

再生可能エネルギーを含む分散型エネルギーシステムの需給管理制御

Management and Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy

滑川 徹
Toru Namerikawa

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科
<http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会

2012年1月20日(金) 東京大学 本郷キャンパス 工学部6号館3階 セミナ室B

エネルギー環境システム制御技術調査研究会

Research Committee on Systems and Control Technology for Energy & Environment
計測自動制御学会 制御部門 調査研究会

主査: 滑川 徹 慶應義塾大学
幹事: 飯野 稔 (株)東芝
副幹事: 畑中健志 東京工業大学

1. エネルギー・環境のためのシステム制御理論
分散制御, 協調制御, 大規模システム, ゲーム/チーム理論, 予測制御, 最適制御, 推定理論, ネットワーク制御
2. エネルギーの安定確保と供給のための制御技術
スマートグリッド, 電力需要予測, 系統安定化問題, 燃料電池のモデリングと制御, スマートシティ, スマートインフラ
3. 環境計測制御技術
センサーネットワーク, センサスケジューリング, ネットワークセンシング, リモートセンシング

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 2

スマートな社会基盤のための分散意思決定

スマートな社会基盤を実現する

- 社会制度のデザイン
- 分散最適化 / 予測制御
- 情報通信における耐攻撃性

社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会

- 主査: 平田研二 (長岡技術科学大学)
- 幹事: 小島千昭 (東京大学), 佐々木智文 (富士通研究所)

例: 統合プライシング / 分散最適化による電力需要・供給ネットワークの安定化

utility U :

agent G_i/C_i : 分散自己最適化

agent G_{i+1}/C_{i+1} : 分散自己最適化

エージェント G_i / C_i の利己的な最適化

+

組織化のための統合プライシング

↓

- 公共利得の最適化

- 需給ネットワークの安定化

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 3

日本のエネルギーネットワークと震災

The state of Japan's power grid

Japan's electrical capacity is third in the world behind the United States and China, but storage and precautionary capabilities from Friday's earthquake and tsunami are showing its ability to meet demand. The Tokyo Electric Power Co., which provides more than a quarter of Japan's power, is generating about 75 percent of its peak capacity (below).

The power grid Japan's power grid consists of three islands. One area is heavily damaged; others in other areas can provide backup. Japan is not connected to nearby China or South Korea, so those countries cannot help with the power shortage.

When the power comes from electricity in Japan is supplied by 1,000 power plants, including nuclear, coal, natural gas, hydro, wind, solar and biomass.

Japan's power grid consists of three islands. One area is heavily damaged; others in other areas can provide backup. Japan is not connected to nearby China or South Korea, so those countries cannot help with the power shortage.

Large power plants: Nuclear, Thermal, Hydroelectric, Wind, Solar, Biomass, Geothermal, Fuel cells, Small hydro, Cogeneration, etc.

When the power comes from electricity in Japan is supplied by 1,000 power plants, including nuclear, coal, natural gas, hydro, wind, solar and biomass.

日本の送電網 (ウィキペディア)
The Washington Post (2011/3/15)

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 4

再生エネルギーの増加

Smart Grid

電力需給の自動最適化・安定化

温室効果ガス: 25%減

[国連サミット 2009]

再生エネルギーの利用
制御不可能な外乱
発電機の分散, 逆潮流

Penetration of Renewable Energy

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 5

スマートグリッドと制御理論

直面する制御問題

1. 需給バランスの調整(レギュレーション)
2. 大規模複雑システムの制御・管理・資源分配
3. 高品質な電力供給

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 6

制御理論によるスマートグリッドの実現

直面する制御問題

1. 需給バランスの調整(レギュレーション)
2. 大規模複雑システムの制御・管理・資源分配
3. 高品質な電力供給

制御理論が提供する解決策

1. 電力需要予測/リアルタイムプライシング
2. 大規模システムに対する分散・予測・最適制御
3. 分散型負荷周波数制御(LFC)

Network Systems Engineering for E.E.





IFAC
18th World Congress
August 28 – September 2, 2011

スマートグリッド・エネルギー分野の動向

滑川 徹

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

第54回自動制御連合講演会
IFAC2011にみる制御理論・制御技術の新動向と日本の取り組み

2011年11月20日(日) 豊橋技術科学大学

1/26 : Track 15

Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track	Track						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Regulation of Adaptive Control Systems	Networked Control Systems	Nonlinear Control	Linear Control	Model Predictive Control	Output Feedback Control	Decentralized Control	Time Delay Systems	Flexible Manufacturing Systems	Hybrid and Discrete-Time Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems
Regulation of Adaptive Control Systems	Networked Control Systems	Nonlinear Control	Linear Control	Model Predictive Control	Output Feedback Control	Decentralized Control	Time Delay Systems	Flexible Manufacturing Systems	Hybrid and Discrete-Time Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems	Control of Flexible Manufacturing Systems

Track 15

- Smart Grid Dynamics, Stability and Security (MoA15)
- Wide-Area Measurement and Control of Smart Grids (MoB15)
- Power Electronic Converters (MoC15)
- Smart Grid Energy Management (TuA15)
- Cyber-Physical Systems for Smart Grid (TuB15)
- Power System Control Technologies for Smart Grid Application (TuC15)
- Power Plant Control I (WeA15)
- Power Plant Control II (WeB15)
- Power System Operation and Control (WeC15)
- Role of Model Predictive Control in Smart Grid (ThA15)
- Grid Expansion Planning & Operation Considering Renewable Energy (ThB15)
- Smart Grid Integration (ThC15)
- Distribution Systems and Micro-Grids (FrA15)
- Distributed Power Generation (FrB15)

Cyber-Physical Systems for Smart Grid (TuB15)

A Stationary Turbine Interaction Model for Control of Wind Farms
Madjidian, Daria
Rantzer, Anders
Lund Univ.
Lund Univ.

Systems and Control Opportunities in the Integration of Renewable Energy into the Smart Grid
Bitar, Eilyan
Khargonekar, Pramod P.
Univ. of California at Berkeley
Univ. of Florida

Poola, Kameshwar
Univ. of California at Berkeley

A Control Theorist's Perspective on Dynamic Competitive Equilibria in Electricity Markets
Wang, Gui
Kowli, Anupama
Univ. of Illinois, Urbana-Champaign
Univ. of Illinois

Negrete-Pincetic, Matias
Univ. of Illinois at Urbana-Champaign

Shafiqeepoorfard, Ehsan
UIUC

Meyn, Sean
Univ. of Illinois

Solar Thermal Plants Integration in Smart Grids
Camacho, Eduardo F.
Univ. of Seville

Del Real, Alejandro J.
Univ. of Seville

Bordons, Carlos
Univ. de Sevilla

Arce, Alicia
Univ. of Seville.

Toward a Framework for Sustainable Cyber-Physical Energy Systems: Frequency Regulation Revisited
Ilic, Marija
Liu, Qixing
Carnegie Mellon Univ.
Carnegie Mellon Univ.

Role of MPC in Smart Grid (ThA15)

<i>Framework for Multiple Time-Scale Cascaded MPC Application in Power Systems</i>	
Ulbig, Andreas	ETH Zurich
Arnold, Michèle	ETH Zurich
Chatzivasileiadis, Spyros	ETH Zurich
Andersson, Goran	Swiss Federal Inst. of Tech.
<i>Power Flow Optimization Using Positive Quadratic Programming</i>	
Lavaei, Javad	California Inst. of Tech.
Rantzer, Anders	Lund Univ.
Low, Steven	Caltech
<i>Operation and Configuration of a Storage Portfolio Via Convex Optimization</i>	
Kraning, Matt	Stanford Univ.
Wang, Yang	Stanford Univ.
Boyd, Stephen P.	Stanford Univ.
<i>A Decentralized MPC Strategy for Charging Large Populations of Plug-In Electric Vehicles</i>	
Ma, Zhongqing	McGill Univ.
Hiskens, Ian A.	Univ. of Michigan
Callaway, Duncan	Univ. of California - Berkeley
<i>Stability of Economically-Oriented NMPC with Periodic Constraint</i>	
Huang, Rui	United Tech. Res. Center
Biegler, Lorenz T.	Carnegie Mellon Univ.
<i>Model Predictive Control of Data Centers in the Smart Grid Scenario</i>	
Parolini, Luca	Carnegie Mellon Univ.
Sinopoli, Bruno	Carnegie Mellon Univ.
Krogh, Bruce H.	Carnegie Mellon Univ.

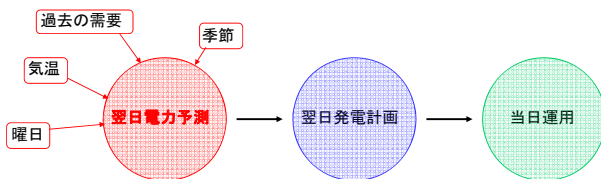
アウトライン

1. 電力需要予測/リアルタイムプライシング
2. 大規模システムに対する分散・予測・最適制御
3. 分散型負荷周波数制御(LFC)

(短期)電力需要予測

●各発電の翌日運転・停止計画 → 経済的電力系統運用

精度の高い電力予測を行うことで省燃料化・低CO₂化が可能



電力需要モデル

電力需要モデル: 「1時間前」と「前日の同じ時刻の前後」の需要と気温に相関

需要モデル (1時間ごとの時系列データ)

$$y(k) = a_0(k) + a_1(k)y(k-1) + a_{23}(k)y(k-23) + a_{24}(k)y(k-24) + a_{25}(k)y(k-25) + b_0(k)t(k) + b_1(k)t(k-1) + b_{24}(k)t(k-24)$$

k : 時刻 [h]

$y(k)$: 電力需要 [MW] $a_0(k), \dots, a_{25}(k)$: 需要の係数 (未知)

$t(k)$: 気温 [deg] $b_0(k), b_1(k), b_{24}(k)$: 気温の係数 (未知)

$y(k-i), t(k-i)$: 時刻 k における i 時間前の需要と気温

\mathcal{H}_∞ フィルタによるパラメータ推定

[電力需要モデル]

$$y(k) = a_0(k) + a_1(k)y(k-1) + a_{23}(k)y(k-23) + a_{24}(k)y(k-24) + a_{25}(k)y(k-25) + b_0(k)t(k) + b_1(k)t(k-1) + b_{24}(k)t(k-24)$$

↓ 離散時間状態空間表現

$$x(k+1) = x(k) \\ z(k) = C(k)x(k) + v(k)$$

推定パラメータ: $x(k) = [a_0 \ a_1 \ a_{23} \ a_{24} \ a_{25} \ b_0 \ b_1 \ b_{24}]^T$

学習用過去データ: $C(k) = [1 \ y(k-1) \ y(k-23) \ y(k-24) \ y(k-25) \ t(k) \ t(k-1) \ t(k-24)]$

\mathcal{H}_∞ フィルタによるパラメータ推定

状態推定問題

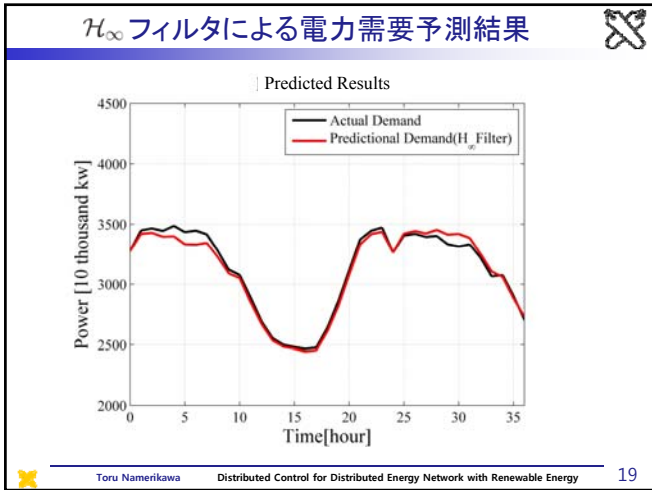
設計パラメータ $\gamma > 0$ に対して

$$\sup_{x_0, v} \frac{\sum_{k=0}^N \|x(k) - \hat{x}(k)\|^2}{\|x(0) - \hat{x}(0)\|_{P_0}^2 + \sum_{k=0}^N \|v(k)\|_{R^{-1}}^2} < \gamma^2$$

を満足する $\hat{x}(k)$ を求めるフィルタを設計せよ

\mathcal{H}_∞ フィルタ

1. ゲイン計算 $K(k) = P(k)C(k)^T (C(k)P(k)C(k)^T + R)^{-1}$
2. 係数推定 $\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + K(k)(z(k) - C(k)\hat{x}(k))$
3. 誤差分散計算 $P(k+1) = \{P(k)^{-1} + C(k)^T R^{-1} C(k) - \gamma^{-2} I\}^{-1}$



パラメータ推定結果

Table 1: 需要に関する係数の推定結果

	a_0	a_1	a_{23}	a_{24}	a_{25}
春	3.565	0.914	0.0392	0.877	-0.835
夏	-35.037	0.895	0.0296	0.853	-0.779
秋	-1.614	0.908	0.0508	0.857	-0.816
冬	-3.057	0.893	0.0508	0.867	-0.811

Table 2: 気温に関する係数の推定結果

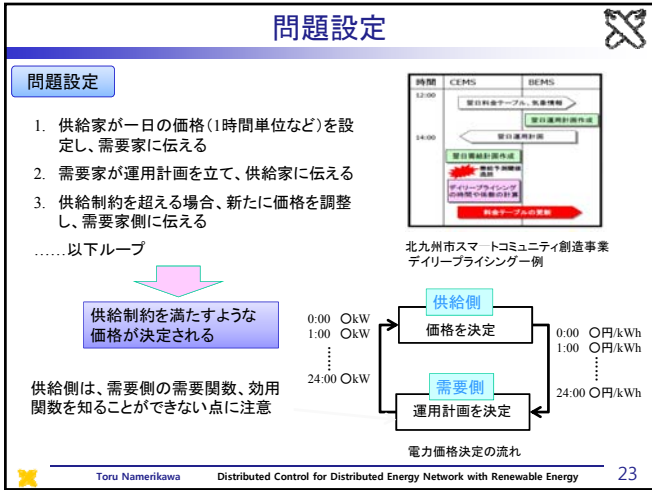
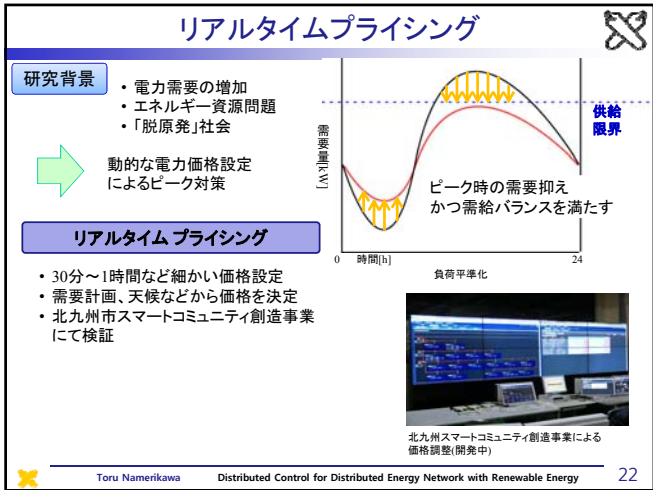
	b_0	b_1	b_{24}
春	-0.170	1.136	-0.179
夏	34.228	-22.984	-9.742
秋	-3.761	1.928	2.112
冬	-14.060	9.663	4.933

- 現在の電力需要は、1時間前と24時間前に大きく依存
- 夏と冬では電力需要に対する気温の影響が逆
- 春と秋では電力需要に対する気温の影響小

需要モデル

$$y(k) = a_0(k) + a_1(k)y(k-1) + a_{23}(k)y(k-23) + a_{24}(k)y(k-24) + a_{25}(k)y(k-25) + b_0(k)t(k) + b_1(k)t(k-1) + b_{24}(k)t(k-24)$$

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 20



需給関数

需要・供給関数

x : 電力量 $v(x)$: 効用関数 $d(\lambda)$: 需要関数
 λ : 電力価格 $c(x)$: 費用関数 $s(\lambda)$: 供給関数

仮定1

- $v(x)$ は2回微分可, 単調増加, 厳密に凹
- $c(x)$ は2回微分可, 単調増加, 厳密に凸

需要量、供給量はそれぞれの得る利益が最大化するように決定

$$d(\lambda) = \arg \max_{x \in \mathbb{R}_+} v(x) - \lambda x \quad (1) \quad \dot{v}(d) = \lambda \implies d(\lambda) = \dot{v}^{-1}(\lambda) \quad (3)$$

$$s(\lambda) = \arg \max_{x \in \mathbb{R}_+} \lambda x - c(x) \quad (2) \quad \dot{c}(s) = \lambda \implies s(\lambda) = \dot{c}^{-1}(\lambda) \quad (4)$$

独立系統機関(ISO)は、双方の利益の合計値の最大化を目指す

$$S = v(d) - c(s) \quad (5)$$

※複数の需要家 $v_i(x)$ 供給家 $c_i(x)$ について考えても、最終的に上記のように $v(x)$, $c(x)$ とまとめることができる。

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 24

マーケット

マーケット(ISO)による利益最大化

米国などでは、独立系等運用機関(ISO)が送電系統の運用管理している。日本では電力会社が管理しているが、CEMSが管理する可能性もある。

仮定2 ISOは需給バランスと社会全体の利益最大化のみについて考える送電制約などについて考慮しない (問題の簡略化)

ISOの求める最適化問題を定式化する

$$\max_{d \geq 0, s_{min} \leq s \leq s_{max}} v(d) - c(s), \quad \text{s.t. } d = s \quad (6)$$

(6)の双対問題

$$\min_{\lambda_0} \max_{d, s} L(\lambda_0, d, s) \quad (7)$$

$$L = (v(d) - \lambda_0 d) + (\lambda_0 s - c(s)) \quad (8)$$

補題1 主問題(6)の最適解を d^*, s^* とする。 d^*, s^* が(7)(8)式を満たすような価格 λ^* が存在する。また λ^* は双対問題(7)のラグランジュ乗数 λ_0 に対応している。

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 25

最適化

最適化アルゴリズム 最適市場価格 λ は双対問題の解 → 主双対問題解法

最急降下法

$$\lambda_{k+1}^i = \lambda_k^i + \gamma (d_k^{i*} - s_k^{i*}) \quad (9)$$

t : 一日の中の時刻 k : ループ回数 γ : ゲイン

市場機能は双対問題を解く最急降下則の計算モデル

Fig5. 電力価格決定のアルゴリズム

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 26

ノイズ・誤差の考慮

需要の摂動 需要に誤差、外因性需要を考慮

$$v(x^t - u_k^t) \rightarrow d_k^t(\lambda_k^t, k) = v_k^t + v^{-1}(\lambda_k^t) \quad (10)$$

$$(1 + \delta_k^t) v^t \left(\frac{x^t}{1 + \delta_k^t} \right) \rightarrow d_k^t(\lambda_k^t, k) = (1 + \delta_k^t) v^{-1}(\lambda_k^t) \quad (11)$$

u : 加法的誤差 δ : 乗法的誤差

$$D_k = \mu_1 d_{1k} + \mu_2 (1 + \delta_{2k}) v^{-1}(\lambda_k) \quad (12)$$

D : 需要(計画)量 d_1 : 加法的需要誤差 δ_2 : 乗法的需要誤差 μ, μ_2 : ゲイン

- μd_1 外因的入力(その時刻 t で最低限必要な電力量)
- d_1 に実際の電力需要データを代入し、 μ を掛けて影響の度合いを調整する
- δ_2 は摂動的誤差
- μ は0時と24時の需要が大体同じになるよう調整

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 27

シミュレーション

赤・緑・紫・青: 1~6ループ目における需要と価格
黒: 100ループ目における需要と価格
黄: 供給制約条件

Fig9. 電力価格 Fig10. 電力需要量

価格増加 → 需要減少

目標(需要の平準化)が達成されている

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 28

アウトライン

- 電力需要予測/リアルタイムプライシング
- 大規模システムの分散・予測・最適制御
- 分散型負荷周波数制御(LFC)

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 29

分散制御

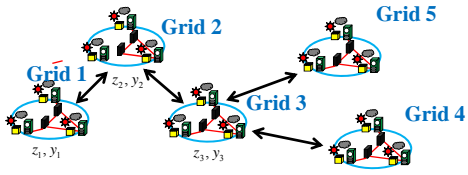
集中制御 単一の制御器による制御 大規模システム、複雑なシステムへの適用は困難

分散制御 複数のサブシステムから構成されるシステム 限られた情報交換の下で行動を決定 集団としての目的を達成

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 30

大規模分散システム

■ 離散時間線形時不変分散システム



$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t) + B_i u_i(t) + F_i w_i(t)$$

$x_i(t) \in R^{n_x}$: 状態 $t \in Z_+$

$u_i(t) \in R^{n_u}$: 制御入力

$w_i(t) \in R^{n_w}$: ノイズ(平均0, 白色)

情報構造を有するシステム

■ 線形時不変システム

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Fw(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t)$$

$x(t) \in R^{n_x}$: State $t \in Z_+$

$u(t) \in R^{n_u}$: control input $y(t) \in R^{n_y}$: control measurement

$w(t) \in R^{n_w}$ $v(t) \in R^{n_v}$: zero mean white process and sensor noises

但し, 可制御, 可観測で以下を満たす.

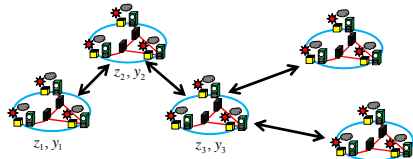
$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^T(s) & v^T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ww} & 0 \\ 0 & R_{vv} \end{bmatrix} \delta_{ts}$$

$$\delta_{ts} = 1 \text{ if } t = s \quad \delta_{ts} = 0 \text{ if } t \neq s$$

$$\mathbf{E} w(t) x^T(s) = 0 \quad \mathbf{E} v(t) x^T(s) = 0 \quad \text{if } t \geq s$$

情報構造

- サブシステムごとに収集情報が時間的・空間的に異なる
- 1つ離れたサブシステムの情報を得るには1ステップ分遅れ



■ 共分散拘束

$$\mathbf{E} u_i(t) w_j^T(t-\tau) = 0 \quad \text{if } \tau \leq \text{dist}(i, j)$$

ただし $\tau \in Z_+$ $\text{dist}(i, j)$: サブシステム i と j の距離

共分散拘束

■ 状態推定に関する制約

$$\mathbf{E} y_i(t) v_j^T(t-\tau) = 0 \quad \text{if } \tau \leq \text{dist}(i, j) - 1$$

■ システムのパワーに関する制約

$$\mathbf{E} x^T(t) Q_x x(t) + u^T(t) Q_u u(t) \leq \gamma \quad Q_x, Q_u > 0$$

■ 状態・入力の平均に関する制約

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in D \subset R^{n_x + n_u}$$

ここで D は原点を内点にもつ凸多面体

予測制御問題

■ 有限時間最適化問題

■ 問題 1

$$\min_{u(0), \dots, u(N_C-1)} \mathbf{E} \left\{ x^T(N_C) P_{N_C} x(N_C) + \sum_{j=0}^{N_C-1} \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix}^T P \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix} \right\}$$

subject to

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \quad x(0) = y_0 + v(0)$$

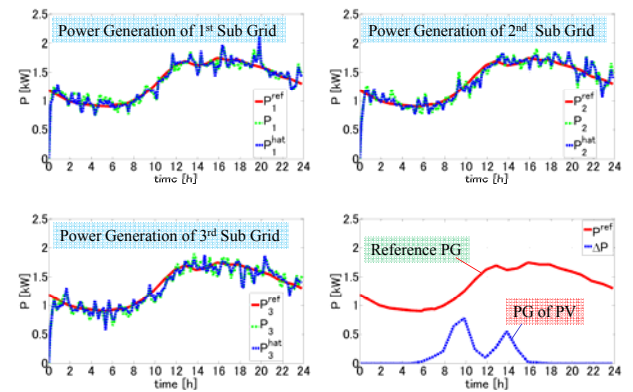
$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q_r \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} = 0 \quad \mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} < \gamma \quad Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_u \end{bmatrix}$$

$$r = 1, 2, \dots, m$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in D \subset R^{n_x + n_u} \quad \mathbf{E} x(N_C) \in F$$

Terminal constraint set

シミュレーション結果



反復勾配法による分散制御

評価関数

$$J(L) = E(|x|_Q^2 + |u|_R^2) \quad (10)$$

$Q > 0, R > 0$

フィードバック行列の更新式

$$L_{k+1} = L_k - \gamma \nabla_L J \quad (11)$$

最適解

Fig.3 勾配法 の概念

命題 1

AとB 行列に対して、 $A - BL$ の固有値が全て単位円内にあるとすると、(10)式で定義される評価関数の勾配は次式で表される。

$$\nabla_L J = 2[RL - B^T P(A - BL)]X \quad (12)$$

この時、以下のリアプノフ方程式を満たすとす。

$$X = (A - BL)X(A - BL)^T + W \quad (13)$$

$$P = (A - BL)^T P(A - BL) + Q + L^T R L \quad (14)$$

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 37

マイクログリッドの周波数制御

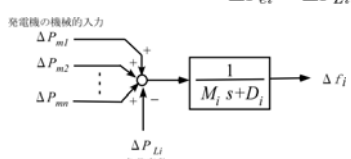
負荷周波数制御 (LFC)

需給の差と周波数の関係に基づくフィードバック制御

発電機モデル 系統 i 内の発電機が全て完全な同期運転を行っているとは仮定

$$M_i \frac{\Delta f_i}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_{ei}$$

$$\Delta P_{ei} = \Delta P_{Li} + D_i \Delta f_i$$



M_i : 慣性定数

Δf_i : 発電機周波数変動

ΔP_{ei} : 発電機電氣的出力

ΔP_{Li} : 負荷変動

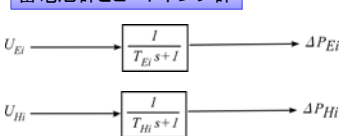
D_i : ダンピング係数

参照]P.Kundur: Power System Stability and Control, 1994.

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 38

マイクログリッドの周波数制御

蓄電池群とヒートポンプ群



ΔP_{Ei} : 蓄電池群の充放電電力変動

ΔP_{Hi} : ヒートポンプ群の消費電力変動

U_{Ei} : 蓄電池群のLFC信号

U_{Hi} : ヒートポンプ群のLFC信号

Fig.6 蓄電池群とヒートポンプ群

[文献] 千住 智信, 徳留 元樹, 興那 篤史, 船橋俊久(2009)

連系線モデル 系統 i から系統 j への潮流 ΔP_{ji} は次式ようになる。

$$\frac{d\Delta P_{ji}}{dt} = T_{ij}(\Delta f_j - \Delta f_i) \quad T_{ij}: \text{同期化力係数}$$

$$\Delta P_{tie\ i} = \sum_{j \in E} \Delta P_{ji}$$

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 39

マイクログリッドの周波数制御

系統 i の状態

ΔP_{gi} : ガスタービン発電機の出力変動

ΔX_{gi} : ガスタービンのガバナー入力変動

ΔP_{wi} : 風力発電出力変動

ΔP_{Li} : 可制御負荷以外の負荷消費電力変動

ΔP_{Ei} : 蓄電池群の充放電電力変動

ΔP_{Hi} : ヒートポンプ群の消費電力変動

$\Delta P_{tie\ i}$: 連系線潮流の変動

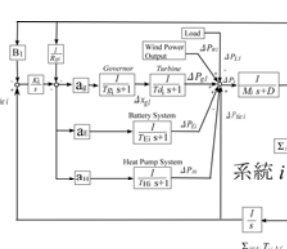


Fig.7 系統 i の周波数解析モデル

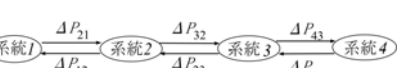


Fig.8 電力ネットワーク

1 地域の系統容量 40MW

ガスタービン	80%
蓄電池群	15%
ヒートポンプ群	5%

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 40

シミュレーションによる検証

1. 発電機が正常に稼働している場合

大きさ0.2のインパルス外乱

提案制御入力がないシステム(PI)と比較

[文献] 入江寛, 横山 明彦, 多田 泰之(2010)

周波数変動が改善

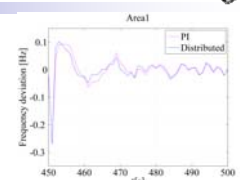


Fig.9 従来法との比較 1

2. 発電機が故障した場合

系統 1 のガスタービンが故障と仮定

提案制御則は安定化

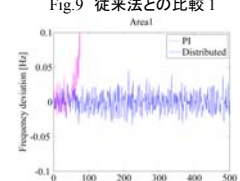


Fig.10 従来法との比較 2

提案手法は分散制御の中でもDistributed型

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 41

シミュレーションによる検証

分散制御

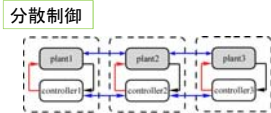


Fig.10 Distributed Control

コントローラ間の情報交換が**ある**




Fig.11 Decentralized Control

コントローラ間の情報交換が**なし**

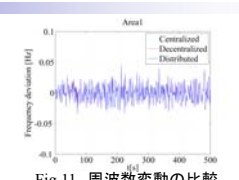


Fig.11 周波数変動の比較

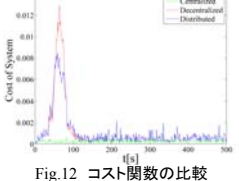


Fig.12 コスト関数の比較

Centralized < Distributed < Decentralized

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy 42

アウトライン

1. 電力需要予測/リアルタイムプライシング
2. 大規模システムの分散・予測・最適制御
3. 分散型負荷周波数制御(LFC)

マルチエージェントと分散システム

ネットワーク結合・情報結合されたシステムの制御



- 合意問題
- 柔軟性
- 姿勢協調/群れ問題
- スケーラビリティ
- ランデブー
- 耐故障性
- フォーメーション
- 多点情報の収集と利用

非線形振動子と同期

身の周りの同期現象
 Circadian rhythms 発電機 蛍 拍手
 非線形振動子としての解釈
 Kuramoto Model



メトロノームの同期

分散型負荷周波数制御(LFC)

対象とする電力網モデル: $G_{network}$

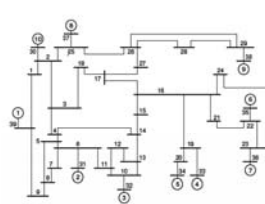


Fig.1 電力網モデル

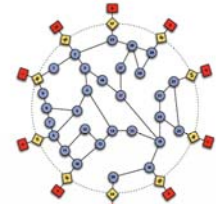


Fig.2 モデルの単結線図

- ① N個の発電機ノード ■ は、1つのターミナルバス ◆ に結合
- ② N個のターミナルバス ◆ と、M個の負荷バス ● が結合グラフを形成

電力網モデル(1/2)

- 仮定 [1] 超高压送電
 \Rightarrow 送電損失=0
 仮定 [2] 調相設備等
 設置アドミタンス零

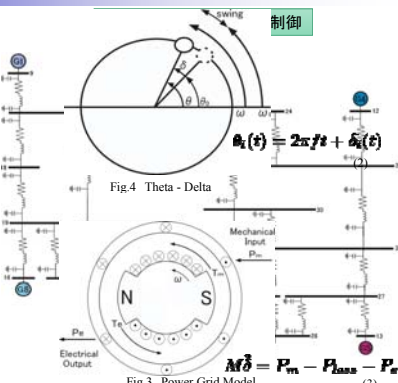
発電機 i の動揺方程式

$$\frac{H_i}{\pi f} \ddot{\delta}_i = P_{m,i} - K_{P,i} \dot{\delta}_i$$

$$-D_i \dot{\delta}_i - E_i^2 G_{ii}$$

$$-P_{e,i} \quad (1)$$

機械入力
 角周波数変動
 内部損失
 電気出力



電力網モデル(2/2)

- 仮定 [1] 超高压送電
 \Rightarrow 送電損失=0
 仮定 [2] 調相設備等
 設置アドミタンス零

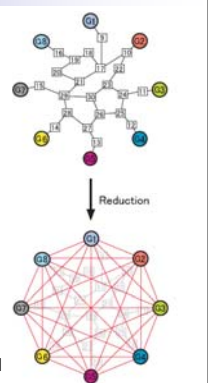
発電機 i の動揺方程式

$$\frac{H_i}{\pi f} \ddot{\delta}_i = P_{m,i} - K_{P,i} \dot{\delta}_i$$

$$-D_i \dot{\delta}_i - E_i^2 G_{ii}$$

$$- \sum_{j=1, j \neq i}^N E_j E_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

電気出力 $P_{e,i}$
 \Downarrow
 接続形態に依存
 \Rightarrow 数式化困難
 \Downarrow
縮約
 [F. Dorfler and F. Bullo, 2010]



非均一蔵本モデル

$$\varepsilon \dot{\theta}_i = -F_i \dot{\theta}_i + \frac{F_i}{D_i} (\omega_i - \sum_j P_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \Omega_i \\ \varepsilon \dot{\Omega}_i = -F_i \Omega_i + \frac{F_i}{D_i} (\omega_i - \sum_j P_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \\ (\theta, \dot{\theta}) = (x, z) \\ \dot{x}_i = z_i = f_i(z) \\ \varepsilon \dot{z}_i = -F_i z_i + \frac{F_i}{D_i} (\omega_i - \sum_j P_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) = g_i(x, z) \\ \varepsilon \dot{z}_i \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_i = P_{m,i} - E_i^2 G_{ii} \\ P_{ij} = E_i E_j B_{ij} \\ \varepsilon = \frac{H_{max}}{\pi f D_{max}} \\ F_i = \frac{D_i / D_{min}}{M_i / M_{max}} \end{cases} \quad (5)$$

非均一 蔵本モデル

$$(D_i + K_{P,i}) \dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_j P_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (7)$$

蔵本モデル

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (8)$$

\longleftrightarrow

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
49

同期の定義

同期：位相固定かつ周波数同調

(1) 位相固定: $\max_{(i,j)} |\theta_i - \theta_j| \in \Delta \theta$

Fig. 8 Frequency Entrainment

Fig. 7 Projection Image

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
50

同期条件 (従来法)

E : 系統に接続されている発電機の定格電圧の最小値 R : 系統の実効抵抗 $\frac{2}{NR} = -B_{ij}$ (9)

[Gutman (2004), Korniss(2006)]

定理 1

同期条件: $\frac{1}{R} > \max_{(i,j)} \left\{ \frac{\omega_i - \omega_j}{D_i - D_j} \right\} \frac{D_{max}}{2E^2}$ (10)

初期条件: $\theta(0) \in \Delta \gamma = [\frac{\pi}{2} - \gamma, \frac{\pi}{2} + \gamma]$, $\gamma = \sin^{-1}$ (上式右辺 / 上式左辺) (11)

同期条件, 初期条件を満たすとき
非均一 蔵本モデル及び電力モデルに関してそれぞれ以下が成立する

非均一 蔵本モデル

位相固定
 $0 < \max_{(i,j)} |\theta_i - \theta_j| < \Delta(\gamma)$

周波数同調
 $\dot{\theta}_{\infty} \in [\dot{\theta}_{min}(\theta), \dot{\theta}_{max}(\theta)]$

電力モデル

近似誤差
 $\delta_P(\theta) - \delta_N(\theta) = \mathcal{O}(\varepsilon), \forall \theta \geq 0$

(10)式が成立 \Rightarrow 電力モデルの同期

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
51

同期条件 (提案法)

$$D'_i = \frac{D_i + K_{P,i}}{D_{max} + K_{max}} \quad (15)$$

定理 2

同期条件: $\frac{2E^2}{R} > \max_{(i,j)} \left\{ \frac{\omega_i - \omega_j}{D'_i - D'_j} \right\}$ (16)

以下同文

定理 1 条件式の全ての数値が固定

$K_{P,i}$ の値が可変
 $\Rightarrow D'_i$ の値が可変
 $\Rightarrow \max_{(i,j)} \left\{ \frac{\omega_i - \omega_j}{D'_i - D'_j} \right\}$ の値が可変

定理 2 (提案法)

定理 1 (従来法)

検証

電力システムに対し

(i) (10)式を満たさない数値を与える

(ii) (16)式を満たすよう各発電機を制御する

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
52

シミュレーション (1/2)

Fig. 10 Phase Locking

Fig. 11 Frequency Entrainment

Fig. 12 Approximation Error (theta)

Fig. 13 Approximation Error (omega)

内側: 電力網モデル
外側: 非均一蔵本モデル

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
53

シミュレーション (2/2)

(ii) 提案法

Fig. 14 Phase Locking

Fig. 15 Frequency Entrainment

Fig. 16 Approximation Error (theta)

Fig. 17 Approximation Error (omega)

内側: 電力網モデル
外側: 非均一蔵本モデル

同期条件 (定理1) \subset 同期条件 (定理2)

Toru Namerikawa Distributed Control for Distributed Energy Network with Renewable Energy
54



直面する制御問題

1. 需給バランスの調整(レギュレーション)
2. 高品質な電力供給
3. 大規模複雑システムの制御・管理・資源分配

制御理論が提供する解決策

1. 電力需要予測/リアルタイムプライシング
2. 大規模システムに対する分散・予測・最適制御
3. 分散型負荷周波数制御(LFC)



特集号 「グリーンイノベーションと制御理論」

1. 総論 グリーンイノベーションと制御 木村英紀 (理化学研究所)
2. スマートグリッドと制御分野への期待 林 泰弘 (早大)
3. 燃料・排出権・卸電力の市場価格変動リスクの計測 遠藤 操 (電力中研)
松川 勇 (武蔵大)
4. 電力負荷を制御する柔軟な価格設定 辻 隆男 (横国大)
5. 配電系統の電圧制御におけるリアルタイムプライシングの展望 薄 良彦 (京都大学)
6. 電力システム解析への力学系アプローチ 飯野 穰 (東芝)
7. エネルギーネットワークの総合評価技術 畑中健志, 藤田政之 (東工大)
8. システム科学技術のためのマルチエージェント最適化とネットワークゲーム 平田研二 (長技大)
内田健康 (早大)
9. 分散化と統合化の制御理論 滑川 徹 (慶大)
10. 電力ネットワークの分散・予測制御 早川 朋久 (東工大)
11. 複数の起点ノードを想定したネットワーク上のフロー制御
12. 事例紹介 3件程度