

明 細 書

発明の名称：制御装置及び制御方法

技術分野

[0001] 本開示は、電源に設けられるインバータを制御する制御装置及び制御方法に関する。

背景技術

[0002] 電源から負荷に交流電力を供給する電力系統では、出力電圧及び周波数を維持するように制御する。電力系統において、再生可能エネルギー電源からの交流電力の導入量が同期発電機からの交流電力の導入量に比して増加すると、電源のもつ慣性力が低下し、需給バランスが急変した場合に周波数の維持が困難となる。

[0003] これに対して、例えば特許文献1の分散電源の制御装置では、分散電源を系統に連系させるインバータを仮想同期発電機（以降、Virtual Synchronous Generatorの略語としてVSGと記載する）制御により動作させることで、同期発電機が持つ慣性力を分散電源に疑似的に持たせ、系統の周波数変動を抑制している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2019-176584号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら従来の分散電源の制御装置では、系統に接続される機器の仕様、構成、又は動作状況が変化する場合、変化前と同様に周波数変動の抑制効果を発揮できるように、インバータの設定変更作業及び変更後の確認作業が必要であるという課題があった。これは、VSG制御に係る演算処理の入力値であるインバータが出力する有効電力が、接続先の機器の影響を受けて変化するためである。すなわち、接続先の仕様、構成、又は動作状況が変化

した場合、有効電力の変化分を補正するように例えばインバータのゲイン調整などを行う必要があった。

- [0006] 本開示は、上記の課題を解決するためになされたもので、予め定めた基準状態の接続先に対してインバータが出力する有効電力基準値を算出できるように構成し、有効電力基準値と有効電力実測値との差、又は有効電力基準値に基づくVSG制御出力と有効電力実測値に基づくVSG制御出力との差をVSG制御に係る演算処理にフィードバックすることで、接続先の仕様、構成、又は動作状況が変化した場合にも、設計値どおりの周波数変動の抑制効果を発揮するようにインバータを制御できる制御装置及び制御方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0007] 本開示に係る制御装置は、インバータの出力電圧の周波数がインバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、インバータの制御を行う制御装置であって、インバータが接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により周波数偏差を算出する第1仮想同期発電機制御部と、第1仮想同期発電機制御部により算出された周波数偏差を用いて、インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する第1指令値生成部と、予め定めた基準状態の接続先にインバータが供給する有効電力である有効電力基準値と有効電力実測値との差である第1誤差を用いて、第1仮想同期発電機制御部における伝達関数のゲインを決定する第1誤差補正制御部と、を備えるものである。
- [0008] 本開示に係る制御装置の別の実施形態は、インバータが接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第1の周波数偏差を算出する第1仮想同期発電機制御部と、第1仮想同期発電機制御部により算出された第1の周波数偏差を用いて、インバータの出力電圧の周波数指令値として第1周波数指令値を生成する第1指令値生成部と、予め定めた基準状態の接続先にインバータが供給する有効電力である有効電力基準値を用いて、伝達関数により第2の周波数偏差を算出する第

2 仮想同期発電機制御部と、第 1 仮想同期発電機制御部が算出した第 1 の周波数偏差と、第 2 仮想同期発電機制御部が算出した第 2 の周波数偏差との差である第 2 誤差を、第 1 仮想同期発電機制御部にフィードバックする第 2 誤差補正制御部と、を備えるものである。

[0009] 本開示に係る制御方法は、インバータの出力電圧の周波数がインバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、インバータの制御を行う制御方法であって、インバータが接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により周波数偏差を算出する工程と、周波数偏差を用いて、インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する工程と、予め定めた基準状態の接続先にインバータが供給する有効電力である有効電力基準値と有効電力実測値との差である第 1 誤差を用いて、伝達関数のゲインを決定する工程と、を備えるものである。

[0010] 本開示に係る制御方法の別の実施形態は、インバータが接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第 1 の周波数偏差を算出する工程と、第 1 の周波数偏差を用いて、インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する工程と、予め定めた基準状態の接続先にインバータが供給する有効電力である有効電力基準値を用いて、伝達関数により第 2 の周波数偏差を算出する工程と、第 1 の周波数偏差と第 2 の周波数偏差との差である第 2 誤差を、第 1 の周波数偏差を算出する工程にフィードバックする工程と、を備えるものである。

発明の効果

[0011] 本開示によれば、インバータの接続先の仕様、構成、又は動作状況が変化した場合にも、設計値どおりの周波数変動の抑制効果を発揮するようにインバータを制御する制御装置及び制御方法を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]実施の形態 1 におけるマイクログリッドの構成例を示す図

[図2]実施の形態 1 における制御装置及び制御対象であるインバータを含む制

御系を示すブロック図

[図3]実施の形態1における制御装置が行う制御処理を示すフローチャート

[図4]実施の形態1における制御対象であるインバータと接続先との関係を示す図

[図5]実施の形態1における制御装置を実現するP L Cのハードウェア構成を示すブロック図

[図6]実施の形態2における制御装置及び制御対象であるインバータを含む制御系を示すブロック図

[図7]実施の形態2における制御装置が行う制御処理を示すフローチャート

発明を実施するための形態

[0013] 実施の形態1.

実施の形態1について図1を用いて詳細に説明する。図1は、実施の形態1におけるマイクログリッド1の構成例を示す図である。図1において、マイクログリッド1は、独立して電力を生成及び消費する自立電力系統であり、発電設備11、負荷12、蓄電池13、電力変換装置14、及びトランスデューサ15を有し、これらが送配電網21により接続されている。このうち、電力変換装置14の動作、すなわち、発電設備11の発電電力量を蓄電池13へ供給する動作及び蓄電池13の充電電力量を負荷12へ供給する動作は、統合コントローラ31により制御される。

[0014] 発電設備11は、例えば風力発電、太陽光発電、水力発電などの出力制御が困難な再生可能エネルギー電源であるとともに、その発電電力量を計測する電力量計及び電力量の計測値を送信する通信装置を有する。

[0015] 負荷12は、電力を消費する機器であるとともに、その消費電力量を計測する電力量計及び電力量の計測値を送信する通信装置を有する。

[0016] 蓄電池13は、例えば鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、ナトリウム硫黄電池、レドックスフロー電池などの二次電池であるとともに、SOC (State Of Charge) を送信し、充放電に関する制御指令を受信するための通信装置を有する。

[0017] 電力変換装置 14 は、制御装置 41、インバータ 42、及び通信装置（図示せず）を有する。電力変換装置 14 において、インバータ 42 は、蓄電池 13 が放電を行う場合、蓄電池 13 が送配電網 21 へ出力する直流電圧を交流電圧に変換し、蓄電池 13 が充電を行う場合、蓄電池 13 が送配電網 21 から受電する交流電圧を直流電圧に変換する交直流を相互に変換可能なインバータである。制御装置 41 は、インバータ 42 が行う上記の交直流の相互変換を制御するとともに、インバータ 42 の出力電圧の周波数がインバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、インバータ 42 を制御する。通信装置は、統合コントローラ 31 から送信される出力指令値を受信する。電力変換装置 14 は、統合コントローラ 31 から送信される出力指令値に基づいて、蓄電池 13 を電圧源として作用させ、GFM（Grid forming）インバータとして機能する。

[0018] トランスデューサ 15 は、電力変換装置 14 のインバータ 42 が実際に出力した有効電力である有効電力実測値 P_{measure} を計測する。トランスデューサ 15 は、例えば同軸ケーブルなどの信号線により制御装置 41 と接続され、計測した有効電力実測値 P_{measure} を制御装置 41 へ信号線を介して出力する。

[0019] 統合コントローラ 31 は、発電設備 11、負荷 12、蓄電池 13、及び電力変換装置 14 と接続され、各機器に備わる通信装置から送信される例えば発電電力量や消費電力量などの電力需給に関する情報に基づいて、蓄電池 13 及び電力変換装置 14 を制御する。

詳細には、発電設備 11 の発電電力量に対して負荷 12 の消費電力量が小さい場合、統合コントローラ 31 は、発電設備 11 が供給する交流電圧を直流電圧に変換するように電力変換装置 14 を制御し、電力変換装置 14 が直流に変換した発電設備 11 の発電電力量により蓄電池 13 を充電させる。他方、発電設備 11 の発電電力量に対して負荷 12 の消費電力量が大きい場合、統合コントローラ 31 は、発電設備 11 の発電電力量と負荷 12 の消費電力量との差分を埋めるように SOC の許す範囲で蓄電池 13 を放電させ、蓄

電池 13 が供給する直流電圧を交流電圧に変換するように電力変換装置 14 を制御する。

統合コントローラ 31 は、蓄電池 13 及び電力変換装置 14 を放電側に制御する場合、電力変換装置 14 の出力指令値として有効電力指令値 P_{ref} を電力変換装置 14 へ出力する。

[0020] ここで、上記の有効電力実測値 $P_{measure}$ 、有効電力指令値 P_{ref} 、及び以降に記載する有効電力は、特に断りのない限り PU 法 (PU: Per Unit) による値であり、その単位は W でなく pu である。例えば、有効電力は、インバータ 42 の定格出力で除算されて PU 法で表される。

[0021] ここで、統合コントローラ 31 は、例えば CPU (Central Processing Unit) などの演算装置、例えば RAM (Random Access Memory) などのメモリ及び HDD (Hard Disc Drive) などのストレージである記憶装置、通信装置、及びこれらを接続するシステムバスを有するコンピュータシステムにより実現される。具体的には、記憶装置が上述の制御処理を表現したプログラムを記憶し、演算装置が記憶装置に記憶された上記のプログラムを実行し、通信装置が発電設備 11、負荷 12、蓄電池 13、及び電力変換装置 14 との通信を行う。また、統合コントローラ 31 は、単一のコンピュータシステムに限られず、複数のコンピュータシステムやクラウドシステムにより実現されてもよい。

[0022] 次に、制御装置 41 の構成及び動作について図 2 及び図 3 を用いて詳細に説明する。図 2 は、実施の形態 1 における制御装置 41 及び制御対象であるインバータ 42 を含む制御系を示すブロック図、図 3 は、実施の形態 1 における制御装置 41 が行う制御処理を示すフローチャートである。

制御装置 41 は、減算器 111、第 1 仮想同期発電機制御部 101 (以降、第 1 VSG 制御部 101 と記載する)、第 1 ガバナ制御部 113、第 1 指令値生成部 102、ZOH 回路 116 (ZOH: Zero Order Hold)、基準出力算出部 117、減算器 118、及び第 1 誤差補正制御部

103を備える。制御装置41は、統合コントローラ31から送信された有効電力指令値 P_{ref} に基づいて、インバータ42の出力電圧の周波数を制御する。以降、制御装置41の各機能ブロックの動作を説明する。

[0023] 減算器111は、統合コントローラ31から受信した有効電力指令値 P_{ref} から、第1ガバナ制御部113の出力値を減算し、その値を第1VSG制御部101へ出力する。ここで、第1ガバナ制御部113は、同期発電機における回転数を一定に保つためのガバナ（調速器）を模擬した演算を行う機能ブロックであり、その動作については後述する。

[0024] 第1VSG制御部101は、減算器121、乗算器122、及び一次遅れ回路123を有する。第1VSG制御部101は、インバータ42の出力電圧に同期発電機における回転子の慣性モーメントに起因する慣性力を疑似的に持たせることで、電力系統を安定化させるVSG制御を行う。電力系統の安定化とは、交流電源に加わる負荷が増加した場合に電源の出力電圧の周波数が低下し、負荷が低下した場合に出力電圧の周波数が増加するP-f垂下特性において、周波数変動を緩やかに導くことを指す。同期発電機を例にすると、例えば質量が大きく慣性力が強く作用する回転子では、負荷変動が回転子の回転数に与える影響は小さい。同期発電機の回転子の回転数と出力電圧の周波数とは同期しているため、慣性モーメントの大きい回転子の場合、負荷増加に対する出力電圧の周波数の変動が緩やかとなる。VSG制御では、このような回転子の慣性力を模擬することで、負荷変動に相当する有効電力の変動に対して、出力電圧の周波数の変動を緩やかにして電力系統を安定化させる。

[0025] 図3に示すステップS11において、第1VSG制御部101は、有効電力実測値 $P_{measure}$ を用いて周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を算出する。

詳細には、第1VSG制御部101において、減算器121は、ZOH回路116によりゼロ次ホールドされた有効電力実測値 $P_{measure}$ を示す信号値を、減算器111の出力値から減算することで有効電力偏差 ΔP_1 を算出する。さらに減算器121は、算出した有効電力偏差 ΔP_1 を乗算器122へ出

力する。ここで、ゼロ次ホールドは、ある信号値を次のサンプリング時点まで一定値に保持することを指す。

[0026] 第1 V S G制御部101において、乗算器122は、有効電力偏差 ΔP_1 にゲイン $(1/D)$ を乗算し、一次遅れ回路123へ出力する。続いて、一次遅れ回路123は、慣性定数 M 及び制動定数 D により構成される伝達関数 $\{1/(1+sM/D)\}$ を乗算器122の出力値に乗算して周波数偏差 $\Delta \omega_1$ を算出し、第1 ガバナ制御部113及び第1 指令値生成部102へ出力する。ここで、 s は伝達関数におけるラプラス演算子である。

[0027] ここで、第1 V S G制御部101が入力値に対して作用させる伝達関数について説明する。上述したとおり、第1 V S G制御部101は、同期発電機における回転子の慣性モーメントに起因する慣性力を模擬した制御を行う。この制御は式(1-1)で表される同期発電機における回転子の動揺方程式に基づくものである。ここで、式(1-1)は、P U法で表現したもので、 M は回転子の慣性定数(単位は s)、 D は制動定数(単位なし)、 ω は回転子の回転速度(単位は $p u$)である。

[0028] [数1]

$$\Delta P(t) = M \frac{d}{dt} \omega(t) + D\{\omega(t) - 1\} \quad (1-1)$$

[0029] 式(1-1)について、式(1-2)を用いて式変形の後、ラプラス変換を行って ΔP から $\Delta \omega$ への伝達関数を求めると、式(1-3)のようになる。図2の記載に照らすと、第1 V S G制御部101が入力値に対して作用させる伝達関数が、式(1-3)で表される伝達関数に対応していることがわかる。また、式(1-3)における ΔP 及び $\Delta \omega$ は、本実施の形態における ΔP_1 及び $\Delta \omega_1$ にそれぞれ対応する。

[0030] [数2]

$$\Delta \omega(t) = \omega(t) - 1 \quad (1-2)$$

$$\Delta P(s) = sM\Delta \omega(s) + D\Delta \omega(s) = \{sM + D\}\Delta \omega(s)$$

$$\Delta \omega(s) = \frac{1}{sM + D} \Delta P(s) = \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{1 + sM/D} \Delta P(s) \quad (1-3)$$

[0031] 図2に戻って、第1 ガバナ制御部113は、同期発電機におけるガバナの

動作を疑似的に行う。詳細には、第1ガバナ制御部113は、第1VSG制御部101から出力された周波数偏差 $\Delta\omega_1$ に伝達関数 $\{K/(1+sT)\}$ を乗算し、その値を減算器111へ出力する。ここで、 T は積分時間に相当する時定数であり、 K はガバナのゲインである。

[0032] 図3に示すステップS12において、第1指令値生成部102は、第1VSG制御部101により算出された周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を用いて、インバータ42の制御指令値として出力電圧の周波数指令値 f_v を生成する。さらに第1指令値生成部102は、生成した周波数指令値 f_v をインバータ42及び基準出力算出部117へ出力する。第1指令値生成部102は、図2に示すとおり、定数乗算器114a、ZOH回路114b、及び加算器115を有する。

[0033] 第1指令値生成部102において、定数乗算器114aは、周波数偏差 $\Delta\omega_1$ に定格周波数 f_n （単位はHz）を乗算して単位をHzに変換し、周波数偏差 $d f_1$ としてZOH回路114bへ出力する。ZOH回路114bは、周波数偏差 $d f_1$ をゼロ次ホールドした信号値を加算器115へ出力する。加算器115は、ZOH回路114bから出力される信号値に、定格周波数 f_n を加算することで周波数指令値 f_v を算出し、インバータ42の制御指令値としてインバータ42及び基準出力算出部117へ出力する。

ここで、定格周波数 f_n は、例えば日本では東日本で50Hz、西日本では60Hzと定められたシステムの周波数である。

[0034] インバータ42は、第1指令値生成部102から出力された周波数指令値 f_v に基づいて有効電力を出力する。周波数指令値 f_v が変動すると、インバータ42の接続先における例えば電圧や周波数などに応じて、インバータ42が出力する有効電力が変化する。このように、インバータ42の制御指令値である周波数指令値 f_v と、インバータ42が出力する有効電力の関係について、図4を用いて詳細に説明する。図4は、制御対象であるインバータ42と、インバータ42の接続先との関係を示す図である。図4では、制御装置41が制御するインバータ42と、線路リアクタンス L を介してインバータ42接続される例えば負荷12などの接続先（以降、単に接続先と記載す

る)が模式的に示されている。ここで、接続先は負荷 1 2に限られず、例えば複数の蓄電池 1 3及び電力変換装置 1 4が接続される場合、これらも接続先として含める。

[0035] 図 4 において、インバータ 4 2から出力される交流電圧を v_v 、送配電網 2 1の線路リアクタンスを L 、送配電網 2 1を流れる電流を i 、接続先における交流電圧を v_o とすると、これらの関係式は以下の式 (1-4) のように表される。ここで、 f_v はインバータ 4 2から出力される交流電圧の周波数、 f_o は接続先における交流電圧の周波数、 θ_o は、電流 i と接続先における電圧 v_o との位相差である。

[0036] [数3]

$$\begin{aligned} L \frac{di(t)}{dt} &= v_v - v_o \\ L \frac{di(t)}{dt} &= V_v e^{j2\pi f_v t} - V_o e^{j(2\pi f_o t + \theta_o)} \end{aligned} \quad (1-4)$$

[0037] さらに、以後の式変形が容易となるように式 (1-5) を導入し、式 (1-4) を電流 i について解くと、以下の式 (1-6) のようになる。また、皮相電力 S が式 (1-7) のように表されることを踏まえると、インバータ 4 2が出力する有効電力 P は、式 (1-8) のように表される。ここで、 Q はインバータ 4 2が出力する無効電力である。

[0038]

[数4]

$$\Delta f = f_v - f_o \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned} L \frac{di(t)}{dt} &= V_v e^{j2\pi f_v t} - V_o e^{j\{2\pi(f_v - \Delta f)t + \theta_o\}} \\ i(t) &= \frac{V_v}{j2\pi f_v L} e^{j2\pi f_v t} - \frac{V_o}{j2\pi(f_v - \Delta f)L} e^{j\{2\pi(f_v - \Delta f)t + \theta_o\}} \\ &= -j \frac{V_v}{2\pi f_v L} e^{j2\pi f_v t} + j \frac{V_o}{2\pi(f_v - \Delta f)L} e^{j2\pi f_v t} e^{j(\theta_o - 2\pi \Delta f t)} \\ &= -j \frac{V_v}{2\pi f_v L} e^{j2\pi f_v t} + j \frac{V_o \{\cos(\theta_o - 2\pi \Delta f t) + j \sin(\theta_o - 2\pi \Delta f t)\}}{2\pi(f_v - \Delta f)L} e^{j2\pi f_v t} \\ &= -\frac{V_o \sin(\theta_o - 2\pi \Delta f t)}{2\pi(f_v - \Delta f)L} e^{j2\pi f_v t} + j \left\{ \frac{V_o \cos(\theta_o - 2\pi \Delta f t)}{2\pi(f_v - \Delta f)L} - \frac{V_v}{2\pi f_v L} \right\} e^{j2\pi f_v t} \quad (1-6) \end{aligned}$$

$$S = P + jQ = \bar{v}_v i \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} P = \operatorname{Re}(S) &= \operatorname{Re}(\bar{v}_v i) = V_v e^{-j2\pi f_v t} \left\{ -\frac{V_o \sin(\theta_o - 2\pi \Delta f t)}{2\pi(f_v - \Delta f)L} e^{j2\pi f_v t} \right\} = \frac{V_v V_o \sin(2\pi \Delta f t - \theta_o)}{2\pi(f_v - \Delta f)L} \\ &= \frac{V_v V_o \sin\{2\pi(f_v - f_o)t - \theta_o\}}{2\pi f_o L} \quad (1-8) \end{aligned}$$

[0039] 式(1-8)で表される有効電力Pにおいて、制御可能なパラメータは、インバータ42が出力する交流電圧の振幅 V_v 及びインバータ42が出力する交流電圧の周波数指令値 f_v の2つであるが、このうち交流電圧の振幅 V_v は、VSG制御において、同期発電機における無効電力Qと電圧 v との関係であるQ-v垂下特性に基づいて決定されるため、本実施の形態では、交流電圧の周波数指令値 f_v のみを制御することで、インバータ42が出力する有効電力Pを変化させる。

[0040] 一方、式(1-8)で表される有効電力Pは、接続先における電圧振幅 V_o 、周波数 f_o 、位相差 θ_o 、及び線路リアクタンスLを変数としてもつ。これらの値は、インバータ42に接続される負荷12、他のインバータ42、及び他の蓄電池13により変化する。すなわち、インバータ42から出力される有効電力Pは、例えば接続先の機器仕様、構成、動作状況などにより影響を受けて変化する。

[0041] 図2に戻って、基準出力算出部117は、第1指令値生成部102から出力された周波数指令値 f_v に基づいて、予め定めた基準状態の負荷12に接続された場合に、インバータ42が出力する有効電力を算出し、有効電力基準

値 P_{st} として減算器 118 へ出力する。

詳細には、基準出力算出部 117 は、加算器 115 から出力される周波数指令値 f_v を用いて、式 (1-8a) により有効電力基準値 P_{st} を算出する。式 (1-8a) において、電圧振幅 V_s 、周波数 f_s 、位相差 θ_s 、及び線路リアクタンス L_s は、基準状態の接続先を表現する定数である。ここで、基準状態とは、電力変換装置 14 が VSG 制御により実現する慣性力を決定する場合に用いる制御装置 41 の設計条件である。すなわち、接続先が電圧振幅 V_s 、周波数 f_s 、位相差 θ_s 、及び線路リアクタンス L_s で表される状態の場合、制御装置 41 は、設計値どおりの周波数変動の抑制効果を電力変換装置 14 に発揮させることができる。

[0042] [数5]

$$P_{st} = \frac{V_v V_s \sin\{2\pi(f_v - f_s)t - \theta_s\}}{2\pi f_s L_s} \quad (1-8a)$$

[0043] 続いて、減算器 118 は、基準出力算出部 117 から出力された有効電力基準値 P_{st} から有効電力実測値 $P_{\text{measurement}}$ を減算して第 1 誤差 dP_1 を算出し、第 1 誤差補正制御部 103 へ出力する。

ここで、減算器 118 により算出される第 1 誤差 dP_1 は、有効電力基準値 P_{st} に対する有効電力実測値 $P_{\text{measurement}}$ の大小関係を表すもので、周波数変動の抑制効果に影響を及ぼす。具体的には、第 1 誤差 dP_1 が正の値の場合、周波数変動の抑制効果は過少となり、第 1 誤差 dP_1 が負の値の場合、周波数変動の抑制効果は過大となる。

[0044] 図 3 に示すステップ S13 において、第 1 誤差補正制御部 103 は、周波数変動の抑制効果に影響を及ぼす第 1 誤差 dP_1 を用いて、第 1 VSG 制御部 101 におけるゲインを決定する。第 1 誤差補正制御部 103 は、図 2 に示すとおり、一次遅れ回路 124、加算器 125、及びリミッター 126 を有する。

[0045] 第 1 誤差補正制御部 103 において、一次遅れ回路 124 は、減算器 118 から入力された第 1 誤差 dP_1 に伝達関数 $\{K_{obs} / (1 + sT_{obs})\}$ を乗算し、加算器 125 へ出力する。加算器 125 は、一次遅れ回路 124 か

ら入力された値に乗算器 122 に設定されたゲインである $1/D$ を加算して、リミッター 126 へ出力する。ここで、 T_{obs} は時定数、 K_{obs} はゲインであり、これらの値は例えば限界感度法などの一般的な制御理論を用いて決定してよい。

[0046] 第 1 誤差補正制御部 103 において、リミッター 126 は、加算器 125 から入力された値が、予め定めた下限値より大きいかを比較して、下限値より大きい場合にはその値を、下限値以下の場合には下限値を乗算器 122 のゲインとして設定する。すなわち、リミッター 126 は、加算器 125 から入力された値と予め定めた下限値との大小関係に応じて乗算器 122 のゲインを変更し、乗算器 122 は、変更後のゲインを有効電力偏差 ΔP_1 に乗算する。ここで、下限値は、加算器 125 から入力された値が 0 とならないように設定するものであり、0 を設定してはならない。仮に下限値を 0 に設定し、加算器 125 から入力された値が 0 以下であった場合、乗算器 122 のゲインとして 0 が設定されるため、第 1 VSG 制御部 101 の出力値が 0 となり、第 1 VSG 制御部 101 が機能しなくなる。

[0047] 第 1 誤差補正制御部 103 は、有効電力実測値 P_{measure} と有効電力基準値 P_{set} の差を補償するように乗算器 122 のゲインを設定する。これにより、接続先の状態、具体的には、接続先における電圧振幅 V_o 、周波数 f_o 、位相差 θ_o 、及び線路リアクタンス L によらず、第 1 誤差 dP_1 が小さくなるように作用する。

[0048] ここで、制御装置 41 のハードウェア構成について説明する。制御装置 41 は、PLC (Programmable Logic Controller) により実現される。PLC のハードウェア構成について、図 5 を用いて説明する。図 5 は、制御装置 41 を実現する PLC のハードウェア構成を示すブロック図である。

図 2 に示された制御装置 41 の各機能ブロックは、PLC 上で制御装置 41 が行う処理が記述されたプログラム（以降、制御プログラムと記載する）が実行されることにより実現される。この PLC は、図 5 に示すように演算

装置 5 1、記憶装置 5 2、通信装置 5 3 を備え、これらはシステムバス 5 4 を介して接続される。ここで、図 5 は一例であり、P L C の構成は図 5 の例に限定されない。

[0049] P L C において、演算装置 5 1 は、例えば C P U などのプロセッサであり、制御プログラムを実行する。記憶装置 5 2 は、R A M などの揮発性メモリ及びフラッシュメモリなどの不揮発性メモリを含み、演算装置 5 1 が実行する制御プログラムや処理の過程で得られたデータなどを記憶するとともに、プログラムの一時的な記憶領域として使用される。通信装置 5 3 は、例えば統合コントローラ 3 1 との通信を行う受信機及び送信機である。

ここで、P L C は、ハードウェア構成が類似するコンピュータシステムと異なり、O S (O p e r a t i n g S y s t e m) を搭載せず、例えば O S の動作に起因する常駐プログラムの割り込みなどによる処理の遅延や処理落ちが発生しづらい特徴を有している。本実施の形態では、これらの特徴に基づいて、P L C により制御装置 4 1 を実現する例を示しているが、この例に限られず、コンピュータシステムにより実現させてもよい。

[0050] このように、第 1 V S G 制御部 1 0 1 は、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により周波数偏差 $\Delta \omega_1$ を算出し、第 1 指令値生成部 1 0 2 は、周波数偏差 $\Delta \omega_1$ を用いてインバータ 4 2 の出力電圧の周波数指令値 f_v を生成し、基準出力算出部 1 1 7 は、周波数指令値 f_v に基づいて予め定めた基準状態の接続先に対してインバータ 4 2 が出力する有効電力基準値 $P_{s,t}$ を算出し、減算器 1 1 8 は、有効電力基準値 $P_{s,t}$ から有効電力実測値 P_{measur} を減算して第 1 誤差 dP_1 を算出し、第 1 誤差補正制御部 1 0 3 は、第 1 誤差 dP_1 を用いて第 1 V S G 制御部 1 0 1 の伝達関数のゲインを設定するように構成したため、接続先の仕様、構成、又は動作状況が変化した場合にも、設計値どおりの周波数変動の抑制効果を発揮するようにインバータ 4 2 を制御する制御装置 4 1 を提供することができる。

[0051] なお、本実施の形態において、第 1 誤差補正制御部 1 0 3 は、第 1 V S G 制御部 1 0 1 におけるゲインを決定する例を示したが、この例に限られず、

決定したゲインに合わせて第1 VSG制御部101の時定数に相当する(M/D)を変更してもよい。詳細には、第1誤差補正制御部103は、決定したゲインの逆数を改めて D とし、この D を用いた場合の伝達関数 $\{1/(1+sM/D)\}$ が制御安定となるように M の値を決定する。この M の値の決定方法は、ナイキストの安定判別法など一般的な制御理論を用いてもよく、 D に対する M の値のパターンを事前に保持しておき、そのパターンからの当てはめによって決定してもよい。これにより、有効電力実測値 P_{measure} と有効電力基準値 P_{set} との差である第1誤差 dP_1 が大きくなり、乗算器122に設定されるゲインが大きくなった場合に制御発振が生じることを防ぐことができる。

[0052] また、リミッター126は、入力値が予め定めた下限値より大きいかを比較して、下限値以下の場合は下限値を乗算器122に設定する例を示したが、この例に限られず、上限値をさらに設定し、入力値が上限値より小さいかをさらに比較して、上限値以上の場合は上限値を乗算器122に設定してもよい。これにより、ゲインを過大に設定して、制御発振が生じることを防ぐことができる。

[0053] 実施の形態2.

実施の形態2について図6及び図7を用いて詳細に説明する。図6は、実施の形態2における制御装置41及び制御対象であるインバータ42を含む制御系を示すブロック図、図7は、実施の形態2における制御装置41が行う制御処理を示すフローチャートである。図6に示す各構成のうち図2と同一符号のものは、同一又は相当部分を示しており、説明を省略する。また、実施の形態2におけるマイクログリッド1の構成は、実施の形態1と同様であり図示及び説明を省略する。

[0054] 実施の形態2において、制御装置41は、減算器111a、第1VSG制御部101a（以降、第1VSG制御部101aと記載する）、第1ガバナ制御部113、第1指令値生成部102、ZOH回路116、減算器211、第2VSG制御部201、第2ガバナ制御部213、第2指令値生成部2

02、基準出力算出部117、ZOH回路216、減算器217、及び第2誤差補正制御部218を備える。以降、実施の形態2における制御装置41の各機能ブロックの動作を説明する。

[0055] 減算器111aは、統合コントローラ31から受信した有効電力指令値 P_{ref} と、詳細を後述する第2誤差補正制御部218から出力された第2誤差 dP_2 との和から、第1ガバナ制御部113の出力値を減算し、その値を第1VSG制御部101aへ出力する。

[0056] 第1VSG制御部101aは、減算器121、乗算器122a、及び一次遅れ回路123を有し、同期発電機が持つ慣性力を電力変換装置14に疑似的に持たせるVSG制御を行う点で実施の形態1における第1VSG制御部101と同様である。一方、乗算器122aは、入力値に乗算するゲイン($1/D$)が固定値である点の実施の形態1と異なる。

[0057] 図7に示すステップS21において、第1VSG制御部101aは、有効電力実測値 $P_{measure}$ を用いて第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を算出する。

詳細には、第1VSG制御部101aにおいて、乗算器122aは、減算器121により算出された有効電力偏差 ΔP_1 にゲイン($1/D$)を乗算し、一次遅れ回路123へ出力する。続いて、一次遅れ回路123は、乗算器122aの出力値に伝達関数 $\{1/(1+sM/D)\}$ を乗算し、第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を算出して第1ガバナ制御部113、第1指令値生成部102、及び減算器217へ出力する。

[0058] 第1ガバナ制御部113は、実施の形態1と同一の機能ブロックであり、第1VSG制御部101aから出力された第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ に伝達関数 $\{K/(1+sT)\}$ を乗算し、その値を減算器111aへ出力する。ここで、時定数 T 及びゲイン K は、実施の形態1と同じ値とする。

[0059] 図7に示すステップS22において、第1指令値生成部102は、第1VSG制御部101aにより算出された第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を用いて、インバータ42の制御指令値として出力電圧の周波数指令値である第1周波数指令値 f_{v1} を生成する。さらに第1指令値生成部102は、生成した第1周波

数指令値 f_{v1} をインバータ 42 へ出力する。第 1 指令値生成部 102 は、実施の形態 1 と同様に、定数乗算器 114a、ZOH 回路 114b、及び加算器 115 を有する。

詳細には、定数乗算器 114a は、第 1 の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ に定格周波数 f_n を乗算して周波数偏差 df_1 を算出し、ZOH 回路 114b へ出力する。ZOH 回路 114b は、周波数偏差 df_1 をゼロ次ホールドした信号値を加算器 115 へ出力する。加算器 115 は、ZOH 回路 114b から出力される信号値に、定格周波数 f_n を加算して第 1 周波数指令値 f_{v1} を算出し、インバータ 42 の制御指令値としてインバータ 42 へ出力する。

[0060] インバータ 42 は、第 1 指令値生成部 102 から出力された第 1 周波数指令値 f_{v1} に基づいて有効電力を出力する。このように、インバータ 42 が出力する有効電力を周波数指令値により制御する点は、実施の形態 1 と同様である。

[0061] 実施の形態 2 において、統合コントローラ 31 から出力された有効電力指令値 P_{ref} は、減算器 211 にも入力される。減算器 211 は、有効電力指令値 P_{ref} から第 2 ガバナ制御部 213 の出力値を減算し、その値を第 2 VSG 制御部 201 へ出力する。

[0062] 図 7 に示すステップ S23 において、第 2 VSG 制御部 201 は、予め定めた基準状態の接続先にインバータ 42 が供給する有効電力である有効電力基準値 P_{st} を用いて第 2 の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ を算出する。第 2 VSG 制御部 201 は、図 6 に示すとおり、第 1 VSG 制御部 101a と同一の機能ブロックである減算器 121、乗算器 122a、及び一次遅れ回路 123 を有し、第 1 VSG 制御部 101a と同一の演算処理を行うことで第 2 の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ を算出し、第 2 ガバナ制御部 213、第 2 指令値生成部 202、及び減算器 217 へ出力する。

ここで、第 2 VSG 制御部 201 が入力値に乘算するゲイン $(1/D)$ 、伝達関数 $\{1/(1+sM/D)\}$ 、及びこれらを構成する慣性定数 M と制動定数 D とは、第 1 VSG 制御部 101a と同一である。

- [0063] 第2ガバナ制御部213は、第1ガバナ制御部113と同様に、第2VSG制御部201から出力された第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ に伝達関数 $\{K/(1+sT)\}$ を乗算し、その値を減算器211へ出力する。ここで、時定数T及びゲインKは、第1ガバナ制御部113と同じ値である。
- [0064] 第2指令値生成部202は、定数乗算器214a、ZOH回路214b、及び加算器215を有し、第1指令値生成部102と同様に、周波数指令値として第2周波数指令値 f_{v2} を生成して出力する。詳細には、定数乗算器214aは、定数乗算器114aと同様の演算処理により周波数偏差 $d f 2$ を算出し、ZOH回路214bへ出力する。ZOH回路214bは、周波数偏差 $d f 2$ をゼロ次ホールドした信号値を加算器215へ出力する。加算器215は、ZOH回路214bから出力される信号値に、定格周波数 f_n を加算して第2周波数指令値 f_{v2} を算出し、基準出力算出部117へ出力する。
- [0065] 基準出力算出部117は、第2指令値生成部202から出力された第2周波数指令値 f_{v2} に基づいて、予め定めた基準状態の負荷12に接続された場合に、インバータ42が出力する有効電力を算出し、有効電力基準値 P_{st} としてZOH回路216へ出力する。詳細には、基準出力算出部117は、式(1-8a)において $f_v = f_{v2}$ として有効電力基準値 P_{st} を算出する。
- [0066] 減算器217は、第2VSG制御部201が出力する第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ から、第1VSG制御部101aが出力する第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を減算することで周波数偏差の差分値を算出する。さらに減算器217は、算出された周波数偏差の差分値を第2誤差補正制御部218へ出力する。
- [0067] 図7に示すステップS24において、第2誤差補正制御部218は、第1VSG制御部101aが算出した第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ と、第2VSG制御部201が算出した第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ との差により第2誤差 $d P_2$ を算出し、第1VSG制御部101aにフィードバックする。
- 詳細には、第2誤差補正制御部218は、積分器として機能し、減算器217から出力された周波数偏差の差分値に伝達関数 (K_s/s) を乗算することで第2誤差 $d P_2$ を算出し、減算器111aへ出力する。この第2誤差 $d P$

$_2$ は有効電力実測値 P_{measure} と有効電力基準値 P_{st} との差分に応じて生じた値であるから、この値をフィードバックすることにより、有効電力実測値 P_{measure} と有効電力基準値 P_{st} との差を小さくすることができる。ここで、伝達関数 (K_s/s) において、 K_s は第2誤差補正制御部218における積分ゲインであり、その値は第2誤差補正制御部218を含む制御系全体が制御安定となるように一般的な制御理論を用いて決定してよい。また、 s はラプラス演算子である。

[0068] このように、第1VSG制御部101aは、インバータ42が出力する有効電力実測値 P_{measure} を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を算出し、第2VSG制御部201は、予め定めた基準状態の接続先に対してインバータ42が出力する有効電力基準値 P_{st} を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ を算出し、第1指令値生成部102は、第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ を用いてインバータ42の出力電圧の周波数指令値として第1周波数指令値 f_{v1} を生成してインバータ42に出力し、第2指令値生成部202は、第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ を用いてインバータ42の出力電圧の周波数指令値として第2周波数指令値 f_{v2} を生成して基準出力算出部117に出力し、基準出力算出部117は、第2周波数指令値 f_{v2} に基づいて予め定めた基準状態の接続先に対してインバータ42が出力する有効電力基準値 P_{st} を算出し、第2誤差補正制御部218は、第1の周波数偏差 $\Delta\omega_1$ 及び第2の周波数偏差 $\Delta\omega_2$ を用いて第2誤差 dP_2 を算出して第1VSG制御部101aにフィードバックするように構成したため、接続先の仕様、構成、又は動作状態が変化した場合にも、設計値どおりの周波数変動の抑制効果を発揮するようにインバータ42を制御する制御装置41を提供することができる。

[0069] なお、実施の形態1及び2において、図1を用いて発電設備11及び負荷12がそれぞれ複数存在する例を示したが、この例に限られず、発電設備11及び負荷12のそれぞれは1つのみでもよい。また、図1を用いて蓄電池13が1つの例を示したが、この例に限られず、蓄電池13は複数存在して

もよく、その複数の蓄電池 1 3 は、複数種類の二次電池を組み合わせたものでもよい。

[0070] また、実施の形態 1 及び 2 において、発電設備 1 1 が複数存在する場合、その複数の発電設備 1 1 は、複数種類の再生可能エネルギー電源を組み合わせたものでもよい。また、発電設備 1 1 が有する電力量計及び電力量計の計測値を送信する通信装置は、1 つの発電設備 1 1 に対して 1 つ以上備える必要はなく、複数の発電設備 1 1 が存在する場合は、合計の発電電力量を計測して送信できるように構成されていればよい。同様に、負荷 1 2 が有する電力量計及び電力量の計測値を送信する通信装置は、1 つの負荷 1 2 に対して 1 つ以上備える必要はなく、複数の負荷 1 2 が存在する場合は、合計の消費電力量を計測して送信できるように構成されていればよい。

[0071] また、実施の形態 1 及び 2 において、マイクログリッド 1 は、発電設備 1 1、負荷 1 2、蓄電池 1 3、電力変換装置 1 4、及びトランスデューサ 1 5 を有する例を示したが、この例に限られず、例えば遮断器、断路器、変圧器などの受配電設備をさらに備えてもよい。また、マイクログリッド 1 は、送配電網 2 1 を介して別の電力系統に接続、すなわち系統連系してもよく、マイクログリッド 1 と別の電力系統との間にも連系設備として例えば遮断器、断路器、変圧器などを備えてもよい。

[0072] また、実施の形態 1 及び 2 において、マイクログリッド 1 は負荷 1 2 を有する例を示したが、この例に限られず、マイクログリッド 1 は負荷 1 2 を有していなくてもよい。但し、この場合、マイクログリッド 1 が複数の蓄電池 1 3 を有する必要があることに注意が必要である。これは、蓄電池 1 3 に充電された電力の消費先が必要となるためである。すなわち、ある蓄電池 1 3 が他の蓄電池 1 3 を充電するために放電する場合、本制御装置 4 1 は、放電を行う当該蓄電池 1 3 を制御する。この場合、各蓄電池 1 3 の充電及び放電は、統合コントローラ 3 1 が制御してよい。

[0073] また、実施の形態 1 及び 2 において、トランスデューサ 1 5 は、有効電力実測値 P_{measure} を直接計測する例を示したが、この例に限られず、電圧及

び電流の実測値を計測して制御装置41へ出力し、制御装置41が出力された計測値を用いて有効電力実測値 $P_{\text{measurement}}$ を算出してもよい。また、トランスデューサ15は、VT (Voltage Transformer) 及びCT (Current Transformer) を介して送配電網21に接続されてもよい。

[0074] また、実施の形態1及び2において、統合コントローラ31と、発電設備11、負荷12、蓄電池13、及び電力変換装置14との接続方法は何ら限定されるものではなく、例えば同軸ケーブルなどの信号線で接続されてもよく、無線通信により接続されてもよく、インターネットやイントラネットを介して接続されてもよい。

[0075] また、実施の形態1及び2において、統合コントローラ31は、例えばEMS (Community Energy Management System)、AEMS (Aria Energy Management System)、BEMS (Building and Energy Management System) などとして構成され、例えば別の電力系統における電力需給の制御を並行して行ってもよい。

[0076] また、複数の実施の形態を説明したが、上記の開示内容以外にも、各実施の形態に記載された特徴が矛盾しない限り、各実施の形態の自由な組み合わせ、各実施の形態の任意の構成要素の変形、又は各実施の形態の省略が可能である。例えば、実施の形態1、2ともに、定数乗算器114a及びZOH回路114bとの順番を入れ替えてもよい。また、実施の形態2において、第2誤差補正制御部218は、出力値である第2誤差 dP_2 を減算器111aへ出力せず、減算器121に出力してもよい。

符号の説明

[0077] 1 マイクログリッド、11 発電設備、12 負荷、13 蓄電池、14 電力変換装置、15 トランスデューサ、21 送配電網、31 統合コントローラ、41 制御装置、42 インバータ、101、101a 第1VSG制御部、102 第1指令値生成部、103 第1誤差補正制御部、

1 1 7 基準出力算出部、2 0 1 第2 V S G制御部、2 0 2 第2 指令値
生成部、2 1 8 第2 誤差補正制御部

請求の範囲

- [請求項1] インバータの出力電圧の周波数が前記インバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、前記インバータの制御を行う制御装置であって、
- 前記インバータが前記接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により周波数偏差を算出する第1 仮想同期発電機制御部と、
- 前記第1 仮想同期発電機制御部により算出された前記周波数偏差を用いて、前記インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する第1 指令値生成部と、
- 予め定めた基準状態の前記接続先に前記インバータが供給する有効電力である有効電力基準値と前記有効電力実測値との差である第1 誤差を用いて、前記第1 仮想同期発電機制御部における前記伝達関数のゲインを決定する第1 誤差補正制御部と、
- を備える制御装置。
- [請求項2] 前記第1 指令値生成部により生成された前記周波数指令値を用いて前記有効電力基準値を算出する基準出力算出部と、
- を備える請求項1 に記載の制御装置。
- [請求項3] 前記第1 誤差補正制御部は、決定した前記伝達関数の前記ゲインを用いて、前記伝達関数の時定数をさらに決定する請求項1 又は2 に記載の制御装置。
- [請求項4] 前記第1 誤差補正制御部は、決定する前記伝達関数の前記ゲインに関して、上限値及び下限値の少なくともいずれかを設定する請求項1 から3 のいずれか1 項に記載の制御装置。
- [請求項5] インバータの出力電圧の周波数が前記インバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、前記インバータの制御を行う制御装置であって、
- 前記インバータが前記接続先に供給する有効電力実測値を用いて、

同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第1の周波数偏差を算出する第1仮想同期発電機制御部と、

前記第1仮想同期発電機制御部により算出された前記第1の周波数偏差を用いて、前記インバータの出力電圧の周波数指令値として第1周波数指令値を生成する第1指令値生成部と、

予め定めた基準状態の前記接続先に前記インバータが供給する有効電力である有効電力基準値を用いて、前記伝達関数により第2の周波数偏差を算出する第2仮想同期発電機制御部と、

前記第1仮想同期発電機制御部が算出した前記第1の周波数偏差と、前記第2仮想同期発電機制御部が算出した前記第2の周波数偏差との差により第2誤差を算出し、前記第1仮想同期発電機制御部にフィードバックする第2誤差補正制御部と、

を備える制御装置。

[請求項6]

前記第2仮想同期発電機制御部により算出された前記第2の周波数偏差を用いて、前記インバータの出力電圧の周波数指令値として第2周波数指令値を生成する第2指令値生成部と、

前記第2指令値生成部により生成された前記第2周波数指令値を用いて前記有効電力基準値を算出する基準出力算出部と、

を備える請求項5に記載の制御装置。

[請求項7]

インバータの出力電圧の周波数が前記インバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、前記インバータの制御を行う制御方法であって、

前記インバータが前記接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により周波数偏差を算出する工程と、

前記周波数偏差を用いて、前記インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する工程と、

予め定めた基準状態の前記接続先に前記インバータが供給する有効

電力である有効電力基準値と前記有効電力実測値との差である第1誤差を用いて、前記伝達関数のゲインを決定する工程と、
を備える制御方法。

[請求項8]

インバータの出力電圧の周波数が前記インバータの接続先に供給する有効電力に対して仮想的な慣性力を持つように、前記インバータの制御を行う制御方法であって、

前記インバータが前記接続先に供給する有効電力実測値を用いて、同期発電機における動揺方程式に基づく伝達関数により第1の周波数偏差を算出する工程と、

前記第1の周波数偏差を用いて、前記インバータの出力電圧の周波数指令値を生成する工程と、

予め定めた基準状態の前記接続先に前記インバータが供給する有効電力である有効電力基準値を用いて、前記伝達関数により第2の周波数偏差を算出する工程と、

前記第1の周波数偏差と前記第2の周波数偏差との差により第2誤差を算出し、前記第1の周波数偏差を算出する工程にフィードバックする工程と、

を備える制御方法。