



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 05 263 T2** 2007.03.29

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 413 046 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 05 263.0**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US03/08671**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 719 434.7**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2004/001949**

(86) PCT-Anmeldetag: **28.03.2003**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **31.12.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **28.04.2004**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **17.05.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **29.03.2007**

(51) Int Cl.⁸: **H02P 25/08** (2006.01)

H02P 6/00 (2006.01)

H02K 3/52 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

173610 P	19.06.2002	US
399415 P	31.07.2002	US
290537	08.11.2002	US
353075	29.01.2003	US
353083	29.01.2003	US
359305	06.02.2003	US

(73) Patentinhaber:

Wavecrest Laboratories, LLC, Dulles, Va., US

(74) Vertreter:

HOFFMANN & EITLE, 81925 München

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR

(72) Erfinder:

MASLOV, A., Boris, Reston, VA 20191, US;
PYNTIKOV, V., Alexander., Ashburn, VA 20147, US

(54) Bezeichnung: **ADAPTIVE ARCHITEKTUR DER REGELUNG FÜR ELEKTRISCHE MASCHINEN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft im Allgemeinen elektrische Maschinen (einschließlich elektrischer Motoren und elektrischer Generatoren). Im Speziellen betrifft diese Erfindung eine neue, "adaptive" Architektur für elektrische Maschinen.

Hintergrund

[0002] Die Industrie für elektrische Motoren hat kürzlich eine große Gelegenheit zum wissenschaftlichen Fortschritt präsentiert, angetrieben durch neue Entwicklungen in elektronischen Steuersystemen als auch durch neue, anspruchsvolle Anwendungen – im Besonderen das elektrische Transportwesen. Die neue Generation konventioneller elektrischer Motoren ermöglicht einem Benutzer, die Leistungsabgabe über einen größeren Bereich zu variieren, elektronische Steuerungen zu verwenden, und manche bestimmte Eigenschaften des Motors zu optimieren.

[0003] Die Verwendung moderner Mikroprozessoren hat fortschrittliche elektronische Motorsteuerungen ermöglicht. Tatsächlich sind elektronische Steuerungen ein wesentlicher Teil nahezu jeder modernen Anwendung elektrischer Motoren geworden. Aber der Motor selbst hat sich über die vergangenen 50 Jahre nicht viel fortentwickelt. Dies bedeutet, dass die Fähigkeit für moderne Steuerungen, die Leistung des Motors zu verbessern, von Natur aus eingeschränkt ist und durch konventionelle Motor-Designs beschränkt ist. Die Entwicklung elektrischer Generatoren hat eine ähnliche Geschichte.

[0004] Die Erfindung wendet kürzliche Durchbrüche der Hochtechnologie an, um Grundarchitekturen für elektrische Maschinen (Motor, Generator und andere Maschinen) zu verbessern, die vor mehr als 100 Jahren bahnbrechend waren. Elektrische Motoren, Generatoren und andere Maschinen mit einer neuen, "adaptiven" Architektur gemäß dieser Erfindung können mehr Leistung in einem kleineren, leichteren Gehäuse bereitstellen; können besser auf eine Steuerung reagieren; können billiger sein und einfacher zu reparieren sein; und können effizienter als existierende Designs für elektrische Maschinen sein.

[0005] Die elektrische Maschine – besonders elektrische Motoren und Generatoren – bilden das Fundament der modernen Industrie. Aber trotz ihrer Wichtigkeit bleiben elektrische Maschinen eine jahrhundertealte Technologie. Michael Faraday entdeckte zuerst im Jahr 1831 die Prinzipien, die grundlegende elektrische Gleichstrommaschinen ermöglichen. Nikola Tesla machte einen weiteren Sprung mit dem ersten Wechselstrommotor in den späten 1800ern. Faraday, Tesla und Andere wendeten dieselben Prinzipien auf elektrische Generatoren an. Thomas Edison und andere Erfinder tätigten spätere Fortschritte, besonders bezüglich der Gleichstrom-Energieerzeugung.

[0006] Selbstverständlich ließen die revolutionären technologischen Fortschritte in dem 20. Jahrhundert die Technologie elektrischer Maschinen nicht zurück. Diese Technologie hat erstaunliche Anwendungen von winzigen (Milliwatt) Mikromotoren bis riesigen (Megawatt) hydro-elektrischen Generatoren hervorgebracht. Anders als die explosiven Fortschritte in der Computertechnologie sind die Fortschritte in der Technologie elektrischer Maschinen jedoch relativ langsam und inkrementell gekommen. Tatsächlich werden Zeichnungen und Beschreibungen elektrischer Motoren aus den Auszügen von Tesla und Generatoren von denen von Edison heutigen Ingenieuren sehr bekannt vorkommen.

[0007] Aber angesichts der enormen Verwendung von Elektrizität und elektrischen Motoren müssen die jahrhundertealten Entwürfe elektrischer Maschinen auf den neuesten Stand gebracht werden, mit Verwenden jünger, in der Vergangenheit nicht verfügbarer Technologien. Das Energieumwandeln von fossilen Brennstoffen, nuklearer Energie und anderen Quellen in elektrische Leistung, und das anschließende Umwandeln dieser elektrischen Leistung in mechanische Leistung ist fundamental für die moderne Industrie. Dieser Prozess sollte besser erfolgen.

[0008] Eine Vielfalt von Typen elektrischer Maschinen existiert – Induktions-, Synchron-, geschalteter Reluktanz-, bürstenloser Gleichstrom-Typ – wobei jeder Typ seine Vorteile und Nachteile hat. Während elektrische Generatoren und Motoren dieser vielfältigen Typen verbessert worden sind, kommt kein Typ einer elektrischen Maschine ohne Kompromisse aus: ein Akzeptieren von Nachteilen in manchen Gebieten, um einen Gewinn in anderen Gebieten zu erhalten. Eine elektrische Maschine, die sich an einen weiten Bereich von Betriebsbedingungen anpassen kann, so dass immer eine optimale Leistung bereitgestellt wird, würde ein signifikanter

Fortschritt über existierende Architekturen sein.

[0009] Weil es so schwierig ist, Kompromisse zu vermeiden, greift ein Ansatz zum Herstellen eines praktischen elektrischen Antriebssystems für ein Fahrzeug, US-Patent 5,549,172, zu dem "Extrem" eines Verwendens zweier Motoren in dem Fahrzeug. Diese Erfindung erkennt, dass kein existierender Motor gut über den gesamten Bereich von Fahrzeug-Betriebsbedingungen arbeitet. Demgemäß versucht die Erfindung, die Gesamtsystemleistung durch Kombinieren eines hocheffizienten Motors bei niedrigen Geschwindigkeiten mit einem hocheffizienten Motor bei hohen Geschwindigkeiten aufzuwerten. Der offensichtliche Nachteil ist die Notwendigkeit zweier vollständiger, getrennter elektrischer Motoren.

[0010] Bei der derart großen Verwendung elektrischer Maschinen können jegliche Verbesserungen in der Leistung einer elektrischen Maschine enorme Wirkungen haben. Moderne Industriegesellschaften verbrauchen riesige Elektrizitätsmengen. Es wird geschätzt, dass der weltweite Verbrauch von 12 Billionen Kilowattstunden vom Jahr 1998 sich nahezu auf 22 Billionen Kilowattstunden im Jahr 2020 verdoppeln wird. Als Vergleich sei der weltweite Verbrauch von weniger als ungefähr 2 Billionen Kilowattstunden im Jahr 1950 angeführt.

[0011] Elektrische Motoren verbrauchen am meisten dieser elektrischen Leistung bzw. Energie – ungefähr zwei Drittel sämtlicher erzeugten Elektrizität. Und elektrische Generatoren produzieren nahezu alles davon. Dieses führt dazu, dass diese elektrischen Maschinen entscheidend zum Erzeugen elektrischer Energie und Verwenden davon zum Antreiben der modernen Industrie sind.

[0012] Wie können elektrische Maschinen verbessert werden? Für elektrische Motoren ist die Effizienz die Hauptleistungsbewertung. Es gibt einen dringenden Bedarf für elektrische Motoren mit einer hohen Effizienz über einen breiten Bereich von Betriebsbedingungen. Andere Leistungsbewertungen enthalten: ein hohes Startdrehmoment, um den Motor in Bewegung zu versetzen. Keine Getriebe- bzw. Übersetzungen. Hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen. Kein Hängenbleib-Drehmoment (cogging torque). Erhöhte Drehmomentabgabe. Mehr Drehmoment pro Systemgewicht. Erhöhte Zuverlässigkeit. Fähigkeit zum Betrieb mit manchen Störungen. Leichtigkeit von Pflege und Wartung. In Fahrzeugen, hohes Drehmoment und Leistungsdichten angepasst mit niedriger Bruttomasse und beschränkten Leistungserfordernissen.

[0013] Verbesserungen in diesen Gebieten können einen großen Unterschied in der Leistung elektrischer Motoren bewirken. Dieses allein wird einen enormen Wert haben. Als wertvoller Zusatz wird jedoch eine ausreichende Verbesserung in der Effizienz und Leistung Anwendungen elektrischer Motoren ermöglichen, die aktuell nicht existieren.

[0014] Zum Beispiel kann kein existierender elektrischer Motor die strikten Leistungsanforderungen für Straßenfahrzeuge zu vernünftiger Effizienz und wettbewerbsfähigen Kosten liefern. Dramatische Verbesserungen der elektrischen Motoren könnte sie zu einer realen Alternative für Verbrennungsmotoren beim Antreiben von Straßenfahrzeugen machen. Eine Technologie für einen elektrischen Motor, die diese Leistungsanforderungen erfüllen könnte, würde wahrlich eine "ermöglichende Technologie" sein, und wird dringend benötigt.

[0015] Ähnlich existiert für Generatoren ein realer Bedarf für eine hohe Effizienz beim Umwandeln einer mechanischen Energie in elektrische Leistung in einer Vielfalt von Betriebsbedingungen. Andere Verbesserungsgebiete enthalten: reduziertes Aktiv- und Passivgewicht. Leichtigkeit der Konstruktion und Wartung. Keine Getriebe- bzw. Übersetzungen. Fähigkeit zum Aufnehmen des Generators innerhalb der Turbine, als bisher getrennt. Niedrige Anfangskapitalkosten.

[0016] Hierbei wird wiederum ein Verbessern existierender Generator-Designs es ermöglichen, jahrhundertalte Entwürfe zu aktualisieren. Aber auch für Generatoren wird eine ausreichende Verbesserung in der Effizienz und Leistung es ermöglichen, dass elektrische Energie selbst durch Energiequellen erzeugt wird, die aktuell nicht wirtschaftlich sind. Zum Beispiel könnten Windkraft-Generatoren in Gebieten mittlerer, und vielleicht sogar niedriger, Windgeschwindigkeiten wettbewerbsfähig werden. Existierende Generatoren erfordern Subventionen zum Betrieb in diesen Bedingungen.

[0017] Verbesserungen in der Leistung einer elektrischen Maschine können einen großen wirtschaftlichen Unterschied ausmachen. Günstigere elektrische Energie und durch elektrische Motoren produzierte mechanische Energie werden die wirtschaftliche Produktivität in fortgeschrittenen Wirtschaftssystemen verbessern. Elektrische und mechanische Energie mit niedrigen Kosten ist wesentlich für das Wirtschaftswachstum in Entwicklungsländern. Eine neue Technologie für elektrische Maschinen könnte behilflich sein, die Energiepreise

niedrig zu halten, selbst angesichts eines steigenden Bedarfs.

[0018] Bessere elektrische Maschinen bringen auch Umweltvorteile mit sich. Effizientere Maschinen bedeuten weniger Energieverschwendung, was den durch die Energieproduktion verursachten Umweltschaden reduziert. Falls elektrische Fahrzeuge eine existenzfähige Alternative zu Verbrennungsmotor-angetriebenen Fahrzeugen werden, wird die Luftverschmutzung außerordentlich reduziert werden. Da der Energiebedarf wächst, werden die Effizienz und der reduzierte Umweltschaden, die bessere elektrische Maschinen bringen können, sogar noch wichtiger werden.

[0019] Eine Vorrichtung zum Treiben einer Positionsbestimmung in einem Einstellsystem ist von DE 195 03 492 A1 bekannt, in welchem eine Systemeinstellung mittels eines Reluktanzmotors auftritt. Eine Bewertung der positionsabhängigen Induktivitäten des Motors kann verwendet werden, mittels des Beobachterprinzips, um kontinuierlich die Position ohne einen zusätzlichen Sensor zu bestimmen. Der Antrieb übernimmt deshalb, zusätzlich, die Funktion eines Sensors.

[0020] Ferner ist ein elektrischer Motor aus US 5,365,137 bekannt, wobei der Motor eine zylindrische, nicht-magnetische Ummantelung hat, die in axial ausgerichteten Abschnitten mit einer vieleckigen Außenoberfläche und einer kreisförmigen Innenoberfläche gebildet ist. Separate U-förmige Statorpol-Aufbauten sind freigegeben an dem Äußeren einer Ummantelung befestigt, wobei jeder Ummantelungsabschnitt die mit einer unterschiedlichen Motorphase verknüpften Pole trägt. Ein Signal wird durch einen Mikroprozessor und eine Phasensteuereinheit verarbeitet, jeweils verknüpft mit einer unterschiedlichen der Motorphasen.

[0021] Ferner ist ein elektronisch kommutierter Reluktanzmotor aus WO 90/11641 bekannt, wobei die Motorstruktur und das Erregungsschema einen elektronisch kommutierten Reluktanzmotor mit hoher Effizienz bereitstellen. Der Stator enthält ungleichmäßig beabstandete Pole, die in Paaren gruppiert sind, die durch einen Raum getrennt sind, der auf den gleichmäßigen Abstand der Pole auf dem Rotor bezogen ist. Benachbarte Polpaare auf dem Stator sind durch einen Abstand getrennt, der dem Abstand zwischen den Polen eines Paares gleicht.

[0022] Ferner ist ein elektrischer Schaltkreis der Wicklungen eines Reluktanzmotors aus EP 0 866 547 A1 bekannt, gemäß welchem der Motor ein gepulstes Magnetfeld hat, das durch Magnetjoche getragene Wicklungen bereitgestellt ist, deren Pole ungleichmäßig um den Rotor beabstandet sind. Die Jochpole und die Rotorpole sind auf einem Pfad in diametraler Symmetrie zum Rotorzugang angeordnet.

Zusammenfassung der Erfindung

[0023] Die vorliegende Erfindung soll die Leistung und die Effizienz eines adaptiven elektrischen Motors und Generators verbessern.

[0024] Die Aufgabe der Erfindung wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Weitere, vorteilhafte Ausführungsformen sind durch die abhängigen Ansprüche definiert.

[0025] Die Technologie adaptiver elektrischer Maschinen hat das Potential, die Leistung elektrischer Maschinen für irgendeine gegebene Anwendung zu verbessern. Diese Verbesserung kann durch Erweitern des Bereichs der optimalen Maschinenleistung erreicht werden, oder durch Zunehmen der Gesamteffizienz der Maschine, oder durch Erreichen von Ergebnissen, die mit konventionellen Maschinen überhaupt nicht erreichbar sind, oder auf irgendeinen anderen Weg. Wie oben angemerkt, werden grundlegende Verbesserungen für elektrische Maschinen dringend benötigt.

[0026] Nur die Zeit wird zeigen, ob die Technologie adaptiver elektrischer Maschinen einen revolutionären Fortschritt darstellt, oder einen eher inkrementellen. Jede neue Technologie kann nur durch echte Entwicklung, Einsatz und Testen bestätigt werden. Aber eine gemäß dieser Erfindung entworfene adaptive elektrische Maschine hat das Potential, eine Vielfalt benötigter, signifikanter Fortschritte über existierende Architekturen für elektrische Motoren und Generatoren bereitzustellen. (In der gesamten Zusammenfassung und detaillierten Beschreibung dieser Erfindung wird auf eine gemäß dieser Erfindung entworfene elektrische Maschine als eine "adaptive elektrische Maschine" verwiesen werden.) Eine adaptive Architektur gemäß dieser Erfindung zieht jüngste Fortschritte in einer Vielfalt unterschiedlicher Gebiete an: Leistungselektronik, digitale Signalprozessoren, Halbleiter und fortschrittliche Magnet- und Weicheisen-Materialien. Mit Verwenden dieser und anderer Fortschritte kann eine adaptive elektrische Maschine manche fundamentale Beschränkungen für die Leistung eines elektrischen Motors und Generators überwinden, die bestanden haben, seit Faraday und Tesla sie

zuerst erfanden.

[0027] Moderne elektrische Motoren haben häufig fortschrittliche, Mikroprozessor-basierte Steuersysteme. Aber eine adaptive elektrische Maschine kann eine noch bessere Steuerung über den Maschinenbetrieb bereitstellen durch Isolieren der elektromagnetischen Schaltkreise der Maschine, um eine Interferenz zu eliminieren, und dann Bereitstellen einer angemessenen, optimalen Steuerung für jeden unabhängigen, elektromagnetischen Schaltkreis durch Steuern des elektrischen Flusses in jedem Schaltkreis unabhängig vom elektrischen Fluss in jedem anderen Schaltkreis. Eine bessere Steuerung bedeutet eine bessere Möglichkeit zum Optimieren. Vielmehr als gezwungen zu sein, Kompromisse beim Auswählen des zu verwendenden Motortyps anzunehmen – so wie beispielsweise Aufgeben eines hohen Startdrehmomentes, um eine variable Drehzahl zu erreichen – kann eine adaptive elektrische Maschine, wegen ihrer adaptiven Natur, eine optimale Leistung über einen weiten Bereich von Bedingungen bereitstellen.

[0028] Zusätzlich verwenden adaptive Maschinen normalerweise digitalbasierte, programmierbare Steuereinheiten. Diese Steuereinheiten können die Steuerung der Gesamtanwendung überaus erleichtern, die die adaptive Maschine verwendet, und machen Software zu einem bedeutenden Teil der Gesamtsteuerung. Dies führt direkt zu großen Kosteneinsparungen während der Entwicklung, Implementierung, des Betriebs und einer Aufwertung irgendeiner spezifischen adaptiven Maschine. Wegen dieser Vorteile sind adaptive Maschinen attraktiv für die Implementierung und den Gebrauch durch Designer und Hersteller spezifischer Anwendungen, und für Endverbraucher der Anwendungen, die adaptive Maschinen verwenden.

[0029] Adaptive elektrische Maschinen können in vielen Anwendungen die Effizienz, Zuverlässigkeit, Leichtigkeit der Wartung und Leistung verbessern, als auch Kosten reduzieren. Vielleicht viel wichtiger ist jedoch, dass diese Maschinen eine "ermöglichende Technologie" bereitstellen können. Für Motoren bedeutet dieses das Potential für elektrische Motoren, dass sie mit Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen wettbewerbsfähig sind. Für Generatoren bedeutet dieses das Potential zur Elektrizität, die profitabel aus Energiequellen erzeugt ist, wie beispielsweise mittleren und langsamen Windgeschwindigkeitsgebieten, die aktuell aufgrund der hohen Kosten unsinnig sind.

[0030] Adaptive elektrische Maschinen haben das Potential für eine Vielfalt großer Vorteile. Manche dieser Vorteile enthalten Folgendes:

Verbesserte Gesamteffizienz – konventionelle elektrische Maschinen haben dieselbe, oder sogar höhere spezifische Effizienz, wie es adaptive elektrische Maschinen für manche spezifischen Maschinendrehzahlen haben, oder für manche spezifische Last, oder für manch andere spezifische Bedingung. Aber bei Betrachten des gesamten Betriebsbereiches der Maschine, oder der Gesamteffizienz der in einer realen Umgebung arbeitenden Maschine, können adaptive elektrische Maschinen eine letztlich überlegenere Effizienz besitzen, die nicht durch konventionelle Maschinen erreicht werden könnte.

[0031] Verbesserte Gesamtleistung – adaptive elektrische Maschinen können eine Leistung bereitstellen, die nicht durch irgendwelche existierende, konventionelle elektrische Maschinen erreicht werden kann. Sie können Benutzern einen großen Bereich von Betriebsbedingungen geben, eine einfachere Steuerung und überlegenere Gesamtleistung wegen sämtlicher Aspekte der Technologie für adaptive Motoren, aber genauer genommen wegen des ziel-orientierten Ansatzes für den gesamten Entwurfsprozess der Maschine.

[0032] Breiterer Betriebsbereich – verglichen mit konventionellen, elektrischen Maschinen können adaptive elektrische Maschinen viele überlegene Leistungsmerkmale haben, am wichtigsten ist dabei ein breiterer Bereich von Betriebsbedingungen wie Drehmoment, Drehzahl, Effizienz und Ähnliches. Die Fähigkeit zum Erweitern des Bereiches für diese wichtigsten Eigenschaften sollte Designern und Herstellern viele neue Gelegenheiten geben, ihre Produkte zu verbessern. Sie können die spezifische Leistung der Anwendungen verbessern, in welchen adaptive Motoren integriert sind, die Leistungseigenschaften und Funktionalität dieser Anwendungen verbessern, oder dem Benutzer Anwendungen liefern, die mit konventionellen, elektrischen Maschinen unmöglich zu erreichen waren.

[0033] Überaus erhöhte Effizienz in gewissen Anwendungen – adaptive elektrische Maschinen können eine signifikant größere Effizienz als existierende Maschinen aufweisen, besonders die bei variablen Drehzahlen betriebenen. Selbstverständlich kann die Effizienz nur zu dem Grad verbessert werden, wie verschwendete Energie vorliegt, so dass, wenn eine Gesamteffizienz einer Maschine 90% überschreitet, es nur wenig Raum zur Verbesserung gibt. Aber in vielen Anwendungen, wie beispielsweise elektrischen Fahrzeugen, wo die Betriebsbedingungen weit variieren, kann in manchen Fällen eine adaptive elektrische Maschine soviel wie eine 50% größere Gesamteffizienz als eine Maschine nach dem Stand der Technik haben. Eine größere Effizienz

in einem ein Fahrzeug antreibenden elektrischen Motor erweitert den Bereich des Fahrzeugs für einen gegebenen Batteriesatz und eine übernommene Batterietechnologie – ein großer Vorteil.

[0034] Kleine Größe und Gewicht – das kompakte Design adaptiver elektrischer Maschinen kann eine Platzierung in Anwendungen ermöglichen, in welchen Raum und/oder Gewicht ein Bonus sein können, was neue Verwendungen elektrischer Motoren ermöglicht, wie beispielsweise beim Transportwesen. Eine hohe Drehmomentdichte (mehr mechanische Energie für jedes Kilogramm einer Maschinenmasse) kann Anwendungen ermöglichen, in welchen hohe Energieanforderungen mit einer begrenzten Raumverfügbarkeit in Konflikt stehen. In elektrischen Fahrzeugen können im Rad eingebaute adaptive Motoren es ermöglichen, Herausforderungen für ungefederte Massen, Aufhängung und Lenkung Kosteneffizienz zu adressieren, ohne die Gesamtleistung zu opfern.

[0035] Personensicherheit/niedrige Spannung – eine Architektur für eine adaptive elektrische Maschine kann ermöglichen, dass die meisten Motoren mit einer niedrigen Spannung, im Allgemeinen unter 50 Volt, betrieben werden, dies sei mit hohen Spannungen (typischerweise 300 V) verglichen, die durch Wechselstrominduktionsmotoren in vielen existierenden elektrischen und hybriden Fahrzeugen erforderlich sind, welche strenge Sicherheitsmaßnahmen aufgrund deren Gefährlichkeit für Menschen erfordern.

[0036] Einfachheit der Entwicklung und Implementierung – Hersteller und Designer, die die adaptive Maschinenteknologie verwenden wollen, können sich die strukturelle Gleichförmigkeit und Einfachheit eines Designs für eine adaptive Maschine für vielfältige Anwendungen zunutze machen. Eine Kenntnis der spezifischen, erforderlichen Zielfunktionen für die Anwendung und die Konsistenz des Design-Prozesses sollten ein Design und einen einfachen Einsatz adaptiver Maschinen in einer breiten Vielfalt von Endbenutzer-Anwendungen durch Befolgen einfacher Standardprozeduren erlauben.

[0037] Niedrigere Systemkosten – in den meisten Fällen können adaptive elektrische Maschinen niedrigere Systemkosten als konventionelle elektrische Maschinen (und deren Steuersysteme) haben. Dieses ist zum Teil so, weil adaptive elektrische Maschinen eingebaute Steuerungen haben, die schon zum sehr frühen Beginn als Teil des Gesamt-Designs für die Anwendung entworfen worden sind. Digitale Software-basierte Steuerungen sind im Allgemeinen auch billiger als ähnliche Analogschaltkreise. Ein anderer wichtiger Kostensachverhalt betrifft die Leistungselektronik von Steuersystemen – adaptive elektrische Maschinen haben im Allgemeinen mehr Steuerkanäle mit weniger Leistung auf jedem Kanal, was die Gesamtkosten der Leistungselektronik zum Schalten der Kanäle signifikant reduziert.

[0038] Niedrigere Herstellungskosten – aufgrund der Einsparungen im Material und Arbeitskraft können adaptive elektrische Maschinen wesentlich günstiger herzustellen sein als konventionelle Maschinen. Im Besonderen kann die Möglichkeit, adaptive elektrische Maschinen modular zu machen, es viel einfacher machen, sie herzustellen.

[0039] Niedrigere Kosten für Design und Re-Design – nach dem Implementieren eines Anfangs-Designs und Integration in eine Anwendung einer ersten adaptiven Maschine werden Design und Integration anderer adaptiver Maschinen durch denselben Hersteller glatt und nahtlos sein. Dieselben mathematischen Modelle und ähnliche Steuerelektronik sollten eine Verschiebung bei der Konzentrierung im Design (und besonders beim Re-Design oder Aufwerten) größtenteils auf die Software-Entwicklungsebene ermöglichen. Dieses macht ein Design, Re-Design und Aufwerten viel effizienter, mit schnelleren Entwicklungs- und Umsetzzeiten und billigeren Entwicklungsprozessen, als in der traditionellen Industrie für elektrische Motoren und Generatoren.

[0040] Software-basierte Steuerungen – die Steuerungen für adaptive elektrische Maschinen kann im Allgemeinen Software-basiert sein. Dieses kann einen großen Vorteil für Designer und Hersteller bereitstellen, durch signifikantes Erleichtern der Implementierung und Feinabstimmen adaptiver elektrischer Maschinen in tatsächlichen Anwendungen. Hardware-Steuersysteme müssen physikalisch zum Feinabstimmen dieser während der Entwicklung modifiziert werden, und Hardware kann nur durch Austauschen aufgewertet und verbessert werden. Bei Software kann vieles des Feinabstimmens, als auch zukünftige Aufwertungen und Verbesserungen, einfach auf einer Software-Ebene innerhalb derselben Topologie, Hardware und Steuereinheit einer spezifischen elektrischen Maschine getan werden.

[0041] Weniger Vibration und Geräusch – im Gegensatz zu Maschinen nach dem Stand der Technik kann eine adaptive elektrische Maschine typischerweise einen leiseren und weicheren Betrieb mit weniger Hängebleib-Drehmoment (cogging torque) und weniger Instabilität aufweisen. Eine adaptive elektrische Maschine kann sich an die Abnutzung der Komponenten der Maschine anpassen, so dass Vibration und Rauschen nicht

zunehmen werden, selbst wenn die Maschine altert. Eine adaptive Maschine kann auch Diagnosen durchführen, um den Operator zu informieren, wenn eine übermäßige Abnutzung oder Beschädigung Probleme aufwerfen.

[0042] Erhöhte Stabilität – Benutzer und Gebrauchssysteme können gleichermaßen von einem vorteilhafteren Leistungsfaktor als konventionelle Motoren profitieren, weil adaptive Motoren bei geringer Last effizienter arbeiten und typischerweise zu einem viel höheren Spitzendrehmoment fähig sind. Adaptive Maschinen haben einen langen mittleren Ausfallabstand, und können länger als konventionelle Maschinen verwendet werden.

[0043] Einfachere Pflege und Reparatur – adaptive elektrische Maschinen können separate Module haben, die einfacher gepflegt und repariert werden können. Besonders für große elektrische Maschinen kann die Fähigkeit zum Reparieren oder Ersetzen eines einzelnen Moduls als vielmehr der gesamten Maschine die Zeit und Kosten zum Pflegen bzw. Warten überaus reduzieren.

[0044] Einfachere Aufwertungen – adaptive elektrische Maschinen ermöglichen es, dass die elektrische Maschine durch Software aufgewertet wird. Während die grundlegende Maschinenstruktur fixiert verbleiben kann, können viele wichtige Eigenschaften der Maschine, wie beispielsweise das Steuerungsschema, durch Modifizieren der Software aufgewertet werden. Dies kann vorzugsweise ferngesteuert oder über das Internet getan werden, wo Software für unterschiedliche Betriebsbedingungen verfügbar sein wird.

[0045] Modulare Aufwertungen – adaptive elektrische Maschinen bestehen aus drei unterschiedlichen Modulen: einem elektromagnetischen System, einem Steuersystem, und Software. Aufwertungen können teilweise getätigt werden durch Ersetzen nur mancher Komponenten dieser Module. Die am einfachsten auszuführenden Aufwertungen sind die Software involvierenden, die gewöhnlicher Weise durch einfaches Umprogrammieren der Steuereinheit getätigt werden können. Neue Digital- oder Leistungselektronik kann zu einer Steuereinheitenaufwertung führen, was nicht irgendeine Software- oder Maschinen-Hardwareaufwertung involvieren kann. Vom Konzept her ähnelt dieses einem Aufwerten eines PCs, wo unterschiedliche Module oder Komponenten (Diskettenlaufwerke, Prozessor, Speicher, Programme, Betriebssystem) häufig ohne ein Überholen des gesamten Computersystems aufgewertet werden können.

[0046] Störungstoleranz – adaptive elektrische Maschinen können eine höhere Störungstoleranz haben. In den meisten Fällen kann die elektrische Maschine auf nicht mehr als 30% ihrer totalen elektromagnetischen Schaltkreiskapazität arbeiten, wenn notwendig.

[0047] Schnellere Leitung und Installation – adaptive elektrische Maschinen können kleinere Größen als ihre konventionellen Gegenstücke haben. Die kleinere Größe und die modulare Natur individueller, elektromagnetischer Schaltkreise kann es ermöglichen, dass sogar große (über 1000 PS) adaptive elektrische Maschinen hergestellt werden und direkt zum Kunden verschifft werden, ohne kostenträchtiges Auseinanderbauen und nachfolgendes, am Standort erneutes Zusammenbauen und Testen, wodurch Kosten gesenkt werden und die Installation beschleunigt wird.

[0048] Neue Anwendungen – die überlegenen Eigenschaften adaptiver Maschinen und die Leistung, die nicht durch konventionelle Maschinen erreicht werden konnte, können zu der Entwicklung neuer Anwendungen führen, die zuvor unmöglich zu implementieren waren. Ein Beispiel könnte in dem Gebiet für den elektrischen Transport liegen, wo mechanische Übersetzungen und Getriebe vollständig abgeschafft werden könnten und mit reinen elektronischen Steuerungen ersetzt werden könnten.

[0049] Mit diesen und anderen Vorteilen können adaptive elektrische Maschinen eine überaus verbesserte Leistung für viele Anwendungen bereitstellen. Zwei Beispiele veranschaulichen, wie adaptive elektrische Maschinen eine bessere Leistung als existierende Designs für elektrische Maschinen bringen, besonders wo die Maschine bei variablen Drehzahlen arbeiten muss. Als Beispiel für einen elektrischen Motor beschreiben wir einen Satz von vier, im Rad eingebauten, elektrischen Motoren, die ein Fahrzeug antreiben. Als ein Beispiel für einen elektrischen Generator beschreiben wir einen durch eine Windturbine angetriebenen elektrischen Generator.

[0050] Der Fachmann wird erkennen, dass jedoch Anwendungen für Designs für adaptive elektrische Maschinen viel breiter als diese zwei Beispiele sein können. Tatsächlich können die meisten wenn nicht sämtliche Anwendungen für elektrische Motoren und Generatoren durch Verwenden eines Designs für eine adaptive elektrische Maschine verbessert werden.

[0051] Zum Beispiel enthalten Anwendungen für Entwürfe für einen adaptiven Motor einen Antrieb für sämtliche Arten von Fahrzeugen, Schiffen, Unterseebootschiffen, Rolltreppen, Kränen und Fahrstühlen. Sie enthalten auch große elektrische Motoren (1000 PS und Obige), die als Pumpen, Lüfter, Gebläse, Kompressoren und Riemenantriebe verwendet werden. Diese Motoren sind entscheidend für Großprozessindustrien, wie beispielsweise Stahlproduktionen, Zellstoff- und Papierverarbeitung, Chemie, Öl- und Gas-Raffination, Bergbau und andere Anwendungen für hohe Beanspruchungen. Im Allgemeinen können adaptive Motoren existierenden Motor-Designs in nahezu sämtlichen Anwendungen für eine variable Drehzahl überlegen sein.

[0052] Im Besonderen verwenden Lüfter und Pumpen über 50% der in der Industrie verwendeten Motoren. Die meisten Lüfter und Pumpen verwenden irgendeine Form einer Flussssteuerung, um die Lieferung mit dem Bedarf abzustimmen. Da die meisten Motoren nicht gut bei variablen Drehzahlen wirken, werden im Allgemeinen mechanische Verfahren (wie beispielsweise ein Dämpfer auf einem Lüfter oder eine Stellklappe auf einer Pumpe) zur Flussssteuerung verwendet. Diese Verfahren verschwenden Energie durch Erhöhen des Flusswiderstandes und durch Betreiben des Lüfters oder der Pumpe entfernt von seiner bzw. ihrer meist effizienten Drehzahl.

[0053] Ein adaptiver Motor, der effizient über einen Bereich von Betriebsbedingungen arbeiten kann, stellt eine viel bessere Lösung bereit. Für Zentrifugallüfter und Pumpen ist die Leistungseingabe proportional zur dritten Potenz der Drehzahl, wohingegen der Fluss proportional zu der Drehzahl ist. Dies bedeutet, dass wenn die Drehzahl (oder der Fluss) des Lüfters oder der Pumpe um nur 20% vom Maximum reduziert werden können, der Leistungsverbrauch möglicherweise um nahezu 50% reduziert werden kann. Anstatt Energie zu verschwenden durch Verwenden einer mechanischen Flussssteuerung in Lüftern und Pumpen, kann Energie gespart werden durch Verwenden eines adaptiven Motors, um sie anzutreiben.

[0054] Mögliche Anwendungen für adaptive elektrische Maschinen kommen von unterschiedlichen Industriemärkten. In einem Fall, dass eine komplexe, gesteuerte, mechanische Bewegung erforderlich ist und die Parameter dieser Bewegung variabel sind, sollten adaptive Motoren ins Spiel kommen. Und in den meisten Fällen sollten adaptive Generatoren besser sein als ihre traditionellen Gegenstücke. Im Allgemeinen gibt es drei existierende Märkte, in welchen adaptive Motoren und Generatoren verwendende Anwendungen eine überlegene Leistung anbieten sollten.

[0055] Existierender Markt für elektrische Motoren und Generatoren – dieser wohl-entwickelte, ausgewachsene Markt hat einen Umsatz von über \$ 11 Milliarden pro Jahr und beinhaltet einen intensiven Wettbewerb. Aber in jedem Fall, wo ein hohes Drehmoment oder variable Drehzahlen erforderlich sind, haben adaptive elektrische Maschinen starke Vorteile. Bestimmte Beispiele von Anwendungen können Handwerkzeuge, Pumpen, Motoren für Kühlgeräte und Kompressoren, Windgeneratoren, Roboter, und Ähnliches enthalten.

[0056] Existierender Markt für kleine Verbrennungsmotoren – dieser Markt ist viel größer als der Markt für elektrische Motoren und Generatoren – ungefähr \$ 25 Milliarden an Jahresumsatz – und ist ebenso wohl-entwickelt und ausgewachsen. Manche Anwendungen in diesem Markt bestehen aus Kettensägen, Gartentraktoren, Gartenwerkzeugen und anderen Rasen-, Haus- und Freizeit-Ausrüstungen. Adaptive elektrische Motoren sollten in der Leistung direkt den in diesen Anwendungen aktuell verwendeten Motoren überlegen sein. Aber es gibt auch eine Anzahl anderer wichtiger Gründe, diese Anwendungen im Benzinverbrauch zu ändern. Behördliche Anreize, Umweltsorgen, Geräusch, Effizienz und Sicherheit sind nur eine geringe Anzahl von Gegenständen, die adaptive elektrische Motoren benzin-angetriebenen Verbrennungsmotoren überlegen machen.

[0057] Existierender Markt für das Kleintransportwesen – Anwendungen in diesem Markt enthalten zwei- und dreibereifte Fahrzeuge zum individuellen Transport: Golfwagen, Rollstühle, Lagerhaus-Unterstützungsfahrzeuge, Fahrräder, Scooter und Ähnliches. Dieser große Markt kann einer der besten sein für adaptive elektrische Motoren aufgrund deren überlegenen Leistungseigenschaften.

[0058] Zusätzlich zu den existierenden Märkten, wo adaptive elektrische Maschinen den existierenden Maschinen überlegen sein können, liegt der größte einzelne Zukunftsmarkt für adaptive elektrische Motoren klar in dem Markt für den elektrischen Transport bzw. das elektrische Transportwesen – genauer genommen in elektrischen Fahrzeugen, Lastwagen und Bussen, und den Antriebssystemen für diese. Allein der amerikanische Heimmarkt für Passagierfahrzeuge (ausgenommen Lastwagen, Busse, Militär, und internationale Märkte) stellt einen riesigen Markt von \$ 650 Milliarden im Jahr dar.

[0059] Ein adaptiver elektrischer Motor kann große Verbesserungen für den Transportmarkt bringen (wie un-

ten detaillierter diskutiert). In vielen Fällen können die einzigartigen Merkmale des adaptiven elektrischen Motors es unnötig machen, eine Übersetzung, ein Getriebe, Reduzierstücke, Differentiale, Kühlsysteme, und Ähnliches für Transportanwendungen zu verwenden, während eines Bereitstellens einer optimalen Effizienz für das Fahrzeug in sämtlichen Betriebsmodi. Unten ist eine Liste mancher Mechanismen angegeben, die ersetzt oder entfernt werden könnten, wenn ein adaptiver elektrischer Motor verwendet wird:

Adaptiver Motor =	Verbrennungsmotor
	+ Getriebe
	+ Reduziersystem
	+ Teil des Bremssystems
	+ Teil des ABS-Systems
	+ Teil des Lenkungssystems
	+ Teil des Aufhängungssystems
	+ Kühlsystem
	+ Generator
	+ Teil des Anlasser/Batterie-Systems

[0060] Tatsächlich kann die Technologie für einen adaptiven elektrischen Motor das gesamte Design-Konzept, den allgemeinen Ansatz und die Technologie eines Fahrzeugs beeinflussen. Eine zusätzliche extrem wichtige Betrachtung kommt hierbei von der gesamten elektrischen/Elektroniksteuerung des Fahrzeugs und der Software-basierten Natur dieser Steuerung. Mit einem zentralisierten, elektronischen Steuersystem für ein Fahrzeug und dessen Antriebssystem kann man sich leicht endlose zukünftige Design-Möglichkeiten vorstellen: zentralisierte Verkehrssteuerung, Wegprogrammierung, Temporegler, Autopilot eines Fahrzeugs; Unfallvorbeugung; Rückgewinnung verlorener und gestohlener Fahrzeuge, Fähigkeit, einem Fahrzeug Wartung, Reparatur elektronisch oder drahtlos schnell zu liefern, zukünftige Software-Aufwertungen eines Fahrzeugs und Ähnliches.

[0061] Anwendungen für Designs adaptiver Generatoren enthalten ein Erzeugen von Elektrizität mit Verwenden von Öl, Gas, Gezeiten-Energie, Solarenergie, bio-abbaubaren Treibstoffen, und hydro, nuklear- und windangetriebenen Turbinen. Im Allgemeinen enthalten sie jedoch irgendeine Anwendung zum Umwandeln mechanischer Energie in Elektrizität.

[0062] Das erste Beispiel einer spezifischen Anwendung für eine adaptive elektrische Maschine ist das elektrische Fahrzeug. Ein Antreiben von Fahrzeugen mit elektrischen Motoren wirft reale Probleme auf. Die Betriebsbedingungen ändern sich konstant. Ein Starten erfordert ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl. Der Fahrbetrieb erfordert Effizienz. Die Beschränkungen der Batterieleistung beschränken die Reichweite. Einbiegen auf eine Schnellstraße erfordert hohe Drehmomentstöße bei hohen Geschwindigkeiten. Jedoch fügt ein Unterbringen eines schweren Motors in den Rädern des Fahrzeugs zu viel ungefederte Masse dem Fahrzeug hinzu, als es zum Handhaben auf Straßen gut ist. Kein existierender elektrischer Motor kann diese Leistungsanforderungen bei vernünftiger Effizienz und wettbewerbsfähigen Kosten liefern.

[0063] Adaptive elektrische Maschinen können diese Probleme lösen. Als ein elektrisches Fahrzeugantriebssystem kann eine adaptive elektrische Maschine direkt in jedem der vier Räder eines elektrischen Fahrzeugs befestigt sein. Ein lokaler digitaler Signalprozessor ("DSP"), optional oder möglicherweise innerhalb des elektrischen Motors befestigt, kann jeden Motor steuern. Entscheidungstätigende Algorithmen können die Fahrzeugleistung nachverfolgen und analysieren, Lastanforderungen nahezu sofort identifizieren und Energie demgemäß liefern.

[0064] Der Motor kann sich selbst wie benötigt bis zu tausendmal pro Sekunde rekonfigurieren, unter lokalem Verwenden seines DSPs, zur verbesserten Effizienz bei allen Drehzahlen, in allen Umgebungen, und in sämtlichen Terrains. Während des Bremsens kann der Motor sowohl als Generator als auch als Brems-/ABS-System agieren, mit Aufnahmen der regenerativen Energie vom Bremsen zur Wiederverwendung auf die effizienteste Weise.

[0065] Die Architektur des adaptiven Motors kann es ermöglichen, dass individuelle Statorpol-Paare eines im Rad eingebauten Fahrzeugmotors repariert oder ausgetauscht werden, ohne zu erfordern, dass der gesamte

Stator repariert wird. Zusätzlich kann die Steuereinheit eines adaptiven Motors programmiert sein, zu ermöglichen, dass der Motor selbst dann läuft, wenn eines oder mehrere der Statorpol-Paare abgeschaltet oder beschädigt sind.

[0066] In einem adaptiven Motor kann das die Statorpol-Paare bildende elektromagnetische Material überaus von traditionellen Designs reduziert sein, was Effizienz hinzufügt. Ein sorgfältiger Entwurf, so wie beispielsweise die Verwendung von Soft Magnetic Composites ("SMC") bzw. Weichmagnetischen Verbundwerkstoffen, kann den Formfaktor der Maschine verbessern, was beim Reduzieren der Größe und der aktiven Masse des Motors hilft. Dieses kann auch beim Reduzieren des Nettokernverlustes bei Betriebsfrequenzen und Induktionspegeln helfen, was somit die Effizienz erhöht.

[0067] Zusätzlich macht das Reduzieren der Gesamtmasse des Motors einen großen Unterschied, wenn der Motor ein im Rad eingebauter Motor ist. Ein Reduzieren der ungefederten Masse in den Rädern verbessert überaus die Handhabung eines Fahrzeugs. Ein großes Problem beim Verwenden von im Rad eingebauten Motoren zum Antreiben von Fahrzeugen ist es gewesen, genug Leistung von einem im Rad eingebauten elektrischen Motor zum Antreiben des Fahrzeugs innerhalb enger Größen- und Gewichtsrandbedingungen zu bekommen.

[0068] Verglichen zu Motoren nach dem Stand der Technik kann ein Design für ein elektrisches Fahrzeugantriebssystem mit vier im Rad eingebauten adaptiven Motoren viele Vorteile bereitstellen. Der Motor kann weniger Komponenten als Motoren nach dem Stand der Technik enthalten, was zu niedrigeren Kosten und leichterem Gewicht führt. Das Motor-Design kann eine hohe Zuverlässigkeit bereitstellen, mit nur einem sich bewegenden Teil pro Antriebsaufbau und ohne Getriebe oder Bürsten. Wie oben bemerkt, kann das Motor-Design auch eine hohe Störungstoleranz bereitstellen, da der Motor zum Betrieb fähig ist mit nicht mehr als 30% seiner gesamten elektromagnetischen Schaltkreiskapazität, falls notwendig.

[0069] Mit vier Motoren im Fahrzeug benötigt jeder Motor nur ein Viertel des Stroms, der erforderlich ist, wenn nur ein Motor das Fahrzeug antreibt. Das elektrische Fahrzeug kann umweltfreundliche Leistung bereitstellen – ohne Emissionen, mit wenig Hitze, mit wenig Geräusch. Ein adaptiver Motor kann in Rädern installiert sein, um in Standardaufnahme zu passen, in Getriebe- oder getriebelosen Direktantriebsanwendungen.

[0070] Ein adaptiver Motor kann elektrische Energie von Batterien, einem Benzingenerator, oder anderen Energiequellen annehmen. Es ist wesentlich, dass das Fahrzeug mit einer niedrigen Spannung, im Allgemeinen unter 50 V, betrieben werden kann. Im Vergleich dazu seien die hohen Spannungen (typischerweise 300 V) genannt, die mit Wechselstrom-Induktionsmotoren in vielen existierenden elektrischen und hybriden Fahrzeugen erforderlich sind, was strenge Sicherheitsmaßnahmen aufgrund deren Gefahr für Menschen erfordert.

[0071] Während sämtliches des Obigen wichtige Vorteile sind, kann der Hauptvorteil adaptiver elektrischer Motoren dieses sein: erhöhte Leistung, Effizienz und Leistungsabgabe (oder Drehmoment) bei hohen und niedrigen Betriebsgeschwindigkeiten. Existierende Verbrennungsmotoren und elektrische Motoren zum Antreiben von Fahrzeugen wirken nicht effizient über einen breiten Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten und Bedingungen. Ein adaptiver Motor kann dieses.

[0072] Das zweite Beispiel einer spezifischen Anwendung für eine adaptive elektrische Maschine ist ein Windkraftgenerator. Ein Erzeugen von Elektrizität aus Windkraft wirft reale Probleme für elektrische Generatoren auf. Windgeschwindigkeit und Richtung ändern sich häufig. Strenge Grenzen bestimmen das Gewicht und die Größe innerhalb der Windturbine. Das Energienetz erfordert, dass eine feste Frequenz in dieses eingespeist wird. Aber die Umdrehungsgeschwindigkeit kann sich auf die Frequenz der erzeugten Leistung auswirken.

[0073] Aktuelle Designs müssen Kompromisse treffen, um diese Streitfragen zu adressieren. Manche verwenden effizienzraubende Aufwärtsgetriebe, komplexe elektrische Systeme zum Liefern einer konstanten Leistung bzw. Energie bei variablen Turbinengeschwindigkeiten, oder Festgeschwindigkeits-Designs, die ein lautes Geräusch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten produzieren. Kein existierender Generator tut dieses gut genug für die praktische Anwendung für Gebiete mit niedrigen oder sich schnell ändernden Windgeschwindigkeiten.

[0074] Ein adaptiver Generator kann diese Probleme lösen. Als ein Windkraft-Erzeugungssystem kann eine adaptive elektrische Maschine direkt mit der Welle der Windturbine des Windrads verbunden sein. Die Grundstruktur dieser rotierenden elektrischen Maschine kann wie oben, für die elektrischen Motoren für Fahrzeuge

beschrieben, sein.

[0075] Ein digitaler Signalprozessor, innerhalb des elektrischen Generators befestigt, kann den Generator steuern. Entscheidungstätigende Algorithmen können die Turbinenleistung nachverfolgen und analysieren, mit nahezu sofortigem Identifizieren der mechanischen Leistungsfähigkeit und dem entsprechenden Liefern von Steuereingaben an den Generator.

[0076] Der Generator kann sich selbst wie benötigt rekonfigurieren, bis zu tausendmal pro Sekunde, für eine verbesserte Effizienz bei allen Windgeschwindigkeiten und Bedingungen. Der Generator kann entweder asynchrone Energie oder eine zur Verbindung mit dem Energienetz synchronisierte Energie produzieren, mit aktiv korrigierter Spannungsschwankung und mit minimiertem Oberwellengehalt.

[0077] Verglichen zu den Generatoren nach dem Stand der Technik kann ein adaptives Windkraft-Generatorsystem viele Vorteile bereitstellen. Der adaptive Generator kann weniger Komponenten als Generatoren nach dem Stand der Technik enthalten, was zu niedrigeren Kosten und leichterem Gewicht führt. Das Design für einen adaptiven Generator kann einen höheren Zeitvorlauf bereitstellen, mit nur einem sich bewegenden Teil pro Antriebsaufbau und ohne Getriebe oder Bürsten. Das Generator-Design kann auch eine höhere Störungstoleranz bereitstellen, da der Generator fähig ist, mit nicht mehr als 30% seiner gesamten elektromagnetischen Struktur zu arbeiten, falls notwendig.

[0078] Mehrfache Generatoren können auf jeder Turbine verwendet werden. Der adaptive Generator für Windkraft kann umweltfreundliche Energie bereitstellen – ohne Emissionen, mit wenig Hitze, mit wenig Geräusch. Ein adaptiver Generator kann, in vielen Fällen, in die Windturbine passen und direkt durch sie angetrieben werden, ohne die Verwendung uneffizienter Getriebekonfigurationen. Der Generator kann effizient in Gebieten mittlerer bis niedriger Windgeschwindigkeiten arbeiten, selbst wenn sich die Windgeschwindigkeit schnell verändert.

[0079] Während sämtliche der obigen wichtige Vorteile sind, kann ein wichtigster Vorteil eines adaptiven Generators über den Stand der Technik dieses sein: verbesserte Effizienz und Energie bzw. Leistung bei variablen Turbinengeschwindigkeiten. Existierende Generatoren für Windkraft arbeiten nicht effizient über einen breiten Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten und Bedingungen. Ein adaptiver Generator kann dieses.

[0080] Es ist lange ein Ziel gewesen, die Steuerung elektrischer Motoren zu verbessern. Aber in Motoren nach dem Stand der Technik beeinflussen zu viele Faktoren das Treibersignal des Motors, um irgendeinen realen Effekt für verbesserte Kontrollschemas zu ergeben. Durch Bereitstellen einer Architektur, die effektiver bzw. wirksamer gesteuert werden kann, stellt eine adaptive elektrische Maschine das Potential zur verbesserten Leistung über einen breiten Bereich von Bedingungen bereit.

[0081] Es ist das Problem im Stand der Technik gewesen, dass diese verbesserten Steuerschemas nicht effektiv die elektromagnetischen Schaltkreise der elektrischen Maschinen nach dem Stand der Technik über mehr als einen schmalen Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten steuern konnten. Magnetische und elektrische Interferenzen zwischen den elektromagnetischen Schaltkreisen machten eine effektive Steuerung nur erreichbar durch Versuch und Irrtum mit Abstimmen auf einen bestimmten schmalen Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten.

[0082] Somit konnten elektrische Motoren nach dem Stand der Technik entworfen werden, hocheffizient über einen schmalen Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten zu sein. Sie konnten nicht dynamisch gesteuert werden, um konsistent effizient zu sein, bei während des Gebrauchs über einen breiten Bereich variierenden Betriebsgeschwindigkeiten.

[0083] Eine adaptive elektrische Maschine kann dazu gebracht werden, effektiv auf eine Steuerung anzusprechen. Konventionelle Drei-Phasen-Motorsteuereinheiten steuern nur einen Strom (Amplitude und Frequenz) und zwei Phasenverzögerungen. Dieses ergibt eine Gesamtmenge von vier unabhängigen, steuerbaren Parametern, unter der Annahme, dass das Anregungsprofil in jeder Phase ist und sich nicht innerhalb einer Zeit ändert.

[0084] Solch eine kleine Anzahl steuerbarer Parameter kann oft nicht die gewünschte Leistung des Motors liefern, besonders über einen breiten Bereich von Betriebsbedingungen. Zusätzlich können Streitfragen wie Effizienz, Drehmomentwelligkeit, kontinuierliche Drehmomentabgabe, mechanisches und akustisches Geräusch, Überschuss-Hysterese, Wirbelstrom- und anormale Kernverluste, unangemessene thermische Hand-

habung, gegenseitige Induktion und Übersprechen (Transformatoreffekte), und ähnliche Probleme nicht leicht mit diesen beschränkten Parametern gehandhabt werden.

[0085] Folglich wurden viele Entwicklungen im dem Stand der Technik getätigt in einem Versuch, die Anzahl steuerbarer Parameter zu erhöhen. Manche der Entwicklungen erhöhen die Anzahl von Phasen von drei auf fünf, sieben, fünfzehn oder sogar mehr. Andere arbeiten auf den Erregungsprofilen, und verwalten bzw. handhaben die Amplituden- und Phasenverzögerungen der in den Erregungsströmen vorliegenden Oberwellen. Diese Entwicklungen wurden mit Verwenden aller existierenden Techniken zum Steuern konventioneller Motoren versucht, mit Pulsbreitenmodulations-Verarbeitung des Gleichstroms, oder mit Wechselstromabgabe erzeugenden Pulsbreitenmodulations-basierten Invertern, welche die populärsten Strategien sind.

[0086] Aber diese Entwicklungen haben nur inkrementelle Verbesserungen erreicht. Dieses kann an einem Hauptgrund liegen – konventionelle Mehrphasen-Motoren haben nicht elektromagnetische Schaltkreise, die voneinander ausreichend isoliert sind, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen zwischen den elektromagnetischen Schaltkreisen zu eliminieren. Als ein Ergebnis kann irgendeine Änderung in einem steuerbaren Parameter des Motors komplexe, dynamische Änderungen in dem elektromagnetischen Schaltkreis des Motors bewirken. An einer Stelle können die steuerbaren Parameter nicht wirklich voneinander unabhängig gesteuert werden.

[0087] Dieses ist am besten ersichtlich durch Vergleichen einer konventionellen elektrischen Maschine mit einer adaptiven elektrischen Maschine. [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Ansicht für einen konventionellen elektrischen Motor. Ein magnetischer Stator **302** enthält einige Magneten **304**, welche abhängig von dem Motortyp Permanentmagneten oder Elektromagneten sein können. Die Magneten **304** sind alle elektrisch und magnetisch miteinander verbunden. Ein Rotor **306** mit Magneten **308**, auch entweder Permanentmagnete oder Elektromagnete, ist ebenso elektrisch und/oder magnetisch integriert.

[0088] Die schematische Ansicht von [Fig. 1](#) deckt eine breite Vielfalt von elektrischen Wechselstrom- und Gleichstrommotoren ab. Der konventionellste Bürsten-Gleichstrom-Motor würde Elektromagneten **308** auf dem Rotor **306** enthalten, welche durch Bürsten kommutiert werden, und Permanentmagneten **304** auf dem Stator **302**. Andere Typen von Gleichstrommotoren enthalten Servomotoren, Schrittmotoren und Ähnliches, welche andere Designs haben könnten, aber immer noch dieselbe allgemeine schematische Ansicht.

[0089] Bürstenlose Motoren würden Permanentmagneten **308** und Elektromagneten **304** haben. Andere Typen von Gleichstrommotoren, besonders Wickel-Gleichstrommotoren, fallen auch unter dieselbe Struktur. Wechselstrommotoren fallen auch im Allgemeinen unter dieselbe Anordnung. Normalerweise werden Drei-Phasen-Induktionsspulen-Anordnungen hergestellt, wobei fünf Phasen und mehr recht selten sind.

[0090] Mit diesem Typ einer Standardanordnung wird die meiste Beachtung der Steuerung der Eingangsspannung V und des Stroms A gewidmet, entweder nur für den Stator **302**, oder sowohl für Stator **302** als auch für Rotor **306**. In Wechselstrommotoren können alle drei Phasen aktiv gesteuert werden, und diese Fähigkeit ist sehr weit hinter dem aktuell in Wechselstrom-Steuereinheiten getätigten Fortschritt. Servomotoren, Schrittmotoren und Wickelmotoren können alle mehr als nur zwei Parameter steuern, aber sind auch darin beschränkt, was aktiv gesteuert werden kann.

[0091] Die typischen Leistungseigenschaften traditioneller elektrischer Motoren sind in [Fig. 2](#) gezeigt. [Fig. 2\(a\)](#) zeigt die Drehzahl-Drehmoment-Kurven für den tatsächlichen FBI-4001-Serie-Gleichstrommotor und seine Leistungsabgabe-Drehzahl-Kurven. Dieser Motor wurde in den ersten EV-1-elektrischen Fahrzeugen verwendet, die von General Motors im Jahr 1997 gebaut worden sind.

[0092] Ähnliche wie in [Fig. 2\(b\)](#) gezeigten Eigenschaften kommen von einem unterschiedlichen Typ eines Gleichstrommotors, der von Unique Mobility, Inc. hergestellt worden ist. Dieser Motor wird in ZAP Elektrofahrzeugen und anderen Transportanwendungen verwendet. Wie klar ersichtlich ist, nimmt das nutzbare Drehmoment schnell mit der Zunahme der Drehzahl des Motors ab, was einer der größten Nachteile der konventionellen elektrischen Motoren ist.

[0093] Eine Aufgabe für adaptive elektrische Motoren kann ein Erreichen der sogenannten Zielfunktion für den Motor sein, was ein Identifizieren der Motorparameter erfordert, die am wünschenswertesten für den Motor in einer spezifischen Anwendung sind. Entwurfsaufgaben arbeiten routinemäßig mit einer Zielfunktion beim Versuch, erforderliche Parameter zu erreichen. Ein wirklicher Unterschied beim Motorentwurf ist, wie früh der Design-Prozess startet, um Haupteigenschaften und Parameter der Motoren zu beeinflussen. In konventionel-

len Anwendungen ist es eine Hauptentscheidung, welcher Motortyp verwendet werden wird – Wechselstrom oder Gleichstrom – und welcher spezifischer Untertyp oder welche enge Gruppe einer Motorkonfiguration betrachtet werden wird.

[0094] Nach der Hauptentscheidung ist die für den Designer verbliebene Flexibilität bereits scharf auf wenige Auswahlmöglichkeiten reduziert. Und wenn der Motor auf exakte Spezifikationen entworfen wird, sind das, was wirklich die Leistung des Motors beeinflussen, die Spannung und der Strom, die zum Motor gespeist werden – nur zwei Parameter. In Mehrphasen-Wechselstrommotoren, manchen Servomotoren und anderen kann die wirkliche Anzahl von Parametern, die einer freien Variation unterzogen werden, größer sein; vielleicht fünf bis sechs Parameter (drei Spannungen und Phasenwinkel) in Drei-Phasen-Wechselstrommotoren.

[0095] Die zentrale Idee hinter dem Konzept für adaptive Motoren kann sein, genug Variablen zu ermöglichen, die aktiv während eines normalen Betriebs des Motors auf die spezifizierte Zielfunktion gesteuert werden können, die so nah wie möglich erreicht werden soll. [Fig. 3](#) veranschaulicht die schematische Ansicht einer Ausführungsform eines adaptiven Motors, welcher der schematischen Ansicht in [Fig. 1](#) für konventionelle Motoren ähnlich sein kann. Aber wenigstens ein wesentlicher Unterschied kann sein, dass jeder elektromagnetische Schaltkreis unabhängig gesteuert werden kann.

[0096] In der in [Fig. 3](#) gezeigten adaptiven elektrischen Maschine mit N unabhängigen elektromagnetischen Schaltkreisen für den Stator **302** und M unabhängigen elektromagnetischen Schaltkreisen für den Rotor **306** ergeben sich $2(N + M)$ unabhängige Variablen, um damit zu arbeiten. Durch angemessenes Steuern dieser Variablen können die erforderlichen Zielfunktionen näher angenähert werden, was ein signifikanter Unterschied einer adaptiven elektrischen Maschine von konventionellen Maschinen sein kann.

[0097] [Fig. 4\(a\)](#) definiert die Erfordernisse für einen Motor mit einem konstanten Drehmoment über einen gewissen Bereich von Betriebsgeschwindigkeiten des Motors. Die gewünschte Drehzahl-Drehmoment-Kurve **320** ist gezeigt, wie auch die wirkliche Drehmoment-Drehzahl-Kurve konventioneller Motoren **322** (siehe auch [Fig. 2\(a\)](#)), und die Kurve **324**, die erreichbar sein kann durch Optimierung mit mehrfachen Variablen in einem adaptiven elektrischen Motor.

[0098] [Fig. 4\(b\)](#) zeigt eine ideale erforderliche Zielfunktion **340** in Anwendungen, wo eine konstante Geschwindigkeit bzw. Drehzahl über den Bereich von Betriebslasten auf der Welle des Motors erforderlich ist, typische konventionelle Motoreigenschaften **342**, und Leistungsmöglichkeiten **344** eines adaptiven Motors.

[0099] Ähnlich zum Obigen behandelt [Fig. 4\(c\)](#) die Zielfunktion, die eine spezifische hohe Effizienz über den Bereich von Motordrehzahlen oder Lasten erfordert. Solche Erfordernisse erwachsen in manchen Energie-beschränkten Anwendungen, z.B. Raumfahrtanwendungen oder batterieangetriebenen Motoren. Diese [Fig. 4\(c\)](#) zeigt die Zielfunktion **360**, was konventionelle Motoren liefern können **362**, und die optimierten Eigenschaften **364** für einen adaptiven Motor.

[0100] Mit Abwenden von diesen Beispielen zu einer verallgemeinerten Optimierungstheorie, ist das optimale Steuern des Motors eine allgemeine Minimierungsaufgabe einer Mehr-Variablen-, hochgradig nicht-linearen mehrfachen Minimumsfunktion, üblicherweise eine "Verlust"- oder "Ziel"-Funktion genannt. Abhängig von der Steueraufgabe kann man z.B. Motorverluste bei gegebener Drehzahl und Drehmoment (die verbreitetste Steueraufgabe) minimieren, oder Motordurchschnittsverluste in einem Bereich von Drehzahlen und Drehmomenten minimieren, oder eine Drehmomentwelligkeit bei gegebener Drehzahl und Drehmoment oder in einem Bereich von Drehzahlen und Drehmomenten minimieren.

[0101] Häufig sind andere Steuerziele formuliert. Diese Ziele können einfache motorbezogene Parameter behandeln – so wie beispielsweise ein Minimieren eines Geräusches oder elektromagnetischer Emissionen, oder Produzieren eines spezifischen Übergangsverhaltens des Motors (z.B. Bereitstellen einer erforderlichen Beschleunigung der Motordrehzahl). Oder sie können ein Optimieren der Leistung des solche Motoren verwendenden komplexen Systems behandeln – so wie beispielsweise ein Minimieren einer Abweichung von dem spezifischen Drehzahlprofil einer durch den gesteuerten Motor angetriebenen Beförderungsanlage, oder Bereitstellen des energie-effizientesten Temporeglers für ein mit einem elektrischen Motor angetriebenes Fahrzeug auf der Straße.

[0102] Beim Behandeln solcher komplexen Optimierungsaufgaben aus dem realen Leben solle man zuerst alle Parameter, oder Variablen, identifizieren, die möglicherweise die Zielfunktion bei einer Minimierung beeinflussen könnten. Für elektrische Motoren sind dieses im Allgemeinen elektrische Parameter der Erregungs-

schaltkreise (Ströme für jeden Schaltkreis, deren Profile und Frequenzen, Phasenverzögerungen zwischen individuellen Schaltkreisen und Ähnliches).

[0103] Aber sie können auch manche mechanisch oder elektromagnetisch gesteuerte Parameter enthalten. Diese Parameter können enthalten: kommutierte Anzahl von Windungen oder Spulen, die aktuell in dem Motor erregt sind (welcher oft aus Kostengründen durch Relais kommutiert wird, aber auch elektronisch gesteuert werden könnte); variable Luftspaltgröße oder variable Reluktanz (welche am häufigsten durch elektromechanische Einrichtungen gesteuert wird, aber auch durch Verwenden von Material mit elektromagnetisch-abhängigen Dimensionseigenschaften erreicht werden könnte); kommutierte Anzahl von Motorsegmenten oder Teilen für mehr-segmentierte Motoren (wie Mehrfach-Luftspalt-, Mehrfach-Stator-Axialmotor-Anordnungen); gesteuerte Erregung in Mehr-Phasen-Motoren zum Reduzieren einer Drehmomentwelligkeit und eines Hängebleib-Drehmomentes (cogging torque); und andere ähnliche Parameter.

[0104] Wenn sämtliche solcher variablen Parameter identifiziert sind und deren Einfluss auf die Zielfunktion bestimmt und quantifiziert ist, kann die Optimierung in einem mathematischen Sinn beginnen. Eine zuerst zu verfolgende komplexe und knifflige Prozedur (und die Prozedur wird häufig als ein Ganzes übersehen oder absichtlich aufgrund ihrer extremen Komplexität ausgelassen) ist ein Identifizieren von Variablen, die wahrhaftig unabhängig voneinander sind (was in der Mathematik ein Normalisieren oder Orthogonalisieren von Variablen in einem mehr-dimensionalen Variablenraum genannt wird). Diese Prozedur ergibt die tatsächliche Dimension des Variablenraums – ein Ergebnis, dessen Wichtigkeit nicht überbetont werden kann.

[0105] Viele Optimierungsschemas nach dem Stand der Technik versuchten, die Gesamtanzahl von Variablen zu erhöhen, ohne eine genaue Analyse ihrer Zwischenabhängigkeiten zu tätigen. Häufig führen Designs für elektrische Motoren nach dem Stand der Technik konzentrierte Wicklungen auf dem magnetischen Pfad für den gemeinsamen Stator ein und versuchen, diese elektrisch unabhängigen, konzentrierten Wicklungen unabhängig zu steuern. Beginnend von einer relativ kleinen Anzahl unabhängiger, konzentrierter Wicklungen ist die Fähigkeit von Steuerungen, die gewünschte, optimale (minimale) Zielfunktion zu liefern, beeinträchtigt, und ein weiterer Anstieg in der Anzahl der unabhängigen, konzentrierten Wicklungen verbessert nicht länger die Leistung des Motors.

[0106] Die Begrenzung des Standes der Technik kann in diesem Fall sein, dass solche "unabhängigen" elektrischen Variablen nicht tatsächlich voneinander unabhängig sind, aufgrund der Tatsache, dass die Wicklungen nicht ausreichend isoliert sind, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen zwischen den Wicklungen zu eliminieren. Signifikante Querinduktionen zwischen solchen Wicklungen können die gesteuerten Variablen voneinander abhängig machen. Im Sinne einer Optimierungstheorie resultiert ein weiterer Anstieg in der Anzahl elektrisch unabhängiger, konzentrierter Wicklungen nicht in dem Anstieg unabhängiger Variablen zur Motorleistungsoptimierung.

[0107] Andere Versuche nach dem Stand der Technik behandeln konventionellere Drei-Phasen-Motoranordnungen, und versuchen, einige unabhängige Oberwellen höherer Ordnung in der Form des Stroms einzuführen, der in jede der drei Phasen injiziert wird. Es ist beabsichtigt, dass solche Oberwellen unabhängige Variablen in dem Sinn eines Definierens einer beliebigen zu injizierenden Stromform sind.

[0108] Die Einschränkung ist wiederum, dass für bekannte Topologien eines Magnetpfades nach dem Stand der Technik diese Oberwellen nicht unabhängige Variablen zum Zweck eines Optimierens einer Motorleistung sein können. Dieses kann wiederum aufgrund der Tatsache sein, dass die Phasen in Drei-Phasen-Motoren eine hohe Querinduktion bzw. Querinduktivität haben und eine signifikante Interferenz aufeinander ausüben, wenn sie unter unterschiedlichen Erregungsschemas erregt oder entregt werden.

[0109] An einer Stelle kann wiederum irgendein weiterer Anstieg in der Anzahl höherer Oberwellen in der Form eines elektrischen Stroms pro Phase nicht länger in einem Anstieg in der Anzahl unabhängiger Variablen zur Motorleistungsoptimierung resultieren. Ziemlich ähnliche Ergebnisse werden für andere Versuche im Stand der Technik beobachtet, verzerrte Erregungsströme in Motoren zu verwenden, die nicht eine ausreichende Isolation jeder Motorphase haben, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen zwischen Motorphasen zu eliminieren.

[0110] Andere Faktoren oder Variablen können sich auf die Leistung elektrischer Motoren auswirken, so wie beispielsweise die Dimension oder Größe des Luftspaltes. Folglich wurden Anordnungen für einen variablen Luftspalt (variable Reluktanz) in vielen Implementierungen nach dem Stand der Technik berücksichtigt. Weil diese Luftspaltgrößen-Variable unabhängig von den elektrischen Eingaben an die Wicklungen ist, kann das

Hinzufügen dieser Variable signifikant die Fähigkeit zum Optimieren von Zielfunktionen verbessern; die Nachteile solche Anordnungen können die Kosten und die Komplexität einer tatsächlichen Implementierung sein.

[0111] Andere Entwicklungen im Stand der Technik versuchen, die Anzahl von Spulen oder Windungen zu kommutieren, die bei unterschiedlichen Wicklungen des Motors erregt werden, entweder in verteilten oder konzentrierten Wicklungsanordnungen. Solche Änderungen ändern fundamentale Parameter der elektromagnetischen Schaltkreise des Motors und bieten den Anstieg in der Anzahl unabhängiger Variablen, die zur Steuerung verfügbar sind. Dies kann in einer besseren Leistungsfähigkeit und einer größeren Steuerungsflexibilität solcher Motoren resultieren; der Nachteil können, wiederum, höhere Kosten und Komplexität einer Implementierung sein, welche in den meisten Fällen Relais mit relativer geringer Zuverlässigkeit und schlechten Gesamtlebensdauer-Eigenschaften mit sich bringt.

[0112] Noch andere Anordnungen nach dem Stand der Technik versuchen, denselben Gegenstand durch Einführen segmentierter Motoren zu lösen, auf solch eine Weise, dass separate, physikalische Segmente des Motors unabhängig aktiviert oder erregt werden können. Am häufigsten wird dieses in der Form eines Axial-Luftspalt-Fluss-Motors mit einigen Statoraufbauten getan, die mit demselben Schaft oder Statorrahmen koaxial verbunden sind, aber es sind auch Radial-Fluss-Anordnungen bekannt. Manche der für solche Anordnungen verwendeten Namen sind Segmentierte Elektromagnetische Motor-Arrays (Segmented Electromagnetic Motor Arrays), kaskadierte Motor-Anordnungen, Motor-Kuppeln und Ähnliches.

[0113] Hierbei können, wie auch bei allen anderen elektromechanischen Anordnungen mit einer teilweisen Nutzung der gesamten Wicklungen und/oder des Statorankers, wiederum die Vorteile eine bessere Leistung in einem breiteren Bereich sein. Aber die Nachteile können ein größeres Gewicht, niedrigere Drehmomentdichte, mehr Kosten, kompliziertere Steuerungen und geringere Zuverlässigkeit, unter anderen, sein.

[0114] Was wirklich benötigt wird (und was dem Stand der Technik fehlt und was dieser nicht fähig ist zu adressieren), kann die Fähigkeit sein, eine große Anzahl unabhängiger Variablen zu haben, die einfach innerhalb einer einfachen Motoranordnung gesteuert werden, so dass die Steuerung dieser unabhängigen Variablen eine optimale Motorleistung liefern kann und die beste Zielfunktion für irgendeinen gegebenen Zweck erreichen kann. Und was den Stand der Technik davon abhält, dieses zu erreichen, kann die Tatsache sein, dass die elektrischen Wicklungen nicht ausreichend isoliert sind, um im Wesentlichen eine elektrische und elektromagnetische Interferenz zwischen diesen zu eliminieren.

[0115] Wenn wir einfach die gegenseitigen Abhängigkeiten der Variablen voneinander entfernen würden, könnten wir eine elektrische Maschine haben, die empfänglich für eine tiefergehende Steuerung und das Potential ist, eine bessere Leistung als mit irgendeiner anderen Anordnung für eine elektrische Maschine zu erreichen. Motoren für einen gemeinsamen magnetischen Pfad nach dem Stand der Technik erlauben nicht solch eine Unabhängigkeit von Variablen aufgrund der Querinduktivitäten entlang des gemeinsamen magnetischen Pfades und ähnlicher Interferenzen zwischen elektrischen Wicklungen.

[0116] Ein Weg, diese Variablen unabhängig zu machen, kann es sein, die Querinduktivität zu entfernen. Das heißt, den magnetischen Pfad in mehrere magnetisch isolierte Untersysteme aufzubrechen, so dass jedes Untersystem ausreichend isoliert von den anderen Systemen ist, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen zwischen den Untersystemen zu eliminieren. Eine auf diese Weise entworfene, adaptive elektrische Maschine kann eine bessere Steuerung und Optimierung erreichen durch ein ausreichendes Isolieren der elektromagnetischen Schaltkreise der Maschine, und dann Bereitstellen einer angemessenen optimalen Steuerung für jeden unabhängigen elektromagnetischen Schaltkreis durch Steuern des elektrischen Flusses in jedem Schaltkreis unabhängig vom elektrischen Fluss in jedem anderen Schaltkreis.

[0117] Mit einer adaptiven Architektur kann eine große Anzahl von Variablen gesteuert werden, effektiv und unabhängig, in der Maschine. Mit jedem elektromagnetischen Schaltkreis können die Stromamplitude und das Stromprofil (Frequenz, Form, Phasenverzögerungen des Starts und Stopps des Profils usw.) individuell und unabhängig gesteuert werden. So wie die Anzahl elektromagnetischer Schaltkreise zunimmt, kann die Anzahl steuerbarer Variablen für den gesamten Motor zunehmen.

[0118] Die Schlüsselaufgabe kann sein, die Anzahl den Betrieb der Maschine steuernder Variablen zu erhöhen, aber auf solch eine Weise, dass jede Variable beträchtlich zum Maschinenbetrieb beiträgt. Bei konventionellen Maschinen führt ein Erhöhen der Anzahl von Variablen schnell zu sich vermindernenden Erträgen, da ein Ändern der Variablen beginnt, einen kleinen, falls überhaupt irgendeinen, vorhersagbaren gewünschten Effekt zu haben.

- [0119]** Ein Erreichen dieser Schlüsselaufgabe einer großen Anzahl von Variablen, jede mit einem wesentlichen Effekt, kann viele der Vorteile adaptiver elektrischer Maschinen ermöglichen.
- [0120]** Standardsteuerungsaufgaben, so wie beispielsweise ein Liefern eines erforderlichen Drehmomentes bei einer gegebenen Motordrehzahl, können erreicht werden, und dann wesentlich und radikal erweitert werden.
- [0121]** Obwohl es immer noch Kompromisse gibt, kann nun auch eine Vielfalt von Leistungsaufgaben erreicht werden, so wie beispielsweise ein Maximieren der Motoreffizienz bei variierender Betriebsdrehzahl, Reduzieren eines akustischen und mechanischen/elektromechanischen Geräusches, Handhaben von Drehmomentwelligkeiten, und Optimieren des Strombedarfs der Energiequelle. Ähnliche Vorteile können für Generatoren möglich werden.
- [0122]** Eine adaptive Architektur kann einer elektrischen Maschine viele neue Steuerungsverfahren erschließen. Mit einer adaptiven Architektur kann eine elektrische Maschine an Betriebsbedingungen zum Bereitstellen einer optimalen Leistung angepasst werden, so wie beispielsweise einem Bereitstellen einer erhöhten Leistung und Effizienz über einen breiten Bereich von Betriebsdrehzahlen.
- [0123]** Flexible Steuerungen können als ein wichtiges, unterscheidendes Merkmal adaptiver elektrischer Maschinen betrachtet werden. Flexible Steuerungen schaffen eine Bequemlichkeit und Eindeutigkeit beim Entwerfen und Implementieren adaptiver elektrischer Maschinen in irgendeiner Anwendung. Zusätzlich bringen auf der Software-Ebene implementierte Steuerungen die Möglichkeit zukünftiger Aufwertungen auf einer Software-Ebene ohne ein tatsächliches Ersetzen des Motors oder der Steuereinheit.
- [0124]** Die Fähigkeit für ein Software-Aufwerten kann nicht nur Kosten beim Aufwerten sparen, sondern kann auch die Aufnahme existierender Implementierungen adaptiver elektrischer Maschinen an zukünftige, jetzt noch unbekannte, Aufgaben erlauben, wie sie erscheinen, ohne ein tatsächliches, physikalisches Ersetzen der Maschine zu erfordern. Es kann auch Entwicklern und Benutzern die Flexibilität eines Software-Entwurfs gegenüber Hardware-Änderungen geben.
- [0125]** Ein hohes Drehmoment kann ein anderes, unterscheidendes Merkmal adaptiver elektrischer Motoren sein. Konventionelle elektrische Motoren können nicht aktiv ein Drehmoment gut verwalten bzw. handhaben, oder das Drehmoment auf der Entwurfsebene beeinflussen. Dieses ist so, weil die Auswahl eines spezifischen Typs eines konventionellen Motors für eine bestimmte Anwendung größtenteils das verfügbare Drehmomentprofil bestimmt.
- [0126]** Im Gegensatz dazu kann ein adaptiver Motor nicht nur ein extrem hohes Drehmoment haben, sondern auch ein hohes Startdrehmoment. Er kann auch spezielle Algorithmen ermöglichen, um das Drehmoment zu erhöhen, falls notwendig, und im Allgemeinen das Drehmoment über den Bereich der Betriebsbedingungen des Motors aktiv handhaben bzw. verwalten.
- [0127]** Die Möglichkeit einer optimalen Leistung über einen breiten Bereich von Betriebsbedingungen kann adaptive elektrische Maschinen für Anwendungen höchster Anforderungen geeignet machen, wie Antrieb, Fahrzeugtransportanwendungen und andere Spezialanwendungen. Im Speziellen kann der extrem breite Bereich von Betriebsdrehzahlen, die adaptive elektrische Motoren erlauben, den Bedarf für mechanische Getriebe und Übersetzungen in Anwendungen eliminieren, wo sie zuvor erforderlich waren.
- [0128]** Das beste Beispiel dafür kann ein Passagierfahrzeug sein. Bis jetzt haben selbst elektrische und hybride Gas-Elektrofahrzeuge mit einem Elektromotor eine Übersetzung, Getriebe, Differential und viele andere mechanische Systeme, die ein adaptiver elektrischer Motor unnötig machen kann.
- [0129]** Als Zusammenfassung umfassen manche Vorteile, die eine adaptive elektrische Maschine im Vergleich zu existierenden elektrischen Maschinen bereitstellen kann:
- Ein einheitliches, konsistentes Konzept, das überall beim Design, der Implementierung, und dem Betrieb der Maschine wirkt.
 - Eine einfache Maschinentopologie, die den Herstellungsprozess erleichtert und auf diesen Prozess bezogene Kosten reduziert.
 - Digital-basierte Steuereinheiten, die einfach zu entwerfen sind, billig herzustellen, und einfach zu warten und aufzuwerten sind.
 - Ausgabeelektronik, die jedem elektromagnetischen Schaltkreis nur einen Bruchteil der für den

gesamten Motor erforderlichen Leistung bereitstellt. Dies kann die Kosten dieser Elektronik dramatisch reduzieren, was das Risiko einer Gefahr für Menschen verringert (da niedrige Spannungen verwendet werden können), und den Einfluss möglicher Fehlfunktionen verringert.

- Software-Ebene von Steuerungen, welches eine Implementierung fortschrittlicher Steuerungs-Algorithmen ermöglicht, die zu teuer durch Analog-Elektronik zu implementieren wären. Zusätzlich können zukünftige Aufwertungen nur auf einer Software-Ebene getätigt werden, was die Aufwertungskosten überaus reduziert.
- Herausragende Gesamtleistungseigenschaften, die zu der Gelegenheit führen können, Anwendungen mit zuvor unerreichbaren Leistungsmerkmalen zu erschaffen.

[0130] Eine Schlüsselidee hinter der Technologie für adaptive elektrische Maschinen kann sein, dass das Design einer jeden spezifischen Maschine durch die Bedürfnisse einer spezifischen Anwendung getrieben wird, in welcher die Maschine verwendet werden wird. Durch Analysieren spezifischer Bedürfnisse, die durch die Anwendung erfüllt werden sollen, und dann angemessenes Formulieren der Zielfunktionen für die adaptive Maschine, kann ein erfolgreicher Entwurfsprozess zu der Entwicklung einer adaptiven Maschine führen, die exakt die gewünschten Leistungseigenschaften erreichen kann.

[0131] Die Begrenzungen der Technologie für konventionelle elektrische Maschinen ermöglichen es Designern, nur eine sehr grobe und ungefähre Übereinstimmung mit gewünschten Leistungseigenschaften zu erreichen. In vielen Fällen führt dies zu der Notwendigkeit eines Verwendens von Reduzierstücken und Getrieben mit der Maschine, und in vielen Fällen führt dies zu der Unfähigkeit, eine Anwendung zu entwickeln, die vollständig manchen spezifischen Bedarf des Endbenutzers erfüllt.

[0132] Wie oben diskutiert, kann ein Schlüssel zur Technologie für adaptive elektrische Maschinen ein Ermöglichen einer unabhängigen Steuerung der elektromagnetischen Schaltkreise der Maschine sein. Wenn diese elektromagnetischen Schaltkreise oder "Phasen" nicht unabhängig gesteuert werden, können optimale Zielfunktionen nicht in einer Mehrphasen-Maschine erhalten werden. Die Topologie adaptiver Maschinen ist strukturiert, eine unabhängige Erregung der elektromagnetischen Schaltkreise zu ermöglichen – was es dem elektrischen Fluss zu jedem Schaltkreis ermöglicht, unabhängig von den anderen Schaltkreisen gesteuert zu werden – und ermöglicht somit den gesteuerten Variablen, unabhängig zu sein. Eine Raumzuteilung zwischen Magneten, Anzahl dieser Magneten, deren Verhältniszahlen, Magnetformen und Ähnliches können alle ein wesentlicher Teil einer Topologie für adaptive elektrische Maschinen sein.

[0133] Ein anderer wichtiger Teil des Konzepts für eine adaptive Maschine kann in der Art zum Erregen der elektromagnetischen Schaltkreise der adaptiven Maschine liegen. Um dieses zu veranschaulichen, zeigt [Fig. 5](#) einen Magneten **308** eines Rotors über einer Anzahl von Elektromagneten **304** eines Stators. Abhängig von der Art, in der die Elektromagneten erregt werden, können unterschiedliche Muster resultierender Kräfte auftreten. Die Steuereinheit für eine adaptive Maschine kann somit ein wesentlicher und sehr wichtiger Teil der Maschine werden, da sie die Erregung der Stator-Elektromagnete **304** auf eine Weise ermöglicht, die es erleichtert, dass die Leistung der Maschine sich dicht an die Zielfunktionen annähert.

[0134] Spezifische Beispiele, wie unterschiedliche Erregungsmuster in einer adaptiven Maschine gebildet sein können, sind in [Fig. 6](#) gezeigt. Eine Linie **380** stellt eine einfache sinusförmige Wellenform dar, die mit alternierenden Polen der Rotormagneten **308** interagiert – auf diese Weise kann jeder Statormagnet **304** mit einer einfachen sinusförmigen Stromwellenform erregt werden. Eine andere Linie **382** zeigt eine andere Option, Schritterregung, die auch einfach zu implementieren ist. [Fig. 7](#) zeigt einige weitere Beispiele möglicher Erregungsstromwellenformen.

[0135] Dies kann zu einem wichtigen Ergebnis führen. Dieselbe adaptive elektrische Maschine kann auf eine Vielfalt von Arten erregt werden, und dadurch kann dieselbe Maschine dazu gebracht werden, auf eine Vielfalt von Wegen zu wirken – etwas, das für konventionelle Maschinen unmöglich sein kann. Wenn die Anzahl elektromagnetischer Schaltkreise groß ist, können zusätzlich spezifische Zielfunktionen mit höherer Genauigkeit angenähert werden, Leistungselektronik für jeden elektromagnetischen Schaltkreis kann billiger und einfacher sein, und der Einfluss möglicher Fehlfunktionen kann geringer werden.

[0136] Die meisten Steuereinheiten für eine adaptive Maschine können sich als digitale, Mikroprozessor-basierte, programmierbare Steuereinheiten herausstellen. Die Wichtigkeit von Software und einer angemessenen Software-Entwicklung für solche Steuereinheiten kann sehr wichtig sein. Tatsächlich können sämtliche der Einrichtungen zum Bilden spezifischer Wellenformen auf einer Software-Ebene, und nicht in Hardware, implementiert werden.

[0137] Diese einfache Aussage kann tatsächlich einen enormen Vorteil adaptiver elektrischer Maschinen angeben. Dieses kann zu der Fähigkeit adaptiver elektrischer Maschinen führen, sich an Betriebsbedingungen anzupassen, deren Fähigkeit auf für konventionelle Maschinen unmögliche Arten zu arbeiten, deren Software-Rekonfigurationsfähigkeit, deren Fähigkeit einfach aufgewertet zu werden und Ähnliches. Eine ganze Liste von Software-Vorteilen kann ins Spiel kommen.

[0138] Gemäß dieser Erfindung entworfene und implementierte adaptive elektrische Maschinen können manche oder sämtliche der Konzepte für adaptive Maschinen und die hier beschriebene Technologie verwenden. Bei weiter Betrachtung gibt es wenigstens drei wesentliche Gruppen von Ausführungsformen adaptiver Maschinen, die die praktischsten Designs zum Anwenden von Konzepten für eine adaptive elektrische Maschine und der Technologie sein können.

[0139] Als Erstes kann die einfachste Anordnung die in [Fig. 8](#) gezeigte sein, eine Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine mit einem Rotor **306** mit Permanentmagneten **308**, und einem Stator **302** mit Elektromagneten **304**. Sie kann gewisse Vorteile haben, vorwiegend Kosten-, Einfachheits-, und Zuverlässigkeitsbezogene, aber kann auch einen Hauptnachteil besitzen. Es kann für ihren Rotor **306** unmöglich sein, frei zu rotieren, ohne einen Strom in das elektromagnetische System der Maschine zu induzieren. Für manche Anwendungen ist dieses irrelevant. Bei anderen Anwendungen kann diese Fähigkeit zum freien Rotieren ohne Induzieren eines Stromes höchst wünschenswert sein, wie beispielsweise bei Transportanwendungen.

[0140] [Fig. 9](#) zeigt eine geringfügig unterschiedliche Anordnung, einen sogenannten Wickelrotor, in welchem die Magneten **308** in dem Rotor **306** tatsächlich Elektromagneten mit separater Erregung sind. Diese Anordnung kann eine etwas komplexere Aufgabe mit sich bringen, die Energie bzw. Leistung zu den rotierenden Teilen der Maschine zu bringen, so dass sie zusätzliche Kosten und eine Abnahme der Zuverlässigkeit zu einem gewissen Ausmaß nach sich ziehen kann.

[0141] Aber ein sehr wichtiges Merkmal dieses Designs kann sein, dass wenn die Elektromagneten **308** in dem Rotor **306** nicht erregt werden, der Rotor **306** frei rotieren kann, ohne einen Strom in die elektromagnetischen Schaltkreise **304** in dem Stator **302** zu induzieren – ein höchst wünschenswertes Merkmal für irgendeine Art von Transportanwendungen. Folglich kann dieser Typ einer adaptiven Maschine sehr wichtig sein.

[0142] Schließlich zeigt [Fig. 10](#) eine Ausführungsform, von dem möglicherweise allgemeinsten Typ einer adaptiven Maschine, welcher unabhängige Erregung jedes Magneten der Maschine ermöglichen kann. Die Elektromagneten **308** in dem Rotor **306** und die Elektromagneten **304** in dem Stator **302** können alle unabhängig erregt werden. Selbst obwohl dieses Design die meiste Flexibilität und die größte Anzahl unabhängiger Variablen bieten kann, können die Kosten seiner Implementierung hoch sein, und dieses Design kann nur bei den fortschrittlichsten Anwendungen gerechtfertigt werden.

[0143] Ein Vergleichen einer Ausführungsform eines adaptiven 1 kW elektrischen Motors mit einem konventionellen Drei-Phasen-Permanentmagnet bürstenlosen Motor-Design, das ungefähr dieselbe PS-Zahl liefert, liefert die in der folgenden Tabelle gezeigten Ergebnisse. Zusätzlich zu diesen Ergebnissen sollte beachtet werden, dass der beschriebene adaptive 1 kW elektrische Motor bei einer zwischen wenigstens 0 U/min und 500 U/min rangierenden Drehzahl betreibbar ist (U/min = Umdrehungen pro Minute), bei einer Effizienz von nicht weniger als 80% bei jeder Drehzahl zwischen wenigstens 50 U/min und 300 U/min.

	Adaptiver 1 kW Motor	Konventioneller Drei- Phasen-Motor
Motor-Pole	16	12
Zähne	14	36
Pol/Zahn-Verhältnis	1,14	3
Wicklungstyp	Schenkelpol	Verteilt
Motor-Durchmesser (mm)	277	239
Stator-Innendurchmesser (mm)	168	123
Motorhöhe (mm)	38	66
Motorvolumen (mm ³)	2,29 x 10 ⁶	2,96 x 10 ⁶
Spannung (VDC)	36	145
Spitzenstrom (Ampere)	55	83
Drehmomentkonstante (Nm/A)	1,65	0,8
Spitzen-Motordrehmoment (Nm)	80	70,5
Motorwiderstand (mOhm)	0,157	0,150
70 Nm berechneter Widerstands- leistungsverlust (Watt)	622	1033
Berechnete Motorkonstante (Spitzen- Drehmoment / Quadratwurzel der kontinuierlichen Leistung) (Nm/sqrt(Watt))	4,16	2,06
Motormasse (kg)	5,9	8,1
Berechnete elektrische Fahrzeugkonstante (Motorkonstante) / (Motormasse)	0,705	0,254

Tabelle 1:

Vergleich gemessener Werte für eine Ausführungsform eines adaptiven 1 kW Motors gegenüber einem konventionellen Drei-Phasen-Permanentmagnet bürstenlosen Motor-Design

	Adaptiver 1 kW Motor	konventioneller Drei-Phasen- Motor
Motorverkaufspreis (geschätzt für eine Produktion von mehr als 1000 Einheiten)	1 x	3 x
Verkaufspreis für elektrischen Antrieb	(im Motorver- kaufspreis enthalten)	2,5 x
Verkaufspreis für System (Motor und Antrieb)	1 x	5,5 x
Spitzen-Drehmoment (Nm)	80	70,5
(Systempreis) / (Spitzen- Drehmoment): Preis/Nm x 100	1,25	7,8
Motorgewicht (Pfund)	18	34,1
Gewicht der elektronischen Steuereinheit (Pfund)	(im Motorge- wicht enthalten)	11
Systemgewicht (Pfund)	18	45,1
(Spitzen-Drehmoment) / (Systemgewicht): Nm/Pfund	4,44	1,56

Tabelle 2:

Vergleich von Preis, Drehmoment und Gewicht für eine Ausführungsform eines adaptiven 1 kW-Motors gegenüber einem konventionellen Drei-Phasen-Permanentmagnet bürstenlosen Motor-Design

[0144] Tabelle 3 unten zeigt die Leistung einer Ausführungsform von vier 17 kW adaptiven Motoren (eine Gesamtmenge von 68 kW durch vier Motoren von jeweils 17 kW bereitstellend) im Vergleich mit vier anderen konventionellen Motoren. Zusätzlich zu diesen Ergebnissen sollte beachtet werden, dass der beschriebene adaptive 17 kW-elektrische Motor ein Drehmoment/Volumen-Verhältnis von 39.000 N/m² hat.

Maschinen-eigenschaften	Adaptives Motor-Design	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Spitzen-Leistung (kW)	68 (17 kW in jedem der 4 Motoren)	56	100	150	122 (30,5 kW in jedem der 4 Motoren)
Spitzen-Drehmoment (Nm)	2600	1069	550	2750	1800
Spitzen-Spannung (Volt)	42	500	300	220	220
Aktive Masse (kg)	120	2000	86	220	116
Drehmoment-Dichte (Nm/kg)	21,7	0,5	6,4	12	15,5
Bemerkungen	Bürstenloser Gleichstrommotor (vier im Rad eingebaute Motoren)	Bürsten-Gleichstrommotor	Bürstenloser Wechselstrommotor	Bürstenloser Wechselstrommotor	Bürstenloser Wechselstrommotor (vier im Rad eingebaute Motoren)

Tabelle 3:

Die Leistung einer Ausführungsform von vier 17 kW adaptiven Motoren (eine Gesamtmenge von 68 kW durch vier Motoren von jeweils 17 kW bereitstellend) im Vergleich mit vier anderen konventionellen Motoren.

[0145] Tabelle 4 unten zeigt die Leistung einer Ausführungsform eines adaptiven Generators im Vergleich mit einem konventionellen Drei-Phasen-Generator.

Maschineneigenschaften	Adaptives Generator- Design	Konventio- neller Drei- Phasen- Generator
Rotor-Magnetpole	96	96
Statorzähne	72	288
Pol/Zahn-Verhältnis	1,33	3
Wicklungstyp	Schenkelpol	Verteilt
Stator-Durchmesser (Zoll)	54	54
Motor-Innendurchmesser (Zoll)	46	46
Spulenwicklungshöhe (Zoll)	8	8
120 U/min Ausgangsspannung (VDC)	700	700
Spitzen-Wicklungsstrom (Ampere)	142	77,5
Spitzen-Wicklungsspannungskonstante (Volt/rad/s)	28	28
Spitzen-Generator-Drehmomentausgabe (Nm)	7950	4340
120 U/min Spitzen-Generator- Leistungsabgabe (kW)	100	54,2
Generatorwiderstand (mOhm)	78	172
Heißer Spitzen- Widerstandsleistungsverlust (Watt)	2200	1450
Statorkern-Material (kg)	320	2220
Statorkern-Materialkosten	1 x	7 x
120 U/min Magnetkernverlust (Watt)	1100	1850
Generatorkonstante (Nm/sqrt(Watt))	3,17	2,13
Masse für elektromagnetischen Generator (kg)	289	374
Leistungsabgabe pro Masse für elektromagnetischen Generator (kW/kg)	0,346	0,145

Tabelle 4:

Vergleich einer Ausführungsform eines adaptiven Generators mit einem konventionellen Drei-Phasen-Permanentmagnet bürstenlosen Direktantriebs-Generator-Design

[0146] Zusätzliche Vorteile der adaptiven elektrischen Maschinen werden dem Fachmann leichtfertig offensichtlich werden. Die folgende detaillierte Beschreibung zeigt nur eine bevorzugte Ausführungsform oder Ausführungsformen der Erfindung. Die Erfindung kann zu anderen und unterschiedlichen Modi fähig sein, und ihre Details können auf vielfältige offensichtliche Weisen modifiziert werden, ohne den Bereich der Erfindung, wie in den beigefügten Ansprüchen ausgedrückt, zu verlassen. Demgemäß sollen die Zeichnungen und die Beschreibung nur als in ihrer Natur veranschaulichend betrachtet werden, und nicht als einschränkend.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0147] Diese Erfindung wird mittels eines Beispiels, und nicht mittels einer Einschränkung, in den Figuren der begleitenden Zeichnungen veranschaulicht.

[0148] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines konventionellen elektrischen Motors.

[0149] [Fig. 2](#) zeigt typische Drehmoment-Drehzahl-Einhüllende und Leistung-Drehzahl-Profile für zwei konventionelle Gleichstrommotoren.

[0150] [Fig. 3](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines adaptiven elektrischen Motors.

[0151] [Fig. 4](#) zeigt eine typische Zielfunktion für ein Drehmoment-Drehzahl-Profil ([Fig. 4\(a\)](#)), für ein Drehzahl-Last-Profil ([Fig. 4\(b\)](#)) und für ein Effizienz-Profil ([Fig. 4\(c\)](#)).

[0152] [Fig. 5](#) zeigt ein Diagramm der Kräfte in dem magnetischen System einer Ausführungsform eines adaptiven Motors.

[0153] [Fig. 6](#) zeigt ein Diagramm der Bildung unterschiedlicher Wellenformen in einer Ausführungsform eines adaptiven Motors.

[0154] [Fig. 7](#) zeigt manche Beispiele von Wellenform-Profilen, die zur Erregung für einen adaptiven Motor verwendet werden können.

[0155] [Fig. 8](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines adaptiven Motors mit einem Permanentmagnet-Rotor.

[0156] [Fig. 9](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines adaptiven Motors mit einem Wickelrotor.

[0157] [Fig. 10](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines adaptiven Motors mit u elektromagnetischen Schaltkreisen für einen unabhängig erregbaren Rotor.

[0158] [Fig. 11](#) zeigt ein Beispiel von: (a) einen Blockdiagramm einer konventionellen elektrischen Maschine und (b) einem Blockdiagramm einer Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine.

[0159] [Fig. 12](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms einer Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine.

[0160] [Fig. 13](#) zeigt ein Beispiel einer Schnittperspektive der Grundstruktur einer Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine, die sieben elektromagnetische Schaltkreise hat.

[0161] [Fig. 14](#) zeigt ein Beispiel einer Ansicht in Explosionsdarstellung einer Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine, die sieben elektromagnetische Schaltkreise hat.

[0162] [Fig. 15](#) zeigt ein Beispiel einer dreidimensionalen Außenansicht des Systems für eine elektrische Maschine von [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#), entworfen zur Verwendung als ein in einem Rad eingebauten Motor für ein elektrisches Fahrzeug.

[0163] [Fig. 16](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms einer Ausführungsform eines Steuerungssystems, das eingesetzt werden kann zum Treiben einer adaptiven elektrischen Maschine als ein elektrischer Motor.

[0164] [Fig. 17](#) zeigt ein detaillierteres Blockdiagramm einer Ausführungsform einer Implementierung für ein Steuerungssystem für einen adaptiven elektrischen Motor.

[0165] [Fig. 18](#) zeigt zum Vergleich: (a) ein Teilschaltkreisdigramm einer Ausführungsform eines individuellen elektromagnetischen Schaltkreises für einen adaptiven elektrischen Motor, und (b) ein Teilschaltkreisdigramm einer Ausführungsform eines individuellen elektromagnetischen Schaltkreises für einen adaptiven elektrischen Generator.

[0166] [Fig. 19](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms einer Ausführungsform einer Steuerungsstruktur für einen adaptiven elektrischen Motor mit unabhängigen Schaltsätzen.

[0167] [Fig. 20](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms einer Ausführungsform einer Steuerungsstruktur für einen adaptiven elektrischen Motor mit unabhängigen Positionssensoren und Schaltsätzen.

[0168] [Fig. 21](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms einer Ausführungsform einer Steuerungsstruktur für einen adaptiven elektrischen Motor mit unabhängigen Positionssensoren, Schaltsätzen und Pulsbreitenmodulator-Generatoren, und mit einem digitalen Signalprozessor.

[0169] [Fig. 22](#) zeigt ein Beispiel eines Blockdiagramms, das eine Methodik für eine Drehmomentsteuereinheit zur Verwendung in dem Steuersystem einer Ausführungsform eines adaptiven Motors veranschaulicht.

[0170] [Fig. 23](#) zeigt ein Flussdiagramm des Prozesses zum Auswählen eines Motorstrom-Wellenformprofils.

[0171] [Fig. 24](#) zeigt eine Kurve, die die Grenze zwischen Profilen für vielfältige Werte von einem Motordrehmoment und einer Drehzahl darstellt.

[0172] [Fig. 25](#) zeigt die gleichgerichtete Ausgangsspannung einer Ausführungsform eines adaptiven elektrischen Generators.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0173] In der gesamten detaillierten Beschreibung dieser Erfindung wird auf eine elektrische Maschine, die gemäß dieser Erfindung entworfen ist, als eine "adaptive elektrische Maschine" verwiesen werden. **Fig. 11** zeigt ein Blockdiagramm einer elektrischen Maschine nach dem Stand der Technik mit "N" Phasen im Vergleich zu einem Beispiel einer adaptiven elektrischen Maschine mit "N" Phasen. In diesem Beispiel entspricht jede der Phasen der adaptiven elektrischen Maschine der einzelnen elektrischen Maschine nach dem Stand der Technik. (In dieser Beschreibung werden die Begriffe "elektromagnetischer Schaltkreis" und "Phase" im Allgemeinen untereinander austauschbar verwendet.)

[0174] [Fig. 12](#) zeigt ein Blockdiagramm eines Beispiels einer Ausführungsform eines adaptiven elektrischen Motors. In diesem Beispiel erzeugt die Steuereinheit **60** ein Steuersignal basierend auf Benutzereingaben, gefühlten Betriebsbedingungen und gefühlten Maschinenbetriebsparametern.

[0175] Benutzereingaben sind Parameter, die der Benutzer während des Betriebs der elektrischen Maschine variieren kann. Ein typisches Beispiel ist eine zum Steuern der Geschwindigkeit eines elektrischen Fahrzeugs verwendete Drossel bzw. Gashebel, oder eine zum Stoppen des Fahrzeugs verwendete Bremse. Maschinenbetriebsbedingungen sind Bedingungen außerhalb der Maschine, die sich auf den Maschinenbetrieb auswirken können. Beispiele umfassen die Geschwindigkeit eines elektrischen Fahrzeugs, ob oder nicht das Fahrzeug wendet. Maschinenbetriebsparameter sind Parameter innerhalb der Maschine. Beispiele umfassen die Rotationsgeschwindigkeit eines Motors und die Relativposition eines Rotors des Motors zu seinem Stator.

[0176] In dieser Ausführungsform kann jeder elektromagnetische Schaltkreis, oder Phase, ausreichend von jedem der anderen elektromagnetischen Schaltkreise isoliert sein, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen zwischen diesen Schaltkreisen zu eliminieren. Dieses kann die Anzahl unabhängiger Maschinenparameter erhöhen, die variiert und gesteuert werden können. Als ein Ergebnis kann dieses das wirksame Ansprechen der elektrischen Maschine auf eine Steuerung und Optimierung erhöhen.

[0177] Zusätzlich kann jeder elektromagnetische Schaltkreis, strukturell und/oder elektromagnetisch von den anderen getrennt, ein separates Steuersignal von der Steuereinheit empfangen, wodurch der elektrische Fluss in jeder Gruppe der elektromagnetischen Schaltkreise unabhängig von dem elektrischen Fluss in jeder anderen Gruppe gesteuert wird. Dieses kann es ermöglichen, dass jeder elektromagnetische Schaltkreis, oder Phase, unabhängig von jeder anderen Phase gesteuert wird, und dadurch eine Relativrotation zwischen dem Rotor und dem Stator bei einer Geschwindigkeit bzw. Drehzahl und einem Drehmoment aufgebaut wird, die dynamisch auswählbar sind. Die Steuereinheit kann betreibbar sein zum Optimieren der Effizienz der elektrischen Maschine für jede ausgewählte Drehzahl bzw. Geschwindigkeit und Drehmoment.

[0178] [Fig. 13](#) zeigt ein Beispiel einer Schnittperspektive der Grundstruktur einer Ausführungsform einer adaptiven elektrischen Maschine **10**. Manche der in [Fig. 13](#) veranschaulichten Elemente sind in größerem Detail

in der Explosionsansicht von [Fig. 14](#) gezeigt. In diesem Beispiel hat die elektrische Maschine **10** einen Kreispermanentmagnet-Rotor **20**, der einen Kreisstator **30** umgibt. Jedoch kann eine adaptive elektrische Maschine ein anderes bewegbares Element als einen Rotor umfassen, oder ein anderes stationäres Element als einen Stator, oder ein erstes Teil und ein zweites Teil umfassen, oder wenigstens ein Teil.

[0179] In diesem Beispiel können der Rotor **20** und der Stator **30** durch einen Luftspalt getrennt sein. Der Rotor **20** und der Stator **30** können auf einer stationären Welle **36** zentriert sein, die bei der Rotationsachse für den Rotor **20** untergebracht ist.

[0180] In diesem Beispiel hat der Stator **30** sieben ferromagnetisch isolierte Elemente, oder Stator- oder "Kernelement"-Gruppen. Jede Statorgruppe **32** kann aus einem magnetisch permeablen Material hergestellt sein, und kann von einem direkten Kontakt mit jeder anderen Statorgruppe getrennt sein. Jede Statorgruppe kann einen separaten elektromagnetischen Schaltkreis bilden, wobei jeder auf ein unabhängiges Teilstück des Stators gewickelte Wicklungen hat, wobei jedes Teilstück strukturell nur durch unmagnetisches Material verbunden ist. Oder jede Statorgruppe kann Wicklungen **34** haben, die auf jedem ihrer zwei Pole gebildet sind. Oder eine adaptive elektrische Maschine kann wenigstens zwei Wicklungen haben, die erregbare elektromagnetische Schaltkreise bilden, die auf Teilstücken von entweder einem bewegbaren Element oder einem stationären Element gewickelt sind, oder beides.

[0181] Sieben Statorgruppen **32** sind in diesem Beispiel gezeigt, wobei jede Gruppe zwei elektromagnetische Schenkelpole hat, und jede im Wesentlichen gleich entlang des Luftspaltes beabstandet ist. Jede Statorgruppe kann ausreichend isoliert sein, um im Wesentlichen elektrische und elektromagnetische Interferenzen (so wie beispielsweise induzierte Ströme und elektromagnetischen Fluss) zwischen den Gruppen zu eliminieren.

[0182] In diesem Beispiel hat der Rotor **20** sechzehn Permanentmagnete **22**. Die veranschaulichten Permanentmagnete können im Wesentlichen entlang des Luftspaltes gleich beabstandet sein und an einer unmagnetischen Kreishinterplatte **24** befestigt sein. Die Hinterplatte **24** kann aus Aluminium oder einem anderen unmagnetisch permeablen Material gebildet sein. Die Hinterplatte **24** kann einen Teil des Gehäuses für die elektrische Maschine bilden, welches Seitenwände **26** daran angefügt hat.

[0183] Der durch die Permanentmagnete **22** des Rotors produzierte magnetische Fluss kann durch Hinzufügen eines magnetisch permeablen Elementes (nicht gezeigt) gesteigert werden, das auf der Rückseite der Permanentmagneten **22** des Rotors befestigt ist. Die veranschaulichte Anzahl von Statorpolen und Rotormagneten ist lediglich beispielhaft. Vielfältige Verhältnisse können zum Bereitstellen gewünschter Betriebsparameter verwendet werden. Zum Beispiel können weniger in größeren Distanzen beabstandete Elektromagneten unterschiedliche Drehmoment- und/oder Drehzahl-Eigenschaften produzieren.

[0184] Das Erregungsschema und das Polgeometrie-Design der elektrischen Maschine **10** können wichtige Design-Betrachtungen sein. Beim Entwerfen einer elektrischen Maschine für den Betrieb als einen Motor ist es eine Aufgabe, die Reluktanz in der Rotor/Stator-Schnittstelle zu minimieren, um eine annehmbare Kommutations-Drehmomentsignatur, Drehmoment-Welligkeit und Hängenbleib-Drehmoment zu erreichen, während das gewünschte Spitzendrehmoment bei maximaler Drehzahl ohne Last geliefert wird. Diese Betrachtungen können durch Ausführen detaillierter Simulationen für finite Elemente berücksichtigt werden, um optimierte, resultierende Drehmoment- und Kraftvektoren zu synthetisieren. Diese Simulationstechniken sind dem Fachmann bekannt.

[0185] In einer Ausführungsform können die Permanentmagneten Neodym-Eisenbor eines nominalen BH_{max} oder eines zwischen 238 bis 398 kJ/m³ (30 bis 50 MGOe) reichenden Energieproduktes umfassen. Ein Formen der Magneten in gerundeten Sektoren mit rechteckigen Querschnitten und verjüngten Kanten kann behilflich sein, die Querinterferenz des unerwünschten magnetischen Flusses zu minimieren. Vorzugsweise können die Magneten **22** radial magnetisiert werden, um starke magnetische Dipole senkrecht zu der Ebene der Hinterplatte **24** für jeden partitionierten Abschnitt des Rotors bereitzustellen.

[0186] Ein Optimieren der gekrümmten, volumetrischen Geometrie der Magneten **22** kann auch die Permeanz und die Rückstoßeigenschaften des Magnetuntersystems für eine beabsichtigte Anwendung optimieren. Weitere Modifizierungen können getätigt werden mit Anwenden eines dreidimensionalen Polformens der elektromagnetischen Kerne, um das magnetische Potentialdifferenzprofil zu korrigieren, das zwischen den elektromagnetischen Statorgruppen **32** und dem Permanentmagnet-Rotor-Aufbau entwickelt wird. Dieses kann das Hängenbleiben reduzieren, das während der Erregungskommutierung und der Winkelverstellung des Rotors **20** auftreten könnte.

[0187] Manch andere Parameter des Rotors **20** können betrachtet werden, um eine optimalere Leistung für eine bestimmte Anwendung zu erreichen. Zum Beispiel können manche dieser anderen Parameter Folgendes enthalten:

- Magnetgüte,
- Energiedichte und die gesamten magnetischen Eigenschaften der Magnetgüte,
- Größe und Dimensionen des Magnetes, um den gewünschten Entmagnetisierungsfaktor zu erreichen, und somit die Gesamtbetriebsbedingung des Magnetaufbaus,
- magnetische Konfiguration der Permanentmagnete, als auch deren Polarisierung,
- thermische Stabilität der Magneten,
- Endbearbeitungs- und Nachverarbeitungsschritte, die beim Herstellen der Magneten für die beabsichtigte Anwendung unternommen werden,
- Anordnungs- und Befestigungstrennung der Magneten,
- Oberflächen- und Unterflächen-Wirbelstromeffekte auf den Magnetsegmenten bei maximaler Winkelgeschwindigkeit der Maschine,
- Homogenität der Magnetisierung über die krummlinige Oberfläche des Magneten,
- Gleichmäßigkeit der radialen und axialen Polarisierungen der Magneten,
- Spaltoptimierung zwischen zwei getrennten, benachbarten Magneten in dem Stator,
- mechanische Eigenschaften der Kanten der Magneten, und
- Rückflussweg des Magneten, wie durch den Rückeisenring bereitgestellt.

[0188] In dem in [Fig. 13](#) und [Fig. 14](#) gezeigten Beispiel können die Seitenwände **26** der elektrischen Maschine entfernbar sein, um es einfacher zu machen, eine individuelle Statorgruppe herauszunehmen und zu ersetzen, die beschädigt werden könnte oder einer Reparatur bedarf, ohne ein Ersetzen der Gesamteinheit. Da jede der Statorkernsegmente **32** untereinander austauschbar hergestellt sein kann, kann die Wartung des Stators **10** eine verhältnismäßig einfache Sache eines Einsetzens eines Ersatz-Statorkern-Segmentes **32** bei der passenden Gegenposition zwischen den Platten und eines Verbindens der Enden der Wicklungen sein.

[0189] Die veranschaulichten Statorkern-Segmente **32** können sicher an einer starren Skelettstruktur **40** befestigt sein, die zentriert an der Welle **36** fixiert sein kann. Dornteile **42**, die in ihrer Anzahl gleich der Anzahl von Statorgruppen sein können, können sich nach außen gerichtet von der Mitte der Skelettstruktur **40** zu U-förmigen Platten **44** erstrecken. Die Seiten der U-förmigen Platten **44** und die Statorkern-Segmente **32** können Gegenlöcher enthalten, durch welche die Statorsegmente **32** an der Skelettstruktur **40** fixiert werden können. Jede U-förmige Platte **44** kann an einem benachbarten Paar von Statorkern-Segmenten **32** angebracht sein.

[0190] Jedes Statorkern-Segment **32** und angrenzende Paar von Dornteilen **42** definieren zusammen einen Raum, innerhalb dessen Schaltkreiselemente enthalten sein können. Die starren Dornteilstücke **42** haben ein ausreichendes Oberflächengebiet, um den notwendigen strukturellen Halt bereitzustellen als auch Schaltkreis-Boards **45** aufzunehmen. Ein Schaltkreis-Board oder Hybridmodul kann an jedem Dornteilstück auf irgendeine konventionelle Weise befestigt sein.

[0191] Um komplexe dreidimensionale Topologien der in dieser Maschine verwendeten elektromagnetischen Kerne zu ermöglichen, können die erforderlichen elektromagnetischen Kerne vorzugsweise aus Soft Magnetic Composite ("SMC") Pulverlegierungen oder legierten Sinterpulvermaterialien ("SPM") hergestellt werden, im Gegensatz zu laminiertem Elektro Stahl. Diese SMC- und SPM-Legierungen können strenge geometrische Randbedingungen und die erforderlichen elektromagnetischen Eigenschaften, die für die beabsichtigte Anwendung spezifiziert werden sollen, ermöglichen, was dann den bezeichneten elektrischen Leistungserfordernissen gegenübergestellt werden kann.

[0192] Darüber hinaus können SMC-Legierungen die Realisierung eines annehmbaren spezifischen Leistungsverlustes (W/kg) und einer relativen Permeabilität bei den Anwendungs-Flussdichtepegeln und Erregungsfrequenzen fördern. Dieses kann eine gewünschte, zu erreichende Spitzen-Drehmomentabgabe ermöglichen, mit einer signifikanten Reduzierung in Materialgewicht und Herstellungsgemeinkosten.

[0193] Die Verwendung von SMC-Materialien kann die Konstruktion elektrischer Maschinen mit komplexen magnetischen Pfaden und einer dreidimensionalen Magnetfeld-Verteilung fördern, ein Vorteil, der von der anisotropischen Natur der SMC-Materialien stammen kann. Mit der Fähigkeit zum Definieren des Magnetfeldes in drei Dimensionen kann die Flexibilität der Pulvermetallurgie eine effiziente Produktion komplex geformter Teile als auch ein signifikantes Rationalisieren des elektromagnetischen Design-Aufbaus mit einem Anstieg in Effektivleistungsabgabe und Gewichtsreduktion ermöglichen.

[0194] Manche bekannte Nass- und Trocken-Verdichtungsverfahren und Hitzebehandlungstechniken sind verfügbar, um die gewünschten Dichten zu erreichen, und somit in diesen SMS-Materialien die gewünschten magnetischen Eigenschaften. Wegen der Verdichtung und der Hitzebehandlung der SMC-Materialien kann die erreichte elektrische Leitfähigkeit so hoch wie $1000 \text{ } 1/\Omega \cdot \text{m}$ erreichen, mit reduzierten aber adäquaten Pegeln einer Permeabilität bei kritischen Induktionspegeln. Solche eine hohe Leitfähigkeit kann die Wirbelstromverluste bei hoch liegenden Induktionen und hohen Magnetfeld-Erregungsfrequenzen (d.h. hohen Winkelgeschwindigkeiten des Motors) beträchtlich reduzieren.

[0195] Es wird geglaubt, dass diese inneren Eigenschaften eine wichtige Rolle bei der Reduzierung des Wirbelstroms als auch von Überschuss-Wirbelstromverlusten unter hohen Betriebsflussdichten und Erregungsfrequenzen spielen. Jedoch können dies SMC-Materialien dazu tendieren, höhere Hystereseverluste aufgrund ihrer nicht-idealen körnigen Strukturbildung aufzuweisen, die durch große, uneinheitliche Belastungen zusammengesetzt sind, die auf das Pulvergitter während der Verdichtung induziert sind.

[0196] Betrachtungen solcher Verlustbestandteile sind sehr wichtig bei der Berechnung der Maschineneffizienz als auch bei der Kernverlustminimierung in dem magnetischen Aufbau der Maschine. Dieses kann wiederum die Vorkehrungen beeinflussen, die angebracht sind zur adäquaten thermischen Handhabung und zum Kühlen der elektrischen Maschine.

[0197] Weichmagnetische Verbundwerkstoffe (Soft Magnetic Composites) können auch gute dimensionale Genauigkeit und Stabilität mit glatten Oberflächenausführungen aufweisen, welches ein wichtiger Faktor bei dem Entwurf der Erregungsspulen sein kann, und noch wichtiger sein kann bei der thermischen Handhabung der integrierten, elektromagnetischen Schaltkreise. Mit der Fähigkeit zum Definieren des Magnetfeldes in drei Dimensionen kann eine signifikante Verbesserung erreicht werden beim Erhöhen des Drehmomentes und dem Reduzieren des Überschussgewichtes der Maschine, durch Entwerfen eines rationalisierten Magnetschaltkreises mit optimierten magnetischen Geometrien und hohen Drehmoment/Nettogewicht-Verhältnissen.

[0198] Die erforderlichen Kerngeometrien und Kerndimensionen zusammen mit deren relevanten Toleranzen können optimiert werden mit Verwenden der bekannten dreidimensionalen Simulation für finite Elemente und von Synthesetechniken, um den Gradienten für das magnetische Potential des zwischen den Polpaaren der Rotorpermanentmagneten und Stator-Elektromagneten entwickelten Magnetfeldes zu maximieren. Die Änderungen in der magnetischen Potentialdifferenz bewirken tangentiale und radiale Kräfte, die zwischen den teilweise ausgerichteten Elektromagnetpolen und den Permanentmagnetpolen erzeugt werden können. Die Momente dieser um die Drehwelle des Systems herum wirkenden Kräfte können ein resultierendes Drehmoment eines Motors unter einer gegebenen Erregungsstromdichte erzeugen, oder einen Strom in die Kernwicklungen induzieren, wenn eine elektrische Maschine als ein Generator wirken kann.

[0199] Manche andere Parameter des Stators **10** können eingestellt werden, um eine bessere Leistung für eine bestimmte Anwendung zu erreichen. Manch andere Parameter können z.B. Folgendes enthalten:

- Design der elektromagnetischen Schaltkreise.
- Pol-zu-Pol-Trennung und Isolierung der elektromagnetischen Kerne,
- Magnet/Elektromagnet-durchlässiger Luftspalt,
- Leistungsverlust des Kernmaterials (Hysteresis/Wirbelstrom/anormaler Verlust),
- Sättigungsflussdichte und Permeabilität des Materials,
- thermische Handhabungstemperatur und physikalische Stabilität,
- mechanische Festigkeit und Umweltstabilität,
- Erregungsstrom, Phasenwinkel, Betriebsart, Gesamtaufeinanderfolge und die Steuerungsstrategie des Statorsystems in einer gegebenen Anwendung,
- optimales Winkelpositionieren bezüglich des gewählten Erregungsschemas, und
- Variation der Phasenreluktanz und somit der Induktion bezüglich des Winkels.

[0200] Eine existierende Technologie- und Topologie-Designs können nicht die inneren, dynamischen Eigenschaften des neu zu gestaltenden Motors ermöglichen, abgesehen von dem Ausmaß, dass ein ziemlich komplexes Treiberverfahren implementiert wurde zum Ändern des Erregungsprofils oder Phasenwinkels des treibenden Stroms. Dieses kann typischerweise entweder als eine Änderung im Phasenvorlauf oder einer Stromwellenform implementiert werden. Wenn anstelle dessen ein Verfahren zur Strom- oder magnetischen Potentialintegration innerhalb des Kern-Designs des elektromagnetischen Schaltkreises des Motors eingebettet werden könnte, könnte der Bedarf für kostenträchtige Stromerfassungs-Hardware eliminiert werden.

[0201] Dieses Verfahren kann in der Wicklungskonfiguration und der Topologie der in adaptiven elektrischen

Maschinen verwendeten elektromagnetischen Kernen anwendbar sein, anwendbarer als in existierenden Designs. Diese Designs können ein einzigartiges Verfahren einer in dem Kern zu tätigenen Magnetfeldintegration ermöglichen – eine Rekonfiguration der Flussverteilung innerhalb des Kerns – und somit unterschiedliche Luftspalt-Flussdichten ermöglichen, die in der Rotor/Stator-Schnittstelle entwickelt werden sollen. Diese Luftspalt-Flussdichten-Variationen können einen breiten Servo-Betriebsbereich für den Motor unterstützen, was zuvor schon an sich in den meisten bisher offenbarten axialen und radialen Designs beschränkt war.

[0202] Dieses kann ideal passend für Anwendungen sein, wo ein hohes Drehmoment und ein ziemlich großer Drehzahlbereich von demselben magnetischen Schaltkreis erwartet werden, ohne irgendeine komplexe Erregungs- oder Strommagnetschaltanordnung. Der Entwurf und die Implementierung davon können auf der Bildungsfähigkeit des Kern-Designs und auch auf dem hohen Maschinenformfaktor basieren, welches normalerweise mit Verwenden von weichmagnetischen Verbundwerkstoffen (Soft Magnetic Composite) Materialien erreicht wird.

[0203] Eine Steuerschaltungsanordnung wird benötigt zum Steuern des elektrischen Flusses zu jedem der auf Teilstücken des Stators **10** gewickelten elektromagnetischen Schaltkreise. Jedes Schaltkreis-Board enthält die Steuerschaltkreiselemente und Schalter, die zum Anwenden eines Stroms durch passende Verdrahtungsverbindungen benötigt sind, um die Wicklung eines Statorsegmentes **32** zu erregen, an welchem das Dornteilstück befestigt sein kann. Sämtliche Steuerschaltkreiselemente und Schalter können in einem einzelnen Schaltkreis-Board integriert sein, um eine noch größere Raum- und Gewichtswirtschaftlichkeit zu erreichen. Jedoch kann eine große Nähe der Energiezuleitungen zu den Elektromagneten elektromagnetische und Funkinterferenzprobleme erzeugen, die adressiert werden müssen.

[0204] Eine Energiequelle stellt den Strom zum Erregen der Statorsegmente **32** bereit, oder der elektromagnetischen Schaltkreise. Wenn die elektrische Maschine primär zum Gebrauch als ein Motor beabsichtigt ist, kann die Motorenergieversorgung, dargestellt durch Batterien **46**, auch innerhalb der Statorräume selbst enthalten sein. Passende Aufnahmen (nicht gezeigt) für die Batterien können an den Dornteilstücken **42** fixiert sein. Die Aufnahmen, die von irgendeiner konventionellen Vielfalt sein können, können ein einfaches Entfernen der Batterien zum Ersetzen oder erneuten Laden erlauben.

[0205] Während eine einzelne Batterie für jeden Raum gezeigt ist, kann irgendein kommerziell verfügbarer Batterietyp oder Batteriepackung, die eine ausreichende Kapazität zum Liefern der notwendigen Motorleistung haben, verwendet werden. Abhängig von bestimmten Batterieeigenschaften und Motorantriebsanforderungen kann es somit möglich sein, einen oder mehrere Räume zur Anordnung anderer Elemente zu verwenden.

[0206] Wenn der elektrische Motor primär als ein Generator verwendet wird, können die Statorräume für das Steuersystem verwendet werden. Dies kann den Bedarf für eine separate Steuerungsbox eliminieren, was ein Vorteil für Anwendungen wie einen Windkraft-Generator ist, bei welchem der Raum innerhalb des Turbinengehäuses kostbar sein kann.

[0207] [Fig. 15](#) zeigt ein Beispiel einer dreidimensionalen Außenansicht des elektrischen Maschinensystems von [Fig. 13](#) und [Fig. 14](#), entworfen zum Gebrauch als ein im Rad eingebauter Motor für ein Elektrofahrzeug. In diesem Beispiel können der Rotorgehäuse-Außenring **24** und die Seitenwände **26** konfiguriert sein zum Bilden einer Radnabe, auf welcher ein Reifen (nicht gezeigt) direkt oder indirekt über Speichen befestigt werden kann. Das Rotorradgehäuse kann zur Drehung um die stationäre Welle **36** über Lager **38** gelagert sein. Die zylindrische Rotorgehäusestruktur kann die Statorstruktur umgeben.

[0208] Es gibt eine Vielfalt von unterschiedlichen Arten, in welcher die Struktur des Stators **10** und der Rotor **20** und deren Elemente modifiziert werden können. Zum Beispiel können, in einer Variation, die Pole innerhalb jeder Statorgruppe durch radiale Spalte getrennt sein, die für alle Statorgruppen einheitlich sein können. Das Ausmaß dieser Spalte kann von dem Abstand zwischen den Polen benachbarter Statorgruppen unterschiedlich sein. Die Statorpolspalten und die Gruppenabstände können jeder unterschiedlich von den Rotorwinkelpolspalten sein.

[0209] Das radiale Ausmaß der ringförmigen Statorstruktur, d.h. die Distanz zwischen dem inneren und dem äußeren Durchmesser, kann im Wesentlichen geringer als die Distanz zwischen der Mittelrotationsachse und dem Innendurchmesser des Stators sein. Diese relativ enge radiale Statorstruktur kann eine günstige Flusskonzentration innerhalb jeder Statorelement-Struktur bereitstellen, fokussiert bei dem Luftspalt. Aufgrund dieser Konfiguration und der Abwesenheit von Streutransformatorflusseffekten von benachbarten Statorkernelement-Gruppen kann eine hohe Drehmomentabgabe effizienter erhalten werden.

[0210] [Fig. 13](#) zeigt 14 Statorpole (in sieben Statorpol-Gruppen) und 16 Rotorpole. Jedoch erlauben die relativ unabhängigen Dimensionsbeziehungen zwischen den Stator- und Rotorpolen eine Flexibilität beim Festlegen der Anzahl von Polen und Dimensionen. Eine ungerade, oder vorzugsweise eine teilerfremde, Anzahl von Statorpol-Gruppen kann bevorzugt werden, um eine optimale Leistung zu ermöglichen. Die Anzahl ist keinesfalls auf sieben beschränkt, welche hier nur zum Zwecke der Veranschaulichung offenbart wird. Ähnlich kann jede Statorkern-Element-(oder Statorpol-)Gruppe nur ein Kernelement (oder Statorpol-Paar) umfassen, oder kann eine Vielzahl von Kernelementen umfassen, die eine gemeinsame, isolierte, magnetisch permeable Struktur gemeinsam nutzen bzw. teilen. Jede Statorkernelement-Gruppe kann mit einer Phase einer Mehrphasen-Maschine verknüpft sein.

[0211] In einer Betriebsumgebung, in welcher es wünschenswert sein kann, eine feine Steuerung über einen breiten Drehzahlbereich zu erhalten, kann eine große Anzahl von Stator- und Rotorpolen implementiert werden. Solch eine Implementierung kann mit den Steuerfähigkeiten des zu verwendenden Steuersystems koordiniert werden, wobei die Anzahl von separaten Statorkern-Element-Gruppen ebenso demgemäß festgelegt wird.

[0212] [Fig. 16](#) zeigt ein Blockdiagramm eines Beispiels eines typischen Steuersystems, das eingesetzt werden kann zum Treiben der in [Fig. 13](#) bis [Fig. 15](#) gezeigten elektrischen Maschine als einen elektrischen Motor. In diesem Beispiel können die Statorwicklungen **34** erregt werden durch Treiben eines von einer Energiequelle **50** über elektronische Schaltersätze **52** gelieferten Stromes. Eine MOSFET H-Brücke, so wie beispielsweise International Rectifier IRFIZ48N-ND, kann als ein elektronischer Schaltersatz verwendet werden. Das Zeitverhalten der Strompulse kann der Steuerung einer Steuereinheit **60** unterworfen werden.

[0213] Die Steuereinheit **60** kann auf von einem Positionssensor **62** empfangene Rückkopplungssignale reagieren, und auch auf einen Drehzahl-Approximator **64**. Der Strom in jeder Phasenwicklung **34** kann durch einen von sieben Stromsensoren **66** gefühlt werden, und die Ausgabe für jede Phasenwicklung kann der Steuereinheit **60** bereitgestellt werden. Ein Hall-Effekt-Stromsensor, so wie beispielsweise F.W. Bell SM-15, kann verwendet werden. Zusätzlich kann die Steuereinheit **60** fähig sein zum Empfangen vielfältiger anderer Eingaben, wie in [Fig. 12](#) gezeigt.

[0214] Die Steuereinheit **60** kann einen Mikroprozessor oder äquivalenten Microcontroller enthalten. In einer Ausführungsform kann ein digitaler Signalprozessor TMS320LF2407APG von Texas Instrument als die Steuereinheit wirken.

[0215] In der in [Fig. 16](#) gezeigten Ausführungsform ist der Positionssensor **62** schematisch durch eine einzelne Einheit dargestellt. Alternativ können mehrere Sensoren angemessen bei Statorabschnitten entlang des Luftspaltes zum Erfassen einer Rotormagnetrotation positioniert sein. Der Positionssensor **62** kann irgendein bekanntes Magnetabfühlergerät (so wie beispielsweise Allegro Microsystems 92B5308 oder ein anderes Hall-Effekt-Gerät) sein. Ein Riesenmagnetwiderstands-(Giant Magneto resistive, MGR)-Sensor, ein Reed-Schalter, ein Pulsdrahtsensor mit einem amorphen Sensor, ein Drehmelder oder ein optischer, magnetischer, induktiver oder kapazitiver Sensor.

[0216] [Fig. 17](#) zeigt ein detaillierteres Blockdiagramm eines Beispiels einer Steuersystemimplementierung für einen adaptiven elektrischen Motor. Die Steuersystemimplementierung für einen adaptiven elektrischen Generator kann sich in manchen Aspekten unterscheiden.

[0217] In [Fig. 17](#) kann eine Gleichstrom-Energiequelle **140** eine Erregung zwei oder mehreren Mehrphasen-Motorstator-Phasenwicklungen **138** über einen Hybrid-Leistungsblock **142** bereitstellen. Wie detaillierter mit Verweis auf anderen Figuren beschrieben, kann der Leistungsblock **142** elektronische Schaltersätze umfassen, die mit Steuereinheit **60** durch einen Pulsweitenmodulationswandler und Gattertreiber gekoppelt sind. Jede Phasenwicklung kann mit einer Schaltbrücke verbunden sein, die verbundene Steueranschlüsse hat, um pulsmodulierte Ausgabespannungen von der Steuereinheit zu empfangen. Alternativ können die Schaltbrücken und Gattertreiberkomponenten durch mit den Steuereinheit-Ausgabespannungen verbundene Verstärker ersetzt werden.

[0218] Stromsensoren **145** können separat den Strom in jeder der Phasenwicklungen fühlen, und diese Information der Steuereinheit **60** bereitstellen. Die Steuereinheit **60** kann mehrere Eingänge für diesen Zweck haben, oder Signale von den Stromsensoren können gemultiplext und mit einem einzelnen Steuereinheiteneingang verbunden werden.

[0219] Ein Rotorpositions- und Drehzahlsensor kann Rotorpositions- und Drehzahlrückkoppelsignale der Steuereinheit **60** bereitstellen. Der Sensor umfasst einen wohlbekannten Drehmelder, Codierer oder deren Äquivalente und einen Drehzahlapproximator, der die Positionssignale in Drehzahlsignale auf wohlbekannte Weise umwandelt.

[0220] Ein Primärenergieversorgungsbus kann die Steuereinheit **60** mit der Energieversorgung **140** verbinden. Benutzereingaben, einschließlich einer Drehmomentanforderungseingabe **147** und einer Profilauswahlleistungseingabe **148**, können auch in die Steuereinheit **60** gelangen. Ebenso können mit der Steuereinheit **60** ein Programm-RAM-Speicher **150**, ein Programm-ROM **152**, ein Daten-RAM **154** und Profilspeicher **156** gekoppelt sein. Diese veranschaulichten Einheiten sind lediglich repräsentativ für irgendwelche wohlbekannten Speicheranordnungen, durch welche die Steuereinheit auf gespeicherte Zufallsdaten und Programmdateien zugreifen kann.

[0221] Ein Profilspeicher **156** ist separat in [Fig. 17](#) für Zwecke einer Veranschaulichung des erfinderischen Konzeptes gezeigt. Der Profilspeicher kann ein ROM umfassen, in welchem die Teilstücke des Motorsteuerschema-Programms gespeichert sind, die die Motorstrom-Wellenformprofile diktieren, die mit einer Implementierung der verknüpften Steuerschemas erhalten werden. Die Profilspeicherdaten können in der Form einer Profilspeicherbibliothek und/oder Nachschlagtabellen gespeichert werden. Die Profilspeicherdatenstruktur kann in der Form von Echtzeit-Berechnungen und Optimierungsroutinen sein. Als eine Alternativ, oder zusätzlich zum ROM kann eine Einheit bereitgestellt werden, die Werte während des Echtzeit-Motorbetriebs berechnet.

[0222] In dem Fahrzeugantriebs-Anwendungsbeispiel kann die Drehmomentanforderungseingabe **147** ein durch den Gashebel des Benutzers gefordertes Drehmoment darstellen. Ein Anstieg im Gaspedal kann ein Befehl zum Erhöhen der Drehzahl bzw. Geschwindigkeit sein, die erreicht werden kann durch Erhöhen des Drehmomentes. Oder sie kann ein Befehl zum Erhöhen des Drehmomentes sein, um dieselbe Geschwindigkeit eines Fahrzeugs unter Schwerlastbedingungen aufrecht zu erhalten, so wie beispielsweise Bergauffahren.

[0223] Im Betrieb sollte die Funktionalität zum Drehmoment-Nachverfolgen des Steuersystems einen stationären Drehmomentbetrieb für irgendeine gegebene Drehmomentanforderungseingabe über variierende externe Bedingungen aufrecht erhalten, so wie beispielsweise Änderungen in Antriebsbedingungen, Lastgradient, Terrain und Ähnliches, und sollte sich an die Gashebelbefehle des Fahrers anpassen. Das Steuersystem kann auf Drehmomenteingabenanforderungen unterschiedlich reagieren abhängig von dem bestimmten, implementierten Motorsteuerschema.

[0224] Die Möglichkeit zur Auswahl zwischen zwei oder mehreren Motorsteuerschemas kann einem Benutzer es ermöglichen, eine angemessene Reaktion zu erhalten. Jedes Steuerschema kann ein bestimmtes Motorstrom-Wellenformprofil mit eindeutigen Eigenschaften bezüglich Effizienz, Drehmomentkapazität, Ansprechfähigkeit, Leistungsverlusten und Ähnlichem erzeugen.

[0225] Die Verwendung und Steuerung elektronischer Schalter zur Anwendung eines Erregungsstromes auf Motorwicklungen ist in dem Fachgebiet bekannt. [Fig. 18\(a\)](#) zeigt ein Teilschaltkreisdigramm eines Beispiels eines Schaltsatzes und eines Treibers für eine individuelle Statorsegment-Wicklung. Jedes Statorwicklung **34** kann in einem Brückenschaltkreis von vier als ein Schaltsatz **52** agierenden FETs verbunden sein. Man beachte, dass diese Brücke zur Pulsweitenmodulation abhängig von der erforderlichen Intergrationsdichte ein voller oder ein halber Brückenschaltkreis sein kann. Beliebige bekannte elektronische Schaltelemente können zum Richten des Treiberstromes in die angemessene Richtung zu den Statorwicklungen **34** verwendet werden, so wie beispielsweise Bipolartransistoren.

[0226] Zwei FETs (**53** und **55**) auf der linken Seite der Brücke können in Reihe über die Energiequelle verbunden sein, wie auch zwei andere FETs (**54** und **56**) auf der rechten Seite der Brücke sein können. Die Statorwicklungen **34** können zwischen den Verbindungsknoten der zwei Reihen-FET-Schaltkreisen verbunden sein. Der Gattertreiber **68** reagiert auf von der Steuereinheit **60** empfangene Steuersignale zum Anwenden von Aktivierungssignalen auf die Gatteranschlüsse der FETs.

[0227] Der obere, linke FET **53** und der untere, rechte FET **56** können gleichzeitig für den Motorstromfluss in eine Richtung aktiviert werden. Für den Stromfluss in die Rückwärtsrichtung können der obere, rechte FET **54** und der untere, linke FET **55** gleichzeitig aktiviert werden. Der Gattertreiber **58** kann in die Steuereinheit **60** integriert werden, oder einen separaten Treiberschaltkreis umfassen.

[0228] Die Steuereinheit kann programmiert werden zum Ausgeben optimal zeitlich festgelegter Steuersignale, die mit den empfangenen Codiersignalen angeglichen werden sollen, basierend auf der spezifischen dimensional Konfiguration der Statorelemente. Ein Programmieren kann somit die Anzahl von Stator- und Rotorpolen berücksichtigen, die Anzahl von Statorgruppierungen, die Dimensionen der Stator- und Rotorpole und die Dimensionen der vielfältigen Spalte in der Motorstruktur.

[0229] Wenn die Steuereinheit **60** zum Ausführen davon programmiert ist, können die überlegenen Motor-drehmoment- und Geschwindigkeitseigenschaften, die von einer adaptiven elektrischen Maschine erhalten werden können, einen zufriedenstellenden Betrieb ermöglichen, selbst wenn eine oder mehrere individuelle Statorelement-Gruppen nicht funktionieren können. Somit kann ein Motor oder Generator mit einer oder mehreren nicht-funktionierenden Statorelement-Gruppen weiter verwendet werden, bis es passend sein kann, die Statorelement-Gruppe zu ersetzen.

[0230] In dieser Ausführungsform kann es für die Steuereinheit **60** wichtig sein, mit dem passenden Steuersystem für jede Anwendung für eine elektrische Maschine programmiert zu sein. Wenn diese Steuersysteme entworfen und implementiert werden, kann es wichtig sein, zwei Hauptfragegruppen zu adressieren. Als erstes die Struktur – Entwerfen der Struktur des Steuersystems, um eine Implementierung der gewünschten Steuer-algorithmen möglich und effizient zu machen. Als zweites die Algorithmen – Erschaffen, Entwerfen und Entwickeln der Steuer-algorithmen, mit Definieren der exakten Parameterwerte, die der Maschine geliefert werden sollen, und ihrer Steuerungen zum Produzieren des gewünschten Betriebs.

[0231] Wie in dem in [Fig. 12](#) veranschaulichten Beispiel kann eine Steuereinheit **60** fähig sein, wenigstens drei Eingabearten zu empfangen. In diesem Beispiel können die ersten Eingaben Benutzereingaben umfassen, so wie beispielsweise eine gewünschte Beschleunigung oder ein Abbremsen für einen Fahrzeugmotor. Als Zweites, gefühlte Betriebsbedingungen der Maschine, wie z.B., in einem Fahrzeugmotor, Umständen, so wie Radgeschwindigkeit, Neigungswinkel des Rades, und Winkel, in dem das Fahrzeug drehen kann; oder in einem Windkraftgenerator, die Windgeschwindigkeit und Variation in der Windgeschwindigkeit. Als Drittes, gefühlte Maschinenbetriebsparameter, so wie die Rotationsgeschwindigkeit der elektrischen Maschine und relative Position des Rotors.

[0232] Ein Beispiel einer Ausführungsform einer Steuerstruktur ist in [Fig. 16](#) präsentiert, wo die Energiequelle eine Erregung vielen unabhängigen Schaltsätzen **52** bereitstellt, die jeweils mit jeweiligen Motorwicklungen oder Wicklungen **34** in parallelen, in Reihe geschalteten, oder komplexer kommutierten Anordnungen verbunden sind. Wenigstens wird ein Positionsfühlen vorzugsweise für den Motor bereitgestellt. Man beachte, dass jeder Motor seinen unabhängigen absoluten Winkelpositionssensor benötigen kann. Dies könnte auf irgendeiner von mehreren Technologien basieren, so wie einer optischen, induktiven, kapazitiven oder magnetischen Technologie.

[0233] Wie der Fachmann erkennen wird, kann ein anderes Abfühlen getätigt werden, so wie ein Abfühlen der Motorrotationsgeschwindigkeit, des angewendeten Drehmomentes, der Motortemperatur, der Strömungsdetektion, und von Pro-Phasen-Strömen. Information von den Sensoren kann zu der Steuereinheit **60** gehen, die verantwortlich für die Implementierung des spezifischen Motorsteuerschemas basierend auf den Eingaben von den Sensoren und, möglicherweise, zusätzlichen Eingaben von dem Operator und der Umgebung des Motors verantwortlich ist.

[0234] Im Allgemeinen können die elektronischen Schaltsätze in der Steuereinheit **60** kommutierende H-Brücken sein, welche vorzugsweise hergestellt werden mit Verwenden von MOSFET-Transistoren, IGBT-Transistoren, Thyristoren, und anderen ähnlichen Geräten, die dem Fachmann wohlbekannt sind. Eine andere mögliche Implementierung des Schalters ist in [Fig. 18\(a\)](#) gezeigt, wo MOSFET-Transistoren durch den Gattertreiber basierend auf den Steuersignalen von der Steuereinheit **60** getrieben werden können.

[0235] [Fig. 19](#) zeigt ein Beispiel einer Steuerstruktur. In diesem Beispiel können sämtliche der Schalter (**52a** bis **52f**) und sämtliche der Motorwicklungen **34** gegenseitig unabhängig sein. Folglich kann irgendeine Störung oder Fehlfunktion von einer oder mehrerer der Windungen nicht irgendeine Fehlfunktion von dem Rest verursachen. Wie unten erwähnt, können Fehlerbedingungen überwunden werden durch Verwenden spezieller Steuer-algorithmen, die entworfen sind, den Motorbetrieb so nah wie möglich am Normalen zu halten.

[0236] [Fig. 20](#) zeigt ein Beispiel einer Anordnung, wo die Fehlertoleranz des Motors noch höher sein kann als die in [Fig. 19](#) gezeigte, wo die Steuereinheit **60** eine einzelne Störungsstelle sein kann. In dem in [Fig. 20](#) gezeigten Design kann sämtliches Positionsabfühlen auf einer Pro-Phase-Basis unabhängig von anderen Pha-

sen getätigt werden, und Gattertreiber (**68a** bis **68g**) mit deren Logik (als die Steuereinheit **60** agierend) können ebenso voneinander getrennt und unabhängig sein. Der Gattertreiber kann z.B. ein Intersil MOSFET Gattertreiber HIP4082IB sein.

[0237] In dem in [Fig. 20](#) gezeigten Beispiel können die Phasen einen Pulsbreitenmodulations-Generator **70** gemeinsam nutzen bzw. teilen, aber sie können auch wie in [Fig. 21](#) gezeigt geklont bzw. baugleich sein. Das in [Fig. 21](#) gezeigte Beispiel führt auch einen digitalen Signalprozessor ein, welcher die Arbeitsweise der Pulsbreitenmodulations-Generatoren steuern kann und individuelle, Pro-Phasen-Stromeingaben verwenden kann, um die Möglichkeit eines Implementierens von Strom- oder Drehmomentnachverfolgungs-Algorithmen für einen geschlossenen Regelkreis zu implementieren.

[0238] Eine Vielfalt unterschiedlicher Algorithmen kann in der Steuereinheit **60** zum Erreichen optimaler Ergebnisse implementiert werden. Zum Beispiel kann eine Steuereinheit für einen adaptiven elektrischen Motor ein Drehmomentnachverfolgungssteuerschema verwenden. Das Steuersystem kann entworfen sein zum Aufrechterhalten eines stationären Betriebs, wenn die Operatorbefehle sich nicht ändern, selbst wenn es Änderungen in Betriebsbedingungen gibt, so wie Änderungen in einer erforderlichen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Drehmoment oder anderen Parametern. Das Steuersystem kann auch entworfen sein zum Ansprechen auf Operatorgeschwindigkeitseingaben, um genau und glatt Änderungen in Drehmomentbefehlen aufzunehmen.

[0239] Das Blockdiagramm in [Fig. 22](#) veranschaulicht ein Beispiel einer mit Methodik für eine Drehmomentsteuereinheit. Dieses Beispiel kann Vorwärtskompensationsausdrücke verwenden, die sowohl gefühlte Motorbetriebsbedingungen als auch individuelle Schaltkreisparameterwerte berücksichtigen, um diese Ziele zu erreichen. Zum Präzisionsdrehmomentnachverfolgen können in diesem Beispiel die gewünschten Pro-Phasen-Stromtrajektorien gemäß dem folgenden Ausdruck gewählt werden:

$$I_{di} = \left(\frac{2\tau_d}{N_s K_{\tau i}} \right) \sin(N_i \theta_i)$$

wobei I_{di} eine gewünschte Pro-Phasen-Stromtrajektorie bezeichnet, τ_d den angeforderten Drehmomentbefehl des Benutzers bezeichnet, N_s die Gesamtanzahl von Phasenwindungen darstellt, $K_{\tau i}$ einen Pro-Phasen-Drehmoment-Übersetzungskoeffizienten bezeichnet, und θ_i einen relativen Positionsversatz zwischen der i -ten Phasenwicklung und einer Rotorreferenzstelle darstellt. Die Pro-Phasen-Stromgröße kann abhängig sein von dem Pro-Phasen-Wert des Drehmomentübersetzungskoeffizienten $K_{\tau i}$.

[0240] Zum Entwickeln der gewünschten Phasenströme kann der folgende Pro-Phasen-Spannungssteuer Ausdruck auf den Treiber für die Phasenwicklung angewendet werden:

$$V_i(t) = L_i dI_{di}/dt + R_i I_i + E_i + k_s e_i$$

[0241] [Fig. 22](#) veranschaulicht ein Beispiel der Methodik, allgemein angegeben durch Bezugszeichen **80**, durch welche die Steuereinheit die Komponenten dieses Spannungssteuer Ausdrucks in Echtzeit ableiten kann, mit Verwenden der Drehmomentbefehlseingabe und der von Phasenstromsensoren, einem Positionssensor und einem Geschwindigkeitsdetektor empfangenen Signalen.

[0242] In diesem Beispiel kann der externe Benutzer-angeforderte (gewünschte) Drehmomentbefehl $\tau_d(t)$, ansprechend auf den Gashebel, zum Steuereinheitsfunktionsblock **82** eingegeben werden. Die Rotorposition θ kann an den Steuereinheitsfunktionsblock **84** eingegeben werden. Block **84** kann eine einen Erregungswinkel $\theta_i(\tau)$ darstellende Ausgabe basierend auf der Rotorposition, der Anzahl von Permanentmagnet-Polpaaren (N_p), der Anzahl von Statorphasen (N_s), und der Phasenverzögerung der bestimmten Phase produzieren. Die Ausgabe des Steuereinheit-Funktionsblocks **84** kann zu dem Steuereinheitsfunktionsblock **82** gespeist werden.

[0243] Mit Verwenden der somit empfangenen Erregungswinkeleingabe kann der Steuereinheitsfunktionsblock **82** bestimmen, gemäß dem oben bekannt gemachten Ausdruck, wie Phasenströme unter den N_s Phasen verteilt sind, so dass das Benutzer-angeforderte Drehmoment $\tau_d(t)$ durch den Motor entwickelt werden kann. Der Steuereinheitsfunktionsblock **86** kann die Differenz zwischen dem von dem Block **82** empfangenen gewünschten Phasenstrom $I_{di}(t)$ und dem abgefühlten Phasenstrom $I_i(t)$ berechnen, um ein Phasenstrom-Nachverfolgungsfehler-Signal $e_i(t)$ auszugeben. Dieses Fehlersignal kann mit einem Verstärkungsfaktor k_g in dem Steuereinheitsfunktionsblock **88** multipliziert werden.

[0244] Ein Effekt der Stromrückkopplungsverstärkung kann sein, die Gesamtsystemrobustheit über den Aus-

schluss von Systemstörungen aufgrund von Messungsrauschen und irgendwelchen Modellparameter-Unge-
nauigkeiten zu erhöhen. Die Ausgabe des Blocks **88** kann zu dem Steuerfunktionsblock **90** gespeist werden.
Der Block **90** kann zeitvariierende Spannungssignale $V_i(t)$ an die Gattertreiber **52** für die selektive, gesteuerte
Erregung der Phasenwicklungen **34** ausgeben. $V_i(t)$ können Komponenten haben, die die Effekte einer Induk-
tion, induzierten elektromotorischen Rückkraft und eines Widerstands kompensieren.

[0245] Zum Kompensieren der Anwesenheit einer Induktion innerhalb der Phasenwicklungen kann der Term $L di_{di}/dt$, wobei di_{di}/dt die Standardzeitableitung des gewünschten Phasenstroms $i_{di}(t)$ bezeichnet, an den Steu-
erfunktionsblock **90** eingegeben werden, um in der Phasenspannungsberechnung hinzugefügt zu werden.
Eine Bestimmung von $L di_{di}/dt$ kann beim Steuereinheitsfunktionsblock **92** getätigt werden, mit Einwirken auf
die empfangenen Eingaben von $\tau_d(t)$, $\theta_i(t)$ und $\omega(t)$.

[0246] Zum Kompensieren der Spannung für die induzierte elektromotorische Rückkraft kann der Term E_i in
der Phasenspannungsberechnung als eine Eingabe zum Funktionsblock **90** vom Steuereinheitsfunktionsblock
94 hinzugefügt werden. Der Kompensationswert für die elektromotorische Rückkraft kann von dem Erregungs-
winkel und der Geschwindigkeit abgeleitet werden, empfangen als Eingaben zum Block **94** mit Verwenden vom
Koeffizienten für die elektromotorische Rückkopplungskraft K_{ei} . Zum Kompensieren der Feldschwächung auf-
grund des Spannungsabfalls in dem Wicklungswiderstand und dem parasitären Widerstand kann der Term R_i
 $i_i(t)$ in der Phasenspannungsberechnung als eine Eingabe zum Funktionsblock **90** vom Steuereinheitsfunktions-
block **96** hinzugefügt werden.

[0247] Im Betrieb kann die Steuereinheit **60** aufeinanderfolgend Steuersignale $V_i(t)$ an die Gattertreiber **68** zur
individuellen Erregung jeweiliger Phasenwicklungen ausgeben. Diese individuelle Erregung kann durch die
Steuereinheit **60** gemäß einem ausgewählten Motorsteuerschema gesteuert werden. Die Gattertreiber **68** kön-
nen die jeweiligen Schaltsätze **52** aktivieren, so dass die Sequenz, in welcher Wicklungen ausgewählt werden,
zu einer in der Steuereinheit **60** aufgebauten Sequenz passt. Die Sequenz kann an die Gattertreiber **68** durch
die Verbindung übermittelt werden, die nur allgemein in dem Diagramm von [Fig. 22](#) veranschaulicht ist.

[0248] Jedes aufeinanderfolgende Steuersignal $V_i(t)$ kann auf einen bestimmten in der entsprechenden Pha-
senwicklung abgefühlten Strom bezogen sein, auf die unmittelbar abgefühlte Rotorposition und -geschwindig-
keit, und auch auf die Modellparameter, K_{ei} und $K_{\tau i}$, die spezifisch für die jeweiligen Phasen vorbestimmt wor-
den sind. Somit kann die Steuereinheit, für jedes abgeleitete Steuersignal $V_i(t)$ zusätzlich zum Empfangen von
rechtzeitig abgefühlten Motorrückkopplungssignalen, vorzugsweise auf die für die bestimmte Phase spezifischen
Parameter zugreifen, welcher das Steuersignal entspricht.

[0249] Die Steuereinheit **60** kann somit die Fähigkeit haben, individuelle Phaseneigenschaftsdifferenzen un-
ter den vielfältigen Statorphasen zu kompensieren. Zum Vermeiden einer Über/Unterkompensation der Span-
nungssteueroutine können die genutzten Pro-Phasen-Schaltkreisparameter exakt auf deren tatsächliche
Phasenwerte angepasst werden.

[0250] Der Pro-Phasen-Drehmoment-Übersetzungskoeffizient $K_{\tau i}$ kann den Pro-Phasen-Drehmomentbeitrag
jeder Phase erfassen. Dieser Parameter kann proportional zu dem Verhältnis des erzeugten Effektivdrehmo-
ments pro für diese Phase angewendeten Strom sein. Das durch die Phase entwickelte Drehmoment kann
eine Funktion der effektiven magnetischen Potentialdifferenz sein, die in dem Luftspalt zwischen dem Kern und
dem Permanentmagneten entwickelt wird, welche die effektive Luftspalt-Flussdichte produziert.

[0251] Der Entwurf der Geometrie für den elektromagnetischen Kern kann eine Stromdichte berücksichtigen,
welche eine Funktion der Ampere-Windungen auf jedem Teilstück des Kerns sein kann, um die Induktion in
dem Material zu optimieren, ohne den Kern in die Sättigung zu treiben. Jedoch können die magnetischen Ei-
genschaften des Kernmaterials oft unhomogen im gesamten Stator Kern sein. Wenn der Motor mit separaten,
elektromagnetisch isolierten Elektromagnetkernen konfiguriert wird, können Inkonsistenzen sogar noch mehr
betont werden.

[0252] Variationen in der Wicklung und Induktivität können auch beim Bestimmen der Drehmomentkonstante
und der Koeffizientenparameter für die elektromotorische Rückkraft beitragen. Es kann eine Verschlechterung
beim Effektivfluss-Aufbau in dem Kern geben, wenn in den Wicklungen Luftaschen gebildet sind. Obwohl hohe
Dichtefaktoren durch einheitliches Wickeln erreicht werden können, können Variationen beim Drahtherstellen
vorliegen. Wenn ein Nenn-Motordrehmoment-Übertragungskoeffizient und ein Nenn-Koeffizient für die elektro-
motorische Rückkraft durch die Steuereinheit verwendet werden, kann somit die Variation in den Eigenschaf-
ten der Phasen eine Gesamtmotorausgangs-Drehmomentwelligkeit produzieren.

[0253] Das in [Fig. 22](#) veranschaulichte Methodikbeispiel für eine Drehmomentsteuereinheit kann dieses Problem vermeiden durch Anwenden des Pro-Phasen-Drehmoment-Übertragungskoeffizienten und der Koeffizienten für die elektromotorische Rückkraft, die für jede Phase vorbestimmt sind.

[0254] Die in [Fig. 22](#) veranschaulichten Berechnungen können aufeinanderfolgend in Echtzeit durchgeführt werden. Der in dem Block **82** gezeigte Ausdruck kann ausgewählt werden, um die gewünschten Ströme zum Nachverfolgen des Drehmomentes in einer Ausführungsform bereitzustellen. Dieser Ausdruck kann modifiziert werden, wenn andere Faktoren als ein effizientes Drehmomentnachverfolgen auch von Wichtigkeit sind. Zum Beispiel können andere Aufgaben eine höhere Geschwindigkeit, erweiterten Bereich, größeres Drehmoment oder Ähnliches enthalten. Der Ausdruck in dem Block **82** kann somit geändert werden, um zusätzliche Betrachtungen aufzunehmen.

[0255] Das in [Fig. 22](#) veranschaulichte Methodikbeispiel für eine Steuereinheit kann in einem integrierten Ausführungsschema durchgeführt werden, in welchem bestimmte Phasenparameter für jede erzeugte Steuerungsausgabe ersetzt werden. Alternativ kann die Steuereinheit eine separate Steuerschleife für jede Statorphase n bereitstellen, wie z.B. in dem in [Fig. 12](#) veranschaulichten Teilblockdiagramm dargestellt.

[0256] Für jede der N_s Motorphasen kann eine entsprechende Steuerschleife **60_i** bereitgestellt werden. Jede Steuerschleife kann die relevanten Parameter für die jeweilige Motorphase enthalten. Die Steuerschleifen können gemäß einer angemessenen Motorphasen-Erregungssequenz aktiviert werden, und benötigen nur die abgefühlten Motorrückkopplungssignale zur Erzeugung der Steuerspannungen.

[0257] In einer alternativen Ausführungsform der in [Fig. 22](#) veranschaulichten Steuermethodik kann der gewünschte Pro-Phasen-Strom $I_{di}(t)$ in Echtzeit aus empfangenen Eingaben von $\tau_d(t)$, $\theta_i(t)$ durch Verweis auf in Nachschlagtabellen gespeicherte Werte bestimmt werden. Nachschlagtabellen können für jede Statorphase bereitgestellt werden. Der in Block **82** von [Fig. 22](#) gezeigte Ausdruck in diesem Motorsteuerschema kann die gewünschte Stromkomponente für das Nachverfolgungs-Drehmomentausgangs-Steuersignal $V_i(t)$ mit einem sinusförmigen Wellenprofil bereitstellen. Die Sinuswellen-Stromtrajektorie $I_{sin}(t)$ kann aus der folgenden Gleichung erzeugt werden:

$$I_{sin} = I_m \sin(N_r \theta_i)$$

wobei I_m die Phasenstromgröße darstellt, N_r die Anzahl von Permanentmagnet-Paaren bezeichnet und θ_i das gemessene Pro-Phase-Rotorpositionssignal bezeichnet. Dieses sinusförmige Stromwellenprofil kann einen effizienteren Motorbetrieb bereitstellen.

[0258] Unterschiedliche Ausdrücke für Block **82** können für die Drehmomentnachverfolgungsfunktionalität von [Fig. 22](#) verwendet werden, um unterschiedliche Stromwellenformprofile zum Manifestieren anderer Betriebsaspekte zu erhalten, obwohl damit vielleicht einiges der mit dem sinusförmigen Wellenformprofil erreichten Effizienz geopfert wird. Für einen Betrieb für ein höheres Drehmoment kann der Ausdruck von Block **82**, in [Fig. 22](#) gezeigt, mit einem Ausdruck ersetzt werden, der eine Rechteck-Strom-Wellenform-Trajektorie $I_{sq}(t)$ ergibt, so wie

$$I_{sq} = I_m \operatorname{sgn}(\sin(N_r \theta_i))$$

wobei $\operatorname{sgn}(x)$ die Standardvorzeichenfunktion bezeichnet und als 1 definiert ist, falls $x > 0$, 0 falls $x = 0$, und -1 falls $x < 0$.

[0259] Der in [Fig. 17](#) gezeigte Profilspeicher **156** kann Daten speichern, die durch die Steuereinheit **60** verwendet werden, um die Stromwerte zu erhalten, die die oben beispielhaft angegebenen Ausdrücke erfüllen. Für das Rechteckwellenprofil kann der Ausdruck $L_d I_{di}/dt$ vorgespeichert werden. Die Daten können als Nachschlagtabellen in einer Profilspeichersbibliothek gespeichert werden, wobei jedes Motorsteuerschema eine entsprechende Nachschlagtabelle hat. Jeder Eintrag in einer Nachschlagtabelle kann einen Wert eines Stroms darstellen, als die Ausgabe von Block **82** in [Fig. 22](#) gezeigt, für eine bestimmte Kombination eines Drehmomentanforderungswertes und einer Rotorposition für das entsprechende Motorsteuerschema.

[0260] Wenn ein Steuerschema ausgewählt wird, für welches die sinusförmige Wellenform produziert wird, kann auf die entsprechenden Profilspeicherdaten zugegriffen werden. Auf Rechteckwellen-Profilspeicherdaten kann zugegriffen werden, wenn das entsprechende Steuerschema ausgewählt wird. Alternativ kann der Profilspeicher Daten für jedes Profil speichern, mit welchem der gewünschte Stromwert I_{di} wiederholt durch die

Steuereinheit in Echtzeit berechnet wird. Während Ausdrücke für sinusförmige und rechteckwellenförmige Wellenformen oben zu Veranschaulichungszwecken bekannt gemacht worden sind, können andere Wellenformprofile für unterschiedliche Betriebszwecke genutzt werden. [Fig. 7](#) zeigt einige Beispiele von Wellenformen, die verwendet werden können.

[0261] Zum Beispiel kann ein sinusförmiges Wellenformprofil verwendet werden, um die Batterielebensdauer durch ihren effizienteren Betrieb zu erweitern. Jedoch ist in den meisten Fällen eine Energieversorgung für eine maximale Stromentladungsrate (so wie 10 Ampere) bemessen. Wenn der Benutzer einen Drehmomentbefehl anfordert, der mit einem Stromziehen von maximal 10 Ampere korreliert ist, kann somit die Motorabgabe auf ungefähr 54 Nm für das sinusförmige Stromprofil beschränkt sein.

[0262] Wenn der Benutzer ein höheres Drehmoment erzeugen möchte, als das sinusförmige Wellenprofil bereitstellen kann, kann die Steuereinheit zu einem Rechteckwellenprofil umschalten. Das Rechteckwellenprofil kann ungefähr 68 Nm produzieren, ohne die maximale Bemessung von 10 Ampere der Energieversorgung zu überschreiten. Jedoch kann der Leistungsverlust sich von ungefähr 140 W für das sinusförmige Motorsteuerschema auf ungefähr 250 W für das Rechteckwellen-Motorsteuerschema erhöhen.

[0263] Eine Auswahl von Profildaten kann durch die Steuereinheit automatisch wie angemessen während eines Motorbetriebs getätigt werden. Alternativ kann ein Benutzer einen Betriebsmodus entsprechend einem der Profile auswählen durch Eingeben eines Profilauswahlsignals beim Steuereinheiteneingang **148**. Der Profilauswahlbetrieb kann mit Verweis auf das in [Fig. 23](#) gezeigte Flussdiagramm beschrieben werden.

[0264] Die Beschreibung erstreckt sich auf ein spezifisches Beispiel, in welchem der Profilspeicher Daten zum Implementieren eines Motorsteuerschemas für ein Profil für eine hohe Effizienz enthält (welches ein Steuerschema zum Produzieren einer sinusförmigen Motorstromwellenform sein kann) und zum Implementieren eines Profils für ein hohes Drehmoment (welches ein Steuerschema zum Produzieren einer Rechteck-Motorstromwellenform sein kann). Dieses Beispiel ist lediglich veranschaulichend, da Daten für andere Profile in dem Profilspeicher gespeichert werden können und auf die unter Betriebsbedingungen zugegriffen werden kann, für welche unterschiedliche Stromwellenformen angemessen sein können.

[0265] In der Abwesenheit eines durch die Steuereinheit erfassten Profilauswahlsignals kann ein automatischer Profilauswahlmodus aktiviert werden. Bei Schritt **100** kann die Steuereinheit erfassen, ob ein Benutzerprofilauswahlsignal beim Eingang **48** empfangen worden ist, um zu bestimmen, ob der automatische Modus aktiviert werden soll.

[0266] Wenn die Bestimmung in Schritt **100** negativ ist, kann die Steuereinheit bei Schritt **102** bestimmen, ob das empfangene Profilauswahlsignal eine Auswahl für ein Profil für ein hohes Drehmoment ist. Wenn nicht, kann die Steuereinheit, nach irgendeiner angemessenen Verzögerung, auf den Profilspeicher zugreifen, um Daten von der Nachschlagtabelle für das Profil für eine hohe Effizienz bei Schritt **104** abzurufen. Die abgerufenen Daten können den gewünschten Stromwert I_{di} für die sofortigen Werte der Drehmomentanforderung und der abgefühlten Rotorpositionspegel ergeben.

[0267] Wenn anstelle dessen das Profil für ein hohes Drehmoment ausgewählt worden ist, wie in Schritt **102** bestimmt, kann auf die entsprechende Nachschlagtabelle bei Schritt **106** zugegriffen werden, und der angemessene Wert von I_{di} kann erhalten werden. Der Prozessfluss von beiden Schritten **104** und **106** kann zum Schritt **100** zur Bestimmung zurückkehren, ob immer noch eine Benutzerprofilauswahl empfangen wird, und die Natur einer solchen Auswahl kann auf die oben beschriebene Weise fortfahren. Der Betrieb bei Schritten **104** und **106** kann nach der Auswahl im Schritt **102** für eine Periode auftreten, die ausreichend lang genug ist, um Einschwingeffekte bei einer Profilumschaltung zu überwinden. Somit kann sich eine angemessene Verzögerung zum Zurückkehren des Prozessflusses zum Schritt **100** für eine Anzahl aufeinanderfolgender Rückkopplungswerte erstrecken.

[0268] Wenn kein Eingangssignal für eine Benutzerprofilauswahl vorliegt, und das System nicht abgeschaltet worden ist, kann die Steuereinheit bei Schritt **100** bestimmen, dass das Wellenformprofil automatisch ausgewählt werden soll. In diesem automatischen Modus kann die Bestimmung durch Steuereinheit bei Schritt **108** getätigt werden, ob oder nicht das System, in dem Motorsteuerschema für eine Profil für eine hohe Effizienz, die Fähigkeit hat, die Drehmomentnachfolge-Erfordernisse für die Benutzer-angeforderte Drehmomenteingabe zu erfüllen. Solch eine Bestimmung kann mit Verweis auf den Wert der Steuereinheit $V_r(t)$ von dem Ausgang von Block **90** von [Fig. 22](#) getätigt werden, der von den Werten der Benutzer-angeforderten Drehmomenteingabe und der Motordrehzahl abgeleitet würde. Die Drehmomentbedürfnisse können erfüllt werden, wenn die

abgeleiteten Steuerspannungen nicht den Spannungspegel der Energieversorgung überschreiten.

[0269] Wenn der abgeleitete Pegel dieses Ausgangs nicht die Energieversorgungsspannung wie in Schritt **108** bestimmt überschreitet, kann die Steuereinheit die Spannung anwenden, die von dem Motorsteuerschema für die hohe Effizienz zum Drehmomentnachverfolgen erfordert wird. Die Steuereinheit, nach irgendeiner angemessenen Verzögerung, kann dann auf das Speicherprofil zugreifen, um Daten aus der Nachschlagtabelle für das Profil für eine hohe Effizienz bei Schritt **110** abzurufen.

[0270] Falls anstelle dessen der abgeleitete Spannungspegel höher als die Energieversorgungsspannung ist, kann eine Bestimmung bei Schritt **108** getätigt werden, dass die Energieversorgungskapazität überschritten wird. Die Steuereinheit kann dann, nach irgendeiner angemessenen Verzögerung, auf den Profilspeicher zugreifen, um Daten aus der Nachschlagtabelle für das Profil für ein hohes Drehmoment bei Schritt **116** abzurufen. Der Prozessfluss von den beiden Schritten **110** und **112** kann zum Schritt **100** zurückkehren, um auf die oben beschriebene Weise fortzufahren. Die oben diskutierten Verzögerungen können angemessen sein, wenn der Betrieb von einem Betriebsprofilmodus zu einem anderen geändert werden soll.

[0271] Während die durch Schritt **108** durchgeführte Profilauswahl für einen automatischen Modus durch wiederholte Berechnung einer Drehmomentkapazitätsschwelle auf einer Echtzeitbasis durchgeführt werden kann, können Berechnungen einer Spannung für vielfältige Kombinationen von einer Drehmomentanforderung und einer Motordrehzahl im Voraus getätigt werden und mit dem angemessenen Profil in einer Nachschlagtabelle in dem Profilspeicher verbunden werden. [Fig. 24](#) ist eine Kurve, die eine Abgrenzung in solch einer Nachschlagtabelle zwischen Bereichen für eine Modusauswahl für ein Profil für eine hohe Effizienz und eine Modusauswahl für ein Profil für ein hohes Drehmoment für Werte eines Drehmomentes und einer Drehzahl gemäß dem veranschaulichten Beispiel darstellen kann.

[0272] Die Nachschlagtabelle kann durch Tätigen des oben beschriebenen Steuereinheitsspannung/Versorgungsspannungs-Vergleichs für eine Mehrzahl von Kombinationen für eine Drehzahl/angefordertes Drehmoment formuliert werden. Drehzahl/Drehmoment-Kombinationen oberhalb der in [Fig. 24](#) gezeigten Kurve können außerhalb der Kapazität des Systems sein zum Nachverfolgen des Drehmomentes in dem Betriebsmodus für ein Profil für eine hohe Effizienz. Die Steuereinheit kann beim Zugreifen auf diese Nachschlagtabelle den Modus für ein Profil für eine hohe Effizienz für Drehzahl/Drehmoment-Kombinationen auswählen, die durch Punkte unterhalb der Kurve dargestellt sind, und den Modus für ein Profil für ein hohes Drehmoment für die verbleibenden Punkte auswählen.

[0273] Sobald eine Maschinensteuerschema ausgewählt worden ist, kann die Steuereinheit die Erregung jedes elektromagnetischen Schaltkreises gemäß des ausgewählten Maschinensteuerschemas steuern. In einem Motor kann diese Erregung des elektromagnetischen Schaltkreises durch ein Steuern eines Schalt-Schaltkreises zum Anwenden eines angemessenen Stromwellenformprofils auf jeden elektromagnetischen Schaltkreis erreicht werden. In einem Generator kann diese Erregung des elektromagnetischen Schaltkreises durch Steuern des Zündens eines IGBT erreicht werden, um die Spannung und den Strom, in jeden elektromagnetischen Schaltkreis induziert, angemessen zu formen.

[0274] Die Steuereinheit kann die Leistung der adaptiven elektrischen Maschine durch dynamisches Auswählen eines Maschinensteuerschemas in Ansprechen auf Benutzereingaben, Maschinenbetriebsbedingungen und Maschinenbetriebsparameter auswählen. Um dieses zu tun, kann eine adaptive elektrische Maschine eine Verwendung einer Vielfalt von Steueralgorithmien zusätzlich zu den oben beschriebenen ermöglichen. Zum Beispiel können wenigstens drei Algorithmientypen in adaptiven elektrischen Maschinen verwendet werden.

[0275] Der erste Typ sind leistungs-orientierte Algorithmen, in welchen die meisten oder sämtliche steuerbare Parameter zum Optimieren gewünschter Leistungseigenschaften bei gegebenen Drehzahlen und einem Drehmoment berechnet werden können. Das oben diskutierte Motorsteuersystem zum Drehmomentnachverfolgen kann in diese Kategorie fallen.

[0276] Der zweite Typ sind Algorithmen, die auf ein Angehen von Störungen gerichtet sind, in welchen die meisten oder sämtliche steuerbare Parameter erneut berechnet werden können basierend auf einer spezifischen Störungsinformation, so dass ein gegebenes Drehzahl-Drehmoment-Profil aufrecht erhalten werden kann, und andere gewünschte Leistungseigenschaften können auch bis zum möglichen Ausmaß optimiert werden.

[0277] Der dritte Typ sind Algorithmen, die auf ein Behandeln von Herstellungstoleranzen und Abnutzung ge-

richtet sind. Diese Algorithmen basieren auf der Prämisse, dass jeder Teil eines Motors, obwohl spezifikationsgemäß hergestellt, eine gewisse Abweichung von dieser Spezifikation haben kann. Diese Algorithmen können solche Abweichungen korrigieren, als auch abnutzungsverursachte Abweichungen.

[0278] Durch Implementieren vielfältiger Algorithmen in Maschinensteuerschemas kann eine adaptive elektrische Maschine eine Steuereinheit zum dynamischen Einstellen der Erregung der elektromagnetischen Schaltkreise der Maschine während des Betriebs haben. Ein Einstellen der Erregung in Ansprechen auf Benutzereingaben, Maschinenbetriebsbedingungen und Maschinenbetriebsparameter kann getätigt werden, um eine verbesserte Leistung der Maschine zu erhalten (so wie ein Effizienzmaximieren oder Drehmomentoptimieren).

[0279] Eine naturgemäße Anwendung für adaptive elektrische Motoren kann die Verwendung als ein Fahrzeugantrieb sein. Ein adaptiver elektrischer Motor kann innerhalb eines breiten Bereichs von Anwendungen zusätzlich zu Fahrzeugantrieben verwendet werden. Während es bei der Implementierung eines Fahrzeugantriebs vorgezogen werden kann, dass der Rotor den Stator umgibt, kann es ein vorzuziehendes Design bei anderen Anwendungen sein, dass der Stator den Rotor umgibt. Somit ist es innerhalb der Erwägung der Erfindung, dass jedes innere und äußere ringförmige Teil entweder den Stator oder Rotor umfassen kann oder entweder die Gruppe von Elektromagneten oder einem Permanentmagnetring umfassen kann. Während gewickelte Schenkelpole veranschaulicht worden sind, können Wicklungen anstelle dessen auch in einer Nicht-Schenkelpolgeschlitzten Struktur bereitgestellt werden.

[0280] Bestimmte Elektromagnet-Erregungssequenzen können abhängig von vielfältigen Betrachtungen variieren. Eine Erregung der Elektromagneten kann sequentiell entlang der Luftspalt-Peripherie oder in einer unterschiedlichen Reihenfolge geschaltet werden. Elektromagnetgruppen können alle zu sämtlichen Zeiten erregt werden, obwohl zu individuell programmierten Zeiten geschaltet. Umgekehrt können individuelle Elektromagneten zu vorbestimmten sequentiell induzierten, zufällig induzierten oder nicht-sequentiell induzierten Intervallen entregt werden.

[0281] Obwohl eine Ausführungsform dieser hier beschriebenen Erfindung gewöhnlicher Weise als ein bürstenloser Gleichstrommotor betrachtet werden kann, wird ein Fachmann erkennen, dass die beschriebenen Prinzipien auch auf Wechselstrommotoren vom Synchron- und Motoren mit gewickelten, durch eine Vielfalt von Pulsformen erregbaren Elementen anwendbar sein können.

[0282] Die Quelle der elektrischen Energie zum Antreiben des Motors kann nicht nur auf eine Batterie beschränkt sein, sondern kann z.B. auch eine Wechselstromquelle enthalten. Solch ein Wechselstromquelle kann zu einer Gleichstrom- oder Pulswellenformversorgungseinheit umgewandelt werden, oder kann ohne solch eine Umwandlung verwendet werden, um den Motor als einen Wechselstrom-Synchronmotor anzutreiben.

[0283] Zusätzliche Ausführungsformen dieser Erfindung betreffen Verfahren zum Erstellen einer Multiphasen-Elektromaschine. Eine Verfahrensausführungsform zum Herstellen einer Multiphasen-Elektromaschine kann ein Bereitstellen wenigstens eines Teiles umfassen, wobei das Teil eine Vielzahl von Kernelementen umfasst. Die Kernelemente können dann in Gruppen angeordnet werden, wobei jede Gruppe wenigstens ein Kernelement hat, und jede Gruppe von Kernelementen mit einer der Phasen der Mehrphasen-Maschine verknüpft ist.

[0284] Die Kernelemente in jeder Gruppe können dann strukturell und/oder elektromagnetisch von den Kernelementen in jeder anderen Gruppe getrennt werden, um eine Steuerung des elektrischen Flusses in jeder Gruppe von Kernelementen unabhängig vom elektrischen Fluss in jeder anderen Gruppe zu ermöglichen. Jede Phase der Mehrphasen-Maschine kann dann unabhängig von jeder anderen Phase gesteuert werden, wodurch eine Bewegung wenigstens eines Teils in einer Richtung und mit einer Kraft aufgebaut wird, die dynamisch wählbar sind.

[0285] Andere Ausführungsformen dieser Erfindung, die Verfahren zum Herstellen einer Mehrphasen-Elektromaschine betreffen, können ferner einen Rotor oder ein anderes bewegliches Teil, einen Stator oder ein anderes stationäres Teil, und andere Elemente und Schritte umfassen.

[0286] Adaptive elektrische Maschinen können auch als elektrische Generatoren verwendet werden. Bei der Verwendung als Generator kann eine adaptive elektrische Maschine dieselbe Grundstruktur haben wie bei der Verwendung als ein elektrischer Motor. Zum Erreichen besserer Ergebnisse unterscheidet sich jedoch im All-

gemeinen das Design der elektromagnetischen Schaltkreise, genauso wie es auch das verwendete Steuersystem tun kann.

[0287] [Fig. 18\(b\)](#) veranschaulicht ein Beispiel eines Schaltsatzes und eines Treibers für einen individuellen elektromagnetischen Schaltkreis für einen adaptiven elektrischen Generator. In diesem Beispiel kann jeder elektromagnetische Schaltkreis vier Dioden (**214**, **216**, **218** und **220**) in einem Brückengleichrichter enthalten. Dieses Beispiel kann auch einen Induktor **222**, eine Diode **224**, einen Kondensator **226**, und einen IGBT (insulated gate bipolar transistor) **228** umfassen. Der IGBT **228** kann alternativ ein MOSFET sein.

[0288] In diesem Beispiel kann jeder IGBT **228** mit einem digitalen Signalprozessor (DSP) **230** verbunden sein. Die vielfältigen elektromagnetischen Schaltkreise können bei einem Knoten **232** verbunden sein, und können parallel angeordnet sein, wobei jeder die Komponenten von [Fig. 18\(b\)](#) hat. Alternativ kann ein gemeinsames "Drei-Phasen"-System konstruiert werden durch Abgreifen der Wicklungen einiger Statorelemente in einer Drei-Phasen-Sternkonfiguration mit demselben Vier-Dioden-Brückengleichrichter.

[0289] Ein Drehen des Rotors erzeugt einen in den Statorpol-Wicklungen induzierten Wechselstrom. Die Brückengleichrichter-Dioden (**214**, **216**, **218** und **220**) können auf den Strom wirken, um einen gleichgerichteten Gleichstrom V_R mit einem großen Welligkeitsbetrag zu produzieren. Der Induktor **222**, IGBT **228**, Diode **224** und Kondensator **226** können dann auf diesen Strom wirken, um die gewünschte konstante Gleichstromausgabe V_{out} zu produzieren.

[0290] Der DSP **230** kann ein pulsbreiten-moduliertes Signal mit einer konstanten Frequenz von z.B. 20kHz und einem variierenden Tastverhältnis an den IGBT **222** senden, das das Zünden des IGBT **222** steuert. Das Tastverhältnis kann wiederholt durch den DSP **230** unter Verwenden der Formel berechnet werden:

$$\text{Tastverhältnis} = 1 - (V_R/V_{out})$$

[0291] V_R kann durch den DSP **230** an einer Stelle zwischen dem Brückengleichrichter (**214**, **216**, **218** und **220**) und dem Induktor **222** abgetastet werden. Das Tastverhältnis, mit welchem der DSP **230** sein Signal an den IGBT **222** pulsbreitenmoduliert, kann das Zeitintervall bestimmen, während dessen der IGBT **222** den Strom senkt. Eine Betriebsfrequenz von 20 kHz, mit welcher der DSP **230** sein Signal an den IGBT **222** pulsbreitenmoduliert, kann sich als Signale mit Zeitdauern auswirken, die 50 Mikrosekunden dauern. Während der 50 Mikrosekunden kann ein Puls, dessen Breite das Zeitintervall bestimmt, während dessen der IGBT **222** den Strom senkt, bei dem IGBT **222** empfangen werden.

[0292] Wenn z.B. der DSP **230** ein V_R/V_{out} -Verhältnis von 0,8 berechnet, kann ein Signal mit einem Tastverhältnis von 0,2 an den IGBT **222** übermittelt werden, was bedeutet, dass ein Puls, der 10 der 50 Mikrosekunden dauert, bei dem IGBT **222** empfangen werden kann, was den IGBT **222** zwingt, den Strom für 20% des Zeitintervalls von 50 Mikrosekunden zu senken. Der DSP **230** kann die Übermittlung seines pulsbreitenmodulierten Signals an den IGBT **222** beenden, wenn er eine Spannung V_R fühlt, die weniger als irgendeine angemessene Betriebsspannung V_{op} sein kann.

[0293] [Fig. 25](#) veranschaulicht eine wellige, gleichgerichtete Gleichspannung V_R 300 über der Zeit und eine angemessene Betriebsspannung V_{op} , während welcher der DSP **230** sein pulsbreitenmoduliertes Signal zum Steuern des Zündens des IGBT **222** übermitteln kann. Die gewünschte konstante Gleichstrom-Ausgangsspannung V_{out} ist ebenfalls veranschaulicht. Bei niedrigen, gefühlten, gleichgerichteten Spannungen, wenn V_R geringer als V_{op} ist, kann es ineffizient sein, das Zünden des IGBT **222** pulsbreiten-zu-modulieren, weil das wie durch den DSP **230** berechnete Tastverhältnis sich seinem Maximum von 1 nähert. Anstelle dessen kann sich der Kondensator **226** während Intervallen entladen, in welchen V_R geringer als die gewählte V_{op} ist.

[0294] Auf diese Weise kann eine elektronische Rückkopplung in der Form von V_R im Gegensatz zu der in Systemen nach dem Stand der Technik genutzten mechanischen Rückkopplung genutzt werden. Dies kann die Notwendigkeit einer Rotorwinkelpositions-Rückkopplung eliminieren, die für existierende Designs für bürstenlose Gleichstromgeneratoren notwendig ist, zum Steuern der Erzeugung einer konstanten Gleichstromausgabe V_{out} , und kann die Verwendung kostengünstigerer elektronischer Komponenten und der Steuerung ermöglichen.

[0295] Ferner kann die hohe, konstante Frequenz, mit welcher der DSP **230** den IGBT **228** pulsbreitenmoduliert, dem Induktor **222** und Kondensator **226** ermöglichen, eine sehr geringe Induktivität bzw. Kapazität zu haben. Da zusätzliche Phasen zum Design des adaptiven Generators hinzugefügt werden, können die Induktivi-

täts- und Kapazitätswerte weiter abfallen, wie sich die innerhalb von V_R inhärente Welligkeit verringert.

[0296] Aus all diesen Gründen kann geschätzt werden, dass die Kosten für einen adaptiven Generator ungefähr ein Drittel der Kosten für ein konventionelles System für einen bürstenlosen Gleichstromgenerator sind. Zusätzlich kann eine Durchschlagstörung in dem adaptiven Generator durch Ersetzen einer MOSFET-Brücke mit einem Vier-Dioden-Brückengleichrichter eliminiert werden.

[0297] Wie für einen adaptiven elektrischen Motor können vielfältige Generatorsteuerschemas mit Verwenden der Steuereinheit zum Anpassen des Generators an vielfältige Bedingungen implementiert werden. Wie für den Motor können diese Bedingungen irgendeine Kombination von Benutzereingaben, abgefühlten Maschinenbetriebsbedingungen (so wie Windgeschwindigkeit oder -Richtung), und abgefühlten Maschinenbetriebsparametern sein.

[0298] In der Offenbarung ist nur eine bevorzugte Ausführungsform oder sind nur Ausführungsformen der Erfindungen und einige, wenige Beispiele ihrer Vielseitigkeit beschrieben. Es sollte verstanden werden, dass die Erfindung in vielfältigen, anderen Kombinationen und Umgebungen verwendet werden kann, und dass Änderungen oder Modifizierungen innerhalb des Bereiches der beigefügten Ansprüche möglich sind.

[0299] Wie es dem Fachmann ersichtlich sein wird, müssen adaptive elektrische Maschinen nicht auf rotierende elektrische Maschinen beschränkt sein, sondern können auch mit Linearmotoren (so wie die für elektrische Zugantriebe verwendeten) und andere Typen von elektrischen Maschinen verwendet werden. In einer rotierenden elektrischen Maschine können sowohl der Stator als auch der Rotor Elektromagnete haben, oder einer oder der andere kann Permanentmagneten haben.

Patentansprüche

1. Elektrische Mehrphasen-Maschine mit:

einem ersten Teil, das eine Vielzahl von Statorkern-Elementen **(32)** umfasst, wobei jedes eine leitfähige Wicklung **(34)** hat, wobei die Vielzahl der Statorkern-Elemente **(32)** in einer Vielzahl von Statorgruppen angeordnet ist, wobei jede Statorgruppe mindestens ein Statorkern-Element **(32)** umfasst, wobei jede Statorgruppe mit mindestens einer elektrischen Phase der elektrischen Mehrphasen-Maschine verknüpft ist, und wobei jede Gruppe elektrisch und magnetisch von den anderen Statorgruppen isoliert ist;
einem zweiten Teil, das ein Rotor-Element **(20)** und eine Maschinensteuereinheit **(60)** umfasst, die in elektrischem Kontakt mit den leitfähigen Wicklungen **(34)** der Statorkern-Elemente **(32)** ist;

dadurch gekennzeichnet, dass

die Maschinensteuereinheit **(60)** ausgebildet ist zum Steuern eines elektrischen Stromflusses in jeder Statorgruppe unabhängig vom elektrischen Stromfluss in jeder der anderen Statorgruppen, wobei jede Phase der Mehrphasen-Maschine **(10)** unabhängig steuerbar ist, wobei die Maschinensteuereinheit **(60)** ferner ausgebildet ist zum Steuern des elektrischen Stroms in einer Phase mit einer Stromform oder einem anderen Stromparameter, der sich von dem in einer anderen Phase unterscheidet.

2. Elektrische Mehrphasen-Maschine von Anspruch 1, wobei das zweite Teil sich in eine Richtung und mit einer Kraft relativ zu dem ersten Teil bewegt, das während des Maschinenbetriebs einstellbar ist.

3. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste und zweite Teil **(20, 30)** in radialer Ausrichtung zueinander untergebracht sind.

4. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Vielzahl von Statorkern-Elementen **(32)** entlang eines Radialumfangs des ersten Teils untergebracht ist.

5. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Bewegung des zweiten Teils bei einer Geschwindigkeit und einem Moment gebildet wird, welche während des Betriebs auf der Basis einer Maschineneingabe variieren.

6. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Maschinensteuereinheit **(60)** eine Verarbeitungseinheit zum Auswählen eines elektrischen Stromprofils hat, das die Effizienz der Maschine optimiert.

7. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Permanentmagnete **(22)** an dem Rotor-Element **(20)** angebracht sind.

8. Elektrische Mehrphasen-Maschine nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Maschine ein Reluktanzmotor ist.

9. Verfahren zum Herstellen einer elektrischen Mehrphasen-Maschine mit:

Bereitstellen einer ein erstes Teil umfassenden elektrischen Mehrphasen-Maschine, wobei das erste Teil eine Vielzahl von Statorkern-Elementen (**32**) umfasst, Anordnen der Vielzahl von Statorkern-Elementen in Gruppen, wobei jede Gruppe mindestens ein Statorkern-Element (**32**) umfasst, wobei jede Statorgruppe mit mindestens einer elektrischen Phase der elektrischen Mehrphasen-Maschine verknüpft ist, und Versorgen eines jeden Statorkern-Elementes mit einer leitfähigen Wicklung (**34**), die in elektrischer Kommunikation mit einer Steuereinheit (**60**) ist, wobei jede Gruppe elektrisch und magnetisch von der anderen Statorgruppe isoliert ist, um den elektrischen Fluss in jeder Gruppe von Kernelementen unabhängig vom elektrischen Fluss in jeder anderen Gruppe zu steuern, und wobei jede Phase der elektrischen Mehrphasen-Maschine (**60**) unabhängig von jeder anderen Phase steuerbar ist, gekennzeichnet durch

Bereitstellen einer Maschinensteuereinheit (**60**), die in elektrischem Kontakt mit den leitfähigen Wicklungen (**36**) der Statorkern-Elemente ist, wobei die Maschinensteuereinheit (**60**) ausgebildet ist zum Steuern eines elektrischen Stromflusses in jeder Statorgruppe unabhängig vom elektrischen Stromfluss in jeder der anderen Statorgruppen, wobei jede Phase der Mehrphasen-Maschine (**10**) unabhängig steuerbar ist, wobei die Maschinensteuereinheit (**60**) ferner ausgebildet ist zum Steuern des elektrischen Stroms in einer Phase mit einer Stromform oder einem anderen Stromparameter, der sich von dem in einer anderen Phase unterscheidet.

10. Verfahren von Anspruch 9, wobei die elektrische Mehrphasen-Maschine ferner mit einem zweiten Teil bereitgestellt wird.

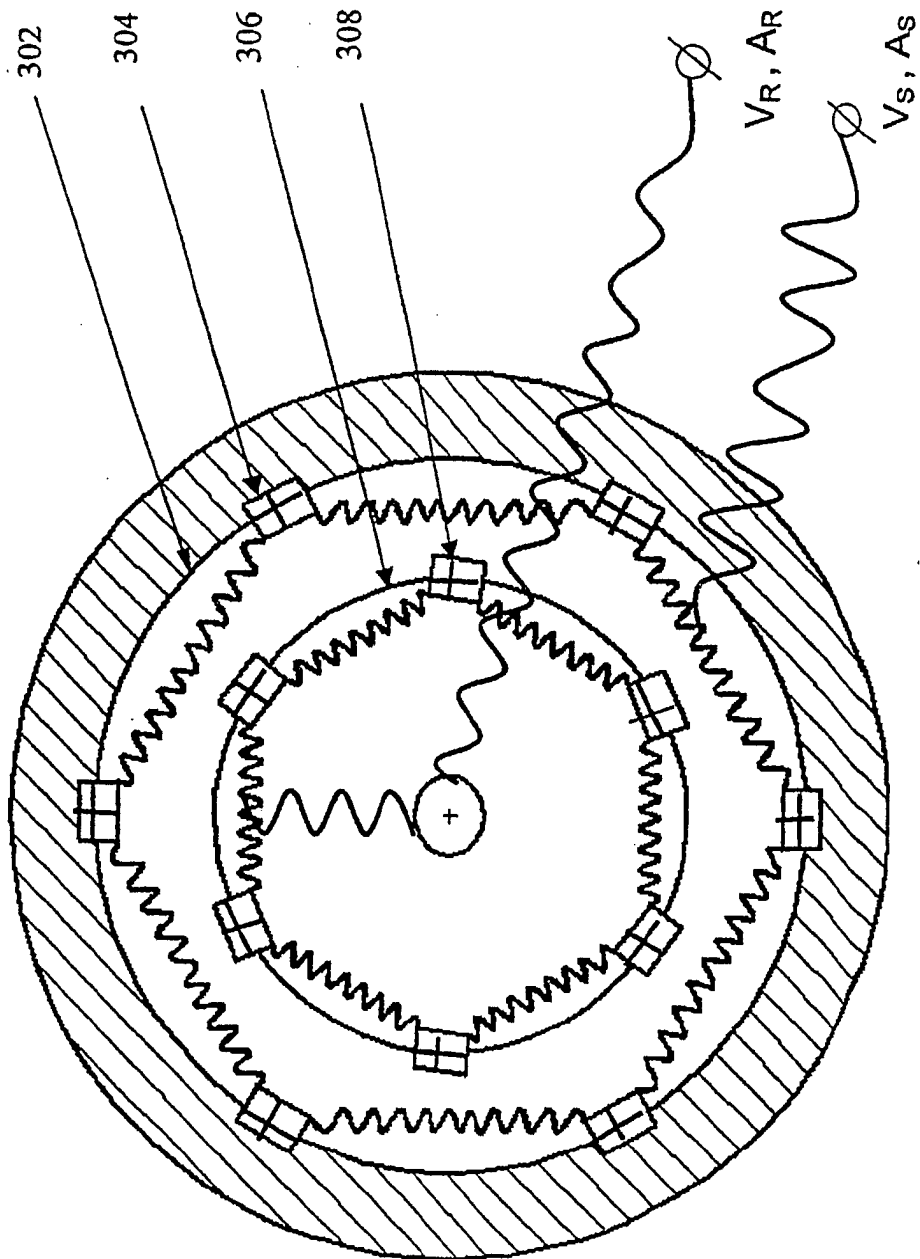
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei die Vielzahl von Statorkern-Elementen (**32**) bereitgestellt wird, entlang eines Radialumfangs des ersten Teils untergebracht zu sein.

12. Verfahren zum Bedienen bzw. Betreiben einer elektrischen Mehrphasen-Maschine, die durch einen der Ansprüche 10 und 11 erhältlich ist, wobei das zweite Teil bei einer Geschwindigkeit und einem Moment bewegt wird, welche während des Betriebs auf der Basis einer Maschineneingabe variieren.

13. Verfahren nach Anspruch 12, ferner die Schritte umfassend zum:

Bereitstellen von mindestens zwei Maschinensteuermethoden zum Erregen jeder der Statorgruppen und dynamischen Auswählen zwischen den Maschinensteuermethoden während des Motorbetriebs basierend auf Operatoreingaben, Maschinenbetriebsbedingungen und Maschinenbetriebsparametern.

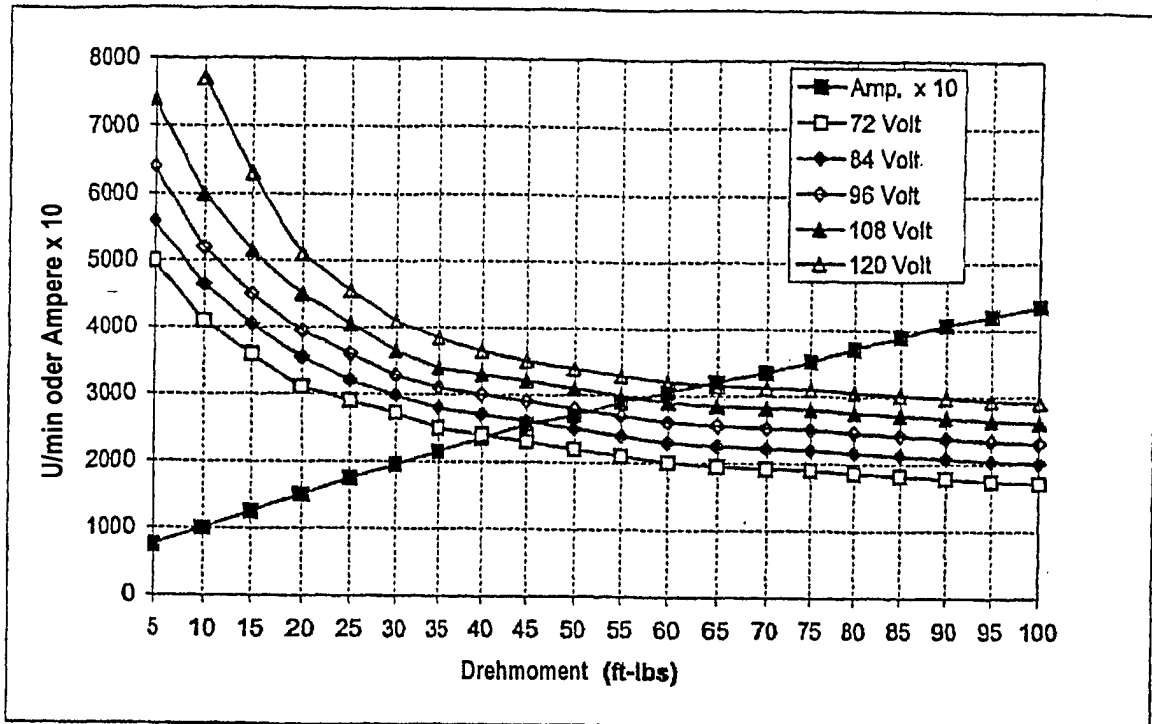
Es folgen 25 Blatt Zeichnungen



Figur 1

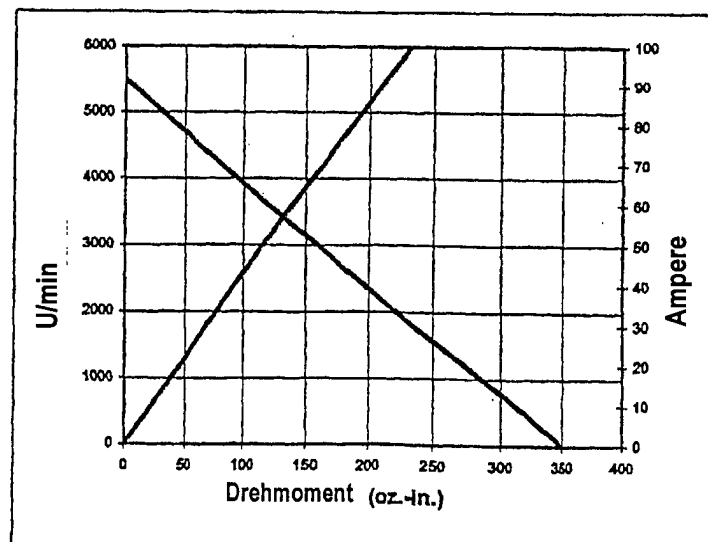
STAND DER TECHNIK

STAND DER TECHNIK

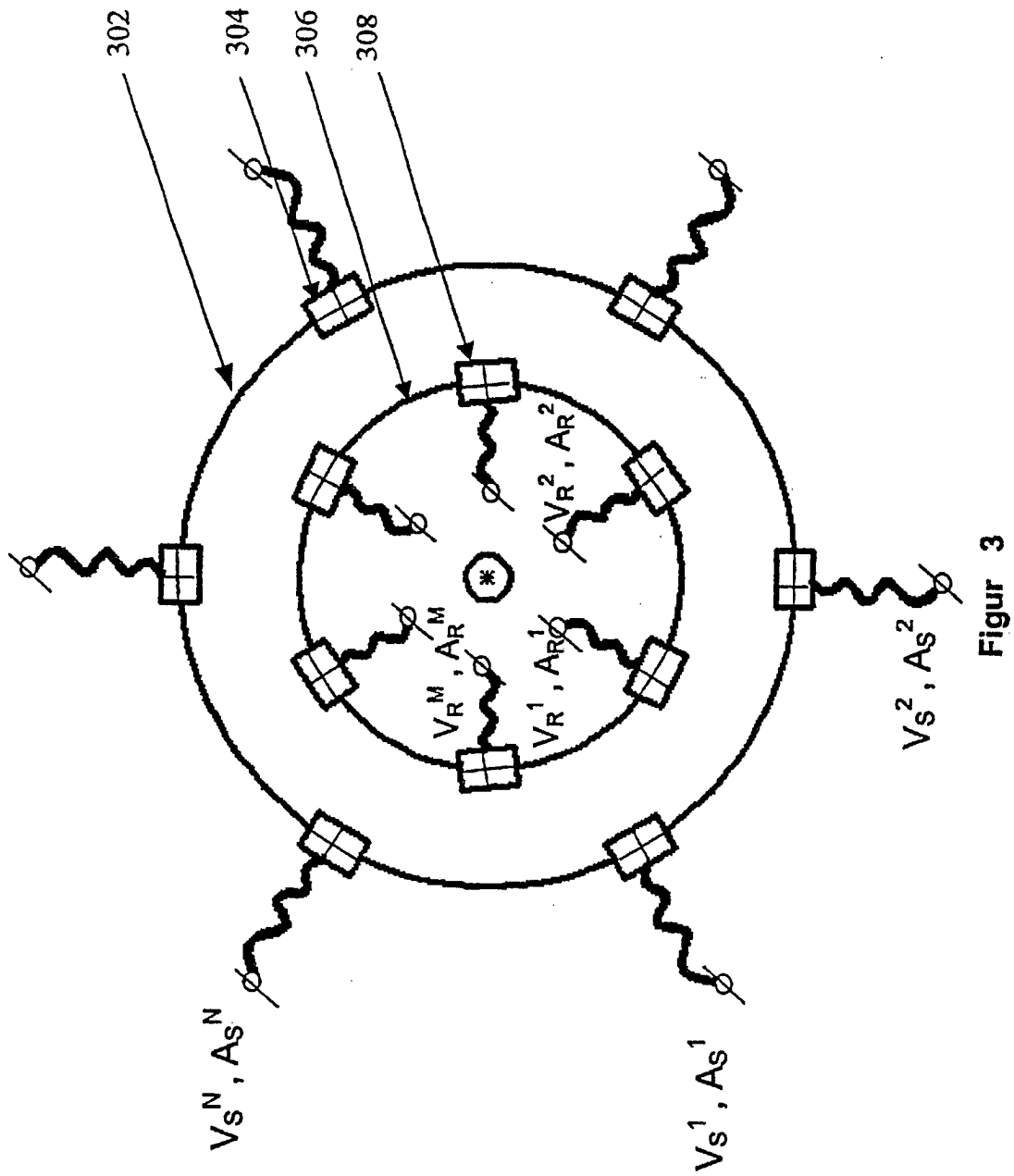


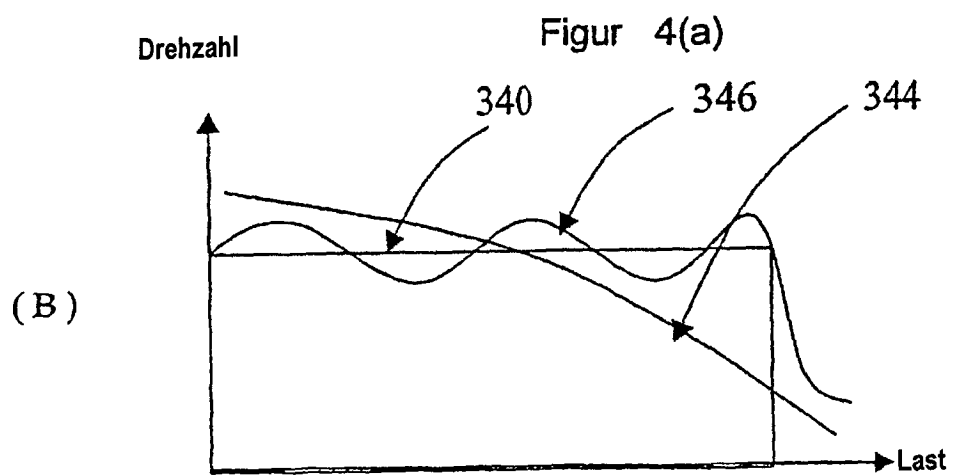
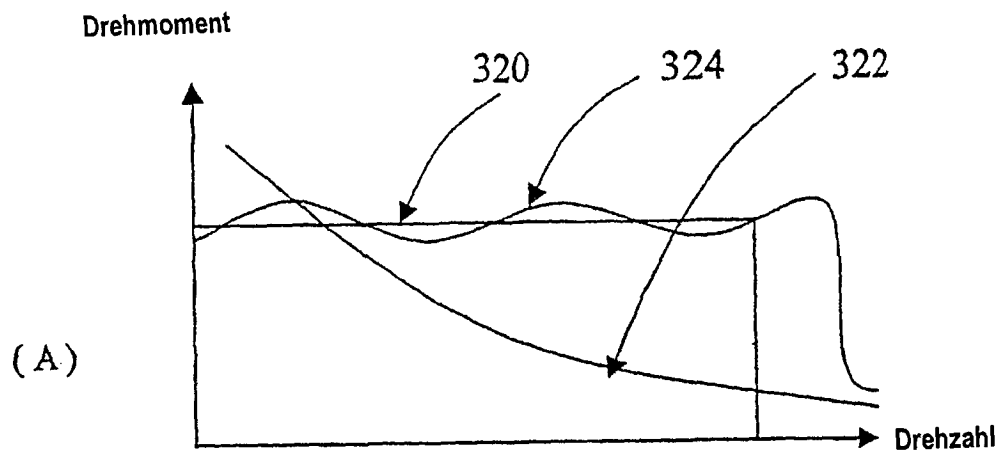
Figur 2(a)

STAND DER TECHNIK

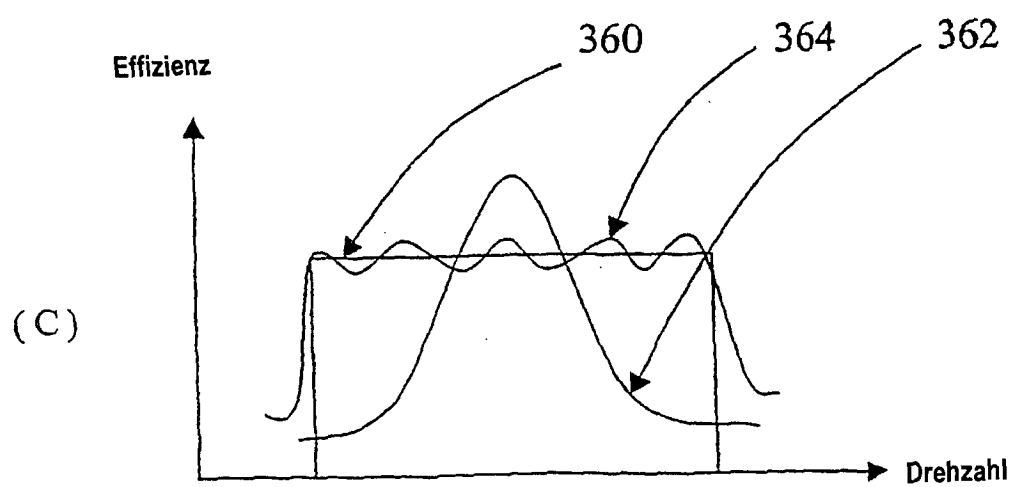


Figur 2(b)

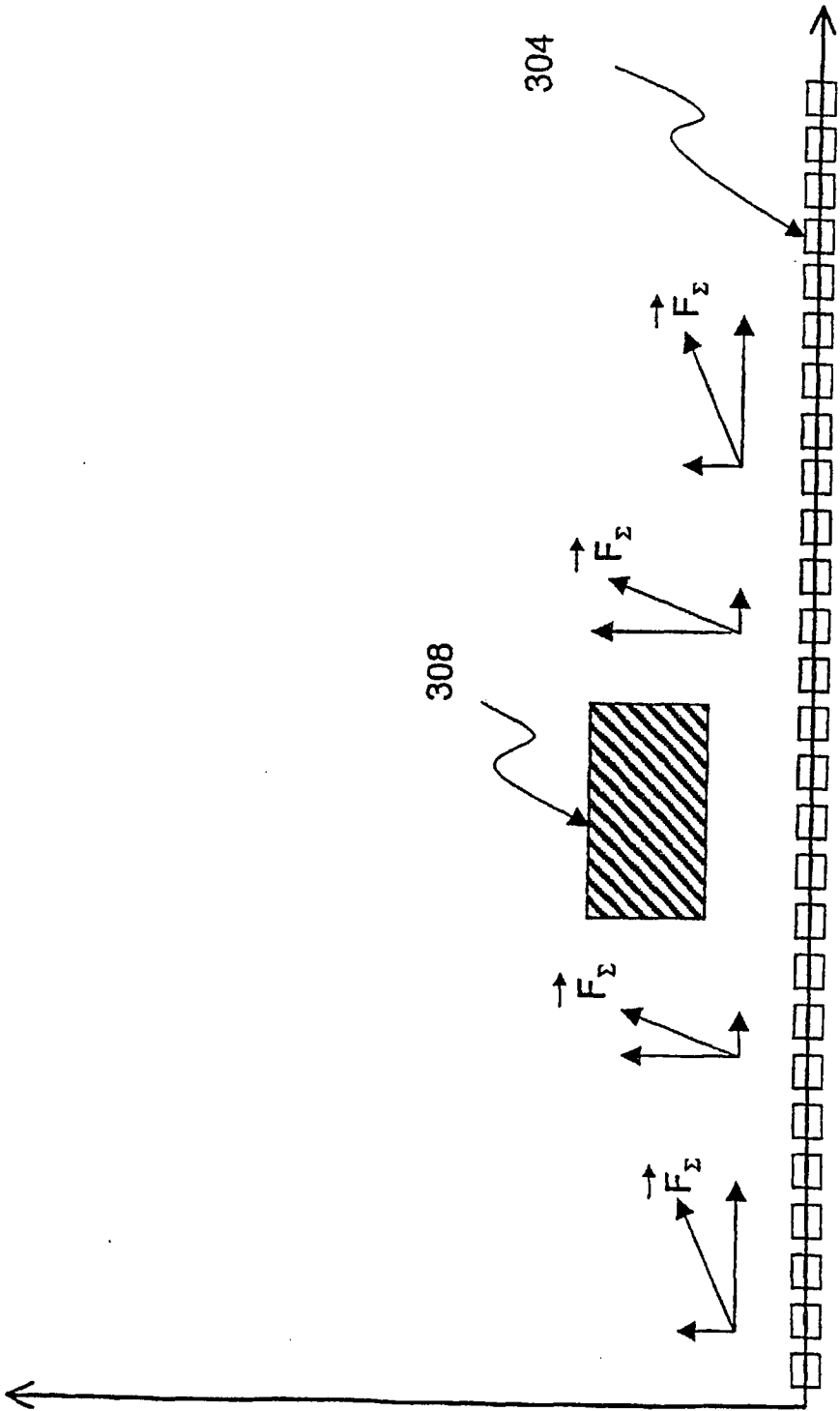




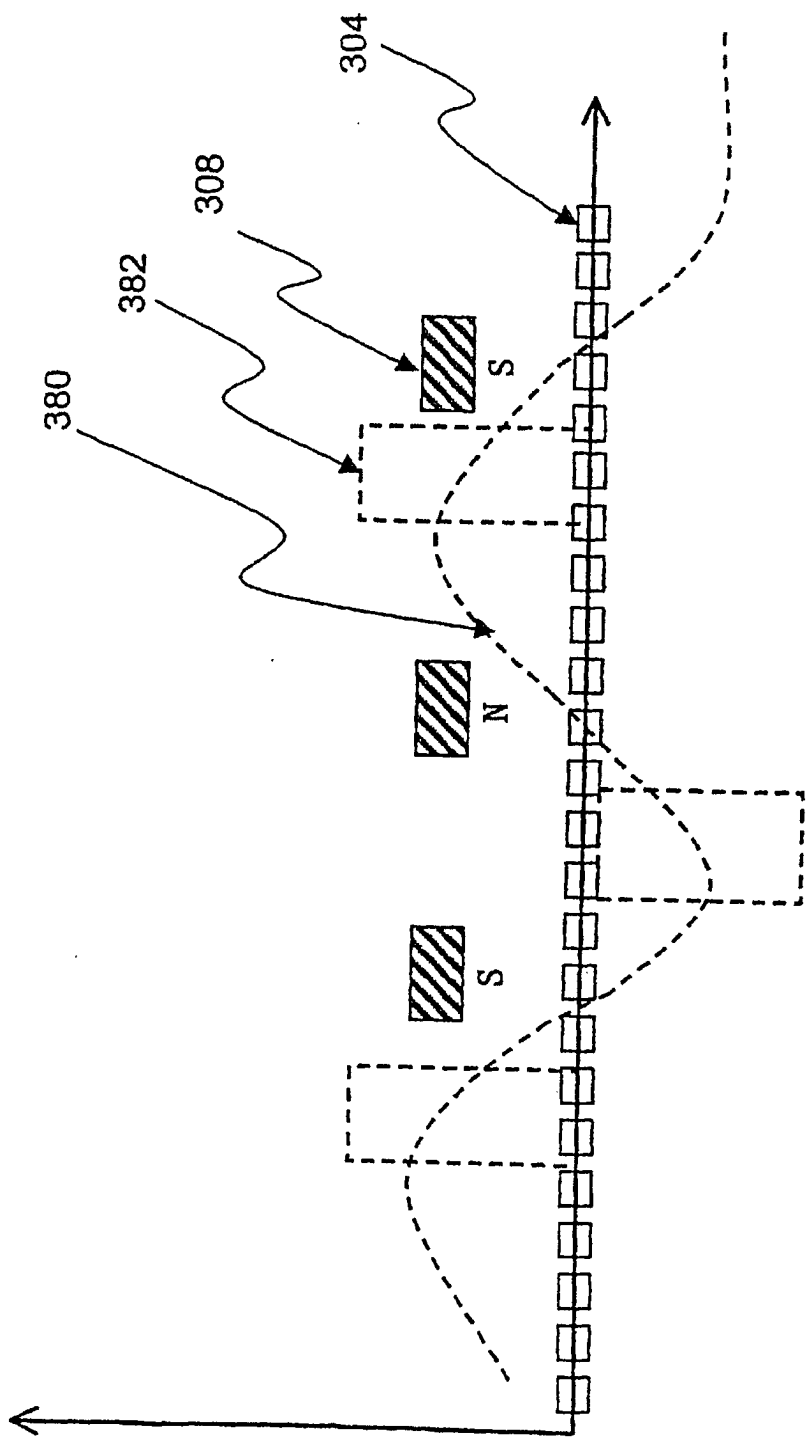
Figur 4(b)



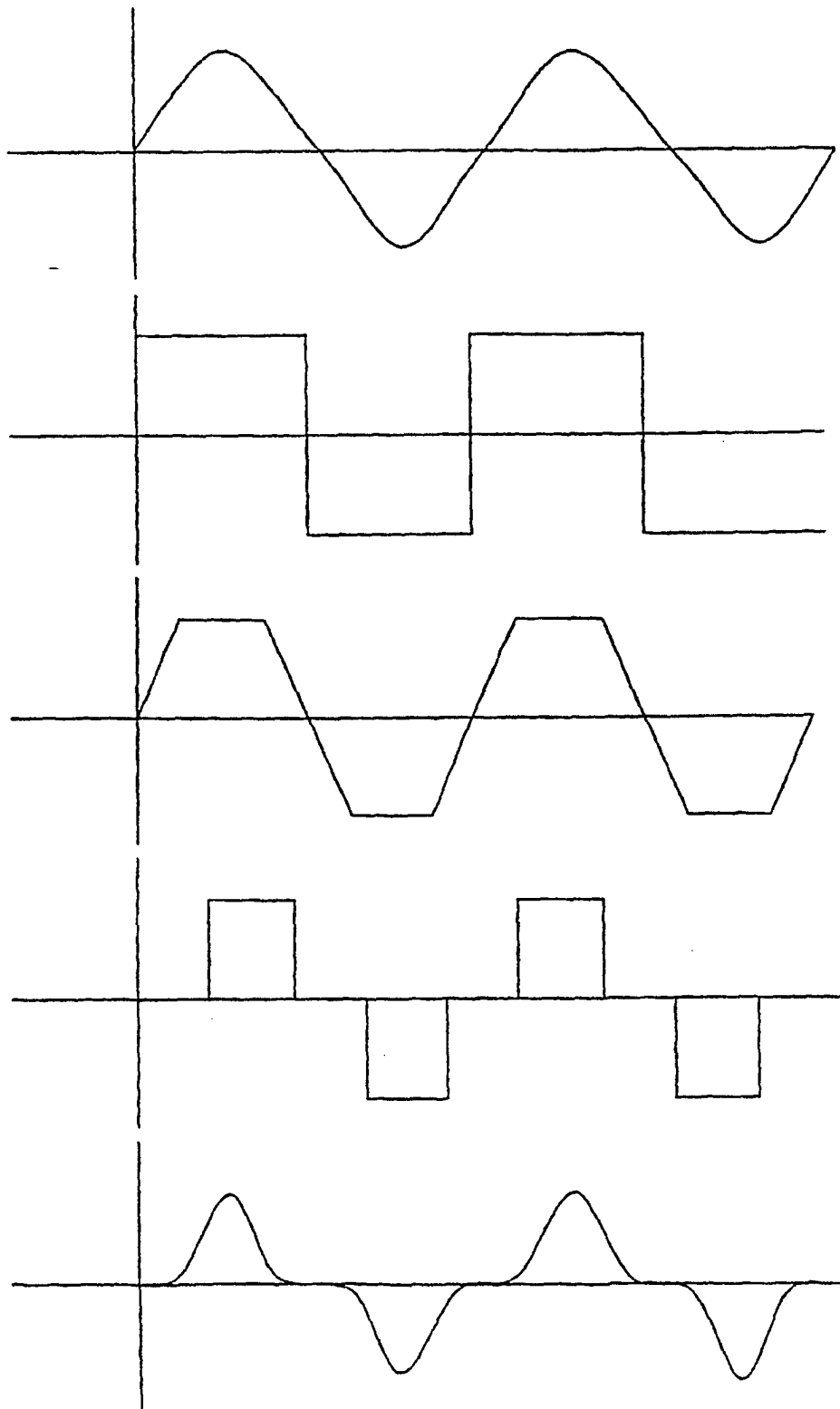
Figur 4(c)



Figur 5



Figur. 6



Figur 7

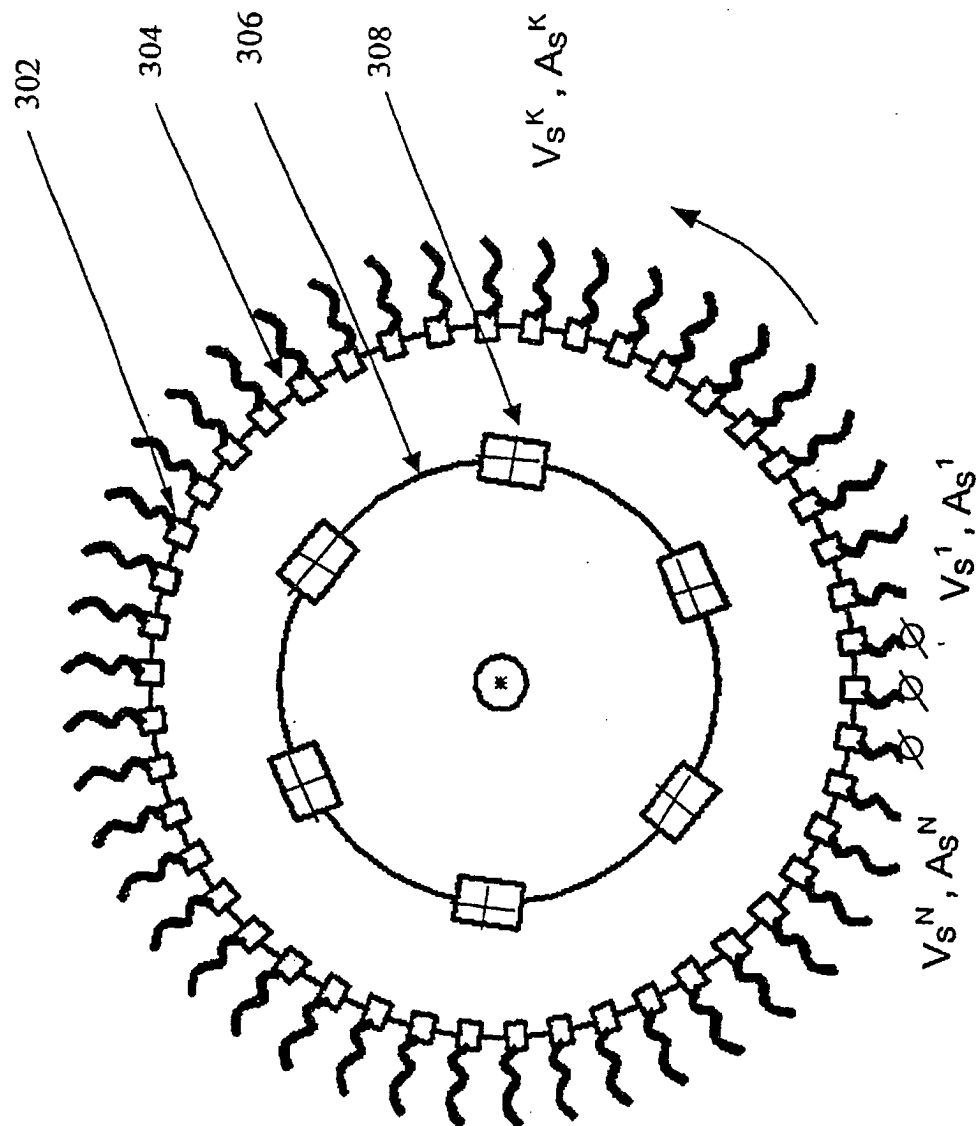
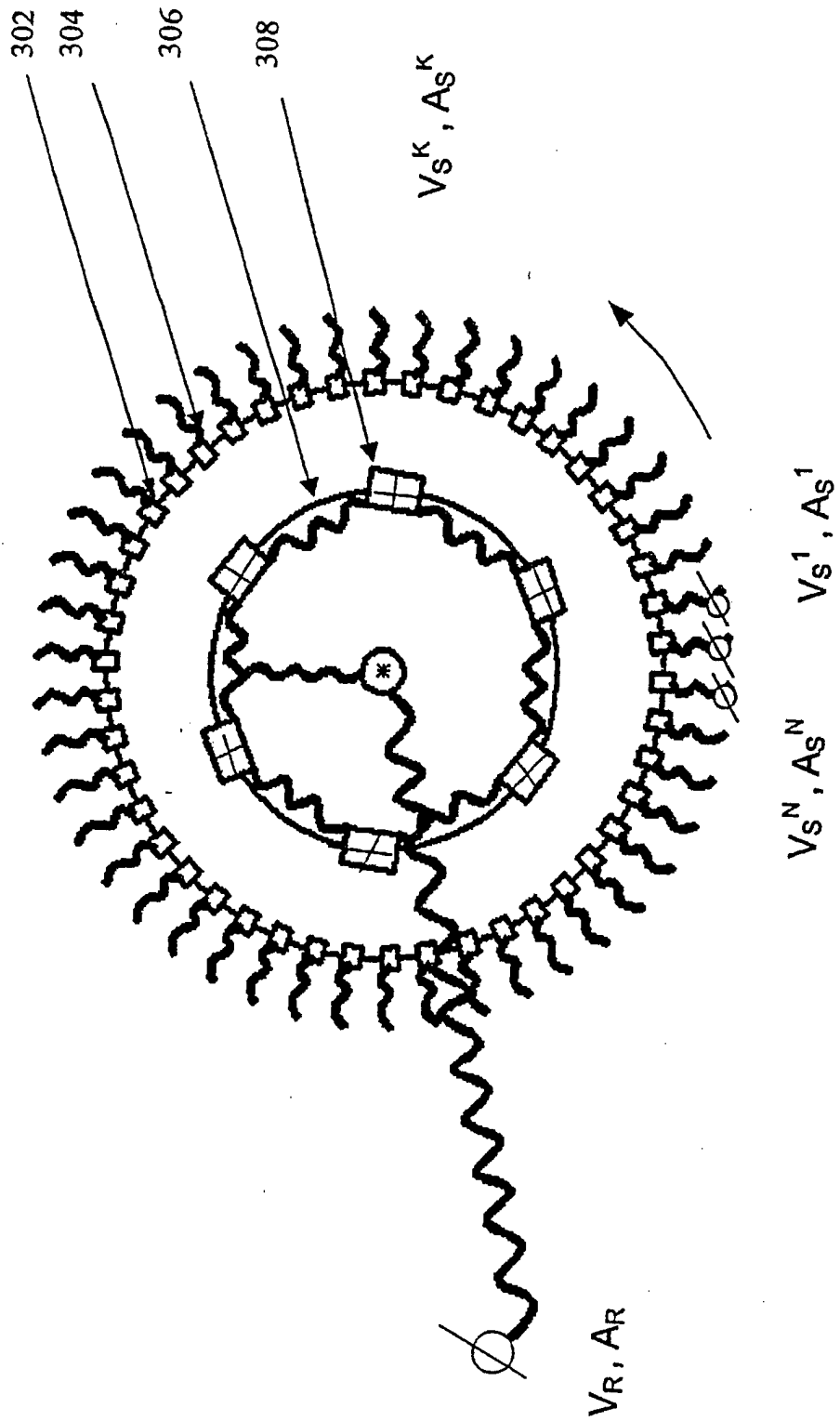


Figure 8



Figur 9

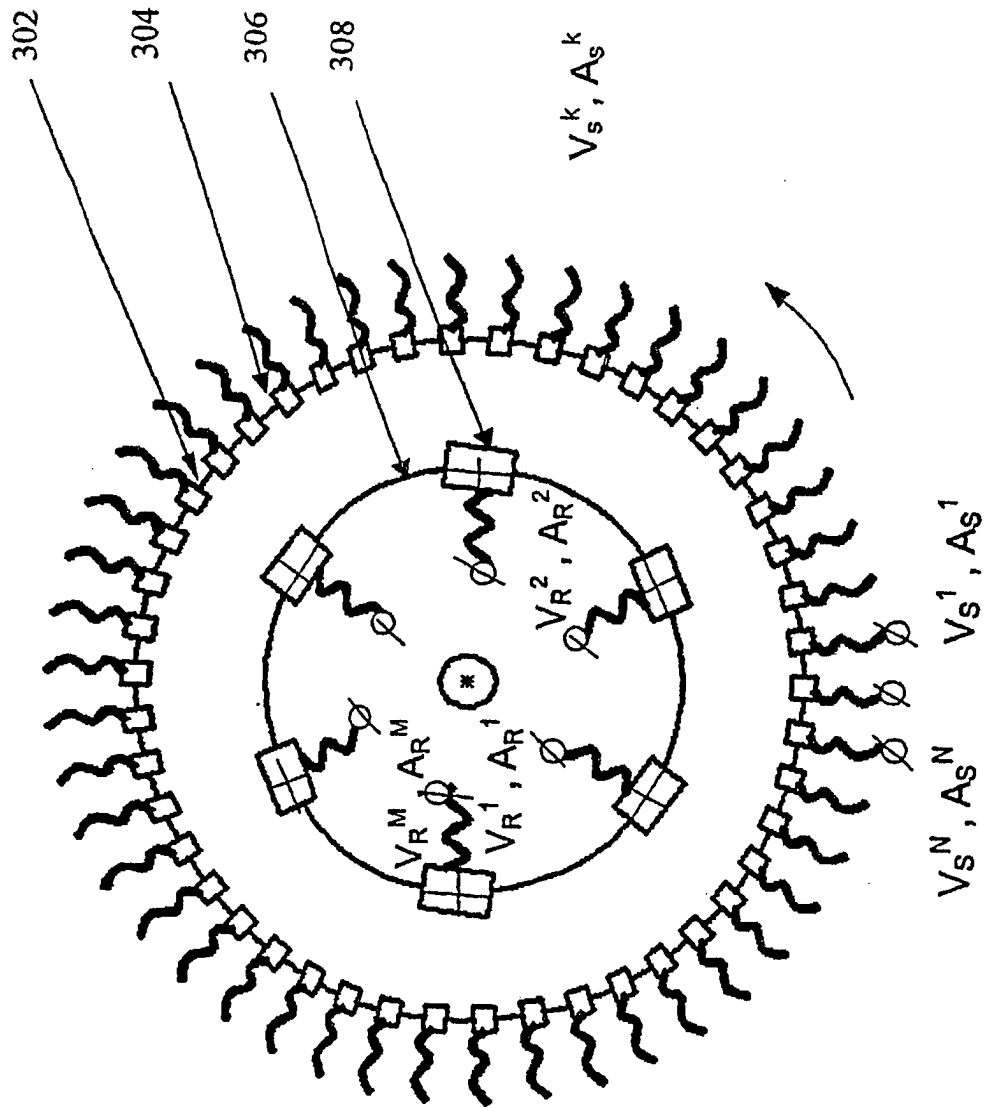
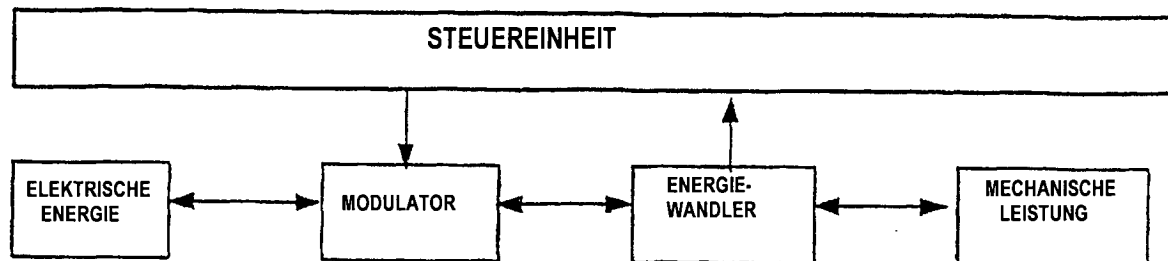
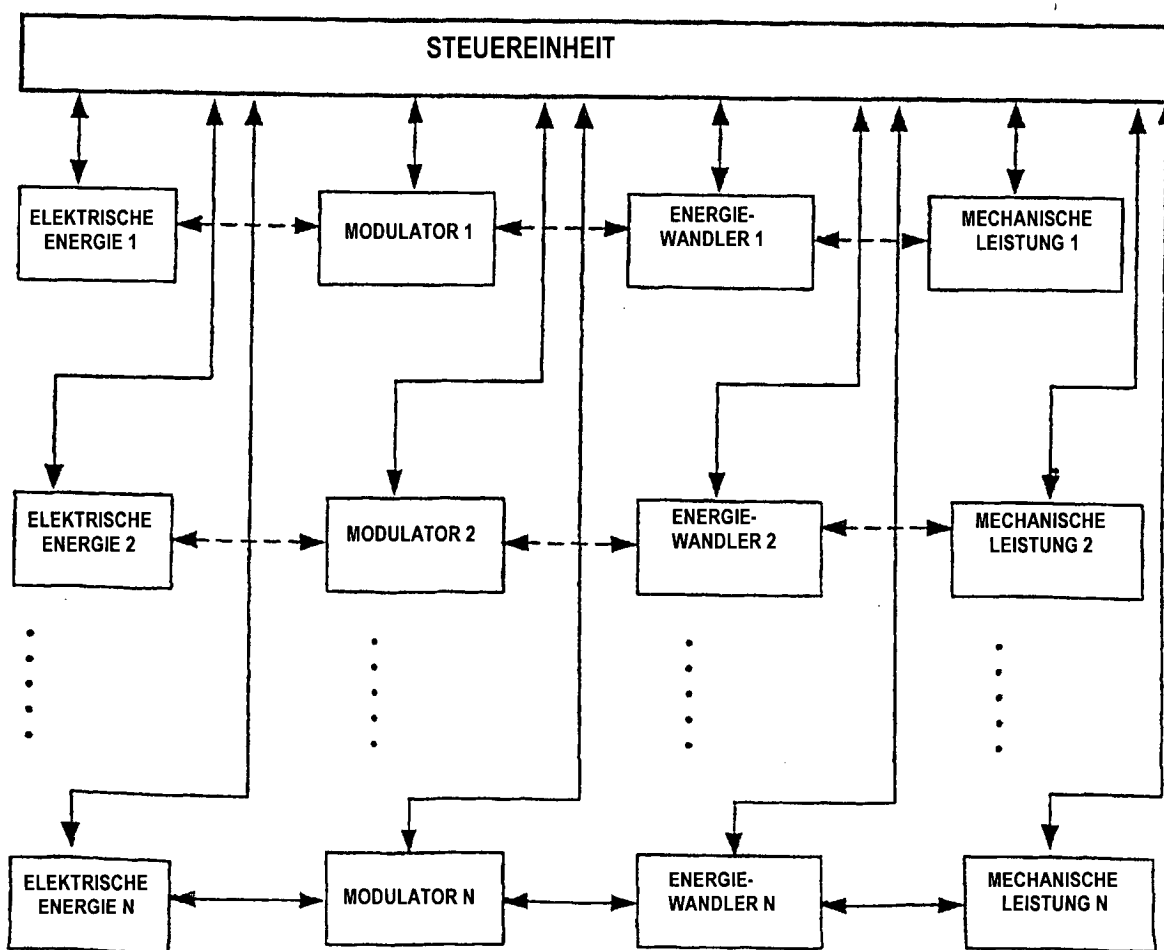


Figure 10

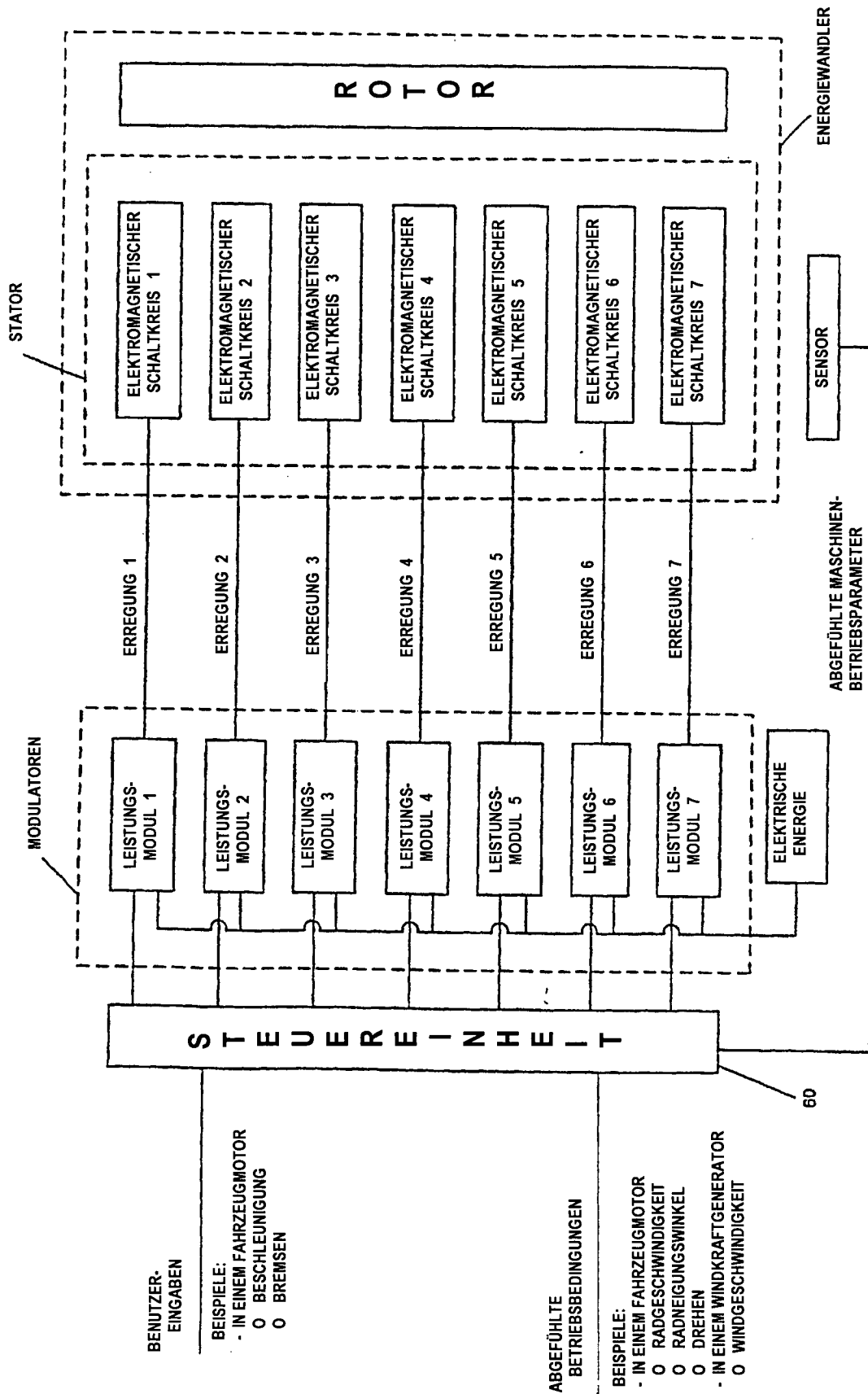
STAND DER TECHNIK



FIGUR 11 (a)



Figur 11 (b)



BEISPIELE:
 - ROTATIONS-
 GESCHWINDIGKEIT DER MASCHINE
 - RELATIVPOSITION DES ROTORS

Figur 12

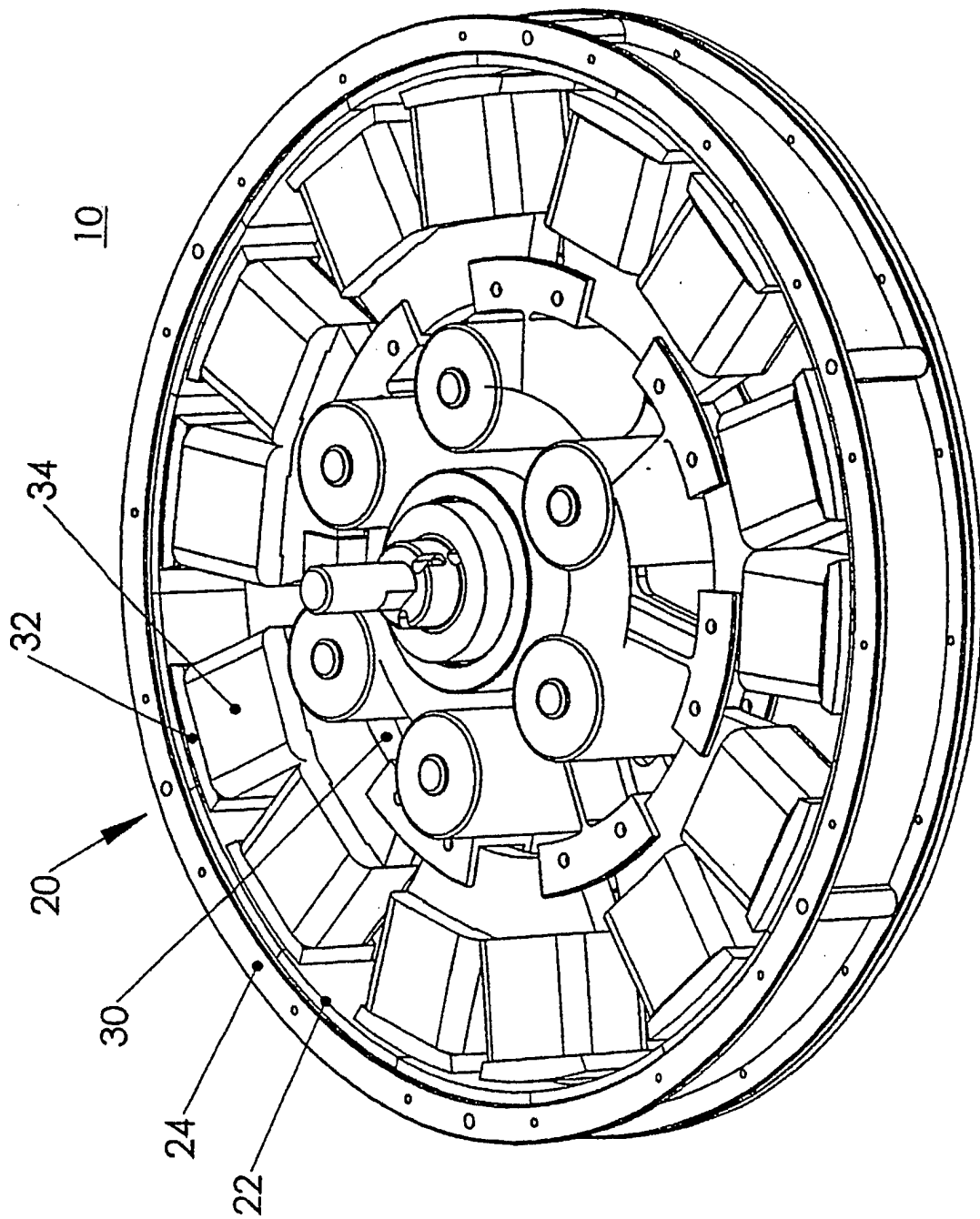
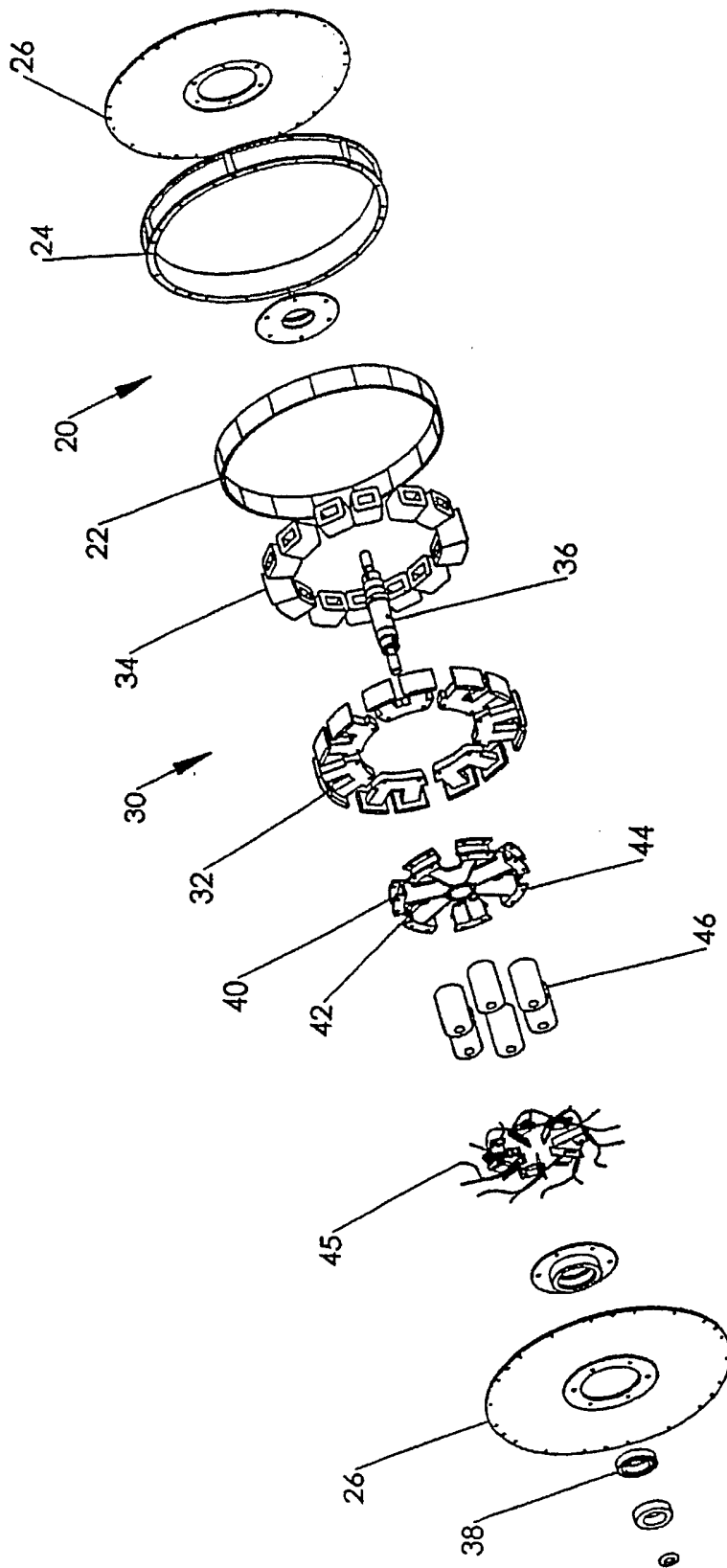
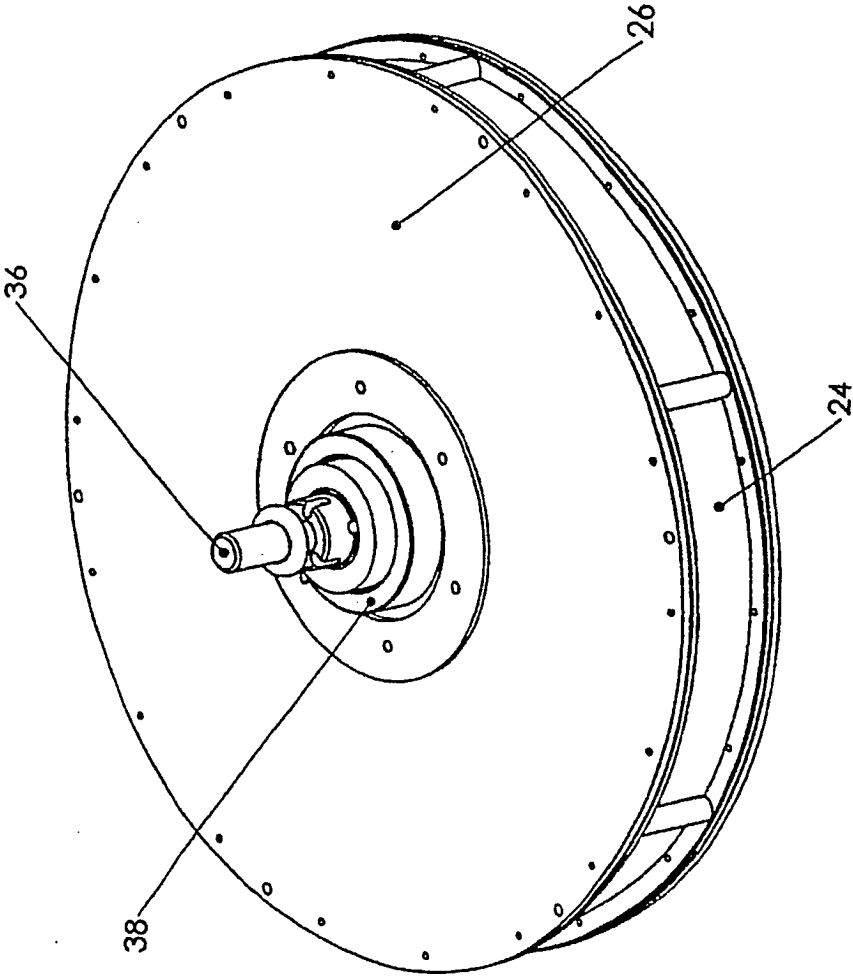


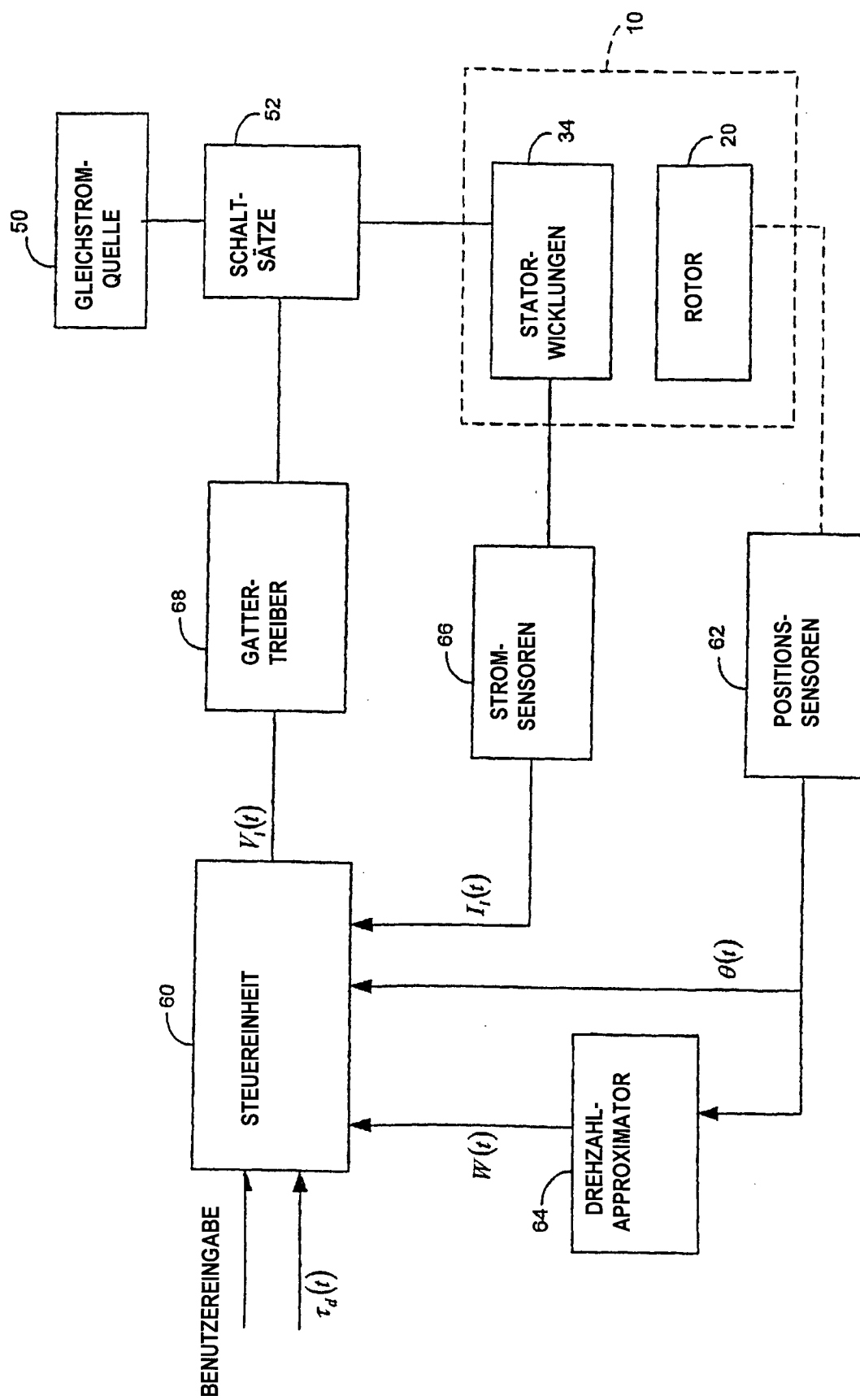
Figure 13



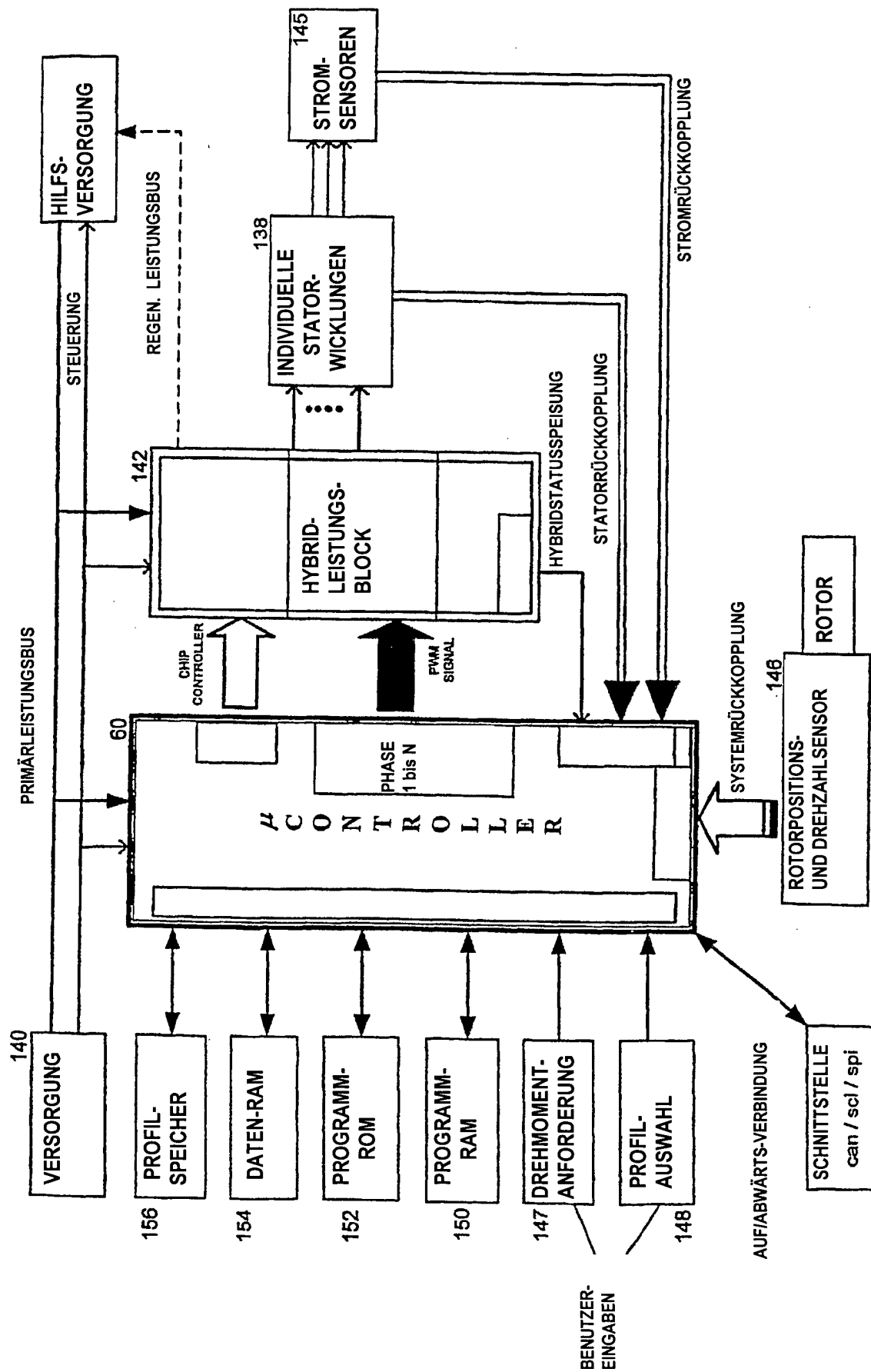
Figur 14



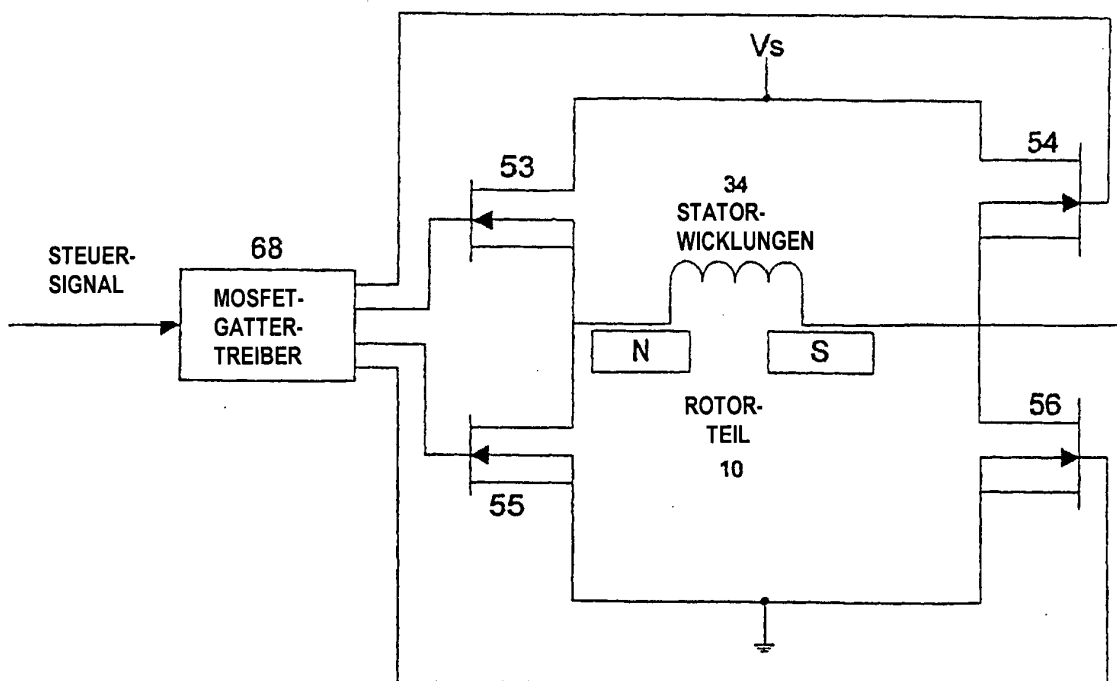
Figur 15



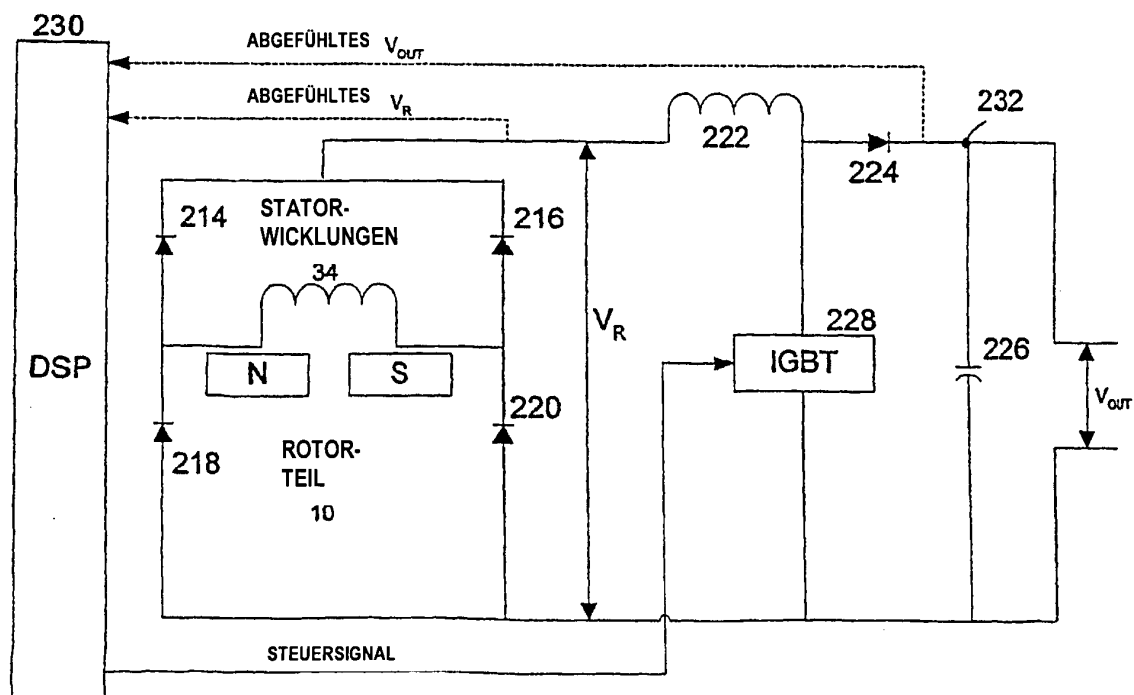
Figur 16



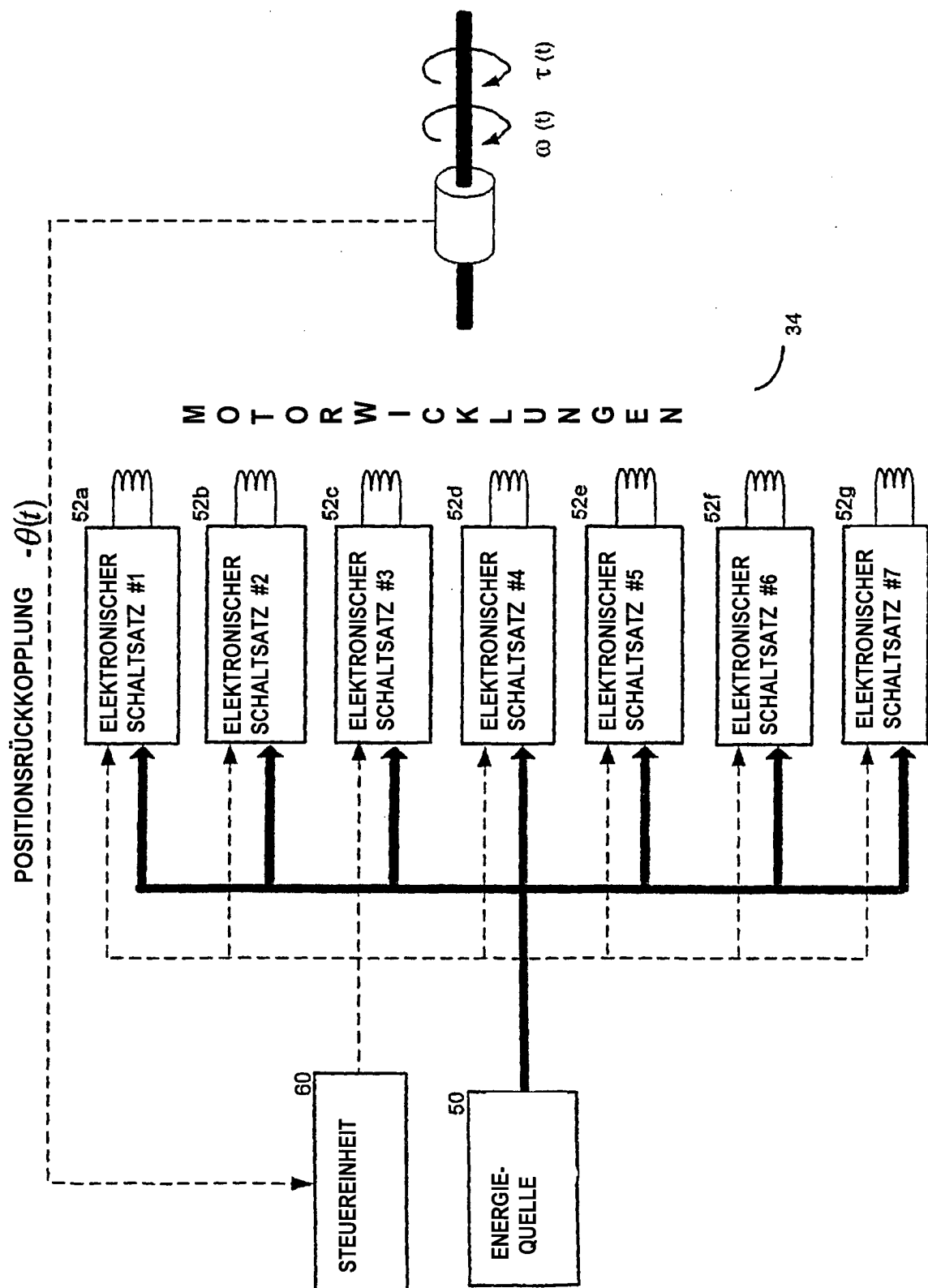
Figur 17



Figur 18(a)

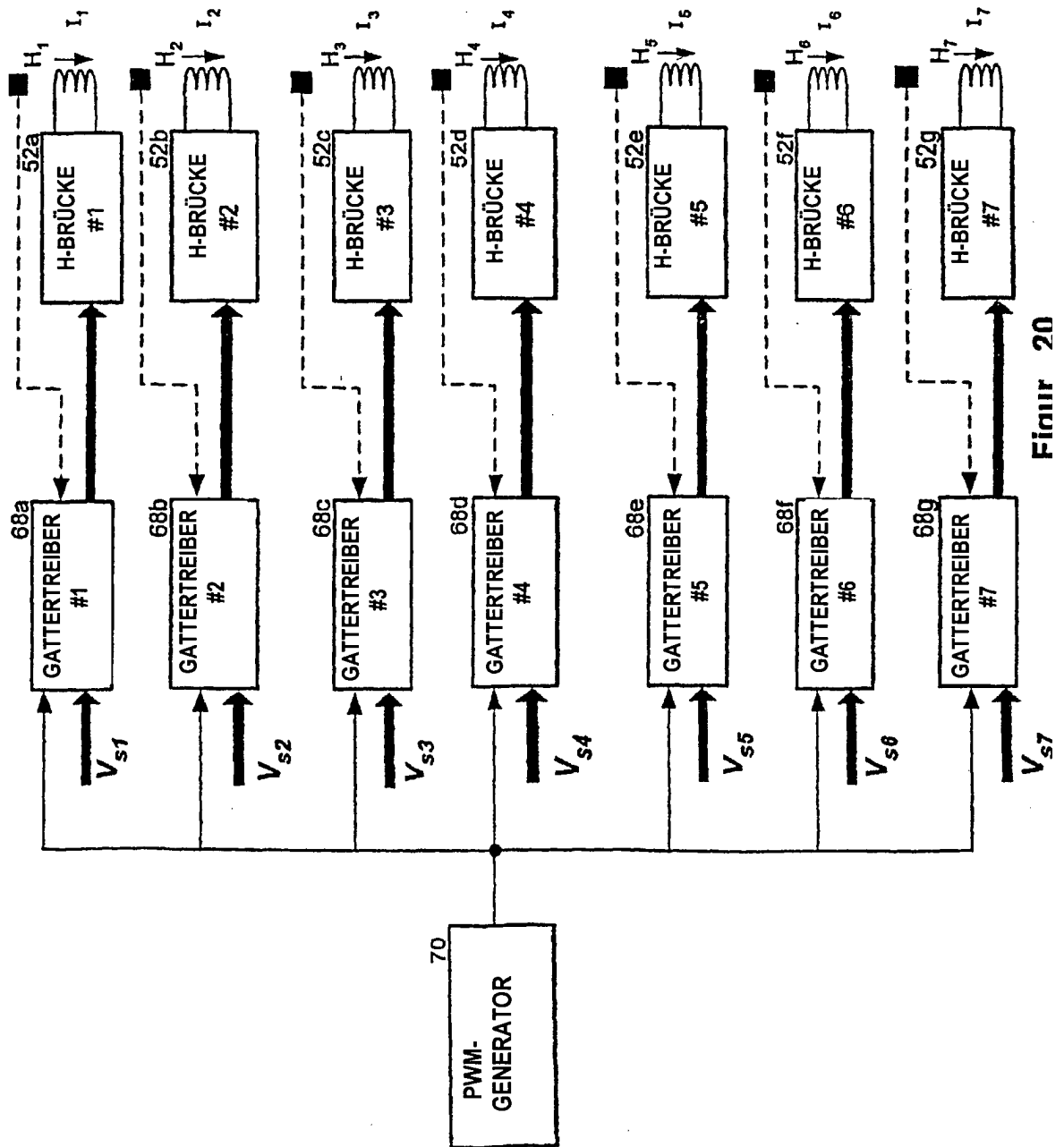


Figur 18(b)



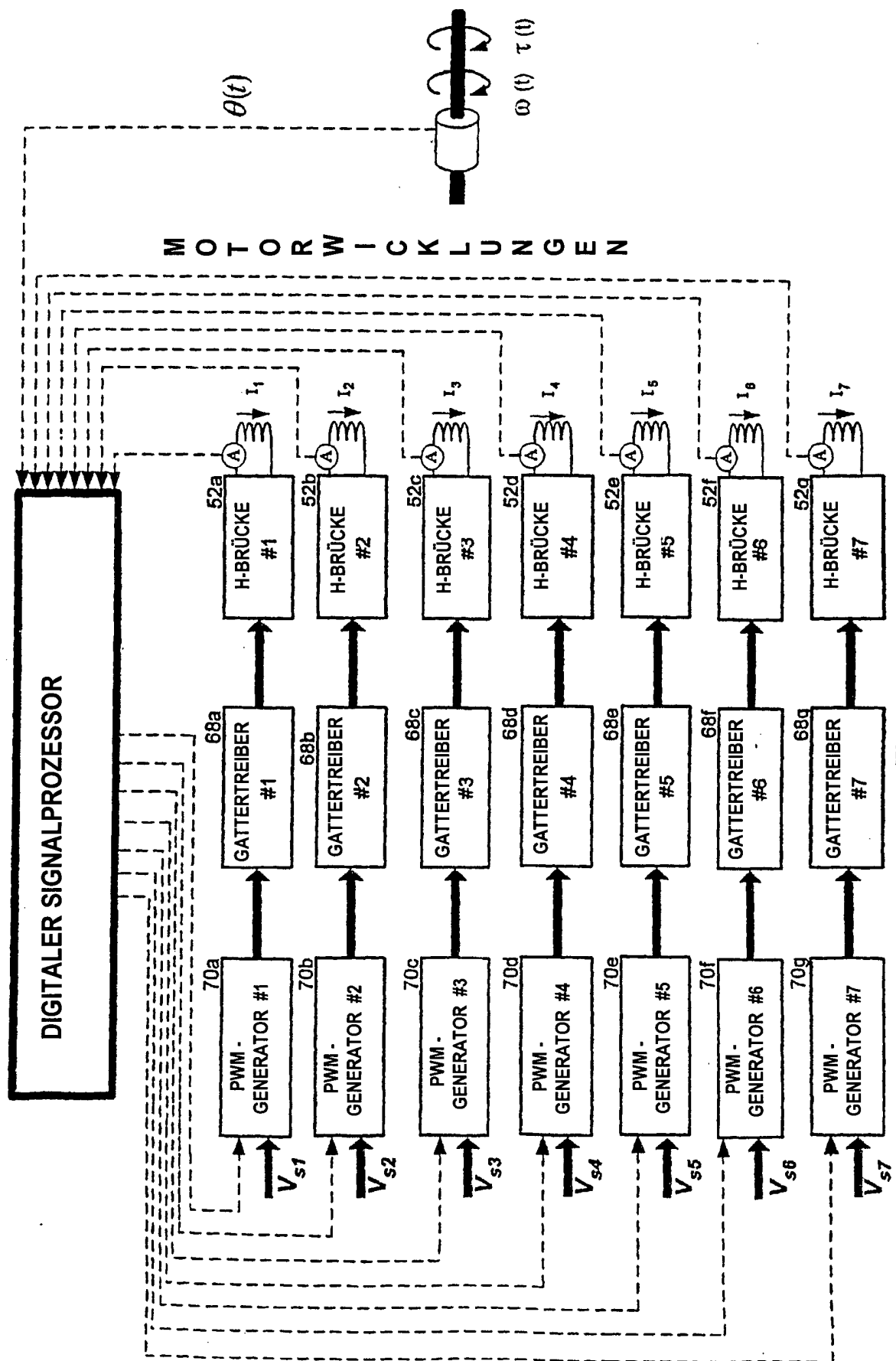
Figur 19

HALL-SENSOR-RÜCKKOPLUNG FÜR GATTERZÜNDUNGSSSEQUENZ



Figur 20

MOTORWICKLUNGEN



Figur 21

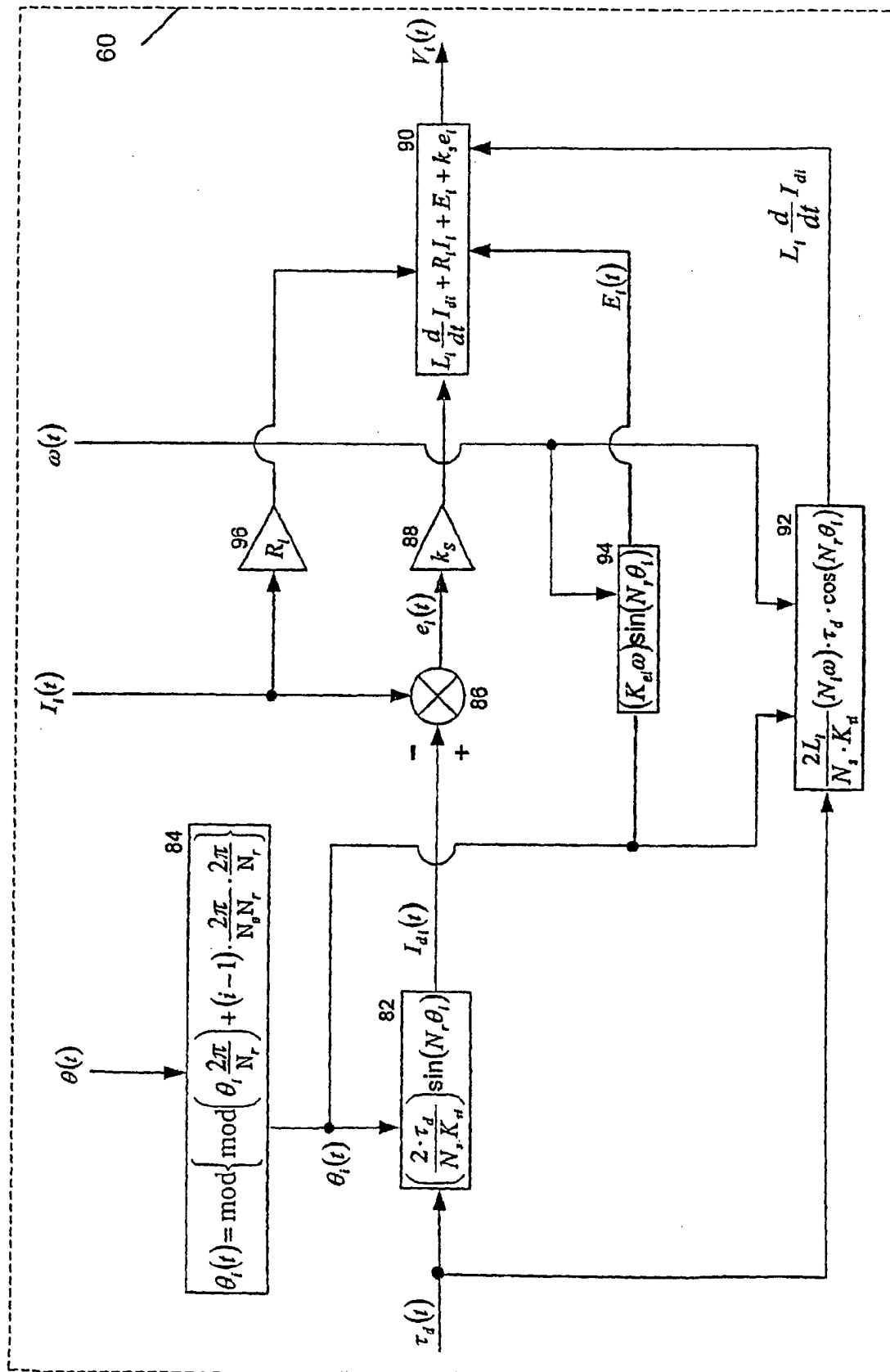
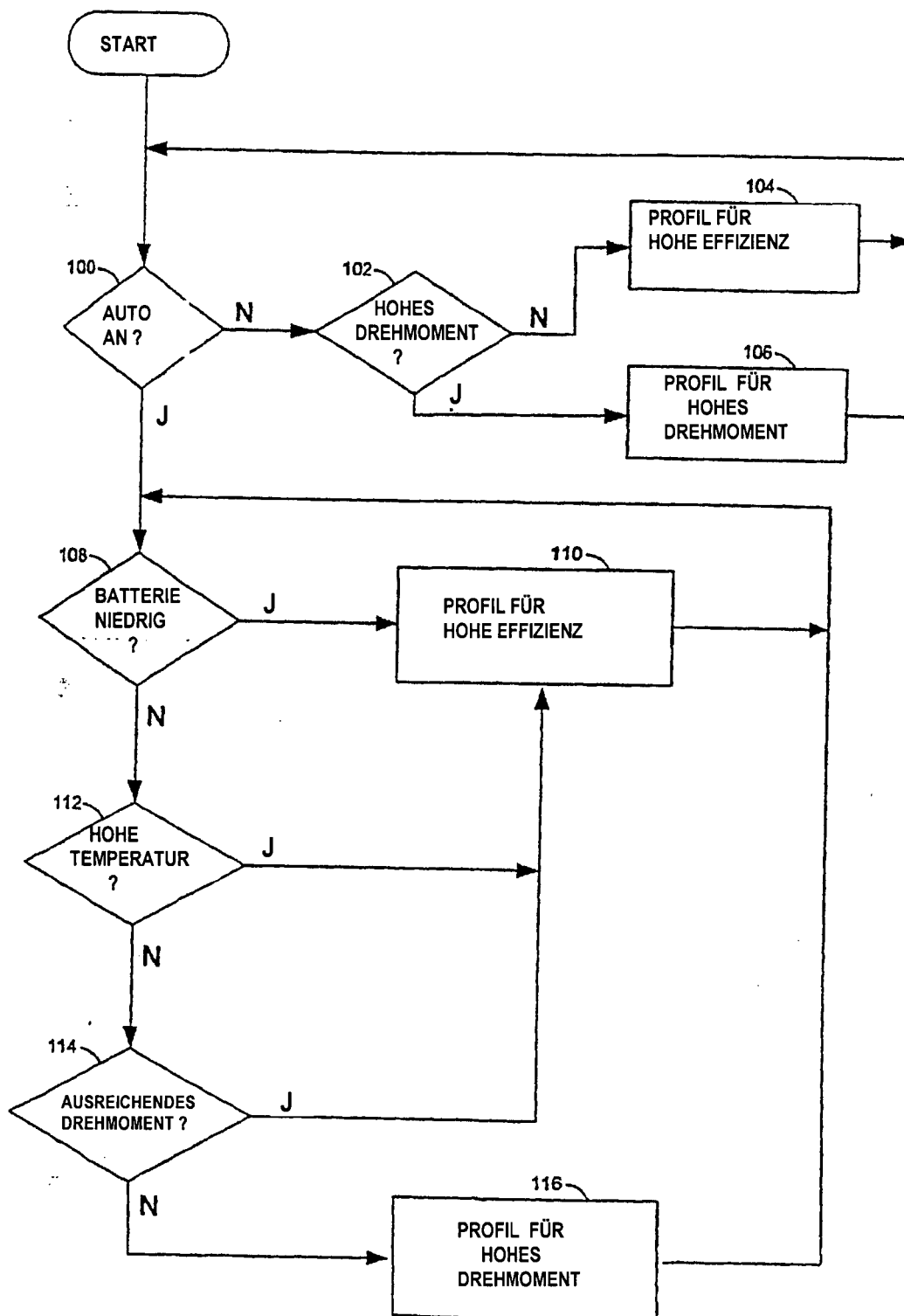
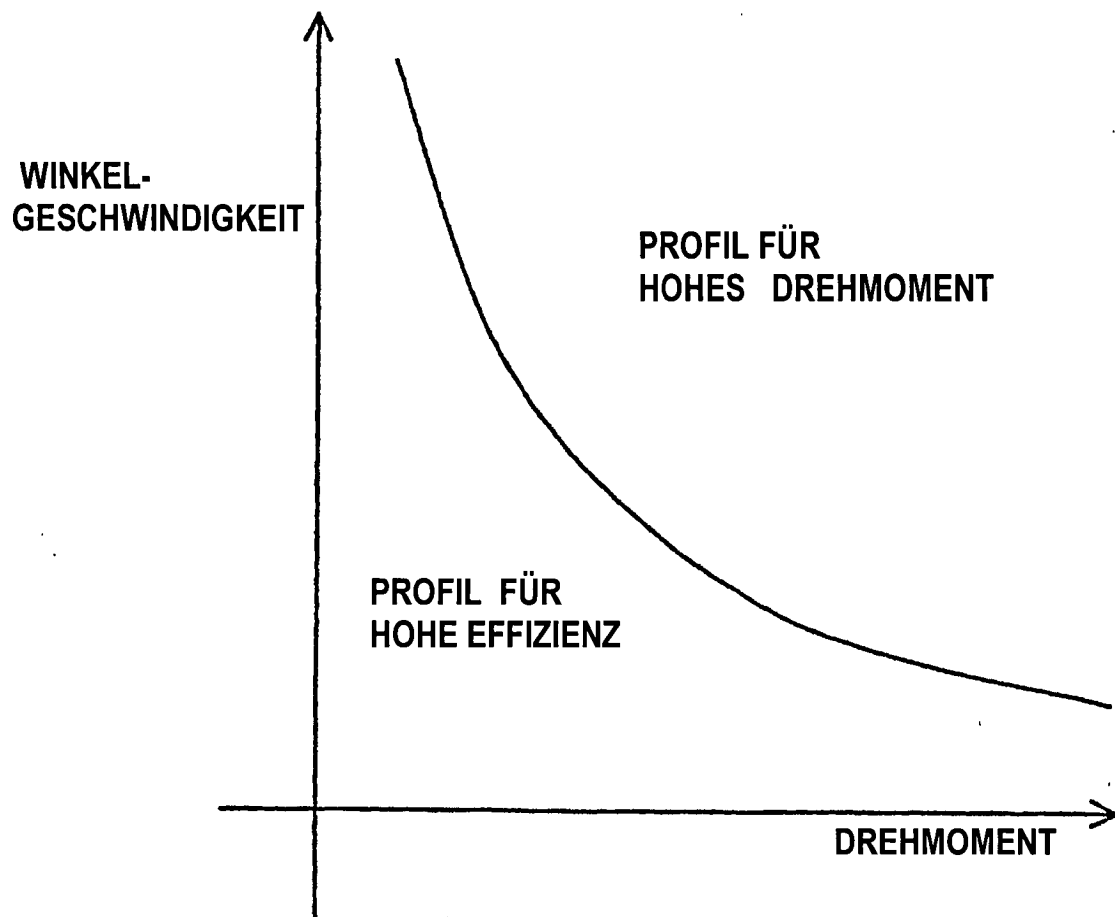


Figure 22



Figur 23



Figur 24

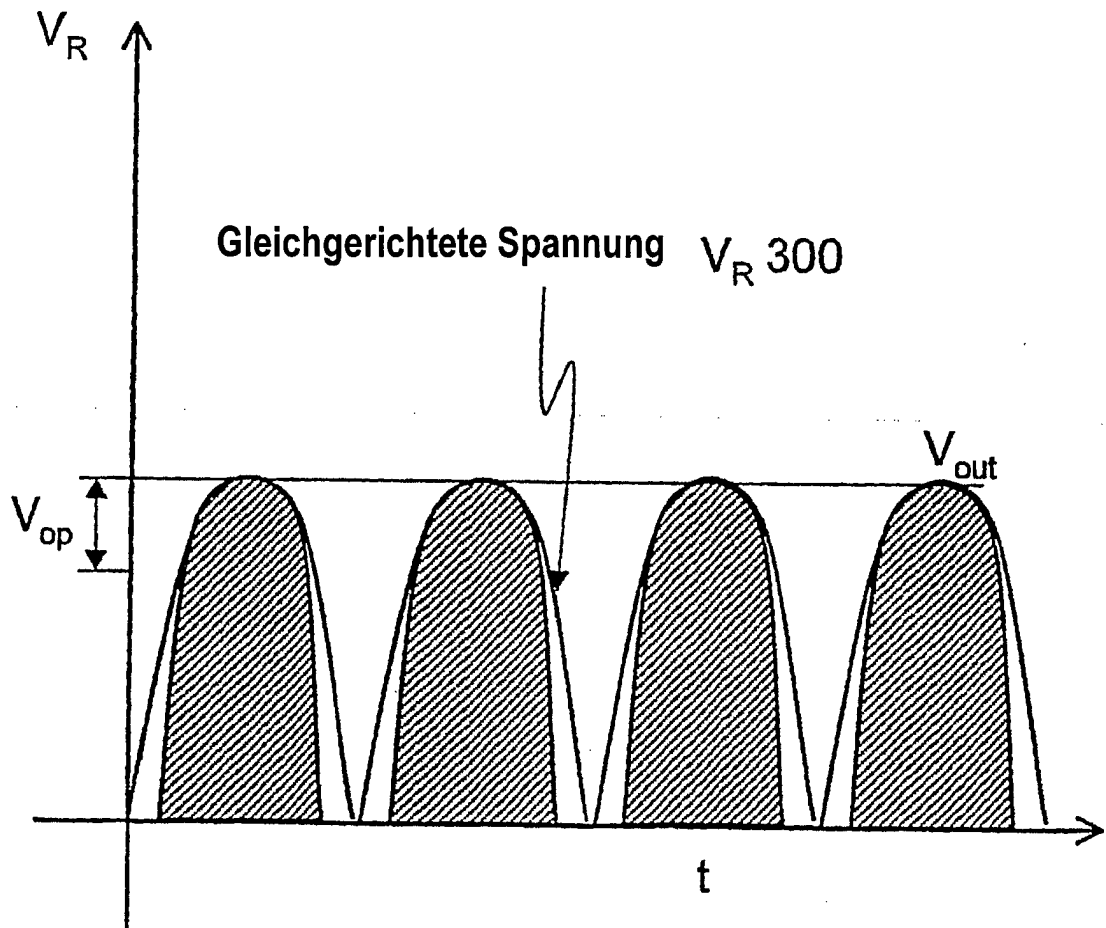


Figure 25