

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420226

研究課題名(和文) 広域ビル空調群の高速電力需要制御における確率的均し効果不安定現象の解明と対策

研究課題名(英文) Investigation on averaging effect and instability phenomenon of fast demand response control for widely-distributed building air-conditioners

研究代表者

蜷川 忠三 (NINAGAWA, Chuzo)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：80630821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)： 将来のスマートグリッドでは、分刻みの高速自動デマンドレスポンス(Fast Automated Demand Response: FastADR)が必要とされるであろう。オフィスビル群の空調設備は可制御負荷としてFastADR負荷の有望なリソースである。本研究では、空調電力需要のFastADR応答モデルとして世界で初めて、FastADR電力抑制指令値と空調必要電力との差による整定時の残差特性を考慮した非対称定率増減伝達関数モデルの適用である。そして、広域大量に集積させたビルマルチ空調設備群がFastADRによりLFCに参画する場合の分刻み発令/解除過渡特性を評価可能とした。

研究成果の概要(英文)： A possibility of application of fast automated demand response (FastADR) aggregation of a cluster of office building air-conditioning facilities to the load frequency control (LFC) of the future smart grid is studied. An aggregation feedback control system design for the LFC is carried out comparing between the conventional 1st order delay and our asymmetric constant rate transfer functions for the response characteristics of air-conditioners' power consumption. Due to the non-linear and rate-limited power consumption changes of building multi-type air-conditioners, there were significant differences between the effects to the LFC responses. Although a recovery disturbance in the LFC result in the case of the conventional 1st order transfer function, the phenomenon disappeared in the case of our proposed transfer function.

研究分野：電力工学

キーワード：デマンドレスポンス ビル空調 負荷周波数制御

1. 研究開始当初の背景

自然エネルギー発電の短時間変動に対応するため、電力需要を即応調整して需給バランスさせようとする VPP (Virtual Power Plant) という将来構想がある。それには、電力需要を分刻みで数%精度に通信制御する FastADR (Fast Automated Demand Response) と呼ばれる新技術が必要である。

FastADR を目指す研究としては、200 軒の空調を 20 秒で停止する実験や、地域規模で 5 分周期の需要制御する実験もあったが、これらは単に負荷停止であり精密な帰還自動制御ではないので VPP には使えない。応募者による 5 分刻み動特性モデルによる FastADR シミュレーションでも数%という制御精度は得られていない。最近、リアルタイム電力料金を分単位で変更すると電力需給制御が発散するとの報告も出てきた。しかし、分刻みで数%という高速精密な FastADR の帰還制御の動特性は十分に研究されていない。

2. 研究の目的

本研究では、即応精密性を得るため FastADR の対象として中小ビル群のビルマルチ空調機を取上げる。ビルマルチは小型分散型なので運転操作時の動作慣性が小さいこと、単純 ON/OFF でなく冷媒流量の連続制御により瞬時電力の精密調整が可能であるからである。さらに、我が国の中小ビルの大半を占めるのがビルマルチ型なので実用化効果が大きいことである。

しかし、ビルマルチ空調機群の FastADR は、指令を広域通信により大量に分配して各ビルマルチ空調設備の瞬時電力操作し、それを大量にサンプリング計量し、広域通信でフィードバックして集約するので確率的な大きな遅れをもつ。また、ビルマルチ空調は単なる ON/OFF による電力調整でなく、冷媒流量の精密制御による瞬時電力の連続制御なので、空調機ごとに状態ごとに毎回異なる応答をする。このように大量ビルマルチ空調機群の FastADR アグリゲーションは極めて複雑な帰還制御動特性を持つ。

3. 研究の方法

(1) FastADR 応答の伝達関数

従来のビルマルチ空調電力動特性モデルには 1 次遅れ伝達関数が用いられたケースが多かった。しかし、設計情報からも実機計測データからも、電力変化は定率増減であること、さらに増加と減少では変化率が大幅に異なることから 1 次遅れ伝達関数ではこの特徴を正確には表現できない。

そこで、実際に運転中のビルマルチ空調機に対して種々の信号振幅の FastADR 指令を何百回と繰返して、1 分刻みの応答時系列データを何百セットと収集した。FastADR 指令の 5 分前実電力時系列や FastADR 指令振幅などの状態入力から、5 分後 1 分刻み電力と室温偏差を出力するニューラルネットワーク

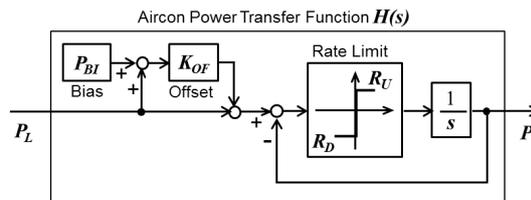


図 1

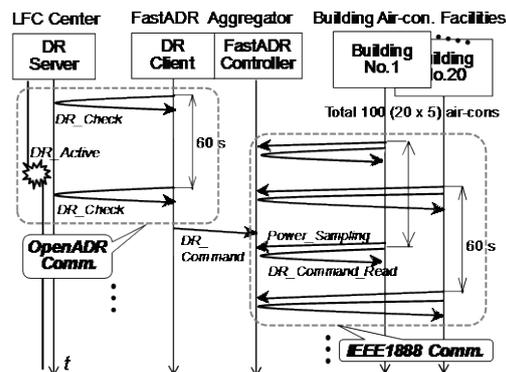


図 2

(NN) モデルを構築した。その NN のステップ応答から本研究で開発した我々独自の非対称定率増減伝達関数にフィッティングした。

図 1 は本研究で開発した 1 台のビルマルチ空調機の電力応答特性を示す非対称定率増減伝達関数のブロック図である。実機は FastADR 制御指令値 P_L と実際電力値 P が一致しない場合が少なくないので、FastADR 発令時の電力初期値をバイアス値として、また、ステップ応答における指令値と実電力整定値との差をオフセット値として、先行研究の伝達関数に対してこれらの要素を追加した。

(2) 広域ビル空調 FastADR システムモデル

図 2 にビル空調設備群の FastADR アグリゲーション通信シーケンスの一例を示す。広域に散在するビル設備群の FastADR アグリゲーションでは、何段階もの通信エンティティを介して FastADR 情報が対象設備に伝えられる。現実にはさらに数倍複雑になると思われる。通信タイミング遅れが数 10[s] となる場合もあるので、実際の広域制御システムではこのタイミング遅れより十分長い、例えば 60 秒といった制御サンプリング周期を設定する必要がある。

実際のビルマルチ空調 FastADR システムでは上記の通信システムにより広域大量のビル空調機の FastADR 電力指令を集約制御する。この大規模なシステム制御系設計のために、多数の非対称定率増減伝達関数 $H(s)$ を用いて大規模シミュレーションモデルを構築した。

今回は例として、ビル 20 棟 ($i = 1, \dots, 20$)

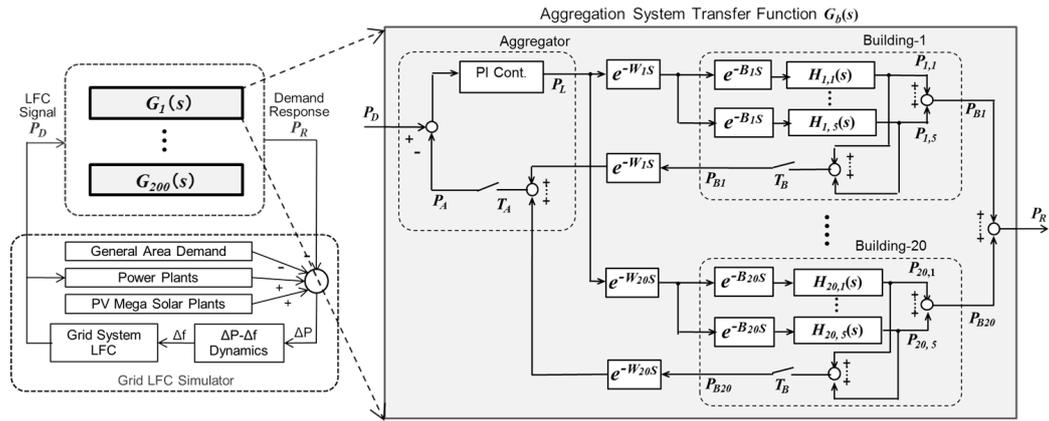


図 3

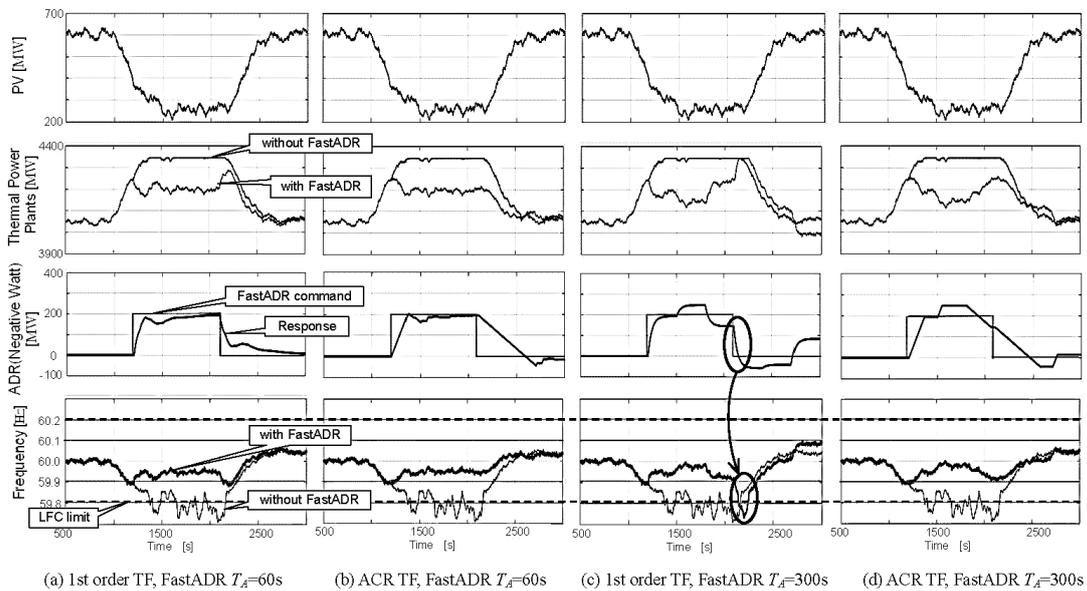


図 4

各々5台 ($j=1, \dots, 5$) 合計 100 台の空調機に対応する 100 個の伝達関数 $H_{i,j}(s)$ から構成されるサブシステム $G_g(s)$ を想定する。本研究で検討する FastADR アグリゲーションシステムは、サブシステムフィードバック制御系 $G_g(s)$ (サブシステム番号 $g=1, \dots, 200$) が複数並列構成されて、全体としてはビル 4000 棟、空調機 2 万台のトータルシステムが構成されたとした。

図 3 は 1 棟の仮想ビルに空調設備 5 台、一つのアグリゲータにビル 20 棟で、アグリゲータが 200 社としたので、全体ではビルが 4000 棟で空調機が 2 万台による FastADR 制御による LFC 応援のシミュレーションモデルである。

(3) 系統負荷周波数制御シミュレーション

図 4 は空調機伝達関数モデルが 1 次遅れ、非対称定率増減の場合の FastADR による LFC シミュレーション結果を比較した結果である。本シミュレーションでは、FastADR

指令値は ± 200 [MW] で発令時間はビルの快適性を考慮し 15 分間とした。全てのグラフの横軸は秒単位時間 [s] を示している。一番上の行から順に太陽光発電出力 [MW]、火力発電合計出力 [MW]、空調機 2 万台の FastADR 出力 (Negative Watt ; ネガワット) [MW]、系統周波数 [Hz] をそれぞれ示している。

図 4(a), (b) は FastADR のサンプリング周期が 60 [s] で、PI コントローラの比例ゲイン $K_p=0.7$ 、積分ゲイン $K_I=0.004$ とし、1 次遅れと非対称定率増減で比較した結果である。同様に、図 4(c), (d) は FastADR のサンプリング周期が 300 [s] で、PI コントローラの比例ゲイン $K_p=0.9$ 、積分ゲイン $K_I=0.001$ とし、1 次遅れ伝達関数と非対称定率増減伝達関数で比較した結果である。

図 4(a) に示すように、太陽光発電出力が 8 分間で 600 MW から 250 MW まで急激に減少した際、FastADR 無しでは周波数が細線のように 59.8 [Hz] を逸脱してしまう。この原因は、全ての LFC 火力発電機の調節力の超えてし

まったためと考えられる。しかし、空調機モデルが1次遅れのFastADR発令時は太線のように、火力発電機の調節力を肩代わりすることにより周波数を59.9[Hz]以内に維持していることがわかる。また図4(b)に示すように、空調機モデルが非対称定率増減のFastADR発令時も同様に周波数の59.8[Hz]からの逸脱を防ぎ、59.9[Hz]以内に維持している。

図4(c)に示すように、1次遅れのFastADR発令時周波数が太線のように2200[s]付近で59.8[Hz]を逸脱している。この原因は、FastADRが2100[s]で発動されたが1次遅れの伝達関数は実際の空調機に比べて応答が速すぎるため、需給のバランスが急激に崩れてしまったためだと考えられる。図4(d)に示すように、実際の空調機の特性を表した非対称定率増減のFastADR発令時周波数は太線のように59.9~60.1[Hz]以内に維持できていることがわかる。この結果より、系統負荷周波数制御を行う際1次遅れと非対称定率増減伝達関数の応答速度の違いが系統周波数に与える影響を与える場合を示した。

4. 研究成果

本研究では、ビルマルチ空調電力のFastADR電力応答特性を実機からニューラルネットで学習させ、我々が提案する非対称定率増減伝達関数を求めた。OpenADR デマンドレスポンス広域通信規格を想定して広域ネットワーク通信むだ時間を有するフィードバック制御系モデルを構築した。

ビル4000棟の空調電力(400[MW])FastADRシステム、火力発電機9基(4000[MW])、太陽光発電群(600[MW])としてLFCシミュレーションを実施した。一例として太陽光発電量が8分で半減と想定し、FastADR応答伝達関数が1次遅れか非対称定率かLFC過渡特性への違いを比較した。その結果、FastADR制御周期が300[s]と長い場合は回復時に1次遅れの場合1分程度59.8[Hz]から逸脱した。しかし、非対称定率増減ではそれが見られず、制御性能評価が異なってしまうことが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- [1] 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 Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 12, No. 3, 2017 (査読あり) (inpress)
- [2] Kiyota, M. Takahama, C. Ninagawa, "Wide Area Network Discrete Feedback Control on FastADR of a Cluster of Building Air-conditioning Facilities", IEEJ

Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 826-828, 2016 (査読あり)

- [3] T. Fukazawa, Y. Iwata, J. Morikawa, C. Ninagawa, "Stabilization of Neural Network by Combination with AR Model in FastADR Control of Building Air-conditioner Facilities", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 124-125, 2016 (査読あり)

[学会発表] (計5件)

- [1] 蛭川忠三:「非対称定率増減負荷群の広域フィードバック制御による高速デマンドレスポンス電力系統負荷周波数制御」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE-16-185, pp. 87-92, 福井, 2016年
- [2] H. Asaka, M. Takahama, S. Miyagawa, C. Ninagawa, "Mitigation of Saturated LFC Thermal Power Plants by Very Fast ADR Aggregation of a Huge Number of Building MultiType Air-Conditioners", IEEJ Power and Energy Society Conference, pp. 7_2_11-7_2_12, 北九州, 2016.
- [3] 蛭川忠三:「リアルタイム電力料金に対する需要家側の最適探索制御による高速デマンドレスポンスの動的不安定性」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 7_2_9-7_2_10, 北九州, 2016年
- [4] 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」, 2015年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, pp. D331_1-D331_4, 東京, 2015年
- [5] 蛭川忠三:「ビル用マルチ空調群による高速デマンドレスポンスアグリゲーション解析モデル」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PSE-15-59, pp. 23-27, 仙台, 2015年

[図書] (計1件)

- [1] 「エネルギーサービス構築の必須知識」, 柳原隆司, 小林延久, 蛭川忠三, (他32名), 担当8章, オーム社, 468ページ, 2016年

[その他]

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~ninalab/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

蛭川 忠三 (NINAGAWA Chuzo)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 80630821