



太陽光発電予測に基づく 調和型電力系統制御 のためのシステム理論構築

研究代表者 井村 順一 東京工業大学

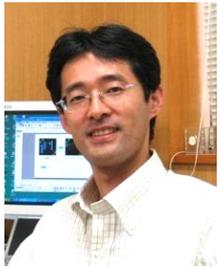
アドバイザー 飯野 穰 東芝(株)

HARPS

System Theory for HARmonized Power System Control
Based on Photovoltaic Power Prediction (HARPS)



12 グループリーダー



井村 順一
(東工大)



津村 幸治
(東大)



太田 快人
(京大)

システム制御



児島 晃
(首都大学東京)



東 俊一
(名古屋大)



原 辰次(東大)
GL任期:2015.04-2017.03



鈴木 秀幸
(大阪大)

数理科学



造賀 芳文
(広大)



植田 譲
(東京理科大)



杉原 英治
(大阪大)

電力システム

気象工学



大関 崇
(産総研)



村田 晃伸(産総研)
GL任期:2015.04-2017.03



益田 泰輔
(名城大)



山口 順之
(東京理科大)

141名 (78名の研究関係者 +63名の学生) 2018年2月時

研究目的

太陽光発電の大量導入および、調和した電力供給を実現するために、太陽光発電予測／需要予測に加えて、需要側エネルギーマネジメントシステム、協調パワーコンディショナー、デマンドレスポンスアグリゲータといった様々な様態が想定される中間層（調和型アグリゲータ）の機能や特性を活用した、次々世代の電力系統制御のためのシステム理論を構築する

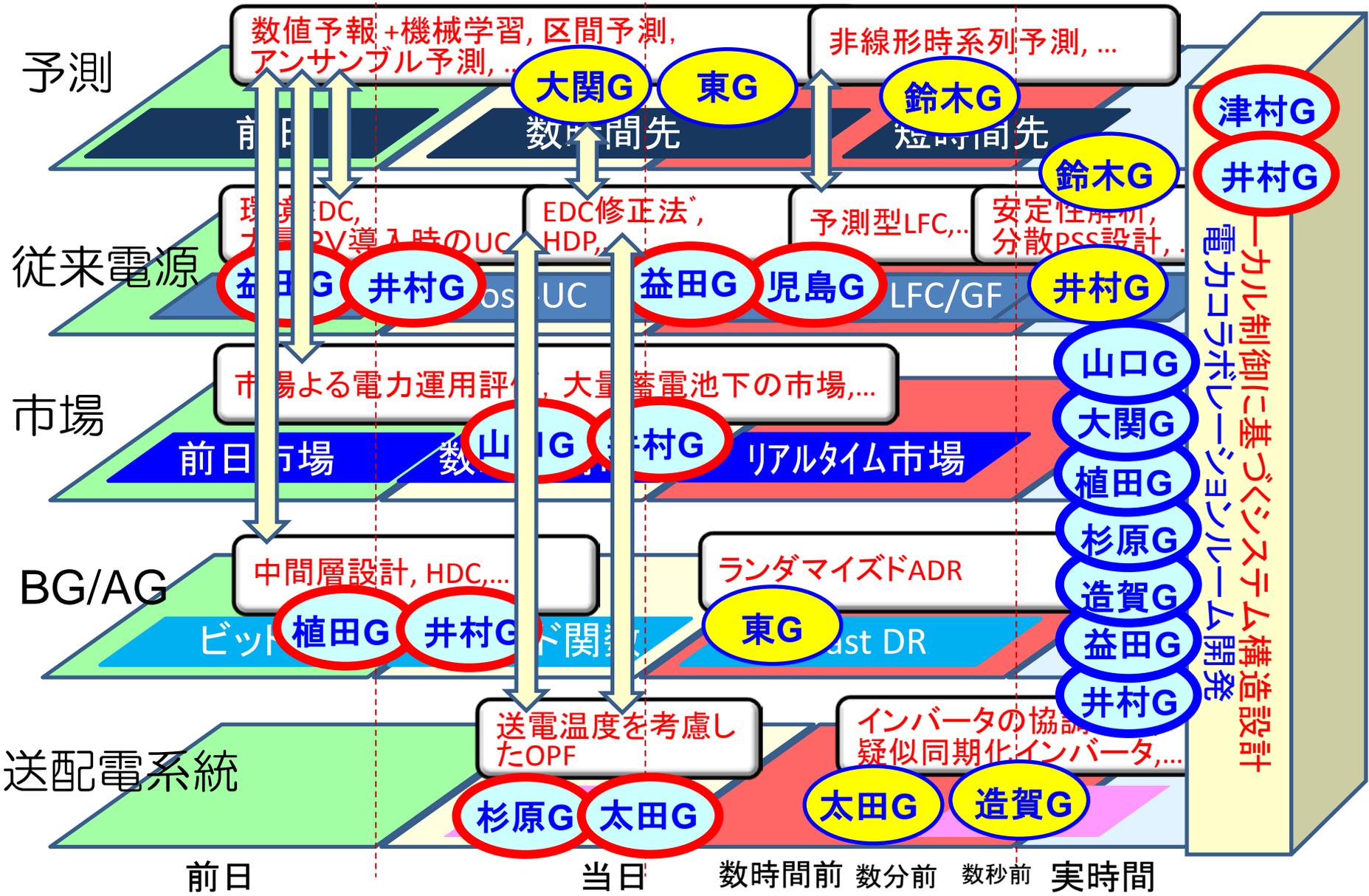
状況設定

- PV102GW導入を標準として、PV330GWまでを見据える
- 蓄電池：太陽光発電に相当する量を目安

アウトライン

1. 研究進捗のまとめ
(業績、国際・社会連携、システム構築)
2. システム理論構築を目指して
3. 研究成果
4. まとめ

個々の研究トピックと連携体制



主な実施内容

・PV予測技術の高度化

- ・予測誤差分析、信頼度付区間予測、アンサンブル予測など

・PV大量導入時の電力系統制御

- ・PVの超大量導入時における需給運用評価
- ・PV予測を活用した電力系統制御(UC,EDC,LFC,OPFなど)
- ・信頼度区間付予測に基づく電力系統制御
- ・配電網の協調電圧制御、疑似同期化インバータ

・運用層-集配層-ユーザー層から成る電力システム最適設計

- ・集配層⇔運用層(市場設計):
前日・当日市場の連動評価、多時間スポット市場
- ・集配層⇔ユーザー層(アグリゲータ設計):
アグリゲータ設計(集約・融通)、需要家制御

これまでの研究業績のまとめ

外部発表（印刷中，発表予定含む）

2018年2月8日現在

本年度件数/累積数

● 論文・査読付国際会議 **総計 72/185編**

論文: 32/74編 (内, 国際論文25/54編)

査読付き国際会議: 40/111編

● 解説等: 9/25件

● 招待講演: 9/16件

● 報道: 14/29件

※JSTプレスリリース 2/4件

● 特許: 0/1件

● 受賞: 3/15件

- SICE Annual Conference Young Author's Award Winner 2017 (井村G)

- 電力技術・電力系統技術合同研究会 奨励賞 2017 (造賀G)

- 第60回自動制御連合講演会 優秀発表賞 2017 (井村G)

● 口頭・ポスター発表: 54/212件

主な国際論文誌の内訳:

IEEE Trans. on Industrial Electronics (3編, IF:7.168)

IEEE Trans. on Industrial Informatics (1編, IF:6.764)

IEEE Trans. on Smart Grid (1編, IF: 6.645)

IEEE Trans. on Power Systems (2編, IF:5.680)

Automatica (1編, IF:5.451)

IEEE Trans. on Automatic Control (1編, IF:4.270)

Nature Energy (1編)

Scientific Reports (3編, IF:4.259)

Renew. Energy & Environ. Sustain. (1編, IF4.357)

Solar Energy (4編, IF4.018)

国際連携の取り組み

Application of Interval Analysis



Prof. N. Ramdani
(Univ. Orleans)

Control Theory of Power System



Prof. K. Johansson
Prof. H Sandberg
(KTH Royal Inst. of Tech.)

Resilient Distribution Systems inc. PV power



Prof. C.-C. Liu
(Washington State Univ.)

DyMonS vs Glocal Control



Prof. M. Ilic
(MIT)

Hierarchical Control inc. Market Mechanism



Dr. A. Annaswamy
(MIT)

Dr. Fabrizio Dabbene
Dr. Roberto Tempo
(CNR-IEIIT)



COOPS-JST Joint Project
PI: Yasumasa Fujisaki (Uchida Team)



Prof. G. K. Venayagamoorthy
(Clemson Univ.)



PV-Prediction based
RT Demand-side Control

A.Prof. A. Chakraborty
(NC State Univ.)



Retrofit Control for
Wind Power Systems

国際連携の取り組みの成果

	共同研究者名	研究テーマ	研究成果	申請	主な研究活動
1	K.H. Johansson 教授 H. Sandberg 教授 (KTH, Sweden)	電力系統制御理論	国際論文誌:1 国際会議論文:4		2015/10/23 打ち合せ, KTH (井村G) 2015/6~2016/3 井村グループポスドク派遣 2016/12/13 打ち合わせ, シアトル (井村G)
2	N. Ramdani教授 (U. of Orleans, France)	区間予測最適化の 区間解析の応用	国際論文誌:1 (JSTプレスリリース) 国際会議論文:3		2015/3月, 10月 打ち合せ Burge, France (井村) 2017/2/17-26 Ramdani招聘 東工大招聘
3	A. Chakraborty 准教授 (NSF ERC FREEDM Center, North Carolina State Univ., USA)	風力発電制御	国際論文誌:1 (JSTプレスリリース) 国際会議論文:2	NSF採択 2017-2020	2015/11/19-20 内田チームとワークショップ開催, 東京 2015/12/15-18 打ち合わせ, 大阪 (井村) 2016/8/15-26 Chakraborty 招聘 東工大滞在 2016/12/8-9 打ち合わせ, NCSU (井村G) 2017/5/29-6/11 Chakraborty 招聘 東工大滞在 2017/9/1-10/12 NCSU 滞在 (実本)
4	M. Ilic 教授 (MIT, USA)	Title: Retrofit Control: A New, Modular Gyrorator Control Approach for Integrating Large-Scale Renewable Power			
					2017/12月(10日間) 打ち合わせ(山口)
5	C-C. Liu教授 (Washington State Univ.,USA) (Virginia Tech., USA)	配電系統制御		NSF申請	2015/9/21-22 1st ESIC-HARPS Workshop, WSU 2016/8/5-6 2nd ESIC-HARPS Workshop, 東京 2017/3/3 打ち合わせ, WSU (造賀G, 杉原G) 2018/3/8-29 VT滞在(造賀G 田岡)
6	A. Annaswamy博士 (MIT, USA)	市場を含む階層制御			2015/11/19-20 内田チームとワークショップ開催, 東京 2015/12/15-18 打ち合わせ, 大阪(原, 井村) 2016/3, 2016/7, 2017/2 打ち合わせ, MIT (原) 2017/3/19-28 MITポスドク招聘, 東京 (原G) 2017/9/10-22 打ち合せ, MIT (津村) 2018/2/中旬 打ち合わせ, MIT(原)
7	G. K. Venayagamoorthy 教授 (Clemson Univ., USA)	需要リアリアルタイム 制御		NSF申請	2016/9/23 Workshop, Clemson Us 2018年度予定 Workshop, 東京
8	R. Tempo博士 F. Dabbene博士 (CNR-IEIIT, Italy)	COOPS共同プロジェクト に参加(PI 内田チ ーム藤崎泰正)			2015/7/15-17 Mid-year meeting, Linz, Austria(井村) 2015/12/12 Workshop COOPS, 大阪(井村, 石崎) 2016/7/8 打ち合わせ(井村), シアトル 2016/11/15-17 Workshop ,Torino (井村, 石崎) 2017/11/15-17 Workshop, Milano (井村, 石崎)
		計	国際論文誌:3 国際会議論文:9	採択1件 申請3件	

社会連携: HARPSコンソーシアム(HARPCON)

ポストFIT (FITのない2030年以降)のあるべき姿を
中間層の役割と設計指針を中心に探る

東工大 先進エネルギー国際研(AES)
センター 柏木先生, 小田先生

連携  エネルギー全体の視点から

JST EMS CREST HARPS
HARPCON

企業7社(22名)

飯野AD



電中研
(4名)

連携  電力全体(特に需要家側)の視点から

JST EMS CREST
中島チーム 岩船先生

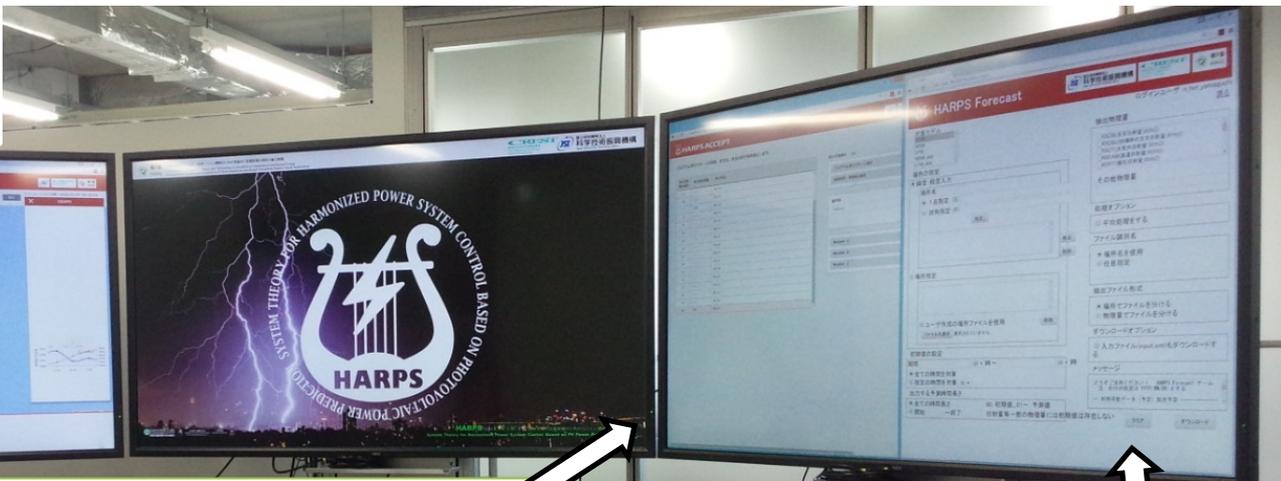
政策提言
プロジェクト提案

実装を見据えた,
・研究の方向性
・個別共同研究

2016年3月	HARPCON設立準備会
2016年6月	第1回HARPCON会議
2017年1月	第2回HARPCON会議
2017年6月	第3回HARPCON会議
2018年2月	第4回HARPCON会議(予定)

HARPS電力コラボルーム (山口G)

デジタル電力シミュレータを備えたコラボレーションルーム
各数理モデルの協調効果をブレインストーミング的に検討



<HARPS ACCEPT>

HARPS電力システムモデル，電源構成モデル，電力市場モデル，中間層モデルを組み合わせ，各研究者が開発した各種の時空間レベルの制御手法を組み込んだデジタル電力シミュレーションを実行

<HARPS Forecast>

全国の日射量実績・予測のデータベースとインターフェイス

<HARPS Database>

OCCTO公開情報，JEPX価格，PV導入量，建物床面積などのデータをストレージ上でデータベース化

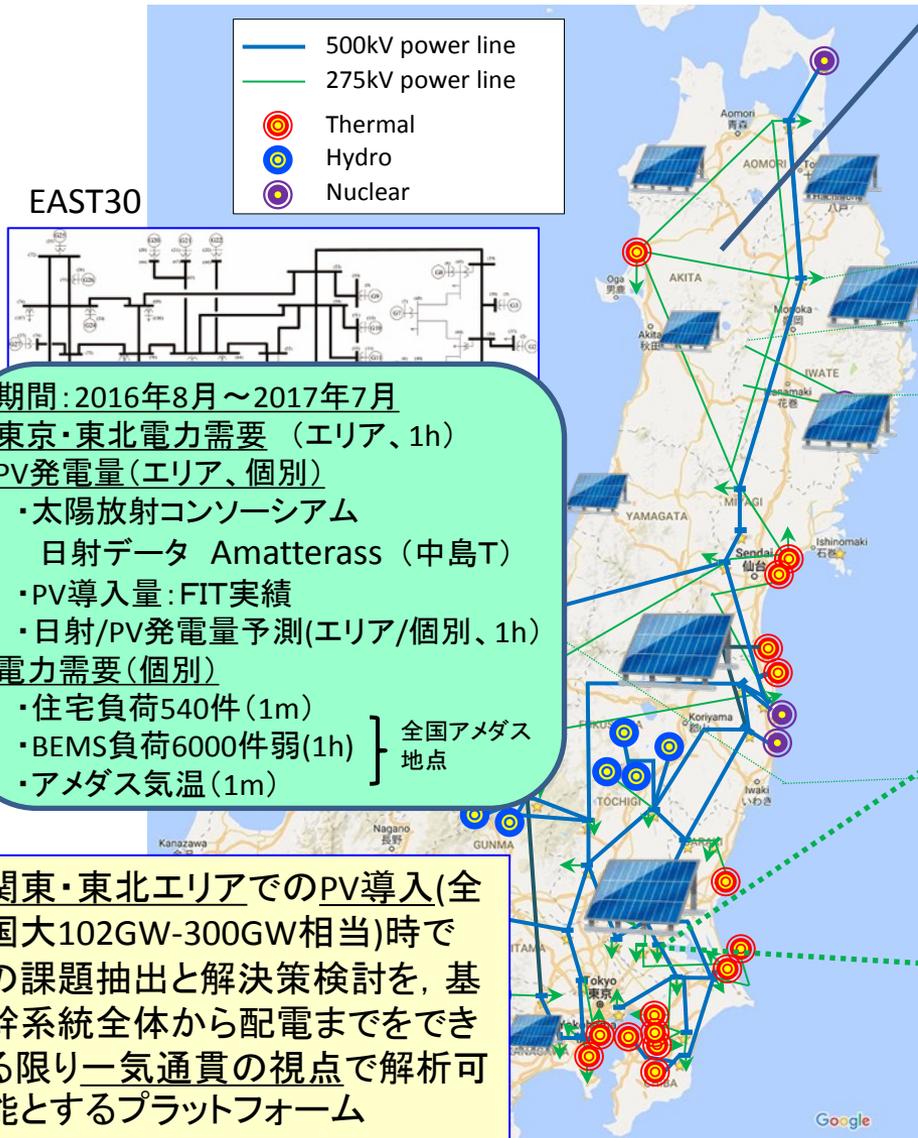
<HARPS OASIS>

研究成果の外部公開

次世代電力系統研究用プラットフォーム構築

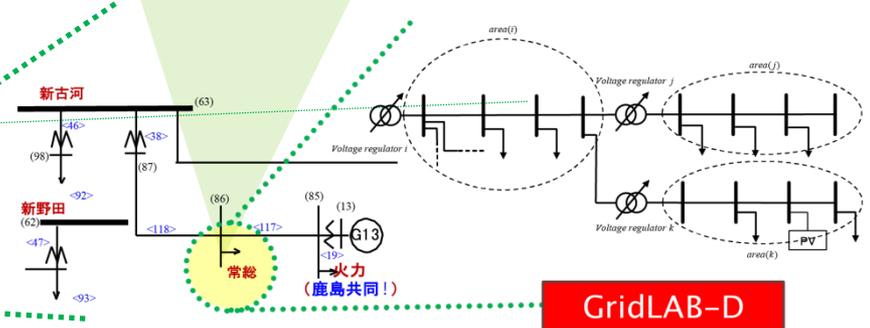
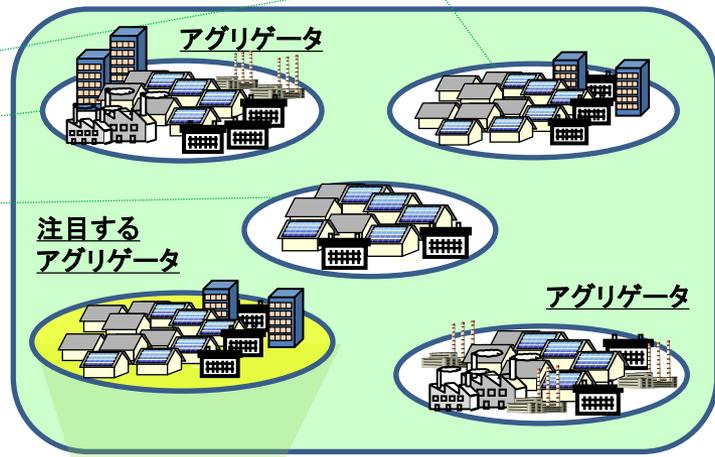
PV-EAST30モデル+気象データ

(電気学会標準モデル EAST30+PVモデル)



市場, UC, EDC, 最適潮流計算, LFC, 過度安定解析, PSS, ...

中間層設計



造賀G 配電システムシミュレータ GridLAB-D
 太田G インバータテストベッド

アウトライン

1. 研究進捗のまとめ
(業績、国際・社会連携、システム構築)
2. システム理論構築を目指して
3. 研究成果
4. まとめ

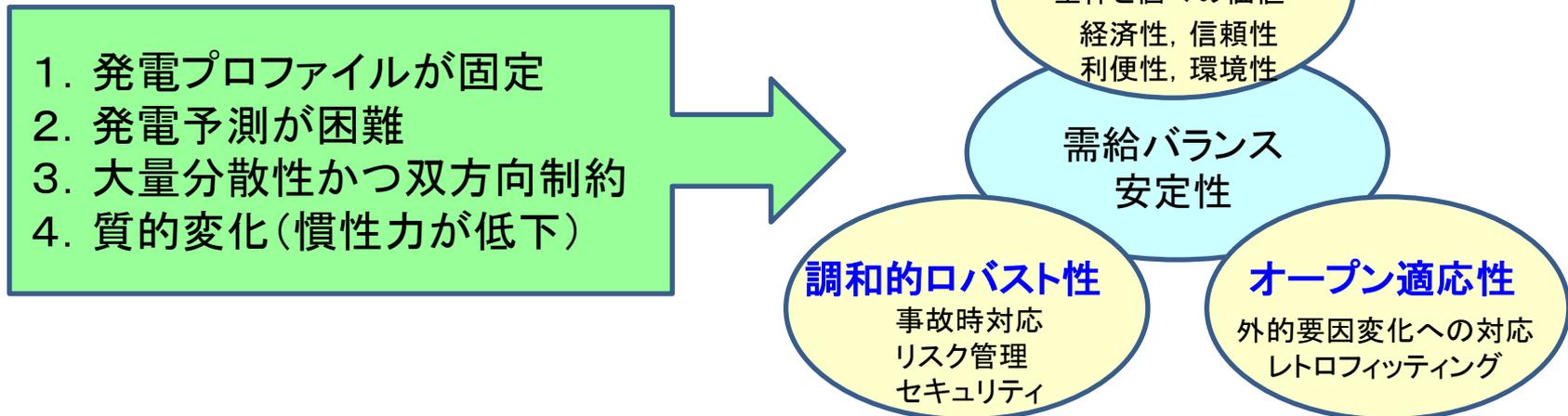
システム理論構築に向けて

PVスマート基幹電源化のためのシステム理論

PVスマート基幹電源化とは

以下の要件を満たす電力システムの制御システムを実現すること

1. **需給バランス・安定性**: 需給バランスを維持し, 安定な電力供給
2. **多価値共最適性**: 系統全体の価値と個々のユーザの価値の共最適性
3. **調和的ロバスト性**: 発電予測のもとでのリスク管理やセキュリティ・事故時対応
4. **オープン適応性**: 外的要因によるシステムの変化・進化に対するフレキシビリティやレトロフィッティング

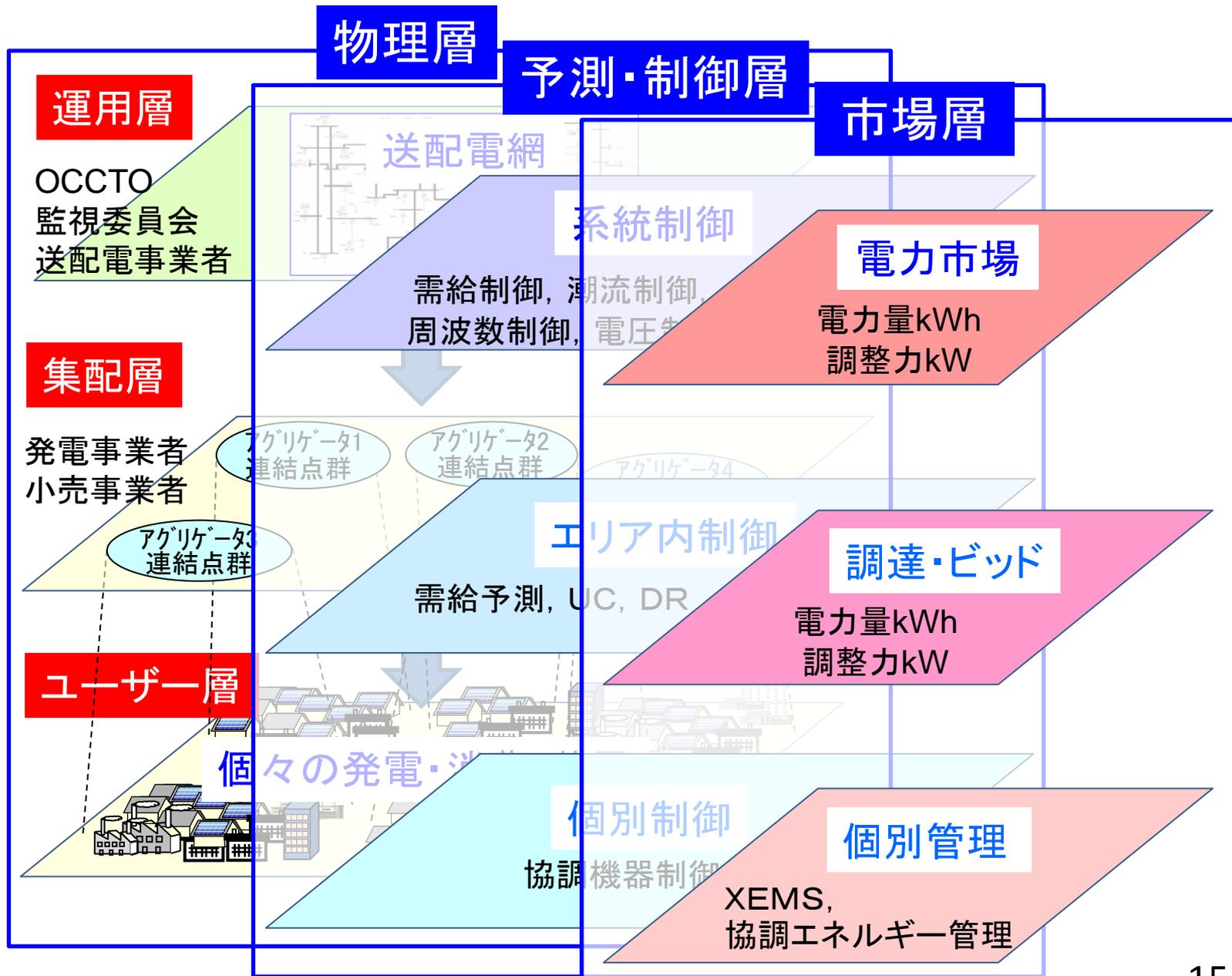


次々世代電力システム構造

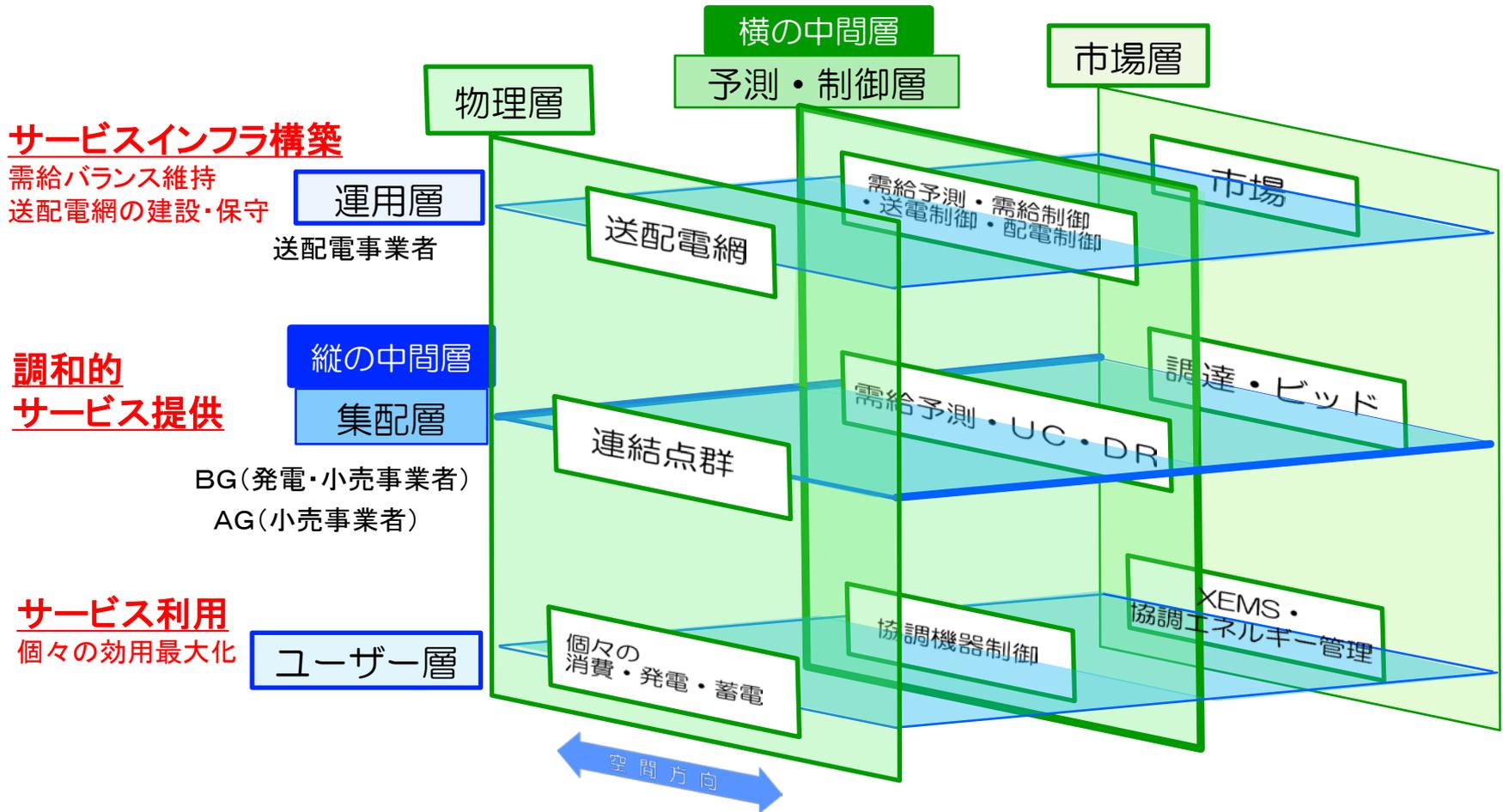
**サービス
インフラ構築**
需給バランス維持
送配電網建設・保守

**調和的
サービス提供**
集約と分配
市場参加

サービス利用
個々の効用最大化



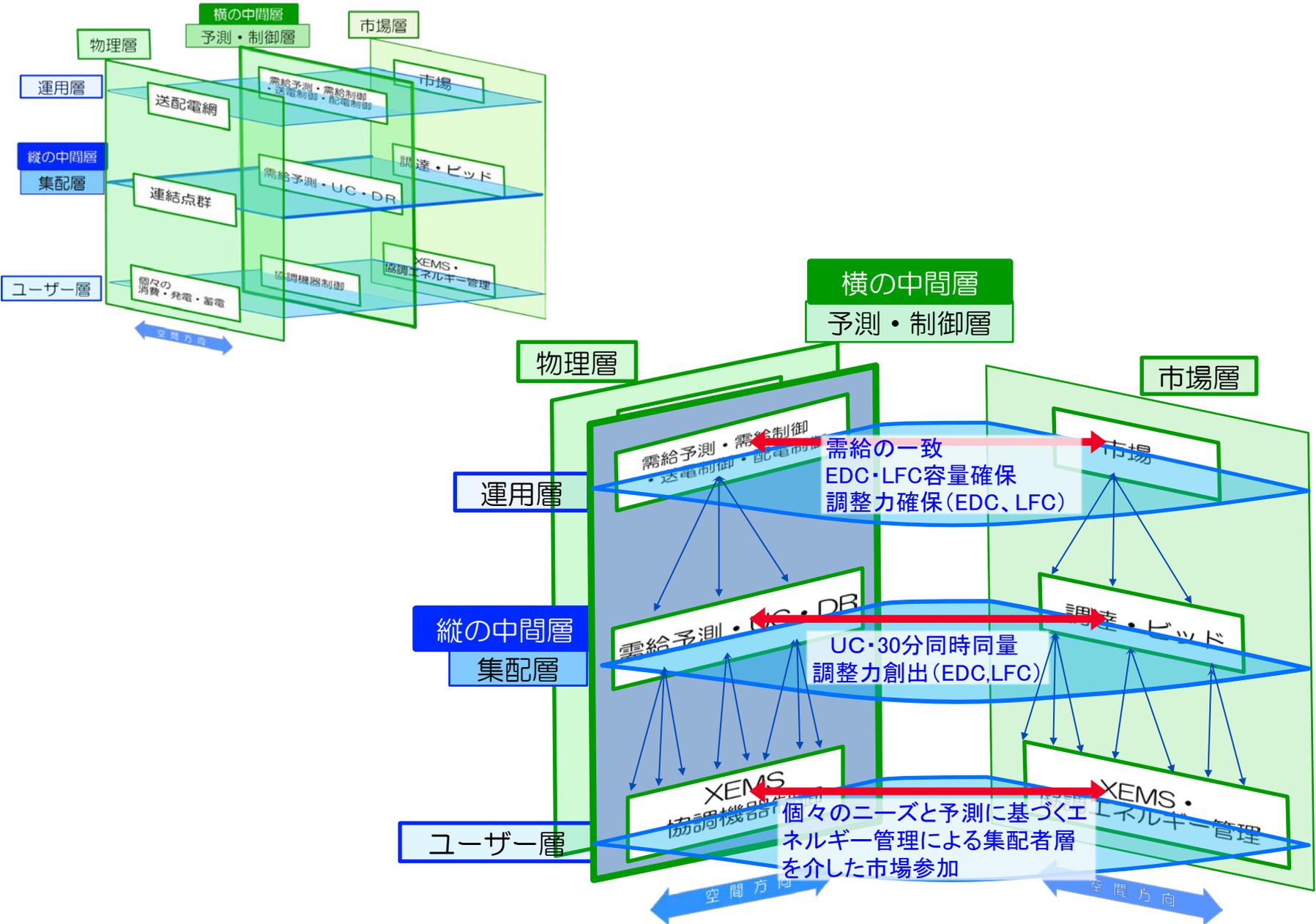
次々世代電力システム構造



システムズアプローチ

- ・各層・機能間の関係から見た**グローバル・ローカル目標**の明確化
- ・様々なレベルでの制御入力、計測信号の**協調的活用**のための理論

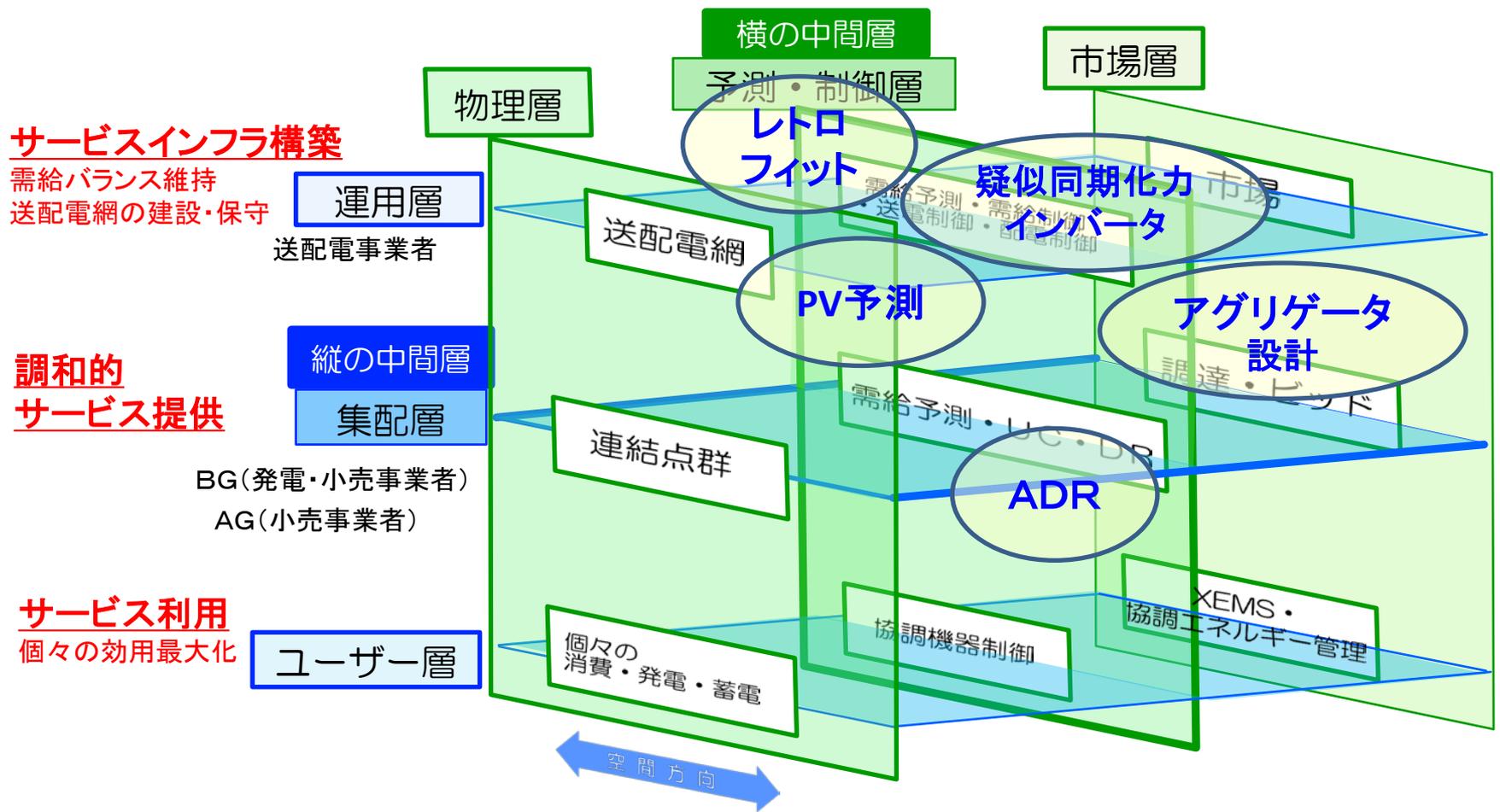
次々世代電力システム構造



アウトライン

1. 研究進捗のまとめ
(業績、国際・社会連携、システム構築)
2. システム理論構築を目指して
3. 研究成果
4. まとめ

次々世代電力システム構造



PV発電の予測技術（大関G）

予測大外れ予見指標開発

- 気象庁の予測に大きな予測誤差がある場合、境界データに利用している物理・統計モデルは、一様に予測を大外れすることが確認されている。
- そこで、日本・欧州・アメリカ・イギリスの予報機関の全球アンサンブル予測を併用し、日射量予測の日々の信頼性評価指標を付加する手法を開発した。
- 今回の技術は各予報機関のアンサンブル予測の標準偏差（以下、アンサンブルスプレッド）を予測の信頼性評価指標として利用した。
- 2014年-2016年の過去3年間における上位5%の前日予測の大外れ事例の検出力についてROC曲線を用いて評価した。
- 12か月より冬季5か月における検出力が高くなったが、どちらも有意な検出力を示した。また、上位10%、1%における検出力も同様に有意な検出力を示し、6日前予測でも同様に有意な検出力を示した。

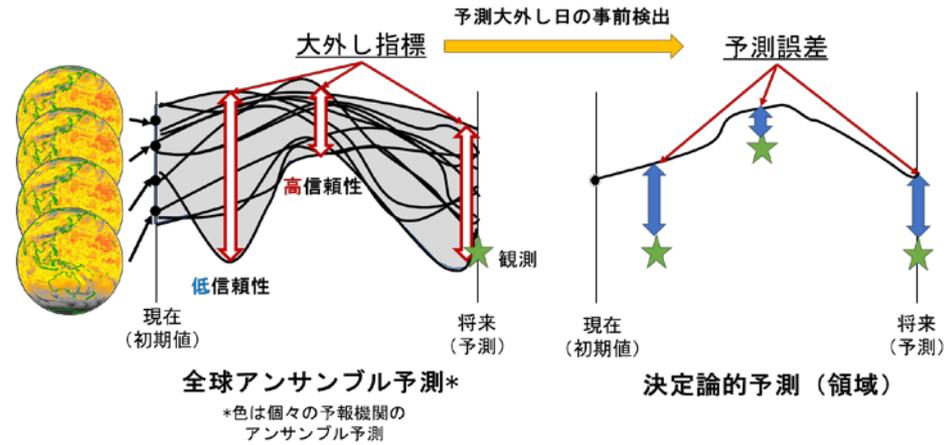


図 アンサンブル予測を利用した予測の大外れ検出手法の概念図

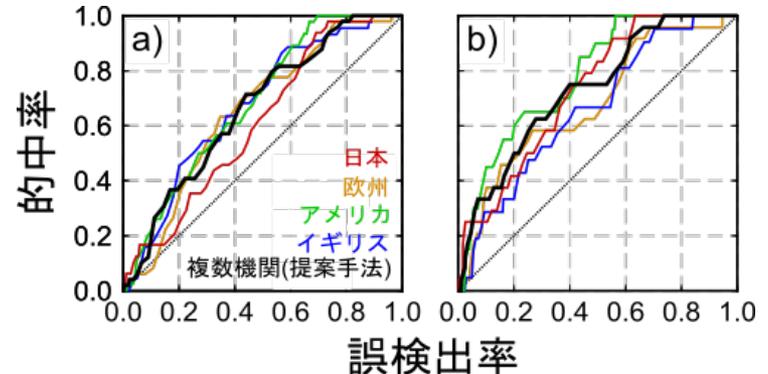


図 12か月 (a) と冬季5か月 (b) で評価した前日予測の大外れ予見指標の検出力。各線の色が予報機関単独で評価した場合、黒太線が4つの予報機関を併用した場合の検出力を示す。

アグリゲータ・市場設計(井村/植田/山口G)

Ishizaki et. al, IFAC (2017), CDC (2017)

前日スポット市場モデル化：発電消費量(需給電量)時系列計画を売買

- ・ **発電機**、**再エネ**、**蓄電池**、**負荷**など多様なリソースの利点を統合

↑ グリッドへの需給電計画値(48スポット) $x_\alpha = g_\alpha - l_\alpha + p_\alpha + \eta_\alpha^{\text{out}} \delta_\alpha^{\text{out}} - \frac{1}{\eta_\alpha^{\text{in}}} \delta_\alpha^{\text{in}}$

アグリゲータ
不確実

アグリゲータ α の需給電コスト関数 (凸性を証明)

$$F_\alpha(x_\alpha) = \max_{p_\alpha \in \mathcal{P}_\alpha} \min_{(g_\alpha, \delta_\alpha) \in \mathcal{F}_\alpha(x_\alpha; p_\alpha)} \left\{ G_\alpha(g_\alpha) + D_\alpha(\delta_\alpha) \right\}$$

再エネの不確かさをコスト換算 発電・蓄電の経済的活用

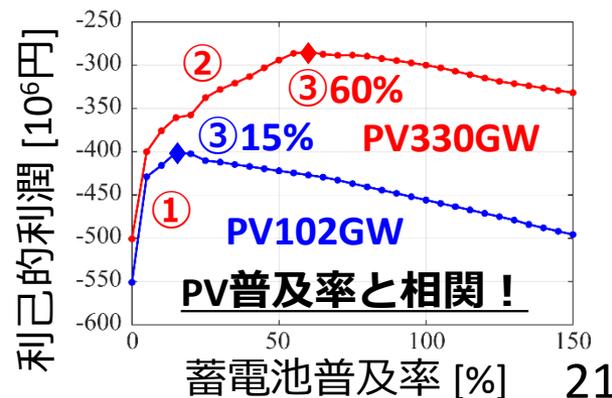
- ・ **ネガ・ポジワット取引を統合した競争市場**をネスト構造凸最適化でモデル化

多時間スポット市場モデル $\min_{(x_\alpha)_{\alpha \in \mathcal{A}}} \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} F_\alpha(x_\alpha) \quad \text{s.t.} \quad \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} x_\alpha = 0$

蓄電池の利潤分析 (FITによるPV普及を前提)

- ① PV不確かさの吸収と裁定取引による**高増分利潤**
- ② 段階的な**価格平準化** (段階的な増分利潤の低下)
- ③ 増分利潤が0となる**蓄電池普及の均衡点**

※ 容量±7kW・14kWh、耐用年数25年、1万[円/kWh]で試算



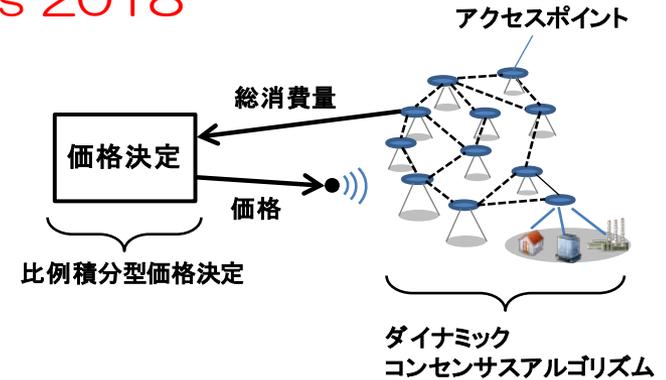
リアルタイムプライシング安定条件 (東G)

Izumi & Azuma: IEEE Trans. Industrial Informatics 2018

JSTプレスリリース

目的

- 分散的に電力消費量の総量を計算(ダイナミック
コンセンサスアルゴリズム)する際の
リアルタイムプライシングの安定性条件の解析
(どのようにパラメータを定めれば安定となるか?)



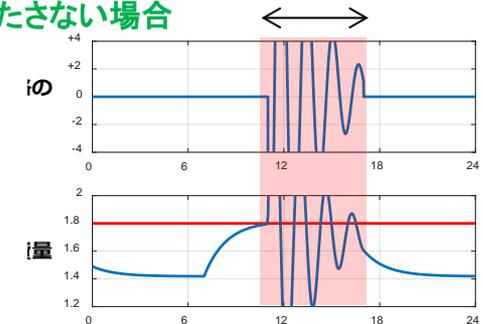
方法と結果

- サブシステム間の接続関係が複雑であり、
改善すべき点など、
どのパラメータがどのように安定性に影響を及ぼすか
が不明
⇒ 安定性に関わるブロックの抽出に成功

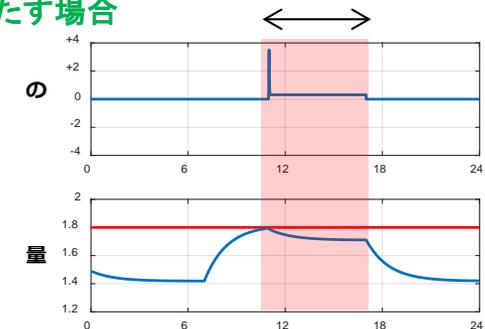
- リアルタイムプライシングの安定性を特徴
付ける3つのパラメータ

- (1) 情報交換経路(ネットワークトポロジ)
 - (2) 情報の統合強度(推定ゲイン)
 - (3) 電力価格への反映度合(制御ゲイン)
- の関係を解明

○ 安定条件を
満たさない場合



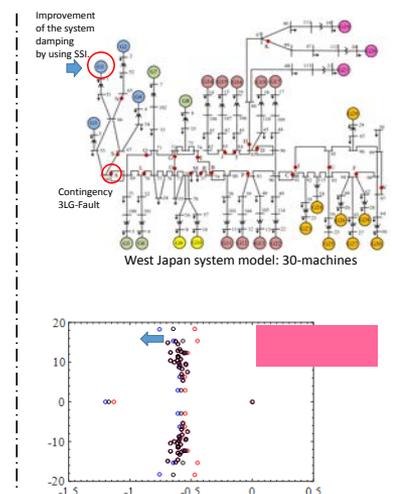
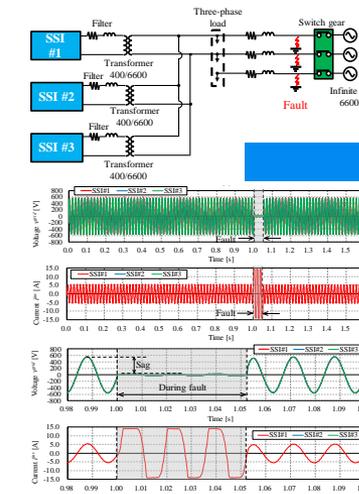
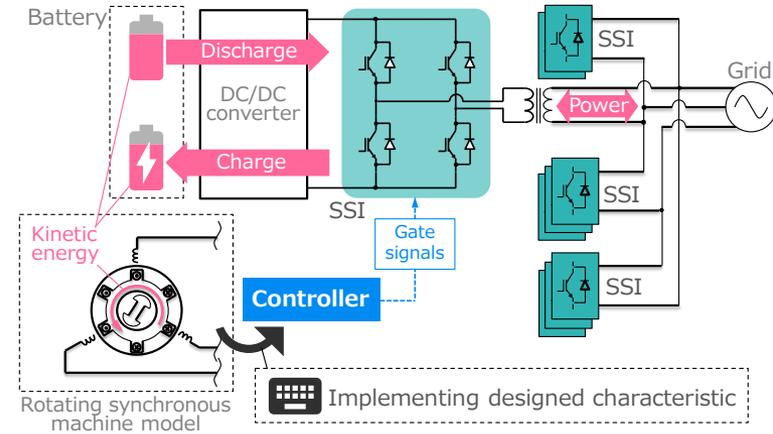
○ 安定条件を
満たす場合



同期化インバータの開発と実証実験（造賀G）

- ▶ 同期化インバータ(SSI)の開発
 - ⇒ Virtual inertia（擬似慣性）の実装
 - ⇒ 動揺方程式に基づいた系統安定化効果
 - ⇒ 再エネ導入時（同期機減少時）の安定度向上
 - ⇒ 設計した動特性を実現するコントローラの開発
- ▶ 数値シミュレーションによる検証
 - ⇒ 開発コントローラの構築
 - ⇒ Inertia-lessインバータとの比較による検証
 - ⇒ 系統のレジリエンス向上を目的とした単相Microgridの構築
 - ⇒ 単相Microgrid実現のための機能の開発（Plug-and-play機能, 周波数制御機能, etc）
- ▶ 実験環境における実証実験
 - ⇒ デジタル制御系への開発コントローラの実装
 - ⇒ 同期機+送電線+保護リレーによる故障実験
- ▶ 理論と実証実験の開発：着実に進行中
 - ⇒ Hardware-in-the-loopによる実証実験
 - ⇒ 複数台の提案制御系を具備したデジタル制御系を用いた単相マイクログリッドの実証実験

再エネ（PV）大量導入時における電力系統のレジリエンスの向上を目的とした、SSIの開発および実証実験

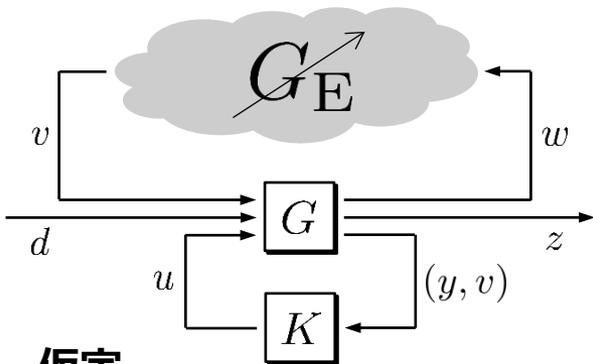


レトロフィット制御 (国際連携・井村G)

多数の主体によって増改築されていく大規模なネットワーク系に対して局所的なサブシステムモデルのみを用いた制御器の設計と実装により大域的なシステム特性や制御性能を改善する**分散制御系の分散設計理論**

理論：すべてのレトロフィット制御器の特徴づけ

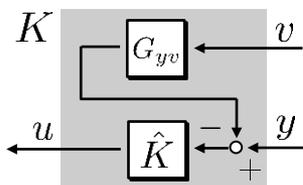
Ishizaki et al.
ACC (2018), ECC(2018)



仮定

G_E と G_{wv} の結合系は安定

任意の環境 G_E に対して全系が安定である**必要十分条件**はレトロフィット制御器 K が下図の構造をもつことである。ここで \hat{K} は局所モデル G_{yu} を安定化する制御器である。

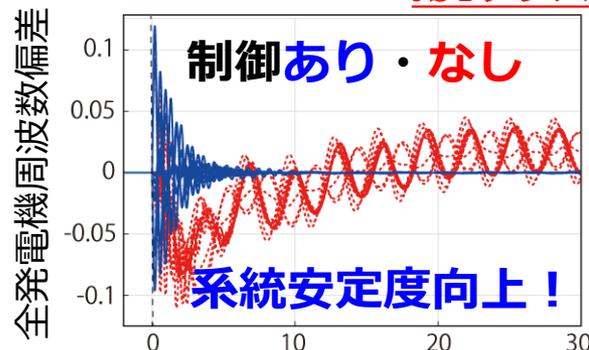
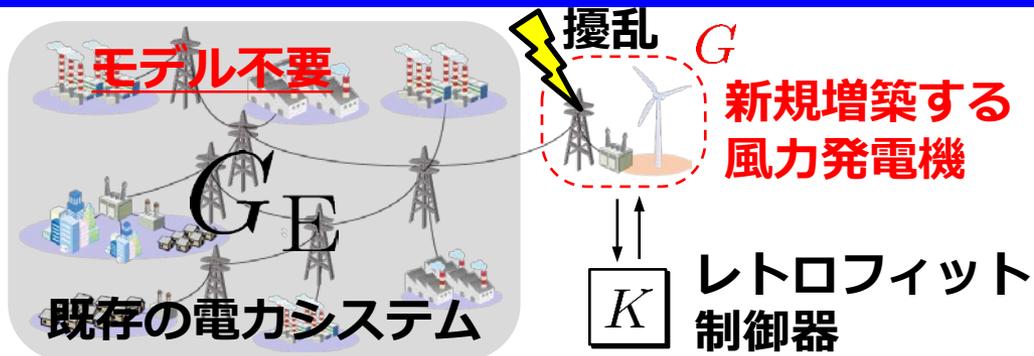


G_{yv} は環境からの信号 v による影響をモニタリングする数値シミュレータ

※ 必要性の証明には G_{wv} の可逆性を仮定

応用：風力発電連携システムに対するプラグイン型制御技術

Sadamoto et al.,
IEEE TPS (2017)
JSTプレスリリース



アウトライン

1. 研究進捗のまとめ
(業績、国際・社会連携、システム構築)
2. システム理論構築を目指して
3. 研究成果
4. まとめ

まとめ

【研究進捗】

論文：72/185編

論文誌論文：32/74編

国際会議論文：40/111編

【国際連携】

8件進行中

論文3編

国際会議論文9編

Retrofit Control of Wind-Integrated Power Systems

Tomonori Sadamoto¹, Member, IEEE, Aranya Chakraborty², Senior Member, IEEE, Takayuki Ishizaki¹, Member, IEEE, and Jun-ichi Imura¹, Member, IEEE,

Abstract—In this paper we address several powering concerns of power integration from the perspective of power system dynamics and stability. We propose a new control design technique called retrofit control by which one can control the rotor voltages of doubly-fed induction generators to suppress the oscillations in the tie-line power flows caused by a disturbance inside the wind farm. The controller can be designed in a modular way, and also implemented in a completely decentralized fashion using only local feedback from the wind generator states and the voltage at the point of common coupling without depending on the states of any of the synchronous machines in the rest of the system. We show the effectiveness of the design using simulations of the IEEE 68-bus, 16-machine power system model with two wind farms.

Index Terms—Wind integration, small-signal stability, decentralized control, damping, DFIG, retrofit control

NOMENCLATURE

The variables below are in per unit unless otherwise stated. Wherever necessary, we will use the subscript k for these symbols to denote that they belong to the k -th bus.

Power Networks:

ω Base frequency, which is 120 π (rad/sec)
 N index set of all buses
 N_G, N_C, N_W index set of generator bus, load bus, and wind farm bus

Synchronous Generators:

δ rotor angle (rad)
 ω rotor frequency
 e internal voltage of rotor
 V_{ex} voltage of the excitation winding
 P_m mechanical power input
 V_{ps} output voltage of Power System Stabilizer (PSS)

Wind Farms:

ω_{gr} turbine and generator frequency
 θ_{gr} generator torsion angle (rad)
 T torque used by DFIG
 P_a aerodynamic power input
 J inertia of turbine and generator (sec)
 D_t, D_g friction coefficients of turbine and generator
 K_t torsional stiffness (1/rad)
 d_t torsion damping
 N_g gear ratio
 $i_{d,r}, i_{q,r}$ d- and q-axis rotor currents
 $i_{d,s}, i_{q,s}$ d- and q-axis stator currents
 $v \in \mathbb{R}^2$ state of d- and q-axis internal controller
 $x_{m,r}, x_{m,s}$ magnetizing reactance
 r_s, r_r stator, rotor resistances
 γ number of wind generators
 C_{d-}, C_{d+} PI gains of d-axis internal controller
 C_{q-}, C_{q+} PI gains of q-axis internal controller
 z state vector of wind farm

Retrofit Controller:

ξ state of retrofit controller
 u input generated by retrofit controller
 \hat{n} dimension of retrofit controller

x_{d-}^s d-axis transient reactance
 x_{d-}^{ss} PSS state vector

γ state vector

ω_{gr} turbine and generator frequency

θ_{gr} generator torsion angle (rad)

T torque used by DFIG

P_a aerodynamic power input

J inertia of turbine and generator (sec)

D_t, D_g friction coefficients of turbine and generator

K_t torsional stiffness (1/rad)

d_t torsion damping

N_g gear ratio

$i_{d,r}, i_{q,r}$ d- and q-axis rotor currents

$i_{d,s}, i_{q,s}$ d- and q-axis stator currents

$v \in \mathbb{R}^2$ state of d- and q-axis internal controller

$x_{m,r}, x_{m,s}$ magnetizing reactance

r_s, r_r stator, rotor resistances

γ number of wind generators

C_{d-}, C_{d+} PI gains of d-axis internal controller

C_{q-}, C_{q+} PI gains of q-axis internal controller

z state vector of wind farm

ξ state of retrofit controller

u input generated by retrofit controller

\hat{n} dimension of retrofit controller

All variables with superscript * denote setpoints (e.g., i_{d-}^* is the setpoint reference for i_{d-}).

Mathematical Notation: We denote the imaginary unit by $j = \sqrt{-1}$, the set of real numbers by \mathbb{R} , the set of complex numbers by \mathbb{C} , the cardinality of a set Z by $|Z|$, the pseudoinverse of a full-column rank matrix W by W^\dagger , and the n -dimensional identity matrix by I_n . The system $\dot{x} = f(x, u)$, where u is input, is said to be stable if the autonomous system under $u = 0$ is exponentially stable. We

【社会連携】



コンソーシアム
HARPCON
全5回

29年度は
連携研究本格化
システム理論構築
開始

【アウトリーチ】

- OS等企画：11件
- HPの充実：2万ビュー
- 解説等：25編
- 内閣府報告：1件
- 報道：29件



【システム構築】



コラボルーム 機能強化

参考資料

- 活動内容
- 各ユニットの進捗状況
- 研究テーマまとめ
- 各グループの進捗状況

H29年度の活動内容

	全体/UL/GL会議	U会議	その他
4	4/29 第1回HARPS成果発表 4/29-30 第6回GL合宿	4/13 第5回H-CON準備 4/25 第6回H-CON準備	
5		5/10 第7回H-CON準備 5/17 第8回H-CON準備 5/29 第9回H-CON準備	
6	6/6 第16回UL 6/23 第3回H-CON 6/23 第7回GL	6/2 第1回予測連携 6/6 第10回H-CON準備 6/27 第2回予測連携 6/28 第3回予測連携 6/28 第4回予測連携 6/28 第12回需要家U	6/22 企業ヒアリング
7	7/25 第17回UL 7/31 第8回GL	7/3 第5回予測連携 7/3 第6回予測連携 7/25 第7回予測連携	7/21 第9回セミナー 7/7 WS WUDS(仏) (招待講演)
8	8/29 第9回GL	8/8 第11回H-CON準備 8/16 第4回基盤U 8/26 制御理論グループ 8/26 第13回コラボR (配電系統連系)	8/30 企業ヒアリング 8/27-30 IEEE CCTA OS ハワイ
9			9/1-10/12 NCSUに滞在(定本) 9/10-22 MITに滞在(津村) 9/19-22 SICE Annual Conf. OS 金沢 9/21 WS Scale-freeback(仏) (招待講演)

H29年度の活動内容

	全体/UL/GL会議	U会議	その他
10	10/12 第18回UL	10/3 第14回コラボR	10/24 企業ヒアリング 10/30-11/2 気象学会秋季大会 OS
11	11/2 第19回UL		11/6 第8回若手研究会 11/10-12 第60回自動制御 連合講演会 OS 11/10 第11回セミナー 11/13 第10回セミナー 11/15-17 WS COOPS2017
12	12/7 第20回UL		12/6 第9回若手研究会 12/8 中島T&井村T 連携打ち合わせ 12/8 企業ヒアリング 12/13 海外打合せ(MIT)(原・津村) 12/14 海外打合せ(KTH)(井村G) 12/19 企業ヒアリング
1	1/10 第21回UL		1/12 企業ヒアリング
2	2/21 第21回UL(予定) 2/27 第4回H-CON(予定)	2/7 第12回H-CON準備	2/16 第10回若手研究会(予定) 2/21 第11回若手研究会(予定)
3			3/8-11 第5回制御部門 マルチシンポジウム OS(予定)

各ユニットの29年度のまとめ

ユニット	現状	今後の課題
予測U	<ul style="list-style-type: none"> 日射・PV予測の予測誤差要因分析と機械学習、時系列予測の前日・当日予測高度化 アンサンブル予測を用いた予測大外しの予見技術の開発 区間予測手法と予測不確実性のモデル構築 コラボルーム用各種予測データベース作成 予測誤差を補正する予測ガバナを開発 	<ul style="list-style-type: none"> 日射、PV予測モデルの高度化の継続 複数予測の統合予測技術の開発の継続 実システムへの適用を想定した予測ガバナの高度化を継続 予測データの活用によるユニット間連携の加速
需給U	<ul style="list-style-type: none"> 前日予測を利用したUCプログラムのコラボルーム実装 ユニット内連携：予見制御LFCの標準解析モデルへの適用（児島G&益田G） ユニット間連携：連系系統におけるネットワーク制約を考慮した最適潮流計算によるEDCの評価（送配電U） 	<ul style="list-style-type: none"> 連系系統の標準UC/EDC/LFCプログラムの開発 ユニット内連携：標準解析モデルを用いた予測型LFCの評価（児島G&益田G） ユニット間連携：連系系統におけるネットワーク制約を考慮したEDCにおけるバッテリー運用の検討（送配電U）
需要家U	<ul style="list-style-type: none"> 前日スポット市場におけるアグリゲータの最適戦略シミュレーションによる連携研究を実施し、HARPCONにおいて有効性の議論を開始した 	<ul style="list-style-type: none"> 時間刻み幅がより細かい市場での解析 Slow DR, Fast DR協調による予測不確実性への対応
送配電U	<ul style="list-style-type: none"> ユニット内は計画外対応を整理した上で、問題設定を明確化し、連携研究を深めた。 ユニット間では需給Uと連携し、EAST30機系統モデルを作成し、UCとOPFの連携研究を進めた。CR上でOPF実行確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 他ユニットとも連携し、地域供給システムのモデル系統を構築し、EAST30との関係を整理する。 各グループの様々な計算プログラムを連動して実行し、統合試験・評価を行うためのプラットフォームを他ユニットとともに構築
基盤U	<ul style="list-style-type: none"> 縦・横の2つの中間層が持つべき機能とその構成を与える階層化分散制御系の構成・制御方式に関する理論的枠組みと系統的設計法を提案 電力系統運用・市場モデルの数値シミュレーションによる中間層評価 電力系統の階層的電力モデル構築と安定性解析 	<ul style="list-style-type: none"> 縦横中間層の役割りと制御性能限界との関係の詳細を明らかにし、具体的な階層化電力システムと市場システムからなる2重階層化分散制御システムの系統的設計手法の構築 2重階層化分散制御システムの数値シミュレーション・安定性解析

ユニット名	研究課題	研究のねらい	研究実施方法(下記の観点から研究を実施中)	グループ名	進捗状況・今後の研究方針
PV 予測 大関G 東G 鈴木G	PV発電予測技術の高精度化	制御に適した、個々のPV発電予測技術を開発する	日射予測モデル(数値予報モデル)の誤差要因分析の継続と改良	大関G	予定通り研究推進中
			PV発電予測(機械学習モデル)による当日短時間予測の高度化	大関G	予定通り研究推進中
			PV発電量の無限時限遅れ座標による時系列予測手法の構築	鈴木G	予定通り。予測統合等展開中
			予測ガバナの開発	東G	国際論文誌へ投稿準備中
	複数予測の統合予測技術の開発	個々の予測技術を統合化することで、予測精度を向上させる	複数予測リソースを利用し、アンサンブル予報の有用性の検証	大関G	論文改訂・再投稿中
			気象衛星ひまわりから推定された日射量データを利用した予測誤差分析	大関G	予定通り研究推進中
			差分の時系列予測との統合手法	鈴木G	予定通り研究推進中
			予測誤差の外れ値の解析を複数の広域エリアに拡張	大関G	投稿論文準備中
区間予測/外れ値解析技術の開発	信頼度付予測技術を開発し、外れ値を予測する	区間推定およびアンサンブル予報の知見を利用して、区間推定の検討	大関G	予定通り研究推進中	
需給 制御 益田G 井村G 大関G 児島G 山口G	予測を利用した従来型電源UC/EDC手法の開発	信頼度付予測や数時間前予測をもとにした系統制御手法の開発により大量PVの導入を可能とする	信頼度付区間予測を利用した需給計画(ユニット間連携研究)	井村G、益田G、大関G	予定通り。UC等への展開を検討
			更新型予測情報を利用したバッテリーの充放電計画と火力機のUC手法	益田G	予定通り。論文投稿中
	予測大外れにも対応可能なEDC/LFC手法の開発と統合	大外れ時の平常運転回復可能状況の解析と予測を活用した新しい周波数制御を開発する	PV発電のシナリオ変更を考慮したEDC計画法(ユニット間連携研究)	児島G、益田G、大関G	予定通り。論文準備中。また複数のPV発電シナリオを扱う場合に展開予定
予測型LFCの開発とその評価(ユニット間連携研究)			児島G、益田G、大関G	予定通り。実系統に近い解析モデルにて性能評価を検証中	
送電ネットワークを考慮したUC/EDC(ユニット間連携研究)			益田G、杉原G、山口G	予定通り。連系系統にて解析を実施中	
需要家制 御 植田G 東G 井村G	需要家アグリゲータの設計	需要家アグリゲータのあるべき姿と市場に参加するためのアルゴリズムを構築する	多様性を利用した充放電量の配分(ユニット内連携研究)	植田G、井村G	国際会議に投稿中。特集号に論文投稿済
			蓄電池を活用したアグリゲータ設計(ユニット間連携研究)	井村G、山口G、植田G	予定どおり。論文作成予定
			PV発電・需要データ構築(ユニット内連携研究)	植田G、東G、井村G	需要モデルを需要家集団設計問題に適用し、検討する予定。また2010年版は需要モデル構築完了。2017年版を構築中。
	調和型ロバスト需要家制御理論の構築	ユーザー層の不確かな需要をプライシングにより制御するための手法を構築する	需要家アグリゲータによる需給制御に向けた目標潮流型料金プランの提案	植田G	予定通り研究推進中
			需要家集団の可制御性最大化(需要家集団の設計)	東G	需要家集団設計の成果を国際論文誌へ投稿準備中
			需要供給家の分散制御法の開発	東G	予定どおり。実データの利用を検討予定。
		モデル予測制御に基づく価格決定法	東G	国際論文誌へ投稿準備中	
		リアルタイムプライシングと蓄電池付ADRIによる需給調整力創出の可能性検証	植田G	予定通り研究推進中	

ユニット名	研究課題	研究のねらい	研究実施方法(下記の観点から研究を実施中)	グループ名	進捗状況・今後の研究方針
送配電制御 杉原G 太田G 児島G 造賀G	送電系統の過負荷管理・制御技術の開発	大量PV時の潮流解析と送電線温度制約を用いた計画外時対応を開発する	電線温度制約下における送電線過負荷に与える影響を評価	杉原G	予定通り。気象パラメータの変化を考慮予定
			送電線温度制約を考慮したEDCの設計(ユニット間連携研究)	児島G、杉原G	予定通り。今後連系線を考慮したEDCに成果を展開する
			気象変動の予測を取り込んだ確率的需給制御(ユニット内連携研究)	太田G、杉原G	予定通り研究推進中
			送配電系統最適運用手法-集中・分散最適化アプローチ	杉原G	予定通り研究実施中
			予測型PSS	児島G	予定通り。今後、多機系の応答と系統の情報の関係を検討する。
	送配電協調制御技術・理論の構築	配電系統側の電圧・周波数制御手法と同期化ラインバートを開発する	同期化ラインバート機能の改良と拡張	造賀G	機能拡張のため、研究継続中
			柔軟な系統運用のための電圧制御方策の検討	造賀G	連携研究を含め研究継続中
			送配電系の電圧・周波数制御と発電量変動への対応	太田G	予定通り研究推進中
基盤理論 津村G 井村G 鈴木G 山口G	階層化分散制御理論の構築	PV大量導入時の系統制御・市場設計のための基礎理論を構築する	大規模電力ネットワークの階層分散型最適化・制御系設計手法(ユニット内連携研究)	津村G、井村G	予定通り。国際連携実施・推進。リスクを考慮した手法への拡張を検討
			分散最適化アルゴリズムの開発	津村G	予定通り。リスクを考慮した手法への拡張を検討
			レトロフィット制御系設計	井村G	予定通り。一般化に向けて検討中。
	電力系統運用・市場モデルによる中間層評価	中間層をプレイヤーとする市場モデル設計とシミュレーションによって評価・検討する	前日・当日市場の連動シミュレーション	山口G	予定通り。研究推進中
			発電所運用の前日市場モデルを用いた連系線利用シミュレーション	山口G	予定通り。研究推進中
			配電系統潮流計算高速化手法	山口G	中間層との連携を検討予定
			蓄電池を活用したエネルギー市場設計(ユニット内連携研究)	井村G、山口G	予定通り。他市場との連携検討予定
			階層性・デスクリプタ表現に基づく大規模電力系統解析	津村G	予定通り。論文作成予定
	電力系統の階層的電力モデル構築と安定性解析	中間層を含む階層モデル表現を提案し、そのモデルを用いた際の安定性・ロバスト性等を解析をする	電力需要集中の数理モデル	鈴木G	研究の展開を検討予定
			電力ネットワークモデルのクラスタ低次元化(ユニット内連携研究)	井村G、鈴木G	予定通り。研究推進中
			複数エリアの相互結合電力グリッドの安定性	鈴木G	予定通り。階層性・同期化力の考慮を検討中
			ならし効果と電力グリッドのロバスト性	鈴木G	予定通り。階層性・同期化力の考慮を検討中

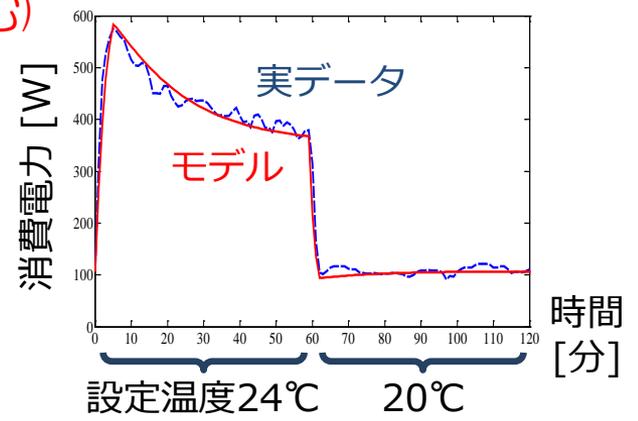
- ・連携を見据えた個別の基礎理論・技術の展開: 30テーマ
- ・ユニット内、ユニット間での連携研究: 12テーマ

論文: 8/16編 査読付き国際会議: 5/20編 (印刷中含む)

➤ 需要家の電力消費モデルの開発

ITC-CSCC2017,
AROB2018

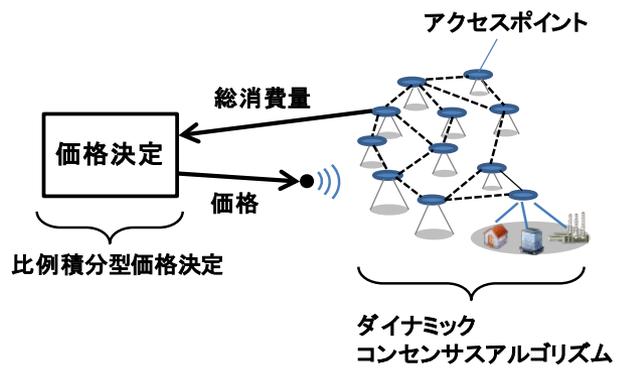
- 実験データを基にモデル(切換え型マルコフ連鎖系)を改良. オンライン切替えの方法を開発.
- 産業需要の気温応答モデルの開発 (植田G, 井村Gとの連携)



➤ リアルタイムプライシングの安定性解析

IEEE Trans. Industrial Informatics 2018

- リアルタイムプライシングの安定性を特徴付ける3つのパラメータ(情報交換経路, 情報の統合強度, 電力価格への反映度合)を説明
- 安定性を保証する3つのパラメータの関係性を明らかに



➤ 需要供給家の分散制御法の開発

IEEE Trans. Industrial Electronics 2017, ISICIE論文誌2018

情報ネットワーク上で
制御量を調整し合う



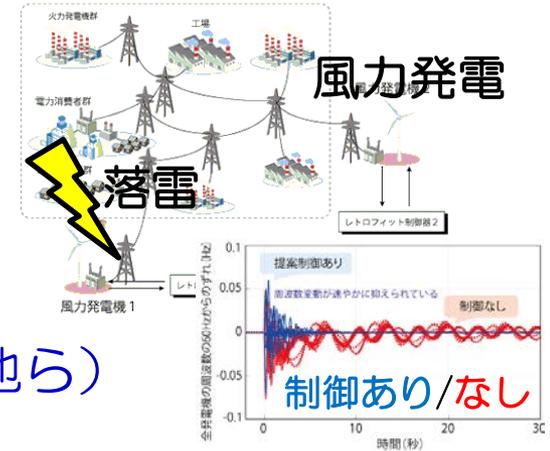
- 需要供給インバランス量のネットワーク型分散制御法の提案 => 各個の需要供給量の制御量を交換する方法
- 各家の需要供給量の動的な変化を推定する方法を提案 => ネットワーク分散制御に組み込むことで性能向上に貢献

井村G 中間層型電力系統制御基礎理論

研究成果 論文：7/16編 査読付き国際会議：16/30編 (印刷中含む)

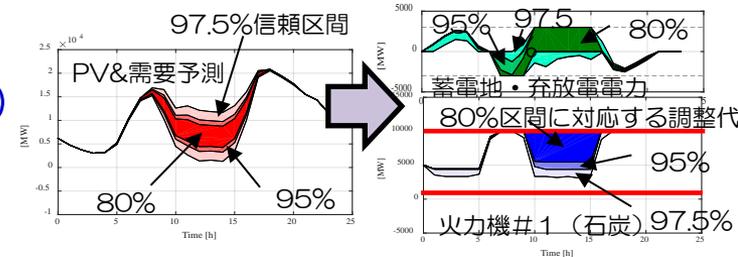
▶ レトロフィット制御理論構築 (石崎, 井上, 定本ら)

- ⇒ 大規模系の局所モデルのみを用いた制御系設計
- ⇒ すべての制御器のパラメトリゼーション
- ⇒ 風力発電連携システムのプラグイン型制御技術開発



▶ 分散電源有効利用に向けた電力市場設計 (石崎, 小池ら)

- ⇒ 蓄電池の有効利用と再エネの不確かさを考慮した前日多時間スポットエネルギー市場の解析

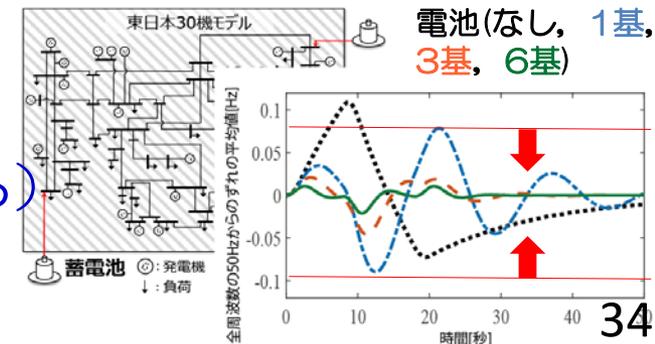


▶ 区間解析を利用した運用計画 (小池, 石崎ら)

- ⇒ 需給変動に対する単調性を利用し最適な発電計画・充放電計画の調整代算出法を提案

▶ 系統の受動性に基づく蓄電池配置と大域制御 (井上ら)

- ⇒ 効果的な周波数制御のための蓄電池配置と詳細モデルを必要としない大域制御



▶ 階層構造を利用した高速な需要最適制御 (西田ら)

- ⇒ 多数の需要家に対する需要確率取引に適用できる並列化数値計算法の提案

植田G 需要家アグリゲータの最適化

研究成果

論文：1 / 1編 査読付き国際会議：0 / 8編
 国際会議口頭・ポスター発表：7 / 8編

- 需要家アグリゲータにおけるPV付き個別需要家の蓄電池を用いた合計潮流計画値達成と必要充放電の最適配分および翌日計画に向けたSOC調整を可能とする計画・運用手法を開発

⇒ 不要な充放電を削減
 ⇒ 需要家間融通により需要抑制を回避

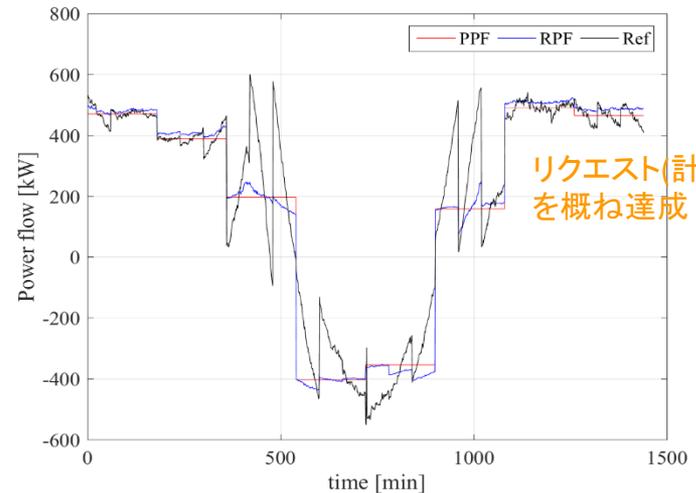
- 中間層における翌日計画および当日DRに向け、日射予測、需要予測、PV発電量把握手法、リアルタイムプライシング手法、目標潮流誘導型料金設定手法を検討

⇒ リアルタイムPV把握、翌日予測における発電・需要ともRMSE10%以下を達成

今後の展開

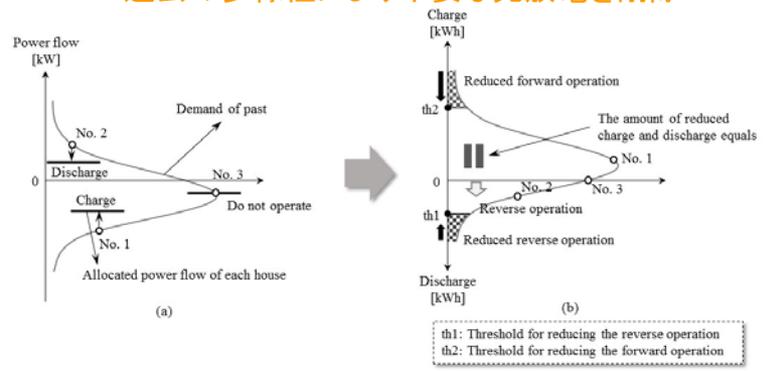
- 予測不確実性を考慮し、開発手法の有効性の検証する

充放電の最適配分例：

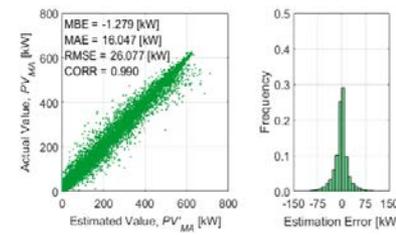


リクエスト(計画値)を概ね達成

過去の多様性により不要な充放電を削除



PV把握：



大関G PV発電の予測技術

研究成果 論文：4/9 (印刷中包含む)

➤ PV発電の推定技術

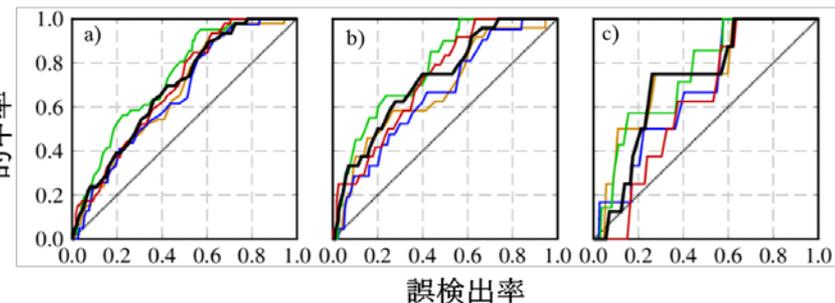
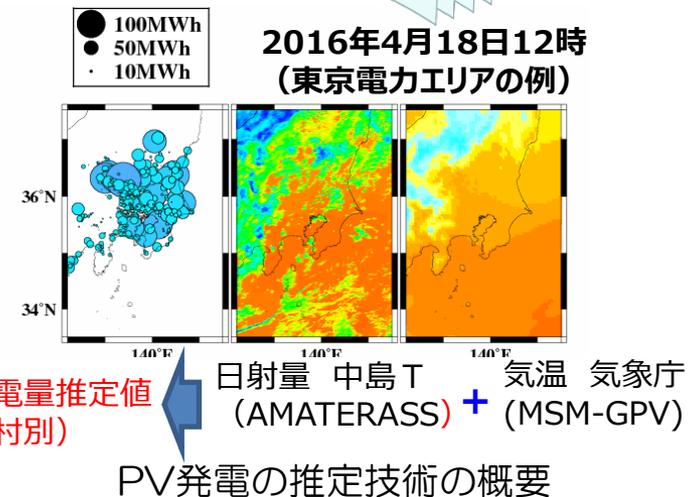
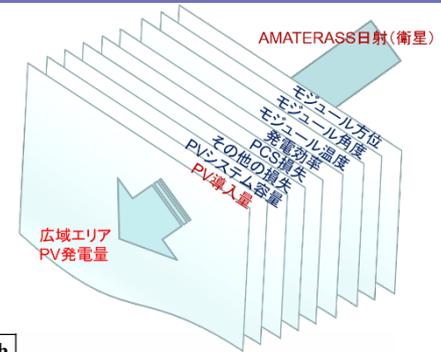
⇒ 中島チームが開発した気象衛星ひまわり8号から推定された日射量データとPV導入量を加味して、広域エリアでのPV発電電力量の推定技術の開発

➤ 予測大外れ予見指標開発

⇒ 複数の海外予測機関の全球アンサンブル予測の併用による有意な予測の大外れの検出率を確認

今後の展開

- 数値予報モデルの予測の誤差分析と予測技術の精緻化
- 予測の大外れ予見手法について、電力需要やPV導入量を加味した評価
- 他の最強チームとも連携したアンサンブル手法等を利用した区間予測



3年間の大外れ予見指標の的中・誤検出率上位10%(a), 5%(b), 1%(c)の大外れ事例

太田G インバータの協調制御

研究成果

論文： 3/8編

国際学会発表： 4/7編

- 複数のインバータが有効電力、無効電力を協調制御して、逆潮流電力による連系点での電圧上昇を抑制する方法を開発

⇒ 価格提示により個々のインバータが必要な無効電力量を計算

⇒ 価格更新によって全体最適を実現

- 配電系統とメガソーラー系の双方に適用可能な方法を提案

⇒ シミュレーションによる検証

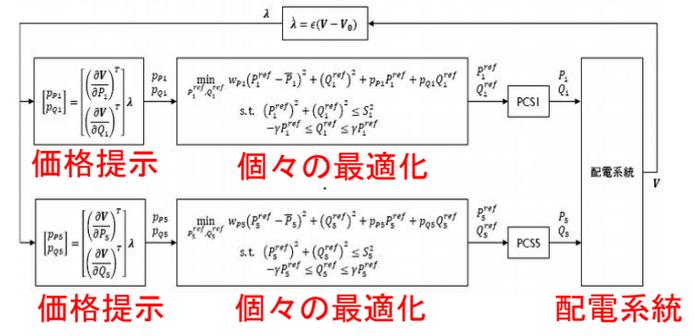
⇒ 模擬電源系による実験検証

出力1kW (500kW機を模擬) x10台

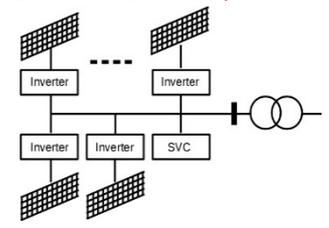
今後の展開

- 蓄電池の充放電方策を組み合わせた有効電力、無効電力の制御方法の開発

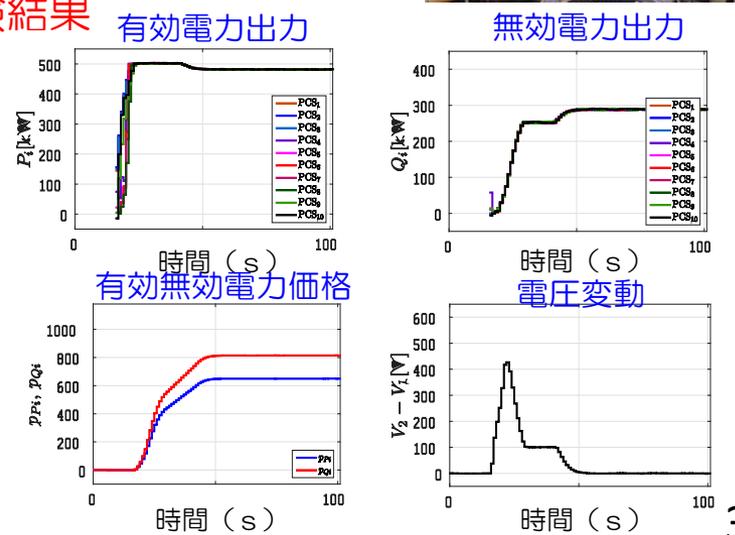
協調制御系の構成 ← ラグランジュ乗数更新



メガソーラー系 スケールダウンモデル



実験結果



児島G 予測型LFC/EDC修正法の開発

研究成果

論文 2/4編 査読付き国際会議 3/10編他

予測型系統制御法の確立とその応用

1. 予測型LFC/EDC修正法 (需給U)

(a) 情報の確度を考慮した予測型LFC

- 日射量・需要の変動特性を考慮した予測型LFCを開発, PV導入系統に適用.

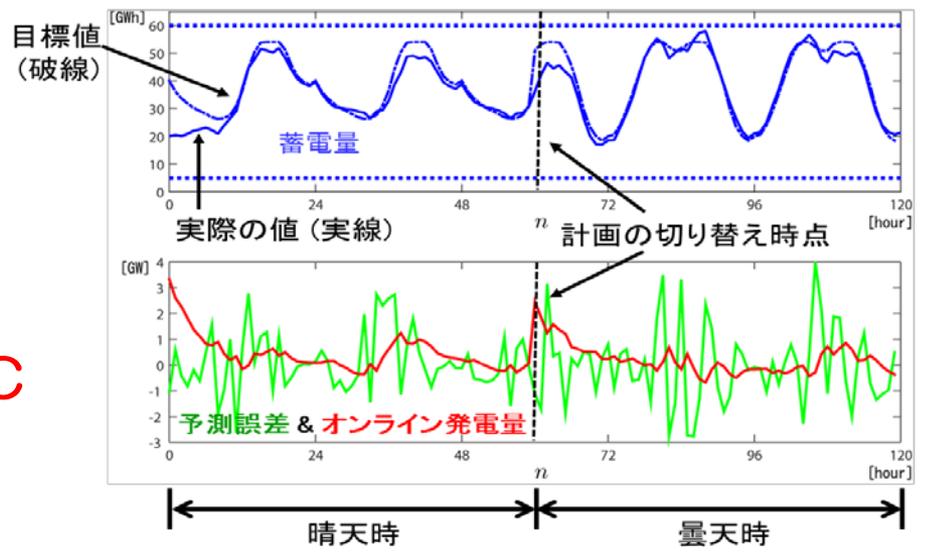
(b) シナリオ変更を考慮したEDC

- ロバストモデル予測制御により, 計画外時のシナリオ (日射量の急変) と持続変動 (需給不確かさ) に対処するEDC計画法を開発.

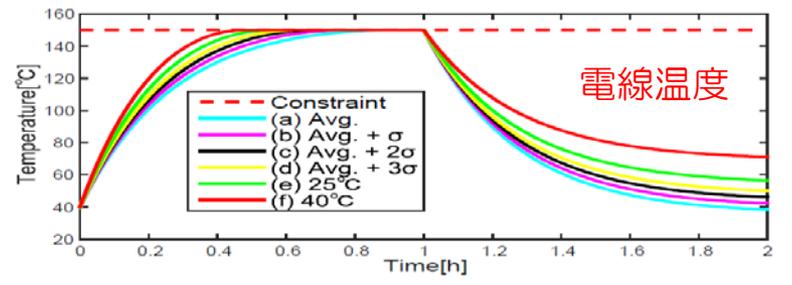
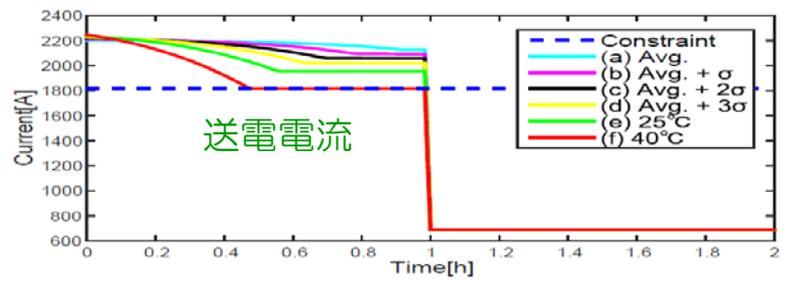
2. 電線温度制約を考慮したEDC (送配電U)

外気温予測を用いたEDC・EDC回復則

- 外気温予測によるEDCとEDC回復則の性能改善の効果を検討.



1. シナリオ変更を考慮したEDC (課題 b)



杉原G 送電線過負荷時の電線温度評価

研究成果

論文：3 / 3編 査読付き国際会議：2 / 5編
(印刷中含む)

➤ 送電線過負荷に対する短時間許容・常時許容電流値の評価

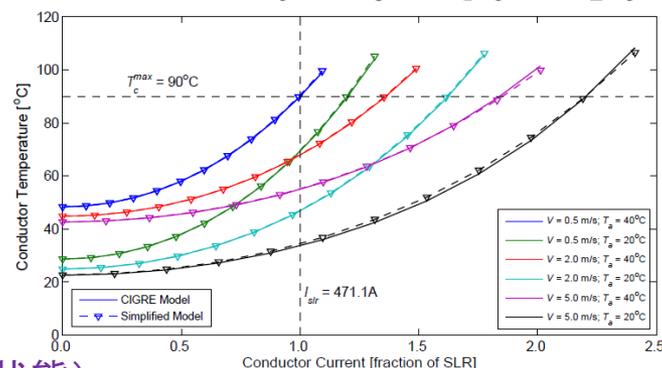
1. 電線温度を評価するための簡易CIGREモデルの開発と妥当性検証
2. 気象変化を考慮した送電線電流変化モデルに基づく短時間容量評価
3. PV発電の短時間先予測誤差を考慮した動的送電容量の評価

今後の展開

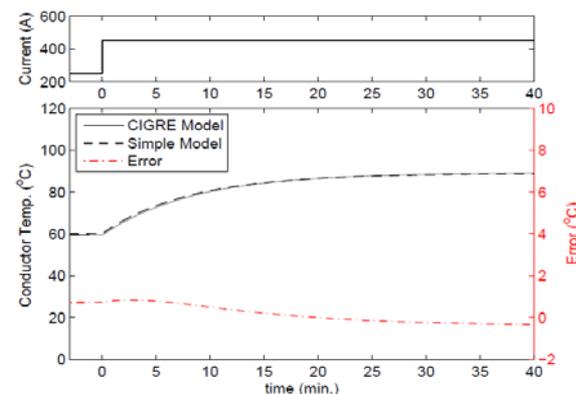
簡易CIGREモデル・送電線電流変化モデルに基づいて、

- 基幹系統を対象とした電線温度制約下における最適潮流計算法の開発
- 地域供給系統を対象とした過負荷解消制御（負荷切り替え等）の検討

簡易CIGREモデル: $T_c = \beta_0 + \beta_1 I_c^2 + \beta_2 I_c^4$

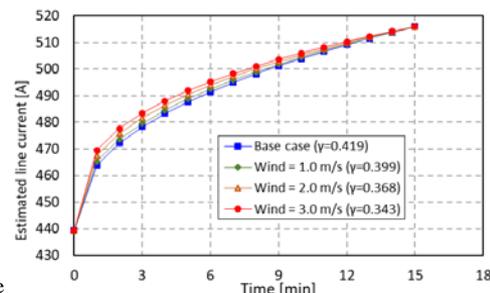
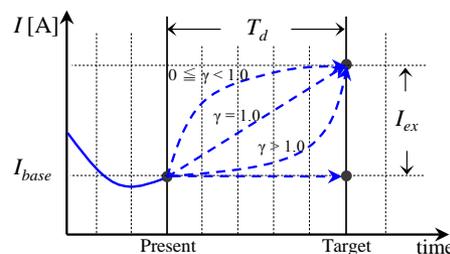


(定常状態)



(過渡状態)

1. 簡易CIGREモデル開発と妥当性検証



2. PV予測誤差に伴う電流変化モデルと気象条件変化

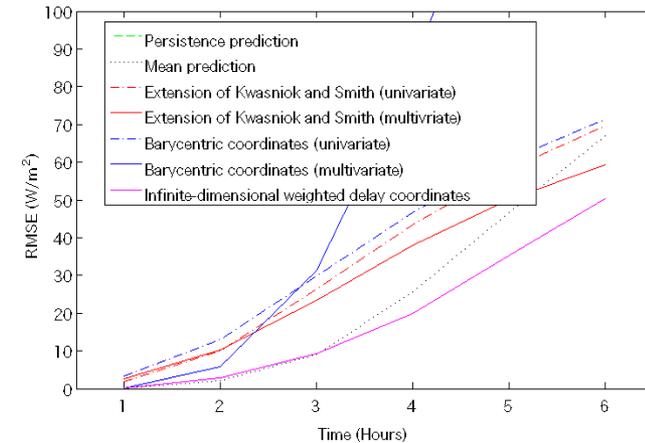
鈴木G PV予測改善と複数地域グリッド

研究成果

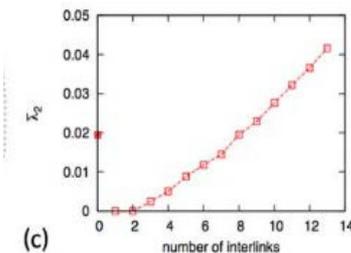
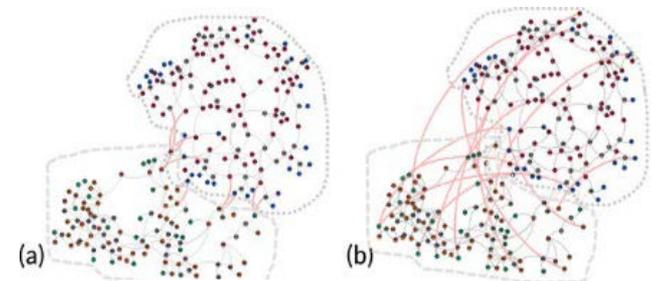
国際誌論文 2/9編ほか [Nature Energy 1編
Scientific Reports 2編]

無限次元の埋め込みによる
PV予測改善

- ▶ 無限次元の埋め込みに基づくPV時系列予測
 - ⇒ 既存の非線形時系列予測で用いられてきた埋め込み座標を無限次元に拡張
 - ⇒ PV予測に適用することにより精度改善
- ▶ 複数地域を結合させた電力グリッドの安定性
 - ⇒ 複数地域グリッドモデルの安定性解析
 - ⇒ 安定性の観点から最適な地域間結合
- ▶ 周波数変動の実データ解析とモデル構築
 - ⇒ 変動の非ガウス・非対称性
 - ⇒ 電力取引・再エネ・グリッド規模の影響



最適な地域間結合



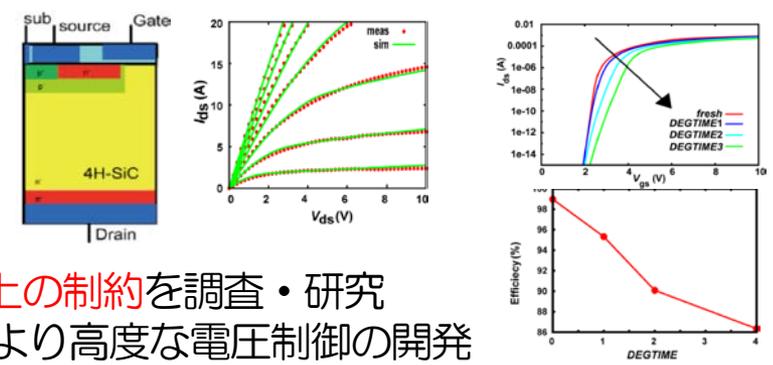
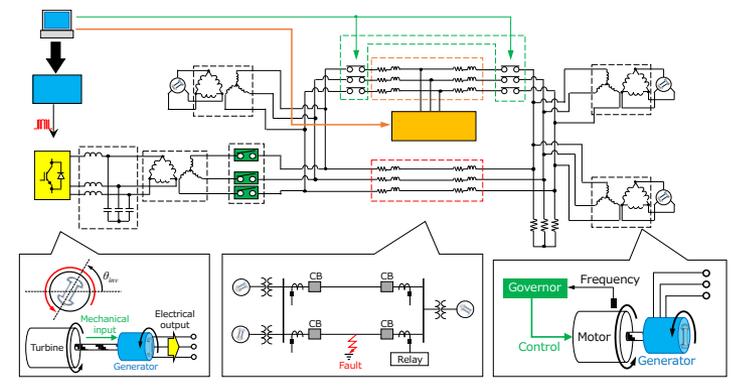
今後の展開

- ▶ 他のPV予測手法との連携・融合
- ▶ 時空間PVデータに対する予測手法
- ▶ 階層的グリッドへの展開
- ▶ 慣性定数・同期化力低下時の安定性

造賀G 擬似同期化カインバータ・配電系電圧制御

研究成果 論文：2/4編，査読付き国際会議：1/8編

- 擬似同期化カインバータの開発
 - ⇒ 単相インバータによる**単相Microgrid構築**
 - ⇒ 過電流保護機能の付加→設計した（所望の）特性を実現する**コントローラの開発**
 - ⇒ 複数同期機，送電線，保護リレーを模擬した**実証実験**を経て制御系を開発
- パワエレ機器の動作制約評価
 - ⇒ 系統事故時デバイス特性への**影響をモデル化**
 - ⇒ デバイス劣化による**変換効率の低下を予測**
- 配電系統の効率的な電圧制御
 - ⇒ OLTC/SVRを対象に**効率的な制御方法を改良**
 - ⇒ **実装時の具体的仕組み**を開発，効果を確認
 - ⇒ **系統構成変更へ対応する実装方法**を開発
- 【国際連携の推進】
 - ⇒ 米国WSU, PNNLとの**国際連携を強化**
 - ⇒ 連携を含む**具体的な打合せ**を実施



今後の展開

- 同期化カインバータによる**系統安定化+デバイス上の制約**を調査・研究
- PCS制御+同期化カインバータ制御を融合した，より高度な電圧制御の開発

津村 G 階層化分散制御系設計の構築： 中間層（アグリゲータ）設計に向けて

研究成果 論文：0/1編 査読付き国際会議：4/11編

➤ 階層分散型制御系設計アーキテクチャの提案

◆ 縦の中間層

⇒ 共有モデル集合を用いたPV基幹電源化のための局所制御器および大域的制御器の階層的制御器設計手法の提案

⇒ グローバル・ローカルな制御目的の間のトレードオフを解明

◆ 横の中間層

⇒ PV基幹電源化のための効用・コスト最適化と物理層との混合制御最適化アルゴリズムの提案

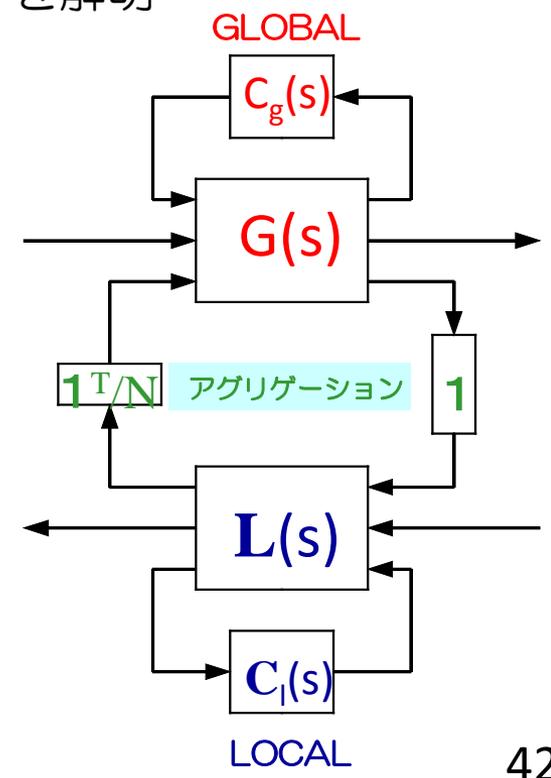
⇒ アグリゲーションにおける望ましいクラスタの基本的性質の導出

➤ 消散性に基づく階層化表現による解析

⇒ 安定条件の導出と送配電ユニットとの連携

今後の展開

- 縦・横の両者の中間層設計の体系化
- 階層分散型制御系における大域/局所制御性能トレードオフに基づく系統的設計法の確立
- 具体的な電力ネットワークモデルへの適用



益田G 需給運用の将来課題の評価

研究成果 論文0(3)編 査読付き国際会議：3(10)編

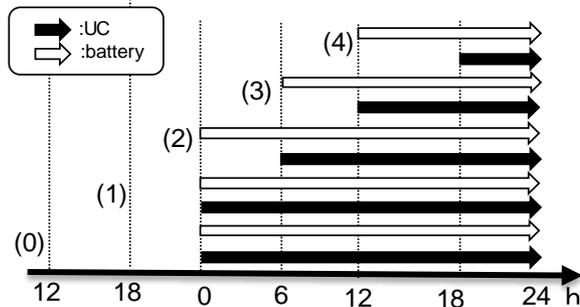
➤ ネットワーク制約を考慮したEDCの検討・評価

- 発電機出力とPV出力を最適潮流計算で決定
- 送電損失量と抑制量はトレードオフ

➤ 当日予測を用いたUC・バッテリー計画の修正

- UCの修正により停電を削減、バッテリー計画の修正により余剰を削減

ケース1: 計画修正なし
ケース2: 計画修正あり
ケース3: 予測誤差なし
(理想ケース)



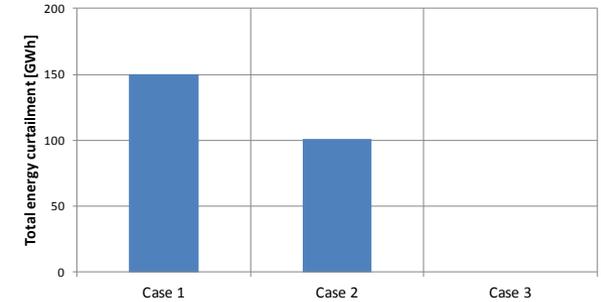
UC・バッテリー計画の修正

• 停電はケース1>ケース2



供給支障電力量

• 余剰はケース1>ケース2



PV出力抑制量

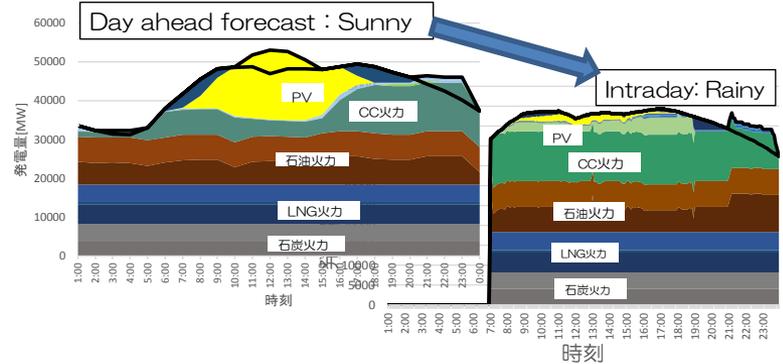
➤ 予測型LFCの周波数解析モデルを用いた評価

- 連系システムの考慮
- 電気学会標準モデルの拡張

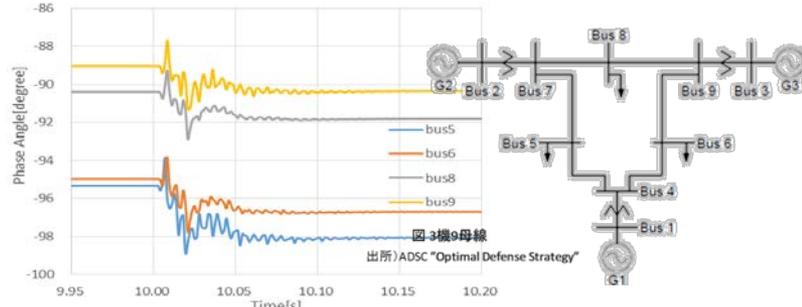
今後の展開 連系システムでのUC→EDC→LFCの解析モデルの完成

研究成果 査読付き国際会議：2/2編

- ▶ 前日・当日市場の連動シミュレーション
 - ⇒ 発電所運用の前日計画と当日運用変更を考慮可能な市場モデルの提供
- ▶ 新型フェーザを用いたPSS
 - ⇒ 新型フェーザを入力信号とした電力系統安定化装置の基礎理論の提案
- ▶ PMUを活用した広域ダンピング制御
 - ⇒ 同期発電機と違い回転軸のないPVが連系された系統への適用を提案
- ▶ 配電系統潮流計算高速化手法
 - ⇒ 計算速度が最大で約100倍となる配電系統潮流計算手法を提案



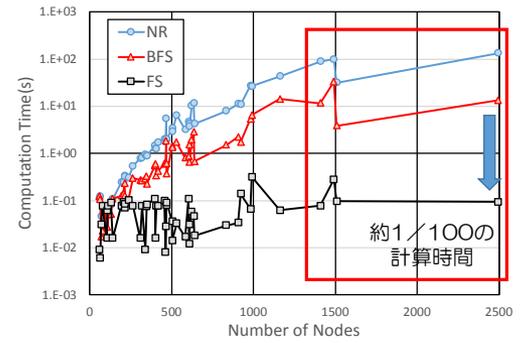
前日天気予報が外れた場合に前日の発電所運用計画を当日に変更した時の卸市場価格の計算も可能



新型フェーザを用いた各母線の位相角動揺

今後の展開（重点項目）

- ▶ 市場シミュレーションモデルはHAPRS全体での検討基盤として活用
- ▶ PV大量導入時の配電系統運用に対する日射量予測への活用評価



配電系統ノード数と計算時間の関係