

マイクログリッドにおけるガスエンジンと蓄電池の H^∞ 最適制御

永原正章 (京都大学), 宮崎誠也 (パナソニック), 工藤貴弘 (パナソニック),
山本裕 (京都大学), 林直樹 (京都大学)

H^∞ Control of Batteries and Gas Engines in Microgrids

M. Nagahara (Kyoto Univ.), S. Miyazaki (Panasonic Corp.), T. Kudoh (Panasonic Corp.),
Y. Yamamoto (Kyoto Univ.), *N. Hayashi (Kyoto Univ.)

Abstract— In this article, we propose a new method for balancing control in microgrid systems via H^∞ control theory. In microgrid systems, one has to add several constraints such as limited capacity of batteries, battery life, and saturation in gas engines. Moreover, designing controllers for microgrid systems requires a model of the controlled objects, in which uncertainties in the model are inevitable. For such multi-objective control problems, H^∞ control theory gives a unified method with efficient numerical optimization. An experimental result of a microgrid system is shown to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: microgrid, H^∞ control, power control

1 はじめに

温室効果抑制のための CO_2 削減の鍵を握るのは電力部門の脱炭素化である。IEA(International Energy Agency, 国際エネルギー機関) の 2010 年のエネルギー技術展望⁵⁾ によると、今後政府がエネルギーと気候変動に関する新政策を導入しない場合、電力部門の CO_2 排出量は 2050 年までに 2010 年に比べて倍増することが予測され、逆に太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを積極的に用いる等の方針をとることにより、発電時の CO_2 排出量は 2007 年比で 90%削減可能であることが示されている。このような長期的な展望のほかに、2011 年 3 月に発生した東日本大震災による電力危機によって、再生可能エネルギーを系統内で安定的に運用する技術の開発が急務の課題となっている。

このような背景のもと、電力の流れを供給側と需要側の両方から制御し、最適化できるスマートグリッド^{10, 1)} という次世代電力網が着目されている。中でも、一般家庭やビルなどの需要地に近い場所で発電や蓄電する仕組みはマイクログリッド^{11, 1)} と呼ばれる。マイクログリッドとは、太陽光発電やガスエンジン、蓄電池などの分散型電源と負荷とが組み合わせられた小規模系統であり、既存の電力会社からの系統から独立して運転可能なオンサイト型電力供給システムである。複数の分散型電源を用い、電力需要にあわせて最適制御を行うことで、需給バランスを調整し、再生可能エネルギーの電力を安定的に供給することができる。

通常、マイクログリッドは電力系統と一点で連携され運用される。この連系線の電力潮流を事前に取り決めた規定値に一致させることがマイクログリッドでは重要であり、これを需給バランス制御もしくは同時同量制御と呼ぶ。マイクログリッドにおいて、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーは、その供給量が天候等によって大きく変動し、それ自体の制御は困難である。また、系統内の負荷の電力消費量も同様に大きな変動を示す。したがって、マイクログリッドにおける需給バランス制御では、これらの不確かな変動を蓄電池やガスエンジンを制御することで吸収し、潮流の安定化を目指す。

マイクログリッドの制御に関しては、これまで様々

な研究が行われている^{4, 6, 8, 11)}。小島ら⁴⁾ は、蓄電池とガスエンジンを制御することにより、需給バランスを制御することを提案している。また佐々木ら⁶⁾ では、需給バランス制御のほかに、小容量の蓄電池を想定した蓄電池残容量 (SOC, State of charge) の変化量抑制制御も同時に達成する制御系を提案している。また、下田ら⁸⁾ は、ガスエンジンと蓄電池の応答特性の違いに着目した統合カスケード制御を提案している。これらの研究により、制御器が適切に設計されれば、マイクログリッドにおける需給バランスの安定化が可能であることがシミュレーションおよび実験により示されている。しかし、これらの研究で用いられている制御手法は PID 制御であり、適切な制御器のパラメータを求めるためには多数の試行錯誤を伴う。

そこで本研究では、そのような試行錯誤が不要で、最悪ケースにおける最適性も保証される H^∞ 制御²⁾ を導入し、電力の需給バランス制御と蓄電池の SOC 変化量抑制制御を同時に達成する制御器を設計することを提案する。また、統合カスケード制御⁸⁾ のように、時定数の長いガスエンジンは低周波域における追従を、時定数の短い蓄電池は高周波域における追従を受け持つシステムを前提とする。電力制御に H^∞ 制御を導入する研究は、過去にもいくつか提案がある。千住ら⁷⁾ はガスタービン発電機の制御に H^∞ 制御を導入し、発電機の軸ねじれ振動抑制を考慮しつつ 30 分同時同量を達成する制御を提案している。またマイクログリッドにおけるインバータの制御に H^∞ 制御を導入する研究も報告されている^{9, 3)}。しかし、本稿で提案するような蓄電池とガスエンジンに対する H^∞ 制御は、これまで提案はなされていない。

本稿の構成は以下の通りである。まず、本稿で考察するマイクログリッドのモデルを第 2 節で示す。次にマイクログリッドの制御問題を第 3 節に示す。この制御問題は、第 4 節において H^∞ 制御問題として定式化され、制御器の設計法が示される。提案法による制御系の有効性を検証するために、第 5 節でシミュレーション結果を、第 6 節で実機による実験結果を示す。最後に、第 7 節にて本稿のまとめ、および今後の課題について述べる。

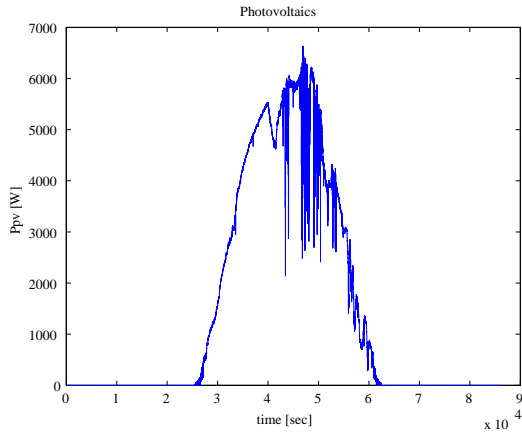


Fig. 1: 太陽光発電量 P_{pv} (24 時間)

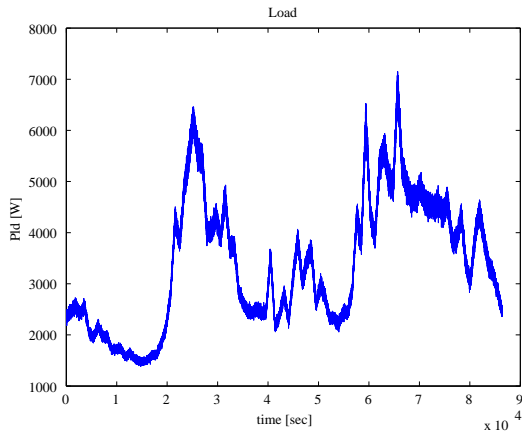


Fig. 2: 負荷の電力消費量 P_{ld} (24 時間)

2 マイクログリッドのモデル

本稿では、分散型電源として太陽光発電と蓄電池、ガスエンジンを考え、それらと負荷が組み合わせられ、電力系統と一点で連携され運用されるマイクログリッドを考察する。

まず、太陽光発電量と負荷は系統に印加される外乱とみなす。Fig. 1 に太陽光発電の 24 時間の発電量、Fig. 2 に負荷の 24 時間の電力消費量の一例を示す。

蓄電池とガスエンジンは 1 次系でモデル化する。すなわち、蓄電池の伝達関数 $G_{bt}(s)$ とガスエンジンの伝達関数 $G_{ge}(s)$ をそれぞれ

$$G_{bt}(s) = \frac{1}{T_{bt}s + 1}, \quad T_{bt} = \frac{0.1}{2\pi},$$

$$G_{ge}(s) = \frac{1}{T_{ge}s + 1}, \quad T_{ge} = \frac{10}{2\pi}$$

とする。ここで、蓄電池の時定数は 0.1 [sec]、ガスエンジンの時定数は 10 [sec] であり、蓄電池の応答はガスエンジンよりも 100 倍程度速い。後の節で述べるように、我々が提案するマイクログリッドシステムはこの応答の速さの違いを積極的に考慮する。

3 問題設定

時刻 $t \geq 0$ における太陽光発電量を $P_{pv}(t)$ 、負荷の電力消費量を $P_{ld}(t)$ とおく。同じく時刻 $t \geq 0$ における電力買入れ目標値（売買電力契約量）を $P_{ref}(t)$ 、マイクログリッド全体の買入れ電力量を $P_{net}(t)$ 、蓄電

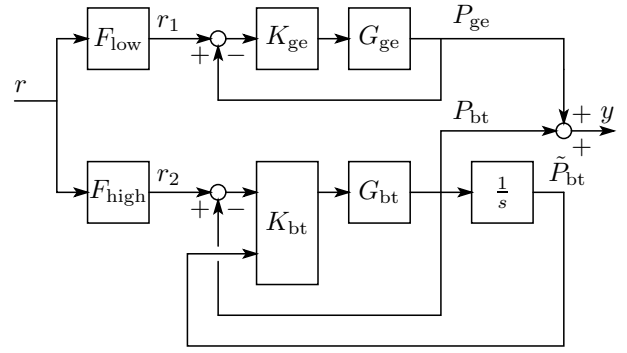


Fig. 3: マイクログリッド制御系

池とガスエンジンの発電量をそれぞれ $P_{bt}(t)$ 、 $P_{ge}(t)$ とおく。このとき、次の関係式が成り立つ。

$$P_{net}(t) = P_{ld}(t) - P_{bt}(t) - P_{ge}(t) - P_{pv}(t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

本稿で考えるマイクログリッドの需給バランス制御の問題は以下で定式化される。

問題 1 電力買入れ目標値 P_{ref} が与えられたとき、以下の量（追従誤差）をなるべく小さくするように蓄電池とガスエンジンの発電量 P_{bt} と P_{ge} を制御せよ。

$$e(t) = |P_{ref}(t) - P_{net}(t)|, \quad t \geq 0 \quad (2)$$

4 蓄電池とガスエンジンの H^∞ 制御

本稿で提案するマイクログリッドシステムを Fig. 3 に示す。この図において、

$$r(t) := P_{ld}(t) - P_{pv}(t) - P_{ref}(t),$$

$$y(t) := P_{bt}(t) + P_{ge}(t), \quad t \geq 0$$

であり、(1) と (2) より、需給バランス制御の問題は、

$$e(t) = |r(t) - y(t)|, \quad t \geq 0$$

を小さくする、すなわち、電力信号 y を入力信号 r に追従させることであることがわかる。

Fig. 3 のシステムに印加する電力信号 r には、Fig. 1 や Fig. 2 に示すような電力信号が含まれるため、様々な周波数を含む非常に複雑な波形となる。前節で述べたように、ガスエンジンは低速、蓄電池は高速に動作することから、電力信号 r をローパスフィルタ F_{low} とハイパスフィルタ F_{high} を用いて、低周波信号と高周波信号に分離し、低周波信号への追従はガスエンジンで、高周波信号への追従は蓄電池で行う。ガスエンジンの時定数 T_{ge} と蓄電池の時定数 T_{bt} を考慮して、これらのフィルタを次式で与える。

$$F_{low}(s) = \frac{1}{T_c s + 1}, \quad F_{high}(s) = \frac{T_c s}{T_c s + 1}.$$

ただし、フィルタの時定数 T_c はガスエンジンと蓄電池の時定数の平均、すなわち $T_c := (T_{ge} + T_{bt})/2$ とする。

さらに、蓄電池の残容量が大きく変化することは蓄電池の寿命を縮めることになるので望ましくない。したがって、これを抑制するために、蓄電池の残容量もフィードバックする。蓄電池の残容量は蓄電池の放電

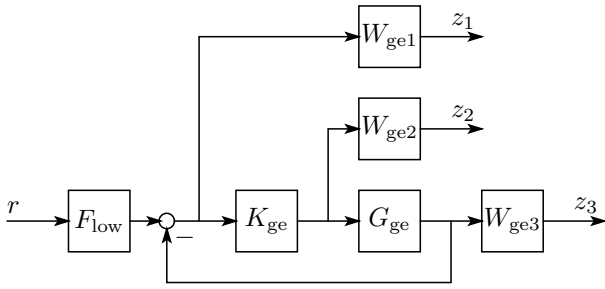


Fig. 4: ガスエンジンの制御器 K_{ge} 設計のためのブロック線図

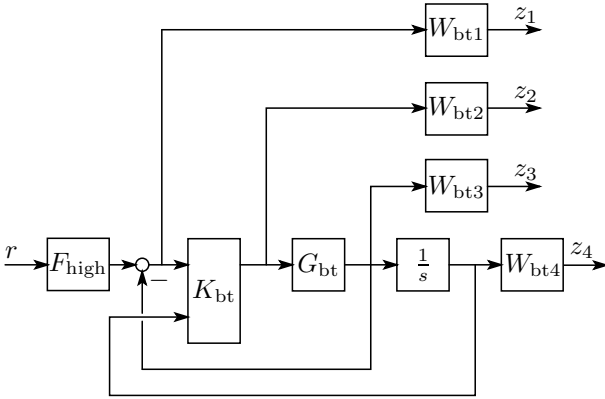


Fig. 5: 蓄電池の制御器 K_{bt} 設計のためのブロック線図
量 (充電量) の積分で表されるので, Fig. 3 で示すように, これを $1/s$ でモデル化する.

制御器 K_{ge} と K_{bt} は H^∞ 制御により設計する. Fig. 4 にガスエンジンの制御器 K_{ge} を設計するためのブロック線図を示す. ここで, W_{ge1} , W_{ge2} , W_{ge3} は以下で与えられる.

$$W_{ge1}(s) = \frac{1}{\frac{10}{2\pi}s + 1}, \quad W_{ge2}(s) = 0.005,$$

$$W_{ge3}(s) = 0.01 \frac{\frac{5}{2\pi}s}{\frac{5}{2\pi}s + 1}.$$

Fig. 4 において, 入力 r から出力 $z = [z_1, z_2, z_3]^\top$ へのシステムの H^∞ ノルムを最小化する制御器 K_{ge} を求める. この問題は標準的な H^∞ 最適制御問題であり, 例えば MATLAB の Robust Control Toolbox における hinfsyn を使えば容易に制御器を求めることができる.

次に, 蓄電池 G_{bt} の制御器 K_{bt} を設計するためのブロック線図を Fig. 5 に示す. ここで, W_{bt1} , W_{bt2} , W_{bt3} , W_{bt4} は以下で与えられる.

$$W_{bt1}(s) = \frac{1}{\frac{0.5}{2\pi}s + 1}, \quad W_{bt2}(s) = 0.001,$$

$$W_{bt3}(s) = 0.01 \frac{\frac{0.5}{2\pi}s}{\frac{0.5}{2\pi}s + 1}, \quad W_{bt4}(s) = 0.01.$$

Fig. 5 において, 入力 r から出力 $z = [z_1, z_2, z_3, z_4]^\top$ へのシステムの H^∞ ノルムを最小化する制御器 K_{bt} を求める. この問題も標準的な H^∞ 最適制御問題であり, 前述の方法により容易に制御器を求めることができる.

5 シミュレーションによる検証

本節では, 前節の定式化によって求めた制御器 K_{ge} と K_{bt} を用いて, 計算機シミュレーションを行ない,

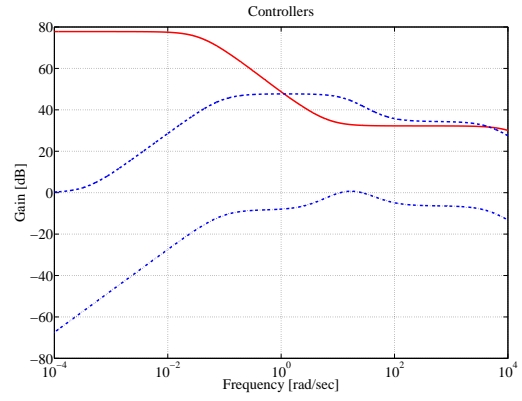


Fig. 6: H^∞ 制御器: K_{ge} (実線), $K_{bt} = [K_{bt}^1, K_{bt}^2]$ (破線, 鎖線)

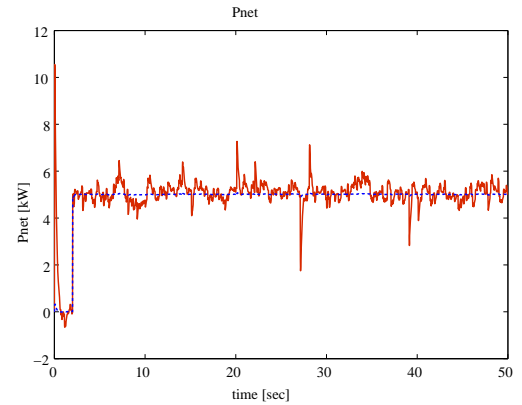


Fig. 7: 買入れ電力: 蓄電池の容量を考慮しない場合 (破線) と考慮した場合 (実線)

提案法の有効性を検証する.

前節で示した H^∞ 設計によって得られた制御器の Bode ゲイン線図を Fig. 6 に示す. ガスエンジンと蓄電池をそれぞれ低周波と高周波とに分離して制御する構成を採用したため, ガスエンジンのための制御器 K_{ge} は低周波域で高いゲインを持ち, いっぽう蓄電池のための制御器 K_{bt} はそれよりも高周波域で高いゲインを持つことがわかる.

次にマイクログリッドの発電シミュレーションを行う. 買入れ電力の目標値を, $t = 0 \sim 2$ [sec] の間は 0, $t \in [2, 50]$ の間は 5 [kW] で一定値とする. また, H^∞ 制御器は,

1. 蓄電池の残容量を考慮しない制御器
2. 蓄電池の残容量を考慮した制御器

の 2 種類を考える. ここで, 蓄電池の残容量を考慮しない制御器とは, Fig. 3 において, 残容量 \hat{P}_{bt} をフィードバックしない制御器である. このとき, K_{bt} は 1 入力 1 出力となり, H^∞ 設計は Fig. 5 において, z_4 を考慮しない設計とする.

Fig. 7 に買入れ電力 $P_{net}(t)$, $t \in [0, 50]$ を示す. 蓄電池の残容量を考慮しない制御では, ほぼ誤差なく追従できているのに対し, 蓄電池の残容量を考慮した制御では, かなり振動的になっている. しかし, 電力の潮流制御においては, 各時刻で正確に目標値に一致させる必要はなく, 例えば 30 分の移動平均誤差 (30 分同時量) がある値 (例えば, 買入れ電力目標値の 3%)

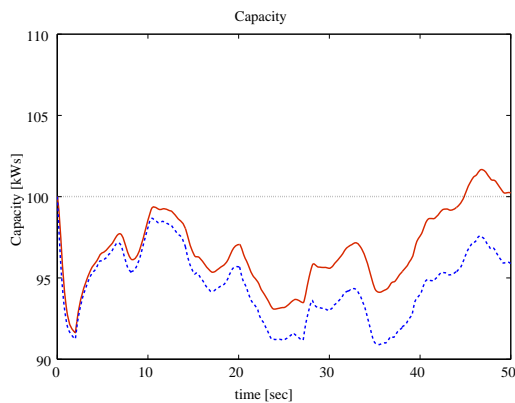


Fig. 8: 蓄電池残容量: 残容量を考慮しない設計 (破線) と考慮した設計 (実線)

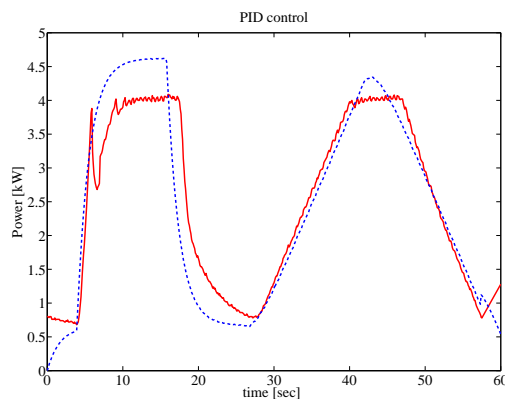


Fig. 9: ガスエンジンのPID制御: ガスエンジンへの指令値 (破線), 発電量 (実線)

以下になればよい．上記の50秒のシミュレーションでは，50秒間の平均誤差が，残容量を考慮しない設計では，目標値5[kW]の0.5149%，残容量を考慮した設計では2.6072%となり，この程度の誤差なら許容できる．

いっぽう，Fig. 8に蓄電池の残容量の変化を表す．なお，蓄電池容量の初期値は100[kWs]とする．蓄電池の残容量を考慮した制御では，蓄電池の容量の変化が抑えられ，初期容量の付近で動作している様子が見られる．

6 実機実験による検証

本節では， H^∞ 設計によって得られたガスエンジンのための制御器 K_{ge} を用いて，実機による実験を行い，提案法の有効性を検証する．なお，蓄電池の制御にはPI制御を用いている．太陽電池は10[kW], 4[kW], 15[kW]の3種類の出力を模擬的に発生させ，また負荷は10[kW]と8[kW]の2種類を模擬的に発生させる．蓄電池は鉛蓄電池で10[kWh]の容量のものを使用し，ガスエンジンは5[kW]の出力のものを用いる．

以上の設定のもとで潮流を一定にする運転，すなわち負荷と太陽光発電の電力を打ち消すように蓄電池とガスエンジンの発電量を制御する．Fig. 9にPID制御器によるガスエンジン制御の実験結果を，Fig. 10に H^∞ 制御器によるガスエンジン制御の実験結果をそれぞれ示す．この実験結果から，PID制御に比べ， H^∞ 制御は高い追従性能を示していることがわかる．

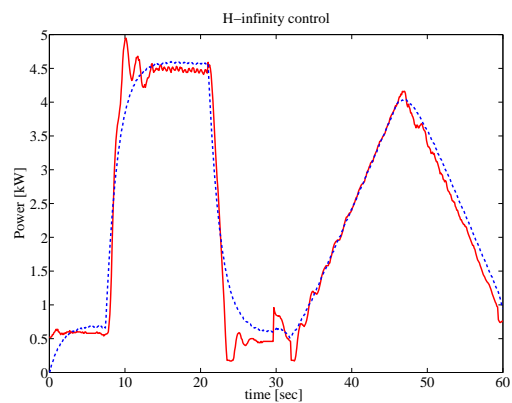


Fig. 10: ガスエンジンの H^∞ 制御: ガスエンジンへの指令値 (破線), 発電量 (実線)

7 おわりに

本稿では，太陽光発電と負荷，ガスエンジンと蓄電池が組み合わされたマイクログリッドにおける電力制御に H^∞ 制御を導入し，買い入れ目標値への追従，および蓄電池の残容量変化の抑制を達成する制御器の設計法を示した．また，シミュレーションおよび実験により提案手法の有効性を示した．本稿では，ガスエンジンや蓄電池の非線形特性は，モデル化誤差として間接的に扱うだけであったが，それらの非線形特性を陽に考慮に入れた設計は今後の課題である．

参考文献

- 1) 合田，諸住，スマートグリッド教科書，インプレスジャパン (2011)
- 2) M. Green and D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice Hall (1995)
- 3) T. Hornik and Q.-C. Zhong, A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on H^∞ and repetitive control, *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, pp. 943–952 (2011)
- 4) 小島，古塩，中村，マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検証，電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 2, pp. 429–436 (2008)
- 5) OECD/IEA, *Energy Technology Perspectives 2010*, OECD/IEA (2010)
- 6) 佐々木ほか，連系点潮流制御下におけるマイクログリッド内の自然変動エネルギーの導入量評価手法，電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 1, pp. 102–109 (2009)
- 7) 千住ほか，同期発電機の軸ねじれ振動抑制と AVR 性能を考慮した分散型電源の同時同量制御，電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 1, pp. 75–82 (2008)
- 8) 下田ほか，マイクログリッドにおける負荷変動解析と電源周波数特性評価を用いた複数分散型電源の制御戦略と設備容量設計法，電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 12, pp. 1553–1559 (2009)
- 9) S. Yang et al., A robust control scheme for grid-connected voltage-source inverters, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 1, pp. 202–212 (2011)
- 10) 横山，スマートグリッド，日本電気協会新聞部 (2010)
- 11) R. Zamora and A. K. Srivastava, Controls for microgrids with storage: review, challenges, and research needs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 2009–2018 (2010)