

(19)



(11)

EP 3 579 175 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
11.12.2019 Patentblatt 2019/50

(51) Int Cl.:
G06Q 50/06 (2012.01)

(21) Anmeldenummer: **18176567.8**

(22) Anmeldetag: **07.06.2018**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

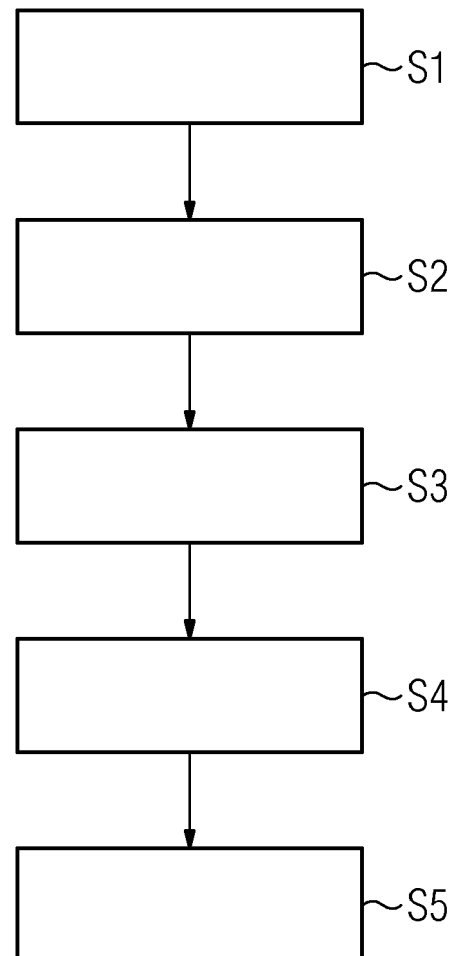
(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft
80333 München (DE)**

(72) Erfinder: **Duckheim, Mathias
91052 Erlangen (DE)**

(54) **VERFAHREN ZUR SENSITIVITÄTSANALYSE EINES MITTELS EINER OPTIMIERUNG
AUSGELEGTEN ENERGIESYSTEMS**

(57) Es wird ein Verfahren zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich wenigstens eines Parameters des Energiesystems vorgeschlagen, das wenigstens die folgenden Schritte:

- Bereitstellen einer Lösung der Optimierung für einen Referenzwert des Parameters;
- Bereitstellen eines zur Optimierung zugehörigen Zielfunktionskoeffizientenvektors, der den Parameter umfasst;
- Bereitstellen einer Mehrzahl von zur Optimierung zugehörigen Nebenbedingungen;
- Ermitteln wenigstens einer aktiven Nebenbedingungen und ihres zugehörigen Normalenvektors; und
- Ermitteln eines kritischen Wertes des Parameters für welchen der Zielfunktionskoeffizientenvektor parallel zum Normalenvektor der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung ist. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems, ein Computersystem sowie ein Computerprogrammprodukt.



EP 3 579 175 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich eines Parameters des Energiesystems. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems, bei welchem eine Sensitivitätsanalyse gemäß der vorliegenden Erfindung und/oder einer ihrer Ausgestaltungen verwendet wird. Ferner betrifft die Erfindung ein Computersystem sowie ein Computerprogrammprodukt.

[0002] Energiesysteme, insbesondere multimodale Energiesysteme, stellen wenigstens eine Energieform für einen Energieverbraucher, beispielsweise ein Gebäude, eine industrielle Anlage oder eine private Anlage, bereit, wobei die Bereitstellung typischerweise mittels einer Umwandlung verschiedener Energieformen, mittels eines Transports der verschiedenen Energieformen und/oder mittels gespeicherter Energieformen erfolgt. Mit anderen Worten werden die verschiedenen Energieformen, insbesondere Wärme, Kälte und/oder elektrische Energie mittels des (multimodalen) Energiesystems bezüglich ihrer Erzeugung, ihrer Bereitstellung und/oder ihrer Speicherungen gekoppelt.

[0003] Es ist bekannt Energiesysteme mittels eines Energiesystemdesignverfahrens möglichst optimal bezüglich ihrer Gesamtkosten oder ihrer Kohlenstoffdioxidemissionen auszulegen. Hierzu wird typischerweise ein mathematisches Modell des Energiesystems verwendet, welches eine Optimierung des Energiesystems bezüglich einer Zielfunktion mittels eines numerischen Optimierungsverfahrens ermöglicht. Typischerweise sind hierzu eine Mehrzahl von Parametern (Eingangsparametern), beispielsweise Vorhersagen von Lastprofilen und/oder Zustandsmessungen, zur Parametrisierung des mathematischen Modells, insbesondere der Zielfunktion, erforderlich.

[0004] Hierbei sind die Werte der Parameter typischerweise mit einer bestimmten Unsicherheit behaftet. Das liegt beispielsweise daran, dass die Energiesysteme über einen langen Zeitraum hinweg, beispielsweise über mehrere Jahrzehnte, betrieben werden sollen. Hierbei ist es jedoch schwer abzuschätzen, wie sich der Wert eines Parameters im Laufe der Jahre, beispielsweise ein Gaspreis, ändert oder entwickelt. Daher wird versucht einen bestmöglichen Wert für jeden der Parameter bei der Ermittlung einer möglichst optimalen Auslegung des Energiesystems (Energiesystemdesignverfahren) zu verwenden.

[0005] Eine bedeutsame Fragestellung hierbei ist, inwieweit die ermittelte Auslegung des Energiesystems von den bei der Ermittlung der Auslegung verwendeten Werten der Parameter abhängig ist. Mit anderen Worten ist eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Werte der Parameter erforderlich, um abschätzen zu können, ob eine signifikante Änderung der Auslegung des Energiesystems bei einer Änderung der Werte der Parameter erfolgt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die er-

mittelte möglichst optimale Auslegung des Energiesystems nicht kritisch von den verwendeten Werten der Parameter abhängig ist. Hierbei bedeutet kritisch beispielsweise, dass bei einer kleinen Änderung der Werte der Parameter es bezüglich der neuen, geänderten Zielfunktion optimaler ist, wenn eine vorab verwendete Technologie nicht mehr verwendet wird. Mit anderen Worten stellt die Sensitivitätsanalyse eine Stabilitätsanalyse der mittels des Energiesystemdesignverfahrens ermittelten Lösung (Auslegung des Energiesystems) bezüglich der hierbei verwendeten Werte der Parameter dar.

[0006] Gemäß des Standes der Technik kann eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Wertes eines Parameters durch jeweils eine Optimierungen für eine Mehrzahl von Werten des Parameters erfolgen. Mit anderen Worten erfolgt schlicht für jeden zu erwartenden Wert des Parameters eine Optimierung. Nachteilig hieran ist, dass hierzu eine Mehrzahl von gleichartigen Optimierungen erforderlich ist, die äußerst zeitaufwendig sind, so dass typischerweise nur eine geringe Anzahl von Werten des Parameters überprüft werden können. Weiterhin bleibt trotz des hohen Aufwandes unklar, ob die überprüften Werte des Parameters repräsentativ bezüglich der Sensitivität beziehungsweise Stabilität sind, und ab welchem Wert des Parameters ein kritisches Verhalten vorliegt. Insgesamt wird dadurch die möglichst optimale Ermittlung der Auslegung des Energiesystems, insbesondere über einen langen vorgesehenen Betriebszeitraum des Energiesystems, erschwert.

[0007] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems mittels eines Energiesystemdesignverfahrens zu verbessern.

[0008] Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruches 1, sowie durch ein Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruches 10, sowie durch ein Computersystem mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruches 11, und durch ein Computerprogrammprodukt mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruches 15 gelöst. In den abhängigen Patentansprüchen sind vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung angegeben.

[0009] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich wenigstens eines Parameters des Energiesystems, umfasst wenigstens die folgenden Schritte:

- Bereitstellen einer Lösung der Optimierung für einen Referenzwert des Parameters;
- Bereitstellen eines zur Optimierung zugehörigen Zielfunktionskoeffizientenvektors, der den Parameter umfasst;
- Bereitstellen einer Mehrzahl von zur Optimierung zugehörigen Nebenbedingungen;
- Ermitteln wenigstens einer aktiven Nebenbedingungen und ihres zugehörigen Normalenvektors; und

- Ermitteln eines kritischen Wertes des Parameters für welchen der Zielfunktionskoeffizientenvektor parallel zum Normalenvektor der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung ist.

[0010] Beim dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems wird ein Verfahren zur Sensitivitätsanalyse der vorliegenden Erfindung oder einer ihrer Ausgestaltungen verwendet. Es ergeben sich zum erfindungsgemäßen Verfahren zur Sensitivitätsanalyse oder einer seiner Ausgestaltungen gleichartige und gleichwertige Vorteile.

[0011] Insbesondere sind/ist das erfindungsgemäße Verfahren zur Sensitivitätsanalyse und/oder das erfindungsgemäße Verfahren zur Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems computerimplementiert.

[0012] Eine Größe ist ein Parameter der Optimierung, wenn dessen Wert oder dessen Werte bei der Optimierung als konstant angesehen werden. Mit anderen Worten ist der Parameter fest aber beliebig. Parameter können ebenfalls als Eingangsparameter bezeichnet werden.

[0013] Eine Größe ist eine Variable der Optimierung, wenn deren Wert oder deren Werte bei der Optimierung variieren. Mit anderen Worten wird mittels der Optimierung ein bestmöglicher beziehungsweise möglichst optimaler Wert der Variablen ermittelt.

[0014] Nebenbedingungen, Randbedingungen oder Zwangsbedingungen - hier zusammenfassend als Nebenbedingungen bezeichnet - sind Bedingungen, Eigenschaften und/oder Relationen, die die Parameter und/oder Variablen der Optimierung erfüllen müssen. Diese können als Gleichung und/oder Ungleichung gegeben sein, und/oder explizit eine Menge von zulässigen Werten der Parameter und/oder zulässigen Werten der Variablen beschreiben.

[0015] Die Optimierung kann mittels eines Optimierungsverfahrens erfolgen. Das Optimierungsverfahren ist beispielsweise ein mathematisches und/oder numerisches Optimierungsverfahren, insbesondere ein Simplex-Verfahren. Die Lösung der Optimierung entspricht der Auslegung des Energiesystems.

[0016] Die Auslegung des Energiesystems kann eine Ermittlung und/oder Bestimmung und/oder Festlegung seiner Komponenten, die das Energiesystem aufweist, umfassen. Weiterhin kann die Auslegung des Energiesystems, die Dimension und/oder Kapazitäten seiner Komponenten, die Kosten der Komponenten, beispielsweise Kosten für eine Energiespeicherung, Energieströme und/oder Leistungsströme, umfassen. Mit anderen Worten kann jede beliebige Systemgröße des Energiesystems und/oder jede beliebige das Energiesystem charakterisierende Größe bei der Optimierung in dem Sinne berücksichtigt werden, dass ein möglichst optimaler Wert der Systemgröße beziehungsweise der charakterisierenden Größe ermittelt wird. Die Berücksichtigung der Systemgröße und/oder charakterisierenden Größe kann mittels ihres Eingehens als Variable in die Zielfunk-

tion erfolgen.

[0017] Mit anderen Worten wird als Auslegung des Energiesystems insbesondere seine Struktur und/oder sein Aufbau bezüglich seiner Komponenten, dessen Dimensionierung und/oder dessen Wirtschaftlichkeitsanalyse bezeichnet. Die möglichst optimale Auslegung des Energiesystems wird ebenfalls als Optimierungsproblem bezeichnet. Mittels der Optimierung wird diese möglichst optimale Auslegung des Energiesystems, das heißt beispielsweise seine Struktur, seine Dimensionierung, seine Wirtschaftlichkeitsanalyse und/oder dergleichen, ermittelt.

[0018] Als Komponenten kann das Energiesystem jeweils einen oder mehrere Stromgeneratoren, Kraftwärmekopplungsanlagen, insbesondere Blockheizkraftwerke, Gasboiler, Dieselmotoren, Wärmepumpen, Kompressionskältemaschinen, Absorptionskältemaschinen, Pumpen, Fernwärmenetze, Energietransferleitungen, Windkraftanlagen oder Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen, Biomasseanlagen, Biogasanlagen, Müllverbrennungsanlagen, industrielle Anlagen, konventionelle Kraftwerke und/oder dergleichen umfassen.

[0019] Der Zielfunktionskoeffizientenvektor kann ebenfalls als Koeffizientenvektor der Zielfunktion oder als Parametervektor bezeichnet werden. Für eine lineare Zielfunktion ist der Zielfunktionskoeffizientenvektor, gegebenenfalls bis auf eine Transponierung, proportional zum Gradienten der Zielfunktion.

[0020] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird der kritische Wert wenigstens eines Parameters, insbesondere einer Mehrzahl von Parametern, ermittelt. Der kritische Wert des Parameters ist hierbei dadurch gekennzeichnet, dass der Zielfunktionskoeffizientenvektor für den kritischen Wert des Parameters parallel zu einem Normalenvektor einer aktiven Nebenbedingung ist. Hierbei ist eine Nebenbedingung aktiv, wenn diese durch die Lösung der Optimierung identisch, das heißt in Gleichheit, erfüllt ist. Liegt die Bedingung der Parallelität des Zielfunktionskoeffizientenvektors und des Normalenvektors der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung vor, so erfolgt typischerweise ein Umkippen der Lösung, die zum Referenzwert des Parameters zugehörig ist, zu einer neuen hiervon verschiedenen Lösung. Mit anderen Worten ist ab dem kritischen Wert des Parameters eine neue Lösung, und somit eine neue Auslegung des Energiesystems optimaler. Mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Ermittlung des kritischen Wertes des Parameters ermöglicht. Somit wird ermittelt, ab welchem Wert des Parameters (kritischer Wert) eine kritische Änderung der Auslegung des Energiesystems erfolgt.

[0021] Ein Vorteil der vorliegenden Erfindung ist, dass hierzu keine weitere Optimierung erforderlich ist. Vielmehr wird eine vorab ermittelte Lösung der Optimierung bereitgestellt (für den Referenzwert des Parameters) und hierzu verwendet. Mit anderen Worten ist für die Ermittlung des kritischen Wertes des Parameters und somit für die Sensitivitätsanalyse nur eine Optimierung erforderlich. Dadurch wird eine verbesserte Ermittlung der Aus-

legung des Energiesystems ermöglicht, da die Abhängigkeit der Auslegung des Energiesystems von der Änderung des Wertes des Parameters ermittelt wird. Weiterhin wird dadurch die für die Ermittlung der Auslegung des Energiesystems erforderliche Zeit reduziert, sodass eine betriebssichere Auslegung des Energiesystems ermittelt werden kann. Mit anderen Worten erfolgt vorteilhafterweise eine robustere Optimierung beziehungsweise Auslegung des Energiesystems.

[0022] Der Parameter, der der Sensitivitätsanalyse unterworfen wird, kann durch eine Benutzereingabe festgelegt werden. Insbesondere ist eine Sensitivitätsanalyse in Bezug auf eine Mehrzahl von Parametern vorgesehen.

[0023] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird vor der Bereitstellung der Lösung, diese durch ein Extremalisieren einer linearen Zielfunktion berechnet.

[0024] Mittels der Optimierung beziehungsweise mittels des Optimierungsverfahrens wird die Zielfunktion extremalisiert, das heißt maximiert oder minimiert. Hierbei ist es nicht erforderlich ein exaktes Maximum beziehungsweise Minimum zu berechnen. Es ist ausreichend, eine näherungsweise optimale Auslegung (Lösung) zu ermitteln, beispielsweise mittels eines Approximationsalgorithmus und/oder mittels einer Festlegung eines Schwellenwertes für einen Fehler des Optimierungsverfahrens.

[0025] In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird die lineare Zielfunktion Z durch $Z = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}$ ausgebildet, wobei \mathbf{c} den Zielfunktionskoeffizientenvektor und \mathbf{x} den Vektor der Variablen der Optimierung bezeichnet.

[0026] Hierbei umfasst der Zielfunktionskoeffizientenvektor den der Sensitivitätsanalyse unterworfenen Parameter des Energiesystems. Die Nebenbedingungen sind ebenfalls linear. Typischerweise können diese in die Standardform $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ und/oder $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ gebracht werden, wobei \mathbf{A} eine Matrix und \mathbf{b} ein weiterer Vektor ist. Die linearen Nebenbedingungen definieren somit ein höherdimensionales konvexes Polyeder. Hierbei liegt eine Lösung der Optimierung beispielsweise an einer Ecke des genannten Polyeders. Die lineare Zielfunktion entspricht einer Hyperebene, welche das Polyeder schneidet. Beim optimalen Wert der Zielfunktion schneidet die durch ihr definierte Hyperebene wenigstens eine Ecke des Polyeders. Somit ist für die Lösung der Optimierung eine oder mehrere Nebenbedingungen aktiv, das heißt identisch erfüllt. Mit anderen Worten liegt die Lösung der Optimierung auf dem Rand des Polyeders. Ist nun der Zielfunktionskoeffizientenvektor parallel zum Normalenvektor der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung, so erfolgt sinnbildlich ein Umkippen der Lösung der Optimierung von einer Ecke des Polyeders zu einer anderen, insbesondere benachbarten, Ecke des Polyeders. Durch dieses Umkippen der Lösung ist der kritische Wert des Parameters gekennzeichnet.

[0027] Ferner ist für $Z = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}$ der Zielfunktionskoeffi-

zientenvektor durch $\mathbf{c}^T = \nabla_{\mathbf{x}} Z$ gegeben, wobei $\nabla_{\mathbf{x}}$ den Gradienten bezüglich der Variablen \mathbf{x} bezeichnet.

[0028] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung umfasst das Verfahren wenigstens den weiteren Schritt:

- Extremalisieren der linearen Zielfunktion für den kritischen Wert des Parameters.

[0029] Dadurch wird vorteilhafterweise die kritische Auslegung des Energiesystems ermittelt.

[0030] In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung erfolgt das Extremalisieren der linearen Zielfunktion mittels eines Simplex-Verfahrens.

[0031] Insbesondere ist das Simplex-Verfahren für lineare Optimierungen von Vorteil. Das Simplex-Verfahren kann ebenfalls als Simplex-Algorithmus bezeichnet werden.

[0032] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird als lineare Zielfunktionen die Kohlenstoffdioxidemission des Energiesystems und/oder der Primärenergieeinsatz des Energiesystems und/oder die Gesamtkosten des Energiesystems verwendet.

[0033] Vorteilhafterweise werden dadurch die Kohlenstoffdioxidemissionen und/oder der Primärenergieeinsatz des Energiesystems optimiert und/oder die Gesamtkosten des Energiesystems minimiert. Beispielsweise stellt die Kohlenstoffdioxidemission des Energiesystems beziehungsweise die Gesamtkohlenstoffdioxidemission des Energiesystems die Zielfunktionen dar. Weiterhin können die Gesamtkosten des Energiesystems, die sich typischerweise aus Investitionskosten, variablen Investitionskosten, Betriebskosten und/oder Unterhaltskosten und/oder Kosten für die Instandhaltung, Verbrauchskosten und/oder Energiekosten und/oder Anfahrkosten zusammensetzen, als Zielfunktionen herangezogen und minimiert werden. Hierbei kann der Parameter ein Gaspreis sein, sodass mittels der vorliegenden Erfindung ermittelt werden kann, ab welchem kritischen Wert beziehungsweise Preis des Gaspreises sich beispielsweise die Installation oder Verwendung eines Blockheizkraftwerkes lohnt oder nicht mehr lohnt.

[0034] In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird als Parameter eine elektrische, thermische, chemische und/oder mechanische Last, ein Preis und/oder wenigstens eine metrologische Größe verwendet.

[0035] Vorteilhafterweise können dadurch eine Vielzahl von verschiedenen Parametern, insbesondere Preise und/oder mechanischen Lasten und/oder metrologischen Größen, beim der Sensitivitätsanalyse und somit ebenfalls bei der Ermittlung der Auslegung des Energiesystems berücksichtigt werden.

[0036] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung umfasst das Verfahren zur Sensitivitätsanalyse wenigstens die weiteren Schritte:

- Affine Transformation des Zielfunktionskoeffizien-

tenvektors;

- Ermitteln eines linearen Gleichungssystems in Abhängigkeit des Referenzwertes des Parameters und der affinen Transformation des Zielfunktionskoeffizientenvektors; und
- Ermitteln des kritischen Wertes des Parameters mittels eines Lösens des linearen Gleichungssystems.

[0037] Dadurch wird vorteilhafterweise die Ermittlung des kritischen Wertes des Parameters auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems reduziert. Lineare Gleichungssysteme können vorteilhafterweise numerisch besonders effizient gelöst werden. Dadurch wird das Verfahren zur Sensitivitätsanalyse weiter verbessert. Beispielsweise ist die affine Transformation des Zielfunktionskoeffizientenvektors durch $\mathbf{c}_t = \mathbf{c} + \mathbf{v}t$ gegeben, wobei der Vektor \mathbf{v} zur Richtung der Änderung des Zielfunktionskoeffizientenvektors korrespondiert und t ein Scharparameter ist.

[0038] Es ist daher von Vorteil, wenn die affine Transformation mittels eines Scharparameters erfolgt, der verschiedene Werte des Parameters kennzeichnet.

[0039] Das erfindungsgemäße Computersystem zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer linearen Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich eines Parameters des Energiesystems ist dadurch gekennzeichnet, dass dieses zur Durchführung eines Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse gemäß der vorliegenden Erfindung und/oder einer ihrer Ausgestaltungen ausgebildet ist.

[0040] Hierbei ist es besonders bevorzugt, wenn das Computersystem ein Quantencomputer ist beziehungsweise als Quantencomputer ausgebildet ist oder einen Quantencomputer umfasst.

[0041] Das ist deshalb von Vorteil, da Quantencomputer für Optimierungsprobleme besonders vorteilhaft sind. Hierbei ist es besonders bevorzugt für Energiesystemdesignverfahren einen Quantencomputer zu verwenden, da diese typischerweise hochkomplexe Optimierungsprobleme darstellen, die mit einem Quantencomputer effizienter und/oder schneller als mit klassischen Computersystemen gelöst werden können. Dadurch wird vorteilhafterweise die Ermittlung der Auslegung des Energiesystems verbessert, da in kürzerer Zeit die Auslegung sowie die Sensitivitätsanalyse der Auslegung in Bezug auf einen Parameter des Energiesystems ermittelt werden kann.

[0042] Besonders bevorzugt ist hierbei, wenn das als Quantencomputer ausgebildete Computersystem weiterhin dazu ausgebildet ist eine Quanten-Abkühlung durchzuführen, insbesondere einen Quanten-Algorithmus für lineare Gleichungssysteme.

[0043] Die Quantenabkühlung (englisch: Quantum Annealing) ist insbesondere für lineare und/oder linear-quadratische Optimierungsprobleme von Vorteil, besonders bevorzugt für Optimierungen mit diskreten Variablen (englisch: Quadratically Constrained Binary Optimization; abgekürzt QUBO).

[0044] Mit anderen Worten ist vorteilhafterweise das

Computersystem dazu ausgebildet eine lineare Zielfunktion zu extremalisieren. Insbesondere wurde die bereitgestellte Lösung mittels eines Quantencomputers durch ein Extremalisieren der Zielfunktion des Energiesystems ermittelt beziehungsweise berechnet.

[0045] Das erfindungsgemäße Computerprogrammprodukt, welches in einem Speichermedium gespeichert ist und welches Softwarecodeabschnitte umfasst, ist dadurch gekennzeichnet, dass mit den gespeicherten Softwarecodeabschnitten eines der Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung und/oder einer ihrer Ausgestaltungen ausgeführt wird, wenn das Computerprogrammprodukt auf einem Computersystem gemäß der vorliegenden Erfindung und/oder einer ihrer Ausgestaltungen läuft.

[0046] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus dem im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispielen sowie anhand der Zeichnung. Dabei zeigt die einzige Figur ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse.

[0047] In einem ersten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich eines Parameters des Energiesystems wird eine Lösung der Optimierung für einen Referenzwert des Parameters bereitgestellt.

[0048] Hierbei kann die Lösung der Optimierung durch ein Extremalisieren einer linearen Zielfunktion des Energiesystems ermittelt worden sein. Mit anderen Worten wird für den Referenzwert des Parameters eine gemäß einer Zielfunktion möglichst optimale Auslegung des Energiesystems ermittelt. Diese Auslegung (Lösung), wird im ersten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse bereitgestellt. Bevorzugt wurde diese Lösung mittels eines Quantencomputers ermittelt.

[0049] In einem zweiten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse wird ein zur Optimierung zugehöriger Zielfunktionskoeffizientenvektor, der den Parameter beziehungsweise dessen Referenzwert umfasst, bereitgestellt.

[0050] In einem dritten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse wird eine Mehrzahl von Nebenbedingungen bereitgestellt, die der Optimierung zugehörig sind.

[0051] Mit anderen Worten wird für das erfindungsgemäße Verfahren zur Sensitivitätsanalyse eine Lösung der Optimierung für einen Referenzwert eines Parameters, sowie der zur Optimierung beziehungsweise Lösung zugehörige Zielfunktionskoeffizientenvektor und die zur Optimierung beziehungsweise Lösung zugehörigen Nebenbedingungen bereitgestellt.

[0052] In einem vierten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Sensitivitätsanalyse werden wenigstens eine oder mehrere aktive Nebenbedingung und ihr zugehöriger Normalenvektor ermittelt. Die Nebenbedingung beziehungsweise Nebenbedingungen sind insbesondere linear, sodass die aktive Nebenbedingung einer

Hyperebene entspricht, die den genannten Normalenvektor aufweist beziehungsweise durch diesen festgelegt ist.

[0053] In einem fünften Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein kritischer Wert des Parameters ermittelt, wobei der kritische Wert des Parameters dadurch gekennzeichnet ist, dass der Zielfunktionskoeffizientenvektor, der den Parameter beziehungsweise dessen Referenzwert umfasst, parallel zum Normalenvektor der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung ist.

[0054] Die Kennzeichnung der einzelnen Schritte impliziert keine zeitliche Reihenfolge der Schritte. Insbesondere können der erste Schritt, der zweite Schritt und der dritte Schritt zeitlich unabhängig voneinander durchgeführt werden. Die Kennzeichnung der Schritte kann jedoch bevorzugt einer zeitlichen Abfolge der Schritte entsprechen.

[0055] Durch das erfindungsgemäße Verfahren zur Sensitivitätsanalyse wird insbesondere ein Wertebereich für den Parameter ermittelt, welcher Wertebereich typischerweise als Randpunkte den Referenzwert des Parameters sowie den kritischen Wert des Parameters umfasst, sodass die Sensitivitätsanalyse vorteilhafterweise für einen gesamten Bereich der Wertes des Parameters (Wertebereich) erfolgt. Weist der Parameter einen Wert in der Nähe seines kritischen Wertes auf, dann ist die Auslegung des Energiesystems gegebenenfalls kritisch zu bewerten, da typischerweise nicht sichergestellt ist, dass das Energiesystem bei einer zukünftigen Änderung des Wertes des Parameters weiterhin optimal ausgelegt ist. Anhand des kritischen Wertes des Parameters beziehungsweise des genannten Wertebereiches kann jedoch abgeschätzt werden, wie wahrscheinlich ein Umkippen oder eine kritische Änderung der optimalen Auslegung des Energiesystems ist. Insgesamt wird dadurch eine robustere und betriebssichere Auslegung des Energiesystems im Rahmen eines Energiesystemdesignverfahren ermöglicht.

[0056] Die Implementierung von vorstehend beschriebenen Prozessen oder Verfahrensschritten kann anhand von Instruktionen, insbesondere anhand von Softwarecodeabschnitten, erfolgen, die auf computerlesbaren Speichermedien oder in flüchtigen Computerspeichern (im Folgenden zusammenfassend als computerlesbare Speicher bezeichnet) vorliegen. Computerlesbare Speicher (kurz Speichermedien) sind beispielsweise flüchtige Speicher wie Caches, Puffer oder RAM sowie nichtflüchtige Speicher wie Wechseldatenträger oder Festplatten. Die vorstehend beschriebenen Funktionen oder Verfahrensschritte können dabei in Form wenigstens eines Instruktionssatzes in oder auf einem computerlesbaren Speicher vorliegen. Die Funktionen oder Verfahrensschritte sind dabei nicht an einen bestimmten Instruktionssatz oder an eine bestimmte Form von Instruktionssätzen oder an ein bestimmtes Speichermedium oder an einen bestimmten Prozessor oder an bestimmte Ausführungsschemata gebunden und können durch Software, Firmware, Microcode, Hardware, Prozessoren oder in-

tegrierte Schaltungen im Alleinbetrieb oder in beliebiger Kombination ausgeführt werden. Dabei können verschiedenste Verarbeitungsstrategien zum Einsatz kommen, beispielsweise serielle Verarbeitung durch einen einzelnen Prozessor, Multiprocessing, Multitasking oder Parallelverarbeitung. Die Instruktionen können in lokalen Speichern abgelegt sein, es ist aber auch möglich, die Instruktionen auf einem entfernten System, insbesondere einem Wolkensystem (englisch: Cloud), beispielsweise MindSphere der Siemens AG, abzulegen und darauf via Netzwerk zuzugreifen. Der Begriff Computersystem, wie hier verwendet, umfasst Prozessoren und Verarbeitungsmittel im weitesten Sinne, beispielsweise Server, Universalprozessoren, Grafikprozessoren, digitale Signalprozessoren, anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs), programmierbare Logikschaltungen wie FPGAs, diskrete analoge oder digitale Schaltungen, Quantencomputer, und beliebige Kombinationen davon, einschließlich aller anderen dem Fachmann bekannten oder in Zukunft entwickelten Verarbeitungsmittel. Prozessoren können dabei aus einer oder mehreren Vorrichtungen bestehen. Besteht ein Prozessor aus mehreren Vorrichtungen, können diese zur parallelen oder sequentiellen Verarbeitung von Instruktionen konfiguriert sein.

[0057] Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt oder andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0058]

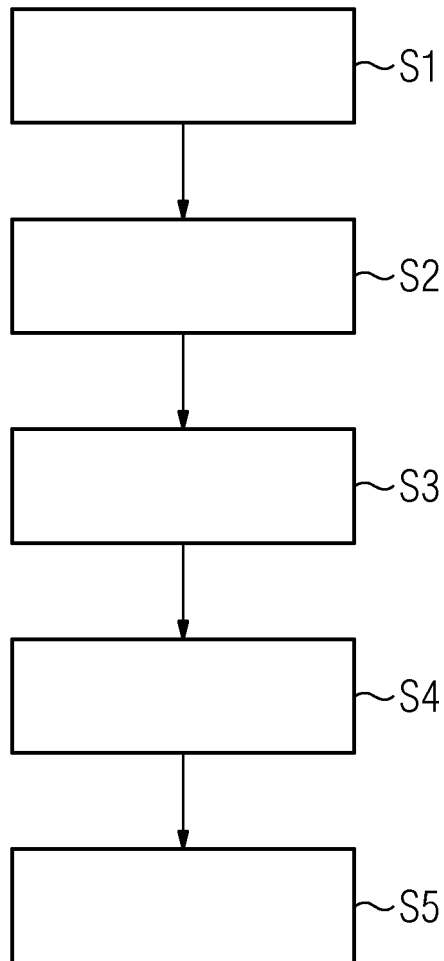
- S1 erster Schritt
- S2 zweiter Schritt
- S3 dritter Schritt
- S4 vierter Schritt
- S5 fünfter Schritt

Patentansprüche

1. Verfahren zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich wenigstens eines Parameters des Energiesystems, umfassend wenigstens die Schritte:

- Bereitstellen einer Lösung der Optimierung für einen Referenzwert des Parameters;
- Bereitstellen eines zur Optimierung zugehörigen Zielfunktionskoeffizientenvektors, der den Parameter umfasst;
- Bereitstellen einer Mehrzahl von zur Optimierung zugehörigen Nebenbedingungen;
- Ermitteln wenigstens einer aktiven Nebenbe-

- dingungen und ihres zugehörigen Normalenvektors; und
 - Ermitteln eines kritischen Wertes des Parameters für welchen der Zielfunktionskoeffizientenvektor parallel zum Normalenvektor der wenigstens einen aktiven Nebenbedingung ist.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem vor der Bereitstellung der Lösung, diese durch ein Extremalisieren einer linearen Zielfunktion berechnet wird. 10
 3. Verfahren gemäß Anspruch 2, bei dem die lineare Zielfunktion Z durch $Z = c^T \cdot x$ ausgebildet wird, wobei c den Zielfunktionskoeffizientenvektor und x den Vektor der Variablen der Optimierung bezeichnet. 15
 4. Verfahren gemäß Anspruch 2 oder 3, umfassend den weiteren Schritt:
 - Extremalisieren der linearen Zielfunktion für den kritischen Wert des Parameters. 20
 5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem das Extremalisieren der linearen Zielfunktion mittels eines Simplex-Verfahrens erfolgt. 25
 6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem als lineare Zielfunktionen die Kohlenstoffdioxidemission des Energiesystems und/oder der Primärenergieeinsatz des Energiesystems und/oder die Gesamtkosten des Energiesystems verwendet werden/wird. 30
 7. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem als Parameter eine elektrische, thermische, chemische und/oder mechanische Last, ein Preis und/oder wenigstens eine metrologische Größe verwendet werden/wird. 35
 8. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend die weiteren Schritte:
 - Affine Transformation des Zielfunktionskoeffizientenvektors;
 - Ermitteln eines linearen Gleichungssystems in Abhängigkeit des Referenzwertes des Parameters und der affinen Transformation des Zielfunktionskoeffizientenvektors; und 45
 - Ermitteln des kritischen Wertes des Parameters mittels eines Lözens des linearen Gleichungssystems. 50
 9. Verfahren gemäß Anspruch 8, bei dem die affine Transformation mittels eines Scharparameters erfolgt, der verschiedene Werte des Parameters kennzeichnet. 55
 10. Verfahren zur Ermittlung einer Auslegung eines Energiesystems, **dadurch gekennzeichnet, dass** hierbei ein Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche verwendet wird.
 11. Computersystem zur Sensitivitätsanalyse eines mittels einer linearen Optimierung ausgelegten Energiesystems bezüglich eines Parameters des Energiesystems, **dadurch gekennzeichnet, dass** dieses zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.
 12. Computersystem gemäß Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** dieses als Quantencomputer ausgebildet ist.
 13. Computersystem gemäß Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** dieses dazu ausgebildet ist eine Quanten-Abkühlung durchzuführen, insbesondere einen Quanten-Algorithmus für lineare Gleichungssysteme.
 14. Computersystem gemäß Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** dieses dazu ausgebildet ist, eine lineare Zielfunktion zu extremalisieren.
 15. Computerprogrammprodukt, welches in einem Speichermedium gespeichert ist und welches Softwarecodeabschnitte umfasst, mit welchen Softwarecodeabschnitten ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10 ausgeführt wird, wenn das Computerprogrammprodukt auf einem Computersystem gemäß einem der Ansprüche 11 bis 14 läuft.





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 18 17 6567

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

| EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE | | | |
|---|--|---|------------------------------------|
| Kategorie | Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile | Betrifft Anspruch | KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC) |
| X | US 2013/060719 A1 (BURKE ROBERT [US] ET AL) 7. März 2013 (2013-03-07) * Zusammenfassung * * Absatz [0023] - Absatz [0038]; Abbildung 1 * | 1-15 | INV. G06Q50/06 |
| A | US 2008/027885 A1 (VAN PUTTEN MAURITIUS H P M [US] ET AL) 31. Januar 2008 (2008-01-31) * Zusammenfassung * | 1-15 | |
| | | | RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) |
| | | | G06Q |
| Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt | | | |
| Recherchenort München | | Abschlußdatum der Recherche 16. Juli 2018 | Prüfer Weidmann, Matthias |
| KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur | | T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument | |

EPO FORM 1503 03.92 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 18 17 6567

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

16-07-2018

| | | | | | | |
|----|--|----|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 10 | Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | | Datum der Veröffentlichung |
| | US 2013060719 | A1 | 07-03-2013 | AU | 2012301674 A1 | 03-04-2014 |
| | | | | CA | 2847189 A1 | 07-03-2013 |
| | | | | CA | 2881363 A1 | 07-03-2013 |
| 15 | | | | CN | 104040570 A | 10-09-2014 |
| | | | | EP | 2751772 A2 | 09-07-2014 |
| | | | | MX | 336907 B | 02-02-2016 |
| | | | | US | 2013060719 A1 | 07-03-2013 |
| | | | | US | 2015347943 A1 | 03-12-2015 |
| 20 | | | | WO | 2013033619 A2 | 07-03-2013 |
| | ----- | | | | | |
| | US 2008027885 | A1 | 31-01-2008 | KEINE | | |
| | ----- | | | | | |
| 25 | | | | | | |
| 30 | | | | | | |
| 35 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| 45 | | | | | | |
| 50 | | | | | | |
| 55 | | | | | | |

EPO FORM P0461

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82