

# エネルギーマネジメントシステムにおける電力需給バランス制御

Power Balancing Control for Energy Management Systems

宮崎 誠也  
Seiya Miyazaki

工藤 貴弘  
Takahiro Kudoh

永原 正章  
Masaaki Nagahara

林 直樹  
Naoki Hayashi

山本 裕  
Yutaka Yamamoto

## 要 旨

本稿では、太陽光発電や家電などの電力変動に対して創蓄エネルギー機器により電力の需給バランスを安定化するための制御方法を提案する。提案するエネルギーマネジメントシステムでは、ベース電力の供給源としてコージェネレーションシステムを用い、急激な電力変動に対して応答速度の速い蓄電池を用いる。ここでその制御設計は需給バランスの性能だけでなく、蓄電池の寿命に関係する蓄電容量の維持や、制御の安定性に関するロバスト性など複数の要素を考慮する必要がある。本稿では、このような複数の目的をもつ制御問題に対して効果的な最適化手法である $H^\infty$ 制御理論を適用し、実験結果を通して提案手法の有効性を示す。

## Abstract

In this article, we propose a control method utilizing energy equipment to stabilize the power balance against fluctuations caused by photovoltaic systems, home appliances, etc. This energy management system consists of a cogeneration system as a base power source and a battery system as a quick-response power source. As for the control design, it is necessary to consider a number of aspects other than just power balancing performance, such as maintaining battery capacity which is related to battery life, robustness which is related to control stability, etc. For such multi-objective control problems, we apply  $H^\infty$  control theory which offers a unified method with efficient numerical optimization. The experimental results of the system are shown to illustrate the effectiveness of the proposed method.

## 1. はじめに

温室効果抑制のためのCO<sub>2</sub>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[1]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<sub>2</sub>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政策をとることにより、発電時のCO<sub>2</sub>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。

これらの背景のもと、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[2][3]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[2][4]と呼ばれる。マイクログリッドとは、太陽光発電やコージェネレーションシステム、蓄電池などの分散型電源と負荷とが組み合わされた小規模系統であり、既存の商用電力系統から独立して、また

は一点連系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、電力需要に合わせて最適制御を行うエネルギーマネジメントシステムを導入することで、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系され運用される。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の再生可能エネルギーは、その供給量が天候などによって大きく変動するため、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コージェネレーションシステム (以下、コージェネレーションシステムの代表例としてガスエンジンを例に示す) を用いて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、これまでさまざまな研究が行われている [4][5][6][7]。小島ら[5]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]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) の変化量抑制も同時に達成する制御系を提案している。さらに、下田ら[7]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 (Proportional-Integral-Derivative) 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。

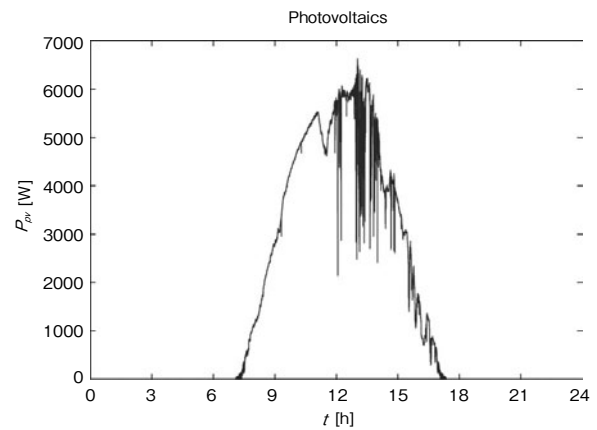
そこで本研究では、そのような試行錯誤が不要で、最悪ケースにおける最適性も保証される $H^\infty$ 制御[8]を導入し、電力の需給バランス制御と蓄電池のSOC変化量抑制制御を同時に達成する制御器を設計することを提案する。 $H^\infty$ 制御は制御対象の不確定な部分を設計時に陽に考慮することが可能で、そのことによりPID制御などと比較しノイズに対して強いロバストな制御器を設計できることが特長である。

また、統合カスケード制御[7]のように、時定数の長いガスエンジンは入力信号のうち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もつシステムを前提とする。電力制御に $H^\infty$ 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[9]はガスタービン発電機の制御に $H^\infty$ 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 $H^\infty$ 制御を導入する研究も報告されている[10][11]。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 $H^\infty$ 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、本稿で考察するエネルギーマネジメントシステムの制御モデルならびに制御問題を第2章に示す。この制御問題は、第3章において $H^\infty$ 制御問題として定式化され、制御器の設計法が示される。提案手法による制御系の有効性を検証するために、第4章でシミュレーション結果を、第5章で実機による実験結果を示す。最後に、第6章にて本稿のまとめ、および今後の課題について述べる。

## 2. エネルギーマネジメントシステムのモデル

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系し運用されるマイクログリッドにお



第1図 太陽光発電電量 $P_{pv}$  (24時間)

Fig. 1 Photovoltaic power generation  $P_{pv}$  (24 h)

るエネルギーマネジメントシステムを考察する。

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。第1図に太陽光発電の24時間の発電量、第2図に負荷の24時間の電力消費量の一例を示す。

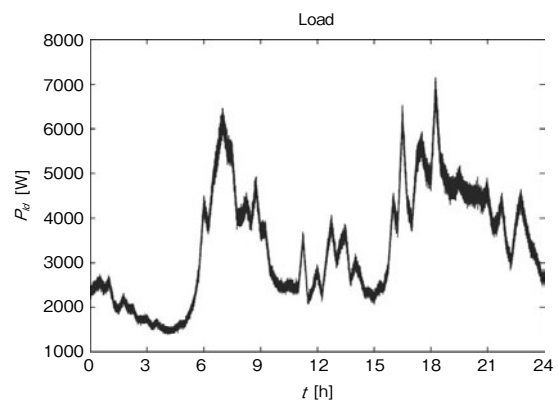
蓄電池とガスエンジンは文献[6]などと同様に、1次系でモデル化する。すなわち、蓄電池の伝達関数 $G_{bt}(s)$ とガスエンジンの伝達関数 $G_{ge}(s)$ をそれぞれ

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

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

とする。ここで、蓄電池の時定数は0.1 s、ガスエンジンの時定数は10 s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。後の章で述べるように、筆者が提案する制御方式はこの応答の速さの違いを積極的に考慮する。

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



第2図 負荷の電力消費量 $P_{ld}$  (24時間)

Fig. 2 Load power consumption  $P_{ld}$  (24 h)

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。

$$P_{net}(t) = P_{ld}(t) - P_{bt}(t) - P_{ge}(t) - P_{pv}(t), \quad t \geq 0 \dots \dots \dots (2)$$

本稿で考えるマイクログリッドの需給バランス制御は、電力買入れ目標値 $P_{ref}(t)$ が与えられたとき、追従誤差 $e(t)$ 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 $P_{bt}(t)$ と $P_{ge}(t)$ を制御する問題として以下で定式化される。

$$e(t) = |P_{ref}(t) - P_{net}(t)|, \quad t \geq 0 \dots \dots \dots (3)$$

### 3. 蓄電池とガスエンジンの $H^\infty$ 制御

本稿で提案する制御系を、第3図に示す。この図において、

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

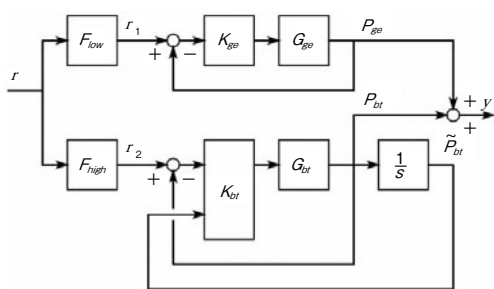
$$y(t) = P_{bt}(t) + P_{ge}(t), \quad t \geq 0 \dots \dots \dots (4)$$

であり、(2)と(3)より、需給バランス制御の問題は、

$$e(t) = |r(t) - y(t)|, \quad t \geq 0 \dots \dots \dots (5)$$

を小さくする、すなわち、電力信号 $y$ を入力される電力信号 $r$ に追従させることである。

第3図のシステムに印加する電力信号 $r$ には、第1図や第2図に示すような電力信号が含まれるため、さまざま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



第3図 マイクログリッド制御系  
Fig. 3 Microgrid control systems

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。

$$F_{low}(s) = \frac{1}{T_c s + 1}, \quad F_{high}(s) = \frac{T_c s}{T_c s + 1} \dots \dots \dots (6)$$

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。

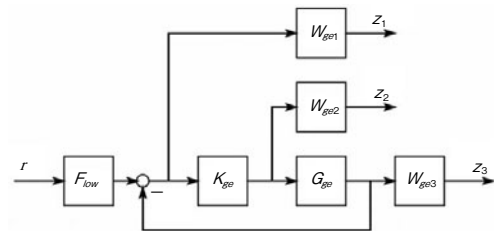
さらに、蓄電池の残容量が大きく変化することは蓄電池の寿命を縮めることになるので望ましくない。したがって、これを抑制するために、蓄電池の残容量もフィードバックする。本稿では第3図で示すように、蓄電池残容量 $\tilde{P}_{bt}$ を蓄電池の充電量 $P_{bt}$ の積分値で表す。

制御器 $K_{ge}$ と $K_{bt}$ は $H^\infty$ 制御により設計する。第4図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、 $W_{ge1}$ 、 $W_{ge2}$ 、 $W_{ge3}$ は重み関数であり、制御器の特性を決定する役割がある。定性的には、 $W_{ge1}$ のゲインを大きくすると目標値に対する追従性が向上し、 $W_{ge2}$ のゲインを大きくするとコントローラ $K_{ge}$ のゲインが抑制されることでゲイン余裕が向上し、 $W_{ge3}$ のゲインを大きくするとモデル化誤差に対するロバスト性が向上する。また、重み関数は伝達関数形式で表現され、その重みを周波数領域で設計することができる。本制御器設計では、 $W_{ge1}$ 、 $W_{ge2}$ 、 $W_{ge3}$ を以下のように設定する。

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

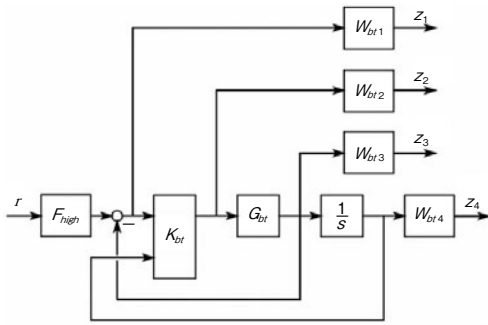
$$W_{ge3}(s) = 0.01 \frac{\frac{5}{2\pi}s}{\frac{5}{2\pi}s + 1} \dots \dots \dots (7)$$

第4図において、入力 $r$ から出力 $z = [z_1, z_2, z_3]^T$ へのシステムの $H^\infty$ 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 $H^\infty$ 最適制御問題であり、例えばMATLABのRobust Control Toolboxにおけるhinfsynコマンドを使えば容易に制御器を求めることができる。



第4図 ガスエンジン制御器設計のためのブロック線図  
Fig. 4 Block diagram of gas engine controller design

特  
集



第5図 蓄電池制御器設計のためのブロック線図  
Fig. 5 Block diagram of battery controller design

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、第5図に示す。ここで、重み関数 $W_{bt1}$ ,  $W_{bt2}$ ,  $W_{bt3}$ の定性的な役割はそれぞれ $W_{ge1}$ ,  $W_{ge2}$ ,  $W_{ge3}$ の役割と同一であり、 $W_{bt4}$ は $W_{bt4}$ を大きな値にすると蓄電池の残容量を抑制する役割がある。本制御器設計では、 $W_{bt1}$ ,  $W_{bt2}$ ,  $W_{bt3}$ ,  $W_{bt4}$ を以下のように設定する。

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

$$W_{bt3}(s) = 0.01 \frac{0.5}{2\pi}s}{\frac{0.5}{2\pi}s + 1}, \quad W_{bt4}(s) = 0.01 \cdots \cdots (8)$$

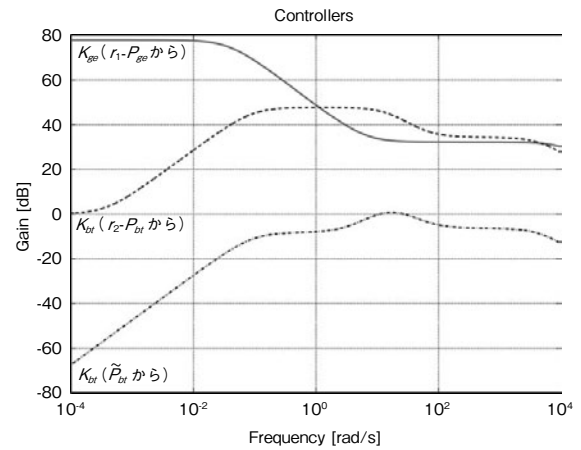
第5図において、入力 $r$ から出力 $z = [z_1, z_2, z_3, z_4]^T$ へのシステムの $H^\infty$ ノルムを最小化する制御器 $K_{bt}$ を求める。この問題も標準的な $H^\infty$ 最適制御問題であり、前述の方法により容易に制御器を求めることができる。

#### 4. 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い、提案手法の有効性を検証する。

前節で示した $H^\infty$ 制御設計によって得られた制御器のゲイン線図を、第6図に示す。なお、 $K_{bt}$ は2入力1出力であるため、 $r_2$ - $P_{bt}$ からのゲインと $\tilde{P}_{bt}$ からのゲインをそれぞれ破線と鎖線で示している。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もち、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もつ。

次にマイクログリッドの発電シミュレーションを行う。第1図・第2図において、比較的変動の激しい時間帯である16:30から17:00における30分間のガスエンジンと蓄電池の出力および買い入れ電力目標値と実際の買い

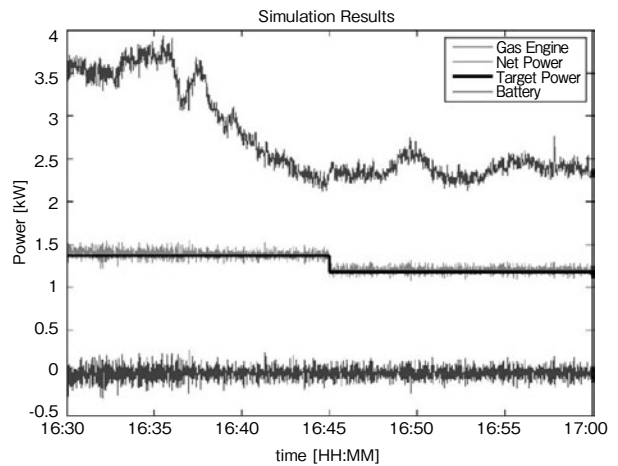


第6図  $H^\infty$ 制御器のゲイン線図  $K_{ge}$  (実線),  $K_{bt}$  (破線, 鎖線)  
Fig. 6 Magnitude plot of  $H^\infty$  controller  $K_{ge}$  (solid line),  $K_{bt}$  (dashed line, chained line)

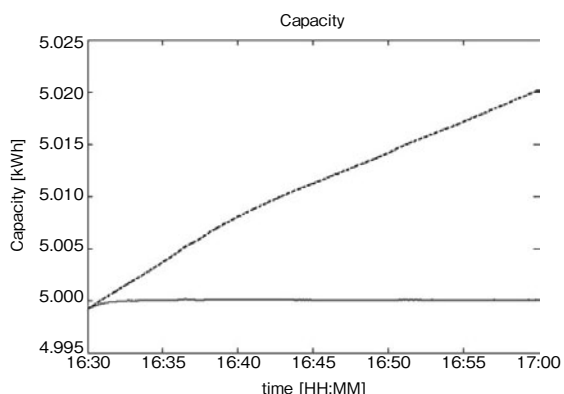
入れ電力値を、第7図に示す。ガスエンジン(図の一番上)は負荷の大きな変動に追従し、蓄電池(図の一番下)は0 kW前後で急激な変動に追従している。その結果、買い入れ電力値(図の中央)は目標値(図の中央の直線)に一致していることがわかる。

30分間の買い入れ電力目標値に対する誤差(30分同時量値)は、目安として電力事業者間の一般的な取り決めである3%の許容範囲に収まる必要がある。上記シミュレーションでは誤差は1.58%であり、許容範囲に収まる。

次に、蓄電池の残容量を考慮することによる効果について、蓄電池の残容量を考慮しない制御器との比較を行い検討する。蓄電池の残容量を考慮しない制御器とは、第3図において、残容量 $\tilde{P}_{bt}$ をフィードバックしない制御



第7図 30分間のシミュレーション結果  
Fig. 7 Simulation results for 30 minutes

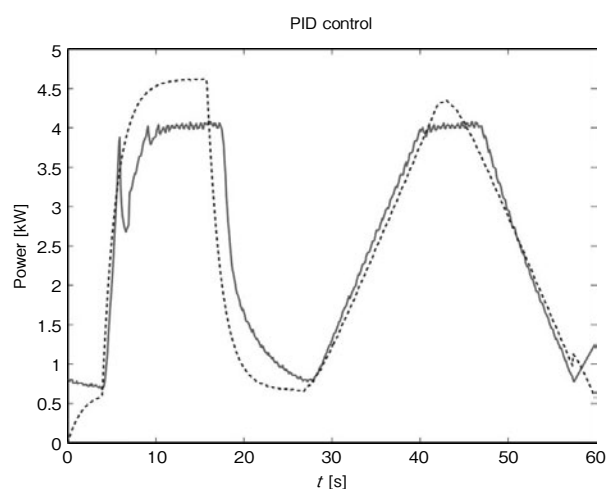


第8図 蓄電池残容量：残容量を考慮した制御（実線）と考慮しない制御（破線）

Fig. 8 Capacity: capacity feedback control (solid line) and no capacity feedback control (dashed line)

器である。

前記シミュレーションと同条件において、蓄電池の残容量を考慮しない制御器の30分間の買い入れ電力目標値に対する誤差は2.11%となり、残容量を考慮する制御器と大差ない。一方、蓄電池の残容量は第8図に示すように、蓄電池の残容量を考慮した制御において蓄電池の容量の変化が抑えられ初期容量である5 kWhの付近で動作しているが、残容量を考慮しない場合は誤差が蓄積され初期容量から乖離（かいり）していく様子が見られる。



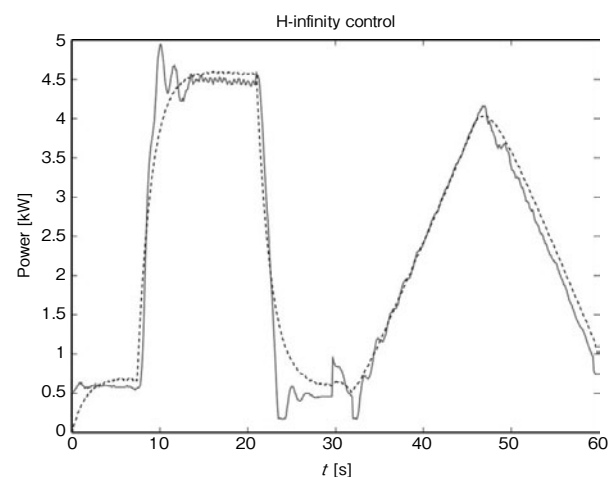
第9図 ガスエンジンのPID制御の追従性：ガスエンジンの発電量（実線）と指令値（破線）

Fig. 9 PID control of gas engine output (solid line) and reference (dashed line)

## 5. 実機実験による検証

本節では、 $H^\infty$ 制御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、提案手法の有効性を検証する。実機実験では、10 kWの太陽電池および10 kWの鉛蓄電池・5 kWのガスエンジン・8 kWの負荷装置を用いる。

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変動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。第9図にPID制御器によるガスエンジン制御の実験結果を、第10図に $H^\infty$ 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、 $H^\infty$ 制御は高い追従性能を示していることがわかる。



第10図 ガスエンジンの $H^\infty$ 制御の追従性：ガスエンジンの発電量（実線）と指令値（破線）

Fig. 10  $H^\infty$  control of gas engine output (solid line) and reference (dashed line)

## 6. まとめ

本稿では、太陽光発電と負荷、コージェネレーションシステムと蓄電池が組み合わされたエネルギーマネジメントシステムにおける電力需給バランス制御に $H^\infty$ 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機実験により提案手法の有効性を示した。本稿では、コージェネレーションシステムの給湯制御や蓄電池の計画的な制御との連携については省いたが、それらの制御も含めた安定性評価は今後の課題である。

## 参考文献

- [1] OECD/IEA, "Energy technology perspectives 2010," OECD/IEA, 2010.
- [2] 合田忠弘 他, "スマートグリッド教科書," インプレスジャパン, 2011.
- [3] 横山明彦, "スマートグリッド," 日本電気協会新聞部, 2010.
- [4] R. Zamora et al., "Controls for microgrids with storage: review, challenges, and research needs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp.2009–2018, 2010.
- [5] 小島康弘 他, "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.
- [6] 佐々木勇太 他, "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方法," *電気学会論文誌B*, vol.129, no.1, pp.102–110, 2009.
- [7] 下田英介 他, "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.
- [8] M. Green et al., "Linear robust control," Prentice Hall, 1996.
- [9] 千住智信 他, "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.75–83, 2008.
- [10] T. Hornik et al., "A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on  $H^\infty$  and repetitive control," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.26, no.3, pp.943–952, 2011.
- [11] S. Yang et al., "A robust control scheme for gridconnected voltage-source inverters," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.58, no.1, pp.202–212, 2011.

## 執筆者紹介



宮崎誠也 Seiya Miyazaki  
パナソニック (株) エナジーソリューション  
開発センター  
Energy Solutions Development Center, Panasonic  
Corp.  
博士 (工学)



工藤貴弘 Takahiro Kudoh  
パナソニック (株) エナジーソリューション  
開発センター  
Energy Solutions Development Center, Panasonic  
Corp.



永原正章 Masaaki Nagahara  
京都大学 大学院情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Kyoto University  
博士 (情報学)



林 直樹 Naoki Hayashi  
京都大学 大学院情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Kyoto University  
博士 (工学)



山本 裕 Yutaka Yamamoto  
京都大学 大学院情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Kyoto University  
Ph.D.