

集合住宅EMSにおける系統安定化制御技術の開発

Development of Control Technology to Stabilize Power in EMS System for Multi-family Residential Complexes

溝 端 竜 也

Tatsuya Mizobata

加 治 充

Mitsuru Kaji

タム ゼン ウー

Tzen Woo Tham

船 倉 正 三

Masami Funakura

渡 辺 健 一

Kenichi Watanabe

垣 内 隆 志

Takashi Kakiuchi

要 旨

筆者らは、電力品質を維持するためのアンシラリーサービス市場に参画可能なシンガポールの集合住宅EMS (Energy Management System) 実現に向けて、1) 蓄電池を利用した周波数調整技術、2) エアコンのデマンドレスポンス制御技術の開発に取り組んでいる。本稿では、シンガポール現地での実証実験の結果を報告する。1) では、蓄電量の過不足なく、7日間連続で周波数制御が可能であることが確認できた。2) では、深夜のデマンドレスポンス制御ではユーザーによるキャンセル率を2.0%に抑制できたが、より大きな電力削減が得られる夜間では24%に至り課題が残ることが確認できた。

Abstract

To realize EMS (Energy Management System) for multi-family residential complexes in Singapore capable of participating in the ancillary services markets, we have developed technologies regarding 1) frequency regulation control using storage batteries, and 2) demand response control using air conditioner control. The developed technologies were evaluated in a pilot system in Singapore. This paper reports on the results. We confirmed that the frequency regulation control was maintained for 1 week with an appropriate state of charge, and the cancel ratio of demand response control was suppressed to under 2.0 % in the early hours of the morning, but in the evening when demand response control can be more effective, the ratio reached 24 %.

1. はじめに

近年、エネルギー資源問題や環境問題の解決のために、再生可能エネルギー（太陽光発電システムなど）の導入が促進されているが、再生可能エネルギーの大量導入による電力系統の不安定化が課題となっている。

電力系統の安定化のため、電力市場のなかには、アンシラリーサービス市場が存在する。アンシラリーサービス市場には、周波数調整市場と予備力市場がある。周波数調整市場は、負荷変動によって発生する系統周波数の変動を調整するための調整余力を取り引きする市場である。予備力市場は、発電機の故障や送配電線の事故などによる電力逼迫（ひっばく）に備えて短時間で発電機の出力を調整する能力や、電力消費機器の消費電力を調整（デマンドレスポンス制御）する能力を、取り引きする市場である。

筆者らは、電力市場の自由化が先行するシンガポールにおけるアンシラリーサービス市場[1]に参画可能な集合住宅EMS (Energy Management System) の実現に向けて、1) 蓄電池を利用した周波数調整技術、2) エアコンのデマンドレスポンス制御技術の開発に取り組んでいる。1) は、蓄電量に応じた有効電力指令を生成することで、充放電による蓄電量の偏りが生じても長期間連続して周

波数調整を実現する技術である。2) は、エアコンのデマンドレスポンス制御による電力削減と快適性維持の両立を実現する技術である。

本稿では開発した制御技術それぞれについて報告する。具体的には、1) 蓄電池を利用した周波数調整技術では、蓄電量が増減しても7日間継続して周波数調整できることを蓄電池実機にて確認した。2) エアコンのデマンドレスポンス制御技術では、10世帯を対象に家庭用エアコンのデマンドレスポンス制御を実施し、電力削減や快適性を評価した。

2. 蓄電池を利用した周波数調整技術

電力系統の周波数は発電機の出力と負荷の不均衡によって変動する。周波数は負荷が増加すると下がり、逆に負荷が減少すると上がる。周波数を適正範囲(たとえば、 $50\text{ Hz} \pm 0.2\text{ Hz}$)に保つように、有効電力指令に従って発電機の出力を制御する周波数調整が行われている。

周波数調整は主に火力発電機で行われるが、火力発電機は機械プロセスの制約を受けるため、周波数変動に対し追従遅れが発生する[2]。蓄電池は火力発電機に比べ高い応答性を備え、有効電力指令に合わせて数百ミリ秒で充放電できるため、火力発電機に比べ少ない容量で効率

的に周波数調整できる[2]. 参考文献[3]では, 電力系統全体で必要となる周波数調整容量に対し, その20%を蓄電池で調整することで, 周波数調整容量を15%削減できるとしている. 米国では, 再生可能エネルギーの出力変動による周波数の変動に対応するために, 近年, 火力発電機より高い応答性を備える専用の大型蓄電池を設置し, 周波数調整に活用している[4].

燃料の補給により周波数調整を継続できる火力発電機と比較し, 蓄電池には蓄電量(以下, SOCとよぶ)の制約があり, 周波数調整を長時間継続できない問題がある. たとえば, 充電(あるいは放電)の有効電力指令が長時間継続したとき, SOCが100%(あるいは0%)に近づいてさらに充電(あるいは放電)できなくなり, 最終的に有効電力指令に追従できず, 電力系統全体の調整余力が不足するリスクがある.

北米では, 長周期変動と短周期変動に分け, 発電機と蓄電池の特徴(応答性, 持続性)に適した有効電力指令をそれぞれ生成し, 各指令に発電機と蓄電池がそれぞれ応答する役割分担を導入して, この問題を解決している[5].

2.1 蓄電池向け有効電力指令の生成方式

当社にて開発した蓄電池向け周波数調整用の有効電力指令の生成方式(以下, 提案方式とよぶ)の特徴を述べる. 提案方式では, SOCに応じた有効電力指令のオフセット(以降, ベースポイントとよぶ)を設定することで, 蓄電池のSOCが100%(あるいは0%)に近づくことを防いでいる. ベースポイントはSOCが低い(高い)ときは充電側(放電側)の値とし, SOCが大きく/小さくなるほどベースポイントの絶対値を大きくする. なお, ベースポイントを設定した場合, 有効電力指令がオフセットされ, 定格出力で充放電しない期間が発生するため, 提案方式ではベースポイントを0とする範囲をSOC 50%付近に設け, 定格出力で充放電しない期間を短くしている.

次に, 具体的な計算方法について説明する.

測定したSOCから(1)式によりベースポイントを算出する. (1)式において, BPはベースポイント, SはSOC, Cは蓄電池の定格出力である. 第1図に示すように, ベースポイントは, SOCが上下限値の範囲内(45%~55%)にある場合は0となり, SOCが0%(100%)のときに充電最大値(放電最大値)の1/2となる. たとえば, 第1図中X点はSOCが100%のときのベースポイントである.

$$BP = \begin{cases} 0 & \text{if } 45 \leq S \leq 55 \\ (S-55)/90 \times C & \text{if } S > 55 \\ (S-45)/90 \times C & \text{if } S < 45 \end{cases} \dots\dots (1)$$

測定した周波数の高周波成分を抽出する. 具体的には, (2)式を用いて, 測定した周波数から, 直近5分で測定した周波数の移動平均を減算する. (2)式において, f_a は周波数の高周波成分, f は測定した周波数, MA は直近5分で測定した周波数の移動平均である.

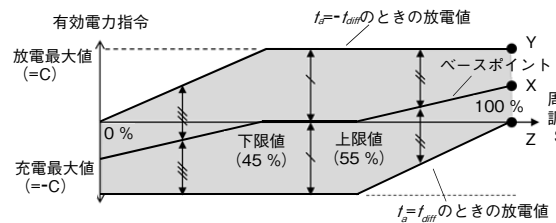
高周波成分は, 移動平均で算出した長周期変動の成分が除去されているため, 長期的に積算値が0に近づく傾向があり, SOCが100%(あるいは0%)に到達して充放電できなくなる確率を低減できる[5].

$$f_a = f - MA \dots\dots\dots (2)$$

(1)式, (2)式で算出したベースポイントBPおよび周波数の高周波成分 f_a から, (3)式を用いて, 有効電力指令を算出する. (3)式において, Pは有効電力指令, BPはベースポイント, Cは蓄電池の定格出力, f_a は周波数の高周波成分, f_{diff} は周波数の許容偏差(周波数の適正範囲が50Hz ±0.2Hzの場合, f_{diff} は0.2Hz)である. なお, $f_a < -f_{diff}$ (あるいは $f_a > f_{diff}$)となる場合は, (3)式において $f_a = -f_{diff}$ (あるいは $f_a = f_{diff}$)とする.

たとえば, SOC Sを100%とした場合, 図中Y点, Z点はそれぞれ周波数の高周波成分 f_a が $-f_{diff}$, f_{diff} のときの有効電力指令Pである. したがって, SOC Sが100%のときには, 有効電力指令Pのとりうる範囲は0~Cとなり, 蓄電池は放電のみを行うため, SOCを100%から減少させることができる.

$$P = BP - (C - |BP|) \times f_a / f_{diff} \dots\dots\dots (3)$$



第1図 蓄電池向け周波数調整用の有効電力指令
Fig. 1 Frequency regulation control signal for a storage battery

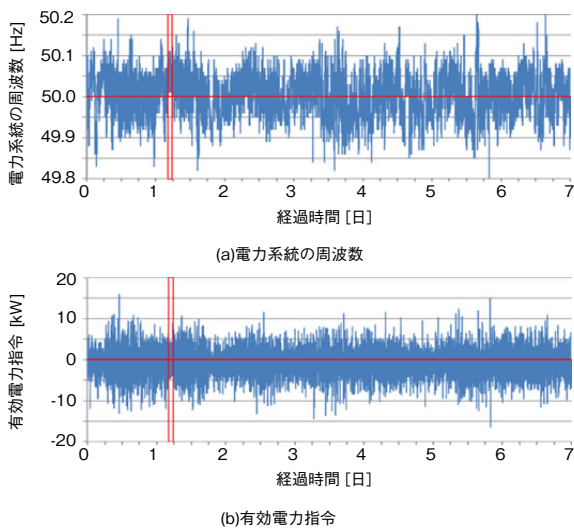
2.2 評価

評価には, シンガポールの集合住宅に設置した蓄電池システムを用いた. 蓄電池には, 定格出力50kW, 定格容量43.1kWhのリチウムイオン電池を用いた. 実験では, 周辺設備の容量を考慮し, 充放電最大値を20kW (C=20kW)とした. また, 参考文献[6]を参考に容量5kWhの範囲でリチウムイオン電池を充放電させた. 参考文献[6]では, 最小限必要な蓄電池の容量を, 1時間のうち15分間定格で充電または放電できる容量としている. そこで, 本

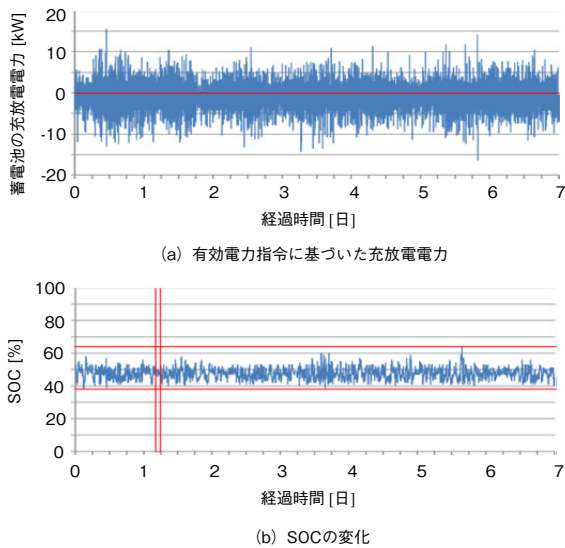
実験でも同様に、充放電最大値20 kWで15分間連続して放電または充電したときの容量である5 kWhを蓄電池の容量とし、5 kWhの範囲においてSOCを0%~100%とした。また、周波数の適正範囲は $50\text{ Hz} \pm 0.2\text{ Hz}$ ($f_{diff}=0.2\text{ Hz}$)とした。

提案方式を実装した蓄電池システムにおいて、周波数と蓄電池のSOCを1秒周期で測定して有効電力指令を生成し、有効電力指令に基づいて充放電を行った。

実験結果を第2図、第3図に示す。第2図(a)は実験期間中に測定した周波数 f であり、第2図(b)は有効電力指



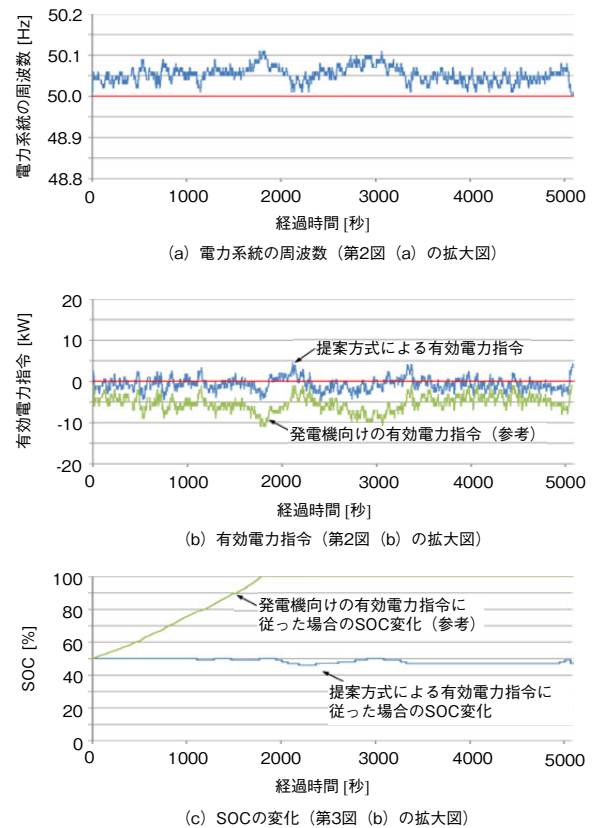
第2図 電力系統の周波数と有効電力指令
Fig. 2 Frequency and active power control signal



第3図 有効電力指令に基づいた充放電とSOCの変化
Fig. 3 Charge / Discharge and SOC

令 P である。第3図(a)は実験期間中の蓄電池の充放電電力であり、第3図(b)はそのときのSOCの変化である。第3図(b)より、提案方式ではSOCは約38%~64%の範囲に収まっており、7日間充放電を継続できた。

次に、第4図を用いて、従来の発電機向けの有効電力指令の生成方式と比較する。第4図(a)、第4図(b)、第4図(c)は、第2図(a)、第2図(b)、第3図(b)における赤枠の期間(周波数が連続して50 Hzを上回った期間)をそれぞれ拡大した図である。第4図(a)より、今回の実験では、最大で5077秒(1時間24分37秒)間連続して周波数が50 Hzを上回るケースが発生した。そのため、蓄電池が、第4図(b)の緑線に示すような発電機向けの有効電力指令(ここでは、 $P = (f - 50\text{ Hz}) / f_{diff} \times C$ とし、積分制御は省略した)に追従した場合、有効電力指令が連続して0 kW未満のため連続して充電することとなり、最初の約1800秒(約30分間)で2.5 kWh充電し、SOCが100%に到達する(第4図(c)の緑線)。その後、周波数が50 Hzを下回るまでの残りの約55分間は有効電力指令に合わせて充電できない。一方、提案方式(第4図(b)の青線)では、ベースポイントを設定し、さらに周波数の高周波



第4図 提案方式と発電機向け有効電力指令の生成方式の比較
Fig. 4 Comparison of proposal and traditional methods

成分を抽出しているため、-5 kW~5 kWの範囲で有効電力指令が生成されており、(連続して充電することなく)同期間におけるSOCは46%~50%の範囲に収まっている(第4図(c)の青線)。

以上の結果から、提案方式では、周波数が連続して50 Hzを上回った(下回った)場合でも7日間充放電を継続することが可能であり、蓄電池向け周波数調整用の有効電力指令の生成方式として有用であることが確認できた。

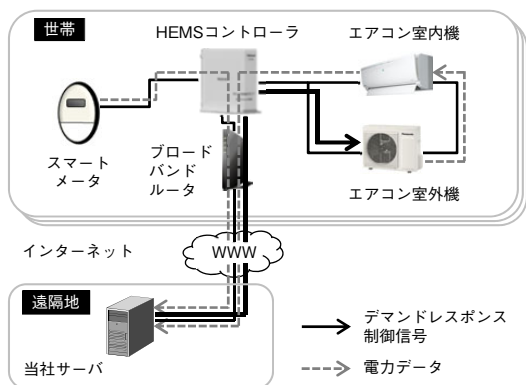
3. エアコンのデマンドレスポンス制御技術

シンガポール集合住宅の10世帯を対象に、家庭用エアコンのデマンドレスポンス制御を実施し、電力削減や快適性を評価した。

3.1 システム構成

エアコンのデマンドレスポンス制御を実現・評価するために開発したHEMS-DR (Home Energy Management System - Demand Response) 実証システムの構成を第5図に示す。HEMS-DR実証システムは、各世帯に配置されたスマートメータ、エアコン、HEMSコントローラと、インターネット経由で接続された当社サーバで構成される。各世帯のスマートメータおよびエアコンはHEMSコントローラによって宅内ネットワークを構成し、インターネット経由で当社サーバと通信することで世帯およびエアコンの消費電力や使用状況データを収集・蓄積できる。

また、当社サーバからインターネット経由で制御信号を送信することで、遠隔からエアコンをデマンドレスポンス制御できる。



第5図 HEMS-DR 実証システム構成図

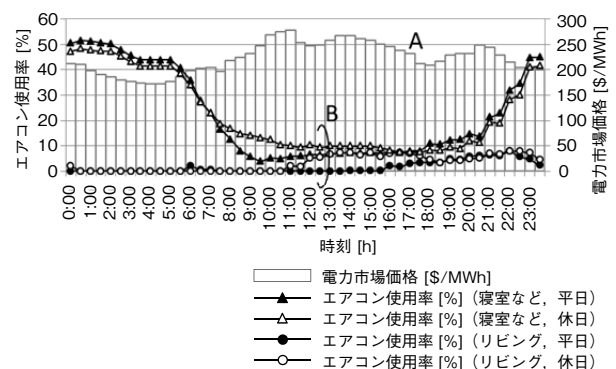
Fig. 5 HEMS-DR system configuration for the test-bed

3.2 課題

エアコンのデマンドレスポンス制御により電力削減する際、①削減できるエアコン消費電力の把握、②デマンドレスポンス制御による快適性への影響の把握が重要であり、これらは住民の生活パターンや許容性によるところが大きい。そのため、電力削減と快適性の維持を両立する制御方式を検討、実証実験で評価した。

3.3 評価方法

まず、電力削減効果を得るためのデマンドレスポンス制御を実施する時間帯とデマンド抑制率を検討した。電力市場取り引きにおいて市場価格が高い時間帯に電力を削減する必要がある。かつその時間帯に対象のエアコンが使用されている必要がある。第6図に2012年のシンガポール電力市場価格の平均(図中A)と、当社現地社員に対するアンケートに基づき作成した、エアコン平均使用率(図中B)を示す。



第6図 エアコンの使用状況と電力市場価格

Fig. 6 Air-conditioner usage and electricity market price

電力削減は日中から夜間にかけて電力市場価格が高い時間帯に必要となることが多く、また、削減量を確保するためにエアコン使用率の高い夜間から明け方の時間帯が実施時間の候補となる。上記を考慮し、1)深夜0:30-2:00、2)昼間13:30-15:00、3)夜間20:30-22:00の3つの時間帯をデマンドレスポンス制御実施時間帯とした。

また、本実証システムにおけるデマンドレスポンス制御は、3レベルの入力電流抑制モード(定格入力電流の75%、50%、0%に抑制)を選択できる。深夜時間帯にエアコン使用率が高いことが想定される一方で、その場合エアコン起動から時間が経過し低負荷で安定運転していることが多いため、75%および50%の抑制モードでは電力削減効果が期待できない。このため、上記3つの時間帯のいずれも、削減電力を確保するために定格入力電流

0%に抑制するモードを適用した。

快適性については、上記条件を考慮した簡易的な温熱シミュレーション結果から、デマンドレスポンス制御を連続して実行すると、室温が上昇し過ぎ、快適性が損なわれることがわかった。この問題を解決するために、デマンドレスポンス制御を実施しない通常運転期間を挟んだ、デマンドレスポンス制御実施スケジュール（第1表）を設定した。

第1表 デマンドレスポンス制御実施スケジュール

Table 1 Time schedule of demand response control experiment

時間帯	デマンドレスポンス制御期間	通常運転期間	デマンドレスポンス制御期間
1) 深夜	0:30-1:00	1:00-1:30	1:30-2:00
2) 昼間	13:30-14:00	14:00-14:30	14:30-15:00
3) 夜間	20:30-21:00	21:00-21:30	21:30-22:00

3.4 評価

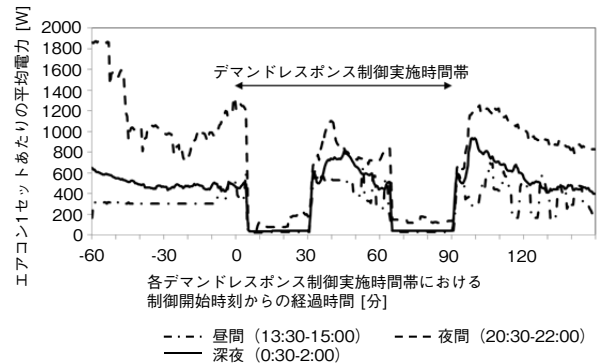
本システムを用いて取得したデマンドレスポンス制御時の電力データを分析し、電力削減を評価した。また、ユーザーによるデマンドレスポンス制御のキャンセル行動およびデマンドレスポンス制御時のアンケート分析によって、快適性を評価した。第2表にデマンドレスポンス制御実験概要を示す。

第2表 デマンドレスポンス制御実験概要

Table 2 Abstract of demand response control experiment

制御期間	2013/5/20-2013/6/23
制御頻度	1回/日（深夜、昼間、深夜いずれかの時間帯）
アンケート期間	2013/6/3-2013/6/16
アンケート頻度	1回/日（デマンドレスポンス制御実施直後）
アンケート項目と選択肢	1. 室内環境変化 1)変化を感じた 2)変化を感じなかった 2. 温熱感評価（7段階） 1)Hot 2)Warm 3)Slightly Warm 4)Neutral 5)Slightly Cool 6)Cool 7)Cold ※「1. 室内環境変化」を感じ、かつ「2. 温熱感評価」がHot, WarmあるいはSlightly Warmと回答した場合、不快であると判定

第7図に、デマンドレスポンス制御時のエアコン1セットあたりの電力変化（平均）を時間帯別に示す。第7図中の矢印で示した各デマンドレスポンス制御実施時間帯において、デマンドレスポンス制御期間で電力が低く抑えられていることを確認した。夜間のデマンドレスポンス制御期間において、わずかに電力が高くなっているのは、デマンドレスポンス制御がユーザーによりキャンセルされた影響である。



第7図 デマンドレスポンス制御時のエアコン電力変化（平均）

Fig. 7 Power consumption during demand response control

第3表に、時間帯別のデマンドレスポンス制御期間におけるエアコン1セットあたりの平均削減電力、キャンセル率、および、アンケートによる不快判定の結果を示す。

第3表 デマンドレスポンス制御評価結果まとめ

Table 3 Summary of demand response control evaluation

	深夜	昼間	夜間
平均削減電力	△425 W	△379 W	△1012 W
キャンセル率（数）	2.0 % (1/51)	0 % (0/12)	24.2 % (8/33)
不快判定率（数）	14.3 % (3/21)	50.0 % (1/2)	40.0 % (4/10)

第3表中の平均削減電力は、デマンドレスポンス制御実施時間帯の開始直前15分間における平均電力と各デマンドレスポンス制御期間における平均電力との差分から削減電力を求め、2つのデマンドレスポンス制御期間の平均値とした。キャンセル率は、デマンドレスポンス制御実施時間帯に稼働していたエアコンのセット数を母数としてキャンセルが発生した割合、不快判定率は、アンケート期間におけるデマンドレスポンス制御実施時間帯に稼働していたエアコンのセット数を母数として、第2表に示す不快判定基準に基づき不快と判定された割合とした。いずれの時間帯においても一定の電力削減が確認でき、とりわけ夜間は起動された直後のエアコンが多いため、エアコン電力が高く、削減効果が大きいことがわかった。一方、快適性については、夜間の時間帯はキャンセルと不快判定が多いことがわかった。これは、エアコン起動直後で室温が低下していないことが多く、快適性への影響が大きいためと考えられる。昼間は、第6図で示したエアコン使用状況と同様に実証世帯でもエアコンの使用頻度が低かった。深夜については、キャンセル率、不快判定率ともに夜間より低くなった。これは、夜間より気温が低く、かつ、エアコン起動から時間が経過して室温が低下した状態でデマンドレスポンス制御が行われ、

また、就寝時で活動量が小さいためであると考えられる。

4. まとめ

本稿では、1) 蓄電池を利用した周波数調整において、開発した蓄電池向けの有効電力指令の生成方式を用いて、長時間連続して充放電できることを示した。2) エアコンのデマンドレスポンス制御技術では、シンガポールの集合住宅10世帯において、住民が実際に生活する環境でエアコンのデマンドレスポンス制御と快適性評価アンケートを実施し、電力削減と快適性を確認した。その結果、深夜は快適性へ大きな影響を与えず電力削減可能であること、また夜間はより大きな電力削減が期待できるものの、快適性への影響も大きいことがわかった。

今後は、1) 複数の蓄電池を用いて効率的に周波数調整を行うための有効電力指令の生成方式の検討、2) 大きな電力削減が期待できる夜間においてもデマンドレスポンス制御を実施するための快適性の向上、などの改善に取り組んでいく。

参考文献

- [1] Energy Market Company, "Home page," PJM Interconnection, LLC. <https://www.emcsg.com>, 参照 Apr. 21. 2014.
- [2] PJM (Pennsylvania-New Jersey- Maryland), "Markets, Regulation and Energy Storage: A match Made in Heaven?," U.S. Energy Information Administration. <http://www.eia.gov/conference/2013/pdf/presentations/glazer.pdf>, 参照 Apr. 21. 2014.
- [3] KERMIT Study Report, "To determine the effectiveness of the AGC in controlling fast and conventional resources in the PJM frequency regulation market.," <http://www.pjm.com/~media/committees-groups/task-forces/rpstf/postings/pjm-kema-final-study-report.ashx>, 参照 Apr. 21. 2014.
- [4] AES Energy Storage, "AES Reaches More Than 100 MW of Grid-Scale Storage in the U.S. with 40 MW Resource in Ohio," http://www.aesenergystorage.com/press_release.php?title=aes-reaches-more-than-100-mw-of-grid-scale-storage-in-the-us-with-40-mw-resource-in-ohio, 参照 Apr. 21. 2014.
- [5] California ISO, "Renewables Integration - Market and Product Review, Phase 2," http://www.caiso.com/Documents/BeaconComments-RewewablesIntegration-Market_ProductReviewPhase2Vision_Roadmap.pdf, 参照 Apr. 21. 2014.
- [6] California ISO, "Non-Generator Resource (NGR) and Regulation Energy management (REM) Overview - Phase 1," <http://www.caiso.com/Documents/NGR-REMOVeriew.pdf>, 参照 Apr. 21. 2014.

執筆者紹介



溝端 竜也 Tatsuya Mizobata
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
Energy Solutions Center, R&D Div.



タム ゼン ウー Tzen Woo Tham
パナソニックR&Dセンター シンガポール
Panasonic R&D Center Singapore,
Div. of Panasonic Asia Pacific Pte. Ltd.



渡辺 健一 Kenichi Watanabe
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
Energy Solutions Center, R&D Div.
博士 (情報学)



加治 充 Mitsuru Kaji
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
Energy Solutions Center, R&D Div.



船倉 正三 Masami Funakura
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
Energy Solutions Center, R&D Div.



垣内 隆志 Takashi Kakiuchi
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
Energy Solutions Center, R&D Div.