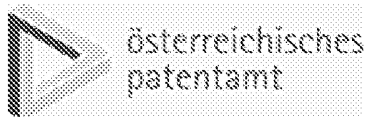


(19)



(10)

AT 511270 B1 2015-07-15

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50201/2012
 (22) Anmeldetag: 24.05.2012
 (45) Veröffentlicht am: 15.07.2015

(51) Int. Cl.: **G01R 31/36** (2006.01)
G05B 13/04 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
 WO 03071617 A2
 US 2012078552 A1

(73) Patentinhaber:
 AVL LIST GMBH
 8020 GRAZ (AT)

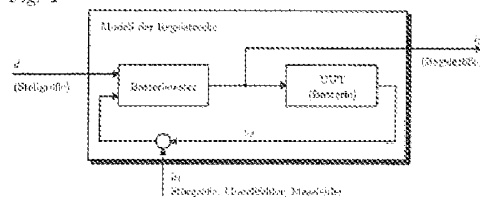
(72) Erfinder:
 König Oliver Dipl.Ing.
 6900 Bregenz (AT)
 Jakubek Stefan Dr.
 1230 Wien (AT)
 Prochart Günter Dr.
 8042 Graz (AT)
 Gschweidl Kurt Dr.
 8063 Eggersdorf (AT)

(74) Vertreter:
 Patentanwälte Pinter & Weiss OG
 Wien

(54) **Verfahren und eine Vorrichtung zur Prüfung von elektrischen Energiespeichersystemen für den Antrieb von Fahrzeugen**

(57) Ein Verfahren zur Prüfung von elektrischen Energiespeichersystemen für den Antrieb von Fahrzeugen sieht vor, dass der Laststrom des Energiespeichersystems mittels eines Regelkreises einem gemäß vorgegebenen Testzyklen zeitlich veränderlichen Referenzstrom möglichst ohne Verzugszeit nachgeführt wird. Dabei wird der Regelkreis mittels eines modellbasierten Reglerentwurfsverfahrens erstellt, bei welchem in das Modell der Regelstrecke ein Modell der Impedanz des Energiespeichersystems eingebunden ist.

Fig. 4



Beschreibung

VERFAHREN UND EINE VORRICHTUNG ZUR PRÜFUNG VON ELEKTRISCHEN ENERGIE-SPEICHERSYSTEMEN FÜR DEN ANTRIEB VON FAHRZEUGEN

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung, mit welchen im Zuge der Stromregelung im Batterietester der tatsächliche Laststrom möglichst exakt und ohne Verzugszeit einem zeitlich veränderlichen Referenzstrom nachgeführt wird.

[0002] Bei der Erprobung von Hybridfahrzeugen oder auch gänzlich elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist die Prüfung der Traktionsbatterien von besonderer Bedeutung. Dabei soll der Teststrom vorgegebenen Testzyklen mit hochdynamischen Transienten möglichst exakt und ohne Verzögerung folgen. Dies kann über einen entsprechenden Regelkreis erreicht werden, der über ein modellbasiertes Reglerentwurfsverfahren konzipiert wird.

[0003] Die Stromregelung soll dabei durch den Prüfling möglichst nicht beeinflusst werden. Da jedoch die Gegenspannung des Prüflings wesentlich vom eingepprägten Strom, d.h. der Regelgröße, abhängt, hat dieser maßgeblichen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften des Regelkreises. Um diesen Einfluss zu vermindern, gibt es mehrere Möglichkeiten. Einerseits kann eine Auslegung der Leistungselektronik mit möglichst großer Ausgangsimpedanz erfolgen. Dies führt jedoch zu einer Reduktion der erreichbaren Regelbandbreite und hat erhöhte Materialkosten sowie erhöhten Platzbedarf zur Folge, weil dafür größere Induktivitäten notwendig sind. Bei der Methode der Störgrößenaufschaltung wird die gemessene Gegenspannung des Prüflings als Störgröße aufgefasst und zur Kompensation der Störung herangezogen. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die Störgröße von der Regelgröße unabhängig ist. Tatsächlich ist aber die Klemmenspannung einer Batterie auf Grund der endlichen Batterieimpedanz vom eingepprägten Strom abhängig. Das Verhalten der Störgröße als Reaktion auf Änderungen des eingepprägten Stroms kann somit nicht vorausschauend kompensiert werden.

[0004] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung war daher eine Verbesserung des Verfahrens und der Vorrichtung wie eingangs angegeben in einer Weise, dass die Last keine unbekannte Störung mehr darstellt, sondern bei der Regelung explizit berücksichtigt werden kann.

[0005] Das Problem bei den bisherigen Systemen liegt darin, dass das Verhalten der Stromregelung von der Impedanz der Batterie (UUT) abhängt. Eine ungünstige Impedanz führt zu langsamem Führungsverhalten und starkem Überschwingen des Teststroms. Die Impedanz ändert sich zudem mit dem Alter und dem Ladezustand der Batterie und hängt vom Arbeitspunkt (Laststrom) ab.

[0006] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung waren daher ein verbessertes Verfahren und eine verbesserte Vorrichtung, mit welchen im Zuge der Stromregelung im Batterietester der tatsächliche Laststrom möglichst exakt und ohne Verzugszeit einem zeitlich veränderlichen Referenzstrom nachgeführt werden kann, um die gewünschten Testzyklen durchzuführen.

[0007] Zur Lösung dieser Aufgabenstellung ist das Verfahren erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass der Regelkreis mittels eines modellbasierten Reglerentwurfsverfahrens erstellt wird, bei welchem in das Modell der Regelstrecke ein Modell der Impedanz des Energiespeichersystems eingebunden ist. Die Gegenspannung der Batterie stellt für die Stromregelung prinzipiell eine Störung dar. Das Modell der Batterieimpedanz ermöglicht eine annähernde Vorhersage des Verlaufs dieser Störgröße als Reaktion auf den eingepprägten Strom. Dadurch kann eine schnellere und robustere Reaktion des tatsächlichen Stroms auf Veränderungen des Referenzstroms erreicht werden.

[0008] Gemäß einer vorteilhaften Variante des Verfahrens ist vorgesehen, dass die Parameter für ein generisches Modell der Batterieimpedanz durch zumindest eine kurze Anregungssequenz und Messung der resultierenden Werte von Strom und Spannung identifiziert werden.

[0009] Die Vorrichtung zur Prüfung von elektrischen Energiespeichersystemen für den Antrieb von Fahrzeugen, mit einem Regelkreis zur Nachführung des Laststromes des Energiespeicher-

systems gemäß vorgegebenen Testzyklen nach einem zeitlich veränderlichen Referenzstrom möglichst ohne Verzugszeit, ist zur Lösung der gestellten Aufgabe dadurch gekennzeichnet, dass im Regelkreis eine modellbasierte Regelung realisiert und in dessen Modell ein Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.

[0010] Eine vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass ein vom Arbeitspunkt der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.

[0011] Dabei kann alternativ auch ein vom Ladezustand der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden sein.

[0012] Als weitere Alternative könnte eine erfindungsgemäße Vorrichtung dadurch gekennzeichnet sein, dass ein vom Alter der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.

[0013] Für alle der genannten Varianten ist eine vorteilhafte Ausführungsform dadurch gekennzeichnet, dass im Regelkreis eine modellbasierte prädiktive Regelung realisiert ist. Die Einbindung ist prinzipiell mit jedem modellbasierten Reglerentwurfsverfahren möglich. Die modellbasierte prädiktive Regelung (MPC) ermöglicht es zudem, physikalische Beschränkungen (z.B. Stellgrößenbeschränkungen oder Strombegrenzungen zum Schutz der Halbleiterschalter im Batteriesimulator) bei der Optimierung des Stellgrößenverlaufs explizit zu berücksichtigen.

[0014] Vorzugsweise ist das Modell der Batterieimpedanz als Übertragungsfunktion 2. oder höherer Ordnung dargestellt.

[0015] In der nachfolgenden Beschreibung soll die Erfindung näher erläutert werden.

[0016] In den beigefügten Zeichnungsfiguren zeigt die

[0017] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Batterietesters,

[0018] Fig. 2 ist ein Blockdiagramm für die Vorgehensweise beim Entwurf eines Stromreglers mit integriertem Lastmodell,

[0019] Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild der Regelstrecke,

[0020] die Fig. 4 stellt ein Blockschaltbild der Regelstrecke mit inkludiertem Lastmodell dar,

[0021] Fig. 5 zeigt ein Schaltbild der Leistungselektronik,

[0022] Fig. 6 zeigt eine Systemantwort des erfindungsgemäßen Systems auf eine Anregungssequenz, mit Darstellung der vorgegebenen Anregungssequenz und der daraus resultierenden Messwerte für Strom und Spannung bei Betrieb mit dem vorläufigen Regler ohne Lastmodell,

[0023] Fig. 7 zeigt ein Diagramm für die simulierte Systemantwort mit nicht optimierten Parametern im Vergleich zur aufgezeichneten Systemantwort, die

[0024] Fig. 8 ist eine Darstellung der simulierten Systemantwort mit optimierten Parametern im Vergleich zur aufgezeichneten Systemantwort, und

[0025] Fig. 9 schließlich zeigt einen Vergleich der Systemantworten auf einen Führungsgrößensprung von 40 A auf 80 A bei Stromregelung mit und ohne Lastmodell.

[0026] Ein in Fig. 1 beispielhaft dargestelltes System besteht aus dem Prüfling, d.h. der Traktionsbatterie, und dem Batterietester. Der Batterietester wiederum besteht aus Leistungselektronik und vorzugsweise digitalem Regler. Die Klemmenspannung der Batterie ist hier mit v_2 , der einzuprägende Laststrom mit i_2 und die Stromreferenz mit i_2^* gekennzeichnet. Die Leistungselektronik wird über die Vorgabe eines pulsweitenmodulierten Signals (PWM) mit dem Duty Cycle d angesteuert. Die gemessenen Größen sind im Messgrößenvektor d zusammengefasst. Der Regler ist vorzugsweise als modellprädiktiver Regler (MPC) mit Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen ausgeführt. Ein Zustandsbeobachter verarbeitet die Messdaten sowie

die zuletzt ausgegebene Stellgröße und schätzt daraus den Zustandsvektor, der vom Regler benötigt wird.

[0027] Modellprädiktive Reglerentwurfsverfahren wurden gewählt, weil damit der Entwurf basierend auf einem Modell der Regelstrecke automatisierbar ist und weil damit die inhärente Stellgrößenbeschränkung der Leistungselektronik (der Duty Cycle ist nur im Bereich von $0 \leq d \leq 1$ veränderbar) berücksichtigt werden kann.

[0028] Mit Hilfe eines Modells des Batterietesters wird ein vorläufiger Regler ohne Modell der Last entworfen. Der Batterietester wird dann bei angeschlossenem Prüfling mit dem vorläufigen Regler betrieben. Eine geeignete Anregungssequenz (bspw. eine pseudozufällige Binärsequenz (PRBS)) wird als Referenzsignal i_2^* verwendet. Dabei werden der tatsächliche Laststrom i_2 und die Klemmenspannung v_2 mit der Abtastrate des Reglers aufgezeichnet. Anhand der Messdaten wird anschließend ein Modell der Last identifiziert und schließlich das Modell des Batterietesters um das Modell der Last erweitert. Mit dem erweiterten Modell des gesamten Systems wird erneut ein Regler entworfen, der dann dazu verwendet werden kann, um den Prüfling mit hochdynamischen Testsequenzen zu beaufschlagen. Dieser Ablauf ist in Fig. 2 zusammenfassend dargestellt.

[0029] Für den oben erwähnten Reglerentwurf ist ein Modell der Regelstrecke notwendig. In Fig. 3 ist die Regelstrecke ohne Berücksichtigung der Last als Blockschaltbild dargestellt. Der Duty Cycle d fungiert dabei als Stellgröße, der Laststrom i_2 ist die Regelgröße und Klemmenspannung v_2 der Batterie wird als Störgröße interpretiert. Der zukünftige Verlauf dieser Störgröße ist nicht bekannt, d.h. der Regler kann erst reagieren, wenn sich die Störgröße bereits verändert hat.

[0030] Wenn ein Modell der Batterie vorhanden ist, kann dieses in das Modell der Regelstrecke integriert werden. Das resultierende Blockschaltbild ist in Fig. 4 dargestellt. Die Klemmenspannung wird dadurch nicht mehr als Störgröße sondern als neue Zustandsgröße des erweiterten Systems betrachtet. Damit können zumindest jene zukünftigen Änderungen der Klemmenspannung abgeschätzt werden, die von Änderungen des eingepprägten Teststroms verursacht werden - unter der Voraussetzung, dass das Lastmodell hinreichend genau ist. Messfehler und Fehler im Lastmodell werden nach wie vor als Störgröße betrachtet. Folglich werden zwei getrennte Modelle, eines von der Last und eines vom Batterietester benötigt.

[0031] Der verwendete Batterietester besteht aus einem geregelten Tiefsetzsteller mit drei versetzt schaltenden IGBT-Halbbrücken. Ein vereinfachtes Schaltbild der Ausgangsstufe mit den relevanten Komponenten ist in Fig. 5 dargestellt.

[0032] Die Dynamik des Systems wird vom passiven Ausgangsfilter bestimmt. Dieses besteht aus den drei Speicherdrosseln L_{1a} , L_{1b} und L_{1c} , dem Filterkondensator C_1 und der Siebdrossel L_2 . Wenn alle drei Speicherdrosseln die gleiche Induktivität aufweisen $L_{1a} = L_{1b} = L_{1c}$, so kann das dynamische Verhalten der Ausgangsstufe mit einem Modell eines einphasigen Tiefsetzstellers

[0033] bestehend aus nur einer Halbbrücke und einer Speicherdrossel $L_1 = 1/3L_{1a} = 1/3L_{1b} = 1/3L_{1c}$ approximiert werden.

[0034] Für das einphasige Ausgangsfilter kann nun ein zeitkontinuierliches Zustandsraummodell aufgestellt werden, mit dem Zustandsvektor $\dot{x}_c = [i_1 \quad v_1 \quad i_2]^T$:

$$\dot{x}_c = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & -\frac{1}{C_1} \\ 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{R_{L2}}{L_2} \end{bmatrix}}_{A_c} x_c = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_c} dV_0 + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_2} \end{bmatrix}}_{E_c} v_2$$

$$i_2 = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_c} x_c. \quad (1)$$

[0035] Der Duty Cycle d und die Klemmenspannung v_2 sind die Modelleingänge (als Stellgröße bzw. Störgröße). Die Größen i_1 , i_2 und v_2 stehen dem Regler als Messgrößen zur Verfügung. Wenn die Kondensatorspannung v_1 nicht gemessen wird, ist ein Zustandsbeobachter notwendig, um den aktuellen Zustandsvektor laufend zu rekonstruieren.

[0036] Für den zeitdiskreten, digitalen Regler ist ein entsprechendes zeitdiskretes Modell des Batterietesters notwendig. Dafür wird die PWM durch ein Abtast-Halteglied (zero-order hold, ZOH) approximiert. Das resultierende Modell kann mit der Übergangsmatrix A_d , der Eingangsmatrix B_d , der Störeingangsmatrix E_d und der Ausgangsmatrix C_d als Zustandsraummodell dargestellt werden:

$$x_{ck+1} = A_d \cdot x_{ck} + B_d \cdot d_k V_0 + E_d \cdot v_{2k}, \quad i_{2k} = C_d \cdot x_{ck} \quad (2)$$

[0037] Der Index k bezeichnet jeweils den aktuellen Zeitschritt.

[0038] Die Konvertierung in das zeitdiskrete Modell erfolgt über standardmäßige Schritte, beispielsweise mit dem Matlab-Befehl `c2d.m`. Auf Grund der benötigten Berechnungszeit des Reglers kann der berechnete neue Wert der Stellgröße nicht sofort, sondern immer erst zum nächsten Abtastzeitpunkt angewendet werden. Dieser Umstand wird berücksichtigt, indem das Zustandsraummodell um eine zusätzliche Verzögerung von einer Abtastperiode erweitert wird. Das damit erhaltene Modell des Batterietesters ist von der angeschlossenen Last unabhängig, muss deshalb für jeden Batterietester nur einmal aufgestellt werden und bleibt anschließend unverändert.

[0039] Batterien weisen grundsätzlich ein sehr komplexes dynamisches Verhalten auf, das von vielen Faktoren - insbesondere vom Ladezustand, den Zelltemperaturen und vom Lade- bzw. Entladestrom - abhängt. Dementsprechend komplexe Modelle sind notwendig, um dieses Verhalten nachbilden bzw. vorhersagen zu können.

[0040] Die elektrischen und elektrochemischen Effekte, die für das dynamische Verhalten einer Batterie verantwortlich sind, weisen unterschiedliche Zeitkonstanten auf. Für die Regelung des Batterietesters sind die Effekte mit kleinen Zeitkonstanten wichtig. Das sind im Speziellen die Zuleitungs- und Kontaktwiderstände, die Induktivitäten der Zuleitungen und Kontaktierungen sowie kapazitive Effekte. Effekte mit großen Zeitkonstanten stellen langsam veränderliche Störgrößen dar, die von einem schnellen Regler gut kompensiert werden können.

[0041] Aus diesem Grund ist für die Regelung des Teststroms ein stark vereinfachtes Modell ausreichend, in dem nur die schnellen Effekte abgebildet werden. Außerdem hat die Ordnung des eingebetteten Lastmodells einen Einfluss auf den Rechenaufwand, der für die Regelung zur Laufzeit betrieben werden muss. Folglich ist die verwertbare Modellordnung durch die zur Verfügung stehende Rechenleistung und die Abtastrate stark beschränkt.

[0042] Für die beschriebenen Versuche wurde ein Modell der Ordnung 2 gewählt, das als allgemeine zeitdiskrete Übertragungsfunktion $Z(z)$ mit dem z -transformierten Teststrom $I_2(z)$ als Eingang und der z -transformierten Klemmenspannung $V_2(z)$ als Ausgang angesetzt wird:

$$Z(z) = \frac{V_2(z)}{I_2(z)} = \frac{b_0 b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3)$$

[0043] Die freien Parameter der Übertragungsfunktion werden in den Parametervektoren $\theta_a = [a_1 \ a_2]$ und $\theta_b = [b_0 \ b_1 \ b_2]$ zusammengefasst.

[0044] Diese Übertragungsfunktion kann mit der Regelungsnormalform in eine äquivalente Zustandsraumdarstellung gebracht werden:

$$x_{Lk+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}}_{A_L} \cdot x_{Lk} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{B_L} \cdot i_{2k} \quad (4)$$

$$v_{2k} = \underbrace{[b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0]}_{C_L} \cdot x_{Lk} + b_0 \cdot i_{2k} \quad (5)$$

[0045] Nun müssen noch die unbekannten Parameter mit Hilfe einer Identifikationsmethode bestimmt werden. Nachfolgend wird ein dafür mögliches Verfahren beispielhaft beschrieben.

[0046] Mit Hilfe eines Reglers basierend auf dem Modell des Batterietesters ohne Lastmodell wird der Prüfling mit einer Laststrom-Anregungssequenz beaufschlagt. Die währenddessen aufgezeichneten Spannungs- und Stromwerte werden in den Messdatenvektoren i_2 (Eingangsdaten) und v_2 (Ausgangsdaten) zusammengefasst. N sei die Anzahl der Elemente der beiden Vektoren (= Länge der Anregungssequenz in Abtastschritten).

[0047] Als Ausgangsbasis wird mit dem tool `ident.m` aus der Matlab Identifikations-Toolbox eine grobe Schätzung von Modellparametern erzeugt. Zuerst wird von den Messdatenvektoren der jeweilige Mittelwert subtrahiert. Zusätzlich werden die Daten mit einem Tiefpass gefiltert, um hochfrequente Störeinflüsse zu beseitigen. Dann wird das tool verwendet um die Parametervektoren θ_a, θ_b für ein ARX-Modell mit Nenner- und Zählergrad 2 zu schätzen.

[0048] Mit dem geschätzten Parametersatz kann anschließend die Antwort $\tilde{v}_2$ des Modells auf den gemessenen Stromverlauf i_2 simuliert und mit dem gemessenen Spannungsverlauf v_2 verglichen werden. Wenn dabei ein großer Unterschied zwischen gemessenem und simuliertem Spannungsverlauf festgestellt wird, können die Parameter mittels Optimierung verbessert werden.

[0049] Ziel der Optimierung ist, die Summe der Fehlerquadrate J als Funktion von den Modellparametern θ_a, θ_b zu minimieren:

$$\min J(\theta_a, \theta_b)$$

[0050] Mit $J(\theta_a, \theta_b) = e(\theta_a, \theta_b)^T \cdot e(\theta_a, \theta_b)/N$ und $e(\theta_a, \theta_b) = v_2 - \tilde{v}_2(\theta_a, \theta_b)$, wobei $\tilde{v}_2(\theta_a, \theta_b)$ das jeweilige Simulationsergebnis für die Parameter θ_a, θ_b mit dem Eingangssignal i_2 ist.

[0051] Alternativ können auch andere Identifikationsverfahren verwendet werden (bspw. Output- Error Methoden (OE)), die ein Modell mit der oben beschriebenen Struktur liefern.

[0052] Die beiden bisher beschriebenen Teilmodelle müssen noch zu einem Modell der Regelstrecke zusammengefasst werden.

[0053] Dafür wird ein erweiterter Zustandsvektor zusammengesetzt aus den Zustandsvektoren der Teilmodelle $x_{Lk} = [x_{dk}^T \quad x_{Lk}^T]^T$ verwendet. Durch die Verbindung des Ausgangs $i_{2k} = C_d \cdot x_{ck}$ des Batterietestmodells mit dem Eingang i_{2k} des Lastmodells und durch die Verbindung des Ausgangs $v_{2k} = C_L \cdot x_{Lk} + b_0 \cdot i_{2k}$ des Lastmodells mit dem Störeingang v_{2k} des Batterietesters entsteht folgendes erweiterte Zustandsraummodell:

$$\begin{bmatrix} x_{dk+1} \\ x_{Lk+1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_d + E_d b_0 C_d & E_d C_L \\ B_L C_d & A_L \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} x_{dk} \\ x_{Lk} \end{bmatrix}}_{x_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot d_k V_0 + \underbrace{\begin{bmatrix} E_d \\ 0 \end{bmatrix}}_E \cdot \tilde{v}_{2k}$$

$$v_{2k} = \underbrace{[C_d \quad 0]}_C \cdot \begin{bmatrix} x_{dk} \\ x_{Lk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0054] Dieses erweiterte Modell kann auch in Matlab mit dem Befehl `connect.m` erzeugt werden.

[0055] Das dargestellte Modell wurde für die weiter unten beschriebenen Versuche verwendet.

Es ist aber zu berücksichtigen, dass dieses Modell für den Fall $b_0 \neq 0$ nur näherungsweise gilt. Eine bessere Beschreibung des Verhaltens der erweiterten Regelstrecke könnte erreicht werden, wenn b_0 bereits im zeitkontinuierlichen Modell des Batterietester berücksichtigt werden würde. Wegen der Erweiterung des Zustandsvektors muss sowohl der Regler als auch der Beobachter auf das erweiterte Modell ausgelegt werden.

[0056] Das beschriebene Verfahren wurde an einer Versuchsanlage getestet. Für die Versuche stand keine Traktionsbatterie als Prüfling zur Verfügung, deswegen wurde ein Batteriesimulator als Prüflast verwendet. Es ist zu beachten, dass der Batteriesimulator mit einem relativ langsamen Regler als Konstantspannungsquelle betrieben wurde. Dessen dynamisches Verhalten unterscheidet sich deutlich von dem einer Batterie. Trotzdem konnte zumindest die prinzipielle Machbarkeit gezeigt werden. Das obere Diagramm der Fig. 6 zeigt die PRB-Sequenz, das mittlere den eingeregelter Prüfstrom und das untere die daraus resultierenden Klemmenspannung.

[0057] Wie aus der Fig. 7 hervorgeht, welche die simulierte Ausgangsspannung für die Parameter darstellt, die beispielsweise mit dem MatLab-Befehl `ident.m` bestimmt wurden, wird damit das Verhalten des Systems nur unzureichend nachgebildet. Die hier verwendeten Parameter dienten aber als Startwerte für die Optimierung der Parameter.

[0058] Nach Optimierung der Parameter hingegen ergibt sich die simulierte Systemantwort der Fig. 8, wobei für die simulierte Ausgangsspannung eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messdaten erreicht werden konnte. Die hier verwendeten Parameter wurden verwendet, um den Regler mit Lastmodell auszulegen.

[0059] Die Fig. 9 schließlich zeigt die gemessene Antwort des Prüfstroms auf einen Sollwertsprung bei Verwendung des Regler ohne (blau) und mit (rot) Lastmodell. Der Regler mit Lastmodell erreicht den Sollwert schneller und die Überschwingweite fällt geringer aus als beim Regler ohne Lastmodell. Allerdings tritt nach dem ersten Anstieg des Stroms ein kurzes Unterschwingen auf.

[0060] Das beschriebene Verfahren bietet die Möglichkeit einen modellprädiktiven Stromregler eines Batterietester um ein Modell der Last zu erweitern und dadurch die Dynamik der Stromregelung für einen bestimmten Prüfling zu verbessern. Auf Grund der Verwendung eines generischen Lastmodells ist die Anwendung nicht Batterien eingeschränkt, sondern kann auch auf andere Lasten angewendet werden.

[0061] Vorzugsweise werden die Modellparameter im laufenden Betrieb laufend mitgeschätzt (bspw. mit Recursive Least Squares (RLS)), wenn sich die Dynamik der Last während des Betriebs zu stark ändert. Auch der Regler wird dann mit den veränderlichen Parametern zur Laufzeit ständig neu ausgelegt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Prüfung von elektrischen Energiespeichersystemen für den Antrieb von Fahrzeugen, bei dem der Laststrom des Energiespeichersystems mittels eines Regelkreises einem gemäß vorgegebenen Testzyklen zeitlich veränderlichen Referenzstrom möglichst ohne Verzugszeit nachgeführt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Regelkreis mittels eines modellbasierten Reglerentwurfsverfahrens erstellt wird, bei welchem in das Modell der Regelstrecke ein Modell der Impedanz des Energiespeichersystems eingebunden ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Parameter für ein generisches Modell der Batterieimpedanz durch zumindest eine kurze Anregungssequenz und Messung der resultierenden Werte von Strom und Spannung identifiziert werden.
3. Vorrichtung zur Prüfung von elektrischen Energiespeichersystemen für den Antrieb von Fahrzeugen, mit einem Regelkreis zur Nachführung des Laststromes des Energiespeichersystems gemäß vorgegebenen Testzyklen nach einem zeitlich veränderlichen Referenzstrom möglichst ohne Verzugszeit, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Regelkreis eine modellbasierte Regelung realisiert und in dessen Modell ein Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein vom Arbeitspunkt der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein vom Ladezustand der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein vom Alter der Batterie abhängiges Modell der Batterieimpedanz eingebunden ist.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Regelkreis eine modellbasierte prädiktive Regelung realisiert ist.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Modell der Batterieimpedanz als Übertragungsfunktion 2. oder höherer Ordnung dargestellt ist.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

1 / 3

Fig. 1

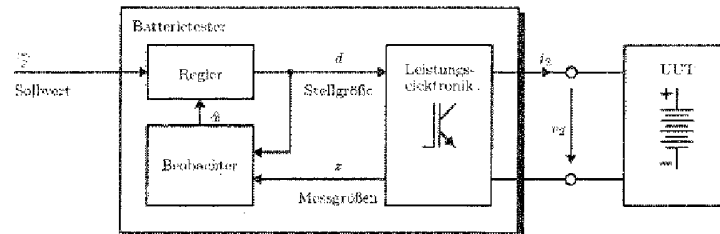


Fig. 2

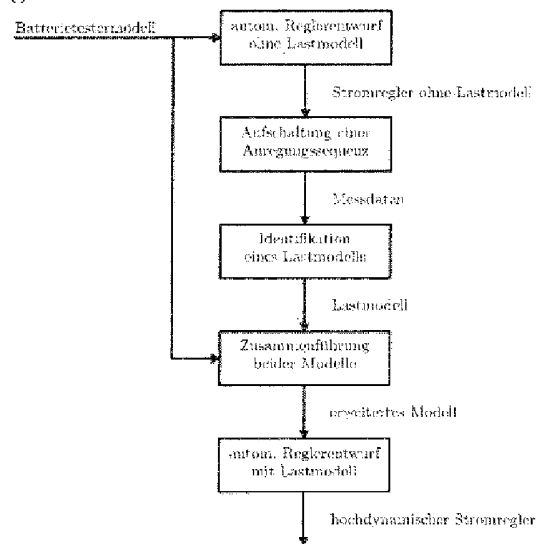
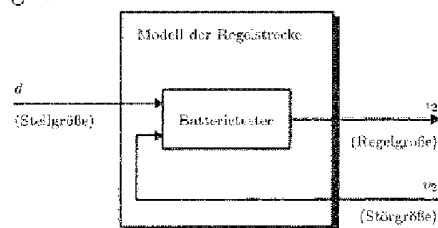


Fig. 3



2/3

Fig. 4

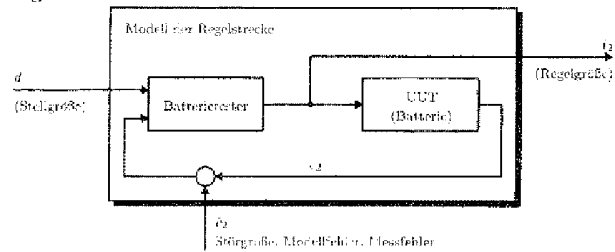


Fig. 5

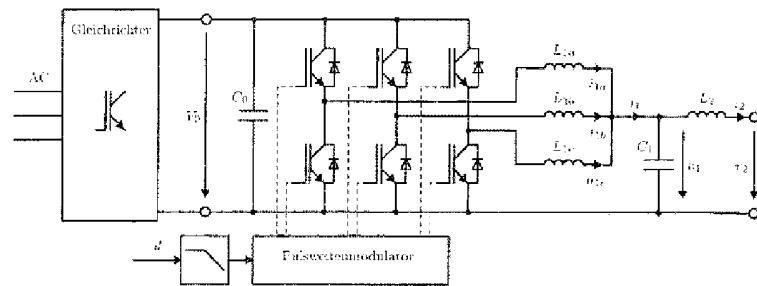


Fig. 6

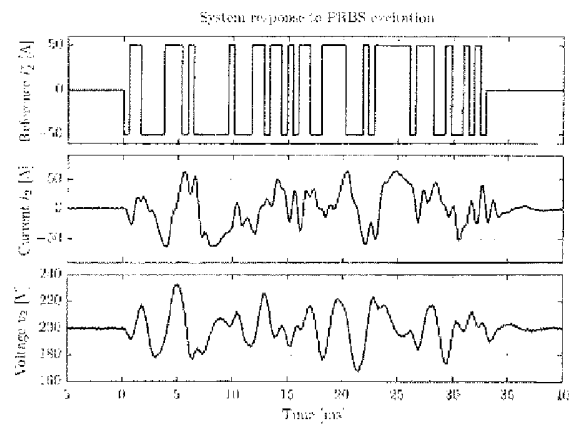
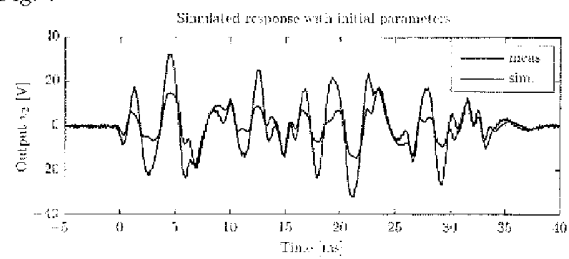


Fig. 7



3/3

Fig. 8

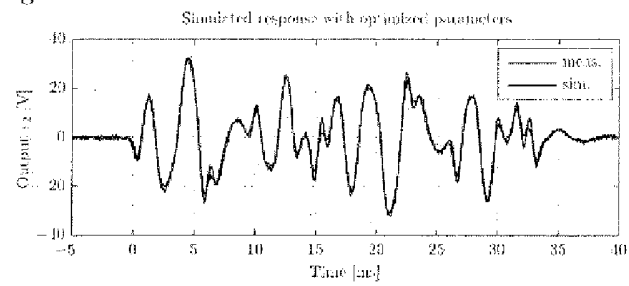


Fig. 9

