

# 電力負荷プロファイルを制御するための 熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討

杉本 一郎\* ((株)エネルギー・生活科学研究所) 毛笠 明志 (大阪大学大学院)

## 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2013年4月2日に、電力システムについて「広域系統運用の拡大」「小売及び発電の全面自由化」「法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保」の改革方針が閣議決定された[1]。次に2013年11月13日に、電気事業法の第1次改正として、「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[2]。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[3]。その議論の中では、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[4]。

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[5]、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として取引されている[6]。

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[7]。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計画されている（計2物件 約450戸）[8]。このようなFCを各戸に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を構成して、棟屋内で電力融通を行う場合には、FC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[9]。このFC群制御が外部のオペレータ側からの「DRの要請」に応じて行われる場合、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、集合住宅がこのような構成で電力負荷プロファイルを制御するためには、FCの発電容量を十分に発揮できる環境が必要となる。つまり、FCの発電出力を増加してDRを実行する場合には、FCが有するコージェネレーションの課題、「熱律速によるFCの稼働制約」を回避する必要がある[10]。

そこで本研究では、集合住宅を対象に、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、1棟100戸未満の集合住宅モデルを設定し、小売事業者／アグリゲータ／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、一括受電点からみた電力負荷プロファイルを制御する、FCの自律群制御とその稼働制約を解消する「熱・電気を統合したデマンドレスポンス」についてフレームワークを検討する。

## 2. 集合住宅モデル

既設の集合住宅にFCを設置して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年ごろから始まり、これまでにいくつかの成果が報告されている[11][12][13]。これらの実証システムでは、FCの定格発電容量（0.7・1.0kW）に対して平日昼間の平均電力需要（0.4・0.5kW/戸）が少ないため[14]、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、その性能を十分に発揮する工夫がなされてきた。

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8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 <sup>2</sup> (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）<br>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8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      |        |  |

逆にこれらの工夫は、各住居に 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逆潮流させて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を示唆している。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暫定的に設定し、その全体構成例を表 1 に示す。なお本論文の集合住宅モデルでは、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（住宅部）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）には、棟屋全体の電力負荷（LOAD<sub>POI</sub> (kW)）は各住居の電力メータ（スマートメータ；EP<sub>meter</sub> (kW)）の合計値であり、各住居の電力需要（DEMAND (kW)）から FC の発電出力（DER<sub>NORMAL</sub> (kW)）を引いた値の合計となる（式 1 参照）。

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

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」の契約に同意し、DR 実行時に M 台の FC が発電出力を増加（DER<sub>DR</sub> (kW)）すると共に、M 戸の住居で電力消費機器の使用制限（DR (kW)）が行われる場合（以下、DR モードという）には、棟屋全体の電力負荷は（式 2）のように表記できる。

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

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<sub>max</sub> (kW)）以下に制限される。

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

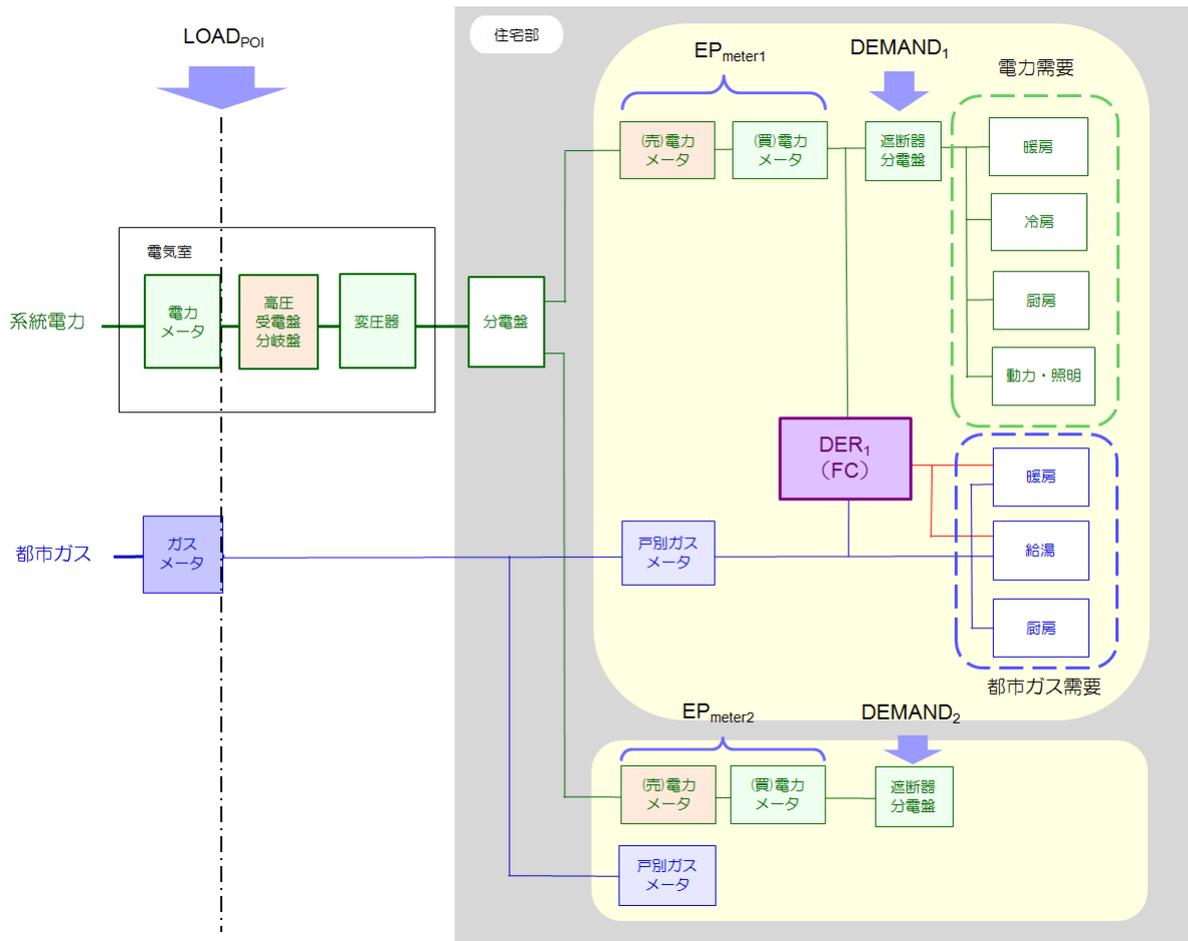


図 1. 集合住宅モデル（住宅部）の棟屋内と住居内の配電系統・配管系統の構成（例）

DR 実行時の棟屋全体の電力負荷を表す（式 2）をみると、右辺の第一項は通常モードの棟屋全体の電力負荷と同等であるが、第二項の FC の発電出力増加（ $DER_{DR}$ ）と電力消費機器の使用制限（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 の発電出力の増加を時間軸で変えることで、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することができる。

ただし、これは FC に「貯湯槽満水等の稼働律速がない」という条件下において可能であり、近年の電力需給の逼迫時間帯（例えば、夏期の平日昼間や冬期の平日夕方）に、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、集合住宅が分譲の場合には FC は各住居の住宅設備と位置付けられ、平時において小売事業者／アグリゲータ／ESP 等の外部のオペレータが FC を制御することは、安全やセキュリティの観点から許容されることはない。よって、FC は、DR の契約に同意した入居者の事前の準備・操作を前提に、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。

#### 4. FC 自律群制御

外部から DR 要請を受けた住居の FC は、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 向けの発電出力増加（ $DER_{DR}$  (kW)）」の合計値（ $P$  (kW)）を出力する。

$$P(t) = \sum_{i=1}^M P_i(t) = \sum_{i=1}^M (DER_{NOMAL_i}(t) + DER_{DR_i}(t)) \quad (式 4)$$

ここで、 $M$  は（式 2）と同様に、DR の契約に同意する住居数（FC の台数）を示す。また、FC の発電出力は（式 3）のように定格発電容量（ $P_{max}$  (kW)）以下に制限される。

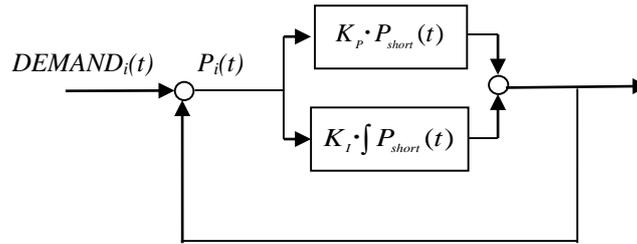


図 2. 予備力補完制御 (PI 制御) [15]

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、具体的な群制御方式として、例えば予備力補完制御がある[15]。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、その後以下の「モニタ情報」を参照しながら、図 2 に示す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 ;  $P_{short}$ )

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

ここで、 $K_p$  は比例ゲイン、 $K_i$  は積分ゲインを示す。

各住居の FC が自律群制御により発電出力を変更することで、棟屋全体の電力負荷プロファイルを制御することができ、DR の効果を得ることができる。そのためには、各住居で貯湯槽満水等の FC の稼働律速を解消することが条件となり、FC の稼働 (発電) を促進するためのエネルギー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 ための「ピークカットによる節電手法」[16]に加えて、FC の稼働律速を解消し一定時間以上の稼働を担保する、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、具体的には貯湯槽の温水を消費する風呂 (注湯) あるいはシャワー (給湯) 等が該当する。また熱消費行動には、小売事業者 / アグリゲータ / ESP 等からの DR 要請に応じて、事前の取り決めに従って自動化された機器操作と居住者の人為的な行動が想定される。

### ◆ 自動化による熱消費

FC の稼働律速を解消する自動化による熱 (温水) 消費とは、FC が自律的に「自動風呂」操作を行い、浴槽に注湯することが該当する。つまり、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自動風呂機能を利用して貯湯槽の温水を消費する。表 2 に自動風呂 (注湯) による熱消費とそれによる FC の最低稼働時間 (算定) を示す。

自動風呂の温水消費により貯湯熱量の 80%弱が消費され、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

FC の稼働律速を解消する人為的な行動による熱 (温水) 消費は入浴行為であり、風呂とシャワーが該当する。つまり、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、風呂の操作行為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 (給湯) による熱消費とそれによる FC の最低稼働時間 (算定) を示す。

風呂入浴の場合は、上述の自動風呂の温水消費と同様で、夏期においても 4 時間以上の FC の稼働が可能となる。

表 2. 風呂・シャワー入浴による熱消費と FC の最低稼働時間（算定）

| (風呂)         |       |       | (シャワー)       |       |       |
|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 季節・期間        | 夏期    | 冬期    | 季節・期間        | 夏期    | 冬期    |
| 給水温度         | 25℃   | 5℃    | 給水温度         | 25℃   | 5℃    |
| 注湯温度         | 38℃   | 38℃   | シャワー給湯温度     | 39℃   | 42℃   |
| 注湯量          | 180 L | 180 L | シャワー給湯量      | 65 L  | 65 L  |
| FC稼働時間 (Min) | 4.3 h | 6.7 h | FC稼働時間 (Min) | 1.6 h | 2.7 h |

一方、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の稼働が見込めるが、夏期においては1.5時間程度の稼働であり、入浴人数の増加または入浴時間の延長等のライフスタイルによりFCの稼働環境を改善する必要がある。

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つとして、「FCによる電力負荷プロファイルの制御を促進する熱消費行動」が提案される。このようなデマンドレスポンスは、各戸にFCを装備しシステム電力と一括連系する集合住宅において、FCと周辺機器の制御機能および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システム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、外部のオペレータからの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、FCの自律群制御を提案した。またFCの稼働を促進する方策として、熱・電気を統合したデマンドレスポンスを提案し、機器操作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示した。そして自動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。

つまり、熱・電気を統合したデマンドレスポンスを用いた分散型エネルギー（コージェネレーション）による電力負荷プロファイルの制御は、夏期の平日・昼間のピーク時間帯（13時～16時）または冬期の平日・夕方のピーク時間帯（17時～20時）における負荷平準化および節電に充分寄与できることが判明した。

## 参考文献

- [1] 経済産業省：電力システムに関する改革方針（平成25年4月2日閣議決定）
- [2] 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）
- [3] 経済産業省 HP：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 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 [http://www.meti.go.jp/committee/gizi\\_8/18.html#seido\\_sekkei\\_wg](http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/18.html#seido_sekkei_wg)（アクセス2014年2月9日）
- [4] 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）
- [5] M. A. Piette, et.al. Field Demonstration of Automated Demand Response for Both Winter and Summer Events in Large Buildings in the Pacific Northwest, LBNL-6216E, December 2012
- [6] Federal Energy Regulatory Commission, Assessment of Demand Response and Advanced Metering Staff Report 2012, December 2012
- [7] コージェネレーション・エネルギー高度利用センターHP：エネファームメーカー販売台数 [http://www.ace.or.jp/web/works/works\\_0090.html](http://www.ace.or.jp/web/works/works_0090.html)（アクセス2014年2月10日）
- [8] 東京ガス プレスリリース：世界初 マンション向け家庭用燃料電池「エネファーム」の発売について（平成25年10月21日）
- [9] H. Aki, I. Ishii, et.al. Operational strategies of networked fuel cells in residential homes, IEEE Transactions on Power Systems 2006; 21(3):1405-1414

- [10] 安芸, 近藤, 石井, 山本: 小規模需要家への分散型電源の普及とエネルギー融通に関する分析, 第 19 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 1-3, pp.11-18, 2003 年 1 月
- [11] 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 年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業 住宅等におけるエネルギーの効率的な利用に関する技術開発 水素利用/燃料電池連携群シンポジウム, 2007 年 11 月 14 日
- [12] H. Aki H, A. Kegasa, I. Sugimoto, et.al. Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen: A demonstration in hydrogen-fueled apartments, *International Journal of Hydrogen Energy* 2012, Vol.37, pp.1204-1213
- [13] 山脇, 岡本, 川越: 集合住宅におけるスマートエネルギーハウス実証試験, 第 30 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 7-1, pp.101-106, 2014 年 1 月
- [14] 前田, 丸山, 安, 伊藤, 嶋川: 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 (その 2), 第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 26-6, pp.473-476, 2005 年 1 月
- [15] 石川, 杉本, 安芸, 近藤, 前田, 石井: 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
- [16] 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