



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 105 861.9**

(22) Anmeldetag: **07.03.2019**

(43) Offenlegungstag: **10.09.2020**

(51) Int Cl.: **G01R 19/10 (2006.01)**
G01R 25/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
SMA Solar Technology AG, 34266 Niestetal, DE

(74) Vertreter:
**Patent- und Rechtsanwälte Loesenbeck, Specht,
Dantz, 33602 Bielefeld, DE**

(72) Erfinder:
**Sakschewski, Vitali, 34281 Gudensberg, DE;
Buelo, Thorsten, 34121 Kassel, DE; Rauscher,
Florian, 38118 Braunschweig, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2010 023 038 A1
DE 10 2011 084 910 A1

SULLA F. ; SAMUELSSON O. : Estimation of the Zero Sequence Voltage on the D-Side of a DY Transformer by Using One Voltage Transformer on the D-Side. In: Proceedings of 2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection, 2008, S. 517 – 522. - ISSN: 0537-9989

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

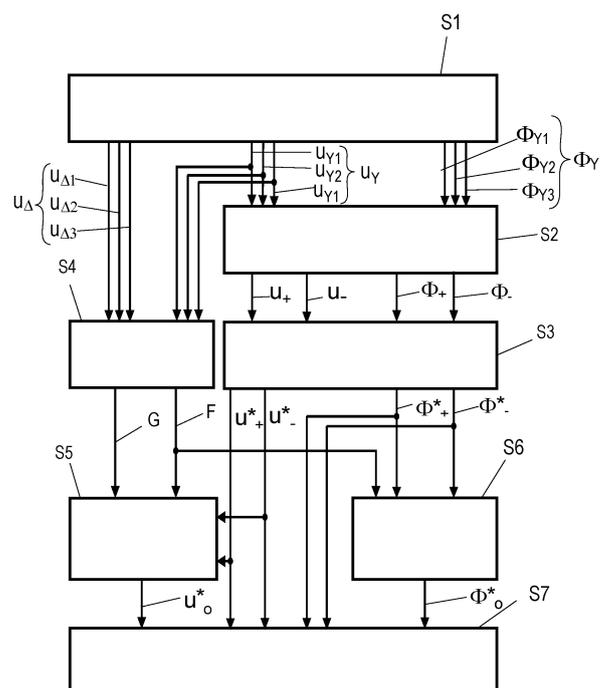
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur näherungsweise Bestimmung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators (4) anhand von gemessenen Spannungen an einer Unterspannungsseite des Transformators (4). Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf:

- Messen von Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_Y) und Phasenwinkeln (Φ_Y) an der Unterspannungsseite des Transformators (4);
- Transformieren der Strangspannungen (u_Y) und Phasenwinkel (Φ_Y) in Mit- und Gegensystemspannungen (u_+ , u_-) und Phasenwinkel (Φ_+ , Φ_-) des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite;
- Bestimmen von Mit- und Gegensystemspannungen (u^*_+ , u^*_-) und Phasenwinkeln (Φ^*_+ , Φ^*_-) des Mit- bzw. Gegensystems an der Oberspannungsseite aus den Mit- und Gegensystemspannungen (u_+ , u_-) und Phasenwinkeln (Φ_+ , Φ_-) des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite;
- Abschätzen einer Nullsystemspannung (u^*_0) und eines Phasenwinkels (Φ^*_0) eines Nullsystems an der Oberspannungsseite; und
- Transformieren der Mit-, Gegen- und Nullsystemspannungen (u^*_+ , u^*_- , u^*_0) und der Phasenwinkel (Φ^*_+ , Φ^*_- , Φ^*_0) in Strangspannungen und/oder Dreiecksspannungen an der Oberspannungsseite des Transformators (4).

Die Erfindung betrifft weiter eine zur Durchführung des Verfahrens eingerichtete Vorrichtung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur näherungsweise Bestimmung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators anhand von gemessenen Spannungen an einer Unterspannungsseite des Transformators. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Vorrichtung, insbesondere als Teil eines Wechselrichters, die zur Durchführung des genannten Verfahrens geeignet ist.

[0002] Wechselrichter werden in Energieversorgungsanlagen, beispielsweise Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) eingesetzt und dienen dort der Umwandlung von Gleichstrom in einen zur Einspeisung in ein Energieversorgungsnetz geeigneten netzkonformen Wechselstrom. Falls eine galvanische Trennung zwischen dem Energieversorgungsnetz und dem Wechselrichter gewünscht oder aufgrund von Richtlinien und gesetzlichen Bestimmungen für bestimmte Energieversorgungsnetze gefordert ist, ist zwischen einem Wechselstromausgang des Wechselrichters und dem Energieversorgungsnetz ein Transformator angeordnet.

[0003] Insbesondere bei größeren Photovoltaikanlagen, die unmittelbar an ein Mittelspannungsnetz angeschlossen werden, ist die Verwendung von Transformatoren unerlässlich. Gemäß beispielsweise der normativen Vorgabe „IEEE 1547“ ist gefordert, dass Fehlerzustände des Energieversorgungsnetzes innerhalb der Energieversorgungsanlage detektiert werden können und die Energieversorgungsanlage nach Erkennung bestimmter Fehlerzustände auf diese reagiert und sich beispielsweise vom Netz trennt. Derartige Fehlerzustände sind z.B. Kurzschlüsse auf der Oberspannungsseite des Transformators. Konkret ist vorgesehen, dass ein Über- und/oder Unterschreiten von vorgegebenen Werten für die Leiter-Leiter-Spannungen (auch Dreiecksspannungen genannt) und/oder die Leiter-Erd-Spannungen (auch Strangspannungen genannt) detektiert wird, um auf Fehlerzustände zu schließen und das Einspeiseverhalten des Wechselrichters wie gefordert anzupassen. Dabei ist zu bedenken, dass bestimmte Transformatorarten keinen Neutralleiter auf der Oberspannungsseite aufweisen oder diesen nicht zur Unterspannungsseite weiterleiten, wodurch keine Nullsystem-Spannung übertragen wird, was einen Informationsverlust darstellt.

[0004] Um die geforderte Änderung des Einspeiseverhaltens umsetzen zu können, ist Kenntnis der verschiedenen Leiter-Leiter-Spannungen, sowie der Leiter-Erd-Spannungen an der Oberspannungsseite des Transformators Voraussetzung.

[0005] Eine messtechnische Erfassung dieser Spannungen ist aufgrund des hohen Spannungsniveaus jedoch unter Umständen sehr aufwändig und

kostenintensiv, beispielsweise wenn der Transformator an seiner Oberspannungsseite mit einem Mittelspannungsnetz mit Spannungen im Bereich von 20 kV (Kilovolt) verbunden ist. In einigen Netzsystemen ist es daher zulässig, das Einspeiseverhalten des Wechselrichters abhängig von Spannungsniveaus an der Unterspannungsseite des Transformators zu machen. Insbesondere bei Transformatorarten, bei denen eine Nullsystem-Spannung nicht übertragen wird, spiegeln die Spannungsverhältnisse an der Unterseite des Transformators die Spannungsverhältnisse an der Oberspannungsseite des Transformators jedoch nur unzureichend wider. Eine unmittelbar anhand von Spannungsmessungen an der Unterspannungsseite des Transformators durchgeführte Fehlerbestimmung kann in dem Fall einen an der Oberspannungsseite des Transformators aufgetretenen Fehler nicht unbedingt korrekt detektieren. Für eine korrekte Fehlerdetektion ist eine möglichst genaue Kenntnis der Spannungsverhältnisse an der Oberspannungsseite des Transformators unerlässlich.

[0006] In dem Artikel „Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips“ von Bollen und Styvaktakis, IEEE, 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, 2000, pp. 899-904, vol. 2, wird eine Methode beschrieben, mit der anhand von gemessenen Spannungen an einer Unterspannungsseite eines Transformators qualitative Aussagen über Fehlerzustände an der Oberspannungsseite des Transformators getroffen werden können. Nur qualitative Aussagen sind jedoch nicht geeignet, um konkrete Kriterien, die sich auf Spannungswerte an der Oberspannungsseite des Transformators beziehen, umzusetzen.

[0007] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung bzw. ein Wechselrichter anzugeben, mit denen die Spannungsverhältnisse an einer Oberspannungsseite eines Transformators zuverlässig anhand der Spannungsverhältnisse an der Unterspannungsseite quantifiziert werden können, so dass eine Fehlerdetektion für die Oberspannungsseite des Transformators auch ohne eine messtechnische Erfassung der Spannungswerte an der Oberspannungsseite des Transformators erfolgen kann.

[0008] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren und einen Wechselrichter mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0009] Ein erfindungsgemäßes Verfahren der eingangs genannten Art weist die folgenden Schritte auf: Es werden Dreiecksspannungen, Strangspannungen und Phasenwinkel an der Unterspannungsseite des Transformators gemessen und die Strangspannungen und Phasenwinkel in Mit- und Gegen-

systemspannungen und Phasenwinkel des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite transformiert. Dann werden Mit- und Gegensystemspannungen und Phasenwinkel des Mit- bzw. Gegensystems an der Oberspannungsseite aus den Mit- und Gegensystemspannungen und Phasenwinkeln des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite bestimmt. Eine Nullsystemspannung und ein Phasenwinkel eines Nullsystems an der Oberspannungsseite wird abgeschätzt und durch Transformation die Mit-, Gegen- und Nullsystemspannungen und der Phasenwinkel in Strangspannungen und/oder Dreiecksspannungen an der Oberspannungsseite des Transformators bestimmt.

[0010] Spannungen an der Unterspannungsseite des Transformators sind beispielsweise die an Anschlüssen eines Wechselrichters, der über den Transformator mit einem Energieversorgungsnetz gekoppelt ist, anliegenden Spannungen. Entsprechend kann eine Vorrichtung, die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist, an Ausgangsanschlüssen eines Wechselrichters angeordnet sein oder auch in einen Wechselrichter integriert sein.

[0011] Das erfindungsgemäße Verfahren beruht auf der Grundidee, dass eine Bestimmung der Spannungen an der Oberspannungsseite in einem rotierenden Koordinatensystem vorteilhaft ist, da zwei von drei benötigten Spannungen, nämlich die des Mit- bzw. Gegensystems, sowie die zugehörigen Phasenwinkeln sich leicht aus den entsprechenden messbaren Werten der Unterspannungsseite ergeben. Somit braucht lediglich für die entsprechenden Parameter des Nullsystems eine Abschätzung erfolgen.

[0012] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens werden die Mit- und Gegensystemspannungen an der Oberspannungsseite den Mit- bzw. Gegensystemspannungen an der Unterspannungsseite gleich gesetzt. Dabei kann optional ein Korrekturwert hinzuaddiert werden. Bevorzugt werden die Phasenwinkel des Mit- bzw. Gegensystems an der Oberspannungsseite aus den Phasenwinkeln an der Unterspannungsseite gesetzt, wobei ein Phasenkorrekturwert hinzuaddiert wird, der das n -fache von 30° für das Mitsystem und das n -fache von -30° für das Gegensystem beträgt. Dabei ist n ein ganzzahliger Wert, der von dem Typ des Transformators abhängt. Insbesondere wird der Wert von n abhängig von oder auch gleich einer Transformatorverschiebung des Transformators gewählt. Bis auf den genannten optionalen Korrekturwert für die Spannungen können die vier benötigten Spannungsparameter der Oberspannungsseite damit unmittelbar angegeben werden.

[0013] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird zum Abschätzen der Nullsystemspannung und des Phasenwinkels des Nullsys-

tems an der Oberspannungsseite anhand der gemessenen Dreiecksspannungen und Strangspannungen an der Unterspannungsseite eine qualitative Fehlerbestimmung vorgenommen, durch die auf das Vorliegen eines Fehler an einer Phase oder mehrerer der Phasen der Oberspannungsseite geschlossen werden kann und durch die ein Erdschluss einer der Phasen der Oberspannungsseite erkannt werden kann. Hierbei wird zunächst nur qualitativ ermittelt, auf welcher Phase oder auf welchen Phasen ein Fehler vorliegt.

[0014] Vorteilhaft kann dabei auf an sich bekannte und etablierte Verfahren zurückgegriffen werden. Beispielsweise kann zur qualitativen Fehlerbetrachtung aus den gemessenen Dreiecksspannungen und Strangspannungen eine minimale Spannung ermittelt werden, wobei ein Vergleich der gemessenen Dreiecksspannungen und Strangspannungen mit der minimalen Spannung auf eine fehlerbehaftete Phase an der Oberspannungsseite schließen lässt. Weiter kann zur qualitativen Fehlerbestimmung aus den gemessenen Dreiecksspannungen und Strangspannungen eine maximale Spannung ermittelt werden, wobei ein Vergleich der maximalen Spannung mit einem Vergleichswert, der charakteristisch ist für das oberspannungsseitige Netz, mit dem der Transformator verbunden ist, auf einen Erdschluss an der Oberspannungsseite schließen lässt. Der Vergleichswert kann dabei abhängig von einer subtransienten Kurzschlussleistung des Netzes gewählt werden.

[0015] Im Ergebnis kann anhand dieser qualitativen Fehlerbetrachtung ermittelt werden, ob ein einpoliger oder ein zweipoliger Kurzschluss an der Oberspannungsseite vorliegt und/oder ob ein einpoliger oder ein zweipoliger Erdschluss vorliegt.

[0016] Eine folgende Abschätzung von Parametern des Nullspannungssystems kann auf der Basis eines solchen Ergebnisses der qualitativen Fehlerbetrachtung mit höherer Qualität erfolgen. So wird vorteilhaft beim Vorliegen eines einpoligen Erdschlusses der Wert für die Nullsystemspannung an der Oberspannungsseite gleich dem Produkt der Gegensystemspannung und der Wurzel der Mitsystemspannung gesetzt. Beim Vorliegen eines zweipoligen Kurzschlusses wird der Wert für die Nullsystemspannung an der Oberspannungsseite gleich null gesetzt. Beim Vorliegen eines zweipoligen Erdschlusses wird dagegen der Wert für die Nullsystemspannung an der Oberspannungsseite gleich dem Quotient des Quadrats der Gegensystemspannung und der Mitsystemspannung gesetzt.

[0017] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird der Wert für den Phasenwinkel im Nullsystem an der Oberspannungsseite gleich dem Phasenwinkel im Gegensystem an der Oberspannungsseite gesetzt, zuzüglich eines Phasenoff-

sets, der 0° , 120° oder -120° beträgt, abhängig davon, auf welcher Phase an der Oberspannungsseite der qualitativ bestimmte Fehler vorliegt.

[0018] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von einem Ausführungsbeispiel mit Hilfe von Figuren näher erläutert. Die Figuren zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer an ein Energieversorgungsnetz angeschlossene PV-Anlage ;

Fig. 2 ein schematischer Ablaufplan eines Ausführungsbeispiels eines anmeldungsgemäßen Verfahrens; und

Fig. 3 ein Blockschaltbild eines Wechselrichters mit einer integrierten anmeldungsgemäßen Vorrichtung.

[0019] **Fig. 1** zeigt in einem Blockschaltbild eine PV-Anlage **1** als ein Beispiel einer dezentralen Energieversorgungsanlage. Die PV-Anlage **1** umfasst einen PV-Generator **2**, der über einen Gleichstromeingang **31** an einen Wechselrichter **3** angeschlossen ist. Der Wechselrichter **3** ist über Wechselstromausgänge **32** mit einer Primärseite **41** eines Transformators **4** verbunden. Der Transformator **4** ist im dargestellten Beispiel ein Mittelspannungstransformator, der an seiner Sekundärseite **42** Spannungen im Bereich von etwa 20 kV bereitstellt und entsprechend mit einem Mittelspannungsnetz **5** als Energieversorgungsnetz verbunden ist.

[0020] Die Struktur der PV-Anlage **1** ist in der **Fig. 1** beispielhaft und vereinfacht dargestellt. Der in der **Fig. 1** nur durch das Schaltsymbol einer PV-Zelle symbolisierte PV-Generator **2** umfasst bei einer unmittelbar in das Mittelspannungsnetz **5** einspeisenden PV-Anlage **1** üblicherweise eine Vielzahl von PV-Modulen, von denen jeweils mehrere zu sogenannten PV-Strings serienverschaltet sind, die wiederum jeweils parallel geschaltet mit dem Wechselrichter **3** verbunden sind. Der Wechselrichter **3** ist bei Anlagen dieser Art üblicherweise als ein Zentralwechselrichter ausgebildet. Der Wechselrichter **3** ist im dargestellten Beispiel dreiphasig ausgeführt, wie es in Verbindung mit Mittelspannungsnetzen **5** üblich ist. In der **Fig. 1** sind lediglich die im Rahmen der Anmeldung wesentlichen Teile der PV-Anlage **1** dargestellt. Weitere gleich- oder wechselstromseitig vom Wechselrichter **3** angeordnete Elemente, wie zum Beispiel Trenn- oder Schaltorgane, Filter oder Überwachungseinrichtungen, sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

[0021] Üblicherweise entfernt von der PV-Anlage **1** ist im weiteren Verlauf des Mittelspannungsnetzes **5** ein (Hochspannungs-)Transformator **6** vorgesehen, über den die Mittelspannungsebene **5** mit einem Hochspannungsnetz **7** verbunden ist, das als übergeordnetes Energieversorgungsnetz dient.

[0022] Durch die galvanische Trennung der Primärseite **41** des Transformators **4** von der Sekundärseite **42** kann eine häufig von Betreibern des Energieversorgungsnetzes **7** geforderte separate Erdung der PV-Anlage **1** erfolgen, hier beispielhaft indem ein negativer Pol des PV-Generators **2** mit einem Erdpotential verbunden ist.

[0023] Der Transformator **4** weist unterspannungsseitig, an seiner mit dem Wechselrichter **3** verbundenen Primärseite **41** Wicklungen in einer sternförmigen Verschaltung auf. Ein Nullleiteranschluss ist unterspannungsseitig nicht herausgeführt. Auf der Sekundärseite **42** an der Oberspannungsseite des Transformators sind die Wicklungen ebenfalls sternförmig verschaltet, wobei ein Nullleiteranschluss separat herausgeführt ist und als Erdungsanschluss dient. Der Transformator **4** ist somit ein YNy-Transformator.

[0024] Um Erfordernisse in Hinblick auf eine Fehlererkennung im Mittelspannungsnetz **5** umsetzen zu können, ist anmeldungsgemäß vorgesehen, aus gemessenen Spannungen an der Unterspannungsseite (Primärseite **41**) des Transformators **4** Spannungen an der Oberspannungsseite (Sekundärseite **42**) durch eine Schätzung zu ermitteln. Die Spannungen an der Primärseite **41** des Transformators **4** können beispielsweise im Bereich der transformatorseitigen Anschlüsse des Wechselrichters **3** gemessen werden. Ein für die Schätzung der Spannungen an der Oberspannungsseite geeignetes anmeldungsgemäßes Verfahren ist in **Fig. 2** in Form eines Ablaufplans dargestellt. Beispielhaft wird das Verfahren anhand der PV-Anlage gemäß **Fig. 1** erläutert.

[0025] In einem ersten Schritt **S1** werden Spannungen am Wechselstromausgang **32** des Wechselrichters **3** und damit an der Unterspannungsseite des Transformators **4** gemessen. Konkret sind dies die sogenannten Dreiecksspannungen u_{Δ} zwischen zweien der Leiter (nachfolgend auch Phasen genannt), sowie Strangspannungen u_{γ} zwischen einem Leiter und einem (künstlich) Nullleiter sowie mit diesen Strangspannungen verbundene Phasenwinkel Φ_{γ} . Konkret werden drei Dreiecksspannungen u_{Δ} gemessen, eine erste Dreiecksspannung $u_{\Delta 12}$ zwischen einer ersten und zweiter Phase, eine zweite Dreiecksspannung $u_{\Delta 23}$ zwischen der zweiten und einer dritten Phase und eine dritte Dreiecksspannung $u_{\Delta 31}$ der dritten und der ersten Phase. Wenn nachfolgend von den Dreiecksspannungen u_{Δ} gesprochen wird, sind die drei genannten Spannungen umfasst.

[0026] Die Strangspannungen u_{γ} umfassen ebenfalls drei Spannungswerte, nämlich eine erste Strangspannung $u_{\gamma 1}$, die zwischen der ersten Phase und dem künstlichen Nullleiter gemessen wird, eine zweite Strangspannung $u_{\gamma 2}$, die zwischen der zweiten Phase und dem künstlichen Nullleiter gemessen

wird und eine dritte Strangspannung u_{Y3} , die zwischen der dritten Phase und dem künstlichen Nullleiter gemessen wird. Wiederum werden nachfolgend unter den Strangspannungen u_Y die drei genannten Werte verstanden. Als künstlicher Nullpunkt kann beispielsweise ein Knoten angesehen werden, der über drei gleiche Widerstände mit den drei Phasen verbunden ist.

[0027] Auch die Phasenwinkel Φ_Y umfassen drei Werte, einen ersten Phasenwinkel Φ_{Y1} , der eine Phasenlage der ersten Strangspannung u_{Y1} angibt, einen zweiten Phasenwinkel Φ_{Y2} , der eine Phasenlage der zweiten Strangspannung u_{Y2} angibt, und einen dritten Phasenwinkel Φ_{Y3} , der eine Phasenlage der dritten Strangspannung u_{Y3} angibt.

[0028] In einem Schritt **S2** wird eine Transformation der gemessenen zeitabhängigen Spannungsmesssignale, die sich in den Strangspannungen u_Y und den Phasenwinkeln Φ_Y darstellen, in ein rotierendes Koordinatensystem vorgenommen. Die Darstellung der Messgrößen in dem rotierenden Koordinatensystem erfolgt in bekannter Form eines Mitspannungssystems und eines Gegenspannungssystems, das jeweils in Betrag und Phase komplex angegeben wird. In dem Schritt **S2** werden somit aus den genannten Eingangsgrößen der Strangspannungen u_Y und den Phasenwinkeln Φ_Y ein Mitsystemspannungsbetrag u_+ und ein Mitsystemspannungsphasenwinkel Φ_+ bestimmt. Weiter werden ein Gegensystemspannungsbetrag u_- und ein Gegensystemspannungsphasenwinkel Φ_- ermittelt.

[0029] Die vier in Schritt **S2** ermittelten Werte werden in einem nächsten Schritt **S3** in entsprechende Werte auf der Oberspannungsseite (Sekundärseite **42**) des Transformators **4** umgesetzt. Nachfolgend sind Spannungswerte, die sich auf die Oberspannungsseite des Transformators beziehen, durch einen hochgestellten Stern (*) gekennzeichnet.

[0030] Die Umsetzung der symmetrischen Komponenten (d.h. der Mitsystem- und der Gegensystemkomponenten) der Unterspannungsseite auf die Oberspannungsseite basiert in einer Ausgestaltung auf der Annahme, dass sich die Beträge der Mitsystem- und Gegensystemspannungen zwischen Unterspannungsseite und Oberspannungsseite des Transformators nicht ändern. In einer Weiterbildung können dabei Korrekturwerte c_+ bzw. c_- für das Mit- und das Gegensystem berücksichtigt werden. Es ergibt sich damit für die Mit- bzw. Gegensystemspannungen auf der Oberspannungsseite:

$$u_+^* = u_+ + c_+$$

$$u_-^* = u_- + c_-$$

[0031] Je nach Schaltungstopologie des Transformators unterscheiden sich Phasenwinkel Φ_+^* bzw. Φ_-^* auf der Oberspannungsseite des Transformators von den entsprechenden Phasenwinkeln Φ_+ bzw. Φ_- um eine Anzahl von n Vielfachen von 30° . Die Größe n ist dabei von der Schaltungstopologie des Transformators abhängig und wird auch als Trafoverschiebung bezeichnet. Damit ergibt sich:

$$\Phi_+^* = \Phi_+ + n \cdot 30^\circ$$

$$\Phi_-^* = \Phi_- - n \cdot 30^\circ$$

[0032] In einem nächsten Schritt **S4**, der zeitlich gesehen parallel oder im Wesentlichen parallel zu den Schritten **S2** und **S3** ausgeführt werden kann, wird ausgehend von den Dreiecksspannungen u_Δ und den Strangspannungen u_Y ein qualitativer Hinweis auf einen Fehler auf der Oberspannungsseite ermittelt. Der Schritt **S4** dient dabei nicht einer unmittelbaren Fehlerangabe eines möglicherweise auf der Oberspannungsseite vorliegenden Fehlers, sondern wird durchgeführt, um die Abschätzung von Spannungen an der Oberspannungsseite des Transformators, die letztlich zu Fehlererkennung herangezogen werden, zu ermöglichen. Dieses wird detaillierter im Zusammenhang mit den Schritten **S5** und **S6** ausgeführt.

[0033] Im Schritt **S4** wird qualitativ ermittelt, ob ein Fehler bei einer der oberspannungsseitigen Phasen vorliegt und es wird erfasst, ob der beobachtete Fehler ein Erdschlussfehler ist. Abhängig von dem Ergebnis in Schritt **4** wird eine Information **F** ermittelt, die angibt, ob und auf welcher Phase oder auf welchen Phasen ein Fehler vorliegt. Weiter wird eine Information **G** ermittelt, die einen Erdschluss anzeigt. Diese Signale bzw. Werte werden nachfolgend als Fehlerinformationen **F**, **G** bezeichnet. Die Fehlerinformationen **F** und **G** werden zur weiteren Bearbeitung in einem Schritt **S5** benötigt, die Fehlerinformation **F** zusätzlich in einem weiteren Schritt **S6**.

[0034] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird zur Bestimmung der Fehlerinformationen **F**, **G** eine Vorgehensweise verwendet, die sich an den eingangs genannten Artikel von Bollen und Styvaktakis, IEEE, 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, 2000, pp. 899-904, vol. 2 orientiert. Konkret wird zur Bestimmung des Fehlersignals **F** ein minimaler Spannungsbetrag V_{min} und ein maximaler Spannungsbetrag V_{max} unter den Dreiecksspannungen u_Δ und den Strangspannungen u_Y bestimmt. Weiter wird die Information benötigt, welcher Transformatorrentyp oberspannungsseitig vorliegt.

[0035] Entspricht der minimale Spannungsbetrag V_{min} der ersten Strangspannung u_{Y1} , liegt auf der Oberspannungsseite bei einem Y-Trafo ein Fehler

auf der ersten Phase und bei einem D-Trafo ein Fehler der ersten Dreiecksspannung vor. Entspricht der minimale Spannungsbetrag V_{\min} der zweiten Strangspannung u_{Y2} , liegt auf der Oberspannungsseite bei einem Y-Trafo ein Fehler auf der zweiten Phase und bei einem D-Trafo ein Fehler der zweiten Dreiecksspannung vor. Entspricht der minimale Spannungsbetrag V_{\min} der dritten Strangspannung u_{Y3} , liegt auf der Oberspannungsseite bei einem Y-Trafo ein Fehler auf der dritten Phase und bei einem D-Trafo ein Fehler der dritten Dreiecksspannung vor. Die Definitionen von Strang- und Dreiecksspannungen auf der Oberspannungsseite sind dabei analog zu denen auf der Unterspannungsseite.

[0036] Entspricht dagegen der minimale Spannungsbetrag V_{\min} der ersten Dreiecksspannung $u_{\Delta 12}$, liegt auf der Oberspannungsseite bei einem D-Trafo ein Fehler auf der zweiten Phase und bei einem Y-Trafo ein Fehler der ersten Dreiecksspannung vor. Entspricht der minimale Spannungsbetrag V_{\min} der zweiten Dreiecksspannung $u_{\Delta 23}$, liegt auf der Oberspannungsseite bei einem Y-Trafo ein Fehler auf der dritten Phase und bei einem D-Trafo ein Fehler der zweiten Dreiecksspannung vor. Entspricht der minimale Spannungsbetrag V_{\min} der dritten Dreiecksspannung $u_{\Delta 31}$, liegt auf der Oberspannungsseite bei einem Y-Trafo ein Fehler auf der ersten Phase und bei einem D-Trafo ein Fehler der dritten Dreiecksspannung vor.

[0037] Ebenfalls der Methode von Bollen folgend kann ein Erdschluss ermittelt werden, indem der maximal aufgetretene Spannungsbetrag V_{\max} mit einem sogenannten „ground indicator“ GI verglichen wird. Liegt der Spannungsbetrag V_{\max} unter dem Wert GI wird auf einen Erdschluss geschlossen. Die Größe des ground indicators GI ist abhängig von einer subtransienten Kurzschlussleistung des Netzes, an das der Transformator mit seiner Oberspannungsseite angebunden ist.

[0038] In nachfolgenden Schritten **S5** und **S6** werden aus den bislang bestimmten und als Ergebnis der Schritte **S3** und **S4** vorliegenden Parametern ein Betrag der Nullspannung im Nullspannungssystem u^*_0 auf der Oberspannungsseite (Schritt **S5**) und eine Phase Φ^*_0 auf der Oberspannungsseite des Nullsystems (Schritt **S6**) bestimmt.

[0039] Im Schritt **S5** werden dazu die Fehlerinformationen **F**, **G** sowie die Spannungen u^*_- und u^*_+ des Mit- und Gegensystems der Oberspannungsseite benötigt. Dazu wird anmeldungsgemäß die folgende Rechenvorschrift eingesetzt:

$$u^*_0 = u^*_- \cdot f,$$

wobei der Faktor **f** abhängig von der Art des im Schritt **S4** ermittelten Fehlers ist. Der Faktor **f** ist dabei gleich $(u^*_+)^{1/2}$ (also Wurzel aus u^*_+), wenn es sich um einen einpoligen Erdschluss handelt, gleich 0, wenn es sich umso einen zweipoligen Kurzschluss handelt, und gleich u^*_-/u^*_+ , wenn es sich um einen zweipoligen Erdschlussfehler handelt.

[0040] Falls in dem Schritt **S4** eine genaue Fehlerbestimmung nicht möglich war, so wird der Betrag des Nullsystems u^*_0 auf 0 gesetzt und damit grundsätzlich wie ein zweipoliger Kurzschluss behandelt.

[0041] In einem Schritt **S6** wird in ähnlicher Weise wie im Schritt **S5** der Phasenwinkel Φ^*_0 des Nullsystems auf der Oberspannungsseite anhand von zuvor berechneten Größen sowie der Fehlerinformation **F** ermittelt. Dabei ergibt sich der Phasenwinkel Φ^*_0 wie folgt:

$$\Phi^*_0 = \Phi^*_- + \Delta\Phi,$$

wobei $\Delta\Phi$ ein Phasenoffset ist, der 0° beträgt, wenn ein Fehler auf der ersten Phase der Oberspannungsseite des Transformators vorliegt oder an der ersten Dreiecksspannung zwischen der ersten und zweiten Phase an der Oberspannungsseite. Der Phasenoffset $\Delta\Phi$ beträgt 120° , wenn der Fehler an der zweiten Phase oder der zweiten Dreiecksspannung zwischen der zweiten und der dritten Phase der Oberspannungsseite vorliegt. Schließlich beträgt der Phasenoffset $\Delta\Phi$ beträgt -120° , wenn der Fehler an der dritten Phase oder der dritten Dreiecksspannung zwischen der dritten und der ersten Phase vorliegt.

[0042] Nach Durchführung der Schritte **S5** und **S6** liegt mit den Ergebnissen dieser Schritte sowie dem Ergebnis aus Schritt **S3** ein vollständig die Spannungsverhältnisse auf der Oberspannungsseite des Transformators beschreibendes Mit-, Gegen- und Nullsystem (jeweils in Betrag und Phasenlage) vor. Aus den entsprechenden Werten u^*_+ , u^*_- , u^*_0 und Φ^*_+ , Φ^*_- , Φ^*_0 werden in einem abschließenden Schritt **S7** die einzelnen Spannungen an der Oberspannungsseite des Transformators durch eine entsprechende Rücktransformation aus dem rotierenden in ein statisches Bezugssystem berechnet.

[0043] Die so berechneten Spannungen können in nachfolgenden, hier nicht näher dargestellten Schritten verwendet werden, um zu überprüfen, ob an der Oberspannungsseite des Transformators Netzfehler vorliegen, auf die der Wechselrichter gemäß vorgegebener Richtlinien zu reagieren hat, beispielsweise indem eine Einspeisung in das Energieversorgungsnetz gestoppt oder bezüglich einer eingespeisten Leistung oder eines fließenden Stroms reduziert wird.

[0044] Fig. 3 zeigt in Form eines Blockschaltbilds ein Ausführungsbeispiel eines Wechselrichters 3 mit einer integrierten Vorrichtung zur Schätzung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators.

[0045] Der in Fig. 3 gezeigte Wechselrichter 3 kann beispielsweise in der in Fig. 1 dargestellten Energieversorgungsanlage eingesetzt werden. Er umfasst als eine Hauptkomponente einen DC/AC-Wandler 30, der die Hauptfunktionalität, das Umsetzen eines eingangsseitig an Gleichstromeingängen 31 zugeführten Gleichstroms (direct current - DC) in einen ausgangseitig an einem Wechselstromausgang 32 bereitgestellten Wechselstroms (alternating current - AC). Wie beim Beispiel der Fig. 1 ist der hier dargestellte Wechselrichter 3 3-phasig ausgebildet.

[0046] Der Wechselrichter 3 umfasst weiterhin eine Spannungsmess- und -transformationseinheit 33, die mit den Wechselspannungsausgängen 32 verbunden ist. Diese Verbindung ermöglicht es der Spannungsmess- und -transformationseinheit 33 die an einer Unterspannungsseite eines mit dem Wechselstromausgang 32 verbundenen Transformators (vgl. Fig. 1) anliegenden Spannungen und Phasenlagen wie in Zusammenhang mit dem Schritt S1 der Fig. 2 beschrieben ist, zu messen. Dabei können sowohl die Dreiecksspannungen U_{Δ} als auch die Strangspannungen U_Y gemessen werden. Es ist auch möglich, dass nur die Strangspannungen U_Y einschließlich entsprechender Phasenwinkel Φ_Y zu messen und daraus die Dreiecksspannungen U_{Δ} zu ermitteln.

[0047] Innerhalb der Spannungsmess- und -transformationseinheit 33 erfolgt auch die in Schritt S2 der Fig. 2 angegebene Transformation der Strangspannungen U_Y bzw. Phasenwinkel Φ_Y in entsprechende Werte eines Mitspannungssystems und eines Gegenspannungssystems.

[0048] Die gemessenen und transformierten Werte werden einer Verarbeitungseinheit 34 übergeben, die die in Zusammenhang mit den Schritten S3-S6 der Fig. 2 angegebenen Verarbeitungsschritte ausführt. Die in diesen Schritten ermittelten Werte werden von der Verarbeitungseinheit 34 an eine Rücktransformationseinheit 35 übergeben, die die Rücktransformation in Spannungswerte eines stationären Systems gemäß dem Schritt S7 durchführt.

[0049] Die so berechneten geschätzte Spannungen an der Oberspannungsseite des Transformators werden einer Steuereinheit des DC/AC-Wandlers 30 übergeben, der sein Einspeiseverhalten entsprechend der berechneten Werte anpassen kann, beispielsweise in dem eine Einspeisung in das Energieversorgungsnetz gestoppt oder bezüglich einer eingespeisten Leistung oder eines fließenden Stroms

reduziert wird, wenn die berechneten Spannungswerte der Oberspannungsseite des Transformators auf Netzfehler hindeuten.

[0050] Die von der Spannungsmess- und -transformationseinheit 33 bestimmten Werte können zusätzlich auch der Steuereinrichtung des DC/AC-Wandlers 30 übertragen werden, da diese Werte in der Regel im Rahmen eines pulsweiten Modulationsverfahrens zu Generierung der sinusförmigen Ausgangsspannungen bzw. sinusförmige Ausgangsströme vom DC/AC-Wandler benötigt werden.

Bezugszeichenliste

1	PV-Anlage
2	PV-Generator
3	Wechselrichter
4	Transformator
5	Mittelspannungsnetz
6	Hochspannungstransformator
7	Hochspannungsnetz
30	DC/AC-Wandler
31	Gleichstromeingang
32	Wechselstromausgang
33	Spannungsmess- und Transformationseinheit
34	Verarbeitungseinheit
35	Rücktransformationseinheit
u_{Δ}	Dreiecksspannungen (Unterspannungsseite)
$u_{\Delta 12}$	erste Dreiecksspannung (Unterspannungsseite)
$u_{\Delta 23}$	zweite Dreiecksspannung (Unterspannungsseite)
$u_{\Delta 31}$	dritte Dreiecksspannung (Unterspannungsseite)
u_Y	Strangspannungen (Unterspannungsseite)
u_{Y1}	erste Strangspannung (Unterspannungsseite)
u_{Y2}	zweite Strangspannung (Unterspannungsseite)
u_{Y3}	dritte Strangspannung (Unterspannungsseite)
Φ_Y	Phasenwinkel (Unterspannungsseite)
Φ_{Y1}	erster Phasenwinkel (Unterspannungsseite)

Φ_{Y2}	zweiter Phasenwinkel (Unterspannungsseite)
Φ_{Y3}	dritter Phasenwinkel (Unterspannungsseite)
u_+	Mitsystemspannungsbetrag (Unterspannungsseite)
u_-	Gegensystemspannungsbetrag (Unterspannungsseite)
Φ_+	Phasenwinkel Mitsystem (Unterspannungsseite)
Φ_-	Phasenwinkel Gegensystem (Unterspannungsseite)
u^*_+	Mitsystemspannungsbetrag (Oberspannungsseite)
u^*_-	Gegensystemspannungsbetrag (Oberspannungsseite)
u^*_0	Nullsystemspannungsbetrag (Oberspannungsseite)
Φ^*_+	Phasenwinkel Mitsystem (Oberspannungsseite)
Φ^*_-	Phasenwinkel Gegensystem (Oberspannungsseite)
Φ^*_0	Phasenwinkel Nullsystem (Oberspannungsseite)
n	Anzahl (der Phasenverschiebungen um 30°)
c_+, c_-	Korrekturwert
F, G	Fehlerinformation
f	Faktor
$\Delta\Phi$	Phasenoffset
V_{min}, V_{max}	minimale bzw. maximale Spannung
S1-S7	Verfahrensschritt

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- „Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips“ von Bollen und Styvaktakis, IEEE, 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, 2000, pp. 899-904, vol. 2 [0006]
- Artikel von Bollen und Styvaktakis, IEEE, 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, 2000, pp. 899-904, vol. 2 [0034]

Patentansprüche

1. Verfahren zur näherungsweise Bestimmung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators (4) anhand von gemessenen Spannungen an einer Unterspannungsseite des Transformators (4), mit den folgenden Schritten:

- Messen von Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_{γ}) und Phasenwinkeln (Φ_{γ}) an der Unterspannungsseite des Transformators (4);
- Transformieren der Strangspannungen (u_{γ}) und Phasenwinkel (Φ_{γ}) in Mit- und Gegensystemspannungen (u_{+} , u_{-}) und Phasenwinkel (Φ_{+} , Φ_{-}) des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite;
- Bestimmen von Mit- und Gegensystemspannungen (u_{+}^{*} , u_{-}^{*}) und Phasenwinkeln (Φ_{+}^{*} , Φ_{-}^{*}) des Mit- bzw. Gegensystems an der Oberspannungsseite aus den Mit- und Gegensystemspannungen (u_{+} , u_{-}) und Phasenwinkeln (Φ_{+} , Φ_{-}) des Mit- bzw. Gegensystems an der Unterspannungsseite;
- Abschätzen einer Nullsystemspannung (u_{0}^{*}) und eines Phasenwinkels (Φ_{0}^{*}) eines Nullsystems an der Oberspannungsseite;
- Transformieren der Mit-, Gegen- und Nullsystemspannungen (u_{+}^{*} , u_{-}^{*} , u_{0}^{*}) und der Phasenwinkel (Φ_{+}^{*} , Φ_{-}^{*} , Φ_{0}^{*}) in Strangspannungen und/oder Dreiecksspannungen an der Oberspannungsseite des Transformators (4).

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Mit- und Gegensystemspannungen (u_{+}^{*} , u_{-}^{*}) an der Oberspannungsseite gleich den Mit- bzw. Gegensystemspannungen (u_{+} , u_{-}) an der Unterspannungsseite gesetzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem zu den Mit- bzw. Gegensystemspannungen (u_{+} , u_{-}) ein Korrekturwert (c_{+} , c_{-}) hinzuaddiert wird, um die Mit- und Gegensystemspannungen (u_{+}^{*} , u_{-}^{*}) zu bestimmen.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die Phasenwinkel (Φ_{+}^{*} , Φ_{-}^{*}) des Mit- bzw. Gegensystems an der Oberspannungsseite aus den Phasenwinkeln (Φ_{+} , Φ_{-}) an der Unterspannungsseite gesetzt werden, wobei ein Phasenkorrekturwert hinzuaddiert wird, der das n-fache von 30° für das Mitsystem und das n-fache von -30° für das Gegensystem beträgt, und wobei n ein ganzzahliger Wert ist, der von dem Typ des Transformators (4) abhängt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem der Wert von n abhängig von einer Transformatorverschiebung des Transformators (4) gewählt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem zum Abschätzen der Nullsystemspannung (u_{0}^{*}) und des Phasenwinkels (Φ_{0}^{*}) des Nullsystems an der Oberspannungsseite anhand der gemessenen Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_{γ}) an der Unterspannungsseite eine qualitative Fehlerbe-

stimmung vorgenommen wird, durch die auf das Vorliegen eines Fehler an einer Phase oder mehrerer der Phasen der Oberspannungsseite geschlossen werden kann und durch die ein Erdschluss einer der Phasen der Oberspannungsseite erkannt werden kann.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem zur qualitativen Fehlerbestimmung aus den gemessenen Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_{γ}) eine minimale Spannung (V_{\min}) ermittelt wird, wobei ein Vergleich der gemessenen Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_{γ}) mit der minimalen Spannung (V_{\min}) auf eine fehlerbehaftete Phase an der Oberspannungsseite schließen lässt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, bei dem zur qualitativen Fehlerbestimmung aus den gemessenen Dreiecksspannungen (u_{Δ}) und Strangspannungen (u_{γ}) eine maximale Spannung (V_{\max}) ermittelt wird, wobei ein Vergleich der maximalen Spannung (V_{\max}) mit einem Vergleichswert, der charakteristisch ist für das oberspannungsseitige Netz, mit dem der Transformator (4) verbunden ist, auf einen Erdschluss an der Oberspannungsseite schließen lässt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem der Vergleichswert abhängig von einer subtransienten Kurzschlussleistung des Netzes ist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, bei dem als Ergebnis der qualitativen Fehlerbestimmung ermittelt wird, ob ein einpoliger oder ein zweipoliger Kurzschluss an der Oberspannungsseite vorliegt und/oder ob ein einpoliger oder ein zweipoliger Erdschluss vorliegt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem beim Vorliegen eines einpoligen Erdschlusses der Wert für die Nullsystemspannung (u_{0}^{*}) an der Oberspannungsseite gleich dem Produkt der Gegensystemspannung u_{-}^{*} und der Wurzel der Mitsystemspannung u_{+}^{*} gesetzt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem beim Vorliegen eines zweipoligen Kurzschlusses der Wert für die Nullsystemspannung (u_{0}^{*}) an der Oberspannungsseite gleich null gesetzt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem beim Vorliegen eines zweipoligen Erdschlusses der Wert für die Nullsystemspannung (u_{0}^{*}) an der Oberspannungsseite gleich dem Quotient des Quadrats der Gegensystemspannung (u_{-}^{*}) und der Mitsystemspannung (u_{+}^{*}) gesetzt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem der Wert für den Phasenwinkel (Φ_{0}^{*}) im Nullsystem an der Oberspannungsseite gleich dem Phasenwinkel (Φ_{-}^{*}) im Gegensystem an der Oberspannungsseite ge-

setzt wird, zuzüglich eines Phasenoffsets ($\Delta\Phi$), der 0° , 120° oder -120° beträgt, abhängig davon, auf welcher Phase an der Oberspannungsseite der qualitativ bestimmte Fehler vorliegt.

15. Vorrichtung zur näherungsweisen Bestimmung von Spannungen an einer Oberspannungsseite eines Transformators (4) anhand von gemessenen Spannungen an einer Unterspannungsseite des Transformators (4), **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14 eingerichtet ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, die in einen Wechselrichter (3) integriert ist.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

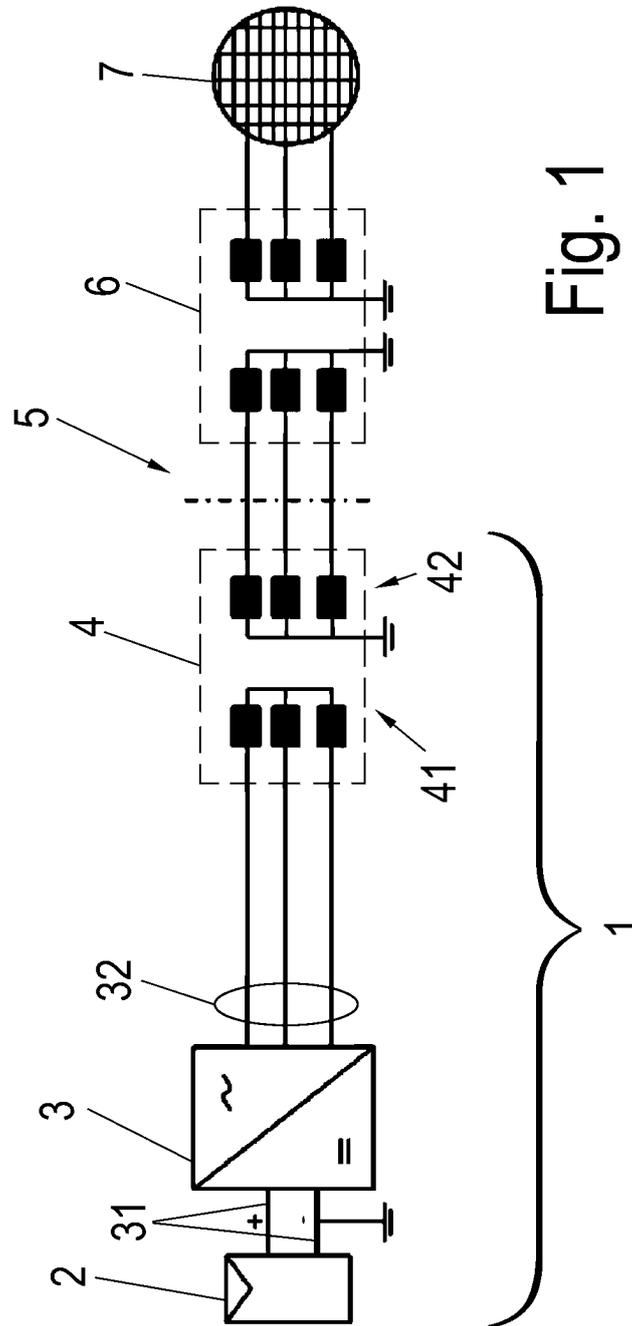


Fig. 1

Fig. 2

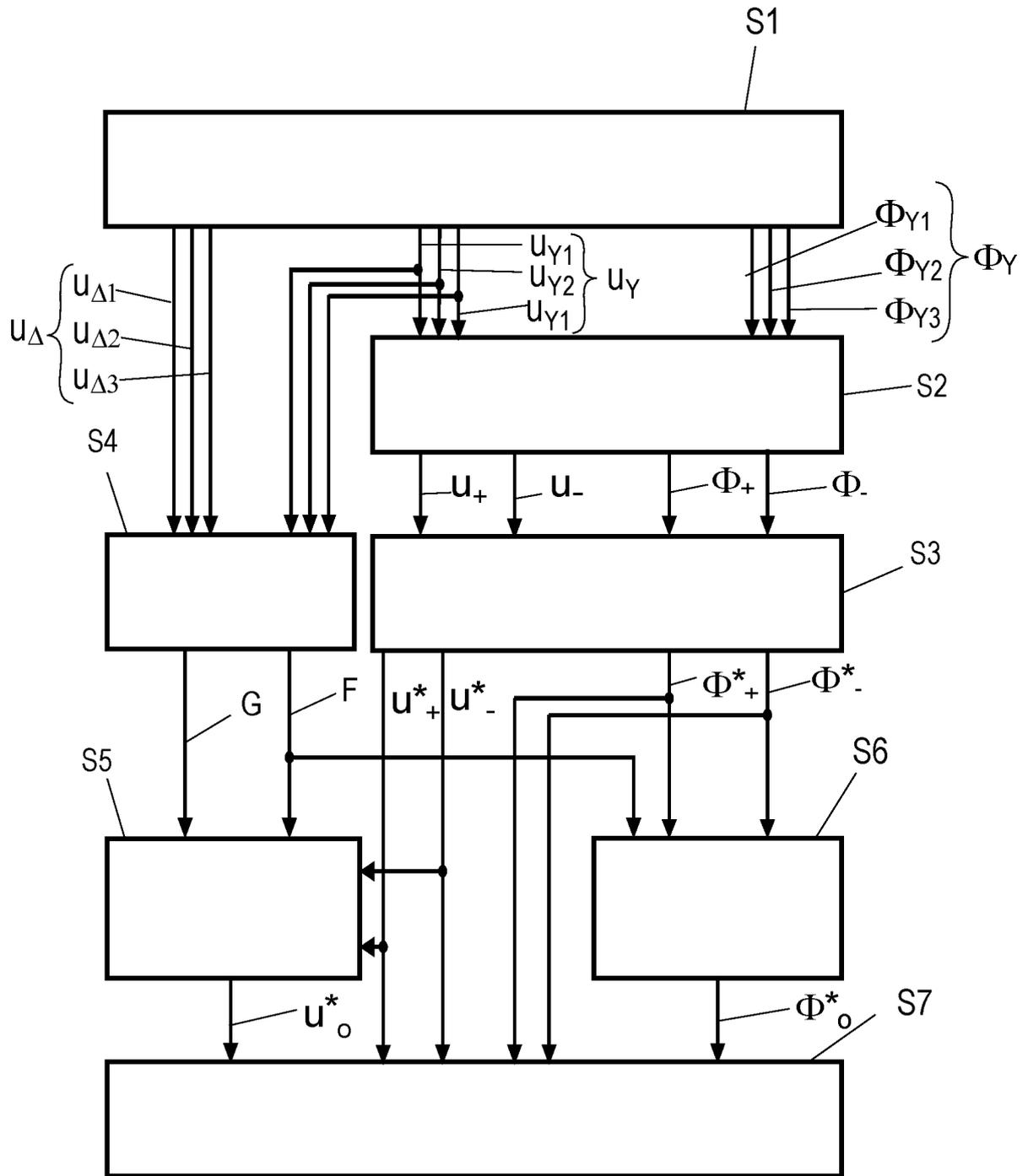


Fig. 3

