



SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 710 823 A1

(51) Int. Cl.: H02J 13/00 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 00304/15

(71) Anmelder:
BKW Energie AG, Viktoriaplatz 2
3013 Bern (CH)
Supercomputing Systems AG, Technoparkstrasse 1
8005 Zürich (CH)
Elektrizitätswerke der Stadt Zürich, Tramstrasse 35
8050 Zürich (CH)
Bacher Energie AG, Rütistrasse 3a
5400 Baden (CH)

(22) Anmeldedatum: 05.03.2015

(72) Erfinder:
Ouwen Xu, 8046 Zürich (CH)
Benjamin Geisser, 8610 Uster (CH)
Alain Brenzikofer, 8049 Zürich (CH)
Sasa Tomic, 8036 Brüttisellen (CH)
Marc Eisenreich, 2560 Nidau (CH)

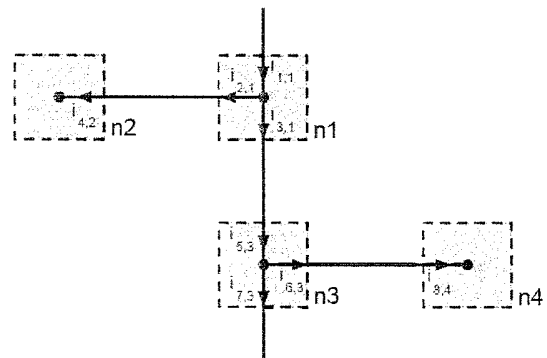
(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.09.2016

(74) Vertreter:
Keller & Partner Patentanwälte AG, Eigerstrasse 2
Postfach
3000 Bern 14 (CH)

(54) Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes.

(57) Bei einem erfindungsgemässen Verfahren zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes, umfassend Netzknoten (n_1, n_2, n_3, n_4) und Netzverbindungen, werden folgende Schritte ausgeführt: a) für eine Mehrzahl von Netzknoten ($n_1 \dots n_4$) wird eine Mehrzahl von zeitsynchronen Strom-Messwerten für Netzverbindungen gewonnen, die mit dem jeweiligen Netzknoten ($n_1 \dots n_4$) verbunden sind; b) zur Gewinnung von Übereinstimmungswerten wird die Übereinstimmung von Messwerten ($i_{3,1}, i_{5,3}$) für Netzverbindungen, die mit unterschiedlichen Netzknoten (n_1, n_3) verbunden sind, evaluiert; und c) die Topologie wird anhand der Übereinstimmungswerte rekonstruiert. Mit dem Verfahren können robuste und genaue Ergebnisse für die Topologie des untersuchten Stromversorgungsnetzes erzielt werden. Dies gilt sowohl für Baumnetze als auch für vermaschte Netze, die sich mit herkömmlichen Verfahren nur schwer erfassen lassen.

Die Erfindung betrifft weiterhin eine Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes, umfassend Netzknoten und Netzverbindungen.

Stand der Technik

[0002] Aufgrund der Vermeidung von CO₂-Emissionen ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten über alle Verbrauchergruppen hinweg zunehmend Prozesse elektrifiziert werden (z.B. Wärmepumpen für die Raumheizung, Elektromobilität). Dies führt trotz Steigerung der Effizienz der elektrischen Geräte voraussichtlich zu einem Anstieg des Stromkonsums. Ausserdem wird die Produktion vermehrt dezentral erfolgen, z.B. durch kleinere Photovoltaik-Anlagen, in Zukunft möglicherweise kombiniert mit einem Batterie- oder Wärmespeicher. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Nutzung der Stromnetze. Zum einen wird eine zumindest zeitweise höhere Belastung resultieren. Diese wird sich nicht einfach durch einen proportionalen Ausbau der heutigen Netze auffangen lassen, zumindest ein Teil der Zusatzbelastung wird durch eine effizientere Nutzung der bestehenden Netze abzufedern sein. Zum anderen werden sich aufgrund der gesteigerten Einspeisung in tieferen Netzebenen andersartige Stromflüsse und Spannungen ergeben, die zu bewältigen sind. Beides bedingt, dass die für die Netze verantwortlichen Stellen über aktuelle und möglichst vollständige Informationen zum Netzzustand in allen Netzebenen verfügen. Auf der Basis dieser Informationen lässt sich die Nutzung des Netzes bei gleichbleibender Sicherheit optimieren, z.B. können lokale Verbraucher, Erzeuger und Speicher in Abhängigkeit des lokalen Netzzustandes gesteuert werden.

[0003] Es wurde somit vorgeschlagen, das Stromversorgungsnetz mit einer Reihe von Messeinheiten auszurüsten, um den jeweiligen lokalen Netzzustand erfassen zu können. Um durch entsprechende Messeinheiten erhaltene Grössen (Ströme, Spannungen, entsprechende Phasenwinkel, Frequenzen usw.) sinnvoll interpretieren und weiter verarbeiten zu können, ist es notwendig, die Topologie des Netzes zu kennen, d.h. zu wissen, wie die Netzknoten wie z.B. Verteiler, Transformatoren, Erzeuger und Verbraucher durch Netzverbindungen miteinander verbunden sind.

[0004] Auf höheren Netzebenen ist die Topologie relativ statisch, d.h. sie ändert sich nur im Rahmen von grösseren Infrastrukturprojekten oder temporär bei Störungen. Der Netzplan lässt sich deshalb mit vertretbarem Aufwand nachführen. Gerade auf tieferen Ebenen kann sich die Topologie viel dynamischer ändern, beispielsweise durch die Zuschaltung oder Abtrennung von Erzeugern oder Verbrauchern oder kleinere Infrastrukturprojekte. Die Nachführung eines vollständigen Netzplans ist hier deutlich aufwendiger, ferner lässt sich ein gewisser zeitlicher Versatz zwischen der Änderung im Netz und der Aufdatierung des Netzplans kaum vermeiden. Wird der Interpretation der Messgrössen und der darauf basierenden Steuerung ein nicht zutreffender Netzplan zugrunde gelegt, ergeben sich jedoch Auswertungsfehler. Damit diese nicht zum Problem werden, müssen gewisse zusätzliche Sicherheitsmargen angelegt werden. Entsprechend lässt sich die Effizienz nur in beschränktem Mass steigern.

[0005] Es ist somit wünschenswert, die Topologie des Stromversorgungsnetzes unabhängig von einem Netzplan in Erfahrung bringen zu können, insbesondere auf der Basis von Messwerten, die im Netz gewonnen wurden. Entsprechende Lösungen wurden bereits vorgeschlagen.

[0006] Im Paper L. Zhao et al.: «Topology Identification in Smart Grid with Limited Measurements via Convex Optimization», Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE wird vorgeschlagen, eine Maximum-a-posteriori-Methode (MAP) einzusetzen, um die Topologie zu bestimmen. Die Methode beruht dabei auf vorhandenen Informationen in Bezug auf Leistungsschalter im Stromversorgungsnetz.

[0007] Im Paper Y. Sharon: «Topology Identification in Distribution Network with Limited Measurements», Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE werden Messungen durch normalverteilte Zufallsvariablen approximiert. Aus verschiedenen möglichen Konfigurationen von Echtzeitmessungen kann dann die optimale bestimmt werden, indem die Maximum-Likelihood-Methode eingesetzt wird.

[0008] Im Paper S. Bolognani et al.: «Identification of power distribution network topology via voltage correlation analysis», Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, 2013 wird vorgeschlagen, die Topologie eines Stromversorgungsnetzes anhand von Korrelationen zwischen Spannungsmessungen zu rekonstruieren. Dazu wird aus einer Kovarianzmatrix der Spannungsmessungen eine Konzentrationsmatrix erzeugt, die Gewichte der Kanten eines Graphen enthält, der das Netzwerk repräsentiert.

[0009] Es hat sich gezeigt, dass sich mit den verfügbaren Verfahren die Topologie realer Stromversorgungsnetze und beim Vorhandensein von Rauschen noch nicht ausreichend genau bestimmen lässt.

Darstellung der Erfindung

[0010] Aufgabe der Erfindung ist es, ein dem eingangs genannten technischen Gebiet zugehörendes Verfahren und eine Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes zu schaffen, welche ein genaues und robustes Ergebnis liefern.

[0011] Die Lösung der Aufgabe ist durch die Merkmale des Anspruchs 1 definiert. Gemäss der Erfindung werden im Rahmen des Verfahrens folgende Schritte ausgeführt:

- a) Für eine Mehrzahl von Netzknoten werden eine Mehrzahl von zeitsynchronen Strom-Messwerten für Netzverbindungen, die mit dem jeweiligen Netzknoten verbunden sind, gewonnen.
- b) Zur Gewinnung von Übereinstimmungswerten wird die Übereinstimmung von Messwerten für Netzverbindungen, die mit unterschiedlichen Netzknoten verbunden sind, evaluiert.
- c) Die Topologie wird anhand der Übereinstimmungswerte rekonstruiert.

[0012] Eine entsprechende erfindungsgemässe Einrichtung umfasst:

- a) bei einer Mehrzahl von Netzknoten angeordnete Messeinheiten mit einem Zeitgeber, zur Gewinnung von zeitsynchronen Strom-Messwerten für Netzverbindungen, die mit dem jeweiligen Netzknoten verbunden sind;
- b) ein Auswertesystem zum Evaluieren der Übereinstimmung von Messwerten für Netzverbindungen, die mit unterschiedlichen Netzknoten verbunden sind zur Gewinnung von Übereinstimmungswerten und zur Rekonstruktion der Topologie anhand der Übereinstimmungswerte;
- c) Einrichtungen zur Übertragung der Strom-Messwerte zur Auswerteeinheit.

[0013] Das Verfahren und die Einrichtung sind dazu geeignet, die Topologie eines Stromversorgungsnetzes bzw. eines Bereichs eines Stromversorgungsnetzes, welches mit Messeinheiten ausgerüstet ist, zu erfassen – ein Netzplan wird dazu nicht benötigt. Die Messwerte sind mindestens insofern zeitsynchron, als die zeitliche Abweichung zweier Messungen auch bei voneinander entfernten Netzknoten deutlich kleiner sein soll als die übliche Zeitskala, in welcher sich Änderungen an den im Verfahren verwendeten Strom-Messwerten ergeben. Wird der Phasenwinkel des Stroms – wie weiter unten ausgeführt – in die Auswertung mit einbezogen, so muss die zeitliche Synchronität besonders gut sein. Dazu umfassen die Messeinheiten Zeitgeber, die entsprechend genaue Zeitsignale, Trigger und/oder Zeitstempel liefern können und z.B. auf dem Global Positioning System (GPS) basieren.

[0014] Unter die genannten Netzverbindungen fallen auch Anschlüsse von Verbrauchern oder Erzeugern am jeweiligen Netzknoten. Ströme zu den Verbrauchern bzw. von den Erzeugern werden so ebenfalls systematisch berücksichtigt. Generell sollen die Messeinheiten nach Möglichkeit derart ausgebildet und angeschlossen sein, dass alle Ströme, die einen mit Messeinheiten ausgestatteten Netzknoten durchlaufen, erfasst werden.

[0015] Das Auswertesystem kann als Einheit ausgebildet werden, z.B. als zentrales System, es kann aber auch modular aufgebaut sein. Im zweiten Fall können die Aufgaben des Auswertesystems verteilt von mehreren Systemkomponenten wahrgenommen werden.

[0016] Die Übertragung der Daten kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen, z.B. über ein öffentlich verfügbares mobiles Datennetz (z.B. GSM, Internet), über ein proprietäres Datennetz, über das Stromversorgungsnetz selbst (z.B. BPL – broadband over power lines) usw.

[0017] Es hat sich gezeigt, dass durch Auswertung der Korrelationen der Strommessungen robuste und genaue Ergebnisse für die Topologie des untersuchten Stromversorgungsnetzes erzielt werden können. Dies gilt sowohl für Baumnetze als auch für vermaschte Netze, die sich mit herkömmlichen Verfahren nur schwer erfassen lassen.

[0018] Mit Vorteil umfassen die Strom-Messwerte einen Phasenwinkel des Stroms und beim Evaluieren der Übereinstimmung wird dieser Phasenwinkel mit berücksichtigt. Die Messwerte sind somit komplexwertig, umfassen also einen Betrag und den Phasenwinkel.

[0019] Im Gegensatz zur Verarbeitung reiner Effektivwerte ergeben sich somit aus den Messungen eines vorgegebenen Zeitraums zusätzliche Informationen, die eine präzisere Bestimmung der Topologie ermöglichen.

[0020] Das Verfahren ist grundsätzlich aber auch auf Basis der Effektivwerte durchführbar.

[0021] Vorzugsweise wird zum Evaluieren der Übereinstimmung eine Matrix ausgewertet, welche Strom-Messwerte als Linearkombinationen anderer Strom-Messwerte repräsentiert. Der Zusammenhang lässt sich als $y = W x$ darstellen, wobei y und x Vektoren mit jeweils allen Strom-Messwerten bezeichnen, während W für die Matrix steht, die in der j . Spalte der i . Zeile das Element w_{ij} enthält, welches den Beitrag des j . Stroms des Vektors x zum i . Strom des Vektors y angibt.

[0022] Eine derartige Matrix lässt sich – wie nachfolgend beschrieben – gut verarbeiten, die entsprechende Parametrisierung ermöglicht zudem eine präzise Abbildung der in einem Stromversorgungsnetz auftretenden Stromwerte. Es ist zu beachten, dass das Verfahren unabhängig von der expliziten Darstellung der Linearkombinationen ist, die entsprechenden Parameter müssen somit nicht explizit als Elemente einer Matrix dargestellt werden.

[0023] Bevorzugt wird eine Regressionsanalyse der Matrix vorgenommen, in deren Rahmen Parameter der Matrix optimiert werden. Derartige Verfahren sind gut geeignet, um die Parameter der Matrix, d.h. die Koeffizienten der Linearkombinationen, bestimmen zu können.

[0024] Mit Vorteil wird die Matrix zeilenweise bearbeitet. Dadurch kann ausgeschlossen werden, dass bei der üblichen Verarbeitung der gesamten Matrix unmittelbar die triviale Lösung, nämlich die Einheitsmatrix, reproduziert wird.

[0025] Mit Vorteil wird im Rahmen der Regressionsanalyse vor der Optimierung der Parameter die Matrix anhand von vorbekannten Informationen zu Netzknoten und Netzverbindungen vorverarbeitet. Diese vorbekannten Informationen beinhalten insbesondere die Information, welche der gemessenen Stromwerte demselben Netzknoten zugeordnet sind, denn Stromwerte desselben Netzknotens sollen bei der Bewertung der Übereinstimmung mehrerer Stromwerte in der Regel ausgeklammert werden, die entsprechenden Koeffizienten der Linearkombination sind Null. Ebenfalls soll die resultierende Matrix keine Diagonalelemente (Parameter, welche einen Stromwert mit sich selbst koppeln) enthalten.

[0026] Weitere vorbekannte Informationen, z.B. über den aktuellen Netzplan, können hier ebenfalls einfließen.

[0027] Bei einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens werden Kirchhoffsche Regeln auf die Matrix angewandt, um Netzknoten des Stromversorgungsnetzes zu berücksichtigen, zu welchen keine Strom-Messwerte vorliegen.

[0028] Falls alle Knoten vollständig durch Messeinheiten erfasst sind, sollte letztlich in jeder Zeile der Matrix ein (nicht-diagonales) Element den Wert 1 annehmen, die weiteren Elemente den Wert 0. Das entsprechende Element gibt dann an, zu welchem anderen Netzknoten die untersuchte Netzverbindung führt. Sind Netzknoten nicht erfasst, ergeben sich in einer Zeile mehrere von Null verschiedene Elemente (idealerweise +1 und -1), die letztlich abbilden, welche (untersuchten) Netzverbindungen mit dem nicht direkt erfassten Netzknoten zusammenwirken. Die Werte der Elemente widerspiegeln letztlich die Kirchhoffschen Regeln, angewandt auf den nicht direkt erfassten Netzknoten.

[0029] Die Zeilen der Matrix werden auf das Vorhandensein solcher Kirchhoffscher Regeln überprüft. Eine Regel sollte in der Matrix der Anzahl der involvierten Strommessungen entsprechend oft erscheinen. Falls ein Zusammenhang gemäss einer Kirchhoffschen Regel mit einer gewissen Konfidenz erkannt worden ist, ist es sinnvoll, die entsprechenden anderen Zeilen der Matrix mit entsprechenden Werten zu füllen.

[0030] Mit Vorteil werden Koeffizienten der Matrix durch einen Recursive-Least-Square-Algorithmus (RLS) bestimmt. Normalerweise ist das untersuchte System überbestimmt. Der RLS-Algorithmus liefert eine Schätzung der Koeffizienten des überbestimmten Systems. Aufgrund seiner rekursiven Struktur benötigt RLS wesentlich weniger Speicherplatz als ein Batch-LMS-Algorithmus. Falls auch der Phasenwinkel der erfassten Stromwerte ausgewertet wird, wird eine komplexe Erweiterung (cRLS) eingesetzt (vgl. dazu P. S. Diniz, «Adaptive Filtering», Springer, 1997).

[0031] Mit Vorteil wird ein Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) auf die Matrix angewandt (vgl. R. Tibshirani, «Regression Shrinkage and Selection via the Lasso», Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 58, Iss. 1 (1996), 267–288). Die Optimierung wird in Abhängigkeit eines Abstimmparameters derart beeinflusst, dass nach Möglichkeit Koeffizienten generiert werden, welche exakt den Wert Null annehmen. Dies deckt sich wie oben erwähnt genau mit dem angestrebten Ziel, wonach jede Zeile genau einen von Null verschiedenen Wert annehmen soll.

[0032] Bevorzugt wird der LASSO-Operator mit verschiedenen Werten eines Abstimmparameters auf die Matrix angewandt. Mindestens eine der resultierenden Lösungen wird danach derart modifiziert, dass die Koeffizienten jeweils 0 oder 1 annehmen, anschliessend dient die mindestens eine modifizierte Lösung als Startpunkt für den Recursive-Least-Square-Algorithmus.

[0033] In einer ersten Variante wird diejenige Lösung verwendet, welche die am wenigsten von Null verschiedenen Einträge umfasst. Die Bestimmung des Abstimmparameters ist schwierig. Es hat sich gezeigt, dass durch diese Massnahme ein sinnvoller Wert des Abstimmparameters herangezogen wird und dass sich dadurch ein gut geeigneter Startpunkt für das RLS-Verfahren ergibt, von welchem die Werte der Matrix zuverlässig zum korrekten Ergebnis konvergieren.

[0034] In einer zweiten, bevorzugten Variante dienen mehrere modifizierte Lösungen als Startpunkte für den Recursive-Least-Square-Algorithmus und dasjenige Ergebnis des Recursive-Least-Square-Algorithmus wird ausgewählt, welches nicht-trivial ist und den geringsten Vorhersagefehler aufweist. Tests haben gezeigt, dass diese Variante die zuverlässigsten Ergebnisse liefert und auch bei relativ starkem Rauschen noch gut funktioniert.

[0035] Mit Vorteil werden nach der Optimierung der Parameter der Matrix die erhaltenen Parameter analysiert und die Matrix wird anhand von Ergebnissen der Analyse in einen ausgewerteten Bereich und einen noch weiter zu verarbeitenden Bereich aufgeteilt. Für den noch weiter zu verarbeitenden Bereich wird dann eine erneute Optimierung der Parameter vorgenommen. Mehrere solcher Iterationen können aufeinanderfolgend ausgeführt werden. Ein Abbruchkriterium kann die Tatsache darstellen, dass nach einer Analyse keine weiteren Bereiche der Matrix dem ausgewerteten Bereich zugeordnet werden können. Die verbleibenden, noch zu bearbeitenden Bereiche entsprechen Subgraphen, welche durch andere Verfahren ausgewertet oder als virtuelle Ladungen der bestimmten Topologie hinzugefügt werden können.

[0036] Die genannten Bereiche der Matrix sind in der Regel nicht zusammenhängend, d.h. sowohl der verarbeitete Bereich als auch der noch weiter zu verarbeitende Bereich sind aus nicht zusammenhängenden Kombinationen von Zeilen und Spalten der Matrix zusammengesetzt.

[0037] Aus der nachfolgenden Detailbeschreibung und der Gesamtheit der Patentansprüche ergeben sich weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Merkmalskombinationen der Erfindung.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0038] Die zur Erläuterung des Ausführungsbeispiels verwendeten Zeichnungen zeigen:

- Fig. 1A eine schematische Darstellung eines Ausschnitts aus einem Stromversorgungsnetz;
- Fig. 1B eine schematische Darstellung der messtechnischen Abbildung des Netzabschnitts aus der Fig. 1A;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung von vier miteinander verbundenen Netzknoten;
- Fig. 3 ein Flussdiagramm zum generellen Ablauf eines erfindungsgemässen Verfahrens;
- Fig. 4 eine schematische Darstellung dreier linear verbundener Knoten;
- Fig. 5 eine schematische Darstellung eines nicht messtechnisch erfassten Knotens mit vier Nachbarknoten;
- Fig. 6 eine schematische Darstellung eines Knotens mit zusätzlicher Last;
- Fig. 7 ein Flussdiagramm des erfindungsgemässen Verfahrens;
- Fig. 8 ein Flussdiagramm der Koeffizientenbestimmung;
- Fig. 9A–F Flussdiagramme zur Koeffizientenanalyse und -Verarbeitung; und
- Fig. 10A, B Flussdiagramme zur Behandlung von Netzknoten mit zusätzlichen Lasten oder Stromquellen.

[0039] Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen. Wege zur Ausführung der Erfindung

[0040] Das erfindungsgemässe Verfahren dient zur Ermittlung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes. Ein kleiner Ausschnitt aus einem solchen Netz ist in der Fig. 1A dargestellt. Das Netz 1 umfasst Hausanschlüsse 2.1 ... 2.6, welche über Verteilerkästen DC oder unterirdische Anschlüsse S mit der Zuleitung 3 gekoppelt sind. In der Fig. 1B ist die messtechnische Abbildung des in der Fig. 1A gezeigten Netzausschnitts dargestellt: In den Verteilerkästen DC und bei den Hausanschlüssen 2.1 ... 2.6 ist je eine Messeinheit PMU angeordnet, welche u.a. komplexe Stromwerte aller am jeweiligen Ort eintreffender Leitungen misst und an eine Zentrale übermittelt. Die unterirdischen Anschlüsse S sind nicht ohne weiteres erreichbar und deshalb nicht mit Messeinheiten PMU ausgerüstet.

[0041] Ausgangspunkt des beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes sind die Messdaten und die Kenntnis, von welcher Messeinheit sie stammen. Der Ort der Messeinheit innerhalb des Netzes ist aber a priori nicht bekannt. Bei den Messdaten handelt es sich um komplexe Stromwerte, d.h. um zeitliche Verläufe des Betrags und des Phasenwinkels in Bezug auf die von den an den Netzknoten angeordneten Messeinheiten überwachten Verbindungsleitungen. Wie anhand der in der Fig. 2 gezeigten vier Netzknoten n1 ... n4 dargestellt, sollen nun zur Ermittlung der Topologie der eingehende und der ausgehende Knoten in Bezug auf eine Verbindungsleitung bestimmt werden. Beispielsweise deutet die Tatsache, wonach $i_{3,1} = i_{5,3}$ ist, darauf hin, dass der Knoten n1 mit dem Knoten n3 verbunden ist.

[0042] Der generelle Ablauf des Verfahrens ist in der Fig. 3 schematisch dargestellt.

[0043] Zunächst wird das System identifiziert, d.h. die zu verarbeitenden Messwerte werden zusammengestellt und die Übereinstimmungen (Korrelationen) zwischen den einzelnen Stromwerten werden bestimmt (Schritt 11). Anschliessend wird das System anhand dieser Übereinstimmungen analysiert (Schritt 12). Falls sich das System reduzieren lässt (Entscheidung 13), so wird diese Reduktion vorgenommen (Schritt 14) und das System auf der Basis des reduzierten Parametersatzes erneut identifiziert (Schritt 11). Lässt sich das System nicht weiter reduzieren (Entscheidung 13), werden die verbliebenen Komponenten miteinander verbunden (Schritt 15). Das Ergebnis ist die Topologie des analysierten Netzes. Die einzelnen Schritte sind im Folgenden näher beschrieben. Der effektive Verfahrensablauf ist durch detailliertere Flussdiagramme in den Fig. 7–10 illustriert.

[0044] Um die Beziehungen zwischen den gemessenen Stromwerten zu identifizieren, werden entsprechende Übereinstimmungen bzw. Kopplungen mit Werkzeugen der Regressionsanalyse approximiert. Die Situation wird durch die Gleichung

$$y = W x$$

beschrieben, wobei die Vektoren x und y sämtliche berücksichtigten Strom-Messwerte umfassen und die Matrix W die Koeffizienten von Linearkombinationen angibt, wobei in der j . Spalte der i . Zeile die Matrix das Element $w_{i,j}$ enthält, welches den Beitrag des j . Stroms des Vektors x zum i . Strom des Vektors y angibt:

$$\begin{bmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \\ i_{4,2} \\ \vdots \\ i_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} & w_{1,4} & \dots & w_{1,m} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & w_{2,3} & w_{2,4} & \dots & w_{2,m} \\ w_{3,1} & w_{3,2} & w_{3,3} & w_{3,4} & \dots & w_{3,m} \\ w_{4,1} & w_{4,2} & w_{4,3} & w_{4,4} & \dots & w_{4,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & w_{m,2} & w_{m,3} & w_{m,4} & \dots & w_{m,m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \\ i_{4,2} \\ \vdots \\ i_{m,n} \end{bmatrix}$$

wobei $i_{m,n}$ angibt, dass es sich um den m . Stromwert des gesamten Sets handelt und dass dieser Wert von der n . Messeinheit stammt.

[0045] Da der Eingangs- und der Ausgangsvektor x, y identisch sind, stellt die Identitätsmatrix I eine triviale Lösung dar. Um diese Lösung zu vermeiden, wird die Matrix W nicht als Ganzes verarbeitet, sondern ein zeilenweises Update vorgenommen. In jeder Zeile wird zunächst einmal das Diagonalelement entfernt. Weil bekannt ist, welche Messwerte von welchem Netzknoten stammen, kann der Trainingsvektor für jede Zeile weiter reduziert werden, denn alle Ströme desselben Netzknoten können ebenfalls ausser Acht gelassen werden. Die resultierende Parametermatrix W hat anschliessend folgende Form:

$$\begin{bmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \\ i_{4,2} \\ \vdots \\ i_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & w_{1,4} & \dots & w_{1,m} \\ 0 & 0 & 0 & w_{2,4} & \dots & w_{2,m} \\ 0 & 0 & 0 & w_{3,4} & \dots & w_{3,m} \\ w_{4,1} & w_{4,2} & w_{4,3} & 0 & \dots & w_{4,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & w_{m,2} & w_{m,3} & w_{1,3} & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1,1} \\ i_{2,1} \\ i_{3,1} \\ i_{4,2} \\ \vdots \\ i_{m,n} \end{bmatrix}$$

[0046] Die zwei Verfahren, die zur Parameterbestimmung angewendet werden sind das Recursive-Least-Squares-Verfahren (RLS) und der Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO).

[0047] Die Fig. 7 gibt einen Überblick über das gesamte Verfahren. Funktionsblöcke, die in weiteren Flussdiagrammen (Fig. 8–10) dargestellt sind, sind jeweils durch doppelt umrahmte Rechtecke symbolisiert.

[0048] Es kann sein, dass das untersuchte Netz Knoten umfasst, welche nur einen eingehenden und einen ausgehenden Strom aufweisen. Es ergibt sich dann die in der Fig. 4 gezeigte Situation: alle dort gezeigten Ströme sind identisch. Um nun Redundanzen zu vermeiden, werden zunächst die Ströme von Knoten wie dem Knoten 6 zu einem einzelnen Strom zusammengefasst, bevor die Parameteranpassung durchgeführt wird (Schritt 101). Trotzdem ergibt sich nach der Anpassung eine Beziehung von $i_{16} = 0.5i_6 + 0.5i_{19}$. Solche mehrfachen im Wesentlichen gleich grossen Parameter müssen gesondert behandelt werden, dies ist unten, im Zusammenhang mit der Fig. 9C, beschrieben.

[0049] Eine derartige Sonderbehandlung lässt sich vermeiden, indem bereits beim Einrichten der Messeinheiten darauf geachtet wird, dass derartige Knoten mit nur zwei Verbindungen nicht mit Messeinheiten ausgerüstet werden.

[0050] Nach dieser Anpassung werden zunächst die Koeffizienten der Matrix W bestimmt (Schritt 200). Der entsprechende Ablauf ergibt sich aus dem Flussdiagramm in Fig. 8. Er ist weiter unten im Detail beschrieben. Anschliessend werden die ermittelten Koeffizienten analysiert und verarbeitet (Schritt 300). Der entsprechende Ablauf ergibt sich aus den Flussdiagrammen gemäss den Fig. 9A–9F und der untenstehenden Beschreibung.

[0051] Ströme bzw. Koeffizienten, die Netzknoten zugeordnet sind, die nach der Verarbeitung durch die entsprechenden Koeffizienten in der Matrix bereits gut beschrieben sind, können dann aus den Vektoren bzw. der Matrix entfernt werden (Schritt 102). Falls sich dadurch eine Reduktion der Grösse der Matrix ergeben hat (Entscheidung 103), wird anschliessend erneut eine Bestimmung der Koeffizienten (Schritt 200) durchgeführt.

[0052] Falls keine weitere Reduktion mehr möglich war (Entscheidung 103), werden die zunächst im Schritt 101 entfernten Knoten mit nur zwei Strömen dem Verzeichnis der Knoten und Ströme wieder hinzugefügt (Schritt 104). Es wird dann eine Bestimmung der Koeffizienten (analog zum Schritt 200) anhand des noch divergenten Sets von Knotenströmen durchgeführt (Schritt 105). Anschliessend werden analog zur Analyse und Verarbeitung der aus der Matrix W bereits vorher bestimmten Komponenten (vgl. Schritt 300) Kirchhoffsche Regeln gesucht und verarbeitet (Schritt 107), wie weiter unten näher beschrieben.

[0053] Falls sich dadurch eine Reduktion der Grösse der Matrix ergeben hat (Entscheidung 108) wird eine erneute Bestimmung der Koeffizienten der Matrix W (Schritt 200) vorgenommen und das Verfahren dort fortgesetzt. Ansonsten wird das Verfahren mit der Endverarbeitung gemäss Funktionsblock 400 fortgesetzt (siehe unten).

[0054] Idealerweise enthalten die Zeilen der Parametermatrix W am Schluss nur noch genau einen Wert, der von 0 verschieden ist und 1 beträgt. Dies entspricht einer eindeutigen Beziehung zweier (unterschiedlicher) gemessener Stromwerte und zeigt an, dass zwei Knoten durch genau eine Leitung (direkt) miteinander verbunden sind. Weil beim Auftreten

von Rauschen die Werte nicht genau 0 bzw. 1 betragen werden, wird ein Schwellenwert vorgegeben. Werte, die diesen Schwellenwert nicht übersteigen, werden 0 gesetzt, die anderen Werte 1. Bezogen auf das Beispiel in der Fig. 2 ergibt sich folgendes Resultat:

$$i_{3,1} = [0 \dots 0 \ 10 \ 0 \dots 0] \text{error: character: not found} [i_{1,1} \dots i_{4,2} \ i_{5,3} \ i_{6,3} \dots i_{8,4}]^T$$

[0055] Es ist möglich, dass gewisse Netzknoten mit Lasten (oder Stromquellen) verbunden sind, die sonst nirgends erfasst werden. Solche Knoten müssen besonders behandelt werden (siehe unten). Es ist ebenfalls möglich, solche Knoten bereits bei der Zuordnung von Messeinheiten vorzumerken und aus der Analyse auszuschliessen.

[0056] Nach der Bestimmung der Parameter werden somit für jede Zeile der Matrix W die in der Fig. 9B schematisch dargestellten Schritte des Funktionsblocks 310 durchgeführt. Zunächst werden die Koeffizienten mit Wert 1 in der untersuchten Zeile identifiziert (Schritt 311). Es wird anschliessend geprüft, ob es einen einzigen solchen Wert in der Zeile gibt (Entscheidung 312). Falls ja, wird geprüft, ob alle anderen Elemente einen Wert unter einem vorgegebenen Grenzwert annehmen (Entscheidung 313). Ist dies auch der Fall, wird für die untersuchte Zeile die entsprechende Position zurückgegeben (Schritt 315). Falls es mehrere Elemente mit Wert 1 gibt oder falls daneben Werte vorhanden sind, die den Schwellenwert überschreiten, wird die Zeile zum divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set hinzugefügt (Schritt 314). Solange nicht alle Zeilen bearbeitet worden sind (Entscheidung 316), wird mit der Analyse der nächsten Zeile fortgefahren.

[0057] Nach Durchlaufen des Funktionsblocks 310 wird geprüft, ob sich entsprechende Zeilen ergeben haben (Entscheidung 301). Ist dies der Fall, werden die betroffenen Koeffizienten der Matrix identifiziert (Schritt 302) und entsprechend überschrieben (Schritt 308). Es folgt – wie oben erwähnt – eine neue Bestimmung der Koeffizienten.

[0058] Falls keine Zeile mit einer eindeutigen 1 identifiziert werden konnte (Entscheidung 301), werden die Zeilen auf mehrere Parameter mit ungefähr gleichem Wert hin untersucht (Funktionsblock 320, vgl. Fig. 9C). Wie oben erwähnt, ergeben sich trotz der Zusammenfassung von Knoten, die nur zwei Verbindungen aufweisen, im Rahmen der Bestimmung der Koeffizienten Zeilen, welche mehrere Elemente mit im Wesentlichen demselben Wert aufweisen. In Abhängigkeit der Anzahl der zusammengefassten Netzknoten n wird zunächst der erwartete Wert $f = 1/n$ berechnet (Schritt 321). Anschliessend werden die Zeilen auf diesen Wert hin untersucht (Schritt 322). Werden solche Werte gefunden, wird überprüft, ob die weiteren Elemente der entsprechenden Zeile nahe bei Null sind (Entscheidung 323). Ist dies der Fall, erfolgt die Prüfung, ob das Element tatsächlich n mal auftritt (Entscheidung 324). Ist dies ebenfalls der Fall, werden die Positionen der Koeffizienten mit diesem Wert zurückgegeben. Das entspricht gleichen Strömen auf einem Netzpfad ohne Abzweigungen. Diese Knotenpunkte werden dann nach der Spannung sortiert (Schritt 326). Falls nebst den ermittelten Werten Koeffizienten vorhanden sind, die erheblich von Null verschieden sind oder falls die Anzahl der ermittelten Koeffizienten nicht mit n übereinstimmt, so wird die Zeile zum divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set hinzugefügt (Schritt 325).

[0059] Nach Durchlaufen des Funktionsblocks 320 wird geprüft, ob sich entsprechende Zeilen ergeben haben (Entscheidung 303). Ist dies der Fall, werden die betroffenen Koeffizienten der Matrix identifiziert (Schritt 304), nach Spannung sortiert (Schritt 305) und entsprechend überschrieben (Schritt 308). Es folgt – wie oben erwähnt – eine neue Bestimmung der Koeffizienten.

[0060] Falls keine Zeile mit mehreren Parametern mit gleichem Wert identifiziert werden konnte (Entscheidung 303), werden die Zeilen auf Kirchhoffsche Regeln hin untersucht (Funktionsblock 330, vgl. Fig. 9D).

[0061] Falls Netzknoten nicht überwacht sind, z.B. weil sie nicht mit einer Messeinheit ausgerüstet sind oder wenn diese ausfällt, werden gewisse Zeilen der Matrix nach der Bestimmung der Koeffizienten kein eindeutiges Bild liefern, d.h. diese Zeilen werden keine einzelne 1 enthalten. Für Netzverbindungen, die sich an einem Netzknoten treffen, gelten jedoch die Kirchhoffschen Regeln. Diese sollten sich im Rahmen der Koeffizientenbestimmung ergeben. Die Fig. 5 zeigt ein Beispiel eines Ausschnitts aus einem Netz, bei welchem ein Netzknoten 2 nicht von Messungen erfasst wird. Mit der Annahme, dass die Ströme von oben nach unten fliessen ergibt sich folgende Kirchhoffsche Regel:

$$\mathbf{[0062]} \quad i_1 = i_5 + i_3 + i_{13}.$$

[0063] Generell werden beim Vorhandensein von Kirchhoffschen Regeln Werte von +1 bzw. -1 in den Zeilen der Matrix erwartet. Umfasst eine Zeile somit mehrere Werte mit Betrag 1, so wird angenommen, dass sie eine Kirchhoffsche Regel abbildet. Zusätzlich sollte eine solche Regel mehrfach erscheinen, nämlich der Anzahl der von der Regel erfassten Ströme entsprechend. Im obigen Fall wären folgende Regeln auf den entsprechenden anderen Zeilen der Matrix zu erwarten:

$$i_5 = i_1 - i_3 - i_{13};$$

$$i_3 = i_1 - i_5 - i_{13};$$

$$i_{13} = i_1 - i_5 - i_3.$$

[0064] Zunächst werden zeilenweise Elemente gesucht, deren Betrag den Wert 1 annimmt (Schritt 331). Falls alle anderen Elemente ungefähr den Wert 0 haben (Entscheidung 332) und falls die Elemente mit Betrag 1 eine Kirchhoffsche Regel erfüllen (Entscheidung 333), so wird diese Regel erfasst (Schritt 335), ansonsten wird die Zeile wieder dem divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set hinzugefügt (Schritt 334). Nach der Analyse der gesamten Matrix werden – falls Regeln ermittelt werden konnten (Entscheidung 306) die von den ermittelten Regeln betroffenen Koeffizienten der Matrix identifiziert (Schritt 307).

[0065] Wie bereits erwähnt, ergeben sich Kirchhoffsche Regeln auch bei Lasten (oder Stromquellen), die mit Netzknoten verbunden sind, welche nicht messtechnisch erfasst werden. Wenn beispielsweise in der Situation in der Fig. 2 der Strom

$i_{1,1}$ von einer solchen Last herrührt, ergibt sich die Kirchhoffsche Regel $i_{1,1} = i_{4,2} + i_{5,3}$. Offensichtlich rührt dies daher, dass $i_{2,1} = i_{4,2}$ und $i_{3,1} = i_{5,3}$. Somit ist vor dem Setzen von Parametern gemäss Kirchhoffschen Regeln zu prüfen, ob die Zusammenhänge, welche durch die Regel abgebildet werden, schon durch andere Parameterzeilen gegeben sind (Funktionsblock 340). Werden solche Zeilen gefunden (Entscheidung 341), wird die untersuchte Zeile wieder zum divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set hinzugefügt (Schritt 344). Dasselbe gilt auch, wenn versteckte Kirchhoffsche Regeln involviert sind (Entscheidung 342). Ansonsten wird ein virtueller Knoten erzeugt (Schritt 340)

[0066] In komplizierten Fällen, z.B. bei vermaschten Netzen, ist die Konsistenz nicht garantiert. Aus diesem Grund wird im Rahmen des beschriebenen Verfahrens angenommen, dass die weiteren Regeln ebenfalls gelten, wenn eine Regel klar etabliert worden ist. Entsprechend werden Parameter der entsprechenden Zeilen der Matrix gemäss den weiteren Regeln gesetzt (Funktionsblock 350). Dazu werden zunächst alle identifizierten Regeln gesammelt (Schritt 351). Dann wird geprüft, ob alle äquivalenten Regeln in dieser Sammlung bereits enthalten sind (Entscheidung 352). Ist dies nicht der Fall, werden die fehlenden Regeln generiert (Schritt 353). Die von den Regeln abgedeckten Zeilen der Matrix können dann aus dem divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set entfernt werden (Schritt 354).

[0067] Werden auch keine Kirchhoffschen Regeln ermittelt (Entscheidung 306), so werden die vorhandenen Zeilen der Matrix zum divergierenden und weiter zu verarbeitenden Set hinzugefügt (Schritt 309).

[0068] Wie bereits erwähnt, erfordern Netzknoten mit zusätzlichen Lasten oder Stromquellen eine besondere Behandlung. Diese wird durch den Funktionsblock 400 (vgl. Fig. 10A, 10B) wahrgenommen. Weil der Laststrom an diesen Netzknoten nur einmal gemessen wird, stimmen die Kirchhoffschen Regeln in Bezug auf diese Netzknoten nicht mehr, wenn sie sich nicht in den berücksichtigten Messungen finden. Die Fig. 6 illustriert einen solchen Fall: Wenn der Netzknoten 35 nicht mehr erfasst wird, ergibt sich die Kirchhoffsche Regel $i_1 = i_2 + i_3 + i_L$. Der Laststrom i_L tritt nun aber ausschliesslich am (nicht gemessenen) Netzknoten 35 auf. Er wird somit nicht durch die betrachtete Matrix abgebildet. Somit können auf die Matrix angewandte Regressionsverfahren keine sinnvollen Parameter für diese Kirchhoffsche Regel liefern. Es ergeben sich Zeilen, die als divergent eingestuft werden müssen.

[0069] Somit verbleiben nach der Koeffizientenbestimmung u. U. einige Zeilen, die nicht klar einer Topologie zugeordnet werden können (Entscheidung 401), entsprechend bleiben Subgraphen übrig. Diese Subgraphen lassen sich mit der Funktion `components()` der allgemein verfügbaren Bibliothek `MatlabBGL` für `Matlab` bestimmen (Funktionsblock 410).

[0070] Um die korrekte Verbindung abzuschätzen, kann beispielsweise die `Matlab`-Funktion `corrQ` eingesetzt werden: Weil derartige Fälle lokal begrenzt sind, beschränkt sich die Zielsetzung auf das Verbinden der verbleibenden Subgraphen. Dazu wird zunächst geprüft, ob jeder Subgraph divergierende Zeilen aufweist (Entscheidung 411). Bei Subgraphen ohne divergierende Zeilen werden alle Ströme dieses Subgraphen zu den divergierenden Strömen hinzugefügt (Schritt 412). Anschliessend wird aus den divergierenden Zeilen die Korrelationsmatrix gebildet (Schritt 413). Korrelationswerte, die eine bestimmte untere Schwelle überschreiten, werden ausgewählt (Schritt 414). Diese untere Schwelle soll grösser sein als die durchschnittliche Korrelation zwischen den Stromprofilen. Pro Subgraph wird dann ein Netzknoten ausgewählt (Schritt 415) und es wird durch Spiegeln bei null eine Gewichtungsfunktion erzeugt (Schritt 416). Dann wird die Funktion `graphminspanntreeQ` verwendet, um die verbleibenden Subgraphen als minimalen Baum zu verbinden (Schritt 417). Schliesslich werden die Verbindungen in der Parametermatrix eingetragen.

[0071] Zwei oder mehr Subgraphen können mit demselben Knoten eines weiteren Subgraphen verbunden werden. Dies wird über die Kirchhoffschen Regeln berücksichtigt. Den am Schluss divergenten Knotenströmen werden virtuelle Lasten angeschlossen, um den Baum zu komplettieren (Schritt 402).

[0072] In der Regel wird das System überbestimmt sein, weil deutlich mehr Strommessungen berücksichtigt werden als Parameter zu bestimmen sind. Um aus diesem überbestimmten System die Koeffizienten der Matrix zu bestimmen, wird der `Recursive-Least-Square-Algorithmus (RLS)` herangezogen (Funktionsblock 200). Aufgrund seiner rekursiven Struktur benötigt `RLS` wesentlich weniger Speicherplatz als ein `Batch-LMS-Algorithmus`. Der `RLS` ist aus dem `LMS` abgeleitet, indem die Systemgleichung in einer adaptiven Weise transformiert wird. Ein Invertieren der Autokorrelationsmatrix kann vermieden werden, indem die Inversion durch die `Woodbury-Matrix-Identität` ersetzt wird, vgl. z.B. P. S. Diniz, «Adaptive Filtering», Springer, 1997.

[0073] Je nachdem, ob reelle Stromwerte oder komplexe Stromwerte gemessen oder berücksichtigt werden, wird ein reellwertiges `RLS-Verfahren` oder ein komplexwertiges `RLS-Verfahren (cRLS)` eingesetzt.

[0074] Das reellwertige `RLS-Verfahren` lässt sich wie folgt implementieren, wobei aus dem Vektor `X` mit den gemessenen Stromwerten die Matrix `W` mit den Koeffizienten berechnet wird:

```

1 begin
  /* Initialization */
2   $R_{xx}^{-1}(0) = \frac{1}{\delta} I$  /*  $\delta$  is a small constant */
3   $W(0) = 0$ , /*  $W(n)$  can be initialized arbitrarily if necessary */
  /* Recursion */
4  for  $n > 0$  do
5     $k(n) = \frac{R_{xx}^{-1}(n-1)X(n)}{\lambda + X^T(n)R_{xx}^{-1}(n-1)X(n)}$ 
6     $R_{xx}^{-1}(n) = \frac{1}{\lambda} R_{xx}^{-1}(n-1) - k(n)X^T(n)R_{xx}^{-1}(n-1)$ 
7     $e(n) = d(n) - W^T(n-1)X(n)$ 
8     $W(n) = W(n-1) + k(n)e(n)$ 
9     $e(n) = d(n) - W^T(n)X(n)$ 
10 end
11 end

```

[0075] Wie oben erwähnt, wird die Parametermatrix W zeilenweise aktualisiert, damit die Einheitsmatrix als triviale Lösung vermieden wird.

[0076] Die komplexe Variante lässt sich wie folgt implementieren, wobei primär die Transpositionen durch Hermitesche Konjugationen zu ersetzen sind, die Matrixeinträge und der a-priori-Fehler sind zusätzlich komplex-konjugiert:

```

1 begin
  /* Initialization */
2   $R_{xx}(0) = \frac{1}{\delta} I$  /* where  $\delta$  is a small constant */
3   $X(0) = W(0) = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ 
  /* Recursion */
4  for  $k > 0$  do
5     $e(k) = d(k) - W^H(k-1)X(k)$ 
6     $\psi(k) = R_{xx}(k-1)X(k)$ 
7     $R_{xx}(k) = \frac{1}{\lambda} [R_{xx}(k-1) - \frac{\psi(k)\psi^H(k)}{\lambda + \psi^H(k)X(k)}]$ 
8     $W(k) = W(k-1) + e^*(k)R_{xx}(k)X(k)$ 
9  end
10 end

```

[0077] Wie bereits erwähnt, wird eine möglichst einfache Lösung angestrebt, bei welcher sich jeweils genau zwei an verschiedenen Netzknoten gemessene Ströme entsprechen. Aufgrund der Kirchhoffschen Regeln kann im Prinzip jeder Strom durch seine Abkömmlinge am nächsten Netzknoten ausgedrückt werden. Somit gibt es theoretisch eine riesige Zahl möglicher Lösungen, die einer unterschiedlich stark besetzten Parametermatrix entsprechen. Es handelt sich um ein so genanntes multikollineares System.

[0078] Um nun die gewünschte Lösung aufzufinden, d.h. eine Parametermatrix, die möglichst dünn besetzt ist, wird der Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso) eingesetzt, der in R. Tibshirani, «Regression Shrinkage and Selection via the Lasso», Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 58, Iss. 1 (1996), 267–288 erstmals vorgeschlagen wurde. Es handelt sich dabei eigentlich um ein regularisiertes Verfahren der kleinsten Quadrate, bei welchem die residuale Summe der Quadrate minimiert wird unter der Bestimmung, dass die ℓ_1 -Norm der Koeffizienten kleiner ist als eine Konstante t . Die Definition ist wie folgt:

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \alpha - \sum_j \beta_j x_{ij})^2 \right\}, \text{ wobei}$$

$$\sum_j |\beta_j| \leq t$$

[0079] Durch Einsatz des LASSO wird eine möglichst dünn besetzte Matrix erzielt. Die Anzahl der Elemente mit Wert 1, welche die Übereinstimmung zweier gemessener Ströme anzeigen, wird minimiert.

[0080] Der Algorithmus ist beispielsweise in der Statistik-Toolbox von Matlab verfügbar. Die entsprechende Formulierung der Funktion lassoQ unterscheidet sich etwas von der obigen. Der Abstimmparameter t ist in anderer Form in der Gleichung als Abstimmparameter X enthalten:

$$\min_{\beta_0, \beta} \left(\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - x_i^T \beta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right)$$

[0081] Die Kostenfunktion lässt sich durch numerische Verfahren wie z.B. ein koordiniertes Abstiegsverfahren (coordinate descent) optimieren.

[0082] Es hat sich gezeigt, dass es nicht trivial ist, den richtigen Abstimmparameter λ zu finden. Ein fester Wert ist nicht für alle Zeilen der Parametermatrix geeignet, da diese unterschiedliche Situationen (insbesondere einen 1:1-Zusammenhang zwischen zwei Strömen oder aber eine Kirchhoffsche Regel) abbilden können. Wenn der Abstimmparameter λ , welcher das relative Gewicht der ℓ_1 -Norm angibt, zu klein gewählt wird, ergibt sich bei einer Zeile, die einer Kirchhoffschen Regel entspricht, nicht das korrekte Ergebnis. Wird λ zu gross gewählt, ergeben sich Koeffizienten, die sehr nahe bei null liegen, es ist dann schwierig, die relevanten Spalten durch Vergleich mit einem Schwellenwert von nicht relevanten Spalten zu unterscheiden.

[0083] Mit Matlab kann automatisch eine gewisse Anzahl von exponentiell verteilten λ -Werten zwischen 0 und einem maximal möglichen Wert λ_{\max} erzeugt werden. Bei $\lambda = \lambda_{\max}$ ist der Einfluss der ℓ_1 -Norm so gross, dass die triviale Lösung zurückgegeben wird.

[0084] Im Rahmen des beschriebenen Verfahrens wird λ wie folgt gewählt: Das Lasso-Verfahren wird mit 10 verschiedenen Werten von λ durchgeführt (Schritt 201). Werte der resultierenden Parametermatrix, welche eine untere Schwelle ξ übersteigen, werden zu 1 gesetzt, die übrigen zu 0 (Schritt 202). Anschliessend wird der cRLS-Algorithmus auf jede mögliche Lösung, die Lasso ergeben hat, angewandt (Schritt 203). Aus Effizienzgründen werden dabei nur diejenigen Spalten berücksichtigt, in welchen Lasso signifikante Koeffizienten ergeben hat.

[0085] Falls sich im Ergebnis des cRLS Koeffizienten mit Wert 1 finden (Entscheidung 204) und falls der Vorhersagefehler der Lösung besser ist als derjenige der bisher besten Lösung (Entscheidung 205), wird die bisher beste Lösung überschrieben (Schritt 206). Ansonsten wird eine weitere Iteration durchgeführt.

[0086] Die letztlich beste Lösung wird dann wie oben beschrieben analysiert und weiter verarbeitet.

[0087] Das vorstehend beschriebene Verfahren wurde für verschiedene Netztopologien getestet und hat sehr gute Ergebnisse bei der Bestimmung der Topologie von Stromversorgungsnetzen geliefert, namentlich auch beim Vorhandensein von Rauschen.

[0088] Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die Erfindung ein Verfahren und eine Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes bereitgestellt werden, welche ein genaues und robustes Ergebnis liefern.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes, umfassend Netzknoten und Netzverbindungen, wobei im Rahmen des Verfahrens folgende Schritte ausgeführt werden:
 - a) Für eine Mehrzahl von Netzknoten Gewinnen einer Mehrzahl von zeitsynchronen Strom-Messwerten für Netzverbindungen, die mit dem jeweiligen Netzknoten verbunden sind;
 - b) Evaluieren der Übereinstimmung von Messwerten für Netzverbindungen, die mit unterschiedlichen Netzknoten verbunden sind zur Gewinnung von Übereinstimmungswerten;
 - c) Rekonstruktion der Topologie anhand der Übereinstimmungswerte.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Strom-Messwerte einen Phasenwinkel des Stroms umfassen und dass beim Evaluieren der Übereinstimmung der Phasenwinkel mit berücksichtigt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zum Evaluieren der Übereinstimmung eine Matrix ausgewertet wird, welche Strom-Messwerte als Linearkombinationen anderer Strom-Messwerte repräsentiert.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass eine Regressionsanalyse der Matrix vorgenommen wird, in deren Rahmen Parameter der Matrix optimiert werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Matrix zeilenweise bearbeitet wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass im Rahmen der Regressionsanalyse vor der Optimierung der Parameter die Matrix anhand von vorbekannten Informationen zu Netzknoten und Netzverbindungen vorverarbeitet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass Kirchhoffsche Regeln auf die Matrix angewandt werden, um Netzknoten des Stromversorgungsnetzes zu berücksichtigen, zu welchen keine Strom-Messwerte vorliegen.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass Koeffizienten der Matrix durch einen Recursive-Least-Square-Algorithmus (RLS) bestimmt werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass ein Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) auf die Matrix angewandt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Operator mit verschiedenen Werten eines Abstimmparameters auf die Matrix angewandt wird, dass mindestens eine der resultierenden Lösungen derart modifiziert wird, dass die Koeffizienten jeweils 0 oder 1 annehmen und dass die mindestens eine modifizierte Lösung als Startpunkt für den Recursive-Least-Square-Algorithmus dient.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere modifizierte Lösungen als Startpunkte für den Recursive-Least-Square-Algorithmus dienen und dass dasjenige Ergebnis des Recursive-Least-Square-Algorithmus ausgewählt wird, welches nicht-trivial ist und einen geringsten Vorhersagefehler aufweist.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass nach der Optimierung der Parameter der Matrix die erhaltenen Parameter analysiert werden und dass die Matrix anhand von Ergebnissen der Analyse in einen ausgewerteten Bereich und einen noch weiter zu verarbeitenden Bereich aufgeteilt wird, wonach für den noch weiter zu verarbeitenden Bereich eine erneute Optimierung der Parameter vorgenommen wird.
13. Einrichtung zur Bestimmung der Topologie eines Stromversorgungsnetzes, welches Netzknoten und Netzverbindungen aufweist, wobei die Einrichtung folgendes umfasst:
 - a) bei einer Mehrzahl von Netzknoten angeordnete Messeinheiten mit einem Zeitgeber, zur Gewinnung von zeitsynchronen Strom-Messwerten für Netzverbindungen, die mit dem jeweiligen Netzknoten verbunden sind;
 - b) ein Auswertesystem zum Evaluieren der Übereinstimmung von Messwerten für Netzverbindungen, die mit unterschiedlichen Netzknoten verbunden sind zur Gewinnung von Übereinstimmungswerten und zur Rekonstruktion der Topologie anhand der Übereinstimmungswerte;
 - c) Einrichtungen zur Übertragung der Strom-Messwerte zur Auswerteeinheit.

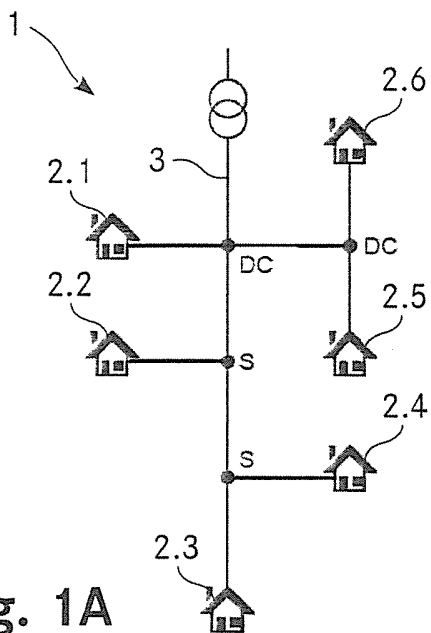


Fig. 1A

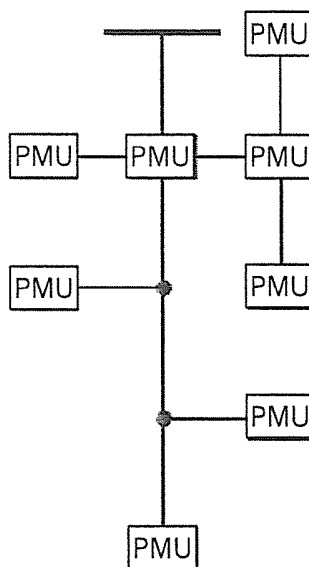


Fig. 1B

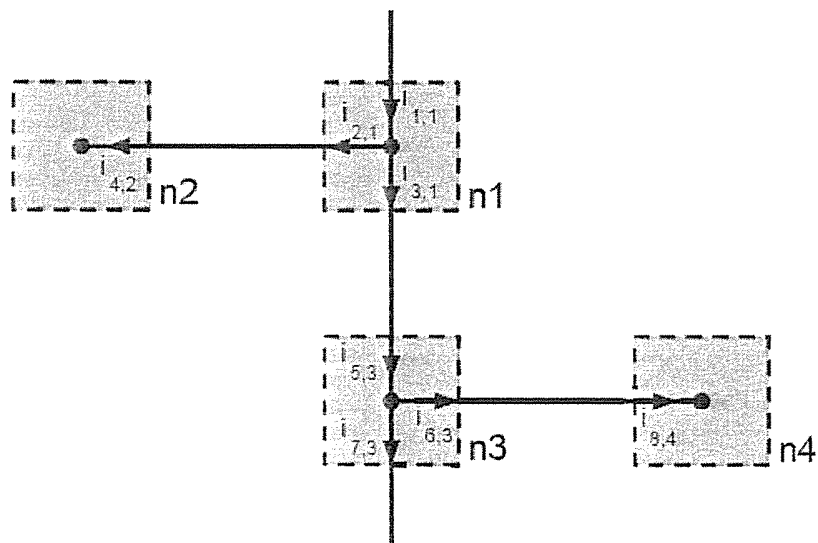


Fig. 2

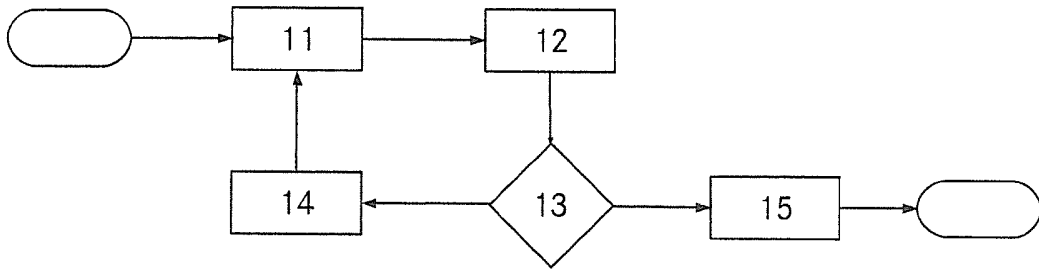


Fig. 3

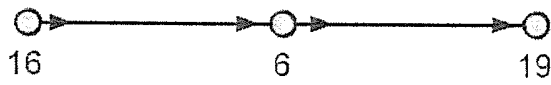


Fig. 4

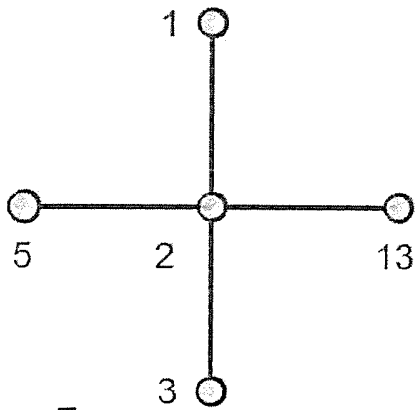


Fig. 5

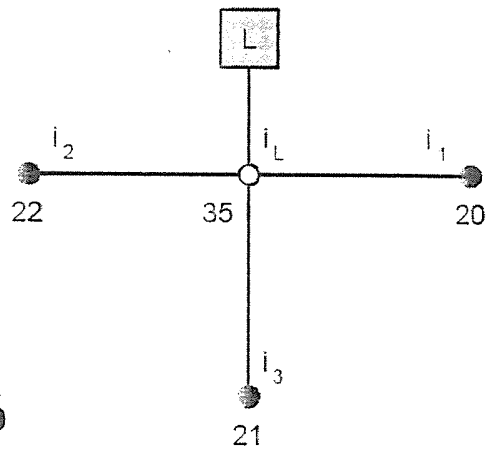


Fig. 6

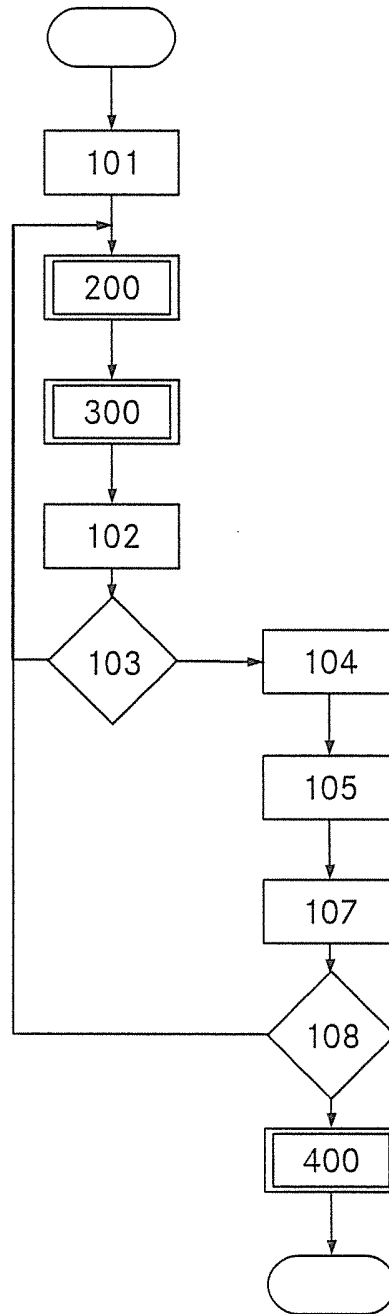


Fig. 7

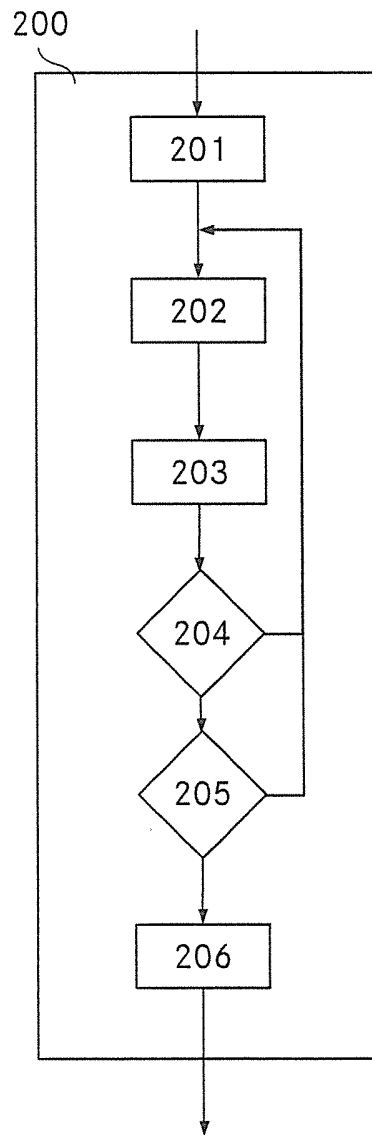


Fig. 8

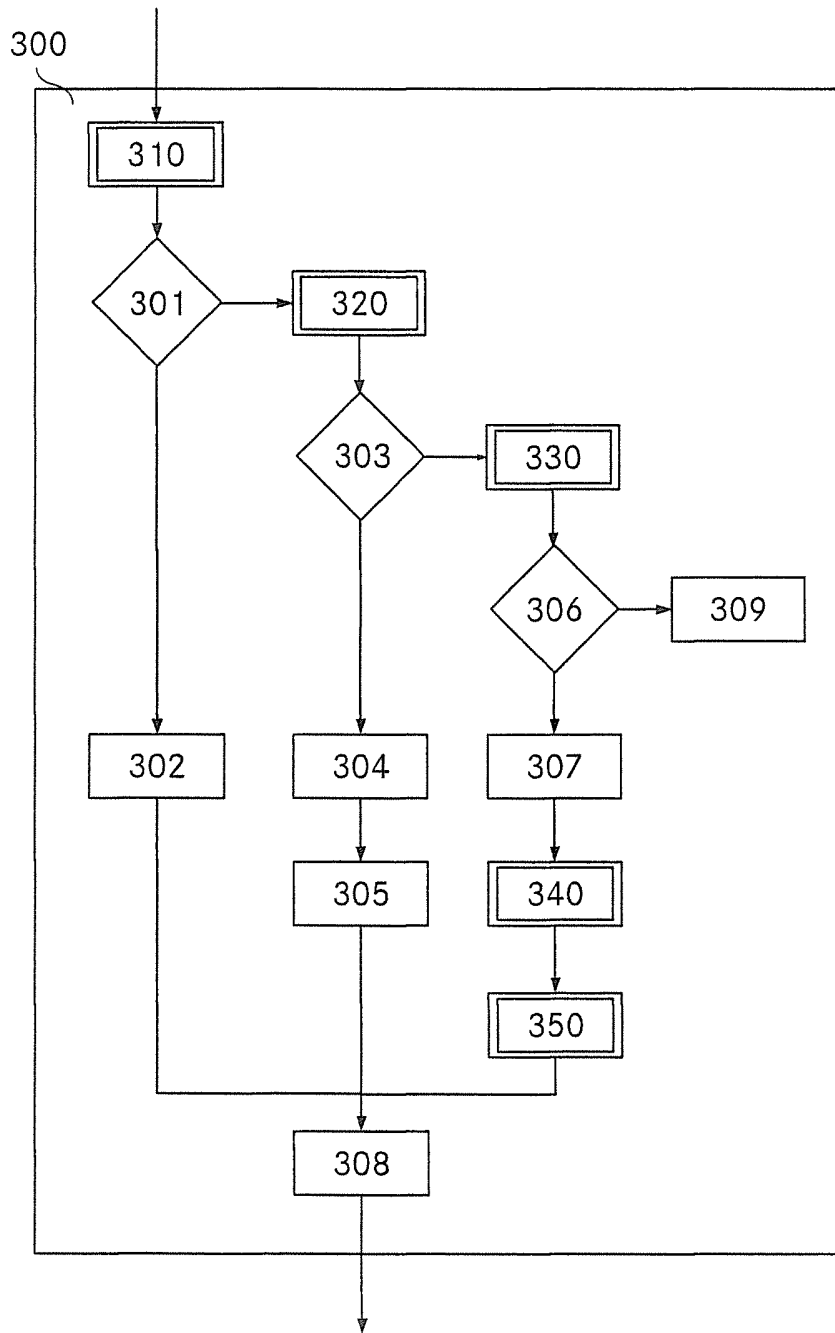


Fig. 9A

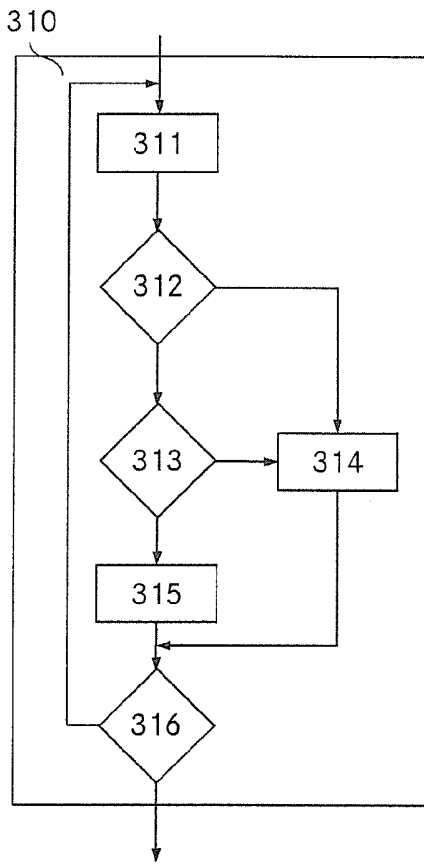


Fig. 9B

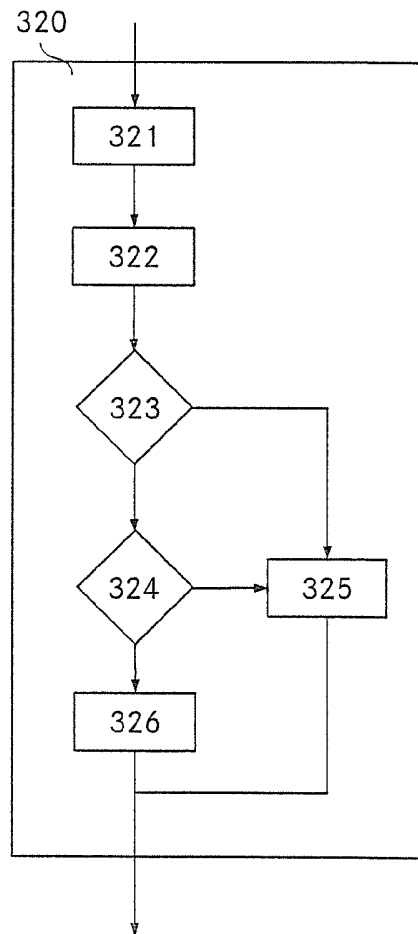


Fig. 9C

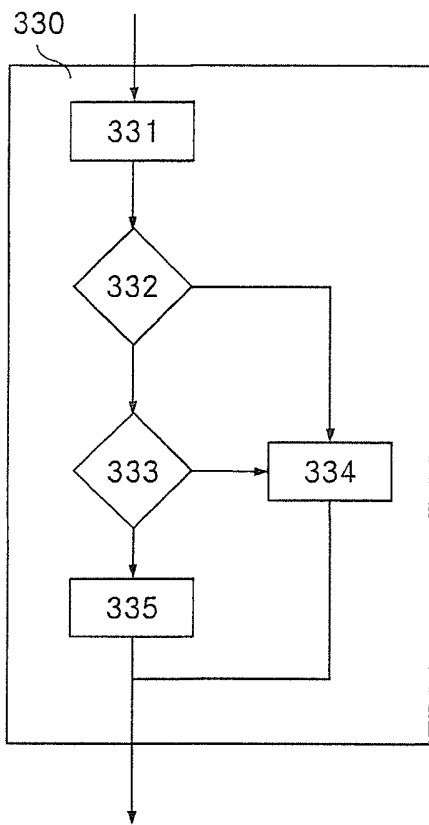


Fig. 9D

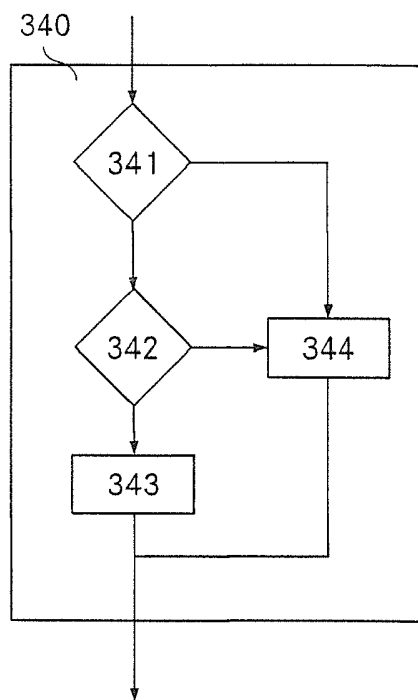


Fig. 9E

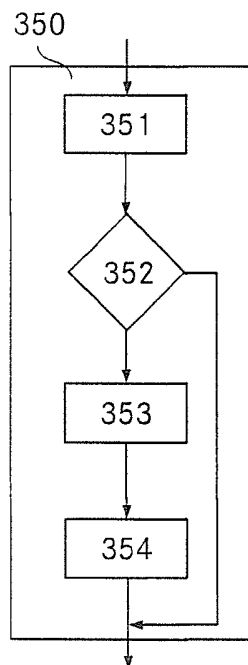


Fig. 9F

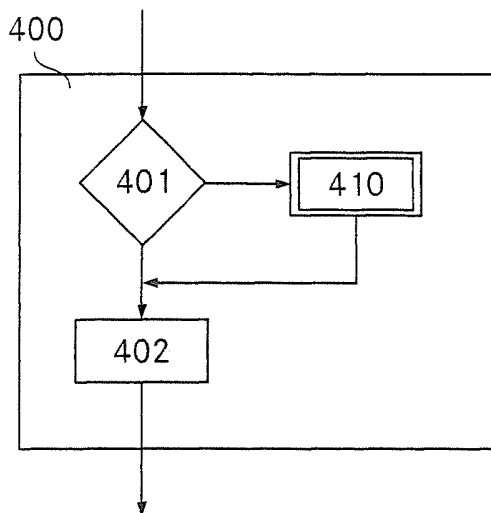


Fig. 10A

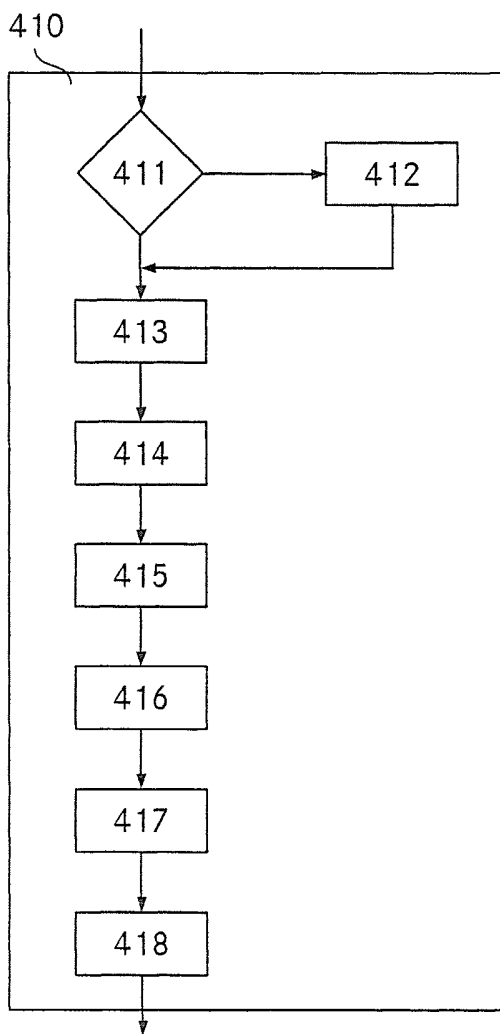


Fig. 10B

**VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT
AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS**

BERICHT ÜBER DIE RECHERCHE INTERNATIONALER ART

KENNZEICHNUNG DER NATIONALEN ANMELDUNG		AKTENZEICHEN DES ANMELDERS ODER ANWALTS	
		23064	
Nationales Aktenzeichen		Anmeldedatum	
304/2015		05-03-2015	
Anmeldeland		Beanspruchtes Prioritätsdatum	
CH			
Anmelder (Name)			
BKW Energie AG			
Datum des Antrags auf eine Recherche internationaler Art		Nummer, die die internationale Recherchenbehörde dem Antrag auf eine Recherche internationaler Art zugeteilt hat	
08-07-2015		SN 64474	
I. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDS <small>(treffen mehrere Klassifikationsymbole zu, so sind alle anzugeben)</small>			
Nach der internationalen Patentklassifikation (IPC) oder sowohl nach der nationalen Klassifikation als auch nach der IPC			
H02J3/28			
II. RESEARCHIERTE SACHGEBIETE			
Recherchiertes Mindestprüfstoff			
Klassifikationssystem		Klassifikationsymbole	
IPC		H02J	
Recherchierte, nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Sachgebiete fallen			
III. <input type="checkbox"/> EINIGE ANSPRÜCHE HABEN SICH ALS NICHT RESEARCHIERBAR ERWIESEN <small>(Bemerkungen auf Ergänzungsbogen)</small>			
IV. <input type="checkbox"/> MANGELNDE EINHEITLICHKEIT DER ERFINDUNG <small>(Bemerkungen auf Ergänzungsbogen)</small>			

Formblatt PCT/ISA 231 a (11/2000)

BERICHT ÜBER DIE RECHERCHE INTERNATIONALER ART

Nr. des Antrags auf Recherche

CH 3042015

<p>A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H02J3/28 ADD.</p> <p>Nach der internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC</p>													
<p>B. RECHERCHIRTE SACHGEBIETE Recherchierbar: Mikroprozessor (Klassifikationssystem und Klassifikationsprotokoll) H02J</p> <p>Rechenwerke, aber nicht zum Mikroprozessor gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen</p> <p>Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPD-Internal</p>													
<p>C. ALS WESSENTLICH ANGESEHENE VERÖFFENTLICHUNGEN</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kategorie*</th> <th>Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile</th> <th>Bez. Anspruch Nr.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>DE 10 2007 055917 A1 (SIEMENS AG [DE]) 12. März 2009 (2009-03-12) * das ganze Dokument *</td> <td>1-13</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2011/196546 A1 (MULLER NELSON [US] ET AL) 11. August 2011 (2011-08-11) * Zusammenfassung; Anspruch 1; Abbildung 1 *</td> <td>1-13</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>AT 511 910 A1 (SIEMENS AG OESTERREICH [AT]) 15. März 2013 (2013-03-15) * Zusammenfassung; Ansprüche; Abbildungen *</td> <td>1, 13</td> </tr> </tbody> </table>		Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Bez. Anspruch Nr.	X	DE 10 2007 055917 A1 (SIEMENS AG [DE]) 12. März 2009 (2009-03-12) * das ganze Dokument *	1-13	A	US 2011/196546 A1 (MULLER NELSON [US] ET AL) 11. August 2011 (2011-08-11) * Zusammenfassung; Anspruch 1; Abbildung 1 *	1-13	A	AT 511 910 A1 (SIEMENS AG OESTERREICH [AT]) 15. März 2013 (2013-03-15) * Zusammenfassung; Ansprüche; Abbildungen *	1, 13
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Bez. Anspruch Nr.											
X	DE 10 2007 055917 A1 (SIEMENS AG [DE]) 12. März 2009 (2009-03-12) * das ganze Dokument *	1-13											
A	US 2011/196546 A1 (MULLER NELSON [US] ET AL) 11. August 2011 (2011-08-11) * Zusammenfassung; Anspruch 1; Abbildung 1 *	1-13											
A	AT 511 910 A1 (SIEMENS AG OESTERREICH [AT]) 15. März 2013 (2013-03-15) * Zusammenfassung; Ansprüche; Abbildungen *	1, 13											
<p><input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Teil U zu entnehmen</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie</p>													
<p>* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen:</p> <p>"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutend anzusehen ist</p> <p>"E" Situations Dokument, das zeitlich erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum eines anderen im Recherchenecht geltenden Veröffentlichungsbeleg verdrängt wird, oder die aus sonstigen besonderen Grund angegeben ist (siehe ausgefüllt)</p> <p>"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Demonstration, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>"P" Veröffentlichung, die vor dem Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht korrespondiert, sondern nur zum Vergleich des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als Ergebnis dieser Veröffentlichung nicht als von einer auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>"Z" Veröffentlichung, die bezüglich derselben Patentfamilie ist</p>													
<p>Datum des tatsächlichen Abschlusses der Recherche internationaler Art</p> <p>7. Oktober 2015</p>	<p>Abschließdatum des Berichts über die Recherche internationaler Art</p> <p>- 8 - 10 - 2015</p>												
<p>Name und Postanschrift der internationalen Recherchekategorie</p> <p>Europäisches Patentamt, P. O. Box 5618 Patentplan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-3040, Fax (+31-70) 340-3016</p>	<p>Berechtigter Beauftragter</p> <p>Rother, Stefan</p>												

Formblatt PC/17/04/01 (Form 2) (Januar 2004)

BERICHT ÜBER DIE RECHERCHE INTERNATIONALER ART

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

№ des Antrags auf Recherche

CH 3042015

im Rechtsbereich angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102007055517 A1	12-03-2009	CN 101855807 A	06-10-2010
		DE 102007055517 A1	12-03-2009
		WO 2009033953 A2	19-03-2009
US 2011196546 A1	11-08-2011	CA 2731433 A1	09-08-2011
		US 2011196546 A1	11-08-2011
AT 511910 A1	15-03-2013	AT 511910 A1	15-03-2013
		EP 2748907 A1	02-07-2014
		WO 2013026675 A1	28-02-2013

Formular PCT/ISA/229 (Suchung Patentfamilie) (Januar 2004)