

## 階層化スマートグリッドにおける アンサンブル需要予測について

### Ensemble prediction of power demands in multi-layer smart grids

○三谷拓也\* , 西田豪\* , 井村順一\*\* , 大竹秀明\*\*\*

○ Takuya Mitani\* , Gou Nishida\* , Jun-ichi Imura\*\* , Hideaki Ohtake\*\*\*

\*日本大学, \*\*東京工業大学, \*\*\*産業技術総合研究所

\*Nihon University, \*\*Tokyo Institute of Technology,  
\*\*\*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

キーワード： 階層構造 (multi-layer structure) , 並列化 (parallelization) , スマートグリッド (smart grid) ,  
アンサンブル予測 (ensemble prediction) ,

連絡先： 〒 963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1  
日本大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 制御工学研究室  
三谷拓也 , Tel.: (024)956-8713, E-mail: ceta17009@g.nihon-u.ac.jp

## 1. はじめに

日本における太陽光発電技術開発指針の 1 つとして広く利用されている「NEDO 太陽光発電ロードマップ (PV2030+)」では 2050 年の国内 1 次エネルギー需要の 5~10% を太陽光発電で補うことを目標としている。太陽光発電の大量導入により、問題となるのは天候変化による発電量の変化、またそれに伴う発電量の予測不確実性である。従来の需給調整法では事前に作成される需要量予測に基づいて一日の発電計画を作成する。しかし、需要家への太陽光発電大量導入を考えた場合、需要量の予測が困難となってしまう。そのため、太陽光発電大量導入を想定した、新たな系統制御技術が必要となってくる。先行研究として、事前の予測に基づいた階層化スマートグリッドにおける需要制御制御手法が提案されている<sup>6)</sup>。この手法では独立系統運用

者 (ISO:Independent System Operator) と需要家の間にアグリゲータという契約している需要家に需要応答 (DR:Demand Response) により需要削減量 (ネガワット) を発生させそれを ISO と取引することで利益を得ている事業者を介し制御を行う。アグリゲータを間に介すことにより電力系統全体の様々な機能分散ができることが示されている。

そこで本稿では、階層化構造を用いた電力需要制御システムにおける、アンサンブル予測に基づいた需要予測制御を考える。さらに予測誤差を考慮した場合の需要予測制御手法を提案し、制御手法の有効性を確認するため、シミュレーションを行う。

## 2. 階層化構造を用いた需要予測制御

従来研究では階層化構造を用いた予測に基づく需要予測の確率を制御する手法が提案されている<sup>6)</sup>。この手法は事前段階で作成される需要予測に基づいてネガワット取引を行うことで需要の制御を行う。

### 2.1 階層化スマートグリッドの定義

一般的にスマートグリッドは「従来からの集中型電源と送電系統との一体運用に加え、情報通信技術 (IOT) の活用により、太陽光発電などの分散型電源や需要家の情報を統合・活用して、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの<sup>3)</sup>」という概念で用いられている。そこで本稿では太陽光発電の大量導入のもとで電力の安定供給を可能とする新たな電力供給システムとして、階層化構造を用いた電力システム制御理論を考える。

まず、本稿で考える階層化されたスマートグリッドは ISO、複数のアグリゲータ、複数の需要家によって構成されている。ここで、ISO は電力システム全体の需要の一致を目的とする機関、アグリゲータは契約している複数の需要家に DR を行うことで発生したネガワットを ISO と取引することで利益を得る事業者、需要家は電力の使用を目的とした太陽光発電設備と一般家庭向けエネルギー最適化システム (HEMS: Home Energy Management System) を有しているものと仮定する。

### 2.2 階層化構造

次に本稿で用いる階層化スマートグリッドについて数学的に定義する。 $i, j, k, l$  は正の整数とする。本稿で定義する階層化スマートグリッドは  $L$  ( $1 \leq l \leq L$ ) 個の階層で構成されており、最上層 (第 1 層) の ISO から、中間層 (第  $l$  層)

の複数のアグリゲータを介して最下層 (第  $L$  層) の需要家に接続されている。ここで、最上層の ISO を  $A_1^1$ 、中間層  $l$  ( $1 \leq i \leq L$ ) 番目のアグリゲータを  $A_i^l$ 、最下層  $j$  ( $1 \leq j \leq J$ ) 番目の需要家を  $A_j^L$  と定義する。

### 2.3 需要家モデル

需要予測の制御を行うにあたり、ある時刻  $t$  における需要家の電力需要量の予測を以下のように定義する。

$$x(t) := q(t) - p(t) \quad (1)$$

ここで、 $q(t)$  は消費電力量、 $p(t)$  は太陽光発電量の予測を表している。また、 $p(t)$  は直達日射量予測に PV 導入量、PV モジュールの角度、方位角、システムロスなどのシステム係数などを乗じ、算出されている。これらの予測は不確実性を有するので、時刻  $t$  に依存する確率変数と仮定し、確率密度関数を定義する。本稿では需要量  $x(t)$  の確率密度関数  $f(x(t))$  を需要予測分布とし制御を行う。

### 2.4 需要予測分布の制御

需要予測分布の制御は需要量の集計、需要予測分布の評価、制御量の配分という手順で行われる。

まず、需要量の集計について説明する。ある時刻  $t$  における  $l$  層  $i$  番目のアグリゲータの電力需要量  $x_i^l(t)$  は

$$x_i^l(t) = \sum_{k \in D_i^l} x_k^{l+1}(t) \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $D_i^l$  はアグリゲータ  $A_i^l$  が取りまとめる需要家集合を表している。また、ISO 各需要家の需要量を直接集計する必要はなく、直下のアグリゲータの需要量を集計することで系統全体の需要量の合計を得ることができる。

次に、集計した需要量  $x_i^l(t)$  を制約条件とする最適制御問題を考える．需要予測分布の評価は

$$F_i^l(x_i^l(t)) = \max_{x_i^l(t)} \prod_{k \in D_i^l} F_k^{l+1}(x_k^{l+1}(t)) \quad (3)$$

と表すことができ、制約条件下で評価関数  $F_i^l(x_i^l(t))$  を最大化するように再帰的に計算されている．この最適制御問題は制約のある多段階決定問題なので、動的計画法<sup>5)</sup>を適用できる．

次に、需要量の評価により計算された評価関数  $F(x(t))$  をもとに ISO が変化率関数  $\Delta(x(t))$  を与える．この変化率関数  $\Delta(x(t))$  は ISO が需要分布に行いたい制御から決定される所与のものとして仮定する．ISO が与えた変化率関数  $\Delta(x(t))$  は上層での変化量を満たすように次のように決定される．

$$\Delta_i^l(x_i^l(t)) = \left[ \Delta_i^{l-1}(x_i^{l-1}(t)) \right]^{\frac{|D_i^l|}{|D_i^{l-1}|}} \quad (4)$$

これは各需要家の変化率の合計が最小になるという意味での最適解であることが従来研究により示されている<sup>6)</sup>．また、これらの計算は階層化構造を用いることで並列計算が可能である．

### 3. 時間区間での制御

従来研究<sup>6)</sup>では、時間断面での制御を時間区間での制御に拡張することでピークシフトが可能となることが提案され、時間区間への拡張も文献<sup>8)</sup>で証明されている．以下、時間区間での制御について説明する．

#### 3.1 時間区間への拡張

時間断面での制御はある時刻  $t$  に着目して制御が行われている．これを複数の時刻で集計・評価・制御を行うことで、各時刻ごとに制御量を順次決定し、結果的に時間区間での制御が可能となる．ある時刻  $t_s = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T \in \mathbb{R}^m$  における制御について考える．ここで、これは離散時間であると仮定する．

定義 1  $l$  層  $i$  番目のアグリゲータの電力需要量  $x_i^l(t_s) \in \mathbb{R}^m$  は次のように定義する．

$$x_i^l(t_s) = \sum_{k \in D_i^l} x_k^{l+1}(t_s) \quad (5)$$

ここで、この演算はベクトルの各要素毎に計算を行うと定義する．

定義 2 集計した需要量  $x(t_s)$  に対し以下の最適制御問題を定義する．

$$F_i^l(x_i^l(t_s)) = \max_{x_i^l(t_s)} \prod_{k \in D_i^l} F_k^{l+1}(x_k^{l+1}(t_s)) \quad (6)$$

ここで、この演算はベクトルの各要素毎に計算を行うと定義する．

この最適制御問題は制約のある多段階決定問題と考えることができ、動的計画法<sup>5)</sup>を適用できる．

定義 3 下層での変化率関数  $\Delta_j^l(x_j^l(t_s))$  は上層での変化率  $\Delta_i^{l-1}(x_i^{l-1}(t_s))$  の合計を満たすよう、以下のように定義する．

$$\Delta_k^l(x_k^l(t_s)) = \left[ \Delta_i^{l-1}(x_i^{l-1}(t_s)) \right]^{\frac{|D_k^l|}{|D_i^{l-1}|}} \quad (7)$$

ここで、この演算はベクトルの各要素毎に計算を行うと定義する．

定義 4 最下層における各需要家の需要予測分布の変化は以下のように定義できる．

$$f_j(x_j(t_s)) \cdot \Delta_j(x_j(t_s)) \quad (8)$$

#### 3.2 ピークシフト・ネガワットの発生

時間断面での制御を時間区間へ拡張することで、時間区間での需要予測分布の特徴を考慮することができる．そこで ISO は時間区間での需要予測分布より所望の制御量を決定する．実際に制御を行う際はこの制御量は DR という形で下層に指示され需要分布の制御を達成する．この時、ピーク時間帯の需要を別の時間帯にシフト

する制御であればピークシフト, ある時間帯の需要量を削減するという制御であればネガワットの発生と表すことができる. 制御前の需要量を  $x(t_s)$ , 制御後の需要量を  $\hat{x}(t_s)$  とした時, 制御前後の需要量の差  $x_{dif}$  を用いてピークシフトを以下のように定義する.

$$x_{dif} = \sum_{k=1}^m x(t_k) - \sum_{k=1}^m \hat{x}(t_k) = 0 \quad (9)$$

また, 同様に制御前後の需要量の差  $x_{dif}$  を用いてネガワットの発生を以下のように定義する.

$$x_{dif} = \sum_{k=1}^m x(t_k) - \sum_{k=1}^m \hat{x}(t_k) > 0 \quad (10)$$

#### 4. アンサンブル予測に基づく制御

アンサンブル予測とは数値予測に含まれる不確実性を前提として, 複数の数値予測の集合(アンサンブル)から予測値を確率的に把握し, 予測情報の確からしさを得るための手法である<sup>1)</sup>. また, そのアンサンブルの集合平均をとることでその予測の期待値を求めることができる.

本稿で使用する数値予測モデルは, メソモデル(MSM: Meso-Scale Model)という日本及びその近海の気象を対象とした気象庁の数値予報モデル<sup>2)</sup>を使用し, 直達日射量 [ $W/m^2$ ] (太陽光球面から直接地上に到達する太陽放射量)の数値予測データを抽出する.

##### 4.1 初期値アンサンブルによる直達日射量予測の作成

一般的にアンサンブル予測を行う場合, 解析値に摂動を加えた複数の初期値を用意し, 解析誤差に起因する予測の不確実性を表現する<sup>1)</sup>. 初期摂動を得る手法は成長モード育成法, 特異ベクトル法など様々提案されているが, 本稿では, 1 初期時間あたりに予測するメンバー数を増やすことで計算コストの増加を伴わずに初期値アンサンブルを構築する手法, 時間ずらし平

均(LAF)法<sup>7)</sup>を用いて初期値アンサンブルを作成する. 以下, アンサンブルの導出法について説明する.

まず, 複数の異なる初期値から予測を行い, 対象となる時刻における予測値のアンサンブルを求める. この時, ある時刻  $t$  におけるアンサンブル  $X_t \in \mathbb{R}^m$  を以下のように定義する.

$$X_t = \{X_t^{(1)}, X_t^{(2)}, \dots, X_t^{(m)}\} \quad (11)$$

次に, ある時刻  $t$  におけるアンサンブルの分布の状態を把握するため, 度数分布を作成する. その結果, Fig.1 から分かるように中央に峰が一つある単峰型の特徴を示した分布であることが分かる. したがって, 本稿では時刻  $t$  におけるアンサンブルは正規分布に従うと仮定し制御を行う.

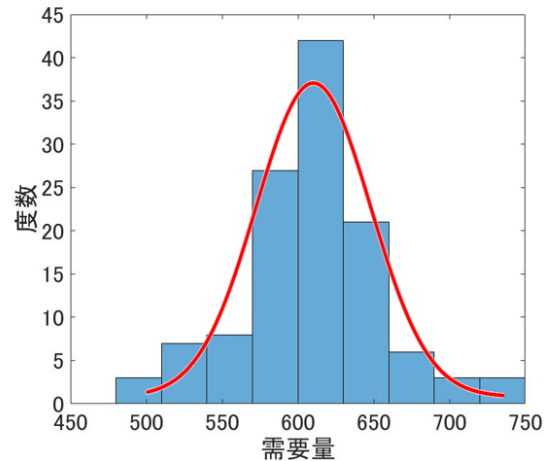


Fig. 1 ある時刻  $t$  におけるアンサンブルの度数分布

##### 4.2 予測誤差を考慮した制御

本稿では事前段階で作成されたアンサンブル予測に基づいて制御を行う. しかし, アンサンブル予測は気象条件や時刻などの状態変化に伴って変化する. そのため, アンサンブル予測が変化する度に需要予測分布への制御量を決定しては計算量が増加してしまう. さらに, 予測が更新される毎に需要家とネガワット取引を行

うことは現実的ではない．そのため，制御手法が需要予測の変化に柔軟に対応できることが重要となる．

従来研究では決定された需要予測分布に基づいて制御を行う．しかし，アンサンブル予測は時間の変化に伴って予測が変化する．Fig.2は事前に予測された分布に基づいて制御量の決定を行った結果である．しかし，Fig.3は制御を行う際，予測分布が変化してしまったことにより，変化後の需要予測分布に制御量を加えた結果である．これは想定よりも多くの制御量を加えた結果となった．しかし，今回の制御は需要量を削減することが目標の制御なので，再度制御を行う必要はない．対して Fig.4は想定していたよりも制御量が少なくなってしまった．これは最悪の場合，停電などのリスクが生じてしまうということを示している．そのため，従来法で提案されている複数回の制御<sup>8)</sup>を適用することで目標とする制御を行うことが可能となり，同時に発生するリスクを低減できる (Fig.5) ．

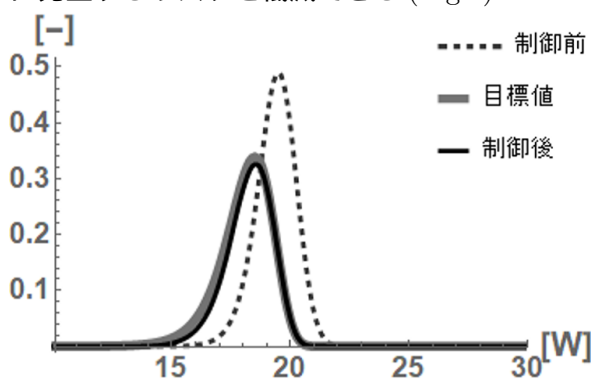


Fig. 2 通常の制御

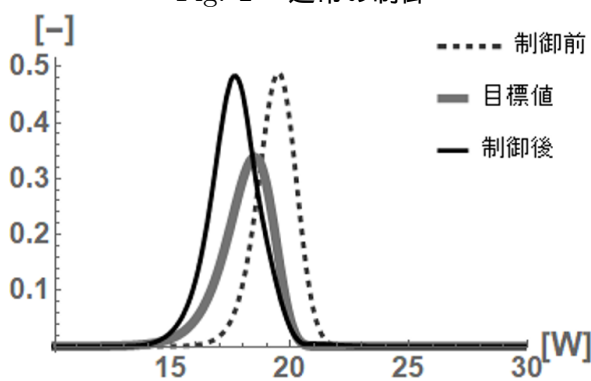


Fig. 3 過剰制御

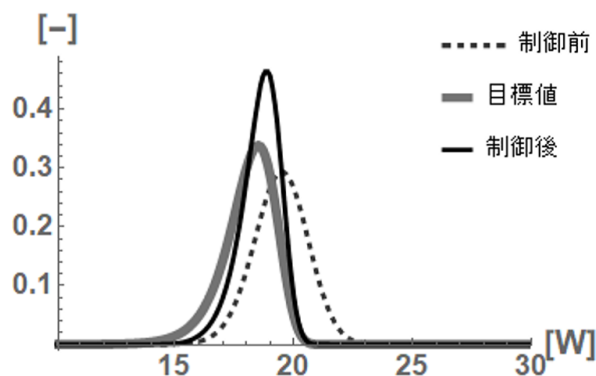


Fig. 4 不足制御

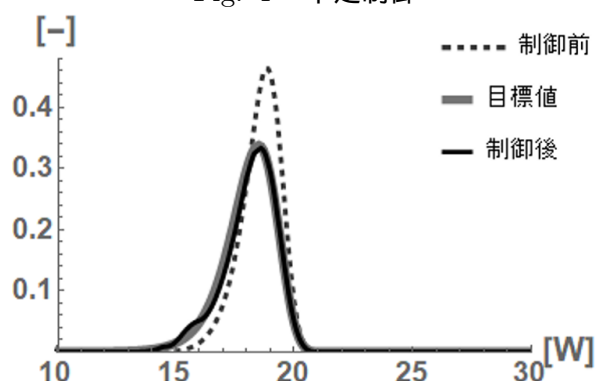


Fig. 5 再制御

## 5. まとめ

本稿では事前に想定された需要予測が変化した場合の制御についてシミュレーションを行った．まず，予測が変化することにより，想定していた制御よりも過剰に制御を行ってしまった場合，ネガワットの発生を制御目標とするならば制御目標を達成したと言える．逆に想定よりも制御が不足してしまった場合，供給量よりも需要量の方が上回ってしまい停電などのリスクが生じてしまう可能性がある．そのため，さらなる制御として従来研究<sup>8)</sup>でも提案されている複数回の制御を行うことでこのリスクを低減できる．また，複数回の制御を行うことで制御量が大幅に不足していた場合であっても，リスクを低減しつつ，目標の制御を達成できると考えられる．したがって，本稿で用いる階層化構造での需要予測制御は需要予測の変動に対するロバスト性が言える．また，本稿では需要量の削

減つまりネガワットの発生についての制御を考察した。さらに，ピークシフトの制御を考えた場合，分散の大きくなるピークの時間帯から分散の小さくなるピーク外の時間帯への制御を行うことになるので，より不確実性の少ない制御を行うことが可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 気象庁予報部 数値予報課：確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望，数値予報課報告・別冊第 62 号，4/10，気象庁予報部（2016）
- 2) 一般社団法人 太陽光発電協会，JPEA PV OUTLOOK 2030，(2012)
- 3) スマートグリッド実現に向けた電力系統技術調査専門委員会，スマートグリッドを支える電力システム技術，10/11，電気学会，(2014)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁，ネガワット取引に関するガイドライン，(2014)
- 5) 金谷健一，これなら分かる最適化数学，215/234，共立出版，(2013)
- 6) G. Nishida, J. Imura, H. Ohtake, Fast Parallel Calculation for Optimal Power Demand Control in Multi-Layer Smart Grids, Proc. of IEEE CCTA 2017,(2017)
- 7) Hoffman, R. N. and E. Kalnay, Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, Tellus A, 35, 100/118, (1983)
- 8) 三谷拓也，西田豪，井村順一，大竹秀明，階層化スマートグリッドにおける需要確率区間制御，第 60 回自動制御連合講演会，(2017)
- 9) 吉野孝平，太陽光発電の予測不確実性を許容する最適リスク配分法，東京工業大学，(2016)

## 謝辞

本研究は，JST,CREST，JPMJCR15K1 の支援を受けたものである。