FRIENDS におけるリアルタイム料金を考慮した DSM に関する研究

学生員 吉川 茂樹* 正員 北 裕幸*
正員 田中 英一* 正員 長谷川 淳**

A Real-time Pricing System for DSM in FRIENDS

Shigeki Yoshikawa*, Student Member, Hiroyuki Kita*, Member, Eiichi Tanaka*, Member,
Jun Hasegawa**, Member

The authors have proposed the Flexible, Reliable and Intelligent ENergy Delivery System (FRIENDS) as a concept of future electric power systems. The concept of FRIENDS takes into account the deregulation of the electric power industry and progress of technologies such as power electronics, distributed generators (DG), distributed energy storage systems (ESS), information and communication. One of the most important characteristics of FRIENDS is that new facilities called Quality Control Centers (QCC) are installed between distribution systems and electric consumers.

This paper presents a methodology for DSM based on a real-time pricing system through the information and communication network in FRIENDS. The economic use of DG and ESS in QCC is also considered in the proposed DSM. The sigmoid logistic function is used for modeling the real-time pricing system and a couple of parameters in the function are optimized by the Genetic Algorithm so that the profit of QCC is maximized. The effectiveness of the proposed DSM is ascertained by evaluating the profit or the load factor of QCC through simulations using model systems.

キーワード：FRIENDS，DSM，リアルタイム料金，分散電源，電力貯蔵装置

Keywords: FRIENDS, DSM, real-time pricing, dispersed generator, energy storage system

1. はじめに

限りある資源を有効に使用するために、エネルギー利用の高効率化が社会的な課題となっている。そのための一手段である DSM (Demand-Side Management) は、電気事業者から需要家側に積極的に働きかけて、電気事業者にとっても社会全体にとっても望ましい需要 (負荷のパターンおよび大きさ、品質) に誘導する計画を立案し実施するものである。特に、近年の情報通信技術の発達により、供給者側と需要家側のきめ細かな双方向情報伝達が可能となってきた。これにより、需要の間接制御、直接制御の実現が期待される状況が生まれ、情報通信技術を用いた次世代 DSM と呼ばれる新しいエネルギーマネジメントシステム (例えば、Home/Building Energy Management System; HEMS/BEMS) が登場して

いる。一方で、わが国では電力の小売自由化により省エネルギーに関するコンサルタント活動自体をビジネスとするような事業 (例えば、Energy Service Company; ESCO) が出現してきている。また、既に小売レベルの競争が激しくなっている米国では、分散した需要家の事業所に対してインターネットを用いた需要の集計や課金情報のやりとりを行いコストの削減を図るなどのサービス (Energy Service Provider; ESP) が生まれている。

ところで著者らは、高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS) と名付けた次世代の新しい配電システム (FRIENDS) の概念を開発し検討を行っている⁽¹⁾。FRIENDS では配電用変電所と需要家との間に電力改質センター (Quality Control Center: 以下 QCC) と呼ぶ設備を複数設置し、それらを高圧あるいは特別高圧の配電ネットワークによって統合化する。QCC の内部はパワーエレクトロニクス機器や電力貯蔵装置 (Energy Storage System: 以下 ESS)、分散電源 (Dispersed Generator: 以下 DG) などによって構成されており、需要家の多様なニーズを考慮した多品質電力供給⁽²⁾ やパワーコンディショニング⁽³⁾ など様々な機能を実現する。また、QCC と需要家間には強力な情報通信ネットワークを併設することを想定しており、より高度な DSM を実現できる可能性を持っている。例えば、上記の多品質

* 北海道大学大学院情報科学研究科
〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
N14 W9 Kita-ku, Sapporo 060-0814

** 函館工業高等専門学校
〒042-8501 函館市戸倉町 14 番 1
Hakodate National College of Technology
14-1, Tokura-cyo, Hakodate 042-8501

電力供給のメニューに需要逼迫時に負荷を遮断するプライオリティーサービスを導入することや、需要家が保持するDGの直接制御やQCC間の電力融通により、需要地内の発電設備を有効に活用すると共に、基幹系統の発電設備との協調運用を図ることで、社会コストの観点からみて望ましい電力消費パターンに誘導することが可能となる。さらに、QCCがHEMSやBEMSのようなエネルギーマネジメントシステムのコントロールセンターとなり、需要家の家電製品の自動制御や消費電力量や電気料金の情報をリアルタイムに提示することにより、省エネルギー・負荷平準化に大きく貢献することもできる。

以上のような背景から本論文では、FRIENDSによる高度なDSMを構築するための基礎的検討段階として、FRIENDSが備える情報通信ネットワークを通じたリアルタイム料金、およびQCC内部の分散電源、電力貯蔵装置を用いたDSMシステムをモデル化し、その導入効果を定量的に評価することを目的とする。

DSMやリアルタイム料金に関する研究としては、(1) DSMのための料金制度に関するもの、(2) 統合資源計画を考慮したDSMに関するもの、(3) 負荷平準化機器・需要家の協力を考慮したDSMに関するものなどがある。まず、料金制度に関するものとして、文献(4)では2種類の電源構成・2時間帯のモデルを用いて季節別時間帯別料金の最適解の理論的検討が行われている。文献(5)では、電力の急峻な需要変動を抑制するリアルタイム料金について、供給者側のコストと需要家の便益から決定される社会便益が最大となるような料金設定について述べられている。次に、統合資源計画を考慮したDSMに関するものとして、文献(6)(7)では、供給者側の電源設備を考慮すると共に、需要家サイドの機器に対する普及インセンティブを内生化したDSMモデルが開発されている。これにより、供給者と需要家双方の費用対効果を同時に考慮しながら、コージェネレーションなどのエネルギー・環境技術の最適な普及規模や奨励金を定量的に評価することができる。文献(8)では、DSMによる配電部門設備投資の繰り延べ効果に関して検討が行われている。さらに、負荷平準化機器・需要家の協力を考慮したDSMに関するものとして、文献(9)では、太陽電池・蓄電池を利用したシステムの構成方法および負荷平準化手法が検討されており、提案するシステムを低圧契約、高圧契約需要家に適用した際の導入効果について検討している。文献(10)では、有効電力の調整による電圧適正化を目的とした需要家協力システムが提案されている。文献(11)では、負荷平準化を目的とした電気温水器の制御手法が検討されている。

本論文では、FRIENDSにおけるQCCが完全に独立した経済主体であると仮定し、QCCが個々の需要家にリアルタイム料金を提示することで負荷平準化を促すと共に、これらの平準化した負荷を集約する。さらに、QCC内部において分散電源または電力貯蔵装置を適切に運用することで経済的な利益を得ることを考える。リアルタイム料金の実現

にはシグモイド・ロジスティック関数を用いており、従来のシステムと提案するDSMシステムにおいて、需要家が得る効用が変わらないという条件の下で、QCCの利益が最大となるように料金システムを決定する手法を提案している。シミュレーションを通してQCCの利益と系統サイドから見た負荷率を評価し、提案システムの特徴を検討する。

2. 提案するDSMシステムの概要

FRIENDSの概念に基づいて新規に配電系統を敷設した需要地域(例えば再開発地域、工業団地など)を想定する。この地域ではQCCが一般電気事業者(以下Utility)と需要家の間に挿入され、従来にはない様々な機能を実現すると共に、需要家はQCCを通じて電力を購入する。ここで、仮にQCCがUtilityと完全に別会社とした場合、地域にはUtility、QCC、需要家の三者の独立した経済主体が存在する。

本論文ではQCCが主体となって行うDSMシステムを提案する。Utility側から見るとQCCは小口の需要家を集約した大口の需要家とみなすことができる。提案するDSMシステムはUtility側からQCCを見た負荷の平準化を目的とする。QCCがDSMを行うことでQCCの負荷率が向上すれば、上位系統を担うUtilityには設備利用率向上等のメリットが生じると考えられる。

2.1 提案するDSMシステム FRIENDSが備えるQCCと需要家間の情報ネットワークを用いて、1時間毎に電気料金(以下、リアルタイム料金)を需要家に提示し、需要を間接的に制御する。また、QCCは負荷平準化を担う代わりにUtilityから時間帯別料金制度、つまり割高な昼間料金と割安な夜間料金で電力を購入できることとする。この条件の下で、QCCは内部に備えるDGとESSを経済的に運用することで、DSMを行う主体であるQCC自身の利益を確保する。なお、市場から電力を購入する際の市場価格変動と連動させてリアルタイム料金を設定するというアプローチも考えられるが、本論文では、QCCがUtilityから定額の時間帯別料金で電力を購入し、それを需要家の負荷の大きさに応じて価格を変え供給することを考えている。

図1 従来のシステム

Fig. 1. Conventional system.

図2 提案するDSMシステム

Fig. 2. Proposed DSM system.

2.2 システム比較対象モデル システム評価のための比較対象モデルを図 1 および図 2 に示す。評価指標には従来システムと提案する DSM システムにおける負荷率と、DSM によって得られる QCC の利益を用いる。なお、従来型のシステムは、Utility と需要家の二者の経済主体のみが存在するモデルであり、需要家は定額料金で Utility から電力を購入する。この場合の負荷率は定額料金制度で電力を購入する需要家の負荷率とする。一方、提案する DSM システムは前述のごとく、QCC を加えた三者の経済主体が存在し、図 2 に示すような関係にある状態のことを指し、この場合の負荷率は DSM 適用後に Utility 側から QCC を見た場合の負荷率となる。

3. システムのモデル化

3.1 リアルタイム料金設定手法 需要家が電気を利用する際に、コスト意識を持たせることで負荷平準化を実現するには、需要が大きな時間帯に高料金を設定することで需要を抑制し、逆に需要が小さな時間帯には低料金により需要を促す必要がある。これを実現するために 3 変数型のシグモイド・ロジスティック関数を用いた料金算出法を提案する。

まず、リアルタイム料金は次に示す流れで決定する。

- ① QCC が前日に需要家の負荷パターンを推定
- ② 推定した負荷パターンを基にリアルタイム料金を設定
- ③ 前日に決定した料金を需要家に提示

需要家の過去の負荷パターンから、需要予測が成り立つと仮定し、QCC は電力量料金が 0 円の場合の日負荷曲線（以下参照負荷曲線と呼ぶ）を推定できるものとする（図 3 参照）。参照負荷曲線における需要 $D(t)$ と最小需要 D_{min} の差分からリアルタイム料金 $RTP(t)$ [¥/kWh] を次式によって決定する。

$$RTP(t) = RTP_{min} + \frac{a}{1 + b \exp(-cr(t))} \dots\dots\dots (1)$$

$$r(t) = D(t) - D_{min} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 RTP_{min} は最低料金を表す任意設定の定数、 a, b, c は関数の形状に影響を与える変数を表す。図 4 に示すように、シグモイド・ロジスティック関数特有の S 形状を用いることで、需要が高まってくると予想される時間帯に他の時間帯と比べて高めの料金設定を行うことができる。

ところで、料金設定を行う際に提案システムと従来システムとの間で需要家を得る満足度、すなわち需要家の効用が同じであることが望ましい。また、需要家の立場から見れば QCC が Utility から購入する料金よりも高い料金で電力を販売されることは好ましくないと考えられる。そこで、需要家への配慮からリアルタイム料金設定時に次に示す制約条件を設ける。

- 提案システムにおける需要家の効用は従来システムのそれと等しい
- リアルタイム料金の上下限値を Utility が提供する時間帯別料金制度の昼間、夜間料金に一致させる

図 3 参照負荷曲線

Fig. 3. Reference load curve.

図 4 リアルタイム料金曲線

Fig. 4. Real-time pricing curve.

図 5 料金-需要曲線

Fig. 5. Price-demand curve.

3.2 需要家モデル 料金に対する需要家の行動は、図 5 に示す直線近似した料金-需要曲線を用いて決定する。ここで、横軸の値は、電気料金 0 [¥/kWh] における需要を 1 としたときの割合を表している。料金と需要曲線から需要の割合を決定し、これを参照負荷曲線の需要と掛け合わせることで需要家の各時刻の消費電力が決定される。料金に対する需要家の効用の指標には、課金によって消失する需要家の消費者余剰（図 5 の斜線部分の面積）を用いる⁽¹²⁾。

3.3 リアルタイム料金の最適化手法 提案するリアルタイム料金には式 (1) 式に示すように、変数 a, b, c による 3 自由度がある。これらを決定変数として使い、DSM を行う主体である QCC の利益が最大になるような料金設定を行う。目的関数および制約条件については 4 章および 5 章で述べるが、その最適化手法には遺伝的アルゴリズム (GA) を用いる（図 6 参照）。すなわち、3 変数を遺伝子列にコーディングし、目的関数値を遺伝子個体の適合度とし

図 6 遺伝的アルゴリズム (GA) の流れ
Fig. 6. Flow chart of genetic algorithm.

て評価する。

4. DG の運用を考慮した DSM

4.1 リアルタイム料金の決定方法 QCC は DG 発電単価よりも購入コストが高い昼間時間帯に DG を運転し、不足があれば Utility から電力を購入する。QCC は各時刻の電力の供給コストが最小となる行動をとり、リアルタイム料金と供給コストの差益を得る。供給コスト $C_{supply}(t)$ [¥/kWh] を次式で表現する。

$$C_{supply}(t) = \frac{C_{DG}(t)W_{DG}(t) + C_{buy}(t)W_{buy}(t)}{W_{DG}(t) + W_{buy}(t)} \dots\dots (3)$$

ここで、 $C_{DG}(t)$, $W_{DG}(t)$ は DG の発電単価 [¥/kWh] (固定費も含む) と発電電力量 [kWh], $C_{buy}(t)$, $W_{buy}(t)$ は Utility からの購入単価 [¥/kWh] と購入電力量 [kWh] を表す。

QCC は DG の運用を考慮して、利益が最大となるように料金設定を行う。決定変数を (1) 式の 3 変数 a, b, c とし、次式の目的関数を用いてリアルタイム料金を決定する。

目的関数：QCC の利益最大化

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^{24} (RTP(t) - C_{supply}(t)) \times W_{demand}(t) \right\} \dots\dots (4)$$

制約条件：リアルタイム料金の上下限値を固定

$$\begin{aligned} RTP_{max} &= C_{buy}(t=day) \\ RTP_{min} &= C_{buy}(t=night) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

提案システムと従来システムでは需要家の効用が不変

$$\sum_{t=1}^{24} u_{conv}(t) = \sum_{t=1}^{24} u_{DSM}(t) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $W_{demand}(t)$ は $RTP(t)$ に基づいて変化した後の需要量 [kWh], $C_{supply}(t)$ [¥/kWh] は供給コスト, $C_{buy}(t=day)$, $C_{buy}(t=night)$ は Utility が提供する時間帯別料金の昼間電力量料金 [¥/kWh] と夜間電力量料金 [¥/kWh], $u_{conv}(t)$, $u_{DSM}(t)$ は従来システムおよび提案システムにおける需要家の効用を表す。

図 7 DG の運用を考慮した DSM における適応度評価
Fig. 7. Fitness evaluation on each chromosome for DSM considering DG operation.

4.2 計算フローチャート リアルタイム料金の最適化のためのフローチャートを図 7 に示す。これは GA の 1 個体に対して適用する処理であり、図 6 の適合度評価の部分に対応する。リアルタイム料金の最大化問題を解くとき、(5) 式と (6) 式で表される制約条件が加わるが、図 7 に示す処理を各個体に適用することにより、制約条件をクリアした個体程、大きな適合度を与え、次世代への生存確率を高めることにした。二つの制約条件をクリアした個体に対しては (4) 式の目的関数値を与え、個体の適合度とする。最終的に最も大きな適合度をもつ個体を最適解として評価する。なお、後で述べる試算例では、図 7 中の適合度評価において、“Small” として 100 という数値を、“Middle” として 1000 を、“High” として目的関数 (利益) そのものの値を入力している (ただし、負の値をとらないような変換を行っている)。

4.3 DG 導入量をパラメータとした評価 リアルタイム料金適用後のピーク負荷に対する DG の割合をパラメータとしてシステムの評価を行った。評価は代表日を対象として行い、QCC の 1 日の利益と負荷率を評価指標とした。

(1) 試算条件 Utility と QCC 間の契約は表 1 に示すように業務用負荷の季節別時間帯別料金⁽¹³⁾ としての契約が成り立っているとし、この条件のもとで QCC は自地域の住宅負荷と業務用負荷に対して電力供給を行う。昼間時間帯は 8~22 時、夜間時間帯はその他の時間帯である。また、夏季は 7 月~9 月である。従来システムの設定額料金および提案システムのリアルタイム料金⁽¹³⁾ 及びその他の設定条件を表 2 及び表 3 に示す。参照負荷曲線は電力系統標準モデル⁽¹⁴⁾ を参考に設定し、図 8 の 4 種類の季節別、業種別の負荷曲線を用いた。

(2) 試算結果 試算結果を図 9 に示す。

(i) 負荷率の評価 DSM を 3 種類の住宅負荷に適用した場合は、ピーク負荷の 10%、業務用負荷に適用した場合は 50% の DG 導入時に QCC の負荷率が最も高くなることがわかった。しかし、DG の過剰な導入を行うと従来システムと比較して負荷率が悪化している。QCC は昼間時間

表 1 QCC-Utility 間の契約

Table 1. Contract between QCC and Utility.

Demand charge[¥/kW]			1560.00
Energy charge[¥/kWh]	Daytime	summer	14.70
		the others	13.65
	Nighttime		6.05

表 2 各種料金の設定条件

Table 2. Parameters in each pricing system.

		Conventional system [¥/kWh]	RTP _{max} [¥/kWh]	RTP _{min} [¥/kWh]
Business	summer	12.02	14.70	6.05
	other seasons	10.93	13.65	
Residential		15.58	19.95	5.95

表 3 その他の設定条件

Table 3. Other data for simulation.

Generation Cost of DG[¥/kWh]	11.0
Slope of Price-demand Curve[¥/kWh]	-100

図 8 代表日参照負荷曲線

Fig. 8. Reference load curves for simulation.

帯に DG を用いて需要家に電力を供給するが、DG 導入量が多すぎると昼間需要の大部分を DG によって供給することになる。これにより、過剰なピークカットが行われる。

(ii) QCC の利益の評価 DG 導入量が増加するにつれて、QCC の利益は増加している。これは、DG 導入量が変化してもリアルタイム料金によって得られる収入に大きな変化はないが、Utility から昼間時間帯に電力を購入する料金と比較して DG の発電単価が安いために、(3) 式で表現される QCC の昼間時間帯の電力供給コストが低く抑えられるためである。

住宅負荷に適用した場合は DG を運用しない場合でも、QCC は正の利益を得ている。これは表 1、表 2 に示すように QCC が住宅負荷を集約することにより、それと比較して割安な業務用負荷としての契約で Utility から電力を購入し、住宅負荷の料金設定で需要家に電力を販売しているためである。一方、業務用負荷に適用した場合はリアルタイム料金適用後のピーク負荷に対して 30%以上の DG を導入することで、QCC が正の利益を得ることがわかった。

以上の結果から、DG の導入量によっては QCC が負荷率向上に貢献すると同時に、QCC の利益が正となる可能性が示された。

図 9 DG 導入量に対する QCC の 1 日の利益と負荷率

Fig. 9. Profit of QCC and load factor on a day against the installation of DG.

5. ESS の運用を考慮した DSM

ESS は日間運用を考え夜間充電、昼間放電とする。また、この際に QCC は ESS の運用により減少した Utility-QCC 間の基本料金（契約電力）を個々の需要家から基本料金として回収し、収入を得ることができると仮定する。契約電

力は本来 1 年毎に決定されるため、本問題は年単位で考える必要がある。これを考慮して QCC の年間収支を次式により表現する。

収入：

$$\sum_{t=1}^{8760} RTP(t) \times W_{demand}(t) + C_{base} \times W_{cut} \times 12 \dots\dots (7)$$

支出：

$$\sum_{t=1}^{8760} (C_{buy}(t) \times (W_{demand}(t) \pm ESS(t))) + Cons \times rate \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 C_{base} は Utility-QCC 間の基本料金 [¥/kW/month]、 W_{cut} は契約電力減少分 [kW]、 $C_{buy}(t)$ は Utility からの購入電力量料金 [¥/kWh]、 $W_{demand}(t)$ は $RTP(t)$ に基づいて変化した後の需要量 [kWh]、 $ESS(t)$ は ESS の充放電容量 [kWh]、 $Cons$ と $rate$ は ESS の建設コスト [¥/kW] と年経費率をそれぞれ表す。

5.1 リアルタイム料金の決定方法 QCC は ESS の運用を考慮して運用時の利益が最大となるような料金設定を行う。決定変数を (1) 式の 3 変数 a, b, c とし、次式の目的関数を用いてリアルタイム料金を決定する。

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^{24} (RTP(t) \times W_{demand}(t)) - \min \{ C_{buy}(t) \times W_{receive}(t) \} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $W_{receive}(t)$ は QCC が Utility から購入する電力量 [kWh] を表す。制約条件としては (5) 式および (6) 式で表される制約の他に、ESS を以下に示す問題の解に従って運用するという制約を加える。

目的関数：1 日における ESS の運用コスト最小化

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{24} C_{buy}(t) \times W_{receive}(t) \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$W_{receive}(t) = W_{demand}(t) \pm ESS(t) \dots\dots\dots (11)$$

制約条件：契約電力オーバーなし、逆潮流禁止

$$0 \leq W_{receive}(t) \leq W_{contract} \dots\dots\dots (12)$$

ESS の入出力上限制約

$$-ESS_{limit} \leq ESS(t) \leq ESS_{limit} \dots\dots\dots (13)$$

ESS の容量制約

$$0 \leq State_{ESS}(t) \leq State_{max} \dots\dots\dots (14)$$

日間境界条件 (0 時と 24 時の貯蔵容量の一致)

$$State_{ESS}(t=0) = State_{ESS}(t=24) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $W_{contract}$ は QCC-Utility 間の契約電力 [kW]、 $State_{ESS}(t)$ は ESS の容量 [kWh] をそれぞれ表す。なお、(15) 式は、ESS の日間運用を前提とした条件である。また、ESS の充放電パターンは動的計画法 (DP) の適用により (10) 式を満たすように決定される⁽¹⁵⁾。

図 10 ESS の運用を考慮した DSM における適合度評価

Fig. 10. Fitness evaluation on each chromosome for DSM considering ESS operation.

5.2 計算フローチャート リアルタイム料金の最適化のためのフローチャートを図 10 に示す。これは GA の 1

個体に対して適用する処理であり、図 6 の適合度評価の部分に対応する。4.2 節に述べたような処理を行うことで、リアルタイム料金の制約条件を満たす個体の生存確率を高める。二つの制約条件を満たす個体に対して (9) 式の目的関数値を与え、最終的に最も大きな適合度をもつ個体を最適解として評価する。なお、後で述べるシミュレーションでは、図 10 中の適合度評価において、“Small”、“Middle”、“High” の適合度に、前述の図 7 と同じ値を入力している。

ESS の運用を考慮した DSM では、契約電力が考慮されているため QCC の利益計算は年間単位で行う。計算の簡略化のために、試算では各月毎に 1 日の参照負荷曲線に負荷特性を代表させ、各代表日についてリアルタイム料金の最適化を行う。各月の QCC の利益は、代表日における QCC の利益と各月の日数を乗算することにより求められる。

ESS の導入により QCC の契約電力が減少するほど、QCC の基本料金収入は大きくなる。QCC がより多くの収入を得るためには、QCC は可能な限り契約電力を低く抑えるように ESS の運用を行うことが望ましい。

導入した ESS を用いて、どの程度契約電力を低減できるかを調べるために図 11 に示す流れで年間ピークとなる月の代表日に対してリアルタイム料金の最適化を行う。算出された契約電力の下で各月代表日に対して最適化計算を実行し、(7) 式と (8) 式から QCC の 1 年間の利益を計算する。

5.3 ESS 導入量をパラメータとした評価 ESS 導入量をパラメータとしてシステムの評価を行った。試算は年間単位で行い、QCC の 1 年の利益および各月代表日の負荷率を評価指標とした。

(1) 試算条件 各月代表日および年ピーク負荷 (7 月末の 5 日間：P で表記) の参照負荷曲線を図 12 に示す。Utility-QCC 間の契約、リアルタイム料金の設定条件は 4.3 節で述べたものと同条件とする。現行の業務用時間帯別料金制度では日祝日は終日夜間電気料金で販売されるため、QCC は日祝日には DSM を適用しないとする。各

図 11 各月代表日のリアルタイム料金計算の流れ
Fig. 11. Flow chart of determining the real-time prices.

図 12 参照負荷曲線

Fig. 12. Reference load curves for simulation.

表 4 ESS の設定条件

Table 4. Simulation data for ESS.

System output[kW]	Parameter
Storage Capacity[kWh]	System output $\times$ 7.2h
Total battery efficiency	78%
Annualized factor of capital cost	0.0778
Capital cost [¥/kW]	250,000

月の日祝日の数は文献(14)を参考に設定した。ESS の種類は NAS 電池を想定し、その設定条件を表 4 に示す。建設費は目標値の 25 万 [¥/kW] に設定した。

(2) 試算結果 試算結果を表 5 および図 13 に示す。

(i) 負荷率の評価 結果から、DSM を住宅負荷へ適

表 5 負荷率の比較 (従来型システム vs DSM)

Table 5. Load factor comparison (conventional vs DSM).

(a) Residential

Capacity of ESS[kW]	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	P	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Conventional system	77.9	77.9	77.9	79.7	79.7	79.7	83.4	83.4	83.4	79.7	79.7	79.7	79.7
Proposed system	0	81.9	81.9	82.0	83.9	83.8	83.8	87.7	87.7	83.8	83.9	83.8	83.9
25	84.2	84.4	84.9	87.9	85.4	86.7	88.4	90.1	89.4	86.7	87.9	85.4	86.9
50	86.4	86.0	84.1	85.8	85.5	86.7	88.9	94.2	89.9	86.7	85.5	86.5	86.3
75	86.4	84.5	83.3	81.2	83.0	86.8	88.9	96.3	88.9	86.8	81.2	83.0	85.6
100	86.5	84.0	77.7	74.5	76.6	81.2	88.1	96.3	88.1	81.2	74.5	76.6	79.8
125	86.5	83.5	73.2	68.9	71.2	76.8	88.1	96.8	88.1	76.8	68.9	71.2	75.1
150	86.5	83.5	73.2	68.9	71.2	76.8	88.1	96.8	88.1	76.8	68.9	71.2	75.1
175	87.0	83.5	68.4	59.8	62.3	76.3	88.1	96.8	88.1	76.3	59.8	62.3	72.5
200	87.4	83.3	68.4	57.9	62.2	76.3	88.1	96.8	88.1	76.4	57.9	62.2	72.5

(b) Business

Capacity of ESS[kW]	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	P	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Conventional system	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9	60.9
Proposed system	0	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7	62.7
25	64.0	65.1	65.1	65.8	65.8	64.0	64.4	64.2	64.6	65.1	65.8	64.0	64.7
50	67.1	65.1	65.1	66.0	66.0	67.1	64.9	69.0	65.1	65.1	66.0	66.6	64.8
75	68.7	70.2	70.2	70.6	70.6	68.7	66.3	72.8	66.7	70.2	70.6	69.4	66.6
100	71.7	75.0	75.0	68.9	68.9	71.7	70.6	77.9	66.7	75.0	68.9	78.7	66.9
125	74.5	75.3	75.3	68.4	68.4	74.5	73.9	81.5	69.9	75.3	68.4	74.1	70.7
150	74.9	72.1	72.1	65.8	65.8	74.9	78.6	86.8	70.3	72.1	65.8	67.9	74.2
175	75.5	70.4	70.4	64.6	64.6	75.5	84.1	92.5	71.7	70.4	64.6	65.2	80.1
200	69.7	70.4	70.4	64.2	64.2	69.7	84.1	92.5	72.7	70.4	64.2	65.2	77.6
225	69.1	69.0	69.0	58.7	58.7	69.1	84.2	92.9	75.9	69.0	58.7	65.0	71.6

図 13 ESS 導入量に対する QCC の 1 年の利益

Fig. 13. Profit of QCC on year against the installation of ESS.

用した場合は 75 kW 以下、業務用負荷へ適用した場合は 200 kW 以下の ESS の導入により各月代表日の負荷率が改善されているのがわかる。表 5 の斜線部分は従来システムと比較して負荷率が悪化している代表日の負荷率を示している。数値計算に用いた住宅用負荷、業務用負荷の参照負荷曲線データにおいて、4 月・10 月の代表日の負荷は 1 日を通じて最も需要量が小さい (図 12 参照)。このような負荷に対して ESS の過剰な導入を行うと、契約電力が 1 日の負荷全体に対して高いため、ESS の運用パターンは夜間時間帯に過剰充電、昼間時間帯に過剰放電となる。このた

め、昼間時間帯から夜間時間帯への過剰なピークシフトが起こる。

(ii) QCC の利益の評価 図 13 から住宅、業務負荷共に、ESS の導入量の増加に対し QCC の利益は最初は減少するものの、その後増加し、再び減少に転じるというパターンで変化している。これは、ESS 導入による契約電力削減効果を表す収入 (7) 式の第 2 項) が大きく関係している。すなわち、貯蔵装置の導入量が少ない段階 (導入量 A) では、貯蔵エネルギー量の制約から契約電力を大幅に減少させるほどの効果はないが、ESS の導入量が増加し十分な貯蔵エネルギー量を持ってくると (導入量 B)、契約電力削減効果が大きくなる。しかしながら、さらに導入量を増加させていくと (導入量 C)、逆に充電時の負荷が契約電力を増加させる方向に働くことになるため、その効果はある程度まで ESS を増加させた段階で飽和する。ESS の導入量の増加は建設費を単調に増加させるため、導入量 A および C の段階では、ESS 建設費が収入を上回り、ESS 導入量の増加に対して QCC の利益は減少する。これに対して、導入量 B であれば、契約電力減少に伴う収入が ESS 建設費を上回り、QCC の利益が増加する。以上のことから、利益を最大にするような ESS の導入量が存在することになる。

住宅負荷の場合は ESS 導入量が 50 kW、業務用負荷の場合は ESS 導入量が 175 kW のときに QCC は最も高い利益を得ている。このとき、各月代表日の負荷率の改善が実現できている。しかし、業務用負荷へ適用した場合は正の利益を得ることが難しいことがわかった。住宅負荷へ適用した場合に QCC は正の利益を得ているが、これは QCC が住宅負荷を集約することにより、それと比較して割安な業務用負荷としての契約で Utility から電力を購入し、住宅負荷の料金設定で需要家に電力を供給しているためである。

ESS の運用を考慮した DSM を住宅負荷に適用した場合は負荷率の向上と同時に QCC が利益を得ることが可能となるが、設定した ESS の建設費のもとでも、業務用負荷への適用は QCC にとってメリットがないことがわかった。

6. ま と め

本論文では FRIENDS が備える情報ネットワークを通じ、需要家の負荷パターンに合わせたリアルタイム料金、および DG、ESS の運用を考慮した DSM システムを提案した。提案した DSM を民生分野負荷である住宅負荷と業務用負荷に適用し、QCC の利益と負荷率の定量的な評価を行った結果、DG の運用を考慮した DSM の適用によって、負荷率の改善と QCC の利益確保が同時に実現できる可能性が示されたが、ESS の運用を考慮した DSM の業務用負荷への適用は難しいことがわかった。

ところで、QCC が出現する近未来においては、Utility が需要の離脱を防ぐために、現状よりも多様なメニューを用意しているという状況も考えられる。その場合においても、QCC は需要家近接性とその適度な需要規模 (QCC あたり 1~2 [MW]) により、需要家ニーズを考慮したきめ細かい

供給メニューを展開できるという固有の特長・優位性を持つと考えられる。従って、Utility は公平性の観点から系統全体に対して一律のユニバーサルサービスを行い、個々の需要家ニーズを考慮したよりきめ細かいサービスは、系統への影響を抑制しながら QCC が担うことによって、Utility と QCC とが協調した供給形態が実現できるものと考えている。

なお、今回の試算では、参照負荷曲線および料金-需要曲線の不確定性について考慮していないため、今後はこれらの不確定性を含めた検討を行っていく必要があると考えている。また、リアルタイム料金の実現に際しては、リアルタイム料金表示モニタの設置および通信コストに関わる費用が発生すると考えられるが、今後はこれらのコストを含めた評価を行うことで、より現実に近い形でのコスト評価を行う必要もあると考えている。

(平成 17 年 2 月 23 日受付, 平成 17 年 6 月 1 日再受付)

文 献

- (1) K. Nara and J. Hasegawa: "A New Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System", *T. IEE Japan*, Vol.117, No.1, pp.47-53 (1997-1) (in Japanese)
奈良宏一・長谷川淳:「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」, 電学論 B, 117, 1, pp.47-53 (1997-1)
- (2) R. Hara, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa: "Interior Structure of Quality Control Center on the Low-Voltage Side for Customized Power Quality Service in FRIENDS", *Electrical Engineering in Japan*, Vol.139, No.3, pp.45-52 (2002)
- (3) T. Sasaki, H. Kita, R. Hara, E. Tanaka, and J. Hasegawa: "Interior Structure of a Quality Control Center at the Low-Voltage Side Considering Power Conditioning by SMES", *Electrical Engineering in Japan*, Vol.143, No.3, pp.20-28 (2003)
- (4) Y. Kaya and H. Asano: "A Theory of Time-of-Use Rate for the Power System with Multi-type Power Plants", *T. IEE Japan*, Vol.108-B, No.9, pp.399-406 (1988-9) (in Japanese)
茅 陽一・浅野浩志:「多種電源からなる電力システムに対する季時別料金制の理論」, 電学論 B, 108, 9, pp.399-406 (1988-9)
- (5) 田中 誠:「電力の急峻な需要変動を抑制するリアル・タイム料金」, 日本経済研究, No.46 (2002)
- (6) M. Takahashi and H. Asano: "Penetration Analysis of Next Generation DSM Systems by Discrete Variable Integrated Resource Planning Model: Part1 Development of a Model", *Proc. of the 13th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, No.112, pp.459-460 (2002) (in Japanese)
高橋雅仁・浅野浩志:「離散型統合資源計画モデルによる次世代 DSM システムの普及分析, その 1: モデル開発」, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.112, pp.459-460 (2002)
- (7) H. Asano and M. Takahashi: "Penetration Analysis of Next Generation DSM Systems by Discrete Variable Integrated Resource Planning Model: Part2 Penetration Analysis of Residential Gateway and Load Control", *Proc. of the 13th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, No.113, pp.461-462 (2002) (in Japanese)
浅野浩志・高橋雅仁:「離散型統合資源計画モデルによる次世代 DSM システムの普及分析, その 2: 家庭用負荷制御プログラムの最適普及方策」, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.113, pp.461-462 (2002)
- (8) T. Imanaka and H. Asano: "Basic Study on Avoided Distribution Costs by Demand Side Management", *Proc. of the 11th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, No.287, pp.731-732 (2000) (in Japanese)
今中健雄・浅野浩志:「DSM による配電部門設備投資の繰り延べ効果に関する基礎的検討」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.287, pp.731-732 (2000)
- (9) S. Machida and T. Tani: "Introduction Effect of the Load Leveling Systems with Solar Cell and Storage Battery", *IEEE Trans. PE*, Vol.123-B, No.1, pp.37-45 (2003-1) (in Japanese)

- 町田定之・谷 辰夫：「太陽電池・蓄電池を利用した負荷平準化システムの導入効果」, 電学論 B, **123**, 1, pp.37-45 (2003-1)
- (10) H. Honda and H. Saitoh: "An Evaluation Model of Customer's Cooperation System for Proper Voltage Profile of Distribution Networks", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.11, pp.1506-1516 (2001-11) (in Japanese)
本田秀樹・斉藤浩海：「配電系統の電圧適正化を目的とした需要家協力システムの評価用モデル」, 電学論 B, **121**, 11, pp.1506-1516 (2001-11)
- (11) M.H. Nehrir and B.J. LaMeres: "A multiple-block fuzzy logic-based electric water heater demand-side management strategy for leveling distribution feeder demand profile", *Electric Power System Research*, Vol.56, No.3, pp.225-230 (2000)
- (12) Y. Mitsukuri, H. Kita, R. Hara, E. Tanaka, and J. Hasegawa: "Reliability Evaluation Considering Customized Power Quality Supply in FRIENDS", *Electrical Engineering in Japan*, Vol.151, No.4, pp.25-35 (2005)
- (13) 「季節別時間帯別料金メニュー」: 東京電力 HP,
URL: <http://www.tepco.co.jp/>
- (14) 「電力系統標準モデル」: 地域系統供給モデル, 表 3.5(a) 負荷曲線データ, URL: <http://www.ice.or.jp/pes/model/>
- (15) Y. Hamasaki, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, T. Ohno, M. Hyodo, and T. Nakajima: "Operation of NAS battery system aimed at improvement in consumer merit", *The Hokkaido Chapters Of The Institutes Of Electrical And Information Engineers, Japan*, No.77, pp.98-99 (2003) (in Japanese)
浜崎裕二・北 裕幸・田中英一・長谷川淳・大野高宏・兵藤 守・中島達人：「需要家メリット向上を目指した NAS 電池システムの運用に関する検討」, 平成 15 年度電気関係学会道支部連大, No.77 (2003)

吉 川 茂 樹 (学生員) 1979 年 4 月 5 日生。2005 年 3 月北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年 4 月東北電力(株)入社, 現在に至る。在学中, 主として, 電力系統における需要家側制御(DSM)に関する研究に従事。

北 裕 幸 (正員) 1963 年 5 月 7 日生。1988 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1989 年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 1995 年 4 月同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻助教授, 2005 年 7 月同大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻教授となり, 現在に至る。博士(工学)。1997 年電気学会論文賞受賞。主として, 電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。IEEE, 日本 OR 学会, 電気設備学会, 照明学会会員。

田 中 英 一 (正員) 1952 年 8 月 12 日生。1977 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 2004 年 4 月改組により, 同大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻に配置換えとなり, 現在に至る。主として, 電力系統の解析・制御に関する研究に従事。日本 OR 学会, 電気設備学会, 計測自動制御学会会員。

長谷川 淳 (正員) 1943 年 12 月 13 日生。1971 年 3 月北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部講師, 同助教授を経て, 85 年 4 月同教授。2004 年 4 月独立行政法人国立高等専門学校機構函館工業高等専門学校校長となり, 現在に至る。工学博士。1997 年電気学会論文賞受賞。1994 年 B 部門長, 1997 年副会長(調査担当), 2004 年会長代理, 2005 年会長。主として, 電力系統の計画・運用・解析・制御および電気エネルギー工学全般に関する研究に従事。IEEE, 照明学会, エネルギー資源学会, 低温工学協会, 日本 OR 学会, 電気設備学会等会員。