

環境快適性を考慮した分散協調型デマンドコントロールシステム向け 電力制御アルゴリズムの提案と評価

A Study on Environmental-aware Controller

for Distributed and Cooperative Demand Side Management System

80717415 半田智彦 (Toshihiko Handa)

Supervisor : 西宏章 (Hiroaki Nishi)

1. 結論

地球温暖化問題の深刻化やエネルギー資源問題の悪化を受け、風力や太陽光などの自然エネルギーの利用やコジェネレーションシステム(CGS)のような未利用エネルギーの利用を行うシステムの普及が進んできている。このような小規模分散型電源に対応した電力システムとしてマイクログリッドが提案されているが、従来研究は主に系統連携や需要予測、供給側の制御に重点が置かれてきた。しかし、自然エネルギーの利用や一般家庭でのエネルギー需要予測の困難さを勘案すると、供給側のみでの制御では不十分になる可能性がある。そこで、グリッド内のエネルギー需要を制御するための分散協調型デマンドコントロールシステムが有効となる。

本研究では、この分散協調型デマンドコントロールシステムにおける各需要家間の協調制御を行うためのアルゴリズムおよび、需要家端末における電力制御アルゴリズムに快適性指標の導入し、評価を行うことを目的とする。

2. 分散協調型デマンドコントロールシステム KNIVES

従来からのデマンドコントロールシステムは、主に大規模建築物におけるコスト削減や省エネルギー化を目的として開発、導入されてきた。それに対し、本研究で対象としている分散協調型デマンドコントロールシステムは、小規模需要家への導入と複数需要家間での協調制御を採用し、マイクログリッドベースの電力供給網に対応している。本研究ではKNIVESと呼ばれる分散協調型デマンドコントロールシステムを提案しており、下記のような特徴を持つ。

KNIVES はエリアごとの需給平衡を実現するためのKNIVESサーバと、各需要家のもとに設置してローカルな需給平衡を実現するためのKNIVES 端末から構成される。KNIVESサーバは電力系統のエリアネットワークに対応し、複数のレイヤから構成される。最下位レイヤが最も狭いエリアを統括するサーバとなり、直接KNIVES 端末とデマンド目標値(数値目標ベース)や計測データの授受を行う。上位レイヤに行くほど統括するエリアは広範になるが、直下のレイヤにあるサーバ群に対するデマンド管理のみを行い、サーバの負荷軽減を図っている。このKNIVES サーバシステムの拡張性と可用性はこれまでの研究によって確認されている[1]。

KNIVES 端末は需要家の消費電力、各種環境データの計測や電力消費の制御を行う。環境計測用センサとして、温度・湿度・照度・CO₂センサが実装されている。

3. 需要家間の協調制御

分散協調型デマンドコントロールシステムでは、前述したよ

うに需要家間やサーバ間の上位レイヤにおいて、協調制御を行う。協調制御を行うメリットとして、小規模な需要家でも複数軒をまとめることで制御可能な電力量を増やすこと、そしてより効率的なピークシフトコントロールが行えること、の2点が挙げられる。

本研究では、東京ガス横浜研究所に構築されたマイクログリッド実証施設を利用して、協調制御アルゴリズムの実装と評価を行った。マイクログリッド実証施設の電源構成を以下に示す。

- ガスエンジン CGS: 25kW x 2, 9.9kW x 1
- 太陽光発電: 10kW x 1
- 風力発電機: 6kW x 2
- バイオマス発電: 9.9kW x 1
- 鉛蓄電池: 50kW - 30分
- ニッケル水素電池: 50kW - 2時間

また、各発電設備の発電量の計測および制御、システム全体における需要予測などを行う統合制御サーバが用意されている。

今回の協調制御実験では、マイクログリッドの統合制御サーバとKNIVESサーバを接続し、3実験室に制御端末を設置した。協調制御を行うために、端末側には現在の電力量とともに需要予測をサーバに送信する機能を実装した。一方、サーバには管理する全需要家で使用可能な電力をマイクログリッドの統合制御サーバより取得し、各需要家に電力を割り振る機能を実装した。このとき、端末から送られた電力量や予測値をもとに、各需要家のデマンド目標値は計算され、送信される。電力を割り振るためのロジックは、需要家ごとの優先度や余剰電力の融通にも対応している。今回の実装では、制御対象外の施設で使用した電力量の変動に応じて各実験室のデマンド目標値を更新しており、この目標値更新は5秒ごとに行われる。図1に実験データを示す。Limit はグリッド全体での目標値であり、lab1~3は制御対象の実験室における電力使用量である。

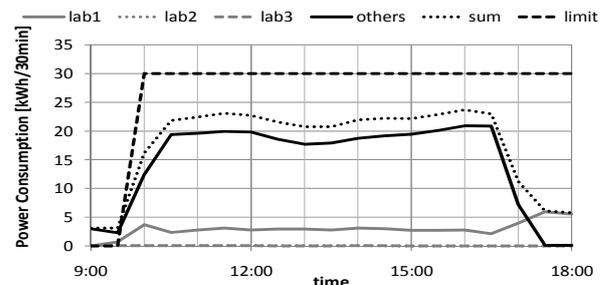


図1 協調制御によるデマンド目標値と消費電力の関係

4. 快適性指標

デマンドコントロールシステムにおいて、制御対象となるも

のは各需要家における電力消費量であり、快適性に関してはあまり考慮されていなかった。しかし、室内環境の悪化は作業効率の低下を招くことが過去の研究からわかっており、住空間や執務空間を擁する建築物においてデマンドコントロールを行った際に、極端に室内環境の快適性が悪化することは避けるべきである。また、快適性といっても一概に温度指標のみを見ればよいというわけではなく、放射温度や湿度、風速、在室者の状態、着衣量も快適性に関する熱要素に含まれる。これらを考慮した室内環境向けの快適性指標として PMV (Predict Mean Vote, ISO7730) や SET* (Standard Effective Temperature) が一般的に使われているが、放射温度を使用するため特別な測定装置を用いる必要がある。より簡便に計測できる環境データから計算できる快適性指標としては、温度と湿度から評価を行う不快指数 (Discomfort Index, DI) があり、次式によって表される。

$$DI = 0.81t_a + 0.01rh(0.99t_a - 14.3) + 46.3 \quad (1)$$

ここで、 t_a は気温、 rh は相対湿度をそれぞれ表している。75 を超えるとやや暑い、80 を超えると暑くて汗が出る、85 を超えると暑くてたまらない、という感覚に対応する[2]。KNIVES 端末では温度センサと湿度センサを実装しているため、本研究ではこの不快指数を快適性指標として採用する。

5. 電力制御と快適性のバランス

これまでKNIVESでは従来のデマンドコントロールシステムと同様に、電力消費量のみを勘案して電力消費機器の制御を行ってきた。現在実装されている制御手法ではサーバからデマンド目標値と計測された電力データから線形補間により算出した予想電力消費量を元に、各端末が制御対象機器の制御スケジュールテーブルを作成する。このスケジュールテーブルは予め機器ごとに設定された優先度に基づいて電力の割り振りを行うよう作成され、端末の制御サイクル (5 秒) ごとに更新される。協調制御を行う際にもこのスケジュールテーブルを参照することにより、消費電力の時間遷移を勘案することができる。

しかし前章で述べたように、快適性の保持はデマンドコントロールを行う際に除くことのできない指標であり、電力消費量の削減と快適性の保持とのトレードオフをバランスする手法を検討する必要がある。そこで、本研究ではデマンドコントロールを行った際の室内熱環境の変化を考察するため、住宅を対象にした熱負荷モデルを構築し、シミュレータとして実装した。今回熱負荷モデルにて勘案した要素を以下に述べる。

- 日射によるガラス透過熱負荷 Q_g [W]

$$Q_g = I_g \cdot SC \cdot area_{window} \quad (2)$$

- 建築構造物を通過する還流熱負荷 Q_n [W]

$$Q_n = ETD \cdot K \cdot area \quad (3)$$

- 換気・隙間風による熱負荷 (顕熱 Q_s [W], 潜熱 Q_l [W])

$$Q_s = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta\theta \quad (4)$$

$$Q_l = r \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta x \quad (5)$$

- 室内の照明、電気機器、人体による発熱負荷 Q_i [W]
- エアコンによる熱負荷 Q_a [W]

ただし、(2)式における I_g は日射熱取得[W/m²]、 SC は窓の遮蔽係数、 $area_{window}$ は窓の面積[m²]、(3)式における ETD は実効温度差[K]、 K は熱通過率[W/m²K]、 $area$ は壁面もしくは窓の面積、

(4)、(5)式において C_p は空気の定圧比熱[J/kgK]、 ρ は空気の密度[kg/m³]、 V は換気量[m³]、 $\Delta\theta$ は内外温度差[K]、 Δx は室内外絶対湿度差[kg/kg(DA)]をそれぞれ表す。

シミュレータは熱負荷モデルを実装した熱環境モジュールと制御アルゴリズムの実行モジュールから構成し、電力制御実行時の電力消費量と室内環境の変化を出力する (図2)。この結果を比較評価することで、制御手法の室内環境に与える影響を考察する。図3にその一例を示す。ここでは、与えられた電力量を1度に使用 (1-slot)、2回に分けて使用 (2-slot)、3回に分けて使用 (3-slot) とした場合の室内環境の変化を示している。横軸は必要とする電力に対する制限率を表し、縦軸は不快指数が75を超える、不快な状態の時間割合を示している。この図より、3回に分けて電力を使用する事により、同様の制限率の場合でも他の手法に比べて室内環境を快適に保つことができていることが分かる。

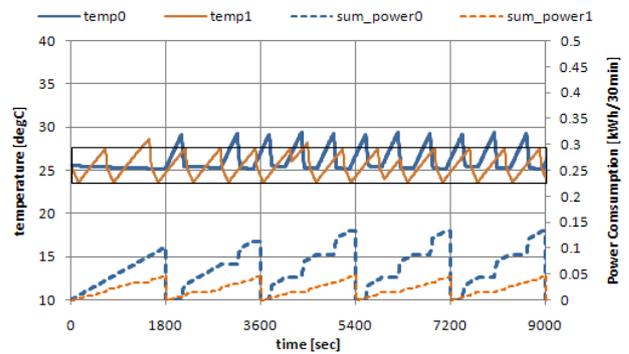


図2 消費電力と室温のシミュレーション結果

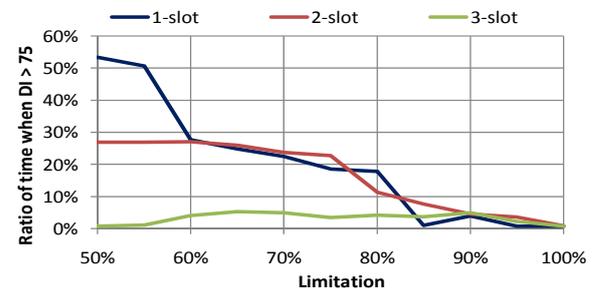


図3 デマンド制限率と室内不快度の関係

また前述したように、各制御対象機器の制御スケジュールは機器ごとの優先度によって決定されるが、快適性指標の導入によりこの優先度を動的に変動させ、快適環境の保持に重きを置いたデマンドコントロールも可能となる。

6. 結論

本研究では、次世代エネルギーネットワークに対応する分散協調型デマンドコントロールのための電力制御アルゴリズムについて、各需要家間における協調制御と需要家における室内快適性を考慮した電力制御における実装、評価を行った。

参考文献

- [1] S. Ishida, C. Roesener, J. Ichimura, H. Nishi, "Implementation of Internet based Demand Controlling System", 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 381-386, 2006
- [2] 空調調和・衛生工学会, 「新版・快適な熱環境のメカニズム 豊かな生活空間を目指して」, 丸善, 2006