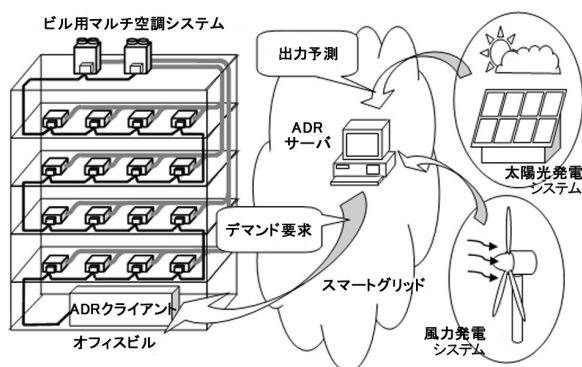


ビル用マルチ空調システムへの新高速デマンド制御

Fine-time-granularity Fast Demand Control of Building HVAC Facilities for Future Smart Grid



森川 純次*1
Junji Morikawa

近藤 成治*2
Seiji kondo

五十住 晋一*3
Shinichi Isozumi

蜷川 忠三*4
Chuzo Ninagawa

リアルタイムの高速デマンド制御は、再生可能エネルギーを備えた未来のスマートグリッドにおいて、変動の大きな再生可能エネルギーを補償する技術として期待されている。最近のビル用マルチ空調システム(以下、空調システム)は精巧な冷媒流量調整装置を使用しているの、これを用いて、従来の ON/OFF 調整のような粗く遅いデマンド制御に代わる短時間対応(5 分程度)の高速デマンド制御(以下、新高速デマンド制御)を提案する。しかしながら、空調システムの制御は非常に複雑で扱いが困難である。これを解決する手段として、我々は統計的予測数式モデルを使用し、5 分後の電力を予測することを考えた。数式モデルを使用した実証試験にて新高速デマンド制御の有効性を示すことに成功した。

1. はじめに

未来のスマートグリッドは、再生可能エネルギー由来の太陽光発電システムや風力発電システムと強い相互連携を持っていることが予想される。これらの再生可能エネルギーは、瞬間的な天候変化に依存して出力電圧が変動することでも知られている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。巨大な量のバッテリーを使用することで、この変動を補償することは可能であるが、未来の大規模な再生可能エネルギーの相互連携を想定した場合、莫大な費用が必要となることは容易に想像できる。バッテリーだけに依存せず、変動の大きな再生可能エネルギーを補償するためには、効率の良い高速なデマンド制御は最も有力な答えの一つである⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。

スマートグリッドの分野において、オフィスビルの空調システムは、需要側の電力管理を実施する有効な手段として有名である。これまでも、空調システムのデマンド制御は広く研究されてきた。また、統計的予測数式モデル(AR モデル)を使ったデマンド制御について、多くの研究が行われてきた⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

しかしながら、短時間(例えば、5 分間隔)で空調システムの消費電力を予測し、制御するための研究発表は少ない。多くの予測数式モデルや制御方法は、主として長い平均時間を必要とする電源の ON/OFF を基本とした制御メカニズムであった。多くの研究者が、短時間対応のデマンド制御を未来のリアルタイム電気料金対応や動的なデマンド制御⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾のために必要であると指摘している⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。

オフィスビルの空調システム⁽²⁰⁾は、日本、アジア、欧州、その他の国々の中規模ビルで広く導

*1 機械・設備システムドメイン 冷熱事業部 空調機技術部

*2 機械・設備システムドメイン 冷熱事業部 空調機技術部 課長

*3 機械・設備システムドメイン 冷熱事業部 冷熱営業部 主席技師

*4 岐阜大学 工学部 電気電子工学科 教授 博士

入されている。空調システムは、精巧な冷媒流量制御装置を使っており、この冷媒流量制御装置を連続的に変化させることによって、新高速デマンド制御を実現することが可能と考える。

本稿では、空調システムのための新高速デマンド制御の仕組みを提案する。空調システムの消費電力(5分間隔)のARモデルをフィールドテストデータから構築する。そして、予測と制御計算はクラウドコンピューティングで実行するシミュレーションにより実施される。新高速デマンド制御の仕組みは、相互連携した再生可能エネルギーを含む未来のスマートグリッドにおいて需要と供給の間をリアルタイムに調和させる仕組みの一つになると考える。

2. 未来のスマートグリッドにおけるビルのデマンド制御

図1にスマートグリッドにおける空調システムの新高速デマンド制御の考えを示す。図中では1棟のビルのみが描かれているが、実際は、多棟のビルを制御することも考えられる。ADR^{*1} クライアント機能を持つゲートウェイは、再生可能エネルギーの瞬間的な電力変動を補償するためにDRAS^{*2}と通信する。

我々の目的は、電力変動を補償することをバッテリーだけに頼らないことであるが、それは、新高速デマンド制御によって高速な応答を行う設備を開発することでもある。

空調システムは、一般的にいくつかの室外ユニットと多くの室内ユニットで構成されている。空調機の冷房サイクルにおいて、室外ユニットは冷媒を凝縮させる機器であり、室内ユニットは、冷媒を蒸発させる機器である。室外ユニットは、屋上に設置されることが多く、室内ユニットは、各部屋の天井に埋め込まれることが多い。設備の電源は室外ユニットへ供給される。その電源を使い、室外ユニットが冷媒を圧縮し、室内ユニットへ分配する。一般的な空調システムは、3分程度の温度慣性を持っている。それゆえに、3分以下の時間粒度で制御することは意味をなさない。加えて、電力量計のパルスカウンタの分解能を考慮すると、本稿では、制御間隔を5分とすることが適当であると考えた。

*1 ADR:Automated Demand Response

*2 DRAS:Demand Response Automation Server

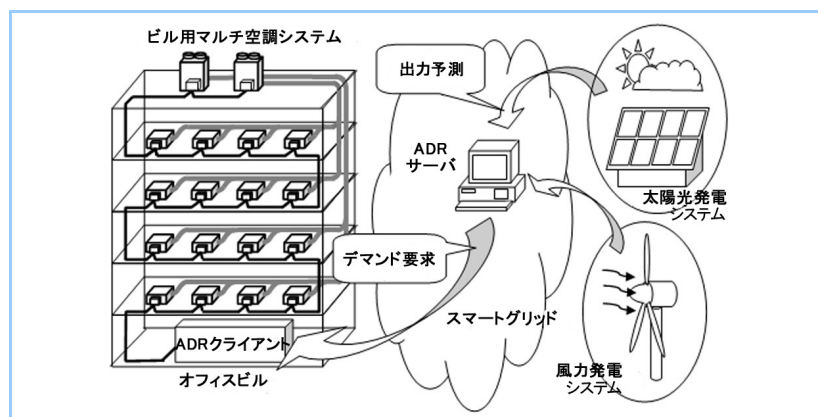


図1 新高速デマンド制御を実現するためのマルチ空調システムの構造

図2は空調システムにおける冷媒回路の概念図である。室外ユニットは、インバータ駆動のコンプレッサ、熱交換器、およびコントローラを内蔵している。各室内ユニットは、熱交換器、送風ファン、電子膨張弁、およびコントローラを内蔵している。室内ユニットは、室内の熱負荷に合わせて熱交換器への冷媒流量を加減するため、電子膨張弁(EEV)を調整する。

各室内ユニットは定期的に室外ユニットへ要求流量を送信する。室外ユニットは定期的にこれらの要求をまとめて、コンプレッサの回転数を変更することで合計流量を調整する。その後、室外ユニットは、各室内ユニットへ応答流量を配給する。各室内ユニットは、応答流量の値により電子膨張弁の開度を調整する。ゲートウェイは、デマンド制御を行うため、DRASからのデマンド要求に対応する。また、膨張弁開度を調整する室内ユニットの優先順位を決定するため各ユニットと通信を行う。

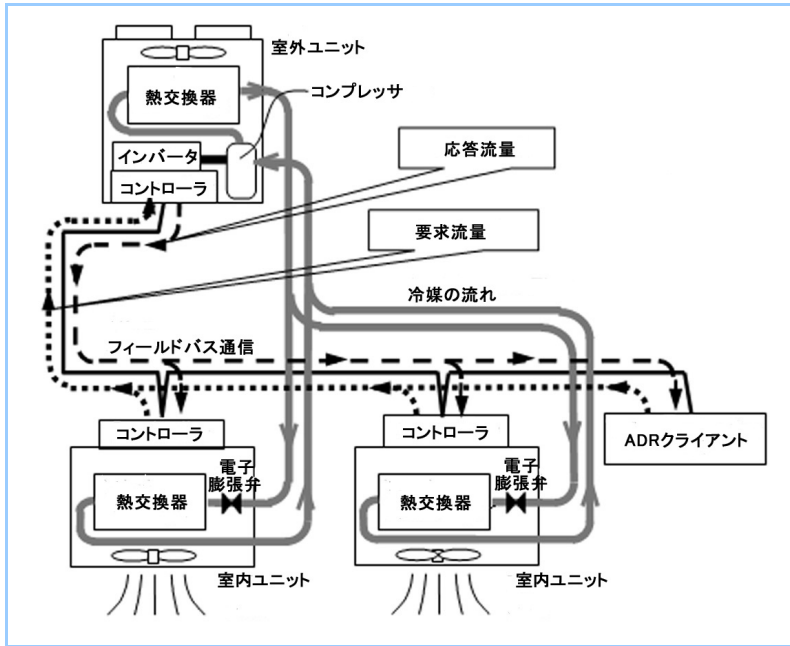


図2 マルチ空調システムの冷媒回路制御の構造図

3. 短時間対応の AR モデル

我々の提案する AR モデルは、4つの状態変数を用いる。すなわち、瞬時消費電力 $P_{A5}(k)$ 、室外気温 $T_{O5}(k)$ 、室内ユニット称呼容量により加重平均した設定温度 $T_{S5}(k)$ 、5分間の総冷媒流量 $F_{R5}(k)$ である。これらの状態変数を導入し、AR モデルシステム方程式を式(1)に定義する。

$$\begin{bmatrix} P_{A5}'(k) \\ * \\ * \\ * \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^L \begin{bmatrix} A^{(l)}_{11} & A^{(l)}_{12} & A^{(l)}_{13} & A^{(l)}_{14} \\ A^{(l)}_{21} & A^{(l)}_{22} & A^{(l)}_{23} & A^{(l)}_{24} \\ A^{(l)}_{31} & A^{(l)}_{32} & A^{(l)}_{33} & A^{(l)}_{34} \\ A^{(l)}_{41} & A^{(l)}_{42} & A^{(l)}_{43} & A^{(l)}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{A5}(k-l) \\ T_{O5}(k-l) \\ T_{S5}(k-l) \\ F_{R5}(k-l) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{PA5}(k) \\ U_{TO5}(k) \\ U_{TS5}(k) \\ U_{FR5}(k) \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

k は5分ごとにカウントする整数値、 l は遅れを表す整数値、 L は AR モデルの次数、 $A^{(l)}_{11}, A^{(l)}_{12}, \dots, A^{(l)}_{44}$ は AR 係数マトリクスの要素であり、 $U_{PA5}(k), U_{TO5}(k), U_{TS5}(k), U_{FR5}(k)$ は予測誤差を表す。 $P_{A5}'(k)$ は5分後の消費電力の予測値を意味している。

はじめに、総冷媒流量を表す独自の状態変数 $F_{R5}(k)$ について式(2)に示す。

$$F_{R5}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M F_{Rn}(t_m) \quad \text{式(2)}$$

$n=1, 2, \dots, N$ は、室内ユニットの数であり、 $t_m = t_1, t_2, \dots, t_M$ は、5分間の計量サンプリング時間を示す。例えば、 $M=5$ の場合、計量サンプリング時間 t_m は1分ごととなる。

次に、室内ユニットの称呼容量を使用して加重平均した5分間の設定温度 $T_{S5}(k)$ を導入した。 $T_{S5}(k)$ は式(3)の方程式によって与えられる。

$$T_{S5}(k) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M R_n(t_m) C_n T_{Sn}(t_m)}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M R_n(t_m) C_n} \quad \text{式(3)}$$

C_n は室内ユニットの称呼容量である。 $R_n(t_m)$ は任意の室内ユニット n の運転/停止状態を表すものであり、式(4)のように与える。

$$R_n(t_m) = \begin{cases} 1 & (\text{nth indoor unit is ON at } m\text{th sampling}) \\ 0 & (\text{nth indoor unit is OFF at } m\text{th sampling}) \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

4. 実証試験

表1は、データ測定のためにフィールドテストで使用するビルの概要である。新高速デマンド制御の考えは、より大規模なビルの場合に特に有効であるが、このビルは、我々の研究を適用して、有効性を評価するためには十分な大きさである。

表1 フィールドテスト用ビルの概要

項目	仕様
ビルの種類	一般的なオフィスビル
総床面積	5000 m ²
建物の構造	鉄筋コンクリート
建物内にある室内ユニットの数	30 台

図3は、2008年8月2日の7:00から19:00までの5分間隔($k=1, 2, \dots, 144$)の計測時系列データを示す。瞬時消費電力 $P_{A5}(k)$ は、室外ユニットに電力量計を設置し、出力パルスをカウントすることで測定した。5分間隔の室外気温 $T_{O5}(k)$ は気象庁から得られたデータである。各室内ユニットの設定温度を観測し、加重平均設定温度 $T_{S5}(k)$ を計測した。また、各室内ユニットの電子膨張弁開度は、連続的に計測を実施し、総冷媒流量 $F_{R5}(k)$ もまた計測により得られた。ARモデル係数マトリクスは、のちに別のコンピュータによって計算したものである。未来のスマートグリッドにおいて実際には、データのサンプリング、保存、記憶はクラウドコンピューティングで構築したSaaS(オンデマンド型ソフトウェアサービス)などで実施することを想定している。また、ARモデルの次数 $L=2$ であり、AR係数マトリクス $A^{(l)}_{11}, A^{(l)}_{12}, \dots, A^{(l)}_{44}$ は、Yule-Walker方程式を使ったコンピュータ計算によって求めた。

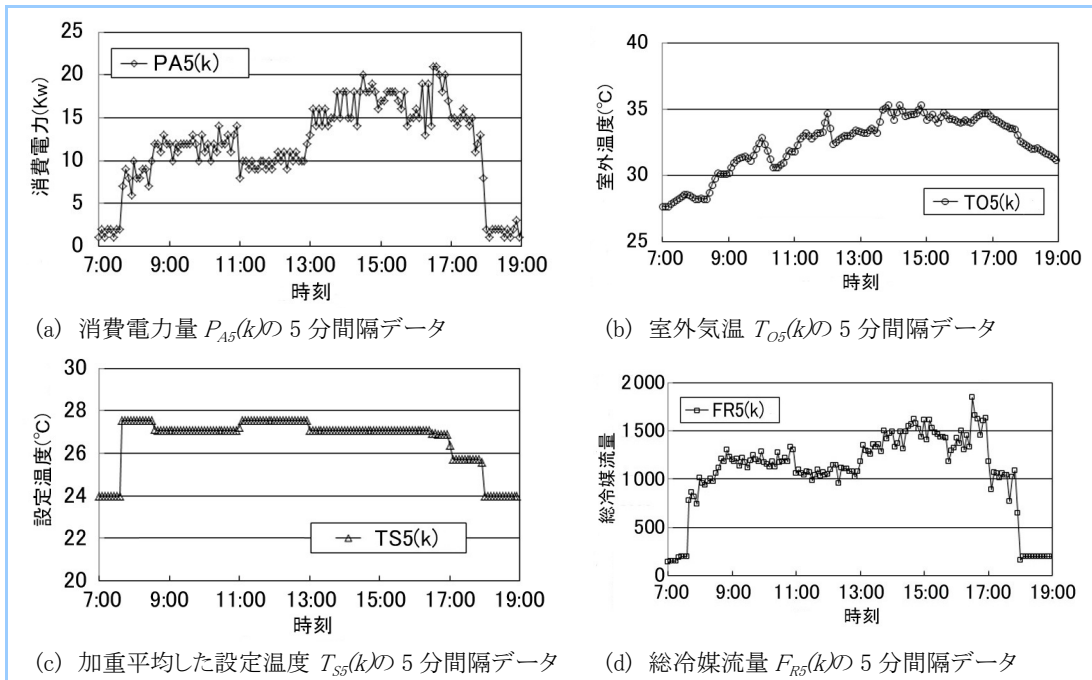


図3 7:00 から 19:00 までの5分間隔の計測時系列データ

図4は、7:00から19:00までの計算で予測した5分間隔の消費電力を示す。また、この図に測定値も重ねて表示する。計算値と実測値は、全体的によく一致している。図5は詳細比較のため電力使用の多い昼過ぎの時間帯で図4を拡大したものである。図5を見ると、計算値は測定値に比べて急な変化が少ない。ARモデル予測計算において、予測値は、ARモデル係数を用いて、いくつかの過去の値の線形結合により得られる。他の言葉で言い換えると慣らし効果と呼ばれ、予測値は測定値のように急な変化はしない。ARモデルはいくつかの直前の値から次の値を予測しているため、極端に急な変化があると、これを予測することは本質的に困難である。

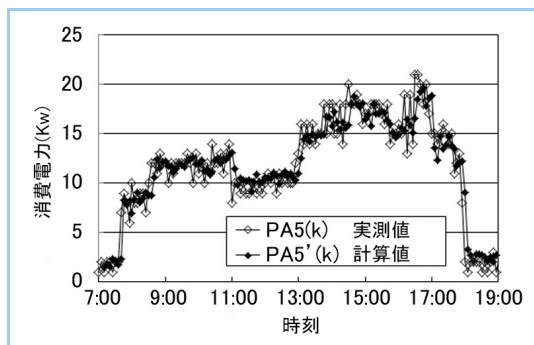


図4 7:00~19:00 における消費電力量の時系列データ(計算値と実測値の比較)

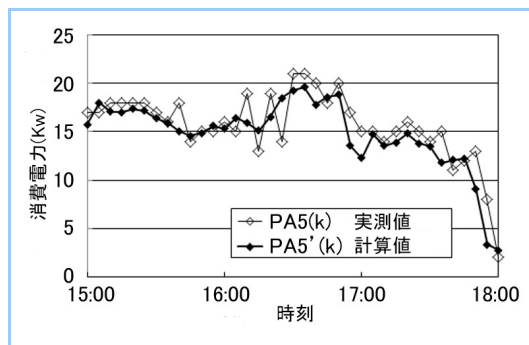


図5 15:00~18:00 における5分間隔の時系列データ(図4の拡大図)

図6は、高速デマンド制御を想定して、試験的に実施した予測計算の結果を示している。スマートグリッドからデマンド要求が16:00から16:55に実施されたと仮定し、5分間の消費電力を総冷媒流量 $T_{R5}(k)$ が減少したものと計算した。抑制の影響が制御期間の開始から効果的に素早く反応していることが分かる。予測計算の定量的な評価は実施できていないが、我々はさらに冷媒制御と予測計算の精度を向上させる計画である。

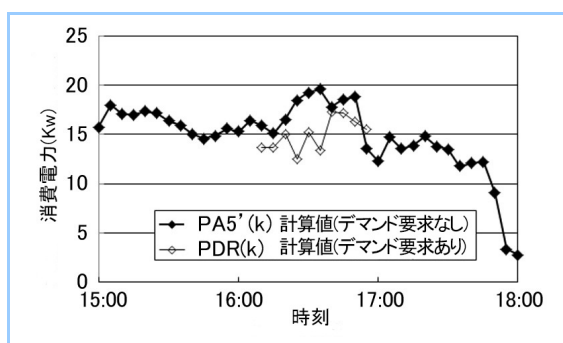


図6 デマンド要求を仮定して消費電力を抑制した場合の予測値

5. 考察

表2に空調システムの従来のデマンド制御と我々の新高速デマンド制御を比較して示す。従来のデマンド制御は、主として運転のON/OFF状態を切り換えることで調整している。新高速デマンド制御は冷媒流量を連続的に調整する。これは、全体設備の瞬時消費電力を素早く反応させるものであり、その結果、我々の方法では空調システムを不必要に過度に停止させることがない。

大規模な再生可能エネルギーの相互連携において、再生可能エネルギーの発電は、時に10分程度の間で著しく変動する。なぜならば、太陽光発電においては日照が、風力発電においては風速が短時間で急変するためである。従来のデマンド制御技術は、30分の時間範囲を基準としているため、電力抑制では、10分のようなタイムリーな補償ができなかった。我々の新高速デマンド制御技術は、需要家側の正確で素早い応答を可能とし、リアルタイム料金制度などを実現するため役立つと考える。

表2 従来のデマンド制御と新高速デマンド制御の比較

	従来	新高速デマンド制御
予測の時間粒度	1/2~1時間	1~5分
ADR への応答速度	遅い	速い
制御の精度	過剰に停止させる可能性のある粗い制御	快適性を考慮した細かい(5分程度の短時間対応)制御
制御方法	ON/OFF 制御	継続的なフィードバック制御
電力抑制メカニズム	サーモによる ON/OFF の割合	電子膨張弁開度の調整
制御に要求されるレベル	低い	高い
実施形態	組込み CPU で制御	クラウドコンピューティングで制御

6. まとめ

本研究において、以下の結果を得ることができた。

- (1) 空調システムの新高速デマンド制御を提案した。
- (2) ビル全体の空調システムにおいて5分間隔の消費電力の AR モデルをフィールドテストデータから導出した。
- (3) デマンド要求を想定し、5分間隔で連続的にデマンド制御を実施したと仮定すると、計算結果では、効果的で高速なデマンド応答を示すことができた。

提案する新高速デマンド制御は、大規模な再生可能エネルギーと相互連携したリアルタイム電気料金制度や仮想発電所のような未来のスマートグリッド構想に役立つだろう。

参考文献

- (1) S.Chu, "Investing in our energy future," in GridWeek talk, http://www.energy.gov/news2009/documents2009/Secretary_Chu_Gred.Week.pdf, page 11, Sept 2009.
- (2) S.Chen, H.Gooi, and M.Wang, "Sizing of energy storage for microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol.3, No.1, pp.142-151, 2012.
- (3) H. Kanchev, D. Lu, F. Colas, V. Lazarov, and B. Francois, "Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4583-4592, 2011.
- (4) M. Damm, S. Mahlkecht, C. Grimm, T. Bertenyi, T. Young and C. Wysoudil, "A partially decentralised forecast-based demand-side-management approach," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (5) P. MacDougall, C. Warmer, and K. Kok, "Mitigation of wind power fluctuations by intelligent response of demand and distributed generation," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (6) A.Abdollahi, M.Parsa, M.Rashidinejad, and M.Kazem, "Investigation on economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol.3, No.1, pp.12-19, 2012.
- (7) J.Medina, N.Muller, and I.Roytelman, "Demand response and distribution grid operations: opportunities and challenges," *IEEE Tran. on Smart Grid*, Vol.1, No.2, pp.193-198, 2010
- (8) Z.Zhou, and F.Zhao, and J.Wang, "Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol.2, No.4, pp.580-588, 2010.
- (9) C. Ninagawa and T. Sato, "Remote monitoring integrated state variable for AR model prediction of daily total building air-conditioning power consumption," *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, pp. 611-612, 2010.
- (10) C. Ninagawa and T. Sato, "Remote monitoring integrated state variable for AR model prediction of daily total building air-conditioning power consumption," *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, pp. 611-612, 2010.
- (11) H. Mori and A. Takahashi, "Hybrid intelligent model of relevant vector machine and regression tree for probabilistic load forecasting," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (12) N. Amjady, F. Keynia, and H. Zareipour, "Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (13) J. L. Mathieu, P. N. Price, S. Kiliccote, and M. A. Piette, "Quantifying changes in building electricity use with application to demand response," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 3, pp. 507-518, 2011.
- (14) S. Paoletti, M. Casini, A. Giannitrapani, A. Facchini, A. Garulli, and A. Vicino, "Load forecasting for active distribution networks," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (15) A. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 236-242, 2010.
- (16) P. Nyeng and J. Ostergaard, "Information and communications systems for control-by-price of distributed energy resources and flexible demand," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, pp. 334-341, 2011.
- (17) Z. Cstvei, J. Ostergaard, and P. Nyeng, "Controlling price-responsive heat pumps for overload elimination in distribution systems," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Europe 2011*, Manchester, U.K., Dec. 2011.
- (18) T. Jin and M. Mechehoul, "Ordering electricity via Internet and its potentials for smart grid systems," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 302-310, 2010.
- (19) M.Parvania, J. Fotuhi-Firuzabad, "Demand response scheduling by stochastic SCUC," *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 1, No. 1, pp. 89-98, 2010.
- (20) W.Goetzler, "Variable refrigerant flow systems," *ASHRAE Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 24-31, 2007.