

ビル空調群ネガワット仮想発電所の均し効果と不確実性の定量評価

研究代表者 岐阜大学 電気電子工学科 教授 蛭川 忠三

1. まえがき

将来のスマートグリッド技術として電力制御指令に対して需要家が分単位で応答する FastADR (Fast Automated Demand Response) が研究されている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。この FastADR における需要家設備として、有望視されているものにビルマルチパッケージエアコン空調設備がある。その理由としては普及率と可制御性が挙げられるが、一方で複雑な冷媒回路の分散型組込み制御となるため、確率的な制御動作となり、数分の応答を問題とする場合はその不確実性が問題となりうる。

ビルマルチ空調設備と同様に個々の装置では不確実性をもつ太陽光発電や風力発電では、大量にアグリゲーション (集積) した時の均し効果によりこの問題の解決が試みられている。しかし、ビルマルチ空調機はオフィスビル群に広範囲に分布しているにも関わらず、大量アグリゲーションにおける均し効果の定量的検討は先行研究⁽⁸⁾のほかには見当たらない。また電力料金単価によるデマンドレスポンス (DR) については、住宅向けや集中型ビル空調を対象とした研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ や、料金と快適性のトレードオフ⁽¹¹⁾や、短い料金変動への対応⁽¹²⁾等の研究もある。しかし、分散型ビルマルチ空調では、時間単位の遅い制御の研究⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾は存在するが、数分単位で精密電力抑制する FastADR 応答予測は見当たらない。

本研究では、ビルマルチ空調設備電力の大半を占める圧縮機電力を直接分単位で制限する方式による FastADR について、モデル予測と実応答との予測誤差、および、抑制指令と実応答との制御残差、という二つの評価指標で大量アグリゲーションによる均し効果を検討した。モデル予測と実応答との予測誤差の均し効果は、先行研究⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾において実機時系列データから構築した多数の数式モデルを用いて、それら大量の予測応答を重ね合わせるシミュレーションにより求めた。また、抑制指令と実応答との制御残差は、実ビルマルチ空調設備に対して大量な回数の FastADR 実機実験をおこない、同時発生とみなして応答時系列を重ね合わせることで均し効果を定量的に求めた。

2. ビルマルチ空調機 FastADR アグリゲーション

従来のビルマルチ空調設備に対するデマンドレスポンス (DR) は、1時間といった粗い時間粒度で、電力抑制量も下げすぎても構わないといった緩やかな制御条件であった。そのため、運転台数変更、設定温度変更といった間接的な操作指令により時間単位の消費電力量を削減するものであった。

しかし, FastADR が目指すのは分単位の時間粒度でかつアグリゲータが目標とする値に合うよう精密制御することを想定している。空調電力を直接的に数値で精密抑制制御するには, 運転台数や設定温度ではなく, 直接的に空調機組込みの制御装置に電力数値目標を指令することが望ましい。

Fig.1 に示すように, ビルマルチ空調設備は1台の室外機に複数台の室内機が接続されて一つの冷媒回路ブロックを構成する。ビルマルチ空調機の消費電力は室外機にある圧縮機で約90%程度を占めており, インバータ駆動されているので連続的に細かく消費電力を制御可能であり, 精密な FastADR 電力抑制が期待できる。そこで本研究では, FastADR 電力抑制の手段として, クラウドにあるアグリゲータから遠隔ビルマルチ空調設備に対して圧縮機インバータ電力の抑制目標値を明示的に指令する方式を仮定する。

この抑制目標値とは, いわゆる制御理論における目標値とは異なり, 消費電力の上限を設定したものである。また, 抑制目標よりも冷媒回路を維持するための組込み制御が優先されるため, 目標値に一致するよう電力が消費されるとは限らない。その組込み制御の要因は, (i)空調負荷が低くて抑制値より現在の温調電力が小さい, (ii)圧縮機の最低回転数に相当する電力には抑制できない, (iii)圧縮機潤滑油回収の数分間は高電力を消費する, などがある。したがって Fig.2 に示すように, 個々のビルマルチ空調機の分刻み電力応答波形は FastADR 電力抑制指令値に対して過渡的に上回る時間帯もあれば指令値まで消費しない時間帯もあり一般に確率的な応答波形となる。

個々の FastADR 応答波形を複数重ね合せていく一例を Fig.3 に示す。この図は個々の実測応答波形と抑制指令値と重ね合せ波形を並べて表示している。個々の応答波形実験・予測値は, 図の最上段に示すように確率的な組込み制御や外乱のために抑制指令値と大きくはずれる場合がある。しかし, 重ね合せ数 N を増やしていくにつれて応答波形は均し効果により期待値に収束していくと考えられる。

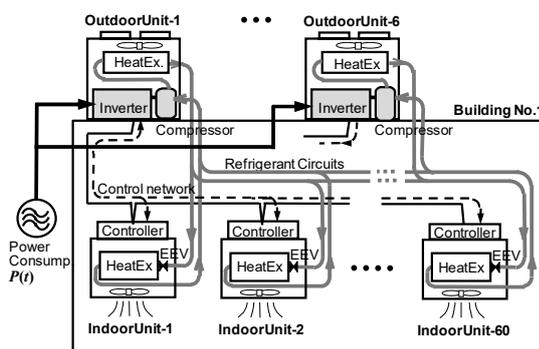


Fig.1 Complicated refrigerant circuits and control network of multi-type building air-con facilities

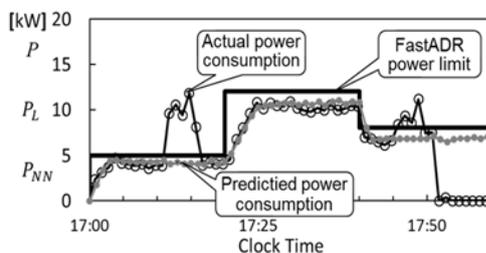


Fig.2 Stochastic behavior of FastADR responses of a multi-type building air-conditioner

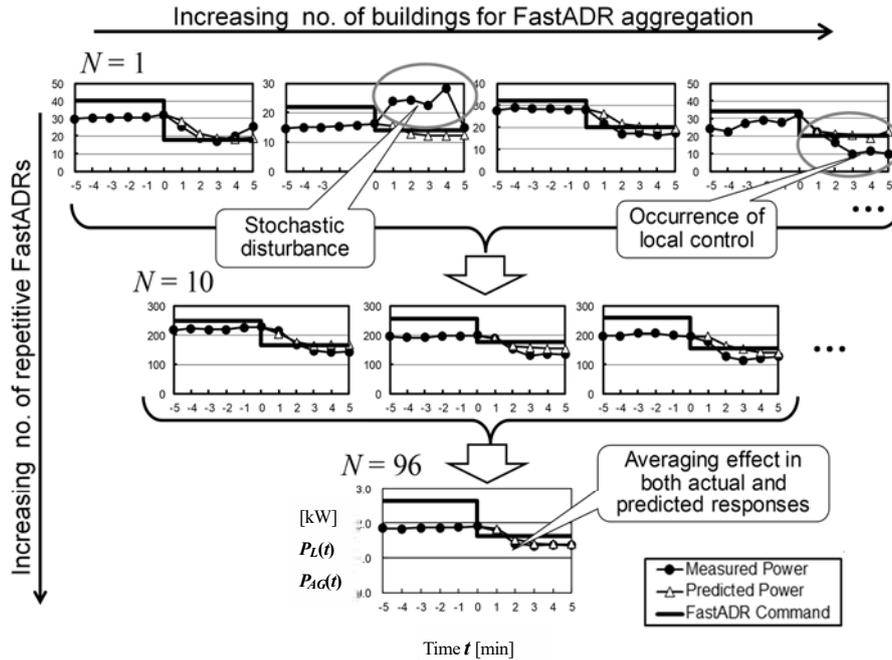


Fig.3 Averaging effect on FastADR aggregation of a large number of building-multi air-conditioning facilities

FastADR アグリゲーションにかかる時間には、制御対象設備の応答時間の他に、FastADR 発令直前の価格等のネゴシエート手続き時間や、通信制御処理時間も考慮が必要であるだろう。しかし、ネゴシエート手続き時間や通信制御処理時間に関しては人為的・制度的な側面が強く、これら時間やそのバラツキを考慮することは現時点では困難と思われる。本研究では、ネゴシエート手続き時間や通信制御処理時間については対象外とし、制御対象設備の応答時間、つまり電力抑制指令が伝わってからの応答のみを評価する。

一般に、ビル1棟では数台～数10台の空調機によりビルマルチ空調設備が構成される。そこで本研究では、分刻み離散時刻 t [min]におけるビル1棟分のビルマルチ空調設備電力を $P(t)$ [kW]、それに対応するアグリゲータからの FastADR 抑制指令値を $P_L(t)$ [kW]とする。また、ビル1棟全体を FastADR の取扱い単位とするので、それに対応させてビル1棟全体について各室内機の室温と設定の偏差に室内機定格冷房能力 C_i の重みをつけて平均したものを $T_{SA}(t)$ [deg]として扱う。

$$T_{SA}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^{N_{IU}} C_i \cdot (T_{Ai}(t) - T_{Si}(t)) \right\} / \sum_{i=1}^{N_{IU}} C_i \quad (1)$$

ここで、 i は室内機番号 ($i = 1, 2, \dots, N_{IU}$)、 $T_{Ai}(t)$ は各室内機室温センサー値、 $T_{Si}(t)$ は各室内機設定温度、 C_i は各室内機定格冷房能力である。

3. FastADR 応答の予測数式モデル

本研究の目的の一つにアグリゲーション規模に対する FastADR 予測誤差の均し効果の検討がある。個々の詳細な予測誤差そのものを追求するのではなく、また大量に構築する必要があるため、ビル毎のニューラルネットワーク (Neural Network: NN) モデルは単純な構造とした。NN モデルを使用した理由は、応答特性が確率的で非線形であり、かつ突発的な変化を持つためである。NN 構造と接続重みは先行研究⁽⁷⁾⁽⁹⁾の方法とし、入力変数を下記の(2)式とし、出力変数を(3)式とする 3 層パーセプトロン型ニューラルネットワークとした。

$$\mathbf{x} = [P_L(t+1), P_L(t), P(t-4), P(t-3), P(t-2), P(t-1), P(t), T_{SA}(t-4), T_{SA}(t-3), T_{SA}(t-2), T_{SA}(t-1), T_{SA}(t), T_o(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = [P(t+1), P(t+2), P(t+3), P(t+4), P(t+5), T_{SA}(t+1), T_{SA}(t+2), T_{SA}(t+3), T_{SA}(t+4), T_{SA}(t+5)]^T \quad (3)$$

ここで、 $T_{SA}(t)$ [deg]は前述の平均室温偏差、 $T_o(t)$ [deg]は外気温を示す。本論文では電力応答波形のみ着目しているため、入出力変数は P と P_L のみを用いた。電力 P の予測値を P' とし、以後予測値を同様に記述する。予測出力変数ベクトル \mathbf{y} の $P'(t+1), \dots, P'(t+5)$ の各成分については、次式で記述できる ($\tau = 1, 2, \dots, 5$)。

$$P'(t+\tau) = \text{Sig} \left(\sum_{j=1}^J w_{jk} \times \text{Sig} \left(\sum_{i=1}^I u_{ij} \times x_i \right) \right) \quad (4)$$

ここで、 $\text{Sig}(z) = 1/(1 + e^{-az})$ はシグモイド関数、 i ($=1, \dots, I$ ($=13$)) は入力層ノード番号、 j ($=1, \dots, J$ ($=15$)) は中間層ノード番号、 k ($=1, \dots, K$ ($=10$)) は出力層ノード番号、 u_{ij} と w_{jk} は接続重みである。また FastADR 直後 $t=1 \sim 5$ の 5 分間電力量 W'_5 を分刻みモデルで予測する場合は次式となる。以降 $P'(t+\tau)$ ($\tau = 1, 2, \dots, 5$) の意味で $P'(t)$ と記述する。

$$W'_5 = \frac{1}{60} \sum_{t=1}^5 P'(t) \quad (5)$$

4. FastADR モデル予測誤差の均し効果

前述のように確率的動作の冷媒組込み制御のため、毎回 ($n = 1, 2, \dots, N$) の応答予測値 $P^{(n)'}(t)$ は確率的であり予測モデルと実測値は誤差を生じる。複数回の分刻み応答を重ね合わせたアグリゲーション電力 $P_{AG}(t)$ は誤差が小さくなることを期待できる。

$$P_{AG}(t) = \sum_{n=1}^N P^{(n)'}(t) \quad (6)$$

今回は、予測モデルおよび実測による電力抑制応答を約 100 回 ($N = 96$) 重ね合わせて相互の誤差を評価した。Fig.4 は NN モデルを用いて、電力抑制応答 96 回を重ね合せ実測値と予測値を比較した図である。次節で示す相対誤差 E_{W5} は NN モデルで 2% と大きく改善された。この結果から、電力抑制応答を繰り返し行うことにより、個々の抑制応答の確率的減現象による

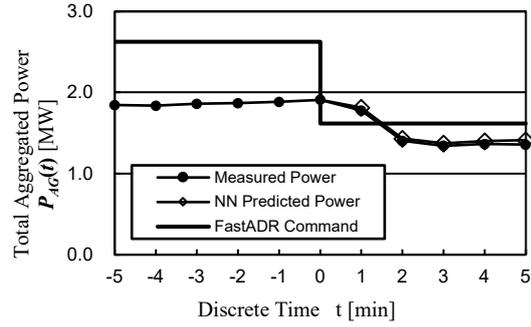


Fig.4 Aggregation of many repetitions of FastADR step responses with model prediction

予測の失敗が打ち消し合う可能性を示すことができた。よって、繰り返し電力抑制応答を行うことで、その期待値としての誤差は減少する可能性があるといえる。なお FastADR 応答以前から指令と実測値との間に差があるのは、この電力抑制指令 P_L は上限を伝えるだけであり実電力は組込み制御に任せるためである。

$t = 0$ で電力抑制が発令されたとして $t = 1, 2, \dots, 5$ の 5 分間電力量の実測値 W_5 [kWh] とその予測値 W'_5 [kWh] から(7)式のようにモデル予測誤差 E_{W5} を定義する。

$$E_{W5} = (W'_5 - W_5) / W_5 \\ = \left(\sum_{t=1}^5 P'(t) - \sum_{t=1}^5 P(t) \right) / \left(\sum_{t=1}^5 P(t) \right) \quad (7)$$

このとき、FastADR 電力抑制を $n = 1, 2, \dots$ と N 回繰返すとして、その 5 分間電力量合計 $W_5^{(N)}$ を N 個重ね合せた合計 5 分間電力量の予測誤差 $E_p^{(N)}$ を下式で定義する。

$$W_5^{(N)} = \sum_{t=1}^5 P^{(n)'}(t) \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
E_P^{(N)} &= (W_5^{(N)} - W_5^{(N)}) / W_5^{(N)} \\
&= \left(\sum_{n=1}^N W_5^{(n)} - \sum_{n=1}^N W_5^{(n)} \right) / \left(\sum_{n=1}^N W_5^{(n)} \right) \tag{9}
\end{aligned}$$

重ね合わせる応答波形の数 N , つまり FastADR 繰り返し回数を増加させることによる予測誤差バラツキの均し効果を調べた。各 N の場合ごとに実現値としては、50 試行のモンテカルロシミュレーションを実施して、予測誤差 E_P の標準偏差を求めた。その結果、Fig.5 に示すように N を増やすに従い E_P の標準偏差が減少した。よく知られているように、均し効果においては標準偏差に関する $1/\sqrt{N}$ 則が有名であるが、今回の結果でも $1/\sqrt{N}$ 則と類似の結果が得られた。また、均し効果は比較的小さい N でも顕著に見られ、 $N=10$ から $N=50$ に増やすだけで標準偏差は約 50 % 減少した。

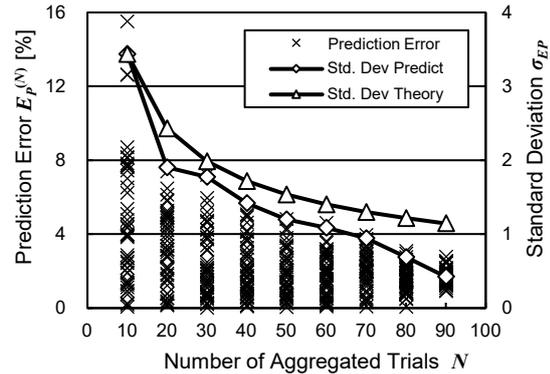


Fig.5 Averaging effect of the FastADR power curtailment predictions

5. FastADR 重ね合せ実験

一般的にビルマルチ空調設備は設定温度に室温が合うように制御されるため、平常時のデータから、FastADR 電力抑制指令が入力された場合に相当する時系列応答データを取得することは難しい。そこで、本研究では我々の先行研究で開発した FastADR 電力抑制制御方式⁽¹⁸⁾⁻⁽²¹⁾を用いて、実際のビルマルチ空調設備を遠隔から制御し、時系列応答データを収集した。応答性を評価するにはビルマルチ空調設備の応答データが一定量必要となるため、中長期的なデータの収集が不可欠だろう。その際、空調設備の利用者との関係性は重要で、その負担は可能な限り軽減するべきだと考える。

この制御方式では、平常時運転中のビルマルチ空調設備に対して遠隔から FastADR 電力抑制指令に似た指令を重畳させる。このとき、個々の FastADR 電力抑制指令は小信号かつ現在の電力使用レベルを中心にランダムに決定する。この方式であれば有意な室温変化を防ぐことができ、居住者の快適性を損なわないようにしている。またランダムに指令を決定することで、多様なパターンのデータを収集できるようにしている。

Fig.6 に取得した時系列データの例を示す。この例は実際の典型的なオフィスビルのビルマルチ空調設備に対して、5 分毎に FastADR 電力抑制指令を出してその応答時系列データを収集したものであり、灰色に示す部分がビルマルチ空調設備の応答時系列データの箇所を示している。本研究で用いる FastADR 電力抑制応答時系列データは、ある実際のオフィスビルに対して試験をおこない取得したものである。対象としたのは一般的な小規模オフィスビルであり、エネルギー原単位が全国平均とほぼ同じ、つまり平均的熱負荷特性を有する。また、典型的なエネルギー効率の標準量産品であるビルマルチ空調設備を使用している。

Table 1 は実験対象のビル空調設備の概要を示す。当該ビルは 30 台の室内機、5 台の室外機からなる空調設備を有す。このビルを用いて 2016 年 8 月の一か月間に、制御間隔を 5 分として先に述べたデータ収集方式を用い、全館空調消費電力 $P(t)$ 、および FastADR 電力制限指令 $P_L(t)$ の 1 分毎時系列データの収集をおこなった。その結果、当該ビルの 5 ブロックのビルマルチ空調機について計 540 回の FastADR 電力抑制の応答時系列データを取得した。これらデータには $P_L(t)$ がビル空調設備の最低動作電力以下となるようなサンプル等は除外している。

時刻の異なる数台のビルマルチ空調データを混在させて組合せ合成したものを、多数のビルマルチ空調の同一時刻での合成した応答であると仮定し、FastADR 重ね合せアグリゲーションを検討した。つまり、エルゴート性が成立することを仮定してビルマルチ空調機の実測値によるアグリゲーション電力の検討をおこなった。

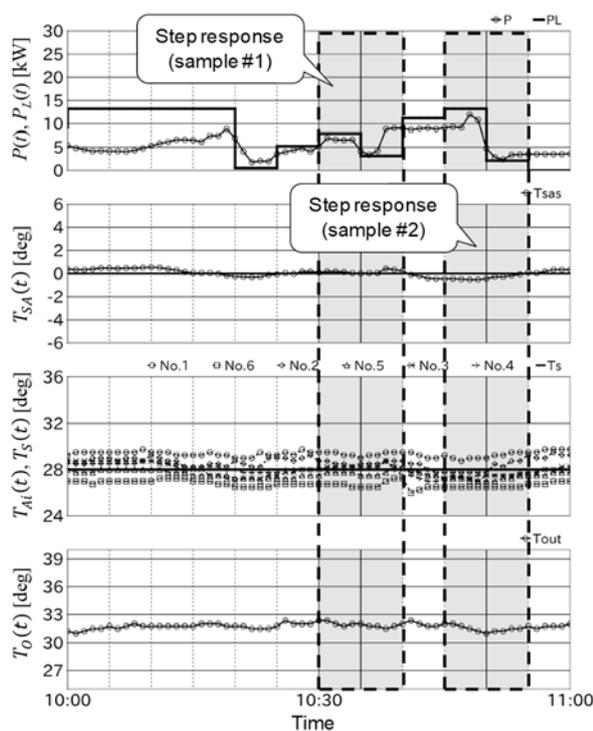


Fig.6 Collection of time-series data of power and temperature responses of FastADR commands

Table 1 Outline of a sample office building

Item	Specification
Type of building	General purpose office
Dimension	2 story, area app. 1600 m ²
No. of outdoor units	5 outdoor units
No. of indoor units	6 for each outdoor units, total 30
Rated Cooling Capacity	40, 40, 45, 68, and 73 [kW]

N 回のデータの $t \geq 0$ の FastADR 電力制限指令 $P_L(t)$ の合計電力抑制指令を P_{LA} とおき、前節で述べた FastADR 応答時系列データ群から P_{LA} の目標値 $5N$ [kW]となる重ね合せ応答時系列データを作成した。この重ね合せ時系列データの作成条件・方法は次の通りである。

- ・ 集積目標値に組合せ結果許容誤差： $\pm 0.1N$ [kW]
- ・ 組合せの探索方法：ランダム
- ・ 組合せの探索数： N 毎上限 20 サンプル探索
- ・ 各 N の組合せ：抽出するデータは重複させない
- ・ $N = 1$ の場合：単に条件を満たす時系列データを抽出

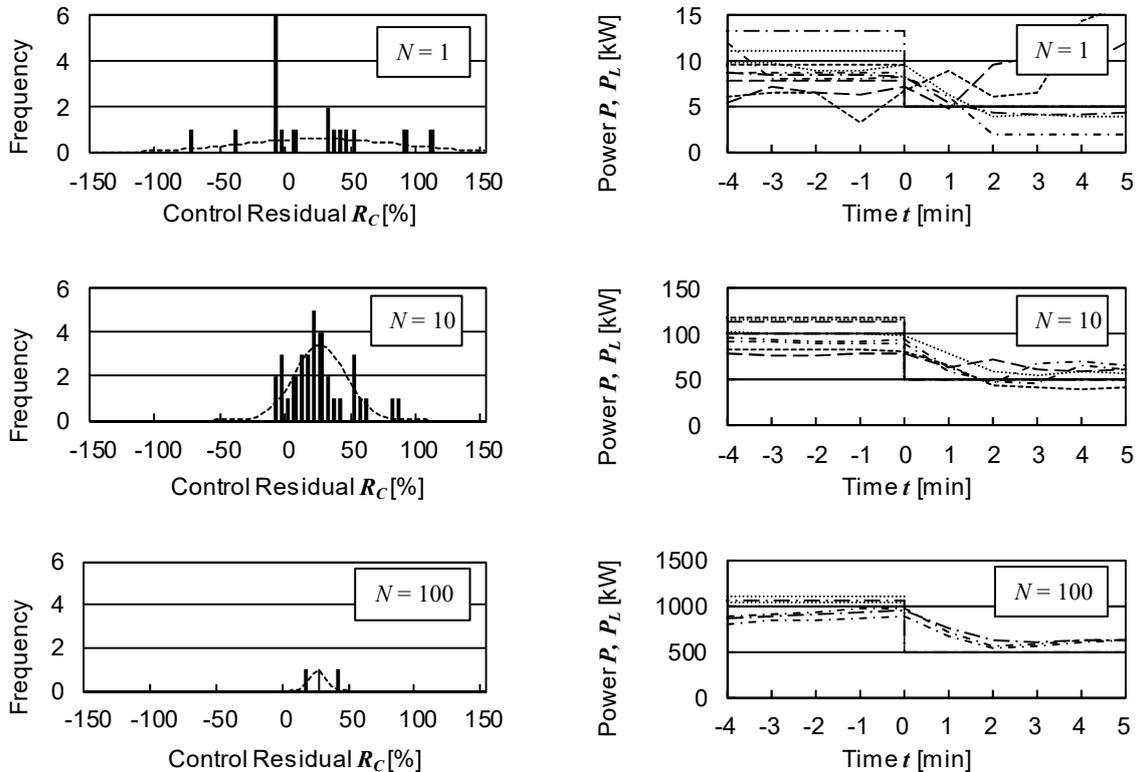
このため、 N によって重ね合せ時系列データを作成できた件数は異なっており、例えば $N = 100$ の場合は 3 ケースしか作成できなかった。また重ね合せ時系列データの評価には、以下の式で定義する 5 分間電力量に基づく制御残差 R_C を用いた。

$$R_C = \left(\sum_{t=0}^4 P_{AG}(t) - \sum_{t=0}^4 P_{LA} \right) / \sum_{t=0}^4 P_{LA} \quad (10)$$

各 N のサンプルセットの R_C が分布する平均を μ 、標準偏差 σ とした正規分布を今後分布とする。

6. FastADR 組合せアグリゲーション推定

$N = 1, 10, 100$ のときの R_C のヒストグラムと、重ね合せ応答時系列データの代表例をプロットしたものを Fig.7 に、 N に対する R_C の変化をプロットしたものを Fig.8 に示す。なお、Fig.7 のヒストグラムにおける破線は理論値による分布を指す。重ね合せ時系列データの $N = 100$ の場合はサンプルセット数が 3 セットしかなく分布の判断は困難だが、極端に外れることはなく全て中心付近に集まっている。Fig.7 のヒストグラムでは $N = 1$ に対し $N = 10$ の方が正規分布に近づいていると思われる。また、Fig.8 には先に述べた均し効果の $1/\sqrt{N}$ 則に基づき予測される平均 μ とバラツキ $\mu \pm \sigma$ の範囲を破線で示しているが、実測値の重ね合せも類似傾向にあり、制御残差 R_C についても $1/\sqrt{N}$ 則と類似の結果が得られたことが分かる。すなわち、FastADR 応答重ね合せにおいて各応答で確率的に生じている抑制目標値に対するバラツキ残差は、重ね合せ数 N が大きくなるとオフセット値としてある値に収束することが分かった。今回の結果に基づけば、例えば R_C のバラツキ $\sigma \leq 5$ [%]を目標とした場合 $N \approx 200$ でよいことが分かる。この場合も R_C は $\mu \approx 20$ [%]程度、つまり 1[MW]程度の固定的な制御残差（オフセット）が存在することになる。



(a) Histogram with normal distribution reference (b) Aggregated step responses

Fig.7 Distributions of FastADR control residuals and FastADR aggregated step responses

FastADR 重ね合せアグリゲーションによる多数のビルマルチ空調機の FastADR 出力抑制は、ネガワット発電であると考えられる。そこで試しに、LNG 火力発電設備における EDC モードの応答特性と比較をおこなった。N = 100における FastADR 重ね合せ時系列データにおける電力減少分をネガワット発電とみなし、電気学会「電力需給周波数シミュレーションの標準解析モデル」⁽²²⁾AGC30 に含まれる 70 万 kW 級 LNG 火力発電設備の EDC 応答波形例と比較したものが Fig.9 である。N = 100であっても 0.5[MW] 程度のネガワットにしかならないため、火力発電設備の応答波形例とは単純に比較ができないが、指令値がそれぞれに設定してから目標値に達するまでの時間はどちらも 2~3 分程度であり、時間的な応答性はよく

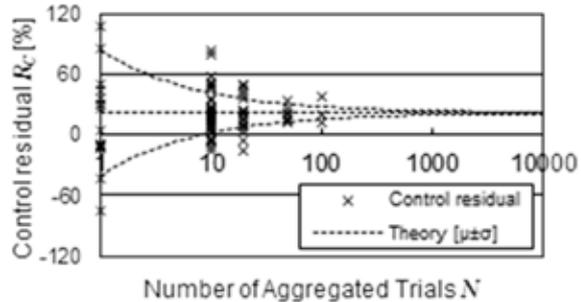
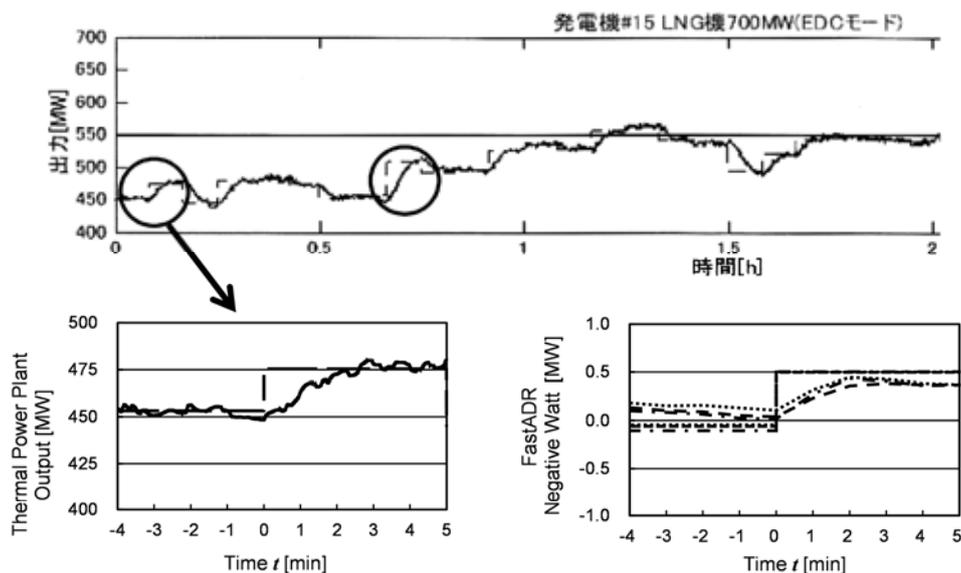


Fig. 8 Averaging effect of the variations of the FastADR power curtailment using superimposition of measured data

時間的な応答性はよく

似ている。つまり、ネゴシエーション時間等が十分に短くできれば、この 50 倍のアグリゲート、5,000 台位で 25[MW]位を数分で抑制できる可能性がある。

(a) EDC step response of the thermal plant #15 of IEEJ AGC30 model



(b) Thermal power plant response (Enlarged figure) (c) FastADR aggregation responses

Fig. 9 Comparison of a LNG thermal power plant sample and FastADR negative watt samples

7. まとめ

本研究では、実際の室外機 5 台・室内機 30 台のビルマルチ空調設備の FastADR 応答を多数回繰返し実測して、大量アグリゲーション時の電力抑制応答特性の予測バラツキと制御残差という二つの観点から均し効果を検討した。

実測時系列データを目標電力抑制量となるようランダム抽出して重ね合せて大量の組合せアグリゲーションにおける均し効果の推定を行った。

加えて FastADR アグリゲーション電力抑制を高速ネガワット発電であると考え、LNG 火力発電設備における中央給電指令所からの 5 分間隔 EDC 信号への応答速度特性と比較した。以上の検討から、以下の新しい知見を示した。

- (1) FastADR 応答予測モデルによる過渡的な 5 分後電力の個々予測は困難であるが、約 100 回重ね合せると確率的分布が 2%程度まで減少し均し効果が確認できた。
- (2) FastADR 応答重ね合せにおいて抑制目標値に対する制御残差は、重ね合せ数 N が十分大きくなると 20%程度の定常オフセット値として出現することが分かった。
- (3) FastADR 交渉通信時間等が短くできれば、5,000 台規模のビルマルチ空調アグリゲーションにより LNG 火力発電機相当が応答時間となる可能性を示した。

今後は、FastADR 電力抑制の組合せ大量アグリゲーションは繰返し大量重ね合せで評価可能であること、また、個々の FastADR 抑制値分布が正規分布でなくてもその標本和であるアグリゲーション量の確率分布は正規分布に収束すること（中心極限定理）の検証を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成により実施できたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 蛭川忠三:「ADR アグリゲーションとビル設備電力管理システム」, 電気設備学会誌, Vol.33, pp.40-43, 2013 年
- (2) 蛭川忠三:「電力市場構造とデマンドレスポンス ーリアルタイム電力料金とシステム制御安定性ー」, 電気設備学会誌, Vol.33, No.9, pp.3-6, 2013 年
- (3) A. Kiyota, M. Takahama, C. Ninagawa, "Wide Area Network Discrete Feedback Control on FastADR of a Cluster of Building Air-conditioning Facilities", IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.11, No.6, pp.826-828, 2015.
- (4) H. Asaka, M. Takahama, C. Ninagawa, "Mitigation of Saturated LFC Thermal Power Plants by Very Fast ADR Aggregation of a Huge Number of Building Multi-Type Air-Conditioners", IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.12, No.3, pp.442-443, 2017.
- (5) 蛭川忠三, 安積英駿, 高浜盛雄:「ビルマルチ空調設備群 FastADR 閉ループ制御のための非対称定率増減伝達関数モデル」, 電学論 B, Vol.137, No.8, pp.566-572, 2017
- (6) J. Morikawa, T. Yamaguchi, C. Ninagawa, "Smart Grid Real-Time Pricing Optimization Management on Power Consumption of Office Multi-type Air-conditioners", IEEE Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.11, No.6, pp823-825, 2016.
- (7) 森川純次, 蛭川忠三:「ビル用マルチ空調設備の電力制限と室温維持を時系列調整する高速リアルタイム電力料金最適制御」, 電学論 B, Vol. 136, No. 11, pp.817-823, 2016 年
- (8) 蛭川忠三, 森川純次:「ビルマルチ空調群デマンドレスポンス過渡応答の大量アグリゲーション均し効果の推定」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE-17-120, pp.97-102, 2017 年

- (9) S.Noh, J.Yun, K.Kim, "An Efficient Building Air-Conditioning System Control Under Real-Time Pricing", 2011 Int. Conf. on Advanced Power System Automation and Protection, pp.1283-1286, 2011
- (10) S.Ramdaspathi, M.Pipattanasomporn, M.Kuzlu, S.Rahman, "Transactive Control for Efficient Operation of Commercial Buildings", IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe ISGT Europe, pp.1-5, 2016.
- (11) J. Agüero, F.Rodríguez, M.Castilla, M.Pereira, "Productiveness and Real Time Prices in Energy Management for HVAC Systems", 39th IEEE Conf. on Industrial Electronics IECON2013, pp.7956-7961, 2013.
- (12) I.Murata, Y.Takarada, "Modeling of Dynamics in Demand Response for Real-Time Pricing", IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, pp.806-811, 2014.
- (13) S.Tamaru, D.Murayama, M.Murai, Y.Takagi, Y.Hanada, K.Kimura, "The Energy Saving Control Method of Air Conditioning System with Outdoor Air Handling Units and Multi Air Conditioners for Buildings", 2013 IEEJ Annual Conf., Vol.4, pp.337-338, 2013.
 田丸慎吾, 村山大, 村井雅彦, 高木康夫, 花田雄一, 木村浩二:「外調機とビルマルチエアコンから構成される空調システムの省エネ制御手法」, 平成 26 年電気学会全国大会, Vol.4, pp.337-228, 2013 年
- (14) 三宅範幸, 高橋広考, 富田泰志, 桑原健一:「蓄電池とビル設備の協調型電力需要ピークカット制御手法の開発」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.31_7-31_8, 2013 年
- (15) 奈良村拓, 森川純次, 蛭川忠三:「ビルマルチ空調設備の FastADR における電力制限量配分のための室温副作用予測モデル」, 電学論 B, Vol.136, No.4, pp.432-438, 2016 年
- (16) S.Kondo, J. Morikawa, C. Ninagawa, "Averaging Effect on Stochastic Response Prediction in FastADR Aggregation for Building Air-conditioning Facilities", IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.11, pp.820-822, 2016.
- (17) C. Ninagawa, S. Kondo, J. Morikawa, "Prediction of Aggregated Power Curtailment of Smart Grid Demand Response of A Large Number of Building Air-Conditioners", IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS2016), pp.1-6, Dubai, UAE, 2016.
- (18) C. Ninagawa, K. Suzuki, A. Nakamura, J. Morikawa, "Applying DNA Analysis Method to Training Data Mining for FastADR Response Model of Air-Conditioning Power Consumption", IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.12, No.3, pp.400-401, 2017.

- (19) 中村惇志, 蛭川忠三, 森川純次 : 「ビル空調電力 FastADR 制御用ニューラルネットの訓練条件ゾーン分類機械学習」, 電気学会研究会資料, ST-16-047, pp29-34, 2016年
- (20) C. Ninagawa, A. Nakamura, J. Morikawa, "Modulation Training Method of Perdition Model for Smart Grid FastADR Power Limitation of Building Air-conditioners", IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, Vol.13, No.2, 2018 (in press).
- (21) 蛭川忠三, 青木佳史, 中村敦志, 森川純次, 近藤成治, 稲葉隆 : 「ビル空調設備スマートグリッド電力抑制予測モデルの平常運転 FastADR 信号モジュレーション訓練法」, 電学論 D, Vol.138, No.3, 2018年 (in press)
- (22) 電力需給解析モデル標準化調査専門委員会 : 「電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル」, 電気学会技術報告, No.1386, p.108, 2016年
- (23) W. Feller, "An Introduction to Probability Theory and Its Applications Third Edition," John Wiley & Sons, New York, 1968.