

熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討

CHP based Demand Response for controlling Electricity Load Profile

杉本 一郎*・安芸 裕久**

Ichiro Sugimoto

Hirohisa Aki

As a policy act for balancing an electric power supply and demand in Japan, the Japanese government intends to open the retail electricity market in 2016 and the diet is discussing to revise the Electricity Business Act. In the institutional design of electric power exchange, Negawatt power using Demand Response (DR) is expected to introduce as a new type of electric power on the demand side. Stationary fuel cells (CHPs) have been commercialized in Japanese households since 2009, and installed over 77,000 sets at the end of 2013. In this paper, we propose a CHP based DR mechanism for controlling the electricity load profile of apartment houses which are equipped with CHP in each house. This mechanism removes the CHP operating constraints by means of the automatic operations or the human activities. In response to the DR request, this mechanism is activated, and each CHP works autonomously toward the Negawatt target.

Keywords : demand response, electricity load profile, distributed energy aggregation

1. はじめに

東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第1原子力発電所の事故を契機に、日本の電力需給は逼迫した状況にあり、政府ではそれを打開するための政策の一つとして、電力システムの改革が進められている。まず電気事業法の第1次改正として、2013年11月13日に「広域系統運用機関（仮称）」の設立が国会において可決承認された¹⁾。さらに政府では、2016年の「小売の全面自由化」に向けて、広域系統運用機関や電力取引市場の詳細な制度設計について議論されている。その議論の中で卸電力市場の制度設計において、需要家サイドによる新たなエネルギー需給施策として、「デマンドレスポンスを活用したネガワット取引」に期待が寄せられている²⁾。

米国などでは、電力需給のバランスを維持するために、需要家に対して電力需要の抑制を促すインセンティブ制度として、デマンドレスポンス（Demand Response：以下、DRと略す）が定着している。特に外部のオペレータ側からの情報に基づき、需要家機器を自動的に制御するDR（自動化DR）は、2000年初頭から米国において実証研究が始まり³⁾、2012年にはその手法も確立し、卸電力市場や容量市場でネガワット（Negawatt）の名称で取引されている⁴⁾。

一方、日本では家庭部門を対象に、2009年6月に戸建住宅向けの定置用燃料電池（以下、FCと略す）が商品化され、2013年12月末時点では累計7.7万台以上が導入されている⁵⁾。また2014年4月から集合住宅向けのFCが商品化され、新築分譲マンションへの導入も始まっている（計2物件約450戸）⁶⁾。各戸にFCを装備した集合住宅において、その集合住宅が棟屋全体で一括受電システムを構成して、棟屋内で電力融通を行う場合には、FC群の余剰能力を活用して「棟屋全体の電力負荷プロファイル（Electricity Load Profile）を制御する」ことが可能となる⁷⁾。外部のオペレータからの「DRの要請」に応じて、FC群制御が行われる時、この集合住宅の一括受電点ではDRと同等の効果が現れる。ただし、FC群がDR要請の時間帯に期待するネガワットを供給するためには、DR実行前にFCの稼働環境を整える必要がある。

そこで本研究では、各戸にFCが装備され、棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系する「集合住宅モデル」を設定し、電力小売事業者／エネルギーサービスプロバイダ（以下、ESPと略す）等からのDR要請に対応して、FCの稼働制約を解消すると共に、一括受電点からみた棟屋全体の電力負荷プロファイルを制御する、「熱・電気を統合したデマンドレスポンス」のフレームワークについて検討する。

2. 集合住宅モデル

集合住宅にFCを戸別に装備して、FCで生成した電力や熱（温水）を各戸で融通する実証研究は、2006年ごろから

*株式会社エネルギー・生活科学研究所
〒537-0024 大阪市東成区東小橋2丁目10番26号
E-mail ichiro@energy-and-humanlife.com

**独立行政法人産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第二事業所

表 1 集合住宅モデルの全体構成 (例)

(全体概要)		(住宅概要)	
住宅	高層集合住宅	フロア構成	1フロア6戸
所在地	都市部（主として都市ガス供給エリア）	住居構成	ファミリー型
販売形態	分譲（新設）・再生（棟屋改修）	床面積	77 - 94 m ² (3LDK - 4LDK)
総戸数	1棟100戸未満	(住宅設備)	
構成・規模	住宅棟 1棟 地上15階	発電・給湯	定置用燃料電池（常時インターネット接続） バックアップボイラ（ガス瞬間式）
	1階 エントランス・共用室・駐車場	空調・暖房	エアコン×2 床暖房×2
	2 - 15階 住宅 1フロア6戸×14フロア＝84戸	厨房	システムキッチン・ガスコンロ
(共用エネルギー設備)		浴室	自動風呂
受電方式	高圧6.6kV連系（一括受電）	電気メータ	スマートメータ×2（売電用・買電用）
ガス供給	低圧供給（一括供給）	ガスメータ	スマートメータ×1
契約	電力・ガス小売事業者はESP等と一元的に契約		

始まり、これまでいくつかの成果が報告されている^{8), 9), 10)}。これらの実証システムでは、FCの定格発電容量（0.7 - 1.0 kW）に比べて平日昼間の平均電力需要（0.4 - 0.5 kW/戸）が少ないため¹¹⁾、FCの発電出力を制限することや、FCの定格容量を共用することで、その性能を充分に発揮する工夫がなされてきた。つまり、各戸にFCが装備された集合住宅では、平日昼間の発電容量に余裕があり、FCで追加的に発電した電力を棟屋内で融通することにより、一括受電点で系統からみた電力負荷を軽減できることがわかる。

このような仕組みを「棟屋単位でのDR」として構成する場合には、集合住宅はネガワット取引のために一定の規模が必要となるが、仕組みの導入・普及・展開を考慮すると小規模なことが望ましい。これらの観点から、各住居にFCが装備され、棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系する、1棟100戸未満の「集合住宅モデル」を設定し、その全体構成例を表1に示す。なお本論文では、集合住宅の住宅部のみを対象とし、共用部については対象外とする。

3. 電力負荷プロファイルの制御

集合住宅モデルの棟屋内および住居内の配電系統、ガス配管系統、給湯・暖房配管系統の構成例を図1に示す。各住居のFCが通常時に自家エネルギー需要に即して稼働している場合（以下、通常モードという）、棟屋全体の電力負荷プロファイル（ $LOAD_{POI}$ (kW)）は各住居の電力メータ（双方向型スマートメータ； EP_{meter} (kW)）の合計値であり、各住居の電力需要（ $DEMAND_i$ (kW)）からFCの発電出力（ DER_{NORMAL} (kW)）を引いた値の合計となる（式(1)参照）。

$$\begin{aligned}
 LOAD_{POI}(t) &= \sum_{i=1}^N EP_{meteri}(t) \\
 &= \sum_{i=1}^N (DEMAND_i(t) - DER_{NORMALi}(t)) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 N は棟屋内の全住居数を示す。

棟屋全住居 N 戸の内、 M 戸の住居が「棟屋単位でのDR」に参画し、DR実行時に M 台のFCが発電出力を増加（ DER_{DR} (kW)）すると共に、 M 戸の住居で電力消費機器の使用抑制（ DR (kW)）が行われる場合（以下、DRモードという）、棟屋全体の電力負荷プロファイルは式(2)のように表記できる。

$$\begin{aligned}
 LOAD_{POI}(t) &= \sum_{i=1}^N EP_{meteri}(t) \\
 &= \sum_{i=1}^N (DEMAND_i(t) - DER_{NORMALi}(t)) - \sum_{j=1}^M (DER_{DRj}(t) + DR_j(t)) \quad (2)
 \end{aligned}$$

ただし、FCの発電出力の合計は式(3)のように、定格発電容量（ P_{max} (kW)）以下に制限される。

$$DER_{NORMALj}(t) + DER_{DRj}(t) \leq P_{max} \quad (3)$$

式(2)から、右辺の第一項は通常モードの棟屋全体の電力負荷プロファイルと同等であるが、第二項のFCの発電出力増加（ DER_{DR} ）と電力消費機器の使用抑制（ DR ）によって、さらに電力負荷を軽減できることがわかる。つまり、FCの発電出力を変えることで、棟屋全体の電力負荷プロファイルをFCの定格発電容量の範囲内で制御できることを示している。ただし、これはFCの排熱回収タンク（貯湯槽）に十分な空き容量がある場合であり、電力需給の逼迫期間・時間帯（例えば、夏期の平日・昼間）において、FCの発電出力を一定時間増加させることは現実的には困難となる。

さらに、各住居のFCは住宅設備と位置付けられ、小売事業者／ESP等の外部のオペレータがFCを制御することは、住居の安全やセキュリティの観点から許容されない。よって、FCは外部からのDR要請に対応して、自律的に制御することが要求される。

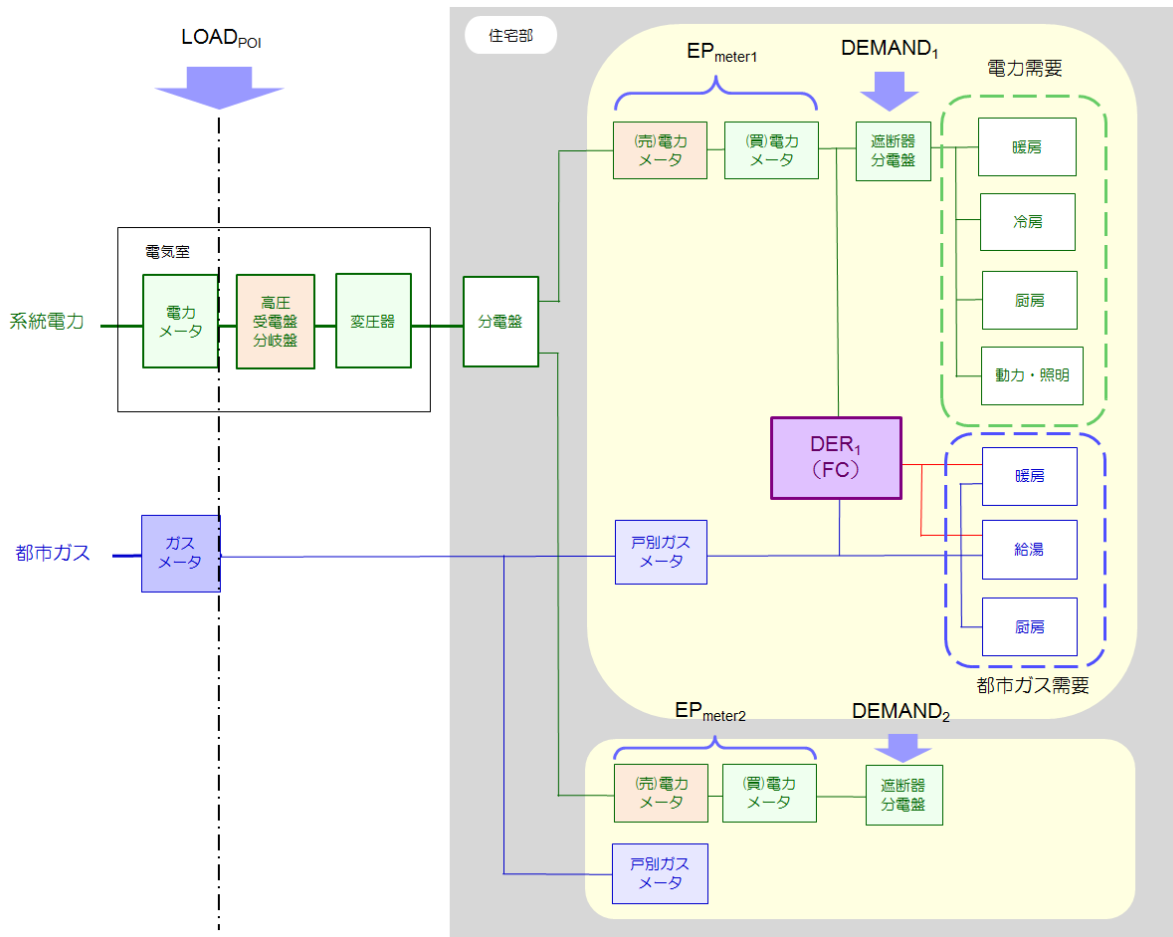


図1 集合住宅モデルの棟屋内と住居内の配電系統・配管系統の構成(例)

4. FC 自律群制御

外部から DR 要請を受けた住居の FC は、事前の設定により自律的に通常モードから DR モードに切り替わり、式(4)に示す、「自家電力需要に即した発電出力 (DER_{NOMAL} (kW))」と「DR 向けの増加出力 (DER_{DR} (kW))」の合計値 (P (kW)) を出力する。

$$P(t) = \sum_{i=1}^M P_i(t) = \sum_{i=1}^M (DER_{NOMALi}(t) + DER_{DRi}(t)) \quad (4)$$

ここで、M は DR に参画する住居数 (FC の台数) を示す。

FC が棟屋全体の電力負荷プロファイルをモニタして自律的に発電出力を変更する群制御方式として、例えば予備力補完制御がある¹²⁾。この制御方式を DR モードでの FC の自律群制御に適用すると、FC は、はじめに電主制御で自家電力需要 (DEMAND) まで発電出力し、その後「モニタ情報」を参照しながら、フィードバック制御 (PI 制御) によって、式(5)のように DR 向けに発電出力を漸近的に変化させる。

(モニタ情報)

- ・棟屋全体の電力負荷プロファイル (リアルタイム値)
- ・棟屋全体の DR 要請電力 (ネガワット) の過不足値 (リアルタイム値 ; P_{short})

$$P_i(t) = DEMAND_i(t) + K_p \cdot P_{short}(t) + K_I \cdot \int P_{short}(t) \quad (5)$$

ここで、 K_p は比例ゲイン、 K_I は積分ゲインを示す。

このように各住居の FC が自律群制御により発電出力を増加させるためには、次に示すように、各住居において FC の稼働制約を解消する、熱消費行動が必須となる。

5. 熱・電気を統合したデマンドレスポンス

熱・電気を統合したデマンドレスポンスには、通常の DR 「ピークカットによる節電手法」¹³⁾に加えて、FC の稼働環境を整え一定時間以上の発電を担保する、「熱消費行動」が含まれる。この熱消費行動は、住居内での温水消費のための機器操作または行為・行動であり、例えば貯湯槽の温水を消費する自動化された注湯操作と、居住者による風呂 (温水の浴槽への落とし込み) またはシャワー行為が該当する。

・自動化による熱消費

自動化による熱 (温水) 消費とは、FC が自律的に「自動風呂」を起動して、貯湯槽の温水を浴槽に注湯することが該当する。外部から DR 要請を受けた FC は、DR モードに切り替わり自律群制御で発電出力を行うと共に、バックアッ

プボイラの注湯機能を利用して、「貯湯槽の温水のみを消費」する。表 2 に風呂（注湯）による熱消費とそれに伴う FC の最低稼働時間（算定）を示す。

貯湯槽が満水の場合でも、自動注湯の温水消費により貯湯熱量の約 75%が消費され、給水温度の高い夏期においても 4 時間以上の FC の稼働が担保される。なおこの温水消費は、DR 実行時間帯において居住者の在・不在を問わず、事前の準備（浴槽の閉栓等）だけで可能となる。

・人為的な行動による熱消費

人為的な行動による熱（温水）消費とは居住者による入浴行為であり、風呂入浴のための注湯とシャワー入浴が該当する。外部から DR 要請を受けた居住者は、FC の DR モードでの稼働と並行して、風呂の注湯操作またはシャワー入浴を行い貯湯槽の温水を消費する。表 2 にシャワー入浴による熱消費とそれに伴う FC の最低稼働時間（算定）を示す。

風呂入浴の場合は、上述の自動化による熱消費と同様であるが、シャワー入浴（1 名、使用時間 5 分）の場合は、給水温度の低い冬期においては 3 時間弱の FC の稼働が担保できるが、夏期においては 1.5 時間程度の稼働であり、入浴時間の延長や半身浴との組み合わせ等の入浴スタイルの変更が必要となる。

以上のように、熱・電気を統合したデマンドレスポンスの一形態として、「FC の稼働を促進する熱消費行動」を提案した。このデマンドレスポンスは、各戸に FC を装備し系統電力と一括連系する集合住宅において、FC の制御機能と節電を指向する居住者のライフスタイルにより実現される。

6. まとめ

本論文では、各戸に FC が装備され棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系する、集合住宅モデルを設定して、外部からの DR 要請に対応して、一括受電点からみた棟屋全体の電力負荷プロファイルを制御する機構を提案した。

表 2 風呂・シャワーによる熱消費と FC の最低稼働時間

(風呂)		
季節・期間	夏期	冬期
給水温度	25℃	5℃
注湯温度	37℃	37℃
注湯量	180 L	180 L
FC稼働時間 (h)	4.2 h	6.6 h
(シャワー)		
季節・期間	夏期	冬期
給水温度	25℃	5℃
シャワー温度	39℃	42℃
シャワー量	65 L	65 L
FC稼働時間 (h)	1.6 h	2.7 h

また熱・電気を統合したデマンドレスポンスの一形態として、FC の稼働を促進する方策、機器の自動化や人為的な行動・ライフスタイルによる熱消費を提案した。そして風呂による熱消費では、給水温度の高い夏期においても 4 時間以上の FC の稼働が担保されることを示した。

参考文献

- 1) 経済産業省：電気事業法の一部を改正する法律（平成 25 年 11 月 13 日 国会成立）
- 2) 経済産業省：卸電力市場の活性化について、電力システム改革小委員会 制度設計ワーキンググループ（第 3 回）（平成 25 年 10 月 21 日）
- 3) M. A. Piette, et.al. Field Demonstration of Automated Demand Response for Both Winter and Summer Events in Large Buildings, LBNL-6216E, December 2012
- 4) Federal Energy Regulatory Commission, Assessment of Demand Response and Advanced Metering Staff Report 2012, December 2012
- 5) コージェネ財団 HP：エネファームメーカー販売台数（アクセス 2014 年 2 月 10 日）
- 6) 東京ガス プレス：マンション向け家庭用燃料電池「エネファーム」の発売（平成 25 年 10 月 21 日）
- 7) H. Aki et.al.：Operational strategies of networked fuel cells in residential homes, IEEE Trans. on Power Systems 2006; 21(3):1405-1414
- 8) 大阪ガス、東芝燃料電池システム、長府製作所：集合住宅における水素供給燃料電池コージェネレーションに関する技術開発、国土交通省 平成 19 年度先端技術開発助成事業 水素利用／燃料電池連携群シンポジウム、2007 年 11 月
- 9) H. Aki, et.al.：Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen: A demonstration in hydrogen-fueled apartments, Int. Journal of Hydrogen Energy 2012, Vol.37, pp.1204-1213
- 10) 山脇、他：集合住宅におけるスマートエネルギーハウス実証試験、エネルギー・資源学会第 30 回コンファレンス講演論文集、7-1, pp.101-106, 2014 年 1 月
- 11) 前田、他：九州地区の集合住宅におけるエネルギー需要の計測と解析、エネルギー・資源学会第 21 回コンファレンス講演論文集、pp.473-476, 2005 年 1 月
- 12) 石川、他：エネルギーネットワークにおける FC 連携制御手法の検討、エネルギー・資源学会第 23 回研究発表会講演論文集、2004 年 6 月
- 13) 省エネルギーセンター：すぐに役立つ“節電・省エネ”104 項目、pp.18-22, 2012 年 6 月 8 日発行