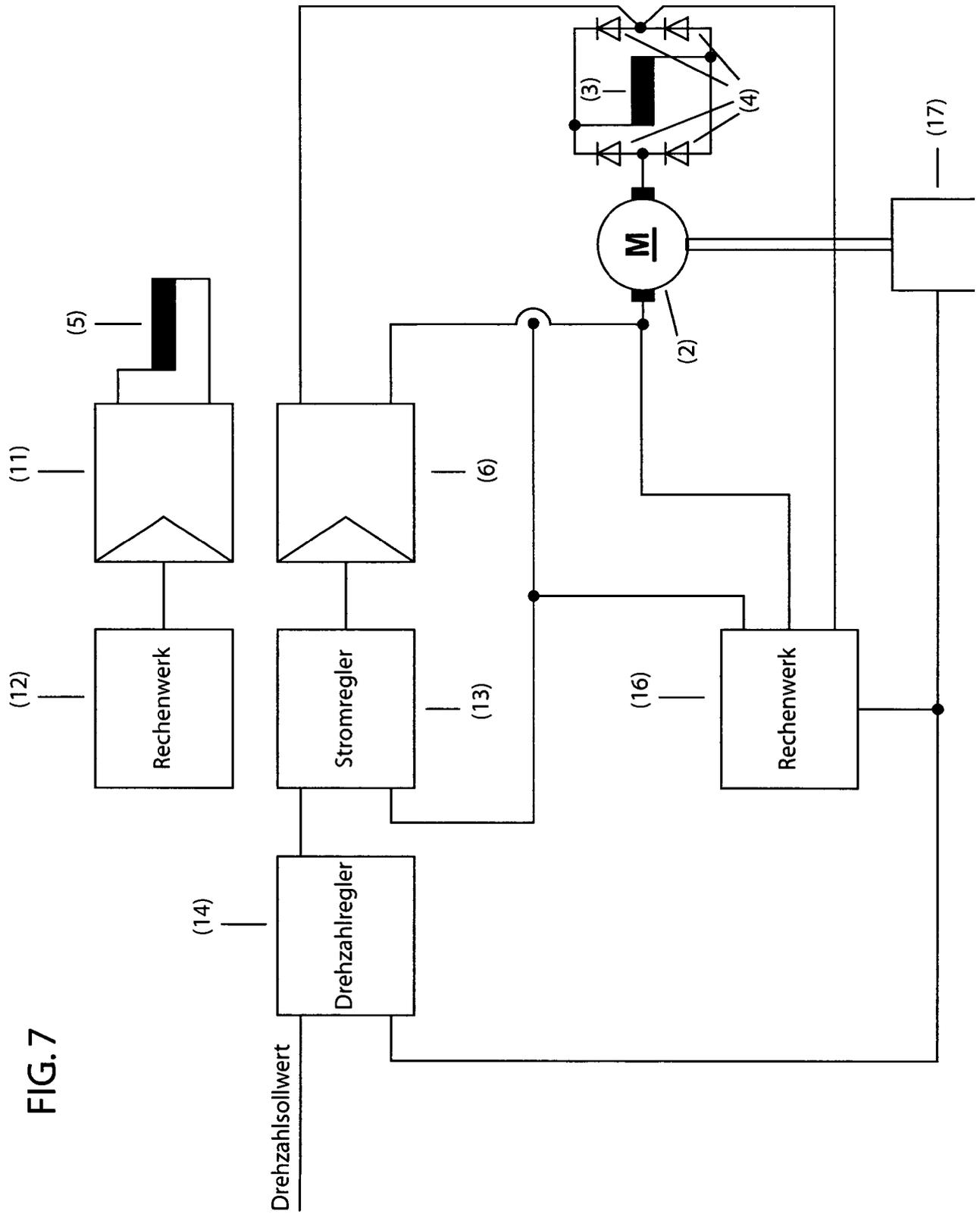


FIG. 7

FIG. 8

