

ニューラルネットワークを用いたマイクログリッドのための電力需給制御 Power Consumption/Supply Control using Neural Network for Micro Grids

80717378 金子綱志 (Tsunashi Kaneko) Supervisor 大森浩充 (Hiromitsu Ohmori)

1 緒論

近年、マイクログリッドという概念が注目されている。これは「分散型電源と負荷を持つ小規模系統で、複数の電源および熱源がIT関連技術を使って一括制御管理されて、既存の電力会社の商用系統から独立して運転可能なオンサイト型の電力供給システム」であり、その最終消費者から近い場所に電源を複数設けるといった特徴から、自然エネルギーを含む再生可能エネルギーの多数導入、また、電熱供給による省エネとコスト低減を見込まれ、研究が進められているものである。マイクログリッドを実現する上でまず必要となるものに電力需給制御技術があげられるが、その一つに droop 制御がある。droop 制御は全ての分散電源をインバータを介して系統に接続することで電力需給関係を満足させる手法で、規範値をもとに分散電源に有効電力、無効電力の設定値を与えるために用いられる PQ インバータ、負荷が必要となる有効電力、無効電力を設定値としながら、PQ インバータの規範値となる周波数、電圧を決定する VS インバータの 2 種類を用いて分散制御を行う。

マイクログリッドでは、プラントの形、構成する電源の出力が一定ではなく、短時間での負荷や発電量の変化への対応が必要となるため、プラントの状況に応じた適応的な制御手法が有効であると考えられる。一般に droop 制御では VS インバータが設定した規範値をもとに PI 制御を用いて PQ インバータが与える設定値を導くため、droop 制御は、2 種類のインバータにより分散電源それぞれがその近傍で得られる情報をもとに運転が可能である一方で、変化するプラントに対する適応性が無かった。そこで、本研究ではここに安定性を保ちながらニューラルコントローラを加える制御手法を提案する。ニューラルコントローラは PI 制御器と並列に与え、フィードバック誤差学習方式で学習する。論文ではその安定性を保証して、シミュレータを作成しその効果を確認した。

2 マイクログリッド [1]

マイクログリッドの概念を図.1 に示す。この概念図に基づいたシミュレータを用いて、MV ネットワークからの切断、そして孤立運転についてシミュレーションを行い、マイクログリッドのふるまいそして制御則の有効性を評価する。蓄電池 (SB) と燃料電池 (FC) を分散電源として電力供給を行うが、本研究では図.1 の点線で囲まれた部分を制御対象とし、燃料電池に与える有効電力出力の指定値 P_{ref} を調整することでマイクログリッドの電力需給関係を満足させることを目標とする。なお、無効電力出力の指定値 Q_{ref} は、MicroGrid Control Center (MGCC) が与えているが、ここでは一定値とする。蓄電池 (SB)、燃料電池 (FC) それぞれの分散電源は、共にインバータを介し三相交流電圧源として運転している。

蓄電池 (SB) と燃料電池 (FC) は、droop 制御に基づいて運転される。droop 制御とは、前節で紹介したように 2 種類のインバータをそれぞれ接続した分散電源によって電力需給関係を満足させるもので、規範値をもとに分散電源に有効電力、無効電力の設定値を与えるために用いられる PQ インバータ、負荷が必要となる有効電力、無効電力を設定値としながら、PQ インバータの規範値となる周波数、電圧を決定する VS インバー

タの 2 種類を用いる。例えばグリッド内で有効電力が不足した場合には、まず VS インバータを接続した分散電源 (本研究では蓄電池) が、必要な有効電力を出力する。この時 VS インバータは与えられた droop 特性 (図.2) に応じた 50Hz より小さな周波数で送電し、その周波数を計測した PQ インバータは与えられた特性曲線 (droop 特性と同様に傾きを負とする曲線) に従って、その周波数に対応した正の有効電力設定値を PQ インバータに接続した分散電源 (本研究では燃料電池) に与える。このように、マイクログリッドにおける電力需給関係は、まず VS インバータが対応し、その後 PQ インバータがそれを肩代わりするという形で満足される。これが droop 制御の概念である。

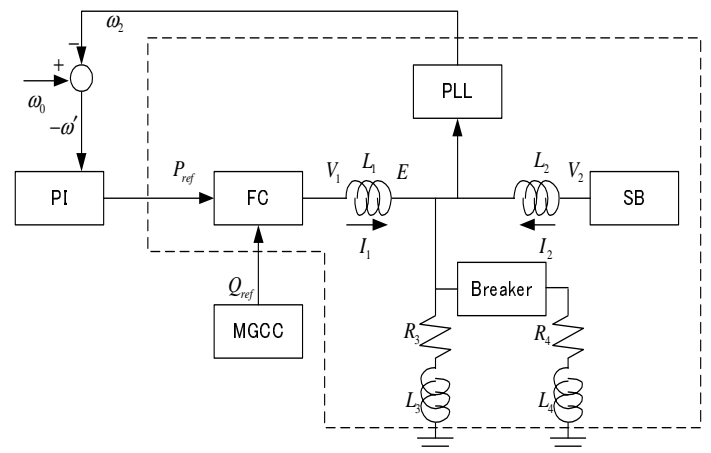


図 1: Micro Grid architecture

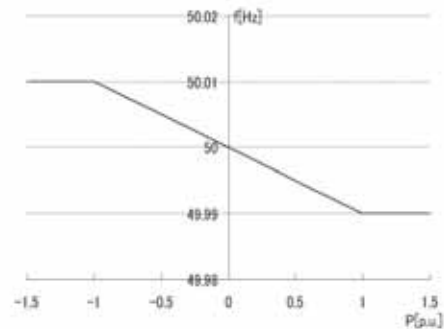


図 2: P-f characteristics

このようにして運転されるマイクログリッドは、入力を P_{ref} 、出力を系統周波数 ω_2 とすると、一入力一出力非線形アフィン形で状態表現が与えられる。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + gu, & x \in R^{11}, \quad u \in R \\ y = \omega_2, & y \in R \end{cases} \quad (1)$$

3 ニューラルコントローラを用いた提案法

燃料電池に与えられる有効電力出力の目標値 P_{ref} は従来の droop 制御では周波数偏差 $\omega_0 - \omega_2 = -\omega'$ を用いた PI 制御により与えられていた．本研究では，周波数変動をより小さくする P_{ref} の設定を目標とし，図.3 に示すよう，フィードバック誤差学習法を用いたニューラルコントローラの導入を提案する．

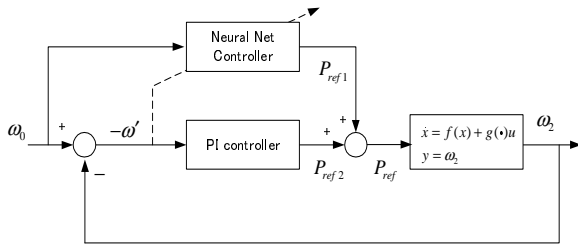


図 3: Micro Grid Control Scheme with FBEL

ここで，ニューラルコントローラの誤差システムは，入力をニューラルコントローラの実出力 P_{ref1} ，出力を周波数偏差 $-\omega'$ として

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + gu, & x \in R^{12}, \quad u \in R \\ y = -\omega' = h(x), & y \in R \end{cases} \quad (2)$$

と表される．

フィードバック誤差学習法を用いる時，誤差システムの強受動性が満たされていれば，制御系の漸近安定性が保証される．そこで，本研究においても制御系の強受動化が必要である．フィードバックによりシステムが強受動化可能な条件についてはシステムの相対次数が 1 であり，システムが弱最小位相であることが知られている．受動化に関しては，拡張誤差信号，バックステッピング法，高階調整法などが知られているが，本研究ではシステムが受動化可能条件を満たすため，並列フィードフォワード補償 (Parallel feed forward compensator: PFC) を導入する．マイクログリッドの受動化においては，PFC により受動化可能条件を満たし，出力フィードバックにより受動化することを考える．

$$PFC: \begin{cases} \dot{\eta} = k(\eta) + m(\eta)u \\ y_{\eta} = \ell(\eta) \end{cases} \quad (3)$$

のようにおくと，PFC を負荷した拡大システムは

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x) \\ k(\eta) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g(x) \\ m(\eta) \end{pmatrix} u \\ \bar{y} = h(x) + \ell(\eta) \end{cases} \quad (4)$$

のようになる．PFC の設計に関しては，拡大系の相対次数を 1 とし，そのゼロダイナミクスが安定，すなわち拡大系を最小位相系とする設計法が知られている [2]．

こうして PFC により受動化可能条件を満たした誤差システムの拡大系を出力フィードバックにより受動化する．誤差システムの拡大系を Isidori の標準形に変形すると，

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = a(\bar{y}, \psi) + b(\bar{y}, \psi)u \\ \dot{\psi} = q(\bar{y}, \psi) \\ \bar{y} = z_1 \\ \psi = [z_2, z_3, \dots, z_{13}]^T \end{cases} \quad (5)$$

とすることができる．

これが 1. 相対次数が 1, 2. 最小位相系, 3. $a(\bar{y}, \psi), q(\bar{y}, \psi)$ がリプシッツ条件を満たす, 4. $b(\bar{y}, \psi) = b(y) \geq b_0 > 0$ を満たす b_0 が存在する．これら 4 つの条件を満たすとき，系が十分大きな $K > 0$ を用いて

$$u = -\frac{K}{b(\bar{y})}\bar{y} + \frac{1}{b(\bar{y})}v \quad (6)$$

なる出力フィードバックによって受動化できることが知られており [3]，本研究ではこの方法を用いて誤差システムの受動化を実現した．

4 シミュレーション結果

マイクログリッドの制御におけるフィードバック誤差学習法の安定性を保証するよう受動化をし，シミュレーションを行った．

マイクログリッドは 20 秒までは外部の MV ネットワーク (商用電源) に接続されており，負荷は常時接続されているものと，商用電源から独立後一度切り離しその後随時追加されるものを設定した．常時接続される負荷は $P=15\text{kW}, Q=10\text{kvar}$ とし，選択負荷は $P=2\text{kW}, Q=1\text{kvar}$ を周波数の回復に応じて順次追加するものとした．MV ネットワークからの独立，また負荷変動に対し，電力需給関係を満たしながら運転した際の周波数の変化を，従来の droop 制御，ニューラルコントローラを用いた提案法それぞれで運転した結果を図 4.5 に示す．

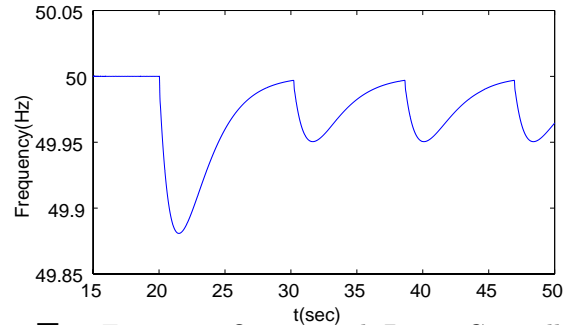


図 4: Frequency Output with Droop Controller

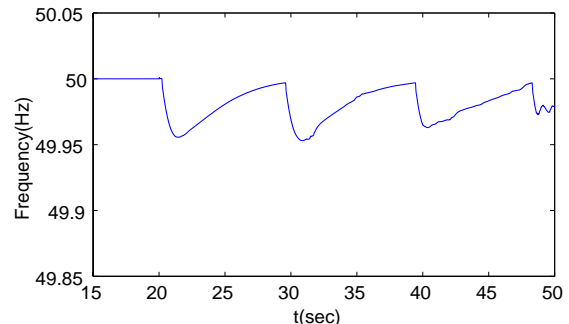


図 5: Frequency Output with Neural Controller

ニューラルコントローラを用いない droop 制御，ニューラルコントローラを用いた提案法共に周波数変動時の回復が確認できる．MV ネットワークからの独立時において顕著だが，ニューラルコントローラの追加により周波数降下が大きく減少していることがわかる．提案法では，選択負荷の接続が繰り返されるに従って周波数降下が小さくなっている様子も見て取れる．

5 結論

シミュレーション結果にも示されるとおり，フィードバック誤差学習法を用いた NN コントローラによる周波数降下の減少を確認した．また，droop 制御に基づくマイクログリッドにおける NN コントローラの使用に際し，その安定性を保つようプラントの受動化を行った．

ニューラルコントローラ使用時の周波数回復にかかる時間は，今後さらに少なくすべきものとするこ，ニューラルネットの汎化性を向上させることなどが，今後の課題として挙げられる．

参考文献

- [1] J. A. Pecas Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, IEEE Transaction on Power Systems, vol.21, no.2, pp916-924, May 2006.
- [2] 出崎 聡, 大森 浩充, 慶應義塾大学大学院修士論文 (2002)
- [3] 岩井善太 水本郁郎 大塚弘文: "単純適応制御 SAC", 森北出版株式会社 (2008)