

(19)



(11)

EP 2 394 031 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
13.01.2016 Patentblatt 2016/02

(51) Int Cl.:
F01K 13/02 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **09779575.1**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2009/056529

(22) Anmeldetag: **28.05.2009**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2010/003735 (14.01.2010 Gazette 2010/02)

(54) VERFAHREN ZUR ANLAGENSTEUERUNG IN EINER KRAFTWERKSANLAGE

METHOD FOR INSTALLATION CONTROL IN A POWER PLANT

PROCÉDÉ DE COMMANDE D'INSTALLATION DANS UNE CENTRALE ÉLECTRIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
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 SE SI SK TR

(30) Priorität: **16.06.2008 DE 102008028527**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
14.12.2011 Patentblatt 2011/50

(73) Patentinhaber: **Siemens Aktiengesellschaft 80333 München (DE)**

(72) Erfinder:
• **CHRISTIDIS, Andreas**
10961 Berlin (DE)
• **WENDELBERGER, Klaus**
68789 St. Leon-Rot (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
US-A- 4 868 754 US-A1- 2006 200 325
US-A1- 2007 240 648

EP 2 394 031 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Anlagensteuerung in einer Kraftwerksanlage, bei dem für eine Mehrzahl von Sätzen von Stellwerten jeweils aus einem Satz von Umgebungswerten einerseits und dem jeweiligen Satz von Stellwerten andererseits ein den jeweiligen Sätzen zugeordneter Funktionswert einer auf einem physikalischen Modell basierenden Zielfunktion erzeugt wird, wobei derjenige Satz von Stellwerten zur Weiterleitung an eine Steuereinrichtung der Kraftwerksanlage ausgewählt wird, dessen zugeordneter Funktionswert ein vorgegebenes Optimierungskriterium erfüllt.

[0002] In einem Kraftwerk wird nicht-elektrische Energie, beispielsweise in Form fossiler Brennstoffe in elektrische Energie umgewandelt und einem Stromnetz zur Verfügung gestellt. Je nach verwendetem Typ des benutzten Rohstoffs für die Erzeugung elektrischer Energie unterscheidet man beispielsweise Kohlekraftwerke, Kernkraftwerke, Gas- und Dampfturbinenwerke etc.

[0003] Durch die weltweit steigende Nachfrage an Energie und der Verknappung fossiler Primärenergieträger steigt dabei derzeit der Preis für die maßgeblich zur Verstromung eingesetzten Rohstoffe. Dazu kommen immer strengere Umweltauflagen bzgl. Feinstaub, NO_x , SO_2 und CO_2 . Daher wird angestrebt, die Effizienz der Kraftwerke, d. h. deren Wirkungsgrad zu erhöhen.

[0004] Neben der kostenintensiven Weiterentwicklung und Erneuerung von Anlagenkomponenten lässt sich durch eine moderne Prozessleittechnik auch die Prozessführung unter Einbezug aktueller Randbedingungen optimieren. Dabei können unterschiedliche Optimierungskriterien wie z. B. eine Erhöhung des Wirkungsgrades oder eine Verminderung der Schadstoffemissionen gewünscht sein. Entscheidungen, die traditionell auf der Erfahrung des Bedienpersonals basierten, können dabei heute mit Hilfe von Rechnern und den entsprechenden Verfahren auf Grundlage physikalischer Modelle, welche den Kraftwerksprozess mathematisch modellieren, getroffen werden.

[0005] Üblicherweise umfasst ein derartiges Verfahren eine Zielfunktion, welche auf Basis eines physikalischen Modells der entsprechenden Kraftwerksanlage aus einem Satz von Prozesswerten einen beispielsweise skalar- oder vektorwertigen Funktionswert erzeugt. Die Prozesswerte umfassen dabei einerseits solche, die durch äußere Einflüsse bestimmt werden (Umgebungswerte) wie beispielsweise Umgebungs- und Kühlwassertemperatur, und die sich im laufenden Betrieb ändern. Die Umgebungswerte stellen also aktuelle Randbedingungen dar, auf die man keinen Einfluss hat, die aber einen Einfluss auf den Prozess haben.

[0006] Andererseits umfassen die Prozesswerte auch die Stellwerte wie beispielsweise Position eines Stellantriebes oder Ventils oder Menge des zugeführten Brennstoffs, die im laufenden Betrieb des Kraftwerks vom Bedienpersonal oder einer automatisierten Steuereinrichtung beeinflusst werden können, d. h. in gewissen Grenzen frei wählbare Prozess- oder Zustandsgrößen. Jeder Satz von Stellwerten in Verbindung mit den Umgebungswerten ergibt einen Wert der Zielfunktion, der zur Bewertung des jeweiligen Satzes herangezogen werden kann und es wird üblicherweise der Satz von Stellwerten zur Weiterleitung an eine Steuereinrichtung der Kraftwerksanlage ausgewählt, dessen zugeordneter Funktionswert ein vorgegebenes Optimierungskriterium erfüllt. Im Falle eines skalaren Funktionswertes kann dies beispielsweise der größte oder kleinste Funktionswert sein.

[0007] Um einen optimalen Satz von Stellwerten zur Steuerung der Kraftwerksanlage zu finden, werden üblicherweise Gradientenverfahren zum Finden eines Minimums oder Maximums der Zielfunktion angewendet. Hierfür sind verschiedene Verfahren wie beispielsweise die Methode des steilsten Abstiegs, das (Quasi-)Newton-Verfahren, die sequentielle quadratische Programmierung oder der Simplexalgorithmus bekannt. Gemein ist den Gradientenverfahren dabei, dass ausgehend von einem Startwert ein lokales Maximum oder Minimum der Zielfunktion gefunden wird.

[0008] Die physikalischen Modelle von Kraftwerksanlagen, aus denen sich die Zielfunktion für die Optimierung ergibt, sind meist nicht linear und im Allgemeinen nicht konvex. Abhängig vom gewählten Startwert kann daher das Gradientenverfahren unter Umständen ein lokales Maximum oder Minimum, d. h. einen lokal optimierten Betriebszustand der Kraftwerksanlage finden, jedoch ist dabei nicht sichergestellt, dass dabei auch der global optimale Betriebszustand gefunden wird.

[0009] Aus der US 2004/0240648 A1 ist ein Verfahren zur Anlagensteuerung beschrieben, bei dem unter Verwendung von statistischen und/oder gradienten-basierten Optimierungsverfahren und physikalischen Modellen von Kraftwerksanlagen ein optimaler Satz von Stellwerten zur Steuerung der Anlagen ermittelt wird.

[0010] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Anlagensteuerung in einer Kraftwerksanlage sowie eine Steuerungsvorrichtung für eine Kraftwerksanlage anzugeben, welche bei möglichst geringem steuertechnischem Aufwand einen verbesserten Betrieb der Kraftwerksanlage bezüglich eines gegebenen Optimierungskriteriums wie z. B. eine Verbesserung des Wirkungsgrads oder eine Reduktion der Emissionen ermöglichen.

[0011] Bezüglich des Verfahrens wird diese Aufgabe erfindungsgemäß gelöst, indem die Anzahl von Sätzen von Stellwerten zusätzlich zu einem Startsatz und einem von dem Startsatz und dessen zugeordneten Funktionswert ausgehend mittels eines Gradientenverfahrens ermittelten Satz weiterhin einen mittels eines Zufallsgenerators ausgewählten Satz umfasst.

[0012] Die Erfindung geht dabei von der Überlegung aus, dass ein verbesserter Betrieb der Kraftwerksanlage möglich

wäre, wenn bei der Bestimmung der Stellwerte der Kraftwerksanlage hinsichtlich des gegebenen Optimierungskriteriums wie Wirkungsgraderhöhung und/oder Emissionsminderung auch global ein optimierter Satz von Stellwerten gefunden werden könnte. Dies könnte beispielsweise mit einer Monte-Carlo-Methode geschehen, die zufallsbasiert Stellwerte auswählt und deren Funktionswerte vergleicht und gegebenenfalls in einem weiteren Schritt im Bereich des besten Stellwertsatzes eine weitere Anzahl von zufällig ausgewählten Stellwerten überprüft. Ein derartiges Verfahren ist jedoch vergleichsweise zeitaufwändig und rechenintensiv und daher auch rechentechnisch vergleichsweise aufwändig. Daher sollte das vergleichsweise schnellere Gradientenverfahren grundsätzlich beibehalten werden, jedoch in der Art einer hybriden Struktur durch ein zufallsbasiertes System erweitert werden, so dass auch das Auffinden eines globalen Optimums von Stellwerten ermöglicht wird. Dies ist erreichbar, indem zusätzlich ein mittels eines Zufallsgenerators ermittelter Satz von Stellwerten und dessen zugeordneter Funktionswert der Zielfunktion während des Gradientenverfahrens eingebracht wird, und dieser zufällige Satz von Stellwerten beim Vergleich der Sätze von Stellwerten und deren jeweiligen Funktionswerten eingeht.

[0013] Durch die Kombination eines gradientenbasierten Verfahrens mit einem Zufallsmodell wird einerseits das Auffinden eines globalen Optimums für die Stellwerte für die Anlagensteuerung gewährleistet, andererseits eine vergleichsweise schnelle Konvergenz des Optimierungsalgorithmus auf geeignete Stellwerte gesichert. Daher ist ein derartig ausgestalteter Algorithmus auch für eine Online-Optimierung im Kraftwerksprozess geeignet, d. h. für eine Anpassung der Stellwerte auf den jeweils optimalen Betriebszustand während des laufenden Betriebs der Kraftwerksanlage. Dazu wird das Verfahren vorteilhafterweise zyklisch wiederholend in der Art einer Schleife ausgeführt, wobei der ausgewählte Satz von Stellwerten eines Zyklus der Startsatz des auf diesen folgenden Zyklus ist. Dadurch kann auch während des Betriebs des Kraftwerks ein einmal eingestellter und gefundener Satz von Stellwerten weiter verbessert werden und es findet eine kontinuierliche Suche nach globalen Optima statt.

[0014] Dies ist insbesondere hinsichtlich der sich im Betrieb ändernden Umgebungsparameter von besonderem Nutzen. Ändert sich nämlich beispielsweise ein Umgebungsparameter wie beispielsweise die Kühlwassertemperatur, ist der eingestellte Satz von Stellwerten unter Umständen nicht mehr der optimale Satz von Stellwerten. In diesem Fall wird mittels des kontinuierlich ausgeführten Gradientenverfahrens der Satz von Stellwerten so weit geändert, dass wieder ein neues Optimum hinsichtlich der gewählten Optimierungskriterien eingestellt wird. Aufgrund des komplexen Zusammenhangs der Umgebungswerte mit dem Funktionswert der Zielfunktion kann sich jedoch bei einer Änderung der Umgebungswerte auch ein neues globales Optimum ergeben, welches mit einem reinen Gradientenverfahren nicht gefunden werden würde, da dieses im lokalen Optimum verbleiben würde. Die Verbindung des zufallsbasierten Systems mit dem Gradientenverfahren in zyklischer Ausführung ermöglicht ein Auffinden eines neuen globalen Optimums im Betrieb. Dieses neue Optimum wird dann an eine Steuereinrichtung der Kraftwerksanlage weitergeleitet und kann dort dem Betriebspersonal angezeigt werden und ermöglicht so ein schnelles Reagieren und damit einen besonders effizienten Betrieb der Kraftwerksanlage.

[0015] Eine Online-Optimierung in der Anlagensteuerung einer Kraftwerksanlage ermöglicht es, zu jedem Betriebszeitpunkt einen optimalen Satz von Stellwerten zu ermitteln, der einen besonders effizienten Betrieb der Kraftwerksanlage gewährleistet. Um diesen Satz von Stellwerten möglichst schnell der Anlagensteuerung der Kraftwerksanlage zukommen zu lassen, wird der ausgewählte Satz von Stellwerten vorteilhafterweise in der Steuereinrichtung an den einzelnen Stellwerten jeweils zugeordnete Stelleinrichtungen der Kraftwerksanlage übergeben. Durch eine derartige direkte Weiterleitung der Stellwerte an die entsprechenden Stelleinrichtungen wie beispielsweise die Brennstoffördereinrichtung wird eine besonders schnelle, automatische Optimierung des Kraftwerksbetriebes erreicht. Dabei ist kein Eingriff von Betriebspersonal mehr notwendig, so dass einerseits ein automatisierter Betrieb der Kraftwerksanlage gewährleistet ist und andererseits eine besonders schnelle Weiterleitung der optimalen Stellwerte an die Stelleinrichtungen erfolgt.

[0016] Der Betrieb einer Kraftwerksanlage unterliegt neben den äußeren Einflüssen, die durch die Umgebungswerte eingehen, auch weiteren Restriktionen, unter deren Berücksichtigung die Steuerung und Optimierung durchgeführt werden muss. Derartige Restriktionen können im einfachsten Fall Grenzen einzelner Variablen sein, wie beispielsweise des Kühlwassermassenstroms, oder aber komplexere Zusammenhänge. Diese lassen sich im physikalischen Modell beispielsweise durch Gleichungen oder Ungleichungen, in denen mehrere Variablen kombiniert auftreten, ausdrücken. Um auch derartige Restriktionen bei der Optimierung und Anlagensteuerung angemessen zu berücksichtigen, umfasst die Zielfunktion vorteilhafterweise eine Straffunktion. Eine derartige Straffunktion ist so aufgebaut, dass sie den Wert Null liefert, sofern die Restriktionen nicht verletzt sind, und einen monoton steigenden Zusammenhang zwischen dem Fehler aus der Restriktionsverletzung und ihrem Funktionswert enthält. Durch die Addition von Ziel- und Straffunktion ergibt sich so eine Modifizierung der Zielfunktion, an der die Optimierung durchgeführt wird. Durch diese erzwungene Verschlechterung der Zielfunktionswerte im unzulässigen Bereich liefert das Verfahren einen Satz von Stellwerten, bei dem die Restriktionen nicht verletzt werden. Außerdem ist das Verfahren dadurch in der Lage, auch von einem unzulässigen Startwert das Gradientenverfahren und damit die Optimierung zu beginnen, was bei anderen Verfahren zur Einbindung von Restriktionen nicht immer der Fall ist. Dies ermöglicht eine weitere Vereinfachung des Verfahrens.

[0017] Bei der Ermittlung eines Satzes von Stellwerten mittels des Gradientenverfahrens dient der Gradient als Indikator für die Richtung, in der die jeweiligen Stellwerte verändert werden müssen, um zu einem optimalen Stellwertsatz

zu gelangen. Fraglich ist, wie weit die Stellwerte jedoch verändert werden müssen, d. h. welche Schrittweite bei der Anwendung des Gradientenverfahrens zur Anwendung kommen soll. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass in jeder Iteration eine eindimensionale Optimierung entlang der Suchrichtung durchgeführt wird und so eine scheinbar optimale Schrittweite gefunden wird. Diese führt jedoch dazu, dass die Suchrichtung jeweils orthogonal zur vorherigen ist, da die partielle Ableitung an der aktuellen Stelle nach der vorherigen Suchrichtung durch die eindimensionale Optimierung in der vorangegangenen Iteration auf den Wert Null minimiert wurde. Dieser Effekt führt bei schmalen Tälern der Zielfunktion zu einem Zickzackverlauf mit sehr kleinen Schrittweiten und damit zu vielen Iterationen. Da aber gerade im Falle einer Online-Optimierung eine schnelle Konvergenz angestrebt werden soll, da die Sätze von Stellwerten unmittelbar zum Einsatz in der Kraftwerksanlage kommen sollen, wird vorteilhafterweise vor der jeweiligen Ermittlung des Satzes mittels des Gradientenverfahrens eine Schrittweite vorgegeben. Eine vorgegebene Schrittweite ermöglicht eine schnelle Durchführung des Gradientenverfahrens und sollte so lange konstant gehalten werden, bis eine Iteration (bei einer Minimierung) einen größeren Funktionswert liefert als die vorherige. Dann wird die Schrittweite verkleinert und von dem besten Wert das Verfahren weitergeführt. Dadurch ist eine besonders schnelle Ausführung des Verfahrens und eine besonders effiziente Online-Optimierung des Kraftwerksbetriebes möglich.

[0018] Bezüglich der Steuerungsvorrichtung wird die Aufgabe gelöst durch eine Steuerungsvorrichtung für eine Kraftwerksanlage mit einem Zufallsgeneratormodul und einem Gradientenmodul, welche Datenausgangsseitig mit einem Vergleichsmodul verbunden sind, wobei die Steuerungsvorrichtung für die Ausführung des genannten Verfahrens ausgelegt ist. Vorteilhafterweise kommt eine derartige Steuerungsvorrichtung in einer Kraftwerksanlage mit einer Steuereinrichtung und einer derartigen mit der Steuereinrichtung dateneingangsseitig verbundenen Steuerungsvorrichtung zum Einsatz.

[0019] Die mit der Erfindung erzielten Vorteile bestehen insbesondere darin, dass durch die zusätzliche Berücksichtigung eines mittels eines Zufallsgenerators ausgewählten Satzes von Stellwerten die Möglichkeit des Auffindens einer globalen Lösung mittels des Zufallsgenerators mit der Schnelligkeit des Gradientenverfahrens verbunden wird. Über den Zufallsgenerator werden potentielle Startwerte für das Gradientenverfahren erzeugt, die übernommen werden, sofern sie - im Sinne des physikalischen Modells der Zielfunktion - besser sind als das vom Gradientenverfahren bisher gefundene lokale Optimum. Durch die zyklische Anwendung des Verfahrens und der Verwendung aktueller Umgebungswerte, die direkt aus dem Prozessleitsystem entnommen werden können, ist das Verfahren onlinefähig. Ändert sich der Betriebszustand der Anlage, so fließen diese Informationen online in das physikalische Prozessmodell ein und der Optimierungsalgorithmus findet schnell das neue Optimum. Dabei kann das Verfahren in der Prozessleittechnik eines Kraftwerks zunächst als Hilfestellung für das Bedienpersonal dienen, für eine schnelle Reaktion der Kraftwerksleittechnik jedoch auch direkt an entsprechende Stellantriebe zur automatischen Weiterleitung eingeschaltet werden. Dadurch wird ein besonders effizienter Betrieb einer Kraftwerksanlage bei gering gehaltenem technischen Aufwand ermöglicht.

[0020] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigt die FIG eine schematische Darstellung des Verfahrens zur Anlagensteuerung einer Kraftwerksanlage.

[0021] Das in der FIG dargestellte Verfahren optimiert zyklisch wiederholend die Stellwerte für die Kraftwerksanlage, um einen besonders effizienten Betrieb des Kraftwerks zu erreichen. Durch die zyklische Wiederholung ist das Verfahren onlinefähig, d. h., es kann direkt in die Prozessleittechnik integriert werden und während des Betriebs die momentan optimalen Stellwerte ermitteln. Ein möglicher Anwendungsbereich ist beispielsweise die Optimierung des Intervalls zwischen den Rußblasevorgängen im Kessel der Kraftwerksanlage sowie deren Dauer und die Säuberungsabstände der Filter in der Rauchgasreinigung, wo zwischen kurzzeitiger Minderfunktion und längerfristiger Effizienzerhöhung abgewägt wird. Zwei weitere Optimierungsprobleme aus dem Kraftwerksbereich sind die Bestimmung des optimalen Kühlwassermassenstroms, sofern sich dieser regeln lässt, und die Prozessführung bei der Verbrennung unter Einhaltung von Emissionsgrenzen und anlagenbedingten Einschränkungen.

[0022] Die FIG zeigt den Aufbau des Verfahrens als Blockschaltbild. Dem Gradientenmodul 1 werden Startwerte 3 von einem Speichermodul 5 übergeben, von denen aus in einer Anzahl von Schritten bzw. Iterationen mit Hilfe numerischer Differentiation das nächstliegende Optimum gefunden wird. Basis für diese Optimierung sind die zu jedem Satz von Stellwerten und Umgebungswerten anhand einer auf einem physikalischen Modell basierenden Zielfunktion 7 ermittelten Funktionswerte.

[0023] Dabei werden Restriktionen an die Stellwerte durch eine Straffunktion additiv in die Zielfunktion 7 eingebunden. Solange die Restriktionen eingehalten werden, liefert die Straffunktion den Wert Null, so dass keine Modifikation der Zielfunktion 7 erfolgt. Bei Verletzung der Restriktionen liefert die Straffunktion einen Wert größer (kleiner) Null, wenn es sich um ein Minimierungsproblem (Maximierungsproblem) handelt. Durch einen stetig steigenden (fallenden) Zusammenhang zwischen dem Fehler, der sich aus der Verletzung der Restriktionen ergibt, und dem Funktionswert der Straffunktion wird das Optimierungsverfahren, das mit der durch die Straffunktion modifizierten Zielfunktion 7 arbeitet, automatisch in Richtung des gültigen Bereiches gelenkt, vorausgesetzt die Straffunktion hat eine betragsmäßig größere Steigung als die Zielfunktion. Um dies zu gewährleisten, wird eine stark ansteigende Straffunktion verwendet, wodurch ein Optimum der unmodifizierten Zielfunktion nur unter aktiver Berücksichtigung der Restriktionen innerhalb der geforderten Genauigkeit zum Optimum der Zielfunktion 7 wird.

[0024] Im Gradientenmodul 1 können bereits mehrere Iterationen des Gradientenverfahrens durchgeführt werden, so dass bereits hier ein besonders genauer Satz von Stellwerten eines lokalen Optimums gefunden werden kann. Der so gefundene Satz von Stellwerten wird zusammen mit den jeweils zugeordneten Funktionswerten der Zielfunktion 7 an ein Vergleichsspeichermodul 9 weitergegeben. Dieses vergleicht den aktuellen Funktionswert mit dem (im Sinne der Zielfunktion 7) bisher besten und schaltet in jedem Zyklus denjenigen Satz zum Speichermodul 11 durch, der den kleineren (größeren) Funktionswert besitzt, sofern es sich um eine Minimierung (Maximierung) handelt.

[0025] Das Gradientenverfahren ermöglicht das Finden eines lokalen Optimums von Stellwerten für den Betrieb der Kraftwerksanlage. Insbesondere bei einer Änderung der Umgebungswerte, die durch das Betriebspersonal nicht beeinflussbar sind, kann jedoch unter Umständen ein anderes globales Optimum vorliegen, welches durch das Gradientenverfahren nicht gefunden werden kann. Um auch in diesem Fall einen besonders effizienten Betrieb der Kraftwerksanlage zu gewährleisten, ist ein Zufallsgeneratormodul 13 vorgesehen, welches in jedem Zyklus für jeden Stellwert 15 annähernd gleich verteilte Zufallswerte innerhalb ihres jeweiligen Definitionsbereiches generiert. Der zufällig generierte Satz von Stellwerten 15 wird über die Zielfunktion 7 ausgewertet und zusammen mit dem Funktionswert der Zielfunktion 7 als erster Eingangssatz dem Vergleichsmodul 17 zugeführt, welches als zweiten Eingangssatz den durch das Gradientenverfahren ermittelten Satz aus dem Vergleichsspeichermodul 11 erhält. Das Vergleichsmodul 17 vergleicht die Funktionswerte der zwei Eingangssätze und schaltet in jedem Rechenzyklus den Eingangssatz zum Ausgang durch, der den kleineren (größeren) Funktionswert besitzt, wenn eine Minimierung (Maximierung) vorgesehen ist.

[0026] Bei einer Erweiterung des Systems für die Behandlung einer größeren Anzahl an Stellwerten 15 kann auch die Hinzunahme eines zweiten oder weiterer Zufallsgeneratormodule 13 in Betracht gezogen werden. Damit lässt sich der mit der Anzahl der Stellwerte 15 exponentiell wachsende Optimierungsraum stochastisch intensiver durchsuchen, und damit die Auffindung des globalen Optimums beschleunigen.

[0027] Der Ausgang des Vergleichsmoduls 17 ist mit einem Vergleichsspeichermodul 19 verbunden, welches in dem Zeitfenster, in dem das Gradientenverfahren läuft, den kleinsten bzw. größten Funktionswert mit den dazugehörigen Stellwerten aus dem Vergleichsmodul 17 speichert. Konvergiert das Gradientenverfahren, wird der gespeicherte Satz an das Speichermodul 5 und von dort an die Steuereinrichtung 21 der Kraftwerksanlage übergeben, wobei das Speichermodul 5 dem Gradientenmodul 1 vorgeschaltet ist und dessen Startwerte 3 liefert. Gleichzeitig wird das neu gefundene Optimum, das in das in dem Gradientenmodul 1 nachgeschalteten Vergleichsspeichermodulen 9 vorliegt, an das Speichermodul 11 vor dem Vergleichsmodul 17 weitergegeben und im nächsten Zyklus werden die Vergleichsspeichermodule 9, 19 zurückgesetzt.

[0028] Durch diesen Aufbau wird ein gefundenes Optimum so lange unverändert in der Schleife gehalten, bis entweder aus dem stochastischen Teil ein besserer Stellwertesatz das Ergebnis des letzten Zyklus des Gradientenverfahrens ersetzt oder durch eine Veränderung der Umgebungswerte sich die Lage des Optimums verschoben hat.

[0029] Im Folgenden werden die einzelnen Module des Verfahrens detaillierter beschrieben.

[0030] Das Zufallsgeneratormodul 13 besitzt acht analoge Eingänge zum Angeben der oberen (ULx_i) und unteren (LLx_i) Grenze jedes Stellwerts 15 (hier: 4). In jedem Rechenzyklus wird ein Satz aus Zufallsvariablen x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) erzeugt, die an den vier Ausgängen anliegen, wobei jede einzelne Variable innerhalb ihres Definitionsbereiches annähernd gleichverteilt ist. Damit soll sichergestellt werden, dass der gesamte Definitionsbereich der Variablen abgedeckt wird, und somit die globale Optimierung erfolgreich ist.

[0031] Der Zufallsgenerator jeder einzelnen Variablen basiert auf dem linearen Kongruenzgenerator und ist ein Pseudozufallsgenerator, da bei jedem Starten die gleiche Zufallszahlenfolge ausgegeben wird. So wie viele Zufallsgeneratoren arbeitet auch der lineare Kongruenzgenerator mit der Modulo-Funktion, die den Rest einer Division ausgibt. Die rekursive Bildungsvorschrift der Zufallszahlen $y_i^t \in [0, 1]$ und die der Zufallsvariablen $x_i^t \in [ULx_i, LLx_i]$ beschreiben die Gleichungen 1 und 2. In Tabelle 1 sind die Parameter aufgeführt, die für die vier Zufallsgeneratoren im beschriebenen Baustein verwendet wurden:

$$y_i^{t+1} = ((ay_i^t + b) \bmod m) \bmod 1 \quad (1)$$

$$x_i^t = (ULx_i - LLx_i) y_i^t + LLx_i \quad (2)$$

Tabelle 1: Im Zufallsgeneratormodul 17 verwendete Parameter

	a	b	m
Variable 1	3,141592653589793	2,718281828459045	3

(fortgesetzt)

	a	b	m
Variable 2	3,141592653589793	1,526341538658045	2
Variable 3	2,718281828459045	3,141592653589793	3
Variable 4	2,718281828459045	2,268542658582743	2

[0032] Für die Realisierung der Modulo-Funktion wurde von dem Ergebnis der Division der abgerundete Wert abgezogen, um den Rest zu erhalten. Das Abrunden geschieht durch eine Fallunterscheidung nach folgender Logik:

$Z_0 = 0$
wenn Zahl > 1 und Zahl < 2

$Z_1 = 1$
wenn Zahl > 2 und Zahl < 3

$Z_2 = 2$
(...)

$$\text{abgerundete Zahl} = \sum_i z_i$$

[0033] Bei dieser Vorgehensweise müssen die Parameter a, b und m so gewählt werden, dass alle möglichen Ergebnisse einem Fall in der Fallunterscheidung entsprechen, um eine annähernd gleichverteilte Zahlenfolge zu erhalten.

[0034] Das Vergleichsmodul 17 besitzt analoge Eingangssätze $f(\vec{x})_1, \vec{x}_1$, und $f(\vec{x})_2, \vec{x}_2$ (und wahlweise $f(\vec{x})_3, \vec{x}_3$) sowie

einen Satz analoger Ausgänge $f(\vec{x}), \vec{x}$. Der binäre Eingang $\begin{matrix} 1 = \max \\ 0 = \min \end{matrix}$ dient der Festlegung der Minimierung oder Maximierung (1 = Maximierung, 0 = Minimierung), abhängig von der Zielfunktion. Durchgeschaltet wird jeweils (in jedem Zyklus) das Eingangssatz $f(\vec{x}), \vec{x}$, bei dem $f(\vec{x})_j$ am größten, wenn der Binäreingang wahr (1) ist, bzw. am kleinsten, wenn

der Binäreingang unwahr (0) ist.

[0035] Der dritte Eingang ist im Normalfall ausgeblendet und nicht angeschlossen, wodurch der Wert Null anliegt. Damit das nicht zu einer Fehlfunktion des Vergleichsmoduls 17 führt, wird intern an allen Eingängen, sofern der Wert Null anliegt, dieser durch den kleinsten (Maximierung) bzw. größten (Minimierung) darstellbaren Wert ersetzt, so dass die gewünschte Funktionalität der Filtration erhalten bleibt. Dies muss insbesondere beachtet werden, wenn das gesuchte Optimum bei Null liegt, da dies folglich nicht berücksichtigt wird.

[0036] Das Speichermodul 5, 11 besitzt ein analoges Eingangssatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$, einen binären Eingang SET und ein analoges Ausgangssatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$. Durch das Setzen von SET auf 1 wird der am Eingang liegende Wertesatz an den Ausgang durchgeschaltet, bei Zurücksetzen von SET auf 0 gespeichert und liegt am Ausgang an bis der Eingang SET wieder auf 1 gesetzt wird.

[0037] Das Vergleichsspeichermodul 9, 19 besitzt ein analoges Eingangssatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$, einen binären Eingang

$\begin{matrix} 1 = \max \\ 0 = \min \end{matrix}$ zur Festlegung der Optimierungsart, einen binären Eingang SET, einen binären Eingang RS (RESET) und

einen Satz analoger Ausgänge $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$. Solange SET und RESET unwahr sind, wird der Wertesatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$ gespeichert und am Ausgang ausgegeben, der bisher den größten (Maximierung) bzw. kleinsten (Minimierung) Funktionswert je nach Optimierungsart besitzt. Wird SET auf 1 gesetzt, wird der Eingangssatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$ an den Ausgangssatz $f(\vec{x})$ und $\vec{x}$ durchgeschaltet und bei Zurücksetzen von SET auf 0 gespeichert, wie beim Speichermodul 5. Dieser Satz bleibt gespeichert, bis am Eingang ein Satz mit einem größeren bzw. kleineren $f(\vec{x})$ anliegt und den vorerst durch den "SET"-

Befehl gespeicherten Satz ersetzt. Der binäre "RESET"-Eingang setzt den Speicher auf den kleinsten ($\begin{matrix} 1 = \max \\ 0 = \min \end{matrix} = 1$)

bzw. größten ($\begin{matrix} 1 = \max \\ 0 = \min \end{matrix} = 0$) darstellbaren Wert. Dieser Eingang ist zur Initialisierung erforderlich und muss beim

Starten des Algorithmus einmalig mit einem Puls betätigt werden. Ohne diese Maßnahme wäre der Initialwert des Speichers Null und würde evtl. keine neuen Werte speichern (z. B. bei einer Maximierung mit einer Zielfunktion, bei der alle Funktionswerte negativ sind).

[0038] Das Gradientenmodul 1 besitzt für jeden Stellwert x_i (hier: 4) drei analoge Eingänge zur Festlegung der oberen

(U Lx_i) und unteren (LLx_i) Grenze sowie des Startwertes x_{is}. Weiterhin gibt es einen analogen Eingang $f(\vec{x})$ und für jeden Stellwert x_i einen analogen Eingang $f(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta x_i)$. Zuletzt besitzt der Baustein weitere zwei binäre Eingänge

$1 = \max$ und RS und vier analoge Eingänge "steps", "minstep", "1/Dx" und "Zykluszeit". Über den Eingang $1 = \max$
 $0 = \min$ wird, wie zuvor beschrieben, die Optimierungsart vorgegeben und am Eingang "Zykluszeit" muss die Rechenzykluszeit,

mit der der Optimierungsalgorithmus betrieben werden soll, in Sekunden vorgegeben werden. Über 1/Dx wird der Abstand der Stützstellen für die Bildung des Differenzquotienten vorgegeben und "steps" sowie "minstep" gehen in die Schrittweitensteuerung ein, wie nachstehend beschrieben. Die Ausgänge bestehen aus einem binären Signal "Konv", welches wahr wird, wenn das Gradientenverfahren konvergiert ist, und zwei analogen Ausgängen x_i und x_i + Δx_i für jeden Stellwert.

[0039] Das Gradientenverfahren bildet, wie der Name schon verrät, die partiellen Ableitungen der Zielfunktion nach den Stellwerten, um die Optimierungsrichtung zu ermitteln. Dazu werden, ausgehend von dem Ortsvektor $\vec{xx}^t$, der in der ersten Iteration der Startwertvektor $\vec{x}_s$ ist, Stützstellen gebildet, die jeweils in die Richtung eines Stellwertes x_i um

$\frac{U Lx_i - LLx_i}{1/Dx}$ verschoben sind. Durch die Auswertung der Zielfunktion an den Stützstellen und Bildung der diskre-

tisierten partiellen Ableitungen, ergibt sich die Suchrichtung. Die normierte Suchrichtung wird durch das Teilen des Suchrichtungsvektors (Gradient), durch den Betrag der größten partiellen Ableitung erreicht, so dass die normierte Hauptsuchrichtungskomponente den Betrag eins hat. Die Anfangsschrittweite wird aus dem Definitionsbereich (U Lx_i -

LLx_i) der Stellwerte mit der größten partiellen Ableitung gebildet, indem dieser mit $\frac{steps^{1,5}}{\min step}$ multipliziert wird. Der

neue Vektor $\vec{x}^{t+1}$ ergibt sich aus dem vorherigen in Summe mit der über die Schrittweite gestreckten, normierten Suchrichtung. Dieses Verfahren wird so oft wiederholt, bis der Wert der Zielfunktion sich nicht stetig ändert, sondern oszilliert. Haben die numerisch gebildeten Gradienten dreimal in Reihe ihr Vorzeichen gewechselt, wird der Wert "steps" intern um eins reduziert und das Verfahren läuft mit verringerter Schrittweite weiter. Das Konvergenzkriterium ist erfüllt, wenn die Schrittweite den Wert Null erreicht hat, oder aber sich der Wert der Zielfunktion innerhalb von vier Iterationen nicht ändert. In dem Fall wird der Binärausgang "Konv" wahr und das Gradientenverfahren kann durch Betätigen des "RS"-Einganges und neuen Startwerten neu gestartet werden.

[0040] Durch Einbeziehung der Grenzen jedes einzelnen Stellwertes 15 lässt sich das Optimierungsproblem skalieren. Auf diese Art wird in erster Linie auf die Anforderung einer bestimmten Genauigkeit der Lösung, bezogen auf den Definitionsbereich der Stellwerte 15 Rücksicht genommen. So lässt sich über "min-step" die Größe der kleinsten Schritt-

weite in die Hauptsuchrichtung kurz vor Konvergenz angeben. Diese beträgt $\frac{1}{(\min step)}$ des Definitionsbereiches

der Stellwerte 15, die in unmittelbarer Nähe des Optimums die größte partielle Ableitung aufweist. Darüber lässt sich die geforderte Genauigkeit der Lösung einstellen. Über den Parameter "steps" wird die Anfangsschrittweite festgelegt, die, bezogen auf den Definitionsbereich der Stellwerte 15 mit der momentan größten partiellen Ableitung, um "steps^{1,5}" größer ist als die Endschrittweite. Mit Hilfe dieser einfachen, heuristischen Schrittweitensteuerung lässt sich die Konvergenzgeschwindigkeit deutlich beschleunigen.

[0041] Für die Einbindung der Straffunktionen sind ein binärer Eingang $1 = \max$ zur Festlegung der Optimierungsart,
 $0 = \min$

zwei analoge Eingänge e und $f(\vec{x})$ und ein analoger Ausgang $f(\vec{x}) + p(e)$ vorgesehen. Hierbei ist e der Fehler durch Verletzung der Restriktionen und $f(\vec{x})$ der Wert der Zielfunktion 7. Aus dem Fehler wird der Strafterm p(e) gebildet und bei einer Minimierung zur Zielfunktion 7 addiert bzw. bei einer Maximierung von der Zielfunktion 7 abgezogen. Die Straffunktion p(e) wird durch Gleichung 3 beschrieben:

$$p(e) = (\exp(\sqrt{|e|}) + \sqrt{\frac{|e|}{10}} - 1) \cdot 1000 \quad (3)$$

[0042] Die Restriktionen der Form $g(\vec{x})_1 < 0$ und $g(\vec{x})_2 > 0$ werden als Verbundbausteine mit folgendem Pseudocode eingebunden:

wenn $g(\vec{x})_1 < 0$

$e_1 = 0$

sonst

$e_1 = g(\vec{x})_1$

wenn $g(\vec{x})_2 > 0$

$e_2 = 0$

sonst

$e_2 = g(\vec{x})_2$

$e = e_1 + e_2$

[0043] Für den selteneren Fall einer Restriktion in Form einer Gleichung $h(\vec{x}) = 0$ kann diese durch zwei Ungleichungen $h(\vec{x})_1 < 0$ und $h(\vec{x})_2 > 0$ beschrieben werden.

[0044] Ein Verfahren zur Anlagensteuerung in einer Kraftwerksanlage in oben genannter Ausgestaltung genügt den Anforderungen für den integrierten Einsatz in der Prozessleittechnik und ermöglicht es, schnell einen global optimalen Satz von Stellwerten 15 zu finden. Somit wird ein besonders effizienter Betrieb der Kraftwerksanlage mit einem hohen Wirkungsgrad und/oder besonders geringen Schadstoffemissionen ermöglicht.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Anlagensteuerung in einer Kraftwerksanlage, bei dem für eine Mehrzahl von Sätzen von Stellwerten (15) je-weils aus einem Satz von Umgebungswerten einerseits und dem jeweiligen Satz von Stellwerten (15) andererseits ein den jeweiligen Sätzen zugeordneter Funktionswert einer auf einem physikalischen Modell basierenden Zielfunktion (7) erzeugt wird, wobei derjenige Satz von Stellwerten (15) zur Weiterleitung an eine Steuereinrichtung (21) der Kraftwerksanlage ausgewählt wird, dessen zugeordneter Funktionswert ein vorgegebenes Optimierungskriterium erfüllt, wobei die Anzahl von Sätzen von Stellwerten (15) zusätzlich zu einem Startsatz und einem von dem Startsatz und dessen zugeordnetem Funktionswert ausgehend mittels eines Gradientenverfahrens ermittelten Satzes weiterhin einen mittels eines Zufallsgenerators ausgewählten Satz umfasst.
2. Verfahren zur Anlagensteuerung in einer Kraftwerksanlage, bei dem das Verfahren nach Anspruch 1 zyklisch wiederholend in der Art einer Schleife ausgeführt wird, wobei der ausgewählte Satz von Stellwerten (15) eines Zyklus der Startsatz des auf diesen folgenden Zyklus ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der ausgewählte Satz von Stellwerten (15) in der Steuereinrichtung (21) an den einzelnen Stellwerten jeweils zugeordnete Stelleinrichtungen der Kraftwerksanlage übergeben wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die Zielfunktion (7) eine Straffunktion umfasst.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem vor jeweiliger Ermittlung des Satzes mittels des Gradientenverfahrens eine Schrittweite vorgegeben wird.
6. Steuerungsvorrichtung für eine Kraftwerksanlage mit einem Zufallsgeneratormodul (13) eingerichtet zur Ermittlung eines zufälligen Satzes von Stellwerten und einem Gradientenmodul (1) eingerichtet zur Ermittlung eines optimalen Satzes von Stellwerten, welche datenausgangsseitig mit einem Vergleichsmodul (17) eingerichtet zum Vergleich von Sätzen von Stellwerten verbunden sind, wobei die Steuerungsvorrichtung für die Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5 eingerichtet ist.
7. Kraftwerksanlage mit einer Steuereinrichtung (21) und einer mit der Steuereinrichtung (12) dateneingangsseitig verbundenen Steuerungsvorrichtung nach Anspruch 6.

Claims

1. Method for the installation control in a power plant, wherein a functional value of a target function (7) based on a

physical model is generated for a plurality of sets of variables (15) from respectively a set of environment variables on the one hand and the respective set of variables (15) on the other hand, said functional value being allocated to the respective sets, wherein the set of variables (15) is selected to be transmitted to a control device (21) of the power plant whose allocated functional value complies with a predefined optimisation criterion, wherein, in addition to a starting set and a set determined on the basis of the starting set and the functional value allocated thereto by means of a gradient method, the number of sets of variables (15) further comprises a set selected by a random generator.

2. Method for installation control in a power plant, in which the method according to claim 1 is performed with cyclic repetition in the form of a loop, wherein the selected set of variables (15) of a cycle is the starting set of the cycle following this cycle.
3. Method according to claim 1 or 2, in which the selected set of variables (15) is forwarded in the control device (21) to the respective control devices of the power plant allocated to the individual variables.
4. Method according to one of claims 1 to 3, in which the target function (7) comprises a penalty function.
5. Method according to one of claims 1 to 4, in which, before the determination in each case of the set by means of the gradient method, an increment is predefined.
6. Control apparatus for a power plant with a random generator module (13) designed to determine a random set of variables and a gradient module (1) designed to determine an optimal set of variables, which are connected on the data output side to a comparison module (17) designed to compare sets of variables, wherein the control apparatus is designed to perform the method according to one of claims 1 to 5.
7. Power plant with a control device (21) and a control apparatus according to claim 6 connected to the control device (12) on the data input side.

Revendications

1. Procédé de commande d'installation dans une centrale électrique, dans lequel pour une pluralité de jeux de valeurs (15) de réglage, on produit respectivement à partir d'un jeu de valeurs d'environnement, d'une part, et du jeu respectif de valeurs (15) de réglage, d'autre part, une valeur de fonction affectée au jeu respectif d'une fonction (7) cible reposant sur un modèle physique, le jeu respectif de valeurs (15) de réglage étant sélectionné pour être acheminé à un dispositif (21) de commande de la centrale électrique, dont la valeur de fonction associée satisfait un critère d'optimisation donné à l'avance, le nombre de jeux de valeurs (15) de réglage, en plus d'un jeu de début et d'un jeu, déterminé au moyen d'un procédé à gradient à partir du jeu de début et de sa valeur de fonction associée, comprenant en outre un jeu sélectionné au moyen d'un générateur de nombres aléatoires.
2. Procédé de commande d'installation dans une centrale électrique, dans lequel le procédé suivant la revendication 1 est réalisé de manière répétée cycliquement à la façon d'une boucle, le jeu sélectionné de valeurs (15) de réglage d'un cycle étant le jeu de départ du cycle le suivant.
3. Procédé de commande d'installation suivant la revendication 1 ou 2, dans lequel on remet le jeu sélectionné de valeurs (15) de réglage dans le dispositif (21) de commande aux dispositifs de réglage de la centrale électrique associés respectivement aux diverses valeurs de réglage.
4. Procédé de commande d'installation suivant l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la fonction (7) cible comprend une fonction de pénalisation.
5. Procédé de commande d'installation suivant l'une des revendications 1 à 4, dans lequel on donne à l'avance, avant la détermination respective du jeu, un pas de progression au moyen du procédé à gradient.
6. Dispositif de commande d'une centrale électrique, comprenant un module (13) générateur de nombres aléatoires, conçu pour la détermination d'un jeu aléatoire de valeurs de réglage, et un module (1) de gradient, conçu pour la détermination d'un jeu optimum de valeurs de réglage, lesquels sont reliés, du côté de la sortie de données, en ayant un module (17) de comparaison conçu pour la comparaison de jeux de valeurs de réglage, le dispositif de

EP 2 394 031 B1

commande étant conçu pour la réalisation du procédé suivant l'une des revendications 1 à 5.

7. Centrale électrique ayant un dispositif de commande suivant la revendication 6, relié, du côté de l'entrée de données, au dispositif (12) de commande.

5

10

15

20

25

30

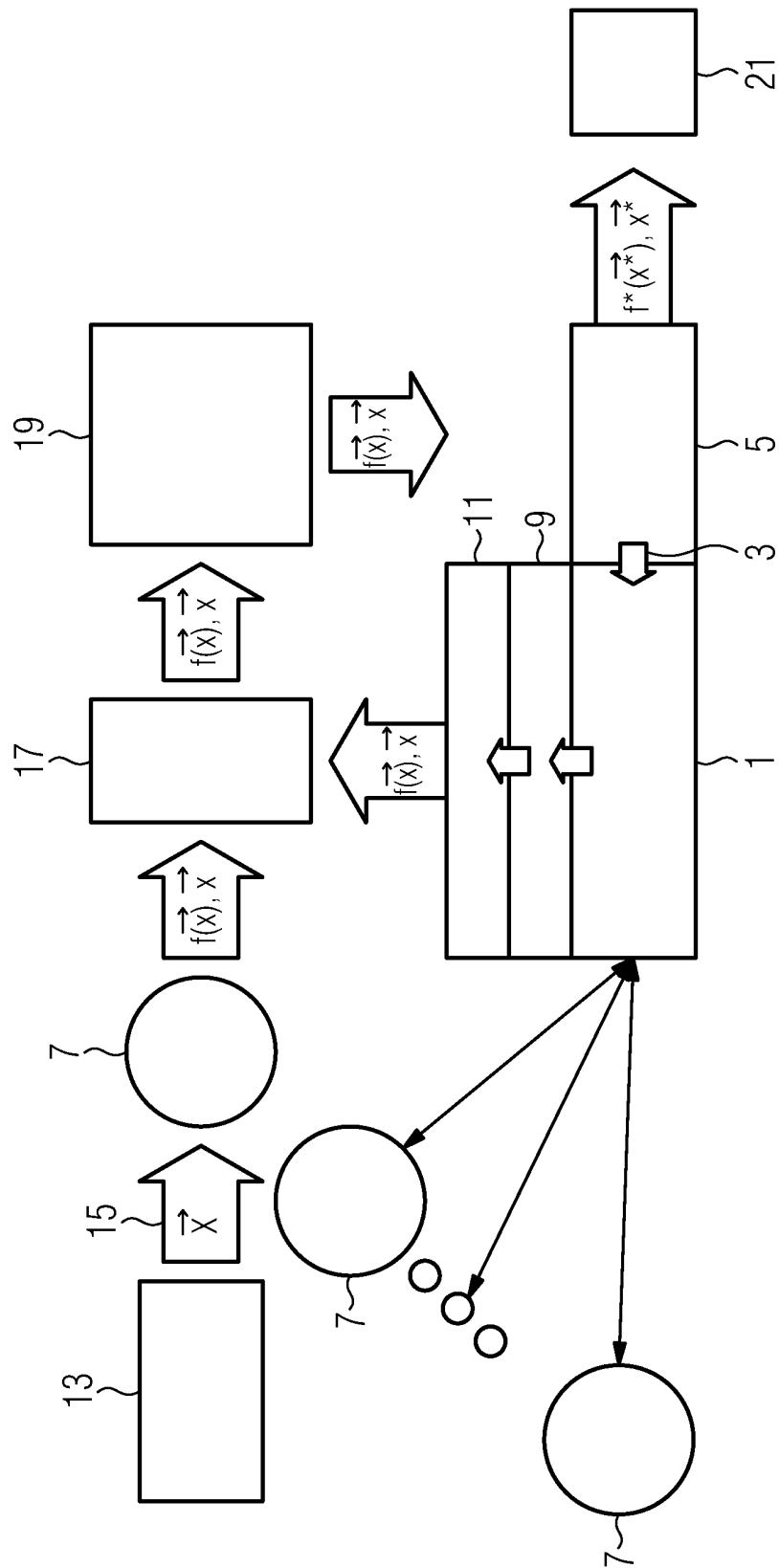
35

40

45

50

55



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 20040240648 A1 [0009]