

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Dezember 2024 (19.12.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/256730 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H02J 3/38 (2006.01) *H02M 7/493* (2007.01)
H02J 3/48 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/066854

(22) Internationales Anmeldedatum:

17. Juni 2024 (17.06.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2023 115 598.9

15. Juni 2023 (15.06.2023)

DE

(71) Anmelder: SMA SOLAR TECHNOLOGY AG

[DE/DE]; Sonnenallee 1, 34266 Niestetal (DE).

(72) Erfinder: **KNOBLOCH, Andreas**; Behringstraße 6,
34121 Kassel (DE). **SCHEURICH, Simon**; Gustav-Frey-
tag-Straße 8, 97877 Wertheim (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA,
NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,
RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD FOR OPERATING AN ENERGY SUPPLY SYSTEM, ENERGY SUPPLY SYSTEM HAVING A PLURALITY
OF INVERTERS AND INVERTER

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BETRIEB EINER ENERGIEVERSORGUNGSANLAGE,
ENERGIEVERSORGUNGSANLAGE MIT EINER VIELZahl VON WECHSELRICHTERN UND WECHSELRICHTER

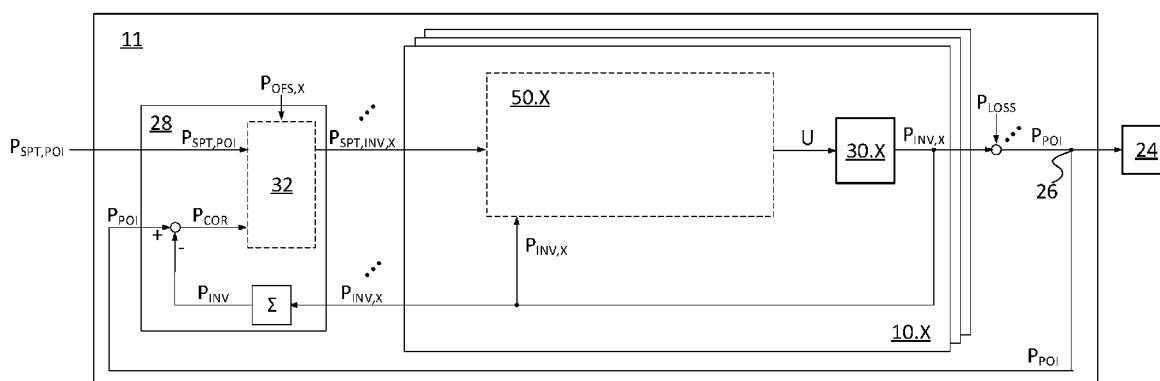


Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a method for operating an energy supply system (11) having a plurality of inverters (10.X) and a system controller (28), which is in communicative connection with the inverters (10.X), wherein the energy supply system (11) has a mains connection (26), which is connected to an AC voltage mains (24), and wherein the inverters (10.X) exchange electrical exchange power ($P_{INV,X}$) with the AC voltage mains (24) via the mains connection (26), so that the energy supply system (11) exchanges a total exchange power (P_{POI}) with the AC voltage mains (24), which comprises the respective electrical exchange powers ($P_{INV,X}$). The system controller (28) determines individual inverter setpoint powers ($P_{SPT,INV,X}$) depending on a system setpoint ($P_{SPT,POI}$) for the total exchange power (P_{POI}) of the energy supply system (11) and transmits the individual inverter setpoint powers ($P_{SPT,INV,X}$) to the controllers (50.X) of the inverters (10.X). The respective controllers (50.X) of the inverters (10.X) set the respective exchange powers ($P_{INV,X}$) of the inverters (10.X) depending on the inverter setpoint powers ($P_{SPT,INV,X}$). The controllers (50.X) of the inverters (10.X) are laid out to form

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

the mains, and the inverters (10.X) provide individually adjustable instantaneous reserve power.

(57) **Zusammenfassung:** Die Anmeldung betrifft ein Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage (11) mit einer Vielzahl von Wechselrichtern (10.X) und einem Anlagenregler (28), der kommunikativ mit den Wechselrichtern (10.X) verbunden ist, wobei die Energieversorgungsanlage (11) einen Netzanschluss (26) aufweist, der an ein Wechselspannungsnetz (24) angeschlossen ist, und wobei die Wechselrichter (10.X) über den Netzanschluss (26) elektrische Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) mit dem Wechselspannungsnetz (24) austauschen, so dass die Energieversorgungsanlage (11) eine Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) mit dem Wechselspannungsnetz (24) austauscht, die die jeweiligen elektrischen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) umfasst. Der Anlagenregler (28) ermittelt in Abhängigkeit von einem Anlagen-Sollwert ($P_{SPT,POI}$) für die Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) der Energieversorgungsanlage (11) individuelle Wechselrichter-Sollleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) und übermittelt die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) an die Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X). Die jeweiligen Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) stellen die jeweiligen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) der Wechselrichter (10.X) in Abhängigkeit von den Wechselrichter-Sollleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) ein. Dabei sind die Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) netzformend ausgelegt und die Wechselrichter (10.X) stellen individuell einstellbare Momentanreserveleistung bereit.

VERFAHREN ZUM BETRIEB EINER ENERGIEVERSORGUNGSANLAGE, ENERGIEVERSORGUNGSANLAGE MIT EINER VIELZahl VON WECHSELRICHTERN UND WECHSELRICHTER

TECHNISCHES GEBIET

Die Anmeldung betrifft ein Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage sowie eine Energieversorgungsanlage und einen Wechselrichter. Die Energieversorgungsanlage weist eine Vielzahl von Wechselrichtern und einen Anlagenregler auf. Der Anlagenregler ist kommunikativ mit den Wechselrichtern verbunden. Die Wechselrichter der Energieversorgungsanlage weisen einen gemeinsamen Netzanschluss auf, über den sie elektrische Leistung mit einem Wechselspannungsnetz austauschen.

STAND DER TECHNIK

Konventionelle Energieversorgungsanlagen, insbesondere thermisch betriebene Kraftwerke und auch Wasserkraftwerke, umfassen netzsynchron rotierende Schwungmassen der Synchrongeneratoren oder Turbinen und des jeweiligen Triebstrangs. Solche Energieversorgungsanlagen tauschen elektrische Leistung mit einem elektrischen Wechselspannungsnetz aus, wobei die gesamte Schwungmasse der Anlagen elektromechanisch wirksam ist und im Netz wesentlich zur Stabilisierung des Wechselspannungsnetzes beiträgt. Insbesondere die Trägheit der jeweiligen Schwungmasse bewirkt aufgrund der darin gespeicherten Rotationsenergie eine Trägheit (auch Inertia genannt) des rotierenden Spannungsraumzeigers der konventionellen Energieversorgungsanlagen gegenüber dem Spannungsraumzeiger im Wechselspannungsnetz. Dadurch findet bei Phasensprüngen und/oder Frequenzänderungen des Spannungsraumzeigers im Wechselspannungsnetz eine augenblickliche Leistungsänderung der Energieversorgungsanlagen statt, die insbesondere durch induktive Effekte und eine Phasenwinkeldifferenz zwischen dem Spannungsraumzeiger der Schwungmasse und dem Spannungsraumzeiger der Netzspannung hervorgerufen wird. Insofern stellt eine konventionelle Energieversorgungsanlage eine sogenannte Momentanreserve bereit und begrenzt die Änderungsrate der Netzfrequenz des Wechselspannungsnetzes, insbesondere für den Fall, dass Leistungsungleichgewichte zwischen Zufuhr und Abfluss elektrischer Leistung, d.h. zwischen Erzeugung und Verbrauch im Wechselspannungsnetz vergleichsweise kurzfristig auftreten, beispielsweise aufgrund einer Störung einer Übertragungsleitung im Wechselspannungsnetz.

Die als Momentanreserveleistung zwischen Energieversorgungsanlage und Wechselspannungsnetz ausgetauschte Energie wird der rotierenden Masse der konventionellen Energieversorgungsanlagen entnommen bzw. zugeführt, indem die jeweilige Schwungmasse

abgebremst bzw. beschleunigt wird, wobei die ausgetauschte Leistung und die ausgetauschte Energie durch die physikalischen Eigenschaften der Energieversorgungsanlage insgesamt begrenzt werden. Die Bereitstellung der Momentanreserve endet, sobald der Spannungsraumzeiger der Schwungmasse sich mit dem Spannungsraumzeiger des Netzes synchronisiert hat und ihre Rotationsfrequenz sich an die Netzfrequenz angeglichen hat, d.h. insbesondere sobald ein Wegdriften der Netzfrequenz gestoppt ist, beispielsweise nachdem das Leistungsungleichgewicht durch weitere Frequenzhaltungsmechanismen oder einen Netzselbstregelleffekt beseitigt ist.

Energieversorgungsanlagen, die über leistungselektronische Stromrichter elektrische Leistung mit dem Wechselspannungsnetz austauschen, wie z. B. Photovoltaik-Anlagen, Windkraftanlagen oder netzgekoppelte Energiespeicher, besitzen in der Regel keine rotierenden Massen und somit keine mechanische Trägheit, praktisch keine mechanische Speicherkapazität und keine wesentliche Überstromfähigkeit. Die leistungselektronischen Stromrichter solcher Energieversorgungsanlagen, insbesondere Wechselrichter, können zum Austausch einer vorgegebenen elektrischen Leistung mit einem bestehenden Wechselspannungsnetz eingerichtet sein oder selbst ein Inselnetz aufbauen.

Aus DE 10 2020 119 039 A1 ist eine Anlage mit Wechselrichtern bekannt, die mit einer jeweiligen Droop-Regelung spannungseinprägend arbeiten und „instantan“ durch Leistungsänderung auf Netzereignisse reagieren können. Ein Anlagenregler passt Parameter der Droop-Regelungen an. Die Anpassung umfasst insbesondere eine Änderung der Sollfrequenz oder hilfsweise der Sollleistung in Reaktion auf eine Leistungsänderung, um die Leistung der Anlage nach einem Netzereignis auf eine Soll-Netzleistung zurückzuführen. Durch diese Lösung ist es möglich, die Soll-Netzleistung am Netzanschluss genau einzustellen.

Aus EP 3 783 765 A1 ist eine $P(df/dt)$ -Trägheitssimulation bekannt, die z. B. durch überlagerte Regelungen realisiert werden kann. Hierdurch können auch netzfolgende Regelungskonzepte realisiert werden, welche am Netzanschluss stationär genau sein können, wenn z. B. ein Integralanteil im Anlagenregler verwendet wird.

AUFGABE

Der Anmeldung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage sowie eine Energieversorgungsanlage bereitzustellen, mittels derer der Austausch elektrischer Energie zwischen der Energieversorgungsanlage mit mehreren Wechselrichtern und einem Wechselspannungsnetz weiter verbessert werden kann. Es ist weiter Aufgabe, einen Wechselrichter zur Verwendung in einer solchen Energieversorgungsanlage bereitzustellen.

LÖSUNG

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1, durch eine Energieversorgungsanlage mit den Merkmalen des Patentanspruchs 23 sowie einen Wechselrichter mit den Merkmalen des Anspruchs 25 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen sind in den abhängigen Patentansprüchen angegeben.

BESCHREIBUNG

Eine Energieversorgungsanlage mit einer Vielzahl von Wechselrichtern und einem Anlagenregler, der kommunikativ mit den Wechselrichtern verbunden ist, weist einen Netzanschluss auf, an den die Wechselrichter angeschlossen sind und der an ein Wechselspannungsnetz angeschlossen ist. Bei einem Verfahren zum Betrieb einer solchen Energieversorgungsanlage tauschen die Wechselrichter über den Netzanschluss elektrische Austauschleistungen mit dem Wechselspannungsnetz aus, so dass die Energieversorgungsanlage eine Gesamt-Austauschleistung mit dem Wechselspannungsnetz austauscht, die die jeweiligen elektrischen Austauschleistungen der Wechselrichter umfasst. Der Anlagenregler ermittelt in Abhängigkeit von einem Anlagen-Sollwert für die Gesamt-Austauschleistung der Energieversorgungsanlage individuelle Wechselrichter-Sollleistungen. Der Anlagenregler übermittelt die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen an die Regelungen der Wechselrichter. Die jeweiligen Regelungen der Wechselrichter stellen die jeweiligen Austauschleistungen der Wechselrichter in Abhängigkeit von den Wechselrichter-Sollleistungen ein. Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass die Regelungen der Wechselrichter netzformend ausgelegt sind und die Wechselrichter individuell einstellbare Momentanreserveleistung bereitstellen.

Durch das anmeldungsgemäße Verfahrens kann eine Energieversorgungsanlage so betrieben werden, dass sie über ihren Netzanschluss einerseits eine Gesamt-Austauschleistung und andererseits eine Momentanreserveleistung bereitstellt, die sich jeweils aus individuell eingestellten Beiträgen der netzformend geregelten Wechselrichter zusammensetzen.

In einer Ausführungsform des Verfahrens werden gemessene Austauschleistungen der jeweiligen Wechselrichter an den Anlagenregler übermittelt. Der Anlagenregler ermittelt in Abhängigkeit von den gemessenen Austauschleistungen die Wechselrichter-Sollleistungen fortlaufend neu und übermittelt sie an die Wechselrichter. Die Regelungen der jeweiligen Wechselrichter stellen daraufhin ihre jeweiligen Austauschleistungen in Abhängigkeit von den jeweiligen neu ermittelten Wechselrichter Sollleistungen ein.

Ein Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die Gesamt-Austauschleistung am Netzanschluss bei gleichzeitiger Bereitstellung von Momentanreserve genauer eingestellt werden kann. Dabei können insbesondere die Beiträge der einzelnen Wechselrichter zur Gesamt-

Austauschleistung durch den Anlagenregler präzise eingestellt werden. Daneben können alle Leistungsbeiträge zur Momentanreserveleistung sowohl am Netzanschluss als auch innerhalb der Energieversorgungsanlage mit hoher Genauigkeit eingestellt werden. Insbesondere kann die Gesamt-Austauschleistung und die Momentanreserveleistung am Netzanschluss individuell auf die Wechselrichter innerhalb der Energieversorgungsanlage aufgeteilt werden, wobei die Aufteilung auf die Wechselrichter insbesondere hinsichtlich der jeweiligen Anforderungen der an die Wechselrichter angeschlossenen Energiequellen, Speicher oder Verbraucher optimiert werden kann. Es kann also eine stationär genaue Verteilung der Leistung zwischen einzelnen Wechselrichtern in der Energieversorgungsanlage bei gleichzeitiger hoher Dynamik der Momentanreserveleistung am Netzanschluss realisiert werden.

Der Anlagenregler ist z. B. eine Einheit, z. B. eine Recheneinheit, zur Erfassung, Signalverarbeitung und Steuerung bzw. Regelung der Energieversorgungsanlage als Ganzes. Der Anlagenregler regelt dabei insbesondere die Gesamt-Austauschleistung am Netzanschluss.

Die durch das Verfahren geregelte und mit dem Wechselspannungsnetz ausgetauschte elektrische Leistung kann eine reine Wirkleistung oder eine reine Blindleistung sein. Alternativ oder zusätzlich kann das Verfahren für die Regelung einer Leistung verwendet werden, die eine Mitsystemleistung oder eine Gegensystemleistung repräsentiert. Darüber hinaus kann das Verfahren für die Regelung von Strömen statt Leistungen verwendet werden. Dabei kann es sich um Wirkströme oder Blindströme handeln, die in Mitsystemkomponenten und/oder in Gegensystemkomponenten in der Regelung verwendet werden.

In einer Ausführungsform des Verfahrens ermittelt der Anlagenregler die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen, indem der Anlagen-Sollwert auf die jeweilige relative Nennleistung des jeweiligen Wechselrichters normiert und ein individueller Offsetwert addiert wird, wobei die Summe der Offsetwerte bevorzugt den Wert Null ergibt. Die Normierung kann dabei z.B. dadurch geschehen, dass die Nennleistung des jeweiligen Wechselrichters durch die Summe der Nennleistungen der Wechselrichter in der Energieversorgungsanlage geteilt wird. Durch den individuellen Offset können insbesondere individuelle Gegebenheiten eines jeweiligen Wechselrichters, z.B. sein Alter oder seine Betriebsdauer, sowie individuelle Gegebenheiten der an die Wechselrichter angeschlossenen Gleichspannungsquellen oder Gleichspannungssenken, z.B. ein aktueller Ladezustand eines angeschlossenen Energiespeichers, eine Auslastung eines angeschlossenen Verbrauchers, z.B. eines Elektrolyseurs oder ähnliches berücksichtigt werden. Die unterschiedliche Leistungsverteilung zwischen einzelnen Wechselrichtern der Energieversorgungsanlage kann dabei z. B. zum Ausgleichen von Ladezuständen sowie von Alterungszuständen einzelner an die Wechselrichter angeschlossener Gleichspannungsquellen, z. B. Batterien, oder zum

Ansteuern von Elektrolyseuren oder anderen daran angeschlossenen Verbrauchern unterschiedlicher Leistungsklassen dienen. Durch Festlegung der Summe der Offsetwerte auf den Wert Null kann ermöglicht werden, dass die Wechselrichter der Energieerzeugungsanlage dann entsprechend ihrer individuellen Gegebenheiten mehr oder weniger zur gewünschten Gesamt-Austauschleistung beitragen. Die Leistungsbeiträge können dadurch noch genauer eingestellt werden, bei gleichzeitiger genauer Einstellung der Gesamt-Austauschleistung.

In einer Ausführungsform des Verfahrens reagieren die netzformenden Regelungen (50.X) autark mit einer individuell einstellbaren Leistungsantwort auf Netzereignisse. Dazu umfassen die netzformenden Regelungen der Wechselrichter insbesondere jeweils eine spannungseinprägende Droop-Regelung und eine trägheitsgebende Regelung, die im Rahmen der netzformenden Regelung miteinander verkettet sind und insgesamt eine Momentanreserveleistung bereitstellen. Dabei stellen die Wechselrichter mittels einer jeweiligen Droop-Regelung ihre jeweiligen Austauschleistungen anhand einer Droop-Kennlinie in Abhängigkeit von einer Droop-Kennlinien-Referenzleistung und einer jeweiligen Spannungsverlaufsabweichung eines Spannungsverlaufs einer Netzspannung von einem jeweiligen Referenzverlauf mit Bezug auf einen Droop-Sollwert ein. Der Droop-Sollwert kann je nachdem, auf welche Leistungsgröße die Regelung angewendet wird, insbesondere eine Sollfrequenz oder eine Sollspannungsamplitude sein. Für den Fall, dass mit dem Verfahren eine Wirkleistung der Energieversorgungsanlage geregelt wird, kann die Droop-Regelung eine $f(P)$ -Beziehung zwischen einer jeweiligen Austausch-Wirkleistung als Maß für die Spannungsverlaufsabweichung und einer Frequenz- bzw. Phasenabweichung bezogen auf eine Sollfrequenz vorgeben. Wenn das Verfahren eine Blindleistung der Energieversorgungsanlage regelt, gibt die Droop-Regelung eine $U(Q)$ -Beziehung zwischen einer jeweiligen Austausch-Blindleistung als Maß für die Spannungsverlaufsabweichung und einer Spannungsabweichung bezogen auf eine Sollspannungsamplitude vor. Im Falle einer Regelung einer Mit- oder Gegensystemleistung umfasst der Droop-Sollwert entsprechende Sollwerte der Mit- und Gegensystemanteile der Frequenz bzw. des Phasenwinkels sowie der Spannungsamplitude.

Mittels einer solchen Droop-Regelung können die jeweiligen Wechselrichter auf Spannungsverlaufsabweichungen im Wechselspannungsnetz reagieren und durch synchrone, schnelle Anpassung der Frequenz und Amplitude des Spannungsverlaufs der netzseitig am Wechselrichter gestellten Spannung mehr oder weniger elektrische Leistung zur Verfügung stellen bzw. beziehen. Das Auftreten einer initialen Spannungsverlaufsabweichung des Spannungsverlaufs der Netzspannung von einem Referenz-Spannungsverlauf bewirkt mit Bezug auf die Sollfrequenz eine Abweichung der Austausch-Wirkleistung des Wechselrichters und mit Bezug auf die Sollspannungsamplitude eine Abweichung der Austausch-Blindleistung des Wechsel-

richters von der jeweiligen Droop-Kennlinien-Referenzleistung. Dabei ist die Spannungsverlaufsabweichung des Spannungsverlaufs insbesondere eine Phasenwinkeldifferenz zwischen dem Phasenwinkel der Ausgangsspannung des Wechselrichters und der Netzspannung, die über eine ausgangsseitige Impedanz die Abweichung der Austausch-Wirkleistung bewirkt, bzw. eine Amplitudendifferenz zwischen einer Amplitude der Ausgangsspannung des Wechselrichters und der Netzspannung, die die Abweichung der Blindleistung bewirkt. Die Austausch-Wirkleistung und die Austausch-Blindleistung dienen mithin als jeweiliges Maß für die Phasenwinkeldifferenz bzw. die Amplitudendifferenz. Im Falle der Wirkleistungsregelung wird die Austausch-Wirkleistung in der Droop-Regelung anhand der Droop-Kennlinie wiederum in eine proportionale Änderung der Frequenz der Ausgangsspannung des Wechselrichters umgerechnet. Dadurch synchronisiert die Droop-Regelung die Frequenz der Ausgangsspannung auf die Netzfrequenz ein, behält jedoch die entstandene Phasenwinkeldifferenz bei, so dass die Austausch-Wirkleistung des Wechselrichters um einen Wert von der Droop-Kennlinien-Referenzleistung abweicht, der im Wesentlichen proportional zur Abweichung der Netzfrequenz von der Sollfrequenz ist. Insbesondere kann die Energieversorgungsanlage dadurch auf Änderungen bzw. Sprünge des Phasenwinkels und/oder der Frequenz des Spannungsraumzeigers der Netzspannung mit einer gezielten Variation der Wirkleistung bzw. auf Änderungen der Amplitude der Netzspannung mit einer gezielten Variation der Blindleistung reagieren, wobei die Stärke der Variation durch die Steigung der Droop-Kennlinie eingestellt werden kann.

Ein Vorteil der Droop-Regelung liegt somit darin, dass die Synchronisierung der Frequenz und Amplitude des Spannungsverlaufs der Ausgangsspannung des jeweiligen Wechselrichters an den Spannungsverlauf des Wechselspannungsnetzes derart erfolgt, dass eine Erbringung einer instantanen Leistungsreaktion hinsichtlich Wirkleistung und/oder Blindleistung am Netzanschlusspunkt der Energieversorgungsanlage ermöglicht wird, die über die Droop-Kennlinie einstellbar proportional zur Abweichung des Spannungsverlaufs der Ausgangsspannung von der vorgegebenen Frequenz und Spannungsamplitude ist. Der netzformende Beitrag der Droop-Regelung erfolgt durch eine Abweichung der Wechselrichter-Istleistung von der Wechselrichter-Sollleistung und hält so lange an, bis die Abweichung des Spannungsverlaufs der Ausgangsspannung von der vorgegebenen Frequenz und Spannungsamplitude aufgehoben wird, beispielsweise durch eine übergeordnete Regelung und/oder ein Zurückkehren der Wechselspannung des Wechselspannungsnetzes in einen Vorfehlerzustand. Dies kann einen wichtigen Beitrag zur Netzformung, z. B. in Form von hoch-dynamischen Netzdienstleistungen (Grid Services) insb. zur Frequenz- und Spannungshaltung, leisten. Dabei ist eine sehr schnelle, z. B. sogar eine instantane, unmittelbar netzstützende Reaktion auf Netzereignisse möglich, die je nach Leistungs- und Energiereserven innerhalb der Energieversorgungsanlage einen erheblichen Beitrag zur Netzstützung ermöglicht.

In einer Ausführungsform des Verfahrens können die Wechselrichter mittels einer trägheitsgebenden Regelung einen Eingangswert der Droop-Regelung, insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung, in Abhängigkeit von einer individuellen Leistungsabweichung des jeweiligen Wechselrichters variieren, um die Austauschleistung der Wechselrichter auf die jeweilige Wechselrichter-Sollleistung zurückzuführen, wenn eine Abweichung des Spannungsverlaufs der Ausgangsspannung von der Spannung im Wechselspannungsnetz vorhanden ist und folglich aufgrund der Droop-Regelung eine Leistungsreaktion stattfindet. Dabei kann die individuelle Leistungsabweichung des jeweiligen Wechselrichters einer Abweichung der gemessenen individuellen Austauschleistung von der vom Anlagenregler vorgegebenen Wechselrichter-Sollleistung entsprechen. Die Dynamik des Zurückführens der Austauschleistung der Wechselrichter auf die jeweilige Wechselrichter-Sollleistung kann in der trägheitsgebenden Regelung insbesondere mittels einer Trägheitskonstante eingestellt werden, die bei der Variation der Droop-Kennlinien-Referenzleistung mit der (integrierten) Leistungsabweichung des jeweiligen Wechselrichters multipliziert wird.

Der Vorteil der trägheitsgebenden Regelung ist, dass die Trägheit des resultierenden Spannungsraumzeigers der Energieversorgungsanlage bei Netzereignissen so eingestellt werden kann, dass der resultierende Leistungs- und Energieaustausch mit dem Stromnetz insbesondere proportional zur Änderungsrate der Frequenz bzw. der Amplitude des Spannungsverlauf der Netzspannung erfolgt. Es können Momentanreserve-Anforderungen erfüllt werden und die mit einem solchen Verfahren betriebenen Energieversorgungsanlagen wirken nach ihren Möglichkeiten netzformend.

Die individuellen Leistungs- und Energiereserven der an die Wechselrichter angeschlossenen Quellen und/oder Senken, die zwecks Netzformung mit dieser Betriebsweise verfügbar sind, lassen sich über die einstellbaren Trägheitskonstanten der trägheitsgebenden Regelung optimal ausnutzen. Dabei sind durch die trägheitsgebende Regelung geringere Energiereserven für die Netzformung im Vergleich zur reinen Droop-Regelung notwendig. Darüber hinaus ermöglicht die trägheitsgebende Regelung die Einstellung der individuellen Austauschleistungen der Wechselrichter und damit auch der Gesamt-Austauschleistung der Energieversorgungsanlage mit hoher stationärer Genauigkeit bezogen auf den Anlagen-Sollwert, insbesondere auch bei stationärer Abweichung des Spannungsverlaufs der Ausgangsspannung von einem Spannungsverlauf mit Nennfrequenz und Nennspannung.

In Ausführungsformen des Verfahrens umfassen die netzformenden Regelungen der Wechselrichter eine vorzeichenabhängige Gewichtung der Abweichung der individuellen Austauschleistung von der jeweiligen Sollleistung. Insbesondere können die netzformenden Regelungen dazu eine Asymmetrie-Statik umfassen, die die Abweichung der individuellen Austauschleistung von der jeweiligen Sollleistung in Abhängigkeit vom Vorzeichen der

Spannungsverlaufsabweichung unterschiedlich gewichtet. Eine solche Asymmetrie-Statik kann insbesondere eine asymmetrische Kennlinie umfassen, die in der Droop-Regelung und/oder in der trägheitsgebenden Regelung der Wechselrichter verwendet wird.

Eine Asymmetrie-Statik kann beispielsweise in der jeweiligen Droop-Regelung verwendet werden, um die Frequenz der Ausgangsspannung des Wechselrichters bei einer Spannungsverlaufsabweichung aufgrund eines Netzfrequenzgradienten entweder langsam oder schnell nachzuführen, abhängig davon, welches Vorzeichen der Netzfrequenzgradient aufweist, d.h. in welche Richtung die Netzfrequenz sich ändert.

Konkret kann die Asymmetrie-Statik in der Droop-Regelung als asymmetrische Droop-Kennlinie oder Droop-Asymmetrie-Statik realisiert sein, die beispielsweise eine positive Abweichung der Austausch-Wirkleistung aufgrund einer sinkenden Netzfrequenz in eine vergleichsweise kleine nachführende Änderung der Frequenz der Ausgangsspannung des Wechselrichters übersetzt, so dass eine vergleichsweise große Phasenwinkeldifferenz entsteht und entsprechend viel Momentanreserveleistung abgerufen wird; im Umkehrschluss kann eine negative Abweichung der Austausch-Wirkleistung aufgrund einer steigenden Netzfrequenz in eine vergleichsweise große nachführende Änderung der Frequenz der Ausgangsspannung des Wechselrichters übersetzt werden, so dass die Phasenwinkeldifferenz vergleichsweise klein bleibt und entsprechend wenig Momentanreserveleistung abgerufen wird. Alternativ kann die Droop-Asymmetrie-Statik genau umgekehrt konfiguriert sein, um beispielsweise bei sinkender Netzfrequenz wenig Momentanreserveleistung und bei steigender Netzfrequenz viel Momentanreserveleistung bereitzustellen.

Alternativ oder zusätzlich kann eine Asymmetrie-Statik in der trägheitsgebenden Regelung verwendet werden, um die Droop-Kennlinien-Referenzleistung im Falle einer individuellen Leistungsabweichung des jeweiligen Wechselrichters schnell oder langsam zu variieren, abhängig davon, welches Vorzeichen die Leistungsabweichung aufweist. Eine individuelle Leistungsabweichung kann dabei insbesondere auftreten, wenn die jeweilige Wechselrichter-Sollleistung durch den Anlagenregler geändert wird und/oder wenn eine Spannungsverlaufsabweichung mit einer etwaigen Reaktion der Droop-Regelung darauf vorliegt.

Konkret kann die Asymmetrie-Statik in der trägheitsgebenden Regelung als asymmetrische Trägheitskonstante oder Trägheits-Asymmetrie-Statik realisiert sein. So kann beispielsweise eine positive Abweichung der Austausch-Wirkleistung aufgrund einer sinkenden Netzfrequenz mit einer vergleichsweise großen Trägheitskonstante multipliziert werden, so dass die Droop-Kennlinien-Referenzleistung vergleichsweise stark gegensteuernd variiert und entsprechend wenig Momentanreserveleistung abgerufen wird; im Umkehrschluss kann eine negative Abweichung der Austausch-Wirkleistung aufgrund einer steigenden Netzfrequenz mit einer

vergleichsweise kleinen Trägheitskonstante multipliziert wird, so dass die Droop-Kennlinien-Referenzleistung vergleichsweise wenig gegensteuernd variiert und entsprechend viel Momentanreserveleistung abgerufen wird. Alternativ kann die Trägheits-Asymmetrie-Statik genau umgekehrt konfiguriert sein, um bei sinkender Netzfrequenz viel Momentanreserveleistung und bei steigender Netzfrequenz wenig Momentanreserveleistung bereitzustellen.

Durch diese Vorzeichenabhängigkeit der Asymmetrie-Statik kann somit individuell eingestellt werden, welche Momentanreserveleistung ein Wechselrichter bei einer gegebenen Spannungsverlaufsabweichung bereitstellt. Dabei wird zumindest mittelbar berücksichtigt, in welcher Richtung sich die Austauschleistung des jeweiligen Wechselrichters aufgrund des zugrundeliegenden Netzereignisses ändert, und diese netzformende Änderung der Austauschleistung entweder zugelassen und ggf. verstärkt oder begrenzt und ggf. unterdrückt.

Die vorzeichenabhängige Gewichtung der Abweichung der Austauschleistung von einer jeweiligen Sollleistung in der netzformenden Regelung, beispielsweise ausgedrückt als vorzeichenabhängige Konstante oder Steigung einer entsprechenden Asymmetrie-Statik, kann für die beiden Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung, beispielsweise je nach Vorzeichen eines Netzfrequenzgradienten, um mindestens den Faktor 2 unterschiedlich sein, beispielsweise um einer sinkenden Netzfrequenz, die auf ein kritisches Leistungsdefizit im Wechselspannungsnetz hinweist, mit einer größeren Momentanreserveleistung entgegenzuwirken als einer steigenden Netzfrequenz, die auf einen ggf. weniger kritischen Leistungsüberschuss im Wechselspannungsnetz hinweist. Bevorzugt ist die Gewichtung vorzeichenabhängig um mindestens den Faktor 5 unterschiedlich, besonders bevorzugt um mindestens den Faktor 10, insbesondere um die Bereitstellung einer asymmetrischen Momentanreserveleistung einzustellen, die weitgehend ausschließlich bei einem Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung erzeugt wird und bei einer gegenläufigen Spannungsverlaufsabweichung möglichst vollständig ausbleibt.

In Ausführungsformen des Verfahrens kann die Asymmetrie-Statik zusätzlich von der Netzfrequenz abhängig sein. Die Netzfrequenz kann dabei z.B. im Wechselspannungsnetz gemessen oder durch die Ausgangsfrequenz des Wechselrichters angenähert sein. Beispielsweise kann die Asymmetrie-Statik mittels einer Fallunterscheidung so eingerichtet sein, dass nur dann eine Momentanreserveleistung aufgrund eines Netzfrequenzgradienten bereitgestellt wird, wenn die Netzfrequenz in derselben Richtung von einer Nennfrequenz abweicht wie der Netzfrequenzgradient, also wenn z.B. eine Überfrequenz vorliegt und die Netzfrequenz weiter steigt. Im Umkehrschluss kann eine anhand der Asymmetrie-Statik an sich vorgesehene Momentanreserveleistung unterdrückt werden, wenn der Netzfrequenzgradient in Richtung der Nennfrequenz zeigt, also wenn beispielsweise eine Überfrequenz vorliegt und einer sowieso schon fallenden Netzfrequenz nicht unnötig entgegengewirkt werden soll.

Weiterhin kann die Asymmetrie-Statik zusätzlich oder alternativ von der jeweiligen Austauschleistung abhängig sein. Damit steht ein weiterer Freiheitsgrad zur individuellen Einstellung der vom jeweiligen Wechselrichter bereitgestellten Momentanreserveleistung zur Verfügung, beispielsweise indem die Momentanreserveleistung auf eine maximale Austauschleistung beschränkt wird oder erst bei einer minimalen Austauschleistung einsetzt.

Die Leistungsregelgeschwindigkeit der Droop-Regelung ist dabei typischerweise schneller als die Leistungsregelgeschwindigkeit der trägheitsgebenden Regelung, so dass die Einstellung der Austauschleistung durch die Droop-Regelung bei Auftreten einer Spannungsverlaufsabweichung schneller erfolgt als die Variation der Droop-Kennlinien-Referenzleistung durch die trägheitsgebende Regelung (53.X) bei einem Auftreten einer Abweichung der Austauschleistung von der Wechselrichter-Solleistung.

Die Energieversorgungsanlage mit dem anmeldungsgemäßen Verfahren spricht einerseits mittels der Droop-Regelung schnell auf Leistungssollwertänderungen an und reagiert andererseits durch die trägheitsgebende Regelung mit einer vorgebbaren Momentanreserveleistung auf Netzereignisse. Insbesondere wenn eine Leistungsabweichung am Netzanschluss durch eine Reaktion der Droop-Regelung auf eine Spannungsverlaufsabweichung verursacht wird, können das Führungsverhalten und das Störverhalten der Energieversorgungsanlage voneinander entkoppelt werden. Durch das synchronisierende Verhalten der Droop-Regelung kann dabei eine schnellere Synchronisierung mit anderen Spannungsquellen im Energieversorgungsnetz erreicht werden, was zu weniger Ausgleichsschwingungen und einer besseren Dämpfung führt. Zugleich sorgt der trägheitsgebende Anteil dafür, dass sich die Austauschleistung bei Netzereignissen vergleichbar mit einer Trägheit einer rotierenden Masse, d.h. proportional zum Gradienten der Frequenz bzw. der Spannungsamplitude im Verlauf des Netzereignisses einstellt, so dass die Austauschleistung entsprechend einer einstellbaren Trägheitsdynamik auf den Anlagen-Sollwert nachgeführt werden. Durch dieses Verhalten kann die Energieversorgungsanlage einen optimalen Beitrag zur Netzstabilität und zur Energieversorgung leisten.

Es kann also ein sehr schnelles Führungsverhalten am Netzanschluss realisiert werden und gleichzeitig die Trägheit des Spannungsraumzeigers trotz Anregung durch Netzereignisse und Störungen aufrechterhalten werden. Hierbei wird berücksichtigt, dass der Anlagen-Sollwert der Gesamt-Austauschleistung oft ein quasi-stationärer Wert ist, der selbst nicht oder eher langsam auf Störgrößen reagieren soll, und andererseits eine Momentanreserve der Energieversorgungsanlage dagegen möglichst schnell zur Verfügung gestellt werden soll. Die Kombination aus schneller Droop-Regelung und langsamerer trägheitsgebender Regelung ermöglicht dabei, das Führungsverhalten und das Störverhalten separat zu parametrieren sowie insbesondere separate Vorsteuerungen für die jeweiligen Ausgangswerte einzusetzen.

In einer Ausführungsform des Verfahrens wird die Gesamt-Austauschleistung der Energieversorgungsanlage ermittelt und z. B. im Anlagenregler eine Gesamt-Leistungsabweichung der Gesamt-Austauschleistung von der Summe der gemessenen Austauschleistungen der Wechselrichter ermittelt.

Die Gesamt-Leistungsabweichung kann auf die jeweiligen relativen Nennleistungen der jeweiligen Wechselrichter normiert werden und die so ermittelten normierten Teil-Leistungsabweichungen beim Ermitteln der Wechselrichter-Sollleistungen z. B. im Anlagenregler berücksichtigt werden.

In einer Ausführungsform des Verfahrens variieren die jeweiligen trägheitsgebenden Regelungen die Droop-Kennlinien-Referenzleistung der Droop-Regelung unter Verwendung einer Vorsteuerung mit dem Produkt aus einem individuellen Vorsteuerungswert und einem ersten Korrekturfaktor. Alternativ oder zusätzlich ermitteln die jeweiligen Droop-Regelungen den Phasenwinkel der Ausgangsspannung des Wechselrichters unter Verwendung einer Vorsteuerung mit dem Produkt aus dem individuellen Vorsteuerungswert und einem zweiten Korrekturfaktor beeinflussen. Der individuelle Vorsteuerungswert kann dabei insbesondere durch den individuellen Anteil des Wechselrichters am Anlagen-Sollwert oder durch eine gewichtete Summe aus dem individuellen Anteil des Wechselrichters am Anlagen-Sollwert und der individuellen Wechselrichter-Sollleistung gebildet werden, wobei die gewichtete Summe insbesondere mittels zweier Korrekturfaktoren gebildet wird, deren Summe gleich eins ist.

In einer Ausführungsform des Verfahrens wird der Eingangswert der Droop-Regelung, insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung, im Rahmen der trägheitsgebenden Regelung in Abhängigkeit von dem Produkt aus einem ersten Gewichtungsfaktor und der individuellen Abweichung der gemessenen individuellen Austauschleistung des jeweiligen Wechselrichters von der Wechselrichter-Sollleistung des jeweiligen Wechselrichters variiert. Weiterhin kann der Eingangswert der Droop-Regelung, insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung, in Abhängigkeit von dem Produkt aus einem zweiten Gewichtungsfaktor und dem individuellen Anteil des Wechselrichters an der Anlagen-Abweichung variiert werden. Dazu kann insbesondere ein Eingangswert der trägheitsgebenden Regelung aus einer über die Gewichtungsfaktoren gewichteten Summe aus der individuellen Leistungsabweichung und dem individuellen Anteil an der Anlagen-Abweichung gebildet werden. Es kann vorgesehen sein, dass die Summe des ersten Gewichtungsfaktors und des zweiten Gewichtungsfaktors den Wert eins ergibt.

Eine Energieversorgungsanlage mit einer Vielzahl von Wechselrichtern und einem Anlagenregler, der kommunikativ mit den Wechselrichtern verbunden ist, ist dazu eingerichtet, mit einem der zuvor beschriebenen Verfahren betrieben zu werden. Dabei können die

Regelungen der Wechselrichter der Energieversorgungsanlage jeweils eine Asymmetrie-Statik aufweisen und dazu eingerichtet sein, eine individuell einstellbare symmetrische oder asymmetrische Momentanreserveleistung bereitzustellen, wobei die Energieversorgungsanlage dazu eingerichtet ist, am Netzanschluss eine einstellbare symmetrische oder asymmetrische Momentanreserveleistung bereitzustellen.

Es ist weiter zumindest ein Wechselrichter vorgesehen, der zur Verwendung in einer solchen Energieversorgungsanlage eingerichtet ist. Der Wechselrichter weist eine netzformende Regelung auf, welche insbesondere eine Droop-Regelung und eine überlagerte trägheitsgebende Regelung zur Veränderung eines Eingangswertes der Droop-Regelung, insbesondere einer Droop-Kennlinien-Referenzleistung umfasst. Der Wechselrichter ist bevorzugt spannungseinprägend geregelt und kann insbesondere eine Asymmetrie-Statik umfassen und eine einstellbare symmetrische oder asymmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen.

In alternativen Ausführungsformen können die Regelungen auf Ströme statt Leistungen eingestellt sein. Dabei kann es sich um Wirkströme oder Blindströme handeln, die in Mitsystemkomponenten und/oder in Gegensystemkomponenten in der Regelung verwendet werden. Hierdurch kann eine hohe Stromgenauigkeit am Netzanschluss eingestellt werden.

Der Anschlusspunkt der Energieversorgungsanlage an das Wechselspannungsnetz kann alternativ ein beliebiger anderer Punkt im Wechselspannungsnetz sein, z.B. ein sogenannter Point of Stability, POS. Der Point of Stability kann z. B. durch die beschriebene Energieversorgungsanlage oder eine Mehrzahl von Energieversorgungsanlagen geregelt werden.

Mit dem beschriebenen Verfahren kann der Bedarf an zusätzlicher Momentanreserve insbesondere in Regionen mit hohem Anteil nicht-konventioneller, z.B. erneuerbarer Energieversorgungsanlagen und/oder mit räumlich ausgedehnten Netzstrukturen aus Energiespeichern, Photovoltaikanlagen und/oder Windkraftanlagen gedeckt werden. Das Verfahren und die Energieversorgungsanlage können im Rahmen von Netzsystemdienstleistungen insbesondere Momentanreserveleistung und Primärregelleistung bereitstellen, die z.B. auf einem entsprechenden Regelleistungs- oder Regelenenergiemarkt angeboten werden können. Sogenannte Netzbooster oder Statcoms sind Beispiele für marktgängige netzformende Netzbetriebsmittel. Die Erbringung der Netzdienstleistungen wird am Netzanschluss der Energieversorgungsanlage möglich gemacht und reicht damit über die Regelung einzelner Wechselrichter hinaus. Die Leistungserbringung, insbesondere das Trägheitsverhalten in Kombination mit anderen netzformenden Eigenschaften am Netzanschluss können durch das anmeldungsgemäße Verfahren und die anmeldungsgemäße Energieversorgungsanlage mit großer Genauigkeit und Dynamik erbracht werden. Die Ausnutzung von verfügbaren Leistungs-

reserven der Energieversorgungsanlage kann verbessert werden, so dass die Energieversorgungsanlage effektiv zur Versorgungssicherheit beitragen kann.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

Im Folgenden wird die Anmeldung anhand in den Figuren dargestellter Ausführungsbeispiele weiter erläutert und beschrieben.

Fig. 1 zeigt schematisch ein bekanntes Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage,

Fig. 4-11 zeigen schematisch verschiedene konkrete Ausführungsformen des anmeldungsgemäßen Verfahrens zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage, und

Fig. 12-24 zeigen aus einer Anregung durch ein beispielhaftes Netzereignis resultierende Zeitverläufe verschiedener elektrischer Größen bei Anwendung des anmeldungsgemäßen Verfahrens mit verschiedenen Parametern.

In den Figuren sind gleiche oder ähnliche Elemente mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet. Die Figuren sind nicht maßstabsgetreu, und Elemente einzelner Figuren können sinngemäß auch in anderen Figuren verwendet werden.

FIGURENBESCHREIBUNG

Figur 1 zeigt schematisch ein bekanntes Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage 11 mit einer Anzahl an Wechselrichtern 10.X. Die Energieversorgungsanlage 11 kann eine Vielzahl von Erzeugern, Speichern und/oder Verbrauchern umfassen, insbesondere Photovoltaik-Generatoren, Batteriespeicher und/oder Elektrolyseure, die über jeweilige Wechselrichter 10.X elektrische Leistung austauschen, d.h. beziehen und/oder abgeben. Die Energieversorgungsanlage 11 tauscht über einem Netzanschluss 26 eine elektrische Gesamtaustauschleistung P_{POI} mit einem Wechselspannungsnetz 24 aus. Die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} umfasst im Wesentlichen die individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$, die von den Wechselrichtern 10.X in Abhängigkeit von individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$ erzeugt werden, und eine etwaige Verlustleistung P_{LOSS} , die beispielsweise in Anschlussleitungen zwischen den Wechselrichtern 10.X und dem Netzanschluss 26 abfällt. Die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$ werden durch einen Anlagenregler 28 vorgegeben und an die Wechselrichter 10.X übermittelt.

Ein Wechselrichter 10.X weist eine konventionelle Regelung 20.X auf. Ein Spannungsverlauf U ist ein Ausgangswert der Regelung 20.X des Wechselrichters 10.X. Der in der Regelung 20.X berechnete Spannungsverlauf U wird mittels eines Wandlers 30.X am Ausgang des

Wechselrichters 10.X eingestellt, beispielsweise durch geeignete Taktung einer geeigneten Wechselrichter-Brückenschaltung des Wechselrichters 10.X. Am Ausgang des Wechselrichters 10.X ergibt sich in Abhängigkeit von der Differenz aus Spannungsverlauf U und dem Verlauf der Netzspannung die individuelle Austauschleistung $P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X. Aus der Summe der individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X ergibt sich abzüglich der Verlustleistung P_{LOSS} die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} der Energieversorgungsanlage 11 am Netzanschluss 26.

Die Regelung 20.X erhält als Eingangswerte eine Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ vom Anlagenregler 28 sowie die gemessene individuelle Austauschleistung $P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X.

Der Anlagenregler 28 erhält als Eingangswert einen Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ sowie die gemessene Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und umfasst einen Regler 15, beispielsweise einen Proportional- oder Integralregler. Der Regler 15 vergleicht Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ und gemessene Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und modifiziert den Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ in Abhängigkeit der etwaigen Abweichungen dazwischen. Weiterhin umfasst der Anlagenregler 28 einen Zuteiler 16, der den ggf. vom Regler 15 nachgeregelten Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ auf die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$ aufteilt. Dabei kann der Aufteiler 16 mit anlagenspezifischen Eigenschaften, z.B. den relativen Nennleistungen der Wechselrichter 10.X, sowie weiteren Parametern, beispielsweise individuellen Offsetwerten $P_{OFS,X}$ zur Aufteilung des Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ auf die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$ parametrisiert werden.

Figur 12 zeigt beispielhaft einen Zeitverlauf der Soll- und Istwerte der Energieversorgungsanlage 11 und der Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung eines Verfahrens gemäß Fig. 1.

Figur 2 zeigt schematisch ein anmeldungsgemäßes Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage 11. Im Unterschied zum bekannten Verfahren gemäß Fig. 1 ist die Rückkopplung der gemessenen Gesamt-Austauschleistung P_{POI} über den Regler 15 entfallen und der Wechselrichter 10.X weist eine netzformende Regelung 50.X auf. Der Anlagenregler 28 weist nun einen Zuteiler 32 auf, der als Eingangswerte den Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ sowie die Summe der gemessenen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X erhält. Der Zuteiler 32 berechnet aus diesen Eingangswerten die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$.

Im Gegensatz zum bekannten Verfahren gemäß Figur 1 wird die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} nicht mehr eingeregelt, indem ihre Abweichung vom Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ mittels eines Reglers 15 minimiert wird, sondern indem die Summe der gemessenen Austausch-

leistungen $P_{INV,X}$ bei der Aufteilung des gegebenen Anlagen-Sollwerts $P_{SPT,POI}$ auf die individuellen Wechselrichter-Solleleistungen $P_{SPT,INV,X}$ durch den Zuteiler 32 berücksichtigt wird. Dadurch kann zwar erreicht werden, dass die Summe der Austauschleistungen $P_{INV,X}$ dem Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ entspricht. Dabei bleibt jedoch eine etwaige Verlustleistung P_{LOSS} , in der Energieversorgungsanlage 11 unberücksichtigt und erzeugt eine entsprechende Abweichung zwischen Sollwert und Istwert am Netzanschluss 26.

Figur 3 zeigt schematisch eine Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens zum Betrieb der Energieversorgungsanlage 11. Der Zuteiler 32 berücksichtigt bei der Berechnung der individuellen Wechselrichter-Solleleistungen $P_{SPT,INV,X}$ zusätzlich eine Gesamt-Leistungsabweichung P_{COR} , die der Differenz zwischen der gemessenen Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und der Summe der gemessenen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X entspricht. Im Gegensatz zum bekannten Verfahren gemäß Figur 1 wird die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} somit nicht eingeregelt, sondern vielmehr gesteuert, indem die Gesamt-Leistungsabweichung P_{COR} bei der Aufteilung des gegebenen Anlagen-Sollwerts $P_{SPT,POI}$ auf die individuellen Wechselrichter-Solleleistungen $P_{SPT,INV,X}$ durch den Zuteiler 32 berücksichtigt wird.

Durch die Verwendung der Gesamt-Leistungsabweichung P_{COR} im Zuteiler 32 wird insbesondere die Verlustleistung P_{LOSS} besser berücksichtigt, so dass die stationäre Genauigkeit der Regelung verbessert ist. Darüber hinaus werden auch die Einflüsse etwaiger anderer, an sich unbekannter Teilnehmer in der Energieversorgungsanlage 11 automatisch mitberücksichtigt, so dass deren ggf. auch fluktuierenden Leistungsbeiträge keinen Einfluss auf die stationäre Genauigkeit der Energieversorgungsanlage 11 haben.

Die folgenden Figuren 4 bis 11 zeigen schematisch verschiedene konkrete Ausführungsformen des anmeldungsgemäßen Verfahrens zum Betrieb der Energieversorgungsanlage 11. Gegenüber den Figuren 1 bis 3 sind dort insbesondere die netzformende Regelung 50.X mit einer Droop-Regelung 51.X und einer trägheitsgebenden Regelung 53.X sowie der Anlagenregler 28 detaillierter beschrieben. Dabei ist insbesondere die Droop-Regelung 51.X als Wirkleistungsregler ausgeführt und verwendet konkret eine Sollfrequenz f_{SPT} als Droop-Sollwert, so dass durch die in den Figuren 4 bis 11 dargestellten Ausführungsformen konkret die Wirkleistung der Energieerzeugungsanlage 11 am Netzanschluss 26 eingestellt wird. Insofern bezeichnet das Bezugszeichen P in den Figuren 4 bis 11 jeweils konkret eine Wirkleistung, und die weiteren kennzeichnenden Merkmale dieser Verfahren sind auf diese Wirkleistung bezogen. Es ist jedoch äquivalent möglich und vom Gegenstand dieser Anmeldung umfasst, die kennzeichnenden Merkmale des Verfahrens und insbesondere das Bezugszeichen P sowie die damit zusammenhängenden Größen analog auf eine Blindleistung

oder eine Mitsystem- oder Gegensystemgröße einer Leistung oder eines Stroms und die jeweils damit komplementären Größen zu beziehen.

Figur 4 zeigt schematisch eine konkrete Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens zum Betrieb der Energieversorgungsanlage 11. Die netzformende Regelung 50.X umfasst eine Droop-Regelung 51.X und eine trägheitsgebende Regelung 53.X.

Die trägheitsgebende Regelung 53.X des Wechselrichters 10.X erhält als Eingangswerte eine Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ vom Anlagenregler 28 sowie die gemessene individuelle Austauschleistung $P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X und ermittelt daraus eine Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$.

Die Droop-Regelung 51.X erhält als Eingangswert die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ von der trägheitsgebenden Regelung 53.X des Wechselrichters 10.X. Aus der Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ und einer gemessenen individuellen Austauschleistung $P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X wird eine individuelle Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_X des Wechselrichters 10.X ermittelt. Mittels einer Droop-Kennlinie, hier konkret mittels der Frequenzkonstante K_f wird daraus eine Frequenzverschiebung Δf ermittelt. Die Frequenzverschiebung Δf wird zu der Sollfrequenz f_{SPT} des Wechselspannungsnetzes 24 addiert. Die resultierende Frequenz f wird in einen Phasenwinkel ϑ umgerechnet und als Spannungsverlauf ϑ an den Wandler 30.X ausgegeben.

Die trägheitsgebende Regelung 53.X des Wechselrichters 10.X erhält als Eingangswert eine Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$. Aus der Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ und einer gemessenen individuellen Austauschleistung $P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X wird eine individuelle Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ des Wechselrichters 10.X ermittelt. Diese wird als individuelle Abweichung ΔP_X in der trägheitsgebenden Regelung verwendet, um über ein Integrator $1/s$ und ein Trägheitsfaktor $1/H_\theta$ die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ als Ausgangswert zu generieren. Diese Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ dient als Eingangswert für die Droop-Regelung 51.X.

Die weiteren Wechselrichter 10.X der Energieversorgungsanlage 11 können gleich wie zuvor beschrieben aufgebaut sein. Die in Fig. 4 dargestellte Regelung 50.X ist insofern netzformend ausgeführt, als einerseits mittels der Droop-Regelung 51.X unmittelbar auf auftretende Phasendifferenzen zwischen dem Spannungsverlauf ϑ am Wechselrichter 10.X und der Netzspannung und damit zusammenhängende Änderungen der Ausgangsleistung $P_{INV,X}$ reagiert wird und andererseits mittels der trägheitsgebenden Regelung 53.X im stationären Zustand die Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ erreicht wird. Grundsätzlich können

Wechselrichter 10.X mit einer solchen Regelung 50.X gemäß Fig. 4 bis 11 (siehe unten) mit einem Anlagenregler 28 gemäß Fig. 2 oder Fig. 3 kombiniert werden.

Der Anlagenregler 28 gemäß Fig. 4 weist einen Zuteiler 32, engl. Dispatcher, auf. Als Eingangswert erhält der Anlagenregler 28 einen Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ für die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} der Energieversorgungsanlage 11. Aus dem Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ und den jeweiligen relativen Nennleistungen der Wechselrichter 10.X ermittelt der Zuteiler 32 die jeweiligen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$, wobei die jeweiligen relativen Nennleistungen der Wechselrichter 10.X dem jeweiligen Quotienten aus der jeweiligen Nennleistung $P_{N,X}$ eines Wechselrichters 10.X und der Summe der Nennleistungen $P_{N,X}$ der Wechselrichter 10.X in der Energieversorgungsanlage 11 entspricht. Zu dem mit der jeweiligen relativen Nennleistung normierten Anteil des Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ wird für einen jeweiligen Wechselrichter 10.X noch ein individueller Offsetwert $P_{OFS,X}$ addiert. Bevorzugt ergibt die Summe der Offsetwerte $P_{OFS,X}$ den Wert Null.

Es ist möglich, die Leistung eines jeden Wechselrichters 10.X innerhalb der Anlage 11 zu korrigieren. Hierfür empfängt der Anlagenregler 28 die gemessenen Auslauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X und ermittelt die Gesamt-Leistungsabweichung P_{COR} zwischen der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} am Netzanschluss 26 und der Summe P_{INV} der gemessenen Auslauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X in der Anlage 11. Die Gesamt-Leistungsabweichung P_{COR} wird auf die relative Nennleistung des jeweiligen Wechselrichters 10.X normiert und am Ausgang des Zuteilers 32 zum normierten und ggf. Offset-modifizierten Anteil des Wechselrichters 10.x am Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ addiert. Als Ausgangswert erzeugt der Anlagenregler 28 so die jeweiligen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$.

Durch das dargestellte Ausführungsbeispiel ist es möglich, auf Ebene der Energieversorgungsanlage 11 eine netzformende Momentanreserveleistung, auch Plant-Level-Inertia genannt, zu realisieren, indem die Wechselrichter 10.X jeweils eine individuell einstellbare Momentanreserveleistung bereitstellen. Gleichzeitig wird die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} unter Berücksichtigung eines Leistungs-Dispatchings auf die Wechselrichter 10.X aufgeteilt und dabei mit hoher stationärer Genauigkeit auf den Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ eingestellt. Dabei werden zwischen dem Anlagenregler 28 und dem jeweiligen Wechselrichter 10.X folgende Informationen ausgetauscht:

Vom Anlagenregler 28 wird die individuelle Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ für jeden Wechselrichter 10.X zu dem jeweiligen Wechselrichter 10.X übermittelt. Dies dient insbesondere dem Leistungs-Dispatching innerhalb der Anlage 11.

Von den Wechselrichtern 10.X werden die gemessenen individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X in der Anlage 11 zum Anlagenregler 28 übermittelt. Dies dient insbesondere der Korrektur von Einflüssen der Verlustleistung P_{LOSS} auf die stationäre Genauigkeit der Regelung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} .

Die Figuren 13 bis 15 zeigen beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung eines Verfahrens gemäß Fig. 4.

Figur 5 zeigt schematisch eine Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens, bei der die Energieerzeugungsanlage 11 eine asymmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen kann. Ergänzend zu Fig. 4 weist die trägheitsgebende Regelung 53.X in Fig. 5 eine Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X auf, die auf die individuelle Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ angewendet wird, um die individuelle Abweichung ΔP_X zu berechnen, aus der im Folgenden über den Integrator $1/s$ und den Trägheitsfaktor $1/H_9$ die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ als Ausgangswert generiert wird. Alternativ kann der Trägheitsfaktor $1/H_9$ bereits in der Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X integriert sein, wobei die Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X auch als Fallunterscheidung mit zwei verschiedenen Trägheitsfaktoren $1/H_9$ realisiert sein kann.

Die Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X im Beispiel gemäß Fig. 5 weist eine vergleichsweise kleine Steigung für negative Werte und eine vergleichsweise hohe Steigung für positive Werte der individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ auf. Dadurch wird einer negativen individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ eine betragsmäßig deutlich kleinere individuelle Abweichung ΔP_X zugeordnet als einer betragsmäßig gleich großen positiven individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$. In alternativen Ausführungsformen können die Verhältnisse der Steigungen der positiven und negativen Hälften der Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X bedarfsweise genau umkehrt eingestellt werden.

Die Dynamik der resultierenden Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$, die als Eingangswert für die Droop-Regelung 51.X verwendet wird, hängt somit über die Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X von der Richtung ab, in der die Austauschleistung $P_{INV,X}$ von der jeweiligen Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ abweicht. Durch die vorzeichenabhängige Steigung der Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X kann individuell eingestellt werden, welche Trägheit die Momentanreserveleistung des Wechselrichters 10.X bei einer gegebenen Spannungsverlaufsabweichung mit einem gegebenen positiven bzw. negativen Vorzeichen und einer damit zusammenhängenden individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ aufweist.

Figur 6 zeigt schematisch eine weitere Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens, bei der die Droop-Regelung 51.X ergänzend oder alternativ zu Fig. 5 eine Droop-Asymmetrie-Statik 57.X aufweist. Die Droop-Asymmetrie-Statik 57.X kann dabei die Frequenzkonstante K_f ersetzen (vergleiche Fig. 4) oder alternativ dimensionslos ausgeführt und mit der Frequenzkonstante K_f multipliziert werden, ggf. im Rahmen einer entsprechend vorzeichenabhängigen Fallunterscheidung. Die Droop-Asymmetrie-Statik 57.X wird auf die individuelle Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_{Xi} angewendet und ergibt die Frequenzverschiebung Δf , die letztlich den Spannungsverlauf ϑ bestimmt.

Die Droop-Asymmetrie-Statik 57.X im Beispiel gemäß Fig. 6 weist eine vergleichsweise kleine Steigung für positive Werte und eine vergleichsweise hohe Steigung für negative Werte der individuellen Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_{Xi} auf. Dadurch wird einer positiven individuellen Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_{Xi} eine betragsmäßig deutlich kleinere Frequenzverschiebung Δf , zugeordnet als einer betragsmäßig gleich großen negativen individuellen Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_{Xi} . In alternativen Ausführungsformen können die Verhältnisse der Steigungen der positiven und negativen Hälften der Droop-Asymmetrie-Statik 57.X bedarfsweise genau umkehrt eingestellt werden.

Die Dynamik des resultierenden Spannungsverlaufs ϑ , der vom Wandler 30.X am Ausgang des Wechselrichters 10.X eingestellt wird, hängt somit über die Droop-Asymmetrie-Statik 57.X von der Richtung ab, in der die Austauschleistung $P_{INV,X}$ von der jeweiligen Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ abweicht. Durch die vorzeichenabhängige Steigung der Droop-Asymmetrie-Statik 57.X kann individuell eingestellt werden, welchen Beitrag die Droop-Regelung 51.X zur Momentanreserveleistung des Wechselrichters 10.X bei einer gegebenen Spannungsverlaufsabweichung mit einem gegebenen positiven bzw. negativen Vorzeichen und einer damit zusammenhängenden individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ bereitstellt.

Zusammenfassend kann mittels einer Asymmetrie-Statik gemäß Fig. 5 oder Fig. 6, insbesondere mit der Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X und/oder der Droop-Asymmetrie-Statik 57.X eine unterschiedliche Gewichtung der Abweichung der Austauschleistungen $P_{INV,X}$ von der jeweiligen Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ in Abhängigkeit vom Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung, beispielsweise je nach Vorzeichen eines Netzfrequenzgradienten vorgenommen werden. Die Gewichtung kann dabei um mindestens den Faktor 2, bevorzugt um den Faktor 5 unterschiedlich sein. Besonders bevorzugt kann die Gewichtung, beispielsweise ausgedrückt als Betrag einer Trägheits- bzw. Frequenzkonstante oder als Steigung der Asymmetrie-Statik, um mindestens den Faktor 10 unterschiedlich sein, damit kann die Bereitstellung einer asymmetrischen Momentanreserveleistung insbesondere so eingestellt werden, dass eine Momentanreserveleistung weitgehend ausschließlich bei einem

Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung erzeugt wird und bei einer gegenläufigen Spannungsverlaufsabweichung mit dem anderen Vorzeichen deutlich reduziert ist oder sogar möglichst vollständig ausbleibt.

Figur 7 zeigt eine Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens, bei der die Asymmetrie-Statik 55.X und/oder 57.X zusätzlich von der Netzfrequenz f_{Netz} und optional von der Austauschleistung $P_{\text{INV},X}$ des Wechselrichters 10.X abhängen. Abhängig von der aktuellen Netzfrequenz f_{Netz} wird damit beispielsweise nur dann eine Momentanreserveleistung aufgrund eines Netzfrequenzgradienten und der dadurch hervorgerufenen individuellen Leistungsregelabweichung $\Delta P_{\text{INV},X}$ bzw. Droop-Wechselrichter-Abweichung ΔP_{X_i} bereitgestellt, wenn die Netzfrequenz f_{Netz} in derselben Richtung von einer Nennfrequenz abweicht wie der Netzfrequenzgradient, also wenn z.B. eine Überfrequenz vorliegt und die Netzfrequenz f_{Netz} weiter steigt. Im Umkehrschluss kann eine anhand der Asymmetrie-Statik an sich vorgesehene Momentanreserveleistung unterdrückt werden, wenn der Netzfrequenzgradient in Richtung der Nennfrequenz zeigt, also wenn beispielsweise eine Überfrequenz vorliegt und einer sowieso schon fallenden Netzfrequenz nicht unnötig entgegengewirkt werden soll. Die optionale Abhängigkeit der Asymmetrie-Statik 55.X und/oder 57.X von der Austauschleistung $P_{\text{INV},X}$ des Wechselrichters 10.X kann als weiterer Freiheitsgrad genutzt werden, um beispielsweise eine Leistungsbegrenzung und/oder ein Totband für die Momentanreserveleistung zu definieren, so dass die Momentanreserveleistung auf eine maximale Austauschleistung beschränkt werden kann bzw. erst bei einer minimalen Austauschleistung einsetzt.

Die Figuren 16 und 17 zeigen beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung eines Verfahrens einer der Figuren 5 bis 7 mit unterschiedlich parametrisierten Asymmetrie-Statiken 55.X, 57.X.

Figur 8 zeigt schematisch eine weitere konkrete Ausführungsform des anmeldungsgemäßen Verfahrens. Abweichend zu den Figuren 4-7 wird im trägheitsgebenden Regler 53.X die individuelle Leistungsregel-Abweichung $\Delta P_{\text{INV},X}$ zu einem einstellbaren Anteil um den individuellen Abweichungs-Anteil $\Delta P_{\text{POI},X}$ an der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} korrigiert. Der individuelle Abweichungs-Anteil $\Delta P_{\text{POI},X}$ an der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} ergibt sich aus der Leistungs-Regelabweichung ΔP_{POI} am Anlagenanschlusspunkt 26 und einer individuellen Normierung auf die relative Nennleistung des jeweiligen Wechselrichters 10.X.

Im Anlagenregler 53.X wird nun die in der trägheitsgebenden Regelung 53.X vormals ausschließlich verwendete individuelle Leistungsregel-Abweichung $\Delta P_{\text{INV},X}$ mit einem ersten Gewichtungsfaktor K_1 gewichtet. Der individuelle Abweichungs-Anteil $\Delta P_{\text{POI},X}$ an der Anlagen-Abweichung $\Delta P_{\text{POI},X}$ wird mit einem zweiten Gewichtungsfaktor K_2 gewichtet. Diese gewichteten Anteile werden summiert und in der trägheitsgebenden Regelung 53.X ggf. mit

einer Trägheits-Asymmetrie-Statik 55.X multipliziert und als individuelle Abweichung ΔP_X verwendet, um über ein Integrator $1/s$ und einen Trägheitsfaktor $1/H_9$ die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ als Ausgangswert zu generieren. Die Summe der Gewichtungsfaktoren K_1 und K_2 , mit der die beiden Regelabweichungen gewichtet werden, ergibt dabei 1.

Es ist damit möglich, die Leistungs-Regelabweichung $\Delta P_{INV,X}$ am Wechselrichter 10.X gegenüber der Leistungs-Regelabweichung $\Delta P_{POI,X}$ am Anlagenanschlusspunkt 26 schwächer zu gewichten, da ersterer Pfad eine größere Verzögerung aufweisen kann. Dies ergibt dann eine höhere Gewichtung der normierten Leistungs-Regelabweichung $\Delta P_{POI,X}$ am Anlagenanschlusspunkt 26:

$$K_1 = K_\Delta < K_2 = 1 - K_\Delta$$

Dabei wird vom Anlagenregler 28 zu dem jeweiligen Wechselrichter 10.X der normierte, d.h. auf den Wechselrichter 10.X umgerechnete individuelle Abweichungs-Anteil $\Delta P_{POI,X}$ der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} der Leistung P_{POI} am Netzanschluss 26 gegenüber dem Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ übermittelt und über den zweiten Gewichtungsfaktor K_2 relativ gegenüber der individuellen Leistungsregel-Abweichung $\Delta P_{INV,X}$ gewichtet in der trägheitsgebenden Regelung 53.X zur Berechnung der Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ verwendet. Dies dient der Inertia-Genauigkeit am Netzanschluss 26.

Die Übermittlung dieser Information kann bei Vorhandensein von Kommunikationsverzögerungen bei der Übertragung der individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X in der Anlage 11 an den Anlagenregler 18 nützlich sein. Es kann damit die Dynamik beim Dispatching verbessert werden.

Alternativ oder zusätzlich kann der individuelle Abweichungs-Anteil $\Delta P_{POI,X}$ an der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} der Leistung P_{POI} am Netzanschlusspunkt 26 auch im Wechselrichter 10.X gebildet werden, wenn die dazu notwendigen Signale, insbesondere die Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} an den Wechselrichter 10.X übertragen werden.

Die individuelle Abweichung ΔP_X eines Wechselrichters 10.X in der Anlage 11, welche resultierend dem Inertia-Integrator der trägheitsgebenden Regelung 53.X des Wechselrichters 10.X zugeführt wird, lässt sich z. B. folgendermaßen berechnen:

$$\begin{aligned} \Delta P_X &= K_1 \cdot (P_{SPT,INV,X} - P_{INV,X}) + K_2 \cdot (P_{SPT,POI,X} - P_{POI,X}) \\ K_1 + K_2 &= 1 \quad \rightarrow \quad K_1 = K_\Delta, \quad K_2 = 1 - K_\Delta \\ \Delta P_X &= K_\Delta \cdot (P_{SPT,INV,X} - P_{INV,X}) + (1 - K_\Delta) \cdot (P_{SPT,POI,X} - P_{POI,X}) \end{aligned}$$

$$\Delta P_X = K_\Delta \cdot \left(\underbrace{\left(\left(P_{SPT,POI} \cdot \frac{P_{NORM,X}}{\sum_X P_{NORM,X}} + P_{OFS,X} \right) - \left(P_{POI} - \sum_{X=1 \dots N} (P_{INV,X}) \right) \cdot \frac{P_{NORM,X}}{\sum_X P_{NORM,X}} \right)}_{P_{SPT,INV,X}} - P_{INV,X} \right) + (1 - K_\Delta) \cdot (P_{SPT,POI} - P_{POI}) \cdot \frac{P_{NORM,X}}{\sum_X P_{NORM,X}}$$

Typischerweise ist $K_1 = K_\Delta > 0$, $K_2 = 1 - K_\Delta < 1$.

Dies erlaubt ein Zurverfügungstellen einer Momentanreserve, auch Plant-Level-Inertia genannt, und zugleich eine genaue Regelung am Wechselrichter 10.X mit dem beschriebenen Leistungs-Dispatching im Zuteiler 32 des Anlagenreglers 28, sowie eine genaue Regelung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} am Netzanschluss 26.

In Figur 8 ist zusätzlich das optionale Verzögerungsglied 34 dargestellt. Hierdurch wird bei der Bildung der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} der Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ um D Abtastschritte gegenüber dem Rückkoppelsignal der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} verzögert. Damit lässt sich die Dynamik des Führungsverhalten im Zusammenhang mit der der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} am Netzanschluss 26 verbessern.

Die Anzahl der Abtastschritte D und damit die Verzögerungszeit kann abhängig von den Kommunikationsverzögerungen bei der Datenübertragung und Signalverarbeitung zwischen Anlagenregler 28 und Wechselrichter 10.X sowie den Totzeiten bei der Messwerteerfassung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} eingestellt werden. Ein Rate-Limiter einer Vorsteuerung (vergleiche Figur 7) kann auch einen Einfluss auf die Wahl der Abtastschritte D haben. Je langsamer vorgesteuert wird, desto größer ist die Anzahl der Abtastschritt D zu wählen.

Dies ermöglicht eine zufriedenstellende Funktionsweise trotz Verzögerungen in der Übermittlung benötigter Daten zwischen Wechselrichter 10.X und Anlagenregler 28. Die Schwingungsneigung wird geringgehalten, und die Einregelgeschwindigkeit wird verbessert.

Die Figur 19 zeigt beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung des Verfahrens gemäß Fig. 8. Insgesamt weist die Ausführungsform der Energieversorgungsanlage 11 gemäß Fig. 8 eine reduzierte Schwingungsneigung auf, wobei Totzeiten bei der Datenübertragung berücksichtigt und die Synchronität von verschiedenen Datenkanälen verbessert werden.

Figur 9 zeigt schematisch eine Ausführungsform der Energieversorgungsanlage 11 mit verbesserter Synchronität. Durch die Einführung eines Verzögerungsglieds 36 mit der Verzögerungskonstante D2 im Anlagenregler 28 kann die Rückkopplung der Gesamt-

Austauschleistung P_{POI} der Anlage verzögert und damit besser mit der Rückkopplung der gemessenen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X synchronisiert werden. So kann Schwingungen entgegengewirkt werden. Dieses Verzögerungsglied 36 kann auch mit weiteren Ausführungsbeispielen dieser Anmeldung kombiniert werden.

Durch die Verzögerung der Rückkopplung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} um D2 Abtastschritte durch das Verzögerungsglied 36 kann die Rückkopplung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} mit der Summe der gemessenen individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.X, welche insbesondere aufgrund von Kommunikationslatenzen verzögert an den Anlagenregler 28 übertragen werden, synchronisiert werden. Dies kann für die Berechnung von sinnvollen individuellen Korrekturwerten $P_{COR,X}$ verwendet werden. Hierdurch kann die Synchronität zwischen der wechselrichterseitigen und der anlagenseitigen Messung verbessert werden. Dadurch kann die Schwingungsneigung bei transienten Ereignissen verringert werden, und die Ermittlung der Verlustleistung P_{LOSS} zur genauen Einstellung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} wird verbessert. Die Figur 18 zeigt beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung des Verfahrens gemäß Fig. 9.

Figur 10 zeigt schematisch eine Ausführungsform der Energieversorgungsanlage mit Vorsteuerung zur Verbesserung des Führungsverhalten der Energieversorgungsanlage 10. Durch die gezeigte Ausführungsform mit einer Doppelvorsteuerung, die vom Anlagenregler 28 mit einstellbarer Gewichtung sowohl in die jeweilige trägheitsgebende Regelung 53.X als auch in die jeweilige Droop-Regelung 51.X eingreifen kann, kann ein schnelles Führungsverhalten für die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} am Netzanschluss 26 und gleichzeitig eine Trägheit in Bezug auf das Störverhalten bei Spannungsverlaufsabweichungen im Netz 24 realisiert werden.

Über den in Figur 10 dargestellten oberen Pfad kann eine Vorsteuerung des Anlagen-Sollwerts $P_{SPT,POI}$ in auf den Wechselrichter 10.X normierter Form $P_{SPT,POI,X}$ auf den gestellten Spannungswinkel ϑ und auf die gestellte Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ oder alternativ auf die Sollfrequenz f_{SPT} der Netzspannung im jeweiligen Wechselrichter 10.X einwirken. Der auf den Wechselrichter 10.X normierte Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ wird auch als individueller Anteil $P_{SPT,POI,X}$ am Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ bezeichnet und hier als Vorsteuerungswert verwendet. Die Droop-Regelung 51.X wandelt die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ in einen entsprechenden Phasenwinkel ϑ um.

Es erfolgt über den Vorsteuerungswert und einen ersten Korrekturfaktor K_{XP} eine schnelle Anpassung der Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ der Droop-Regelung 51.X an einen geänderten Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$, d.h. an eine neue Lastsituation, so dass der träge

Inertia-Integrator der Trägheitsregelung 53.X die Droop-Kennlinien-Referenzleistung $P_{SPT,X}$ nicht erst langsam nachführen muss. Über den Vorsteuerungswert und einen zweiten Korrekturfaktor K_{X9} wird der von der Droop-Reglung berechnete Phasenwinkel $\Delta\vartheta$ direkt an einen geänderten Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ angepasst. Dies erhöht die Dynamik und verringert Schwingungsneigung.

Vom Anlagenregler 28 zu den Wechselrichtern 10.X werden dazu die individuellen Anteile $P_{SPT,POI,X}$ am Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ an die jeweiligen Wechselrichter 10.X übermittelt. Dies entspricht der auf die relative Nennleistung des Anlagen-Sollwerts $P_{SPT,POI}$ normierten Sollleistung des Wechselrichters 10.X. Hiermit kann eine Vorsteuerung für eine schnelle Umsetzung der Leistungssollwertvorgaben am Netzanschluss 26 realisiert werden. Außerdem wird ein schnelles Führungsverhalten für die individuelle Austauschleistung $P_{INV,X}$ und damit die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} ermöglicht.

Über den ersten Korrekturfaktor K_{XP} und den zweiten Korrekturfaktor K_{X9} können die Vorsteuerpfade gegeneinander gewichtet werden.

Durch zusätzliche Limitierungsglieder lassen sich die Amplitude und Änderungsrate der Vorsteuerung begrenzen. Hierdurch können sprunghafte Änderungen, Überspringen und Dämpfung der Anregung von Resonanzen reduziert oder vermieden werden.

Die Figuren 20 bis 22 zeigen beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung des Verfahrens gemäß Fig. 10, wobei in Fig. 20 keine Kommunikationsverzögerung und in Fig. 21 eine signifikante Kommunikationsverzögerung der Übertragung der Austauschleistungen $P_{INV,X}$ der Wechselrichter 10.1, 10.2 an den Anlagenregler 28 angenommen wird, und wobei die Kommunikationsverzögerung in Fig. 22 mittels eines Verzögerungsglieds 36 (vergleiche Fig. 9) berücksichtigt wird.

Figur 11 zeigt beispielhaft eine Ausführungsform der Energieversorgungsanlage 11, bei der verschiedene Ausführungsbeispiele kombiniert wurden. In der Ausführungsform gemäß Fig. 11 ist zudem die in Fig. 10 dargestellte Doppelvorsteuerung der trägheitsgebenden Regelung 53.X und der Droop-Regelung 51.X dahingehend modifiziert, dass der Vorsteuerungswert durch eine gewichtete Summe aus dem individuellen Anteil des Wechselrichters am Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI,X}$ und der individuellen Wechselrichter-Sollleistung $P_{SPT,INV,X}$ gebildet wird. Die gewichtete Summe wird dabei mittels zweier Korrekturfaktoren (K_3, K_4) gebildet wird, deren Summe bevorzugt gleich eins ist.

Es sind auch andere Kombinationen der dargestellten Ausführungsbeispiele möglich, insbesondere mit Verwendung einer Asymmetrie-Statik 55.X, 57.X in der trägheitsgebenden Regelung 53.X und/oder in der Droop-Regelung 51.X.

Die in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele bieten eine zufriedenstellende Funktionsweise hinsichtlich des Führungs- und Störverhaltens der Energieversorgungsanlage 11 trotz etwaiger kommunikationstechnisch bedingter Verzögerungen in der Übermittlung benötigter Daten zwischen Wechselrichter 10.X und Anlagenregler 28. Auch bei etwaigen Unterschieden in der Verzögerung auf verschiedenen Übermittlungskanälen wird die Schwingungsneigung geringgehalten. Dies gilt insbesondere auch für das Ausführungsbeispiel von Figur 11 oder 12, wo mehrere Funktionalitäten gemeinsam realisiert werden.

Vorteilhaft ist insbesondere, dass auch im Ausführungsbeispiel von Figur 11, wo die Einzel-funktionen aus den Figuren 4 bis 10 kombiniert realisiert sind, eine Entkopplung der Einzelfunktionen immer noch gegeben ist. Dies dient zur Reduktion nachteiliger Interaktionen untereinander und hat eine Reduktion der Schwingungsneigung und damit einhergehend eine Verbesserung der Einregelgeschwindigkeit zur Folge.

Die Figuren 23 und 24 zeigen beispielhafte Zeitverläufe der Soll- und Istwerte für eine Energieversorgungsanlage 11 und deren Wechselrichter 10.1, 10.2 bei Verwendung des Verfahrens gemäß Fig. 11 in verschiedenen Varianten.

In den folgenden **Figuren 12 bis 24** werden Zeitverläufe von Sollwerten und Istwerten von Leistungen P_{POI} an einem Netzanschlusspunkt 26 und Leistungen $P_{INV,X}$ an einzelnen Wechselrichtern 10.X einer Energieversorgungsanlage 11 dargestellt. Anhand dieser Figuren werden im Folgenden verschiedene Eigenschaften der Regelungen entsprechend der Fig. 1 bis 11 diskutiert. Dabei wird ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit eine beispielhafte Energieversorgungsanlage 11 betrachtet, die genau zwei Wechselrichter 10.1, 10.2 umfasst. Dabei werden die Leistungen der Wechselrichter 10.1, 10.2 von ihren jeweiligen Regelungen 50.1, 50.2 geregelt, die wiederum von dem Anlagenregler 28 beeinflusst werden, so dass die Gesamt-Austauschleistung der Energieversorgungsanlage 11 mit dem Netz 24 von dem Anlagenregler 28 geregelt wird und eine Momentanreserveleistung am Netzanschluss 26 bereitgestellt wird. Die Energieversorgungsanlage 11 kann weitere Senken oder Quellen umfassen, deren Einfluss in einer Verlustleistung P_{LOSS} zusammengefasst sind, beispielsweise Komponenten wie Trafos, Kabel, Hilfsaggregate oder kleinere Erzeugungseinheiten, die nicht durch die Anlagenregelung angesteuert werden.

Die obere Graphik („Netzfrequenz“) in den Figuren 12 bis 24 zeigt jeweils einen beispielhaften Zeitverlauf der Netzfrequenz des Netzes 24, hier bezeichnet als „f_GRID“. Die jeweils mittlere

Graphik („Plant Level“) zeigt die Zeitverläufe des Anlagen-Sollwerts $P_{SPT,POI}$, hier bezeichnet als P_{POI_REF} , und der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} , hier bezeichnet als P_{POI} . Die jeweils untere Graphik („Inverter Level“) zeigt die Zeitverläufe der zwei individuellen Wechselrichter-Sollleistungen $P_{SPT,INV,X}$, hier bezeichnet als P_{1_REF} und P_{2_REF} , und der zwei zugehörigen individuellen Austauschleistungen $P_{INV,X}$, hier bezeichnet als P_{1_REF} und P_{2_REF} . Damit repräsentieren P_{1_REF} und P_{2_REF} die Sollwerte und P_{1_REF} und P_{2_REF} die Istwerte der Wechselrichter 10.1 und 10.2 der Energieversorgungsanlage 11, deren Sollleistung P_{POI_REF} im Wesentlichen auf die Sollwerte P_{1_REF} und P_{2_REF} aufgeteilt wird und deren Gesamtleistung P_{POI} am Netzanschlusspunkt 26 im Wesentlichen die Leistungen P_{1_REF} und P_{2_REF} umfasst.

Die Figuren 12 bis 24 zeigen resultierende Zeitverläufe bei Anwendung verschiedener Ausführungsformen des anmeldungsgemäßen Verfahrens in der Energieerzeugungsanlage 11. Dabei sind beispielhaft konkret Wirkleistungen (Active Power) dargestellt, wobei die Wirkleistungen auf die Nennleistung der Anlage 11 insgesamt (Plant Level, jeweils mittleres Bild) bzw. auf die Nennleistung des jeweiligen einzelnen Wechselrichters 10.1, 10.2 (Inverter Level, unteres Bild) normiert sind (Einheit „pu“ = „per unit“).

Die Zeitverläufe der Netzfrequenz f_{GRID} und des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} sind in den Figuren 12 bis 24 jeweils identisch. Zusätzlich wirken identische individuelle Offset-Werte $P_{OFS,X}$ (nicht dargestellt) auf die Aufteilung des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} auf die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen P_{1_REF} und P_{2_REF} ein.

Die Zeitverläufe der Figuren 12 bis 24 weisen folgende Abschnitte mit jeweils spezifischen Randbedingungen auf:

$t < t_1$: die Netzfrequenz f_{GRID} entspricht einer Nennfrequenz f_{INIT} des Netzes 24 und beträgt beispielsweise 50 Hz; der Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} und die Offset-Werte $P_{OFS,X}$ sind gleich null.

$T_1 < t < t_2$: die Netzfrequenz f_{GRID} entspricht weiterhin der Nennfrequenz f_{INIT} des Netzes 24; der Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} beträgt +0,3 pu; die Offset-Werte $P_{OFS,X}$ sind weiterhin gleich null.

$T_2 < t < t_3$: die Netzfrequenz f_{GRID} entspricht weiterhin der Nennfrequenz f_{INIT} ; der Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} beträgt weiterhin +0,3 pu; der Offset-Wert $P_{OFS,1}$ für Wechselrichter 10.1 ist von null auf +0,1 pu geändert, der Offset-Wert $P_{OFS,2}$ für Wechselrichter 10.2 ist von null auf -0,1 pu geändert.

$T_3 < t < t_4$: die Netzfrequenz f_{GRID} sinkt mit konstanter Rate von der Nennfrequenz f_{INIT} auf einen kleineren Wert f_1 ; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ beträgt weiterhin $+0,3 \text{ pu}$; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ betragen weiterhin $+0,1 \text{ pu}$ bzw. $-0,1 \text{ pu}$.

$T_4 < t < t_5$: die Netzfrequenz f_{GRID} weist den gegenüber der Nennfrequenz f_{INIT} verringerten Wert f_1 auf; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ beträgt weiterhin $+0,3 \text{ pu}$; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ betragen weiterhin $+0,1 \text{ pu}$ bzw. $-0,1 \text{ pu}$.

$T_5 < t < t_6$: die Netzfrequenz f_{GRID} weist weiterhin den verringerten Wert f_1 auf; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ beträgt weiterhin $+0,3 \text{ pu}$; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ sind von $\pm 0,1 \text{ pu}$ auf null geändert.

$T_6 < t < t_7$: die Netzfrequenz f_{GRID} weist weiterhin den verringerten Wert f_1 auf; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ ist auf $-0,2 \text{ pu}$ geändert; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ sind weiterhin gleich null.

$T_7 < t < t_8$: die Netzfrequenz f_{GRID} steigt mit konstanter Rate von der Frequenz f_1 auf die Nennfrequenz f_{INIT} ; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ beträgt weiterhin $-0,2 \text{ pu}$; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ sind weiterhin gleich null.

$T > t_8$: die Netzfrequenz f_{GRID} entspricht der Nennfrequenz f_{INIT} des Netzes 24; der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ beträgt weiterhin $-0,2 \text{ pu}$; die Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ sind weiterhin gleich null.

Fig. 12 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit einer konventionellen Regelung entsprechend Fig. 1, bei der die Regelung 20.X spannungseinprägend ausgelegt ist und die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} im Anlagenregler 28 mittels des Reglers 15 verarbeitet wird. Der Regler 15 ist dabei als Integralregler oder als Proportional-Integral-Regler ausgeführt und regelt die Abweichung zwischen der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und dem Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ zu null, indem der Anlagen-Sollwert $P_{\text{POI_REF}}$ bei einer solchen Abweichungen entsprechend modifiziert, an den Zuteiler 16 weitergegeben und dort unter Berücksichtigung der Offset-Werte $P_{\text{OFS},x}$ auf die Wechselrichter-Sollleistungen P_{1_REF} , P_{2_REF} aufgeteilt wird.

Fig. 12 zeigt, dass durch die Verstärkung des Integralanteils im Regler 15 des Anlagenreglers 28 ein schnelles Führungsverhalten bei Änderungen des Anlagen-Sollwertes $P_{\text{POI_REF}}$ und eine schnelle Ausregelung des Regelfehlers der Gesamtaustauschleistung P_{POI} erreicht wird, siehe insbesondere den Verlauf der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} an den Zeitpunkten t_1 und t_6 . Andererseits weist der Verlauf der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} an den Zeitpunkten t_1 und t_6 ein deutliches Überschwingen auf.

Nachteilig am Verhalten gemäß Fig. 12 der Energieerzeugungsanlage 11 mit einer Regelung gemäß Fig. 1 ist zudem, dass die Reaktionen der spannungseinprägenden Regelungen 20.X im Falle der Frequenzänderung zwischen t_3 und t_4 bzw. zwischen t_7 und t_8 vom Anlagenregler 28 als Regelabweichung am Netzanschluss 28 wahrgenommen und aufgrund des Integralanteils im Regler 15 ausgeglichen werden, indem die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen P_{1_REF} , P_{2_REF} geändert werden. In Fig. 12 entspricht die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} daher bereits kurz nach den Zeitpunkten t_3 bzw. t_7 wieder dem Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} .

Fig. 13 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung entsprechend Fig. 3 oder Fig. 4, bei der insbesondere im Vergleich zu der Regelung gemäß Fig. 1 kein Regler 15 mit Integralanteilen im Anlagenregler 28 verwendet wird. Stattdessen wird eine Regelabweichung zwischen Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} im Anlagenregler 28 unter Berücksichtigung der gemessenen und an den Anlagenregler 28 übertragenen individuellen Austauschleistungen P_1 , P_2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 sowie der gemessenen oder ermittelten Gesamt-Austauschleistung P_{POI} korrigiert, indem die individuellen Wechselrichter-Sollleistungen P_{1_REF} , P_{2_REF} im Zuteiler 32 unter zusätzlicher Berücksichtigung der jeweiligen Offset-Werte $P_{OFS,X}$ angepasst werden. Es resultiert eine hohe stationäre Leistungsgenauigkeit sowohl an den Wechselrichtern 10.1, 10.2 als auch am Netzanschluss 26. Das Einschwingverhalten nach einer Änderung des Anlagen-Sollwertes P_{POI_REF} selbst oder der Wechselrichter-Sollleistungen P_{1_REF} , P_{2_REF} bei Änderung der Offset-Werte $P_{OFS,X}$ hängt dabei von der Parametrierung der netzformenden Regelung 50.X in den Wechselrichtern 10.1, 10.2 ab, in der Ausführungsform gemäß Fig. 4 insbesondere vom Trägheitsfaktor $1/H_9$ so dass eine umso höhere Trägheitskonstante H_9 ein umso langsames Einschwingen auf den geänderten Sollwert bedingt.

Fig. 14 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung entsprechend Fig. 4, bei der ein optionaler Verstärkungsfaktor K_C im Zuteiler 32 des Anlagenreglers 28 verwendet wird, um die Messwerte P_{POI} und/oder P_1 , P_2 zu kalibrieren. Damit können die im Zuteiler 32 ermittelten, normierten und ggf. Offset-verschobenen Anteile der Wechselrichter 10.1, 10.2 an der Anlagen-Sollleistung P_{POI_REF} um eine einstellbare, normierte Regelabweichung zwischen Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} korrigiert werden, insbesondere um etwaige Messungenauigkeiten an den Wechselrichtern 10.1, 10.2 und/oder am Netzanschluss 26 bedarfsweise mit einstellbarer Gewichtung zu kompensieren. Der Verstärkungsfaktor K_C weist zum Zeitpunkt t_1 zunächst den Wert 0 auf, d.h. eine gegebene Abweichung der Summe der Austauschleistungen P_1 , P_2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 von der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} wird nicht

kompensiert. In der Mitte zwischen t_1 und t_2 wird der Verstärkungsfaktor K_c von 0 auf 0.5 geändert. Dadurch verringert sich die Abweichung der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} und Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} bei einer gegebenen Verlustleistung P_{Loss} , die jedoch unterkompensiert bleibt. In der Mitte zwischen t_5 und t_6 wird der Verstärkungsfaktor K_c von 0.5 auf 1 geändert, so dass die Verlustleistung P_{Loss} exakt kompensiert wird und die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} im stationären Zustand dem Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} entspricht. In der Mitte zwischen t_6 und t_7 wird der Verstärkungsfaktor K_c von 1 auf 1.5 geändert, so dass die Abweichung der Summe der Austauschleistungen P_1 , P_2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 von der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} überkompensiert wird. Dieses Beispiel ist insofern idealisiert, als keine Messungenauigkeiten auftreten und daher mit einem Verstärkungsfaktor K_c mit dem Wert 1 die Verlustleistung P_{Loss} genau kompensiert wird.

Die Verwendung der Regelung aus Fig. 4 ist insbesondere geeignet für Energieversorgungsanlagen 11 mit geringen Kommunikationsverzögerungen bei der Informationsweitergabe zwischen Anlagenregler 28 und den Wechselrichtern 10.X. Falls jedoch insbesondere die Rückmeldung der Leistungswerte P_1 , P_2 an den Anlagenregler 28 verzögert erfolgt, können Schwingungen auftreten, und das Führungs- und Störverhalten kann insgesamt verlangsamt werden.

Fig. 15 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11, bei der die Wechselrichter 10.1, 10.2 jeweils eine netzformende Regelung 50.X aufweisen, die beispielsweise gemäß Fig. 4 ausgeführt ist, wobei die Wechselrichter 10.1 und 10.2 unterschiedliche Trägheitsfaktoren $1/H_9$ verwenden. Dadurch reagiert der Wechselrichter 10.1 auf die der Frequenzänderungen zwischen t_3 und t_4 bzw. zwischen t_7 und t_8 mit einer deutlichen symmetrischen Änderung seiner Austauschleistung P_1 , während der Wechselrichter 10.2 praktische keine Reaktion auf die Frequenzänderungen zwischen t_3 und t_4 bzw. zwischen t_7 und t_8 zeigt. Die Energieerzeugungsanlage 11 insgesamt erzeugt dadurch am Netzanschluss 26 eine symmetrische Momentanreserveleistung, die im Wesentlichen aus dem symmetrischen Beitrag des Wechselrichters 10.1 besteht und insbesondere einem Netzfrequenzgradienten entgegenwirkt.

Die **Figuren 16 und 17** zeigen das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit einer Regelung gemäß einer der Figuren 5 bis 7, wobei durch unterschiedliche Einstellung der Asymmetrie-Statiken 55.X und/oder 57.X in den Regelungen 50.1, 50.2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 verschiedene asymmetrische Momentanreserveleistungen durch die Wechselrichter 10.1, 10.2 bereitgestellt werden, die wiederum eine symmetrische bzw. asymmetrische Momentanreserveleistung der Energieerzeugungsanlage 11 am Netzanschluss 26 ergeben.

Fig. 16 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11, bei der die Wechselrichter 10.1, 10.2 identische Asymmetrie-Statiken aufweisen, die so eingerichtet sind, dass die

Wechselrichter 10.1, 10.2 und damit die Energieerzeugungsanlage insgesamt asymmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen. Konkret sind die Asymmetrie-Statiken so eingestellt, dass die Wechselrichter 10.1, 10.2 auf den positiven Netzfrequenzgradienten zwischen t_7 und t_8 mit einer deutlich größeren Änderung der Austauschleistungen P_{-1} und P_{-2} reagieren als auf den negativen Netzfrequenzgradienten zwischen t_3 und t_4 . Dieses Verhalten kann insbesondere vorteilhaft sein, um mittels der Energieerzeugungsanlage eine insgesamt asymmetrische Momentanreserveleistung bereitzustellen.

Fig. 17 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11, bei der die Wechselrichter 10.1, 10.2 unterschiedliche Asymmetrie-Statiken aufweisen, die so eingerichtet sind, dass die Wechselrichter 10.1, 10.2 jeweils spiegelbildlich asymmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen, so dass die Energieerzeugungsanlage insgesamt wiederum symmetrische Momentanreserveleistung bereitstellt. Konkret kann dazu die Asymmetrie-Statik der Regelung 50.1 des Wechselrichters 10.1 so eingestellt sein, dass der Wechselrichter 10.1 auf den negativen Netzfrequenzgradienten zwischen t_3 und t_4 mit einer deutlich größeren Änderung der Austauschleistungen P_{-1} reagiert als auf den positiven Netzfrequenzgradienten zwischen t_7 und t_8 , während der Wechselrichter 10.2 gerade gegenläufig auf den positiven Netzfrequenzgradienten zwischen t_7 und t_8 mit einer deutlich größeren Änderung der Austauschleistungen P_{-2} reagiert als auf den negativen Netzfrequenzgradienten zwischen t_3 und t_4 . Die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} verhält sich insbesondere hinsichtlich der Netzfrequenzänderungen unabhängig vom Vorzeichen des Netzfrequenzgradienten mit betragsmäßig gleichen Änderungen, so dass die Energieerzeugungsanlage 11 insgesamt eine symmetrische Momentanreserveleistung bereitstellt.

Das Verhalten gemäß Fig. 17 kann insbesondere in einer Energieerzeugungsanlage 11 vorteilhaft angewendet werden, deren Wechselrichter 10.1, 10.2 zumindest zum Teil lediglich asymmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen können, z.B. aufgrund von Beschränkungen der an die Wechselrichter 10.1, 10.2 angeschlossenen Energieerzeuger oder Verbraucher, die ihre elektrische Leistung z.B. im Wesentlichen nur in eine Richtung frei ändern können. Eine solche Energieerzeugungsanlage 11 kann mittels des anmeldungsgemäßen Verfahrens trotzdem insgesamt symmetrische Momentanreserveleistung bereitstellen, indem ein asymmetrisches Verhalten einzelner Wechselrichter 10.1 durch ein spiegelbildlich asymmetrisches Verhalten anderer Wechselrichter 10.2 der Energieerzeugungsanlage 11 ausgeglichen wird.

Die in den Figuren 15 und 16 zu den Zeitpunkten t_2 und t_5 auftretenden Schwankungen der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} werden durch ein betragsmäßig unterschiedliches Verhalten der Wechselrichter 10.1, 10.2 bei der Änderung der Offset-Werte $P_{OFS,1}$ und $P_{OFS,2}$ hervorgerufen und sind an sich unerwünscht, da sich lediglich die Aufteilung des Anlagen-

Sollwert $P_{SPT,POI}$ auf die Wechselrichter 10.1, 10.2 ändern soll, während der Anlagen-Sollwert $P_{SPT,POI}$ gleichbleibt und die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} entsprechend konstant bleiben sollte. Solche unerwünschten Schwankungen der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} können insbesondere mittels einer Vorsteuerung gemäß Fig. 11 reduziert werden.

Fig. 18 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit einer Regelung entsprechend Fig. 9, bei der mögliche Kommunikationsverzögerungen mittels eines Verzögerungsglieds 36 mit der Verzögerungskonstante $D2$ im Anlagenregler 28 berücksichtigt werden können, um die Kommunikationsverzögerungen bei der Übertragung der Leistungsistwerte P_1 , P_2 und der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} einander anzugleichen. Dadurch sind insbesondere Schwingungen bei Änderungen des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} deutlich reduziert.

Fig. 19 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit einer Regelung entsprechend Fig. 8, bei der – alternativ oder zusätzlich zum Verzögerungsglied 36 gemäß Fig. 9 – die individuelle Leistungsregel-Abweichung $\Delta P_{INV,X}$ im trägheitsgebenden Regler 53.X der Wechselrichter 10.X zu einem einstellbaren Anteil um den individuellen Abweichungs-Anteil $\Delta P_{POI,X}$ des jeweiligen Wechselrichters 10.X an der Anlagen-Abweichung ΔP_{POI} korrigiert wird. Dadurch kann die Schwingungsneigung auch bei signifikanten Kommunikationsverzögerungen insbesondere bei Änderungen des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} weiter verringert und das Führungsverhalten verbessert werden.

Fig. 20 zeigt das Verhalten einer Energieerzeugungsanlage 11 mit einer Regelung gemäß Fig. 10, bei der mittels einer Vorsteuerung, die vom Anlagenregler 28 mit einstellbarer Gewichtung sowohl in die jeweilige trägheitsgebende Regelung 53.X als auch in die jeweilige Droop-Regelung 51.X eingreift, sowohl die Dynamik als auch das Führungsverhalten der Regelung weiter verbessert ist. In Abwesenheit wesentlicher Kommunikationsverzögerungen in der Energieversorgungsanlage 11 wird der Anlagen-Sollwert P_{POI_REF} mit hoher stationärer Leistungsgenauigkeit auf die Wechselrichter 10.1, 10.2 aufgeteilt, wobei durch die Rückkopplung von sowohl der Gesamt-Austauschleistung P_{POI} als auch der individuellen Austauschleistungen P_1 , P_2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 in den Anlagenregler 28 eine hohe stationäre Leistungsgenauigkeit am Netzanschluss 26 erreicht wird. Dabei wird insbesondere durch die Vorsteuerung eine hohe Dynamik bei Änderungen des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} erzielt und das Führungsverhalten der Energieversorgungsanlage 11 weiter verbessert. Die Dynamik bei Änderungen der Leistungsaufteilung zwischen den Wechselrichtern 10.1, 10.2 sowie bei Frequenzänderungen der Netzfrequenz erfolgt entsprechend der eingestellten Trägheit der trägheitsgebenden Regler 53.X in den Wechselrichtern 10.X.

Fig. 21 zeigt das Verhalten der Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung gemäß Fig. 10, wobei im Unterschied zu Fig. 20 eine signifikante Kommunikationsverzögerung der Übertragung der Austauschleistungen P_1 , P_2 der Wechselrichter 10.1, 10.2 an den Anlagenregler 28 vorliegt. Dadurch treten bei Änderungen des Anlagen-Sollwerts P_{POI_REF} , beispielsweise an den Zeitpunkten t_1 und t_6 , wiederum Schwingungen der Austauschleistungen P_1 , P_2 , insbesondere ein dynamisches Unterschwingen auf, das sich unter Umständen auch in die Gesamt-Austauschleistung P_{POI} fortsetzen kann. Zudem ist dadurch das Führungs- sowie Störverhalten und somit das Einschwingverhalten der Energieversorgungsanlage 11 insgesamt verlangsamt.

Fig. 22 zeigt das Verhalten der Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung gemäß Fig. 10 bei Vorliegen einer signifikanten Kommunikationsverzögerung, wobei die Kommunikationsverzögerungen im Anlagenregler 28 zusätzlich durch Anwendung eines Verzögerungsglieds 36 auf die gemessene oder ermittelte Gesamt-Austauschleistung P_{POI} gemäß Fig. 6 berücksichtigt wird.

Fig. 23 zeigt das Verhalten der Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung gemäß Fig. 11 bei Vorliegen einer signifikanten Kommunikationsverzögerung und mit Korrektur der individuellen Leistungsregel-Abweichung $\Delta P_{INV,X}$ im trägheitsgebenden Regler 53.X mit $K_1=0,3$ und $K_2=0,7$, jedoch ohne eine Verzögerung durch das Verzögerungsglied 34.

Fig. 24 zeigt das Verhalten der Energieerzeugungsanlage 11 mit der Regelung gemäß Fig. 11 bei Vorliegen einer signifikanten Kommunikationsverzögerung, wobei abweichend zu Fig. 21 die Kommunikationsverzögerungen im Anlagenregler 28 zusätzlich durch Anwendung eines Verzögerungsglieds 36 auf die gemessene oder ermittelte Gesamt-Austauschleistung P_{POI} gemäß Fig. 6 berücksichtigt wird.

BEZUGSZEICHENLISTE

10.X	Wechselrichter
11	Energieversorgungsanlage
15	Integralregler
16	Zuteiler
20.X	Regelung des Wechselrichters
24	Wechselspannungsnetz
26	Netzanschluss
28	Anlagenregler
30.X	Wandler
32	Zuteiler
34, 36	Verzögerungsglieder
50.X	Regelung des Wechselrichters
51.X	Droop-Regelung
53.X	trägheitsgebende Regelung
55.X, 57.X	Asymmetrie-Statik
$P_{INV,X}$	individuelle Austauschleistung des Wechselrichters
P_{INV}	Summe der individuellen Austauschleistungen
P_{POI}	Gesamt-Austauschleistung
$P_{SPT,POI}$	Anlagen-Sollwert
$\Delta\vartheta$	Spannungsverlaufsabweichung
ϑ	Spannungsverlauf
$P_{SPT,X}$	Droop-Kennlinien-Referenzleistung
$P_{SPT,INV,X}$	Wechselrichter-Sollleistung
P_{COR}	Gesamt-Leistungsabweichung
K_1, K_2, K_3, K_4	Gewichtungsfaktor
ΔP_{POI}	Anlagen Abweichung
$K_{XP}, K_{X\vartheta}$	Korrekturfaktoren
$P_{SPT,POI,X}$	individueller normierter Anteil am Anlagen-Sollwert
$\Delta P_{POI,X}$	individueller normierter Anteil an der Anlagen-Abweichung
ΔP_{Xi}	individuelle Droop-Wechselrichter-Abweichung
$\Delta P_{INV,X}$	Leistungsregelabweichung
$P_{OFS,X}$	individueller Offsetwert
$P_{N,X}$	Nennleistung des Wechselrichters
f_{SPT}	Sollfrequenz
$\Delta P_{INV,X}$	individuelle Abweichung
K_f	Frequenz-Konstante
Δf	Frequenzabweichung
P_{LOSS}	Verlustleistung

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Betrieb einer Energieversorgungsanlage (11) mit einer Vielzahl von Wechselrichtern (10.X) und einem Anlagenregler (28), der kommunikativ mit den Wechselrichtern (10.X) verbunden ist,
wobei die Energieversorgungsanlage (11) einen Netzanschluss (26) aufweist, der an ein Wechselspannungsnetz (24) angeschlossen ist, und wobei die Wechselrichter (10.X) über den Netzanschluss (26) elektrische Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) mit dem Wechselspannungsnetz (24) austauschen, so dass die Energieversorgungsanlage (11) eine Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) mit dem Wechselspannungsnetz (24) austauscht, die die jeweiligen elektrischen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) umfasst,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Anlagenregler (28) in Abhängigkeit von einem Anlagen-Sollwert ($P_{SPT,POI}$) für die Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) der Energieversorgungsanlage (11) individuelle Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) ermittelt,
der Anlagenregler (28) die individuellen Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) an die Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) übermittelt,
die jeweiligen Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) die jeweiligen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) der Wechselrichter (10.X) in Abhängigkeit von den Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) einstellen,
wobei die Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) netzformend ausgelegt sind und die Wechselrichter (10.X) individuell einstellbare Momentanreserveleistung bereitstellen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei gemessene individuelle Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) der jeweiligen Wechselrichter (10.X) an den Anlagenregler (28) übermittelt werden und der Anlagenregler (28) die Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) in Abhängigkeit von den gemessenen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) fortlaufend neu ermittelt und an die Wechselrichter (10.X) übermittelt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Anlagenregler (28) die Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) ermittelt, indem der Anlagen-Sollwert ($P_{SPT,POI}$) auf die jeweilige relative Nennleistung des jeweiligen Wechselrichters (10.X) normiert und ein individueller Offsetwert ($P_{OFS,X}$) addiert wird, wobei die Summe der Offsetwerte ($P_{OFS,X}$) bevorzugt den Wert Null ergibt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die netzformenden Regelungen (50.X) autark mit einer individuell einstellbaren Leistungsantwort auf Netzereignisse reagieren und insbesondere jeweils eine Droop-Regelung (51.X) und eine trägheitsgebende Regelung (53.X) umfassen,

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die Wechselrichter (10.X) mittels der jeweiligen Droop-Regelung (51.X) ihre jeweiligen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) anhand einer Droop-Kennlinie in Abhängigkeit von einer Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$) und einer jeweiligen Spannungsverlaufsabweichung eines Spannungsverlaufs einer Netzspannung von einem jeweiligen Referenzverlauf mit Bezug auf einen Droop-Sollwert (X_{SPT}) einstellen, wobei der Droop-Sollwert (X_{SPT}) insbesondere eine Sollfrequenz (f_{SPT}) und/oder eine Sollspannungsamplitude (U_{SPT}) umfasst, wobei die Spannungsverlaufsabweichung des Spannungsverlaufs insbesondere eine Phasenwinkeldifferenz ($\Delta\vartheta$) zwischen dem Phasenwinkel (ϑ) der Ausgangsspannung des Wechselrichters (10.x) und der Netzspannung oder eine Amplitudendifferenz zwischen einer Amplitude der Ausgangsspannung des Wechselrichters (10.X) und der Netzspannung ist, wobei die Phasenwinkeldifferenz ($\Delta\vartheta$) bzw. die Amplitudendifferenz insbesondere durch die jeweilige Austauschleistung ($P_{INV,X}$) repräsentiert wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei die Wechselrichter (10.X) mittels der trägheitsgebenden Regelung (53.X) einen Eingangswert der Droop-Regelung (51.X), insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$), in Abhängigkeit von einer individuellen Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) der Austauschleistung ($P_{INV,X}$) des jeweiligen Wechselrichters (10.X) von der Wechselrichter-Solleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) variieren, um die Austauschleistung ($P_{INV,X}$) der Wechselrichter (10.X) auf die jeweilige Wechselrichter-Solleistung ($P_{SPT,INV,X}$) einzustellen.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, wobei die netzformenden Regelungen (50.X) eine vorzeichenabhängige Gewichtung der Abweichung der individuellen Austauschleistung ($P_{INV,X}$) von der jeweiligen Solleistung ($P_{SPT,INV,X}$, $P_{SPT,X}$) umfassen, wobei die netzformenden Regelungen (50.X) insbesondere eine Asymmetrie-Statik (55.X, 57.X) umfassen, die die Abweichung der individuellen Austauschleistung ($P_{INV,X}$) von der jeweiligen Solleistung ($P_{SPT,INV,X}$, $P_{SPT,X}$) in Abhängigkeit vom Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung unterschiedlich gewichtet.
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Gewichtung für die verschiedenen Vorzeichen der Spannungsverlaufsabweichung mindestens um den Faktor 2, bevorzugt um den Faktor 5, besonders bevorzugt um den Faktor 10 unterschiedlich ist.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, wobei in der Droop-Regelung (51.X) die jeweilige Austauschleistung ($P_{INV,X}$) als Maß für die Spannungsverlaufsabweichung verwendet wird und eine jeweilige Abweichung der Austauschleistung ($P_{INV,X}$) von der Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$) mit einer jeweiligen Droop-Asymmetrie-Statik (57.X) gewichtet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, wobei die individuelle Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) in der trägheitsgebenden Regelung (53.X) mit einer jeweiligen Trägheits-Asymmetrie-Statik (55.X) gewichtet wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, wobei die Asymmetrie-Statik (55.X, 57.X) zusätzlich von der Netzfrequenz (f_{Netz}) und/oder von der jeweiligen Austauschleistung ($P_{INV,X}$) abhängig ist.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, wobei die Leistungsregelgeschwindigkeit der Droop-Regelung (51.X) schneller ist als die Leistungsregelgeschwindigkeit der trägheitsgebenden Regelung (53.X), so dass die Einstellung der Austauschleistung ($P_{INV,X}$) durch die Droop-Regelung (51.X) bei Auftreten einer Phasenwinkeldifferenz ($\Delta\vartheta$) schneller erfolgt als die Variation der Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$) durch die trägheitsgebende Regelung (53.X) bei Auftreten einer individuellen Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) der gemessenen individuellen Austauschleistung ($P_{INV,X}$) von der Wechselrichter-Sollleistung ($P_{SPT,INV,X}$), insbesondere wenn diese Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) durch eine Reaktion auf eine Phasenwinkeldifferenz ($\Delta\vartheta$) verursacht wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) der Energieversorgungsanlage (11) ermittelt wird und insbesondere im Anlagenregler (28) eine Gesamt-Leistungsabweichung (P_{COR}) der Gesamt-Austauschleistung (P_{POI}) von der Summe der gemessenen Austauschleistungen ($P_{INV,X}$) der Wechselrichter (10.X) ermittelt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, wobei die Gesamt-Leistungsabweichung (P_{COR}) auf die jeweiligen relativen Nennleistungen ($P_{N,X}$) der jeweiligen Wechselrichter (10.X) normiert wird und die so ermittelten normierten Teil-Leistungsabweichungen ($P_{COR,X}$) beim Ermitteln der individuellen Wechselrichter-Sollleistungen ($P_{SPT,INV,X}$) insbesondere im Anlagenregler (28) berücksichtigt werden.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 14, wobei die jeweiligen trägheitsgebenden Regelungen (53.X) die Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$) der Droop-Regelung (51.X) unter Verwendung einer Vorsteuerung mit dem Produkt aus einem individuellen Vorsteuerungswert und einem ersten Korrekturfaktor (K_{XP}) variieren.
16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei die jeweiligen Droop-Regelungen (51.X) den Phasenwinkel (ϑ) der Ausgangsspannung des Wechselrichters (10.x) unter Verwendung einer Vorsteuerung mit dem Produkt aus dem individuellen Vorsteuerungswert und einem zweiten Korrekturfaktor ($K_{X\vartheta}$) ermitteln.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, wobei der individuelle Vorsteuerungswert durch den individuellen Anteil des Wechselrichters am Anlagen-Sollwert ($P_{SPT,POI,X}$) oder durch eine gewichtete Summe aus dem individuellen Anteil des Wechselrichters am Anlagen-Sollwert ($P_{SPT,POI,X}$) und der individuellen Wechselrichter-Solllleistung ($P_{SPT,INV,X}$) gebildet wird, wobei die gewichtete Summe insbesondere mittels zweier Korrekturfaktoren (K_3, K_4) gebildet wird, deren Summe bevorzugt gleich 1 ist, .
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 17, wobei der Eingangswert der Droop-Regelung, insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$), im Rahmen der trägheitsgebenden Regelung (53.X) in Abhängigkeit von dem Produkt aus einem ersten Gewichtungsfaktor (K_1) und der Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) des jeweiligen Wechselrichters (10.X) von der Wechselrichter-Solllleistung ($P_{SPT,INV,X}$) variiert wird.
19. Verfahren nach Anspruch 18, wobei der Eingangswert der Droop-Regelung, insbesondere die Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$), in Abhängigkeit von dem Produkt aus einem zweiten Gewichtungsfaktor (K_2) und dem individuellen Anteil des Wechselrichters an der Anlagen-Abweichung ($\Delta P_{POI,X}$) variiert wird.
20. Verfahren nach Anspruch 19, wobei ein Eingangswert der trägheitsgebenden Regelung (53.X) aus einer über die Gewichtungsfaktoren (K_1, K_2) gewichteten Summe aus der individuellen Leistungsabweichung ($\Delta P_{INV,X}$) und dem individuellen Anteil an der Anlagen-Abweichung ($\Delta P_{POI,X}$) gebildet wird, wobei die Summe des ersten Gewichtungsfaktors (K_1) und des zweiten Gewichtungsfaktors (K_2) bevorzugt den Wert eins ergibt.
21. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die durch das Verfahren geregelten elektrischen Leistungen reine Wirkleistungen oder reine Blindleistungen sind, und/oder wobei die durch das Verfahren geregelten elektrischen Leistungen eine Mitsystemleistung oder eine Gegensystemleistung repräsentieren,
22. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die durch das Verfahren geregelten elektrischen Leistungen im Rahmen des Verfahrens durch elektrische Ströme repräsentiert werden, insbesondere durch Wirkströme oder Blindströme in Mitsystemkomponenten und/oder in Gegensystemkomponenten.
23. Energieversorgungsanlage (11) mit einer Vielzahl von Wechselrichtern (10.X) und einem Anlagenregler (28), der kommunikativ mit den Wechselrichtern (10.X) verbunden ist, wobei die Energieversorgungsanlage (11) dazu eingerichtet ist, mit einem Verfahren gemäß einem der vorangehenden Ansprüche betrieben zu werden.

24. Energieversorgungsanlage (11) nach Anspruch 23, wobei die Regelungen (50.X) der Wechselrichter (10.X) jeweils eine Asymmetrie-Statik (55.X, 57.X) aufweisen und dazu eingerichtet sind, eine individuell einstellbare symmetrische oder asymmetrische Momentanreserveleistung bereitzustellen, wobei die Energieversorgungsanlage (11) dazu eingerichtet ist, am Netzanschluss (26) eine einstellbare symmetrische oder asymmetrische Momentanreserveleistung bereitzustellen.
25. Wechselrichter (10.X) mit einer netzformenden Regelung (50.X), die eine Droop-Regelung (51.X) und eine überlagerte trägheitsgebende Regelung (53.X) zur Veränderung eines Eingangswerts der Droop-Regelung (51.X), insbesondere einer Droop-Kennlinien-Referenzleistung ($P_{SPT,X}$) umfasst, wobei der Wechselrichter (10.X) zur Verwendung in einer Energieversorgungsanlage (11) gemäß Anspruch 23 eingerichtet ist.

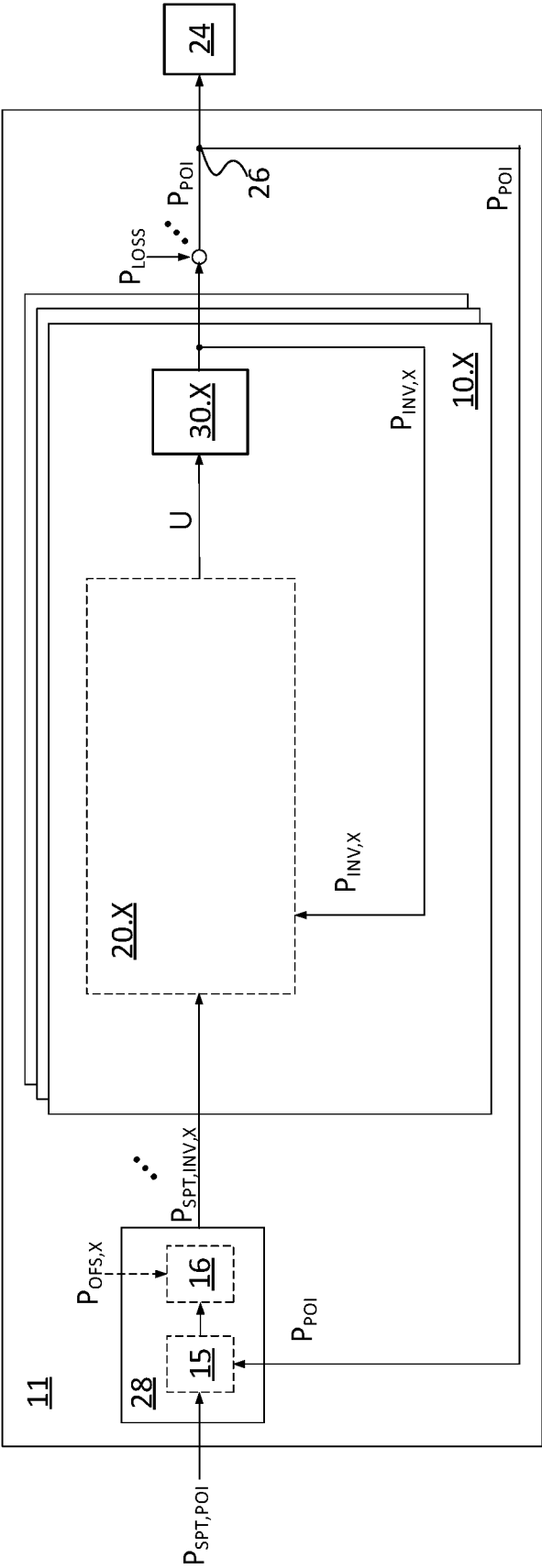


Fig. 1

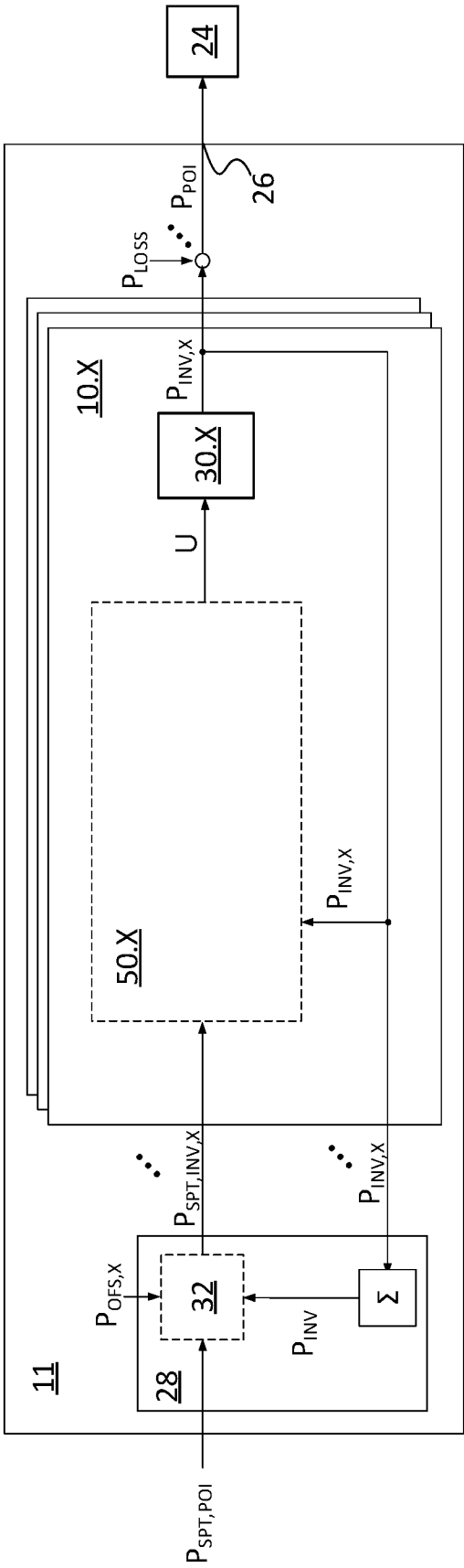


Fig. 2

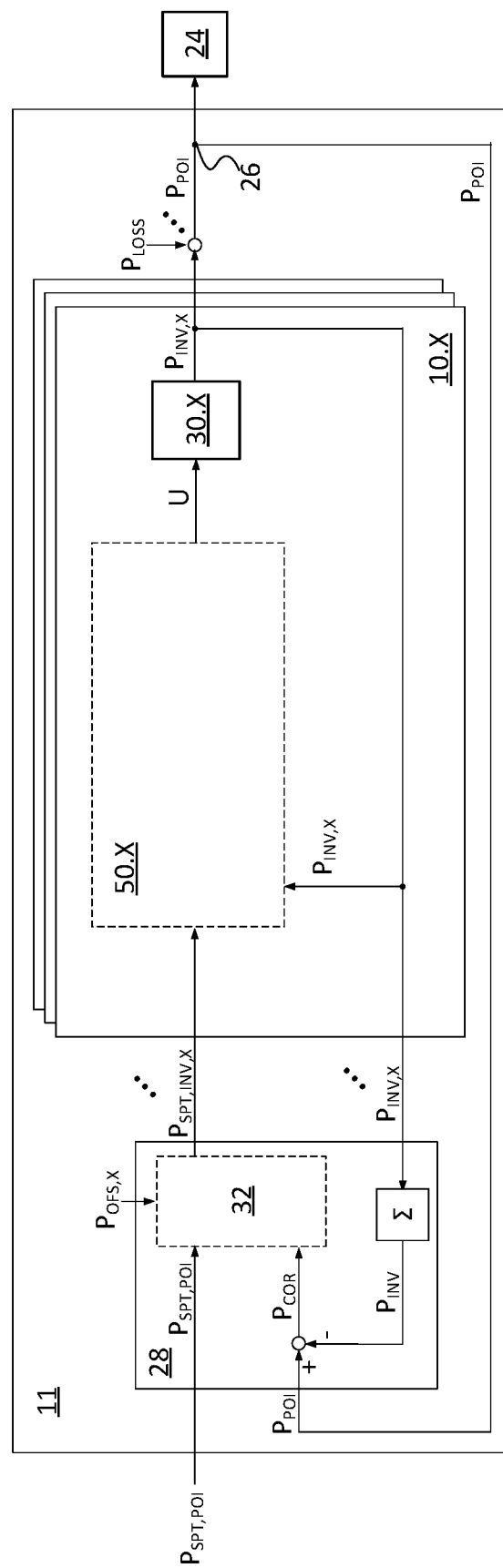


Fig. 3

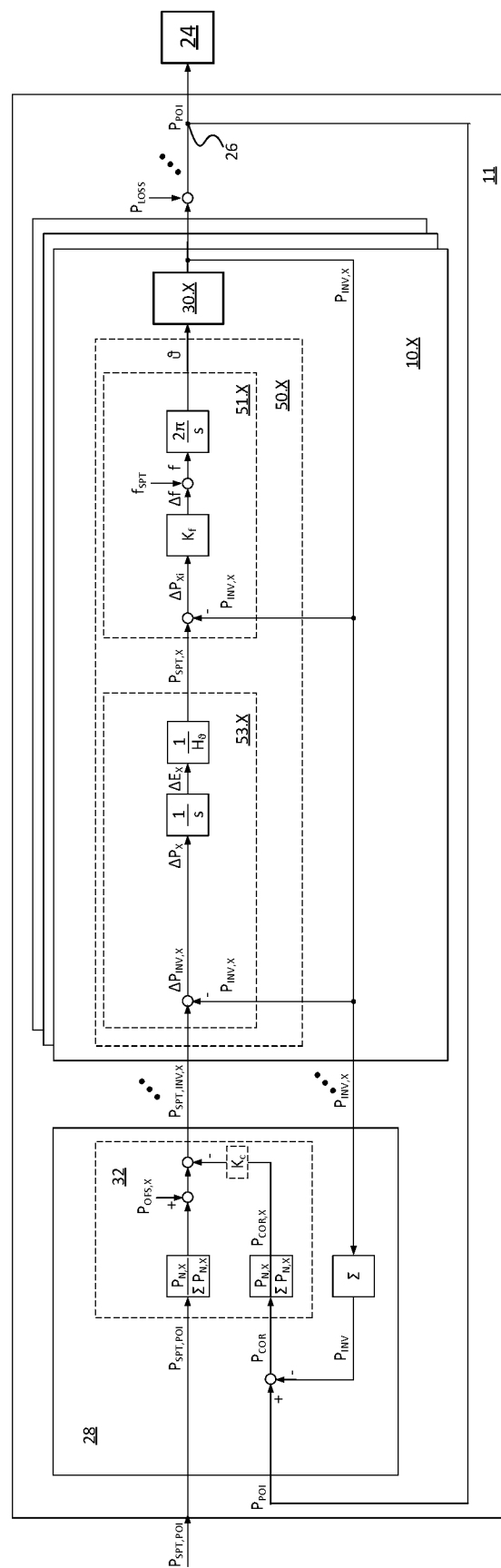


Fig. 4

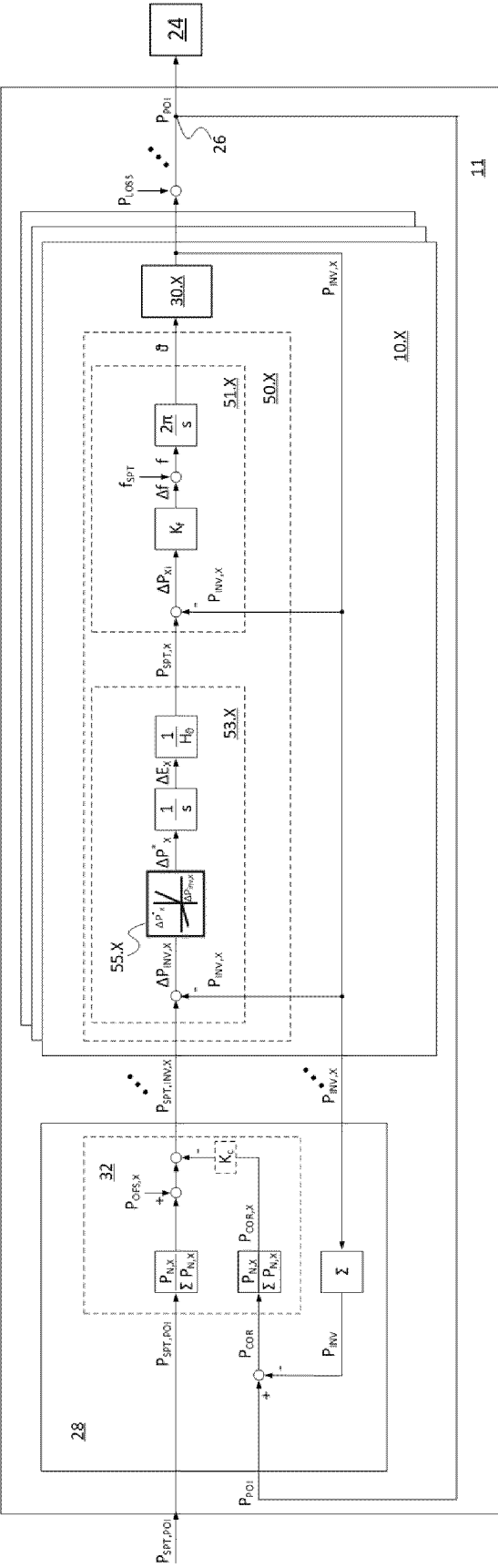


Fig. 5

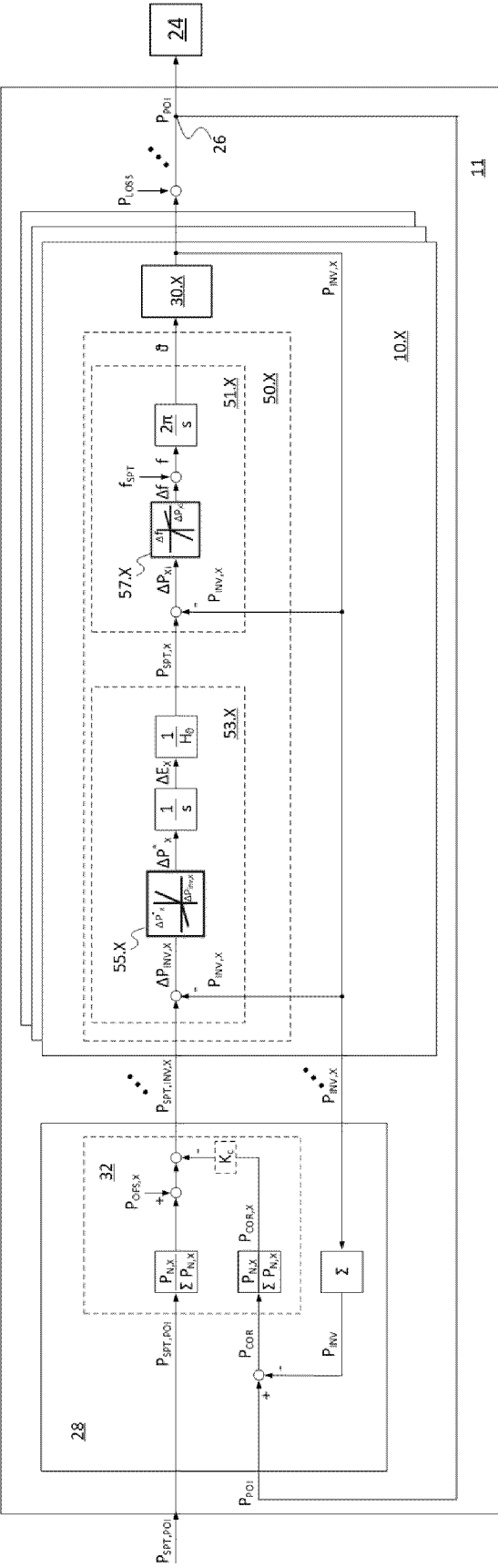


Fig. 6

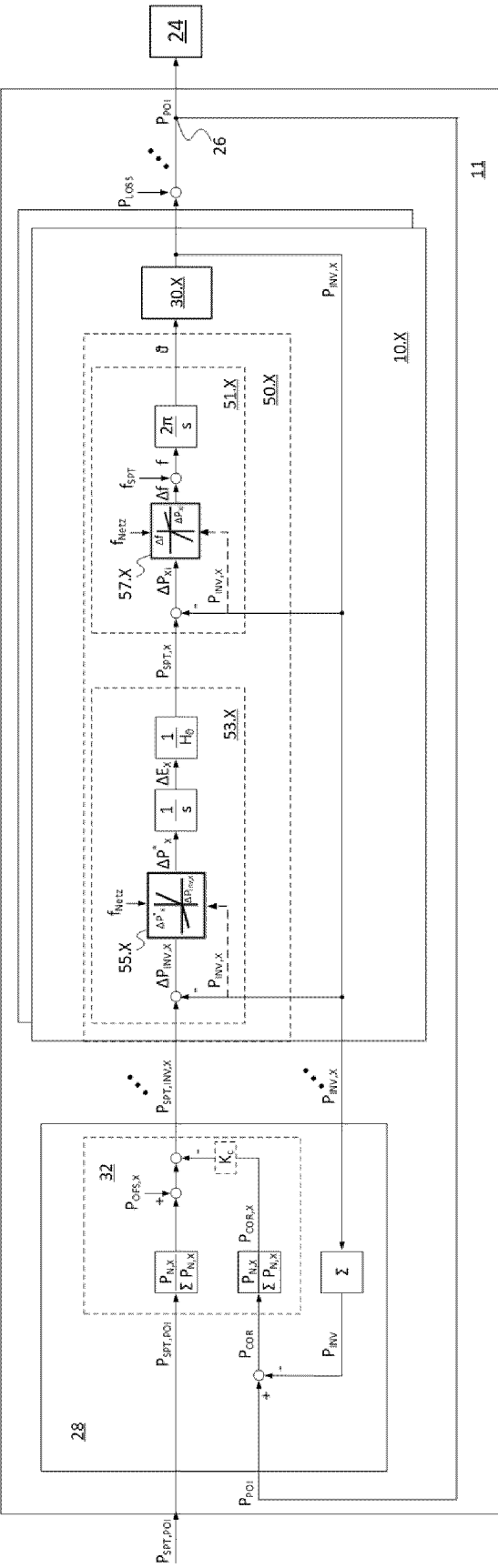


Fig. 7

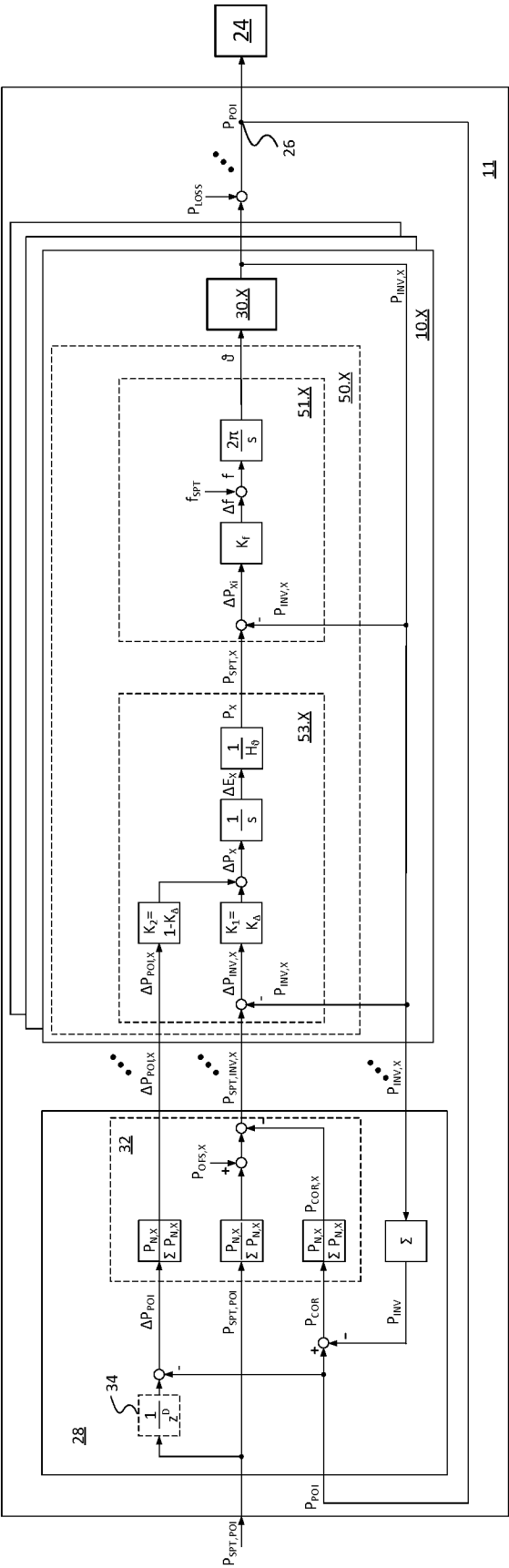


Fig. 8

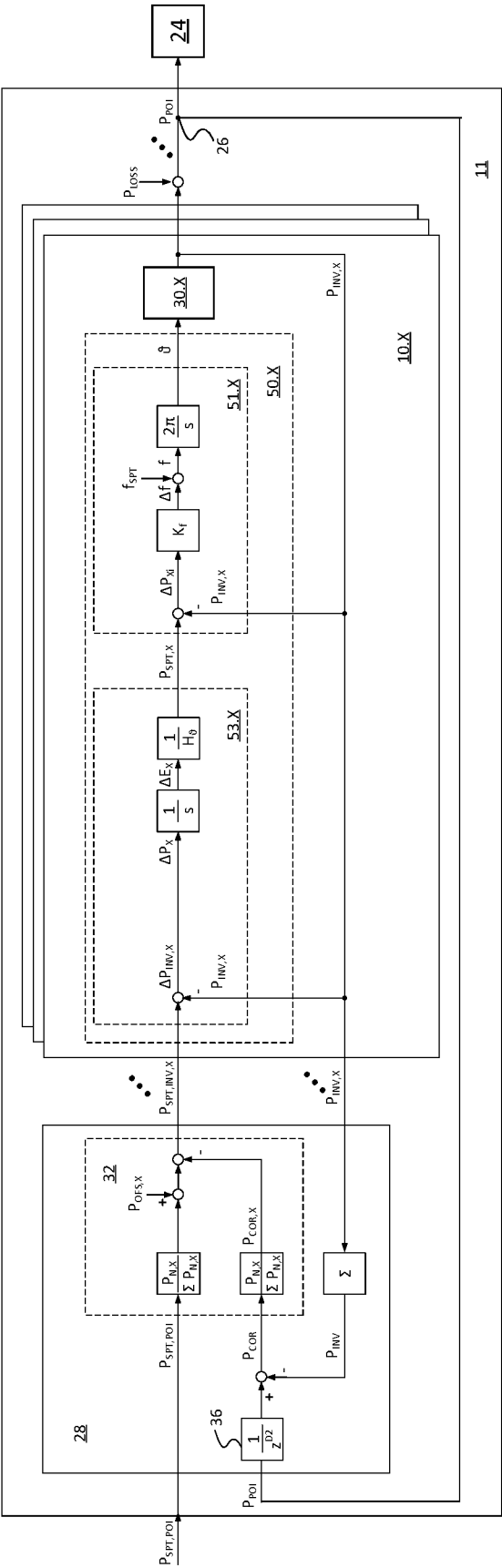


Fig. 9

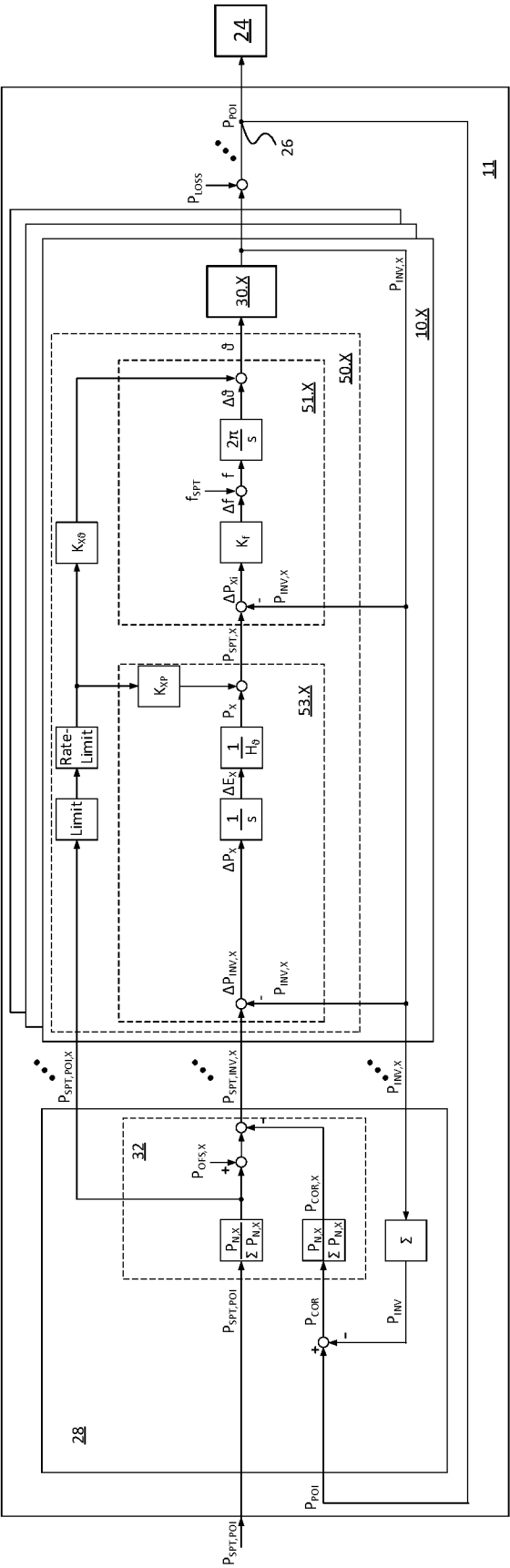


Fig. 10

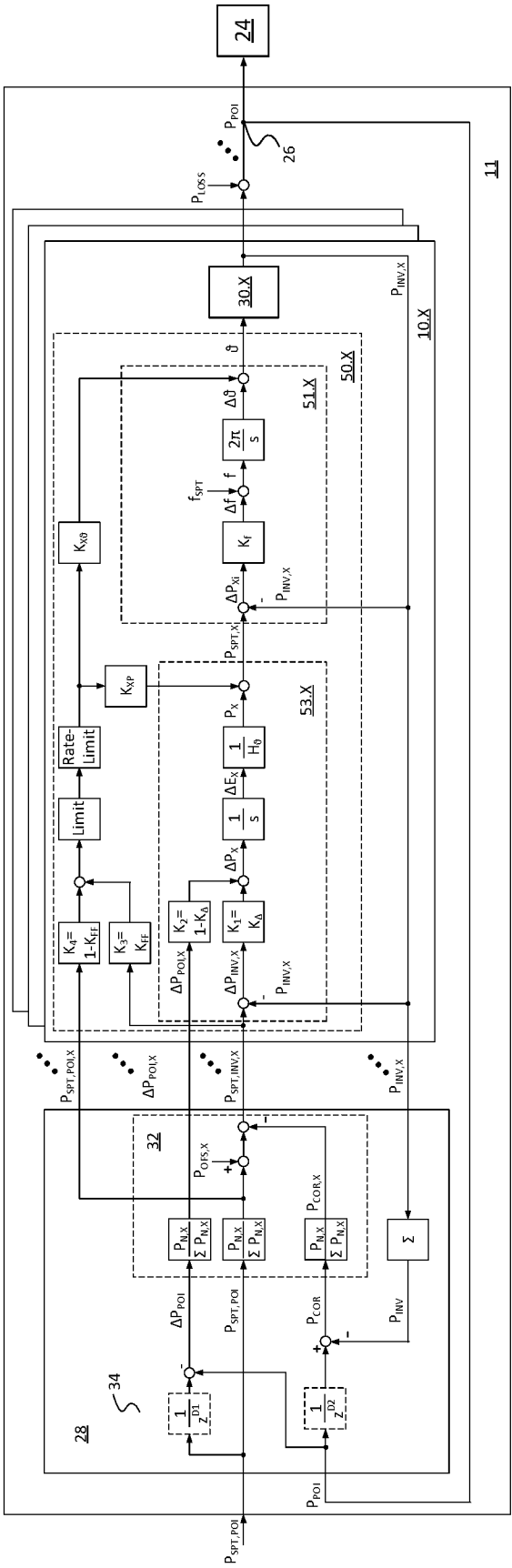


Fig. 11

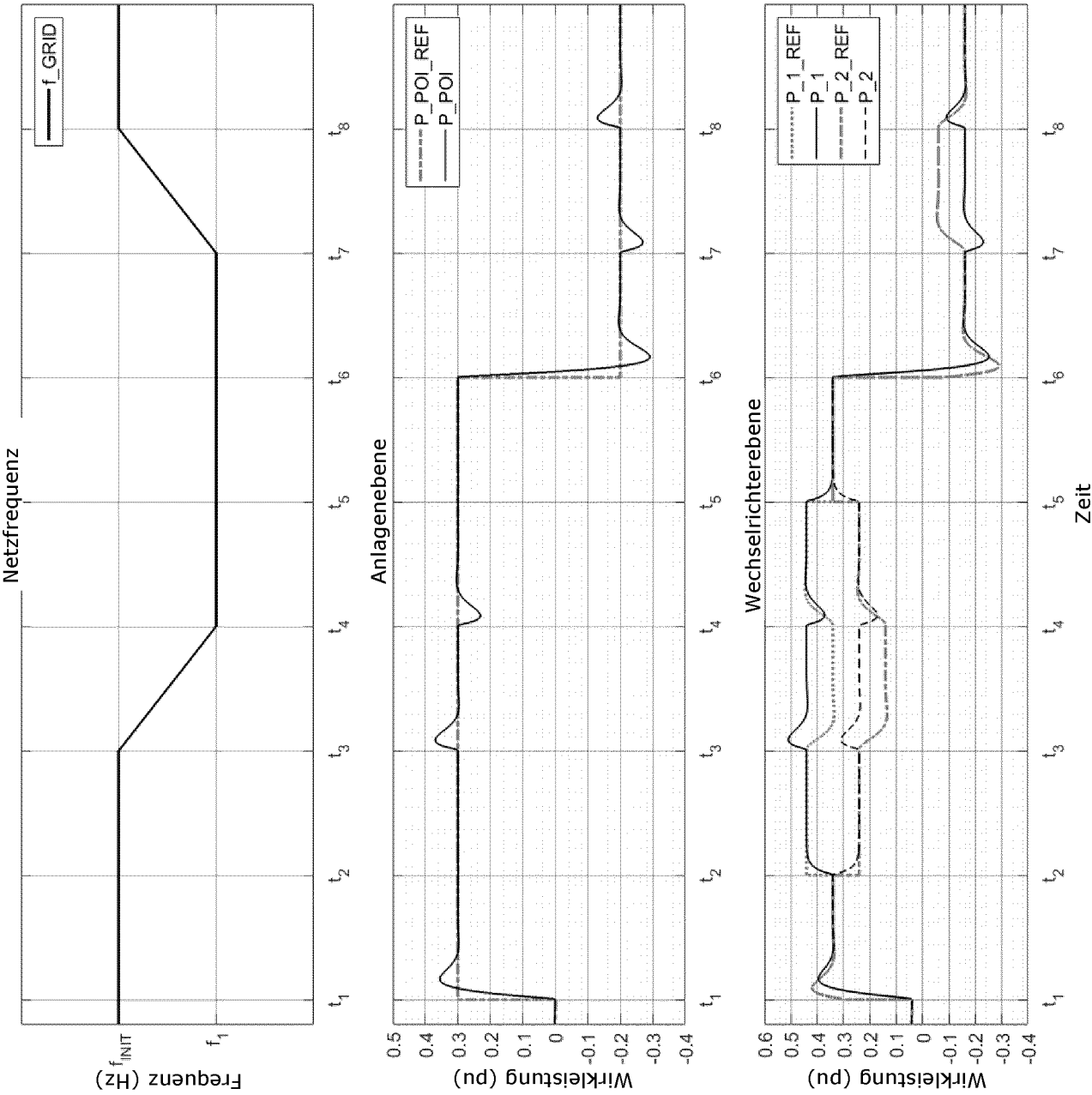


Fig. 12

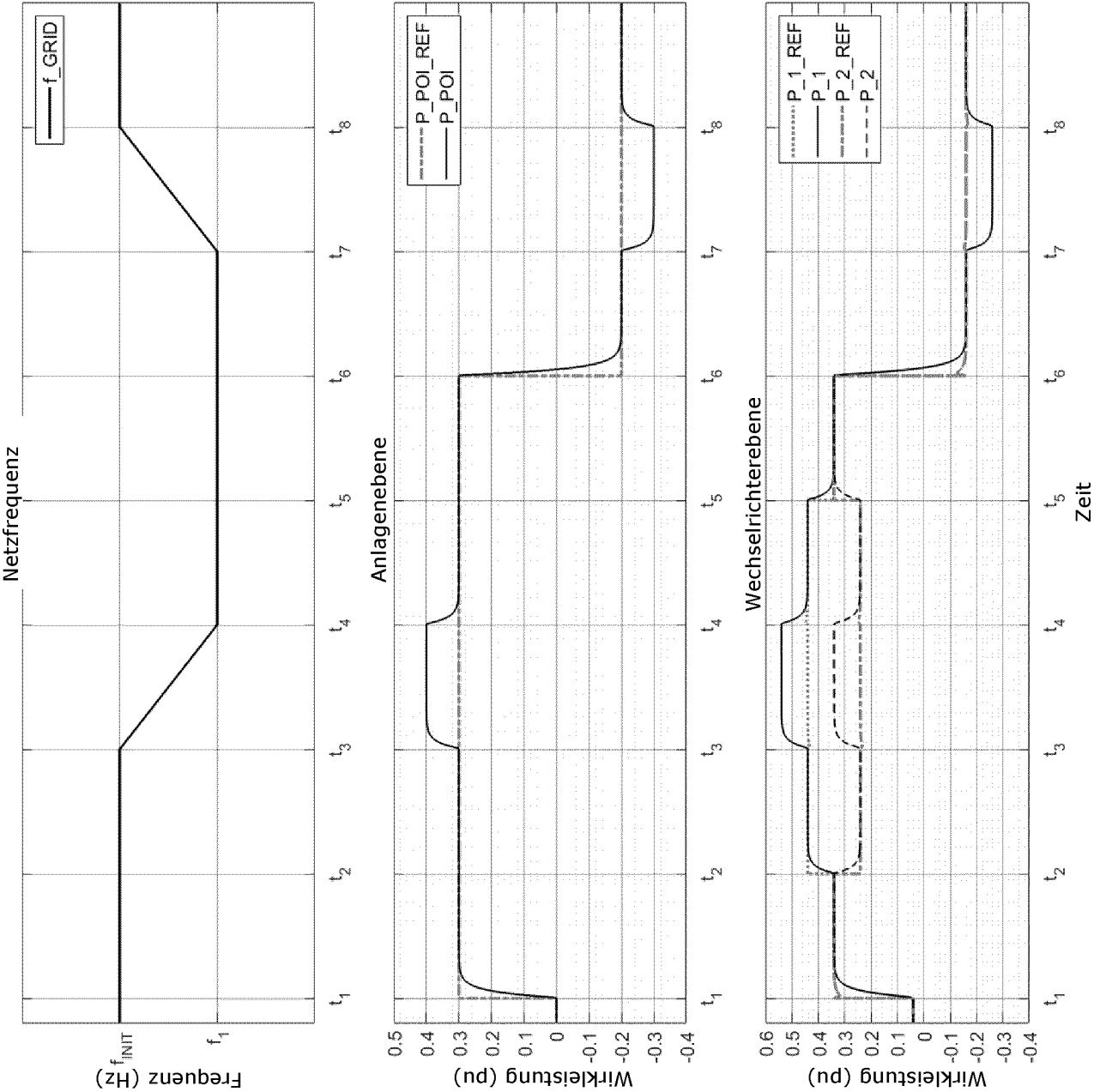


Fig. 13

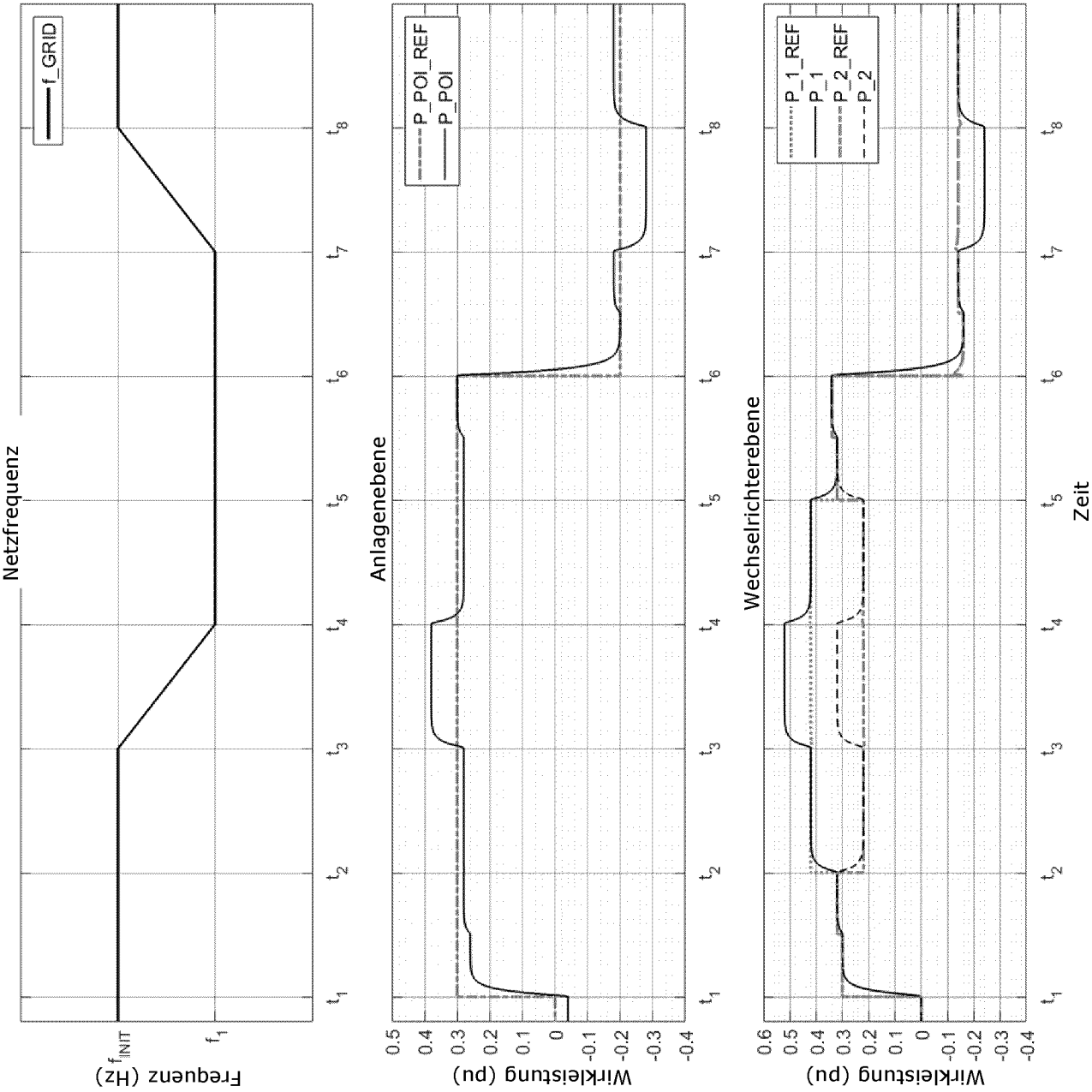


Fig. 14

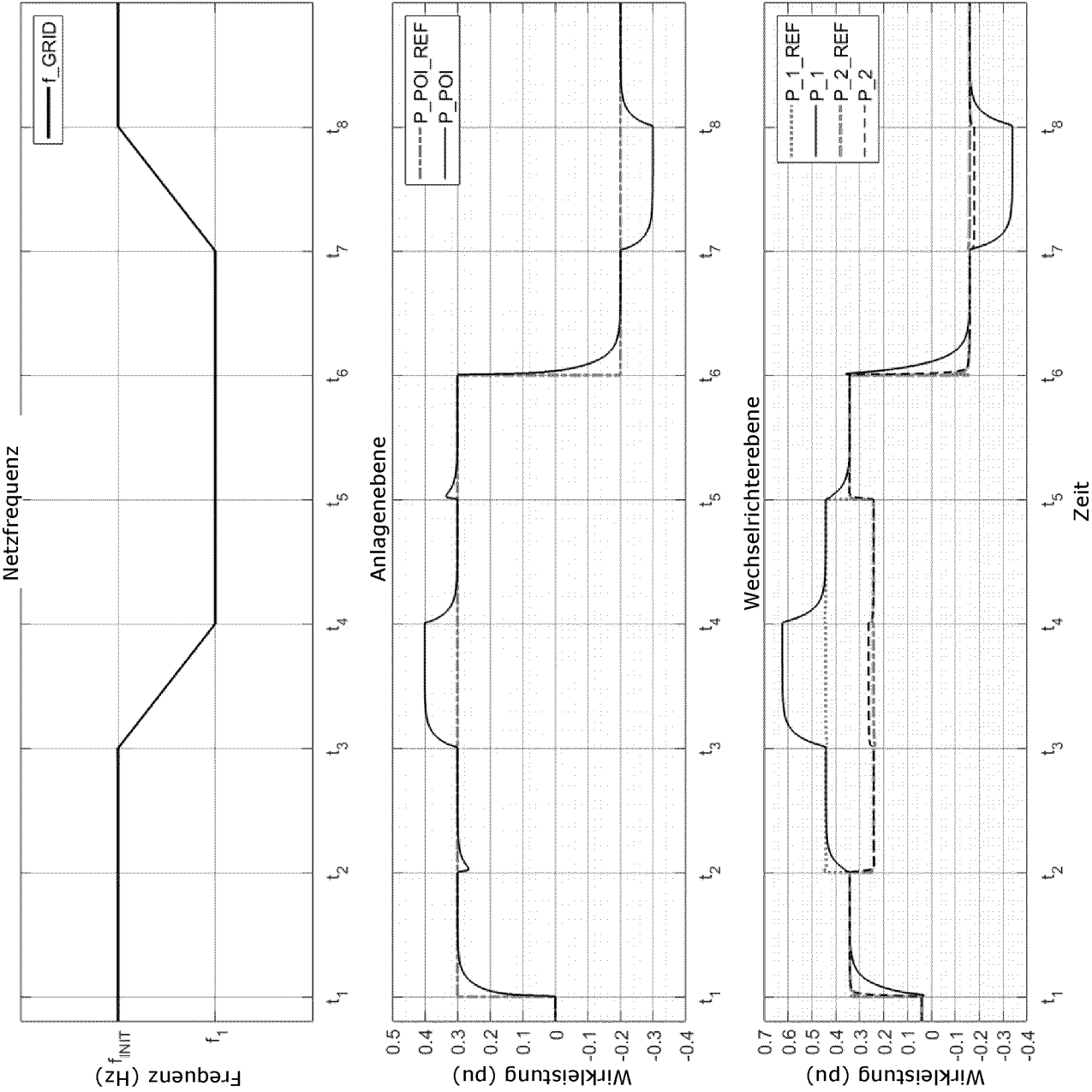


Fig. 15

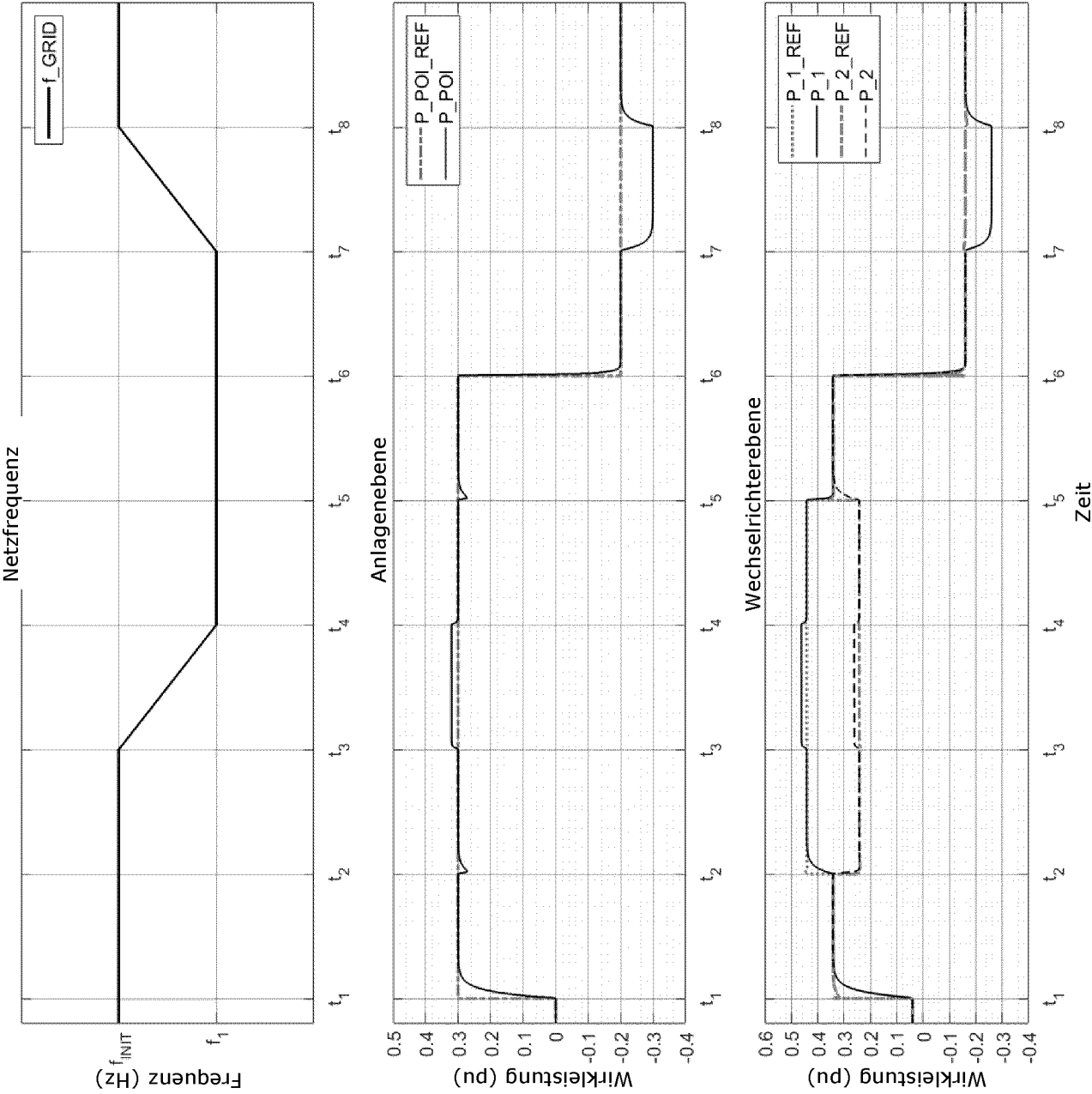


Fig. 16

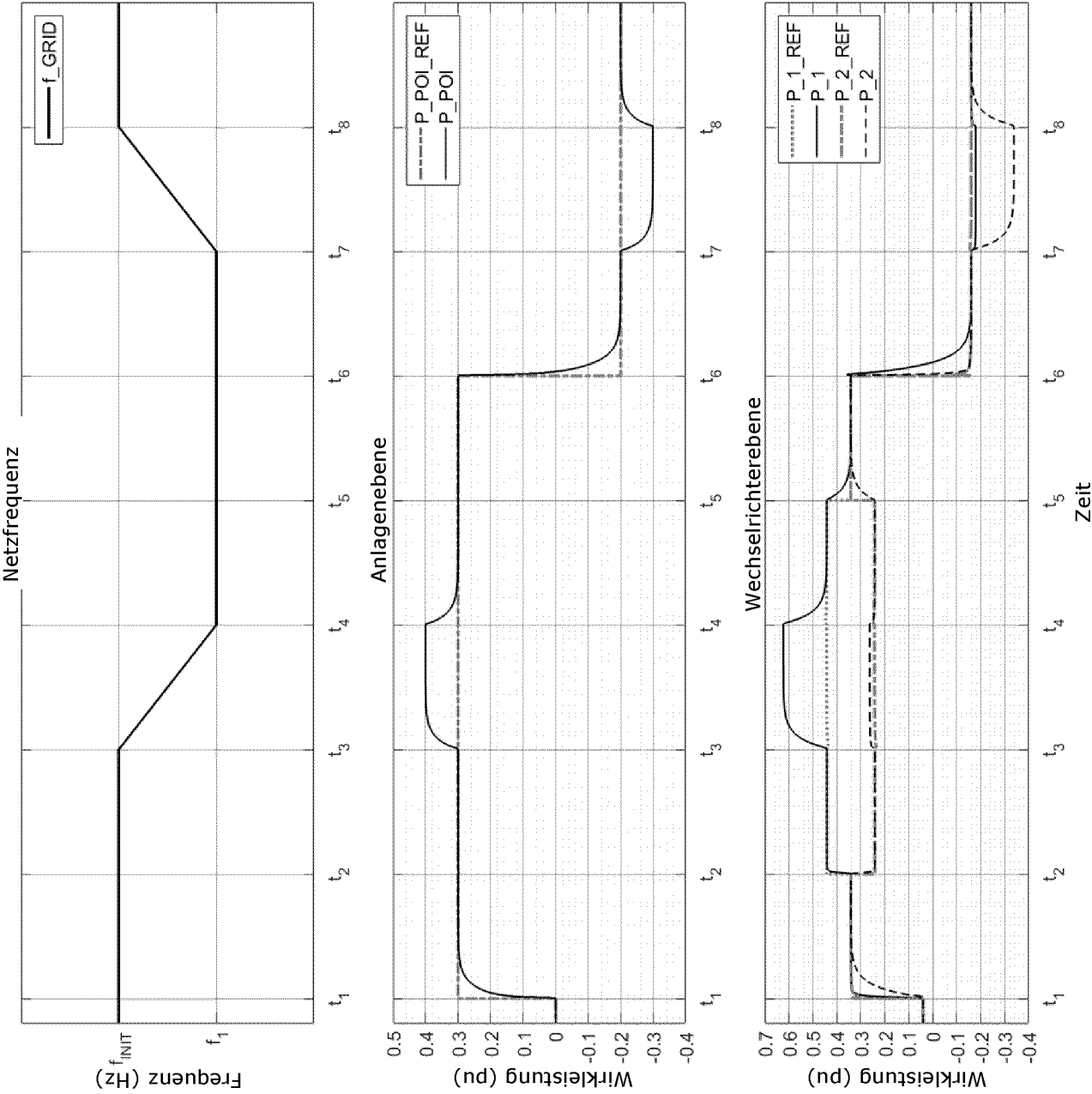


Fig. 17

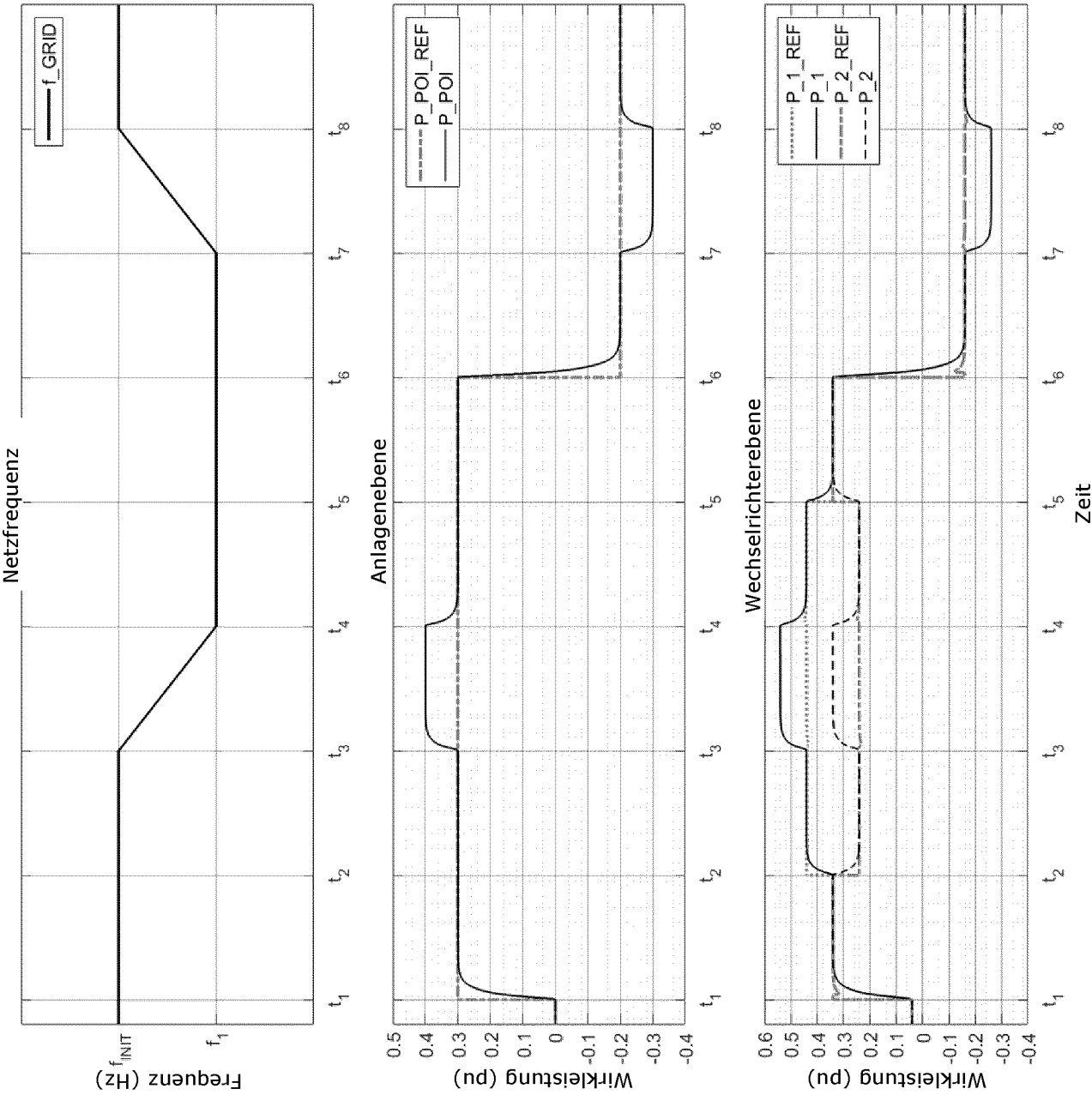


Fig. 18

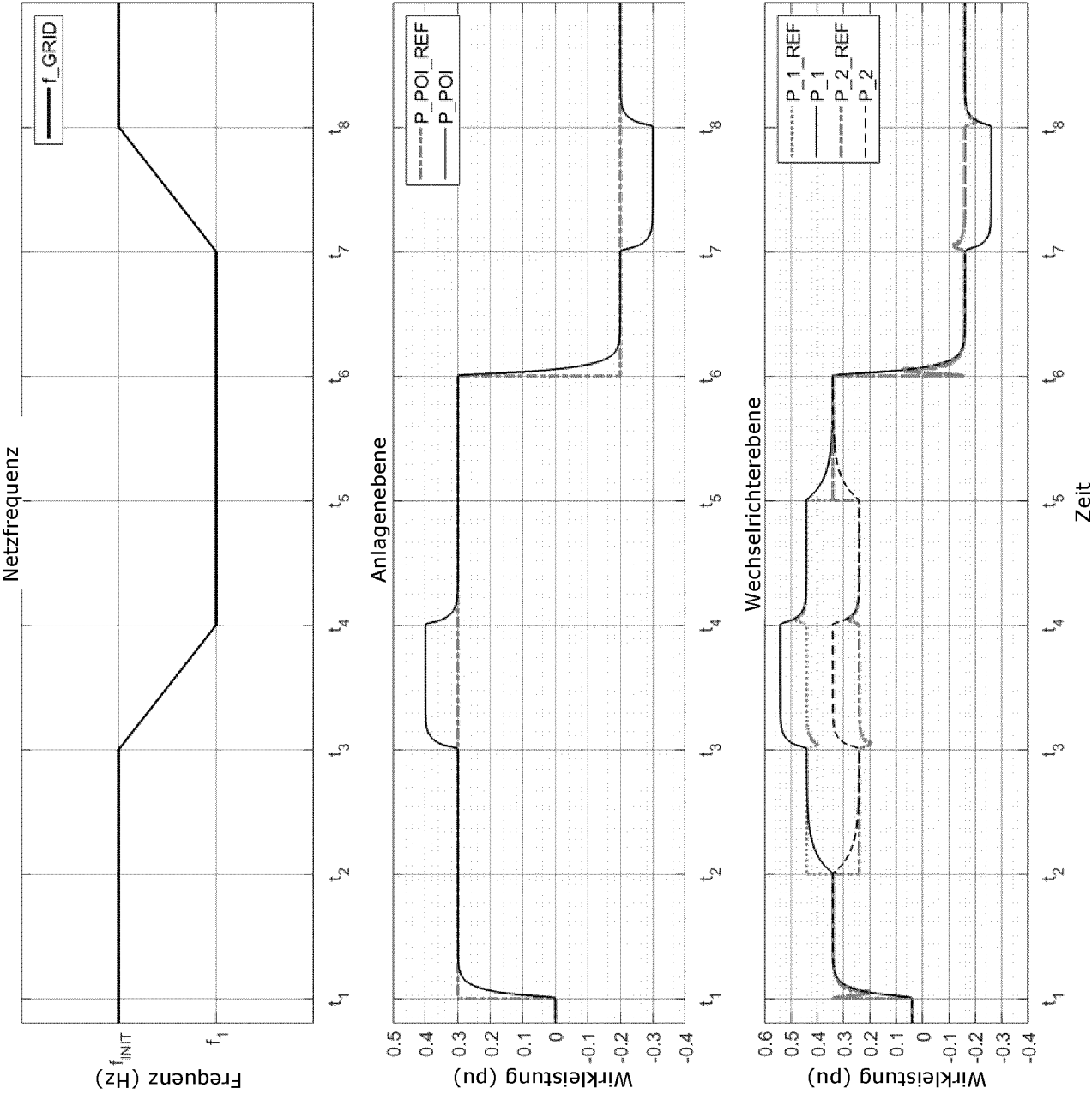


Fig. 19

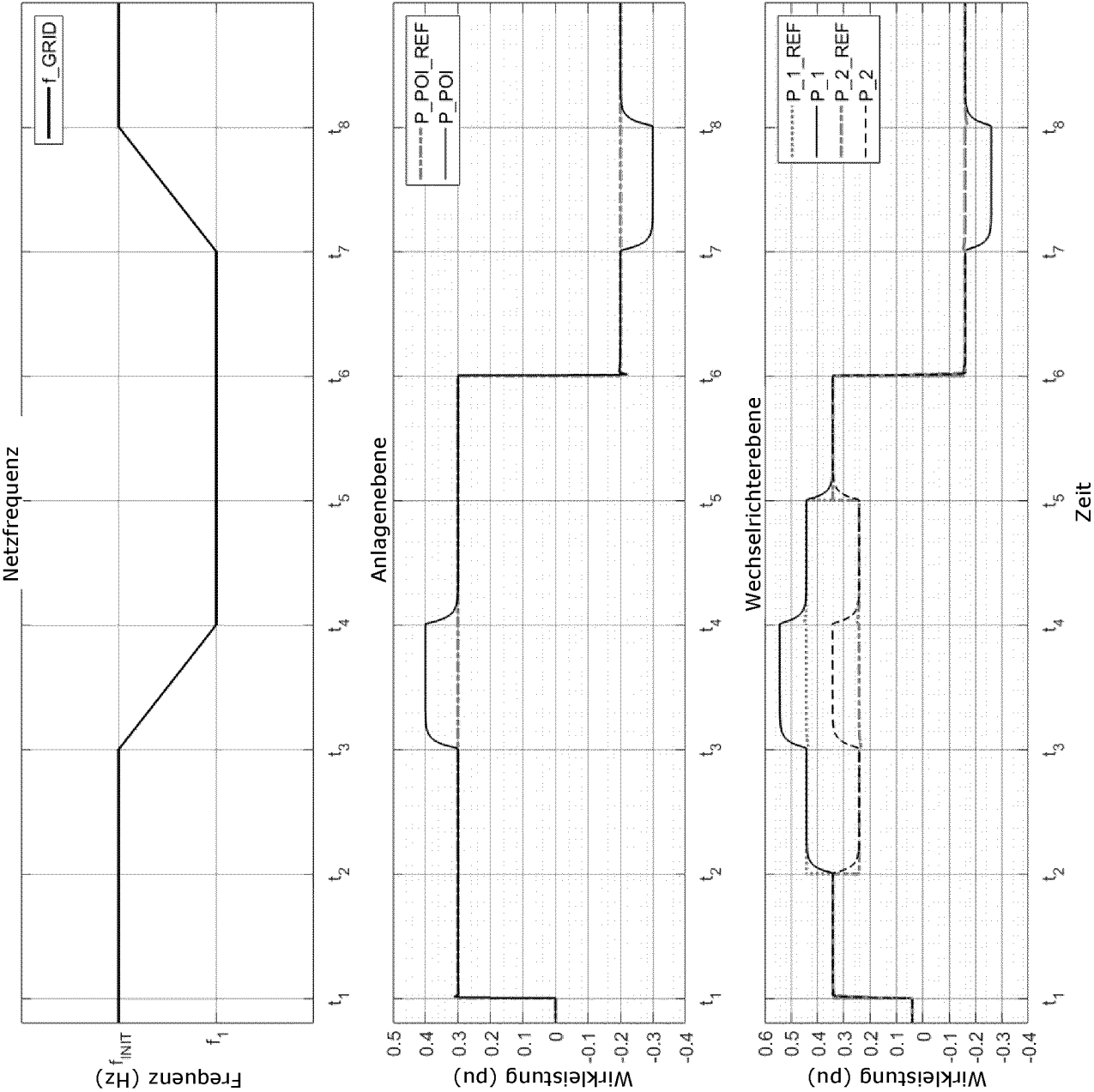


Fig. 20

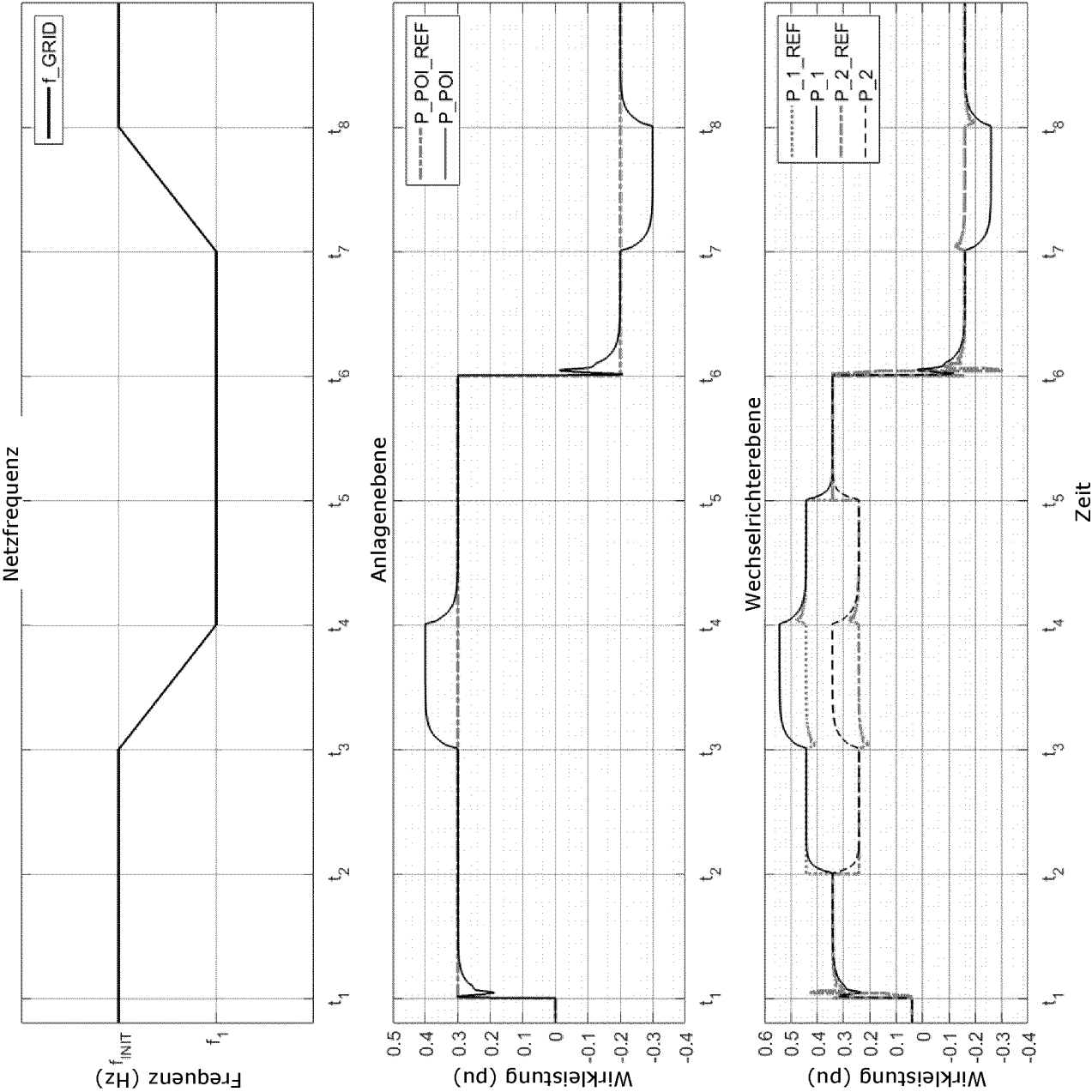


Fig. 21

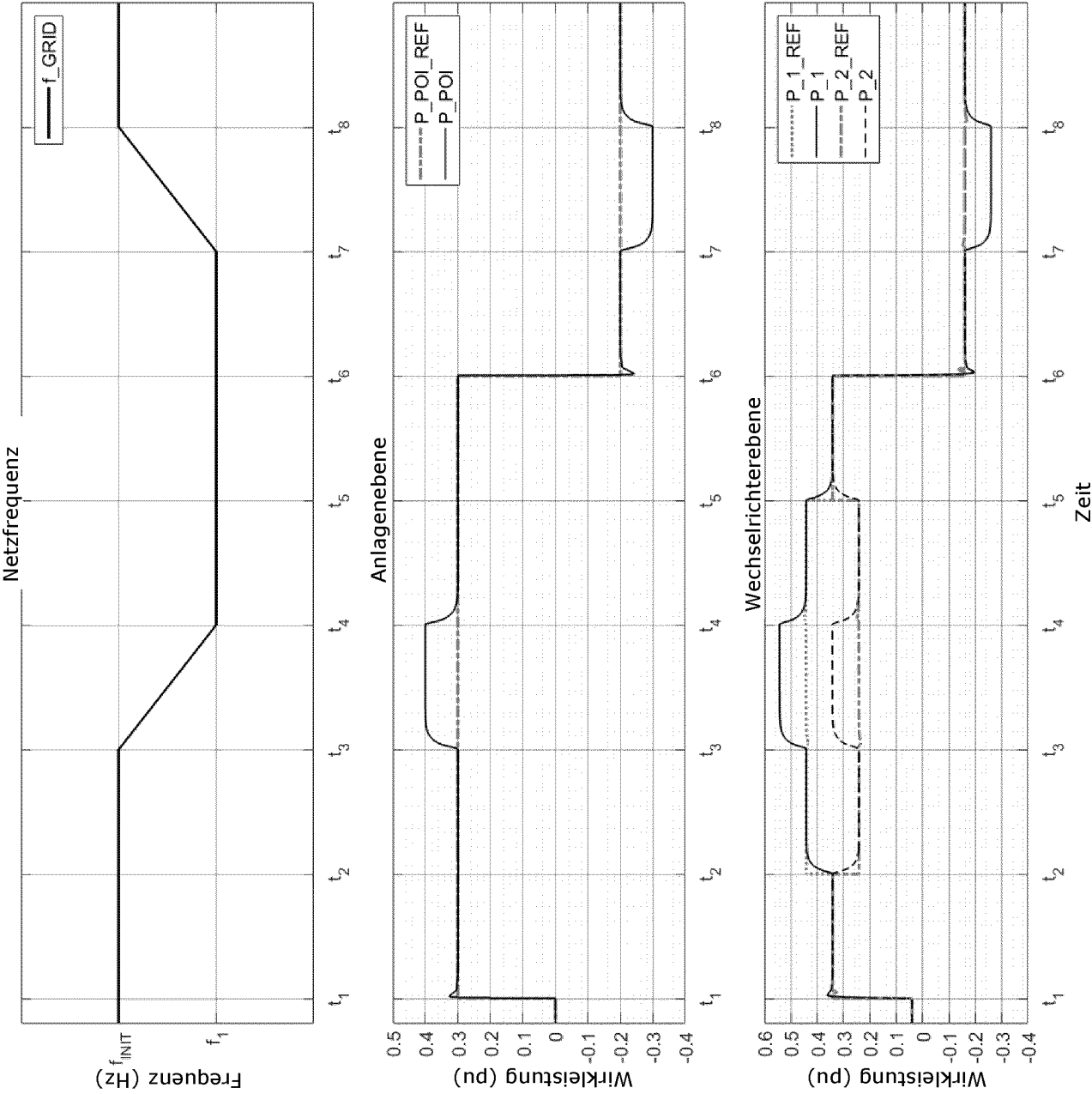


Fig. 22

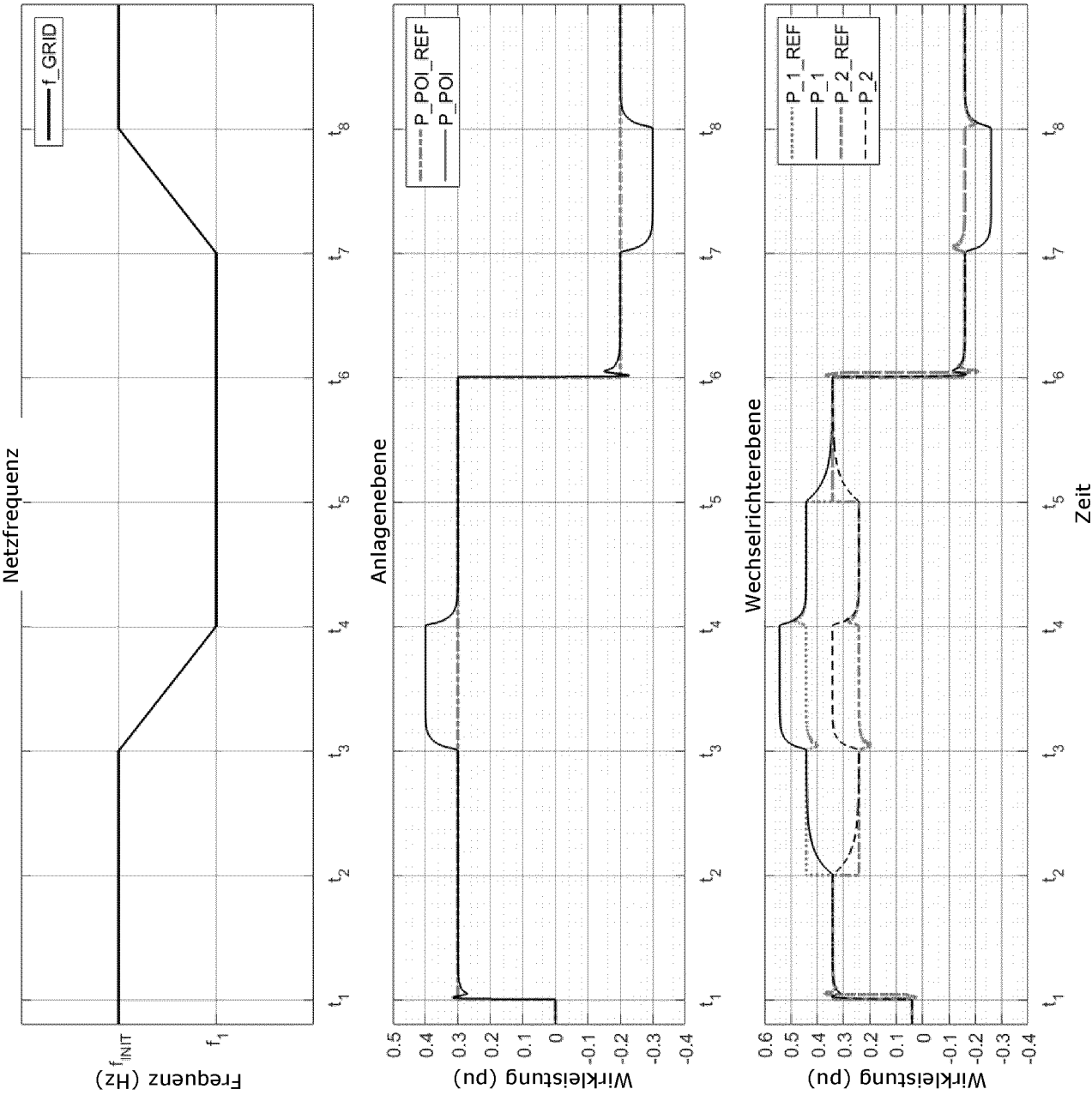


Fig. 23

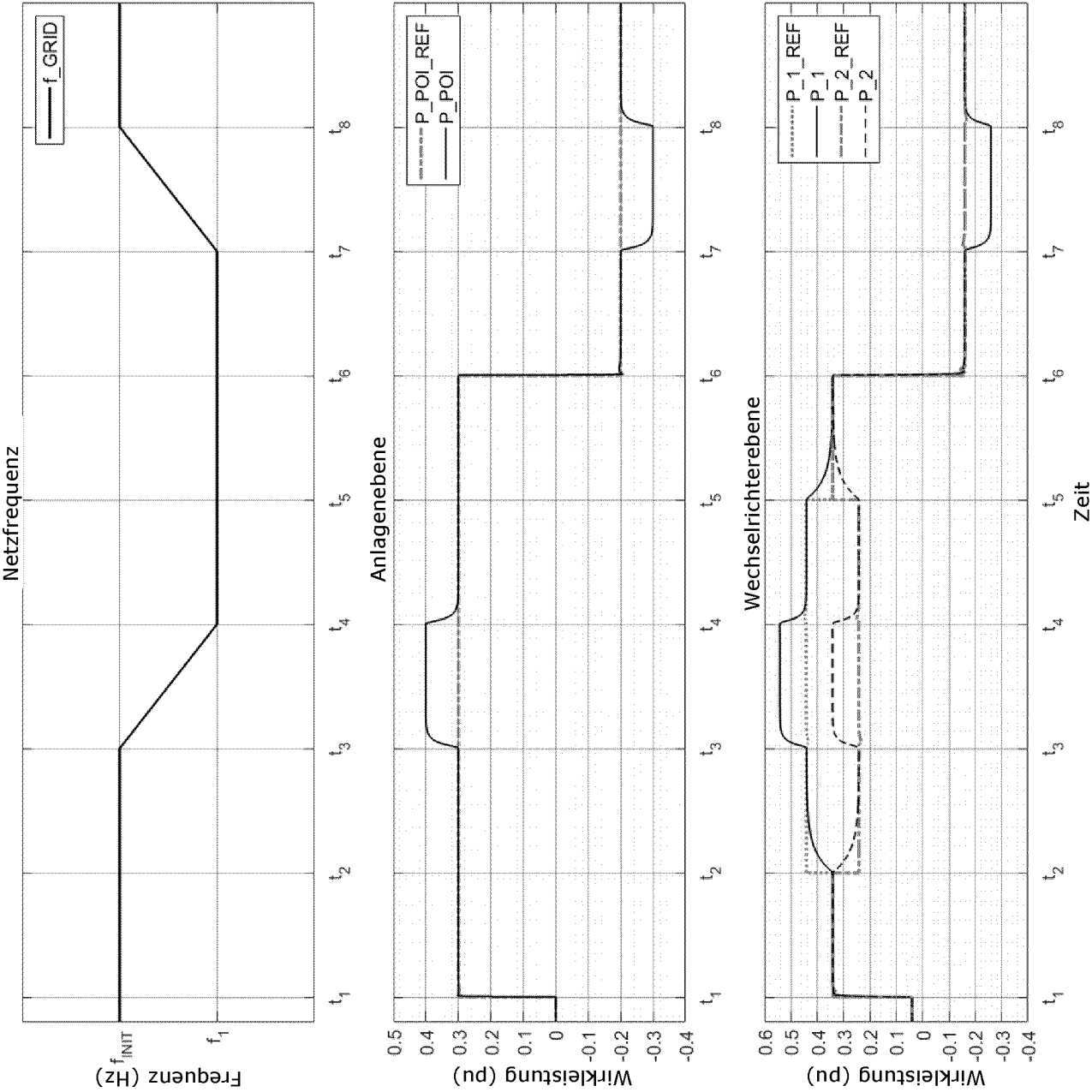


Fig. 24

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/066854

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H02J 3/38 (2006.01)i; H02J 3/48 (2006.01)i; H02M 7/493 (2007.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02J; H02M Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KHADEM S K ET AL. "Parallel operation of inverters and active power filters in distributed generation systemA review" <i>RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, ELSEVIERS SCIENCE, NEW YORK, NY, US</i> , Vol. 15, No. 9, 24 June 2011 (2011-06-24), pages 5155-5168, [retrieved on 2011-08-18] DOI: 10.1016/J.RSER.2011.06.011 ISSN: 1364-0321, XP028120715 figures 10(a),10(b) page 5155	1-25
A	US 9362815 B2 (GURUNATHAN RANGANATHAN [IN] ET AL.) 07 June 2016 (2016-06-07) figures 1,2 abstract column 2, line 25 - column 4, line 35	1-25
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 30 August 2024		Date of mailing of the international search report 17 September 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Zettler, Karl-Rudolf Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/066854

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	9362815	B2	07 June 2016	EP	2633611	A2	04 September 2013
				JP	6086867	B2	08 March 2017
				JP	2014500698	A	09 January 2014
				TW	201244360	A	01 November 2012
				US	2012098336	A1	26 April 2012
				WO	2012061055	A2	10 May 2012

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H02J3/38 H02J3/48 H02M7/493 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H02J H02M		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	KHADEM S K ET AL: "Parallel operation of inverters and active power filters in distributed generation systemA review", RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, ELSEVIERS SCIENCE, NEW YORK, NY, US, Bd. 15, Nr. 9, 24. Juni 2011 (2011-06-24), Seiten 5155-5168, XP028120715, ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/J.RSER.2011.06.011 [gefunden am 2011-08-18] Abbildungen 10 (a) ,10 (b) Seite 5155 -----	1 - 25
A	US 9 362 815 B2 (GURUNATHAN RANGANATHAN [IN] ET AL.) 7. Juni 2016 (2016-06-07) Abbildungen 1,2 Zusammenfassung Spalte 2, Zeile 25 - Spalte 4, Zeile 35 -----	1 - 25
☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 30. August 2024		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 17/09/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Zettler, Karl-Rudolf

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/066854

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 9362815	B2	07-06-2016	EP	2633611 A2	04-09-2013
			JP	6086867 B2	08-03-2017
			JP	2014500698 A	09-01-2014
			TW	201244360 A	01-11-2012
			US	2012098336 A1	26-04-2012
			WO	2012061055 A2	10-05-2012
