



(10) **DE 10 2017 214 363 A1** 2019.02.21

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 214 363.0**

(22) Anmeldetag: **17.08.2017**

(43) Offenlegungstag: **21.02.2019**

(51) Int Cl.: **G01R 31/34 (2006.01)**
G01R 31/02 (2006.01)

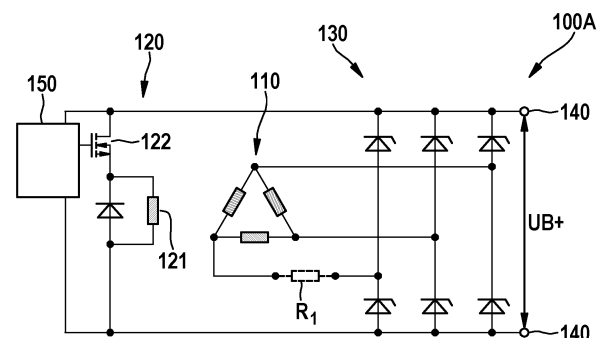
(71) Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Wang, Yi, 74343 Sachsenheim, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands (100A) einer elektrischen Maschine mit einem Rotor (120), einem Stator (110) und einer mit dem Stator (110) verbundene Gleichrichterschaltung (130), wobei ein zeitlicher Verlauf eines Spannungswerts (UB+) der elektrischen Maschine erfasst wird, wobei aus dem erfassten zeitlichen Verlauf des Spannungswerts (UB+) ein Evaluationswert bestimmt wird, wobei der bestimmte Evaluationswert mit einem Referenzwert verglichen wird und wobei in Abhängigkeit von einem Vergleichsergebnisses dieses Vergleichs bewertet wird, ob ein Fehlerzustand (100A) der elektrischen Maschine vorliegt oder nicht.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine sowie eine Recheneinheit und ein Computerprogramm zu dessen Durchführung.

Stand der Technik

[0002] Um Netze bzw. Laststromkreise zu versorgen, können verschiedene Arten von Stromerzeugern verwendet werden. Beispielsweise kann mittels Drehstromgeneratoren ein mehrphasiger Strom erzeugt werden. Zur Speisung von Gleichstromnetzen aus derartigen Drehstromgeneratoren können als Gleichrichter betriebene Umrichter eingesetzt werden, um einen von der Drehstromquelle erzeugten mehrphasigen Strom in Gleichstrom zu wandeln. Die Gleichrichtung kann mittels passiver (Dioden) oder aktiver (Halbleiterschalter) Gleichrichterelemente erfolgen. Bei einem aktiven Gleichrichter ist neben dem Feldregler auch eine entsprechende Ansteuerung Teil des Generatorreglers. Oftmals können Drehstromgeneratoren als elektrische Maschinen realisiert sein, welche generatorisch betrieben werden können, um elektrische Energie zu erzeugen, oder motorisch, um elektrische Energie in mechanische zu wandeln.

[0003] Beispielsweise können derartige Stromerzeuger in Kraftfahrzeugen zur Versorgung eines Kraftfahrzeugbordnetzes verwendet werden. Eine entsprechende elektrische Maschine kann beispielsweise generatorisch betrieben werden, um das Kraftfahrzeugbordnetz zu versorgen oder eine Kraftfahrzeugbatterie zu laden. Zu diesem Zweck kann die elektrische Maschine über sog. Endstufen bzw. Endstufenschaltung mit dem Bordnetz verbunden oder von diesem getrennt werden.

Offenbarung der Erfindung

[0004] Erfindungsgemäß werden ein Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands einer elektrischen Maschine sowie eine Recheneinheit und ein Computerprogramm zu dessen Durchführung mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche vorgeschlagen. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung.

[0005] Die elektrische Maschine kann insbesondere als ein Generator ausgebildet sein, z.B. als Klauenpolgenerator, und/oder insbesondere als eine elektrische Maschine, welche motorisch oder generatorisch betrieben werden kann. Die elektrische Maschine weist insbesondere einen Rotor und einen Stator auf sowie eine mit dem Stator verbundene Gleichrichterschaltung zum Gleichrichten einer an dem Stator anliegenden Wechselspannung. Die

Gleichrichterschaltung kann insbesondere Brückenschaltungen aus passiven Schaltelemente, insbesondere Dioden, oder aus aktiven Schaltelementen, insbesondere Halbleiterschalter wie Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET), aufweisen.

[0006] Durch die Erfindung wird eine Möglichkeit bereitgestellt, auf einfache Weise unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine und deren Stärke zu erkennen.

[0007] Im Rahmen des Verfahrens wird ein zeitlicher Verlauf eines Spannungswerts der elektrischen Maschine erfasst, insbesondere eines Spannungswerts einer von der elektrischen Maschine bereitgestellten Gleichspannung, insbesondere der gleichgerichteten Generatorspannung. Aus dem erfassten zeitlichen Verlauf des Spannungswerts wird ein Evaluationswert bestimmt. Der bestimmte Evaluationswert wird mit einem Referenzwert verglichen und in Abhängigkeit von einem Vergleichsergebnis dieses Vergleichs wird bewertet, ob ein Fehlerzustand der elektrischen Maschine vorliegt oder nicht.

[0008] Insbesondere ist dieser Referenzwert ein theoretischer Wert, der eine fehlerfreie elektrische Maschine beschreibt. Durch den Vergleich von Referenz- und Evaluationswert können insbesondere unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine erkannt werden. Für die Fehlererkennung wird somit insbesondere nur ein Signal benötigt, nämlich der zeitliche Spannungsverlauf, welcher insbesondere auf konstruktiv einfache Weise messtechnisch erfasst werden kann und insbesondere im Zuge des regulären Betriebs der elektrischen Maschine ohnehin erfasst wird. Zweckmäßigerweise wird somit keine zusätzliche Hardware beispielsweise in der Form von zusätzlichen Messgeräten benötigt.

[0009] Bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine weist der entsprechende Spannungsverlauf insbesondere charakteristische Eigenschaften auf. Der Evaluationswert besitzt dabei einen charakteristischen Wert, welcher insbesondere dem Referenzwert entspricht. Bei Fehlerzuständen der elektrischen Maschine verändern sich die Eigenschaften des Spannungsverlaufs. Je nach vorliegendem Fehlerzustand verändern sich die Eigenschaften auf eine unterschiedliche Art und Weise und somit auch insbesondere der Evaluationswert. Durch Auswerten des Spannungsverlaufs bzw. des Evaluationswerts kann somit auf einen vorliegenden Fehlerzustand rückgeschlossen werden. Insbesondere ist die Fehlererkennung unabhängig von einer Drehzahl und Belastung der elektrischen Maschine, ein Fehlerzustand kann also bei beliebiger Drehzahl und Belastung zuverlässig erkannt werden.

[0010] Vorteilhafterweise wird ein statistischer Wert des zeitlichen Verlaufs des Spannungswerts als der

Evaluationswert bestimmt. Bevorzugt werden eine Standardabweichung und/oder eine Varianz eines aus dem zeitlichen Verlauf des Spannungswerts bestimmaren wiederkehrenden Merkmals als der Evaluationswert bestimmt.

[0011] Bei fehlerfreiem Betrieb der elektrischen Maschine besitzt der zeitliche Spannungsverlauf insbesondere eine charakteristische, sich periodisch wiederholende Form. Ein statistischer Wert des bestimmaren wiederkehrenden Merkmals, insbesondere eine Standardabweichung bzw. Varianz, ist somit bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine insbesondere vergleichsweise gering und wird zweckmäßigerweise als Referenzwert verwendet.

[0012] Bei einem Fehlerzustand der elektrischen Maschine weicht der Spannungsverlauf von dieser charakteristischen Form ab. Bei einem Fehlerzustand ist der statistische Wert des bestimmaren wiederkehrenden Merkmals des Spannungsverlaufs, insbesondere die Standardabweichung bzw. Varianz, somit zweckmäßigerweise größer als im fehlerfreien Fall. In Abhängigkeit von dem statistischen Wert, insbesondere der Standardabweichung bzw. Varianz kann somit auf einfache und zuverlässige Weise auf einen Fehlerzustand rückgeschlossen werden.

[0013] Da die Fehlererkennung somit auf Statistik basiert, ist die Genauigkeit der Fehlererkennung insbesondere abhängig von der Menge der Messdaten. Je mehr Messdaten berücksichtigt werden, desto genauer die Ergebnisse. Vorzugsweise umfasst die Menge der Messdaten mindestens 90 Ausführungen des bestimmaren wiederkehrenden Merkmals, insbesondere mindestens 100. Zweckmäßigerweise wird der Spannungsverlauf daher für eine Zeitdauer von zwischen 90 ms und 150 ms erfasst, besonders bevorzugt für eine Zeitdauer von genau 100 ms oder zumindest im Wesentlichen 100 ms, bei einer Abtast-rate von beispielsweise 10kHz.

[0014] Insbesondere ist die Anzahl der bestimmten Ausführungen des wiederkehrenden Merkmals abhängig von der Zeitdauer und einer aktuellen Drehzahl der elektrischen Maschine. Beispielsweise können bei einer Drehzahl von 3000 rpm über eine Zeitdauer von 100 ms 180 Ausführungen des Merkmals bestimmt werden. Bei einer Drehzahl von 1800 rpm können über eine Zeitdauer von 100 ms beispielsweise 108 Ausführungen bestimmt werden.

[0015] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden in dem zeitlichen Verlauf des Spannungswerts Positionen von lokalen Extrema als das bestimmare wiederkehrende Merkmal bestimmt bzw. erkannt, insbesondere von lokalen Peaks des Spannungsverlaufs. Als Position sei insbesondere ihre zeitliche Position oder ihr zeitlicher Abstand voneinander oder ihre Winkelposition oder

ihr Winkelabstand voneinander verstanden. Aus diesen Positionen der erkannten lokalen Extrema wird vorteilhafterweise der Evaluationswert bestimmt. Insbesondere besitzt der zeitliche Verlauf des Spannungswerts bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine in jeder Periode ein lokales Extremum bzw. einen lokalen Peak an insbesondere der gleichen oder zumindest im Wesentlichen gleichen Position. Insbesondere entspricht dieser lokale Peak einem Maximalwert einer Halbwelle in dieser Anwendung. Bei einem Fehlerzustand verändert sich die Form des Spannungsverlaufs insbesondere je nach vorliegendem Fehler und der Stärke des Fehlers. Insbesondere verändert sich dabei die Verteilung der lokalen Extrema bzw. der lokalen Peaks. Bei einer Veränderung der Verteilung der lokalen Extrema im Vergleich zum fehlerfreien Fall kann somit ein vorliegender Fehlerzustand erkannt werden. Der Evaluationswert beschreibt daher zweckmäßigerweise die Positionen der erkannten lokalen Extrema des Spannungsverlaufs, insbesondere deren Verteilung.

[0016] Vorteilhafterweise wird ein statistischer Wert der Positionen der erkannten lokalen Extrema als der Evaluationswert bestimmt, besonders bevorzugt eine Standardabweichung und/oder eine Varianz. Bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine sollten die Positionen der lokalen Extrema eine Normalverteilung mit kleiner Standardabweichung besitzen. Bei einem vorliegenden Fehlerzustand weist die Verteilung der lokalen Extrema eine größere Standardabweichung auf. Daher beschreibt der Evaluationswert zweckmäßigerweise diese Standardabweichung bzw. die Standardabweichung wird vorzugsweise selbst als der Evaluationswert bestimmt.

[0017] Der Referenzwert wird vorzugsweise aus einem Referenzverlauf des Spannungswerts bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine bestimmt. Dieser Referenzverlauf kann während eines fehlerfreien Betriebs der elektrischen Maschine, beispielsweise im Zuge eines Herstellungsprozesses, messtechnisch erfasst oder im Zuge eines theoretischen Modells der elektrischen Maschine rechnerisch bestimmt werden und beispielsweise in einem Steuergerät zur Ansteuerung der elektrischen Maschine hinterlegt werden.

[0018] Vorzugsweise wird der Referenzwert als ein statistischer Wert, besonders bevorzugt als eine Standardabweichung und/oder Varianz, desselben bestimmaren Merkmals, d.h. insbesondere der Positionen von lokalen Extrema, des Referenzverlaufs des Spannungswerts bestimmt. Analog zu obiger Erläuterung unterscheidet sich dieser Referenzwert von entsprechenden Werten bei einer fehlerbehafteten elektrischen Maschine.

[0019] Vorzugsweise wird im Zuge des Vergleichs des Evaluationswerts und des Referenzwerts ein

Schwellwertvergleich durchgeführt, wobei der Referenzwert zweckmäßigerweise als Schwellwert verwendet wird. Vorzugsweise wird dabei überprüft, ob der Evaluationswert den Referenzwert überschreitet. Wenn der Evaluationswert den Referenzwert nicht überschreitet, wird insbesondere erkannt, dass kein Fehlerzustand der elektrischen Maschine vorliegt. Überschreitet der Evaluationswert den Referenzwert hingegen, wird insbesondere erkannt, dass ein Fehlerzustand der elektrischen Maschine vorliegt. Beispielsweise lässt eine über der Referenz-Varianz liegende Evaluations-Varianz auf einen Fehler schließen.

[0020] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird im Zuge des Vergleichs des Evaluationswerts und des Referenzwerts eine Abweichung des Evaluationswerts von dem Referenzwert bestimmt. In Abhängigkeit von dieser Abweichung wird vorzugsweise eine Stärke eines vorliegenden Fehlers bewertet.

[0021] Vorteilhafterweise wird in Abhängigkeit von dem Vergleichsergebnis bewertet, ob als Fehlerzustand der elektrischen Maschine einer oder mehrere der folgenden Zustände vorliegen:

- eine Unterbrechung in einer Phase, wobei ein erhöhter Widerstand zwischen einem Phasenanschluss des Stators und der Gleichrichterschaltung, insbesondere einem Mittelabgriff einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung, vorliegt;
- ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen der elektrischen Maschine, wobei ein verringerter, insbesondere verschwindender Widerstand zwischen zwei Phasenanschlüssen des Stators vorliegt;
- eine Unterbrechung in einem Schaltelementpfad, wobei ein erhöhter Widerstand zwischen zwei Schaltelementen einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung vorliegt;
- ein Kurzschluss in einem Schaltelementpfad, wobei ein verringerter insbesondere verschwindender Widerstand über einem Schaltelement der Gleichrichterschaltung vorliegt.

[0022] Insbesondere kann in Abhängigkeit von der Abweichung des Evaluationswerts von dem Referenzwert die Stärke dieser Fehlerzustände bewertet werden. Je größer der Widerstandwert bei einer Unterbrechung, umso stärker ist der entsprechende Fehlerzustand. Je kleiner der Widerstandwert bei einem Kurzschluss, umso stärker ist dieser entsprechende Fehlerzustand.

[0023] Vorteilhafterweise wird ein zeitlicher Verlauf eines Spannungswerts einer an einer Gleichrichterschaltung der elektrischen Maschine anliegenden

Gleichspannung der elektrischen Maschine erfasst. Der Spannungswert kann insbesondere zwischen Gleichspannungsanschlüssen der elektrischen Maschine bzw. der Gleichrichterschaltung messtechnisch erfasst werden und wird zumeist ohnehin für den regulären Betrieb der elektrischen Maschine erfasst.

[0024] Besonders vorteilhaft eignet sich die Erfindung für die Verwendung in einem Kraftfahrzeug. Durch die elektrische Maschine kann dabei beispielsweise ein Kraftfahrzeugbordnetz gespeist und/oder eine Kraftfahrzeugbatterie geladen werden. Ein Kraftfahrzeugbordnetz kann dabei an Gleichspannungsanschlüsse der Gleichrichterschaltung angeschlossen werden. Insbesondere wird im Rahmen des Verfahrens ein zeitlicher Verlauf einer zwischen diesen Gleichspannungsanschlüssen anliegenden Gleichspannung erfasst und aus diesem Gleichspannungsverlauf wird der Evaluationswert bestimmt. Das Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands kann dabei beispielsweise von einem Steuergerät des Kraftfahrzeugs durchgeführt werden. Die Erfindung eignet sich beispielsweise besonders für Fahrzeuge mit Funktionen, die erhöhte Sicherheitsanforderungen besitzen, z.B. automatisiertes oder autonomes Fahren, oder für Fahrzeuge mit langen Wartungsintervallen, z.B. Nutzfahrzeuge.

[0025] Eine erfindungsgemäße Recheneinheit, z.B. ein Steuergerät eines Kraftfahrzeugs, ist, insbesondere programmtechnisch, dazu eingerichtet, ein erfindungsgemäßes Verfahren durchzuführen.

[0026] Auch die Implementierung des Verfahrens in Form eines Computerprogramms ist vorteilhaft, da dies besonders geringe Kosten verursacht, insbesondere wenn ein ausführendes Steuergerät noch für weitere Aufgaben genutzt wird und daher ohnehin vorhanden ist. Geeignete Datenträger zur Bereitstellung des Computerprogramms sind insbesondere magnetische, optische und elektrische Speicher, wie z.B. Festplatten, Flash-Speicher, EEPROMs, DVDs u.a.m. Auch ein Download eines Programms über Computernetze (Internet, Intranet usw.) ist möglich.

[0027] Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der beiliegenden Zeichnung.

[0028] Die Erfindung ist anhand von Ausführungsbeispielen in der Zeichnung schematisch dargestellt und wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben.

Figurenliste

Fig. 1 zeigt schematisch eine elektrische Maschine mit einer bevorzugten Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Recheneinheit, die dazu eingerichtet ist, eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

Fig. 2 zeigt schematisch ein Spannungs-Zeit-Diagramm eines zeitlichen Verlaufs eines Spannungswerts, welcher im Zuge einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden kann.

Fig. 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens als ein Blockdiagramm.

Fig. 4 bis Fig. 7 zeigen jeweils schematisch eine elektrische Maschine in einem Fehlerzustand und jeweils schematisch ein Spannungs-Zeit-Diagramm eines zeitlichen Verlaufs eines Spannungswerts, welcher im Zuge einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens in dem jeweiligen Fehlerzustand der elektrischen Maschine bestimmt werden kann.

Fig. 8 zeigt schematisch Spannungs-Zeit-Diagramme von gefilterten, normierten zeitlichen Verläufen von Spannungswerten, die im Zuge bevorzugter Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden können.

Fig. 9 zeigt schematisch Normalverteilungen von Positionen von lokalen Extrema gefilterter, normierter zeitlicher Verläufe von Spannungswerten, die im Zuge bevorzugter Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden können.

Ausführungsform(en) der Erfindung

[0029] In **Fig. 1** ist eine elektrische Maschine in Form eines Generators schematisch dargestellt und mit 100 bezeichnet.

[0030] Die elektrische Maschine **100** ist in diesem Beispiel als eine dreiphasige elektrische Maschine ausgeführt, wobei Ständerinduktivitäten (Phasen) eines Stators **110** zu einer Dreieckschaltung verbunden sind. Ein Rotor **120** weist eine Erregerwicklung **121** mit einer parallel geschalteten Diode auf. In einem Erregerstromkreis kann weiterhin ein Erregertransistor **122** vorgesehen sein. Durch Ein- und Ausschalten des Erregertransistors **122**, üblicherweise mittels PWM-Betriebs, wird an die Erregerwicklung **121** eine Spannung (hier die gleichgerichtete Generatorspannung) intermittierend angelegt, worauf sich ein Erregerstrom einstellt. Durch Verändern der Tastrate des PWM-Betriebs sind insbesondere die Höhe des Er-

regerstroms und damit die Höhe der Generatorspannung veränderbar.

[0031] Die elektrische Maschine **100** weist weiterhin eine mit dem Stator **110** verbundene Gleichrichterschaltung **130** mit drei Halbbrücken zum Gleichrichten einer an dem Stator **110** anliegenden dreiphasigen Wechselspannung auf. Jede Halbbrücke weist zwischen ihren zwei hier als Dioden ausgebildeten Gleichrichtelementen jeweils einen Mittelabgriff auf, über welchen die jeweilige Halbbrücke mit einem Phasenanschluss des Stators **110** verbunden ist.

[0032] Zwischen zwei Gleichspannungsanschlüssen **140** der Gleichrichterschaltung **130** wird eine Gleichspannung UB+ als gleichgerichtete Generatorspannung bereitgestellt. Die elektrische Maschine **100** kann beispielsweise in einem Kraftfahrzeug zum Versorgen eines Kraftfahrzeugbordnetzes verwendet werden, welches mit den Gleichspannungsanschlüssen **140** verbunden ist.

[0033] Eine Recheneinheit **150** ist zum Ansteuern der elektrischen Maschine **100** vorgesehen. Beispielsweise kann die Recheneinheit **150** als ein Steuergerät des entsprechenden Kraftfahrzeugs ausgebildet sein. Die Recheneinheit **150** ist dazu eingerichtet, eine Erkennung von Fehlerzuständen der elektrischen Maschine durchzuführen. Zu diesem Zweck ist die Recheneinheit **150**, insbesondere programmtechnisch, dazu eingerichtet, eine bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens durchzuführen.

[0034] In **Fig. 2** ist in einem Spannungs-Zeit-Diagramm der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung UB+ bei einem fehlerfreien Zustand der elektrischen Maschine **100** schematisch dargestellt.

[0035] Dieser Spannungsverlauf **200** stellt insbesondere einen Referenzverlauf der Gleichspannung UB+ im fehlerfreien Zustand der elektrischen Maschine **100** dar und kann beispielsweise während eines fehlerfreien Betriebs der elektrischen Maschine **100**, beispielsweise im Zuge eines Herstellungsprozesses, messtechnisch erfasst oder im Zuge eines theoretischen Modells der elektrischen Maschine **100** rechnerisch bestimmt werden.

[0036] Der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung UB+ hat eine typische Form, die insbesondere von der Anzahl der Phasen n_{phase} , der Anzahl der Polpaare n_{pol} und der Drehzahl n_{gen} der elektrischen Maschine **100** abhängig ist. Insbesondere kann eine Periode T_{el} des zeitlichen Verlaufs dieser Gleichspannung wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1}{T_{el}} = \frac{2 * n_{pol} * n_{phase} * n_{gen}}{60}$$

[0037] Wie in **Fig. 2** zu erkennen ist, besitzt der zeitliche Verlauf **200** der Gleichspannung UB+ bei fehlerfreiem Zustand der elektrischen Maschine **100** in jeder Periode ein lokales Extremum bzw. einen lokalen Peak an derselben oder im Wesentlichen derselben Position. Insbesondere entspricht dieser lokale Peak einem Maximalwert einer Halbwelle in dieser Anwendung. Bei gleichbleibender Drehzahl ist der Abstand zwischen zwei benachbarten lokalen Extrema idealerweise konstant bzw. die Extrema liegen immer an derselben Position. Wegen Toleranzen, Messabweichungen und zufälligen Störungen sollten die Positionen bzw. Abstände dieser lokalen Peaks (als bestimmbares wiederkehrendes Merkmal) eine Normalverteilung mit einer kleinen Standardabweichung besitzen (siehe auch **Fig. 9**).

[0038] Bei einem Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** verändert sich die Form des Spannungsverlaufs der Gleichspannung UB+ in Abhängigkeit von dem vorliegenden Fehlerzustand und der Stärke des Fehlers. Somit verändert sich ebenfalls die Verteilung der lokalen Peaks. Eine Veränderung der Abstands-Verteilung der lokalen Extrema im Vergleich zu dem Referenzverlauf **200** deutet somit auf einen Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** hin.

[0039] Ein statistischer Wert, welcher von der aktuellen Verteilung der lokalen Extrema des Spannungsverlaufs abhängt, besonders bevorzugt die Standardabweichung dieser Verteilung, wird daher im Rahmen des Verfahrens bestimmt, um einen vorliegenden Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** erkennen zu können. Eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, welche zweckmäßigerweise von dem Steuergerät **150** durchgeführt werden kann, ist in **Fig. 3** schematisch als ein Blockdiagramm dargestellt.

[0040] Im laufenden Betrieb der elektrischen Maschine **100** wird in Schritt **310** der zeitliche Verlauf der Gleichspannung UB+ beispielsweise für eine Zeitdauer von 100 ms erfasst.

[0041] In Schritt **320** wird aus diesem erfassten zeitlichen Verlauf der Gleichspannung UB+ ein Evaluationswert bestimmt. Da die Rohdaten der Messung mit Störung und Rauschen behaftet sein können, werden die Rohdaten, also der erfasste zeitliche Verlauf der Gleichspannung UB+, zunächst in einem optionalen Schritt **321** durch ein Filter geglättet. Die geglätteten Daten werden in Schritt **322** mittels ihres Mittelwerts optional normiert, beispielsweise durch Subtraktion ihres Mittelwerts, damit die Signalverläufe deutlicher werden.

[0042] Anschließend werden in dem geglätteten und normierten zeitlichen Verlauf der Gleichspannung UB+ in Schritt **323** lokale Extrema bzw. lokale Peaks er-

kannt und deren Positionen innerhalb einer Periode bestimmt. Insbesondere wird zu diesem Zweck ein theoretischer Wert für die Periode T_{el} bei der aktuellen Drehzahl der elektrischen Maschine **100** gemäß obiger Formel bestimmt. Die lokalen Extrema werden in Schritt **323** insbesondere mit dieser Periode T_{el} detektiert.

[0043] Damit Verteilungen der lokalen Peaks miteinander vergleichbar werden, werden die in Schritt **323** bestimmten Positionen der erkannten lokalen Peaks in Schritt **324** durch Subtraktion ihres Mittelwerts normiert. Auf diese Weise erhält man eine Dichtefunktion der Verteilung der Positionen der erkannten lokalen Peaks, welche als eine Normalverteilung angenommen werden kann.

[0044] In Schritt **325** wird eine Standardabweichung dieser Verteilung der erkannten lokalen Peaks als Evaluationswert bestimmt.

[0045] In Schritt **330** wird dieser bestimmte Evaluationswert in Form der Standardabweichung mit einem Referenzwert verglichen. Dieser Referenzwert wird in Schritt **331** aus einem Referenzverlauf der Gleichspannung UB+ bestimmt, wie er beispielsweise in **Fig. 2** dargestellt ist. Der Referenzverlauf bei der aktuellen Drehzahl der elektrischen Maschine **100** kann dabei mit Hilfe von Kennfeldern in dem Steuergerät **150** hinterlegt sein oder kann von dem Steuergerät **150** mittels eines theoretischen Modells bestimmt werden. Als Referenzwert wird in Schritt **331** eine Standardabweichung einer Positions-Verteilung von lokalen Peaks dieses Referenzverlaufs bestimmt.

[0046] Insbesondere wird in Schritt **330** ein Schwellwertvergleich durchgeführt und überprüft, ob der Evaluationswert den Referenzwert, vorzugsweise zusätzlich einer sinnvollen Toleranzschwelle, überschreitet. Wenn der Evaluationswert den Referenzwert (ggf. zzgl. der Toleranzschwelle) nicht überschreitet und unterhalb des Referenzwerts (ggf. zzgl. der Toleranzschwelle) liegt (d.h. die Standardabweichung der Messung ist höchstens so groß wie die Standardabweichung (ggf. zzgl. der Toleranzschwelle) der Referenz), wird in Schritt **341** erkannt, dass kein Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** vorliegt.

[0047] Überschreitet der Evaluationswert den Referenzwert (ggf. zzgl. der Toleranzschwelle) hingegen, wird in Schritt **342** erkannt, dass ein Fehlerzustand der elektrischen Maschine **100** vorliegt. In diesem Fall wird in Schritt **343** eine Stärke des Fehlerzustands in Abhängigkeit davon bestimmt, wie stark der Evaluationswert von dem Referenzwert (ggf. zzgl. der Toleranzschwelle) abweicht. Insbesondere wird bei Erkennen eines Fehlerzustands in Schritt **342** eine Sicherheits- bzw. Selbstschutz-Maßnahme durchgeführt, beispielsweise eine Begrenzung der Belastung

der elektrischen Maschine **100** durch einen begrenzten Erregerstrom.

[0048] Im Nachfolgenden werden in Bezug auf die **Fig. 4** bis **Fig. 9** unterschiedliche Fehlerzustände der elektrischen Maschine beschrieben und wie diese Fehlerzustände im Rahmen des Verfahrens erkannt werden können.

[0049] In den **Fig. 4** bis **Fig. 7** ist die elektrische Maschine aus **Fig. 1** schematisch in unterschiedlichen Fehlerzuständen dargestellt. Weiterhin sind in den **Fig. 4** bis **Fig. 7** analog zu **Fig. 2** Spannungsverläufe der Gleichspannung $UB+$ schematisch dargestellt, welche in diesen Fehlerzuständen im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden können.

[0050] In **Fig. 4a** ist die elektrische Maschine aus **Fig. 1** in einem ersten Fehlerzustand **100A** schematisch dargestellt. In diesem ersten Fehlerzustand **100A** liegt eine Unterbrechung in einer Phase vor, wobei ein erhöhter (ggf. unendlicher) Widerstand R_1 zwischen einem Phasenanschluss des Stators **110** und einem Mittelabgriff einer Halbbrücke der Gleichrichterschaltung **130** vorliegt. In **Fig. 4b** ist ein zeitlicher Verlauf **200A** der Gleichspannung $UB+$ dargestellt, welcher in einem derartigen Fehlerzustand **100A** im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden kann.

[0051] In **Fig. 5a** ist die elektrische Maschine in einem zweiten Fehlerzustand **100B** schematisch dargestellt, in welchem ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen der elektrischen Maschine **100** vorliegt, wobei ein verringerter, insbesondere verschwindender Widerstand R_2 zwischen zwei Phasenanschlüssen des Stators **110** vorliegt. In **Fig. 5b** ist ein zeitlicher Verlauf **200B** der Gleichspannung $UB+$ dargestellt, welcher in diesem zweiten Fehlerzustand **100B** im Rahmen des Verfahrens in Schritt **310** erfasst werden kann.

[0052] Ein dritter Fehlerzustand **100C** der elektrischen Maschine ist in **Fig. 6a** dargestellt, wobei eine Unterbrechung in einem Schaltelementpfad der Gleichrichterschaltung **130** vorliegt. Dabei liegt ein erhöhter Widerstand (ggf. unendlicher) R_3 zwischen zwei Schaltelementen einer der Halbbrücke der Gleichrichterschaltung **130** vor. Ein entsprechender Verlauf **200C** der Gleichspannung $UB+$, welcher in diesem dritten Fehlerzustand **100C** erfasst werden kann, ist schematisch in **Fig. 6b** dargestellt.

[0053] In einem vierten Fehlerzustand **100D** der elektrischen Maschine, der in **Fig. 7a** dargestellt ist, liegt ein Kurzschluss in einem Schaltelementpfad vor mit einem verringerten, insbesondere verschwindenden Widerstand R_4 über einem Schaltelement der Gleichrichterschaltung **130**. **Fig. 7b** zeigt einen entsprechenden Verlauf **200D** der Gleichspannung UB

+, welcher in diesem vierten Fehlerzustand **100D** erfasst werden kann

[0054] Analog zu obigen Erläuterungen in Bezug auf **Fig. 3** können diese Verläufe **200A** bzw. **200B** bzw. **200C** bzw. **200D** in Schritt **310** des Verfahrens bestimmt werden, wenn der entsprechende Fehlerzustand **100A** bzw. **100B** bzw. **100C** bzw. **100D** der elektrischen Maschine vorliegt. Gemäß Schritt **321** bis **323** werden diese Verläufe **200A** bzw. **200B** bzw. **200C** bzw. **200D** gefiltert und normiert, um lokale Peaks mit Hilfe der Periode T_{el} zu erkennen.

[0055] In **Fig. 8** sind schematisch in Spannungs-Zeit-Diagrammen entsprechende gefilterte, normierte zeitliche Verläufe **200A** bzw. **200B** bzw. **200C** bzw. **200D** dargestellt, die im Zuge bevorzugter Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden. Die einzelnen erkannten lokalen Extrema bzw. lokalen Peaks sind dabei jeweils mit einem Asteriskus dargestellt.

[0056] **Fig. 8a** zeigt einen gefilterten und normierten zeitlichen Verlauf **300** des in **Fig. 2** dargestellten Referenzverlaufs **200**.

[0057] **Fig. 8b** zeigt einen gefilterten und normierten zeitlichen Verlauf **300A** des Spannungsverlaufs **200A** aus **Fig. 4b**, der im Zuge des ersten Fehlerzustands **100A** bestimmt werden kann.

[0058] **Fig. 8c** zeigt einen gefilterten und normierten zeitlichen Verlauf **300B** des in **Fig. 5b** gezeigten Spannungsverlaufs **200B**, der im Zuge des zweiten Fehlerzustands **100B** bestimmt werden kann.

[0059] Ein gefilterter, normierter Verlauf **300C** des in **Fig. 6b** gezeigten Spannungsverlaufs **200C** des dritten Fehlerzustands **100C** ist in **Fig. 8d** dargestellt.

[0060] In **Fig. 8e** ist ein gefilterter, normierter Verlauf **300D** des in **Fig. 7b** gezeigten Spannungsverlaufs **200D** im vierten Fehlerzustands **100D** dargestellt.

[0061] Wie oben erläutert, werden die in Schritt **323** die Positionen der erkannten lokalen Peaks in Schritt **324** durch Subtraktion ihres Mittelwerts normiert, wodurch eine Dichtefunktion der Positions-Verteilung der erkannten lokalen Peaks bestimmt wird, welche als eine Normalverteilung angenommen werden kann, insbesondere mit einem Mittelwert von null.

[0062] In **Fig. 9** sind entsprechende Normalverteilungen der Peakpositionen dargestellt, die in den gefilterten, normierten zeitlichen Verläufen **300**, **300A**, **300B**, **300C**, **300D** der **Fig. 8a** bis **Fig. 8e** erkannt wurden.

[0063] Kurve **400** ist dabei eine Normalverteilung der erkannten lokalen Peaks des in **Fig. 8a** gezeigten ge-

filterten, normierten Verlaufs **300** des Referenzverlaufs **200** aus **Fig. 2**.

[0064] Kurve **400A** ist eine Normalverteilung der Positionen der erkannten lokalen Peaks des gefilterten, normierten Verlaufs **300A** aus **Fig. 8b** im ersten Fehlerzustand **100A**.

[0065] Kurve **400B** ist eine Normalverteilung der Positionen der erkannten lokalen Peaks des in **Fig. 8c** gezeigten gefilterten, normierten Verlaufs **300B** im zweiten Fehlerzustand **100B**.

[0066] Kurve **400C** ist eine Normalverteilung der Positionen der erkannten lokalen Peaks des in **Fig. 8d** gezeigten gefilterten, normierten Verlaufs **300C** im dritten Fehlerzustand **100C**.

[0067] Kurve **400D** ist eine Normalverteilung der Positionen der erkannten lokalen Peaks des in **Fig. 8e** gezeigten gefilterten, normierten Verlaufs **300D** im vierten Fehlerzustand **100D**.

[0068] Wie in **Fig. 9** zu erkennen ist, ist die Verteilung **400** der lokalen Peaks im Referenzfall die schlankeste und besitzt die geringste Standardabweichung bzw. die geringste Varianz. Daher wird die Standardabweichung dieser Verteilung **400** als Referenzwert bestimmt. Die Standardabweichungen der übrigen Verteilungen **400A**, **400B**, **400D**, **400D** sind jeweils größer als die Standardabweichung der Verteilung **400**.

[0069] Je mehr die Standardabweichungen der Verteilungen **400A**, **400B**, **400D**, **400D** als Evaluationswerte von der Standardabweichung der Verteilung **400** als Referenzfall abweichen, desto stärker ist der entsprechende Fehlerzustand der elektrischen Maschine, wodurch in Schritt **343** die Stärke des jeweiligen Fehlers bestimmt werden kann.

[0070] Je größer dabei der Widerstandwert R_1 bzw. R_3 bei einer Unterbrechung im ersten bzw. dritten Fehlerzustand, umso stärker ist der entsprechende Fehlerzustand. Je kleiner der Widerstandwert R_2 bzw. R_4 bei einem Kurzschluss im zweiten bzw. vierten Fehlerzustand, umso stärker ist dieser entsprechende Fehlerzustand.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erkennen eines Fehlerzustands (100A, 100B, 100C, 100D) einer elektrischen Maschine (100) mit einem Rotor (120), einem Stator (110) und einer mit dem Stator (110) verbundenen Gleichrichterschaltung (130), wobei ein zeitlicher Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) eines Spannungswerts (UB+) der elektrischen Maschine (100) erfasst wird (310),

wobei aus dem erfassten zeitlichen Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) des Spannungswerts (UB+) ein Evaluationswert bestimmt wird (320), wobei der bestimmte Evaluationswert mit einem Referenzwert verglichen wird (330) und wobei in Abhängigkeit von einem Vergleichsergebnis bewertet wird, ob ein Fehlerzustand (100A, 100B, 100C, 100D) der elektrischen Maschine vorliegt (341) oder nicht (342).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei ein statistischer Wert des zeitlichen Verlaufs (200A, 200B, 200C, 200D) des Spannungswerts (UB+) als der Evaluationswert bestimmt wird (325).

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei eine Standardabweichung und/oder eine Varianz eines aus dem zeitlichen Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) des Spannungswerts (UB+) bestimmbar wiederkehrenden Merkmals als der Evaluationswert bestimmt werden (325).

4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei in dem zeitlichen Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) des Spannungswerts (UB+) Positionen von lokalen Extrema als bestimmbar wiederkehrende Merkmale bestimmt werden (324) und wobei aus diesen erkannten lokalen Extrema der Evaluationswert bestimmt wird (325).

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei ein statistischer Wert der Positionen der erkannten lokalen Extrema als der Evaluationswert bestimmt wird (325).

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei eine Standardabweichung und/oder eine Varianz der Positionen der erkannten lokalen Extrema als der Evaluationswert bestimmt werden (325).

7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei der Referenzwert aus einem Referenzverlauf (200) des Spannungswerts (UB+) bei einer fehlerfreien elektrischen Maschine (100) bestimmt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei der Referenzwert als statistischer Wert, insbesondere als eine Standardabweichung und/oder Varianz, von Positionen von lokalen Extrema des Referenzverlaufs (200) des Spannungswerts (UB+) bestimmt wird (331).

9. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei im Zuge des Vergleichs des Evaluationswerts und des Referenzwerts ein Schwellwertvergleich durchgeführt wird und überprüft wird, ob der Evaluationswert den Referenzwert überschreitet (330).

10. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei im Zuge des Vergleichs des Eva-

lationswerts und des Referenzwerts eine Abweichung des Evaluationswerts von dem Referenzwert bestimmt wird und wobei in Abhängigkeit von dieser Abweichung eine Stärke eines vorliegenden Fehlers bewertet wird (343).

11. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei in Abhängigkeit von dem Vergleichsergebnis bewertet wird, ob als Fehlerzustand der elektrischen Maschine eine Unterbrechung in einer Phase (100A) und/oder ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen (100B) und/oder eine Unterbrechung in einem Schaltelementpfad (100C) und/oder ein Kurzschluss in einem Schaltelementpfad (100D) vorliegt.

12. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei ein zeitlicher Verlauf (200A, 200B, 200C, 200D) eines Spannungswerts (UB+) einer an der Gleichrichterschaltung (130) der elektrischen Maschine (100) anliegenden Gleichspannung erfasst wird (310).

13. Recheneinheit (150), die dazu eingerichtet ist, ein Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche durchzuführen.

14. Computerprogramm, das eine Recheneinheit (150) dazu veranlasst, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 durchzuführen, wenn es auf der Recheneinheit (150) ausgeführt wird.

15. Maschinenlesbares Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Computerprogramm nach Anspruch 14.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

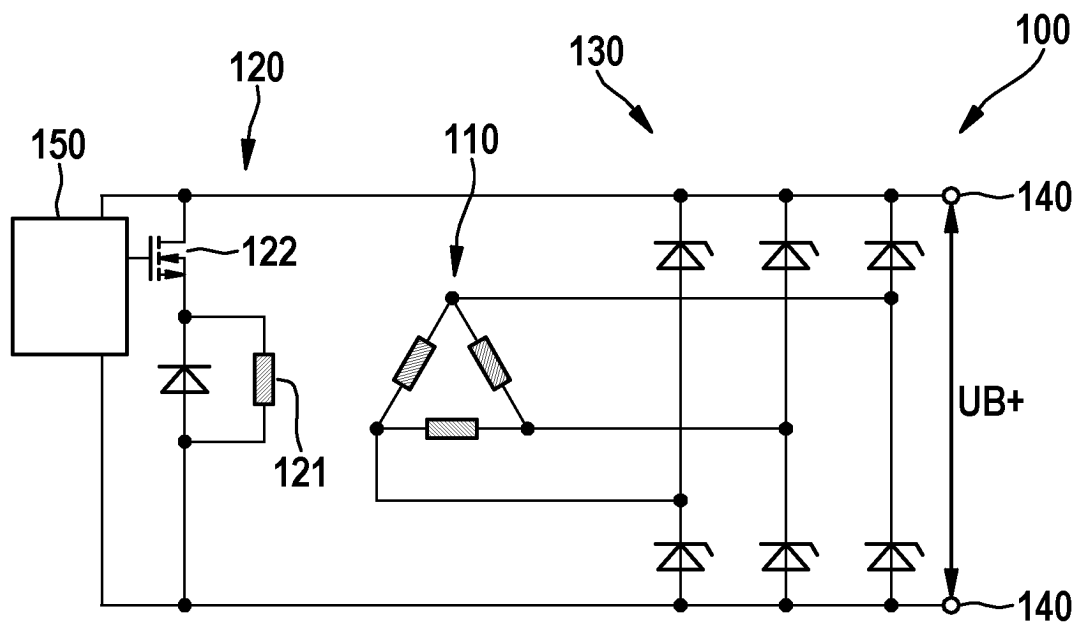


Fig. 1

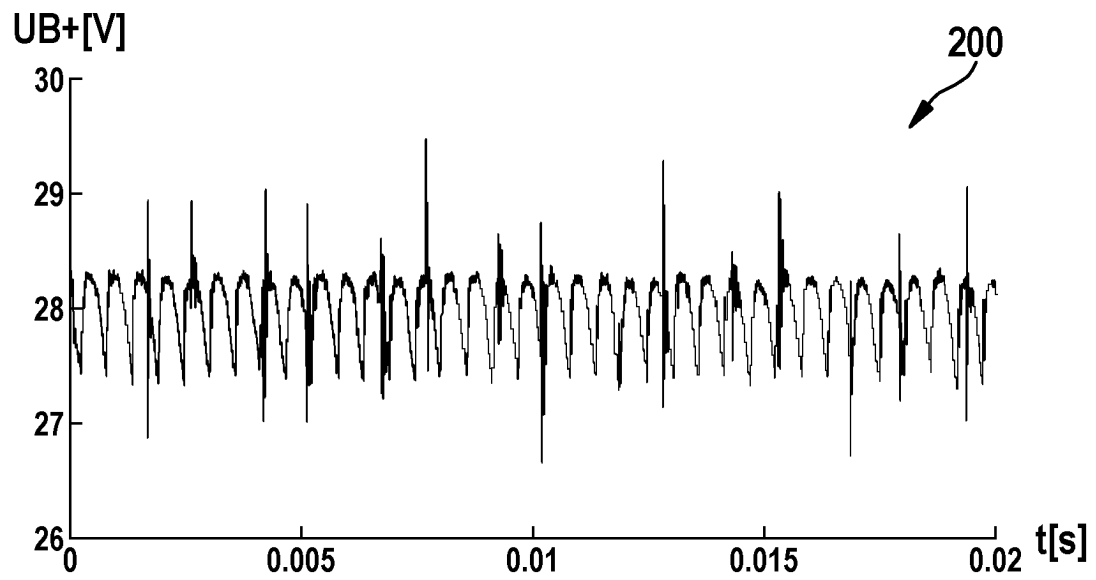


Fig. 2

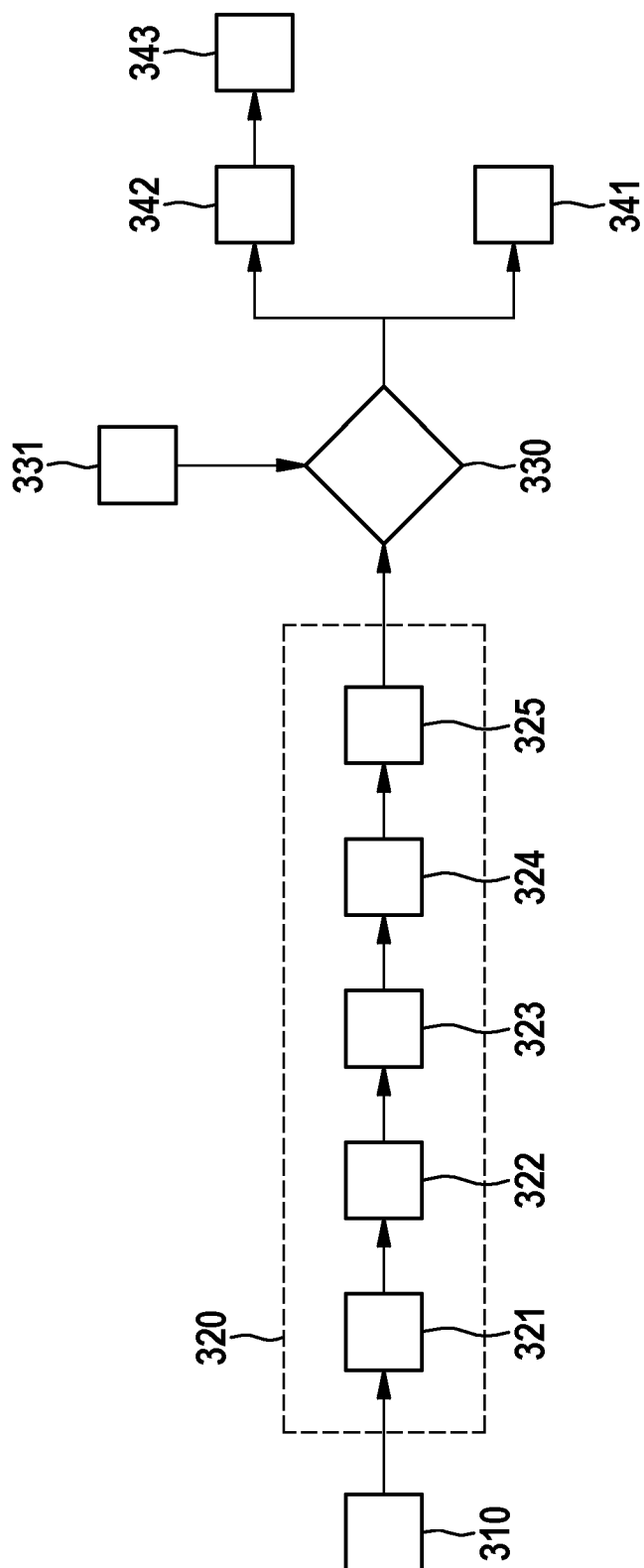


Fig. 3

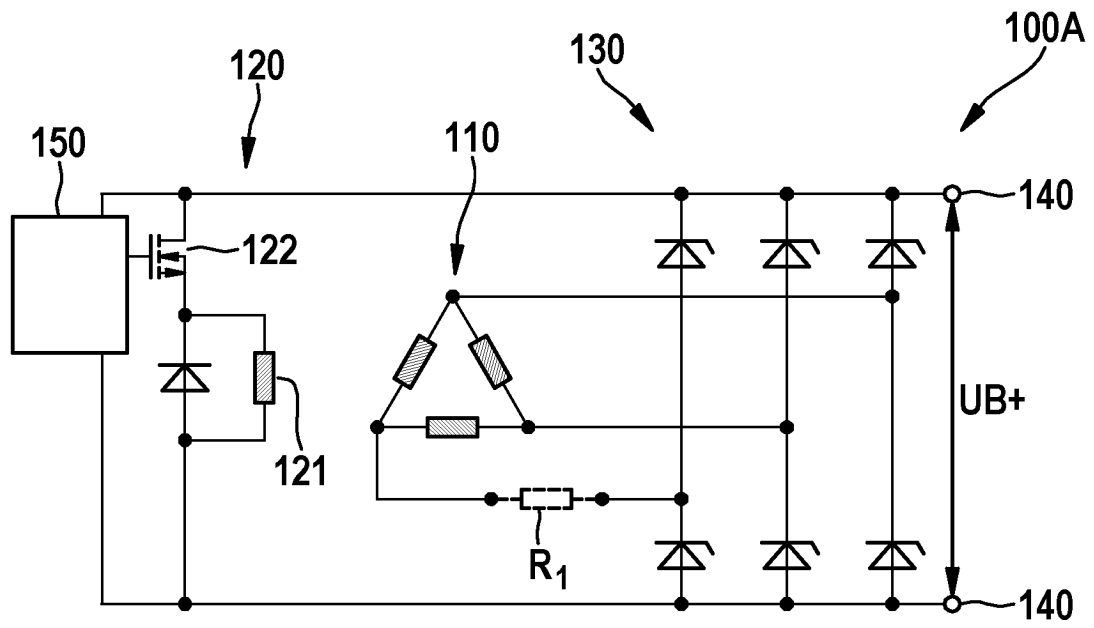


Fig. 4a

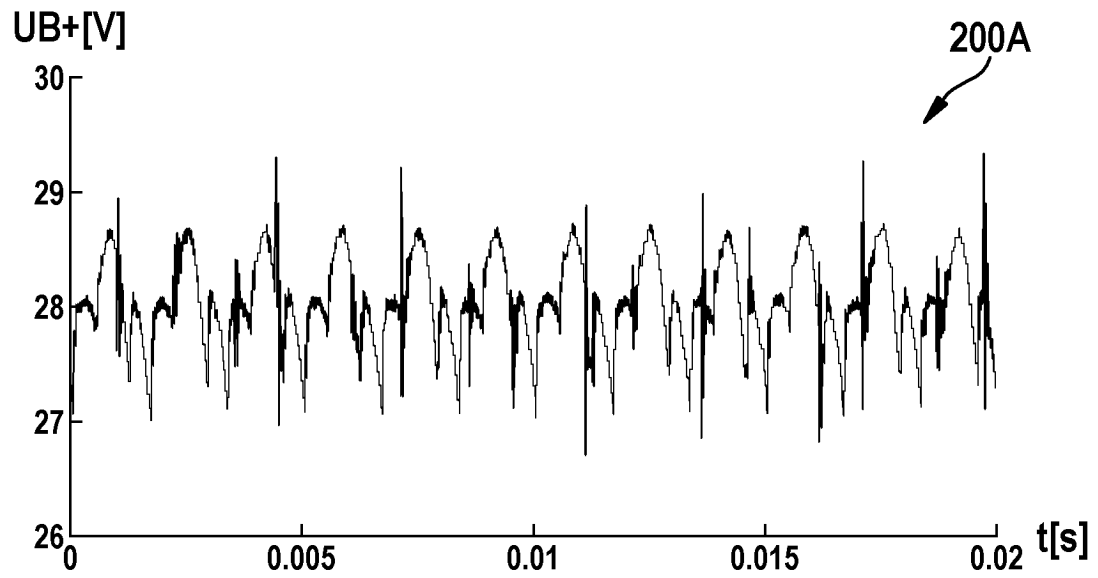


Fig. 4b

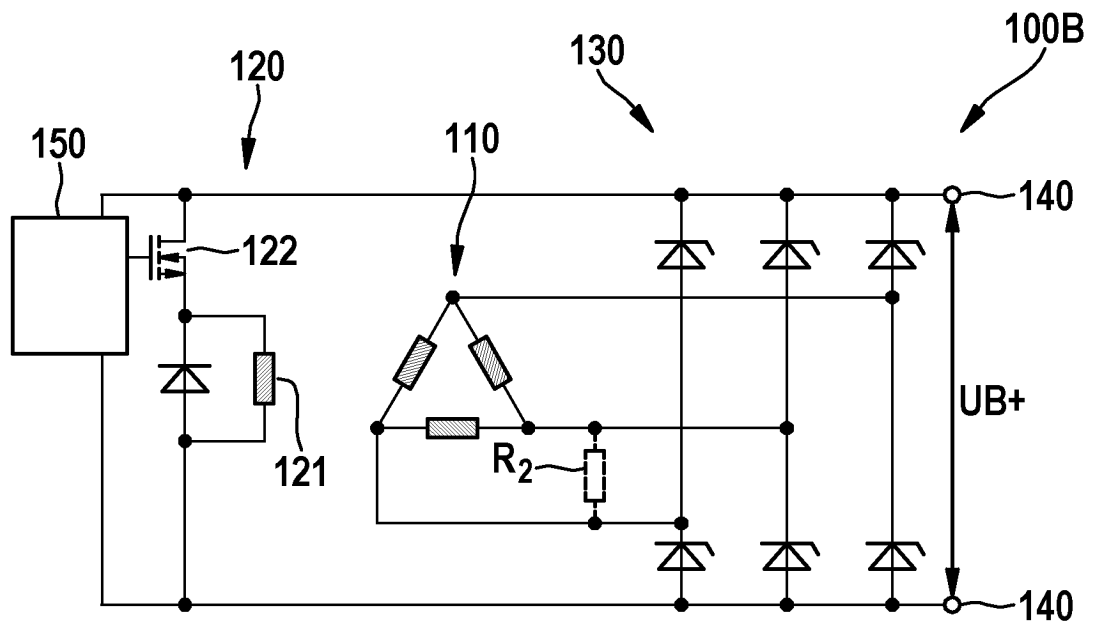


Fig. 5a

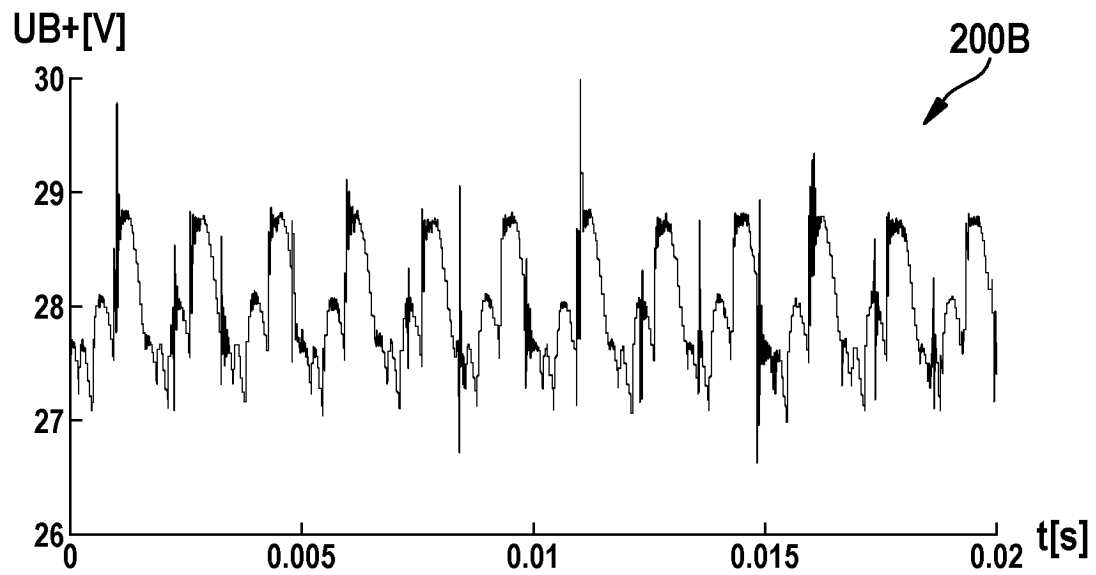


Fig. 5b

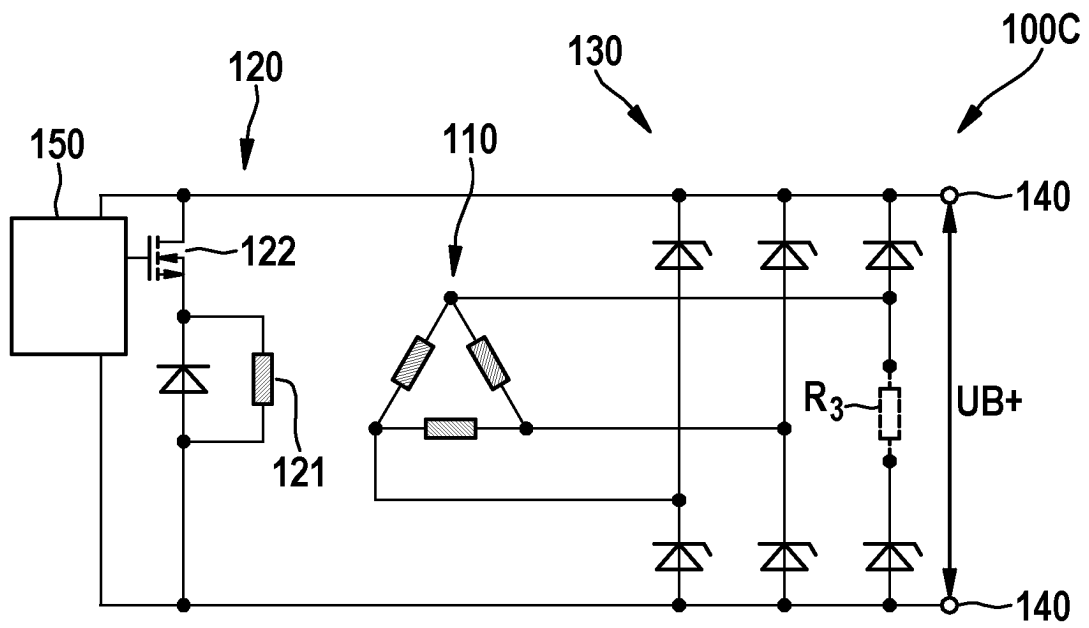


Fig. 6a

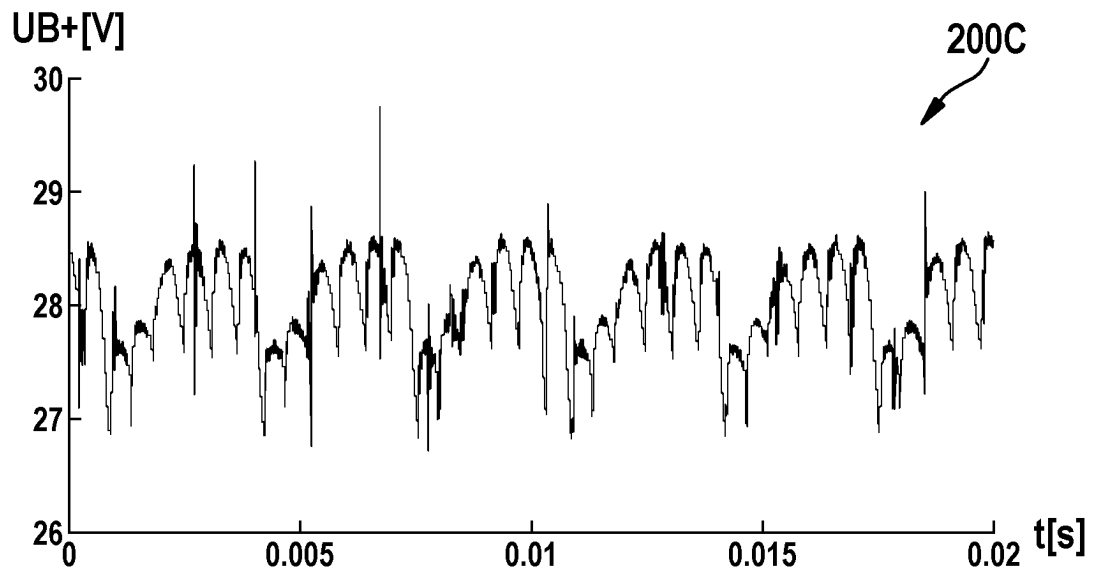


Fig. 6b

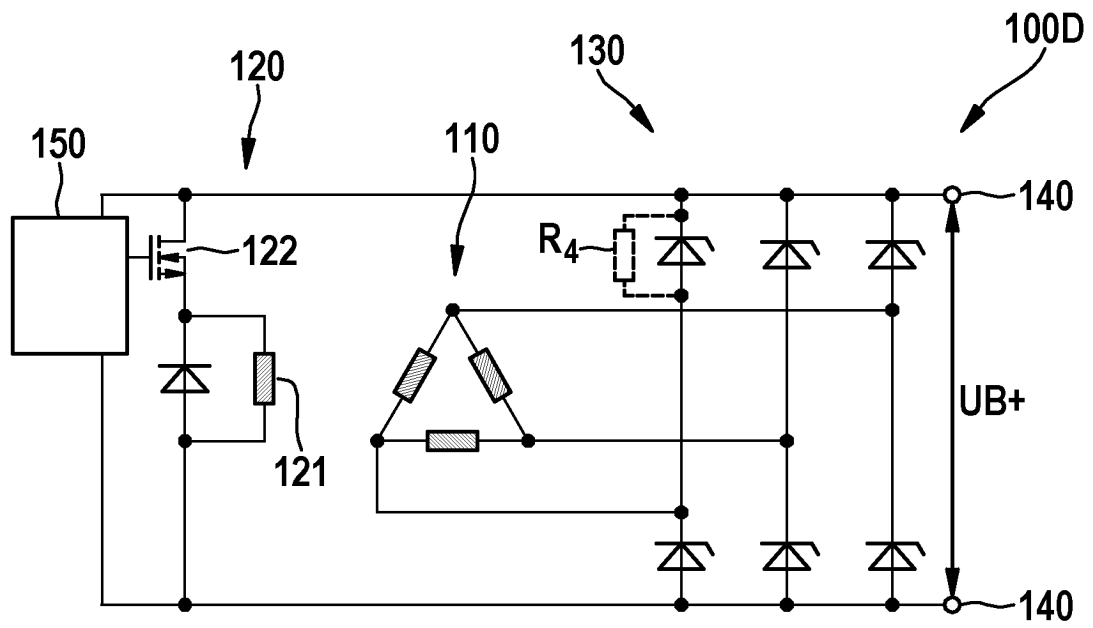


Fig. 7a

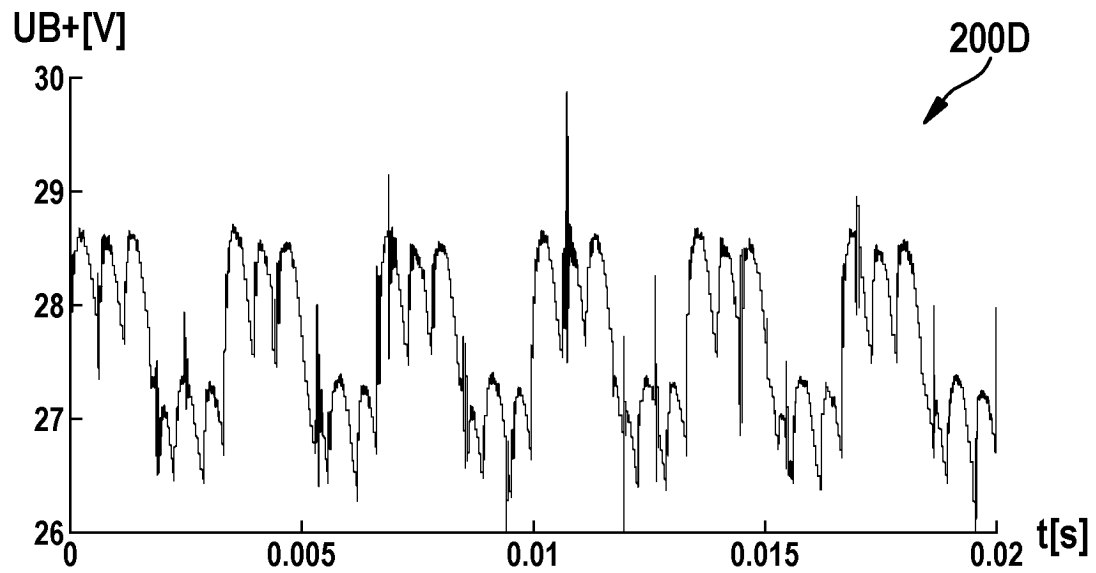


Fig. 7b

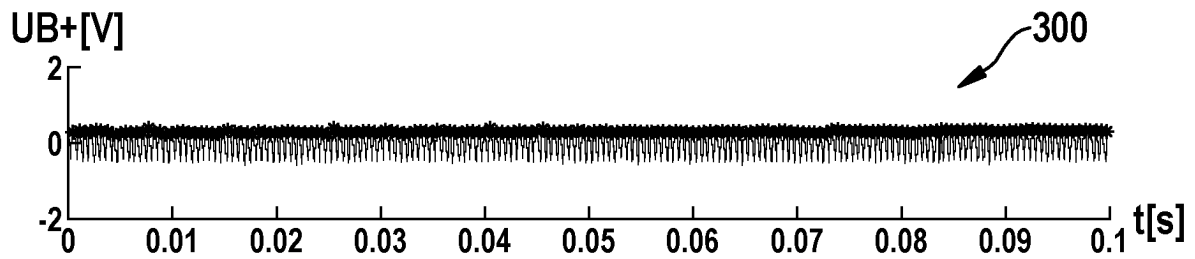


Fig. 8a

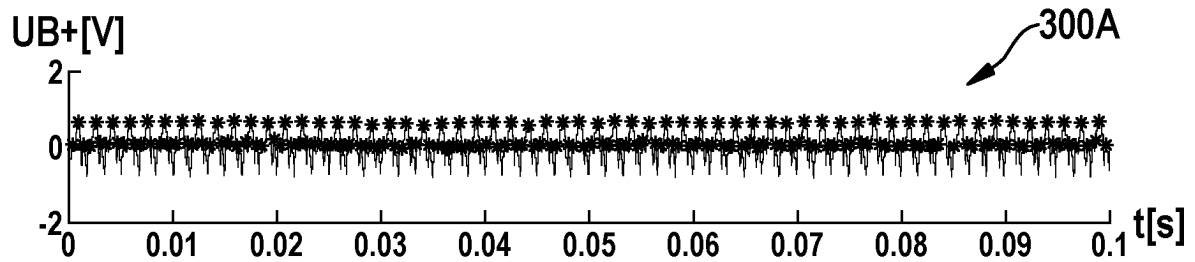


Fig. 8b

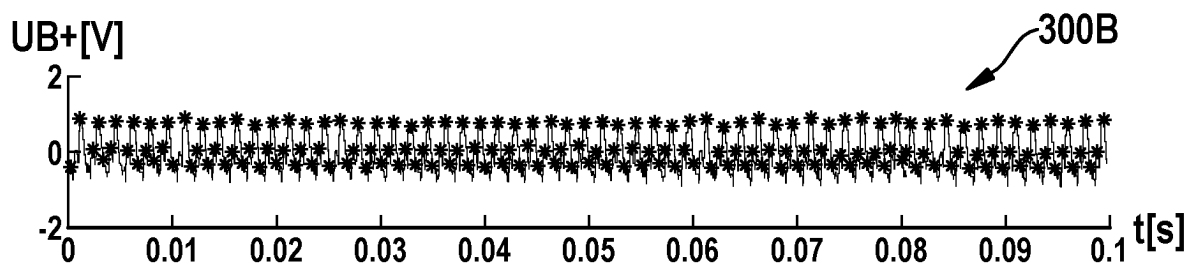


Fig. 8c

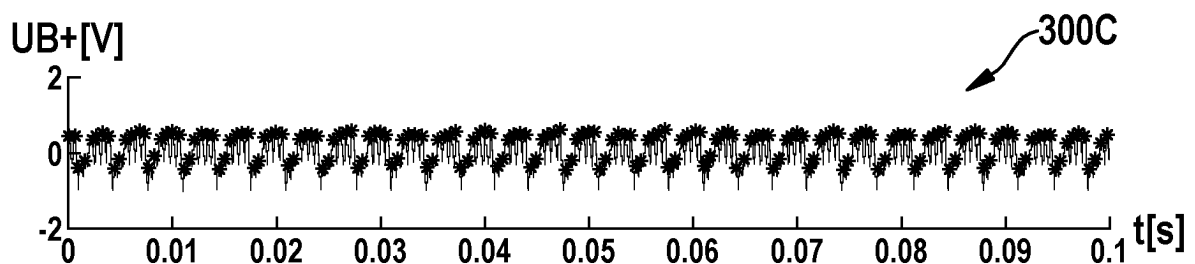


Fig. 8d

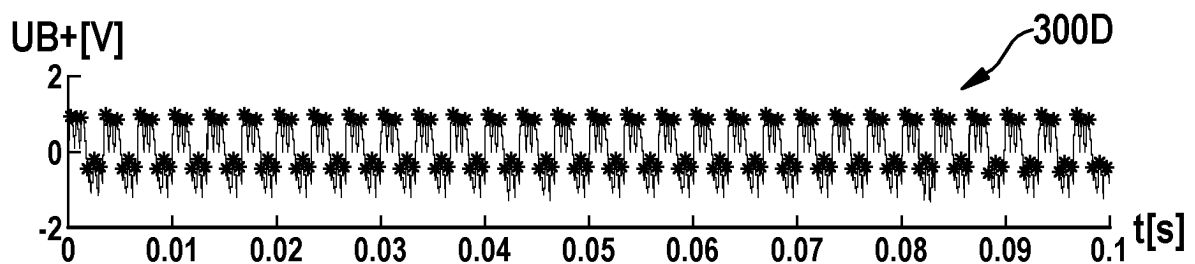


Fig. 8e

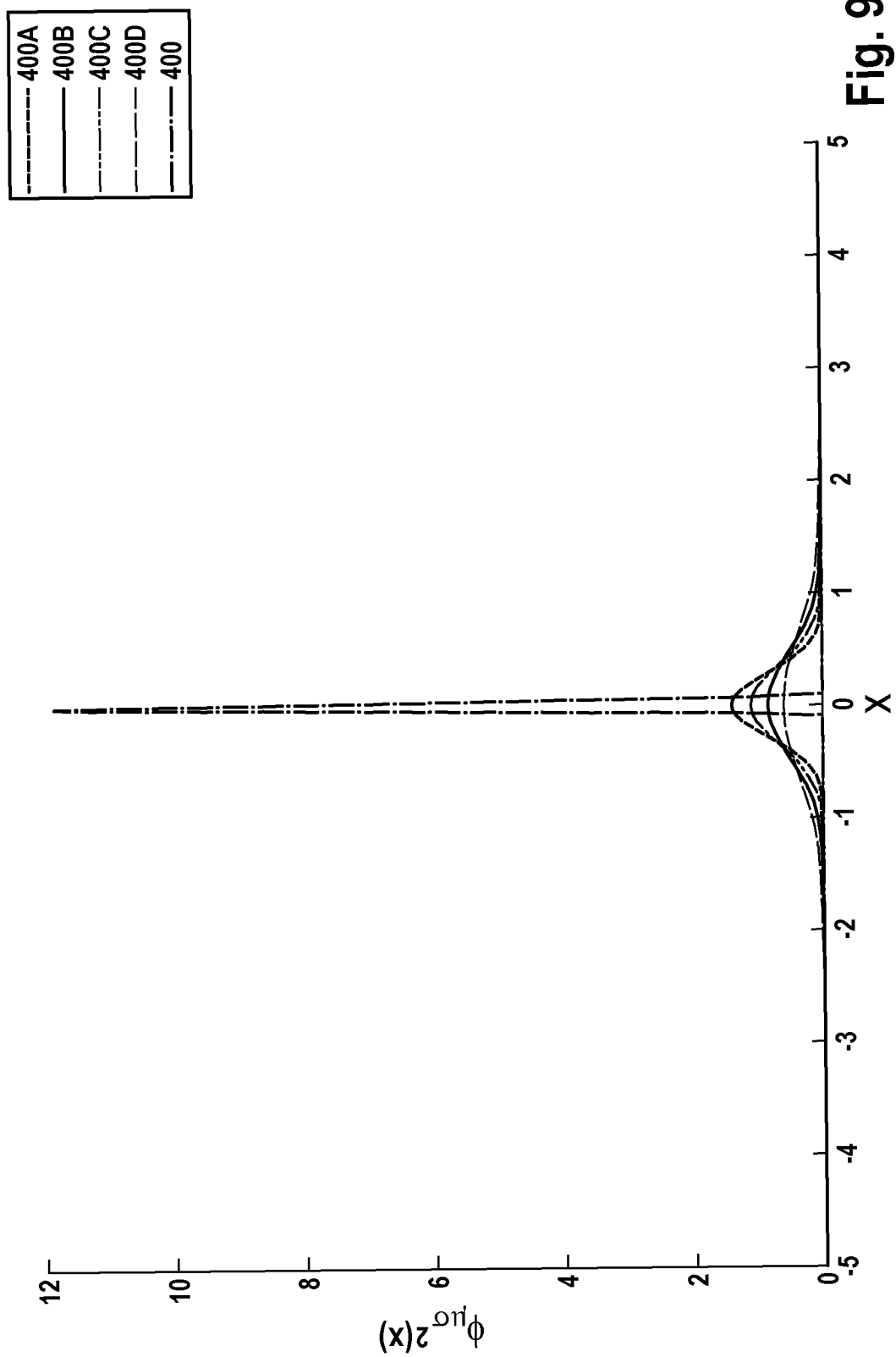


Fig. 9