

文部科学省拠点事業  
「現象数理学研究拠点」研究集会



「スマートハウスの高品質電力供給手法と配電システムの配電電圧制御手法」

明治大学中野キャンパス

2014年10月24日(金)

琉球大学

千住智信

- ①防災対応型無瞬断スマートハウス  
電力供給の継続(電圧補償)  
配電電圧不平衡補償
- ②蓄電池設備および分散型電源を  
用いた配電系統の最適運用制御  
配電系統の配電電圧制御  
連系点潮流制御

スマートハウスの利用可能性を考える

# 防災対応型無瞬断 スマートハウス

# 発表の流れ

1. まえがき
2. FRT機能を適用した無瞬断スマートハウス
3. 無瞬断スマートハウスを用いた三相配電電圧不平衡補償



# 1. まえがき

## 住宅の重要課題

- ✓ 地球温暖化防止のための二酸化炭素排出量削減
- ✓ 家庭における省エネルギー化(電気料金削減)
- ✓ 災害時対応



太陽光発電 (PV)  
システム

定置型蓄電池

HEMS  
(Home Energy Management System)  
ITを用いて不要なエネルギー消費を  
削減し、省エネルギーを達成する  
システム



# スマートハウス





## 2. FRT機能を適用した 無瞬断スマートハウス

## 2.1 まえがき

今後はPVシステムの普及拡大が進み、住宅への導入も大きく進展することが予想される

PVが多数連系された系統において擾乱発生 → PVの単独運転検出機能により系統から一斉解列

### 問題点

系統内電力需給バランスが崩れ、大規模停電発生

そこで... ↓

PVには系統故障時から一定時間、継続運転を行うことで不要な解列を防止する機能が要求される

**Fault Ride Through (FRT) 機能**

## 2.1 まえがき

スマートハウス内にはPCやスマート家電等の精密機器の導入が予想される

**FRT動作中**

住宅の受電電圧は配電電圧に依存するため  
送配電線故障時に電圧低下が発生する



**故障検出後**

一定時間のFRT動作並びに受電電圧一定制御  
を達成し、その後自立運転へ移行する

## 2.1 まえがき

### 提案

# 防災対応型無瞬断スマートハウスにおける FRT動作時の最適な有効無効電力注入

- 系統故障発生後、一定時間のFRT機能が動作し、線路故障が継続すれば自立運転と再連系運転を達成する。
- FRT機能動作中は宅内インバータから配電系統へ最適な有効無効電力を注入することで受電電圧を一定制御する。



PVシステム一斉解列による大規模停電発生回避  
系統故障時の電圧低下を回避

# 2.2 システム構成

- PVシステム
- 蓄電池
- 電気自動車 (EV)
- HEMS
- スマート家電

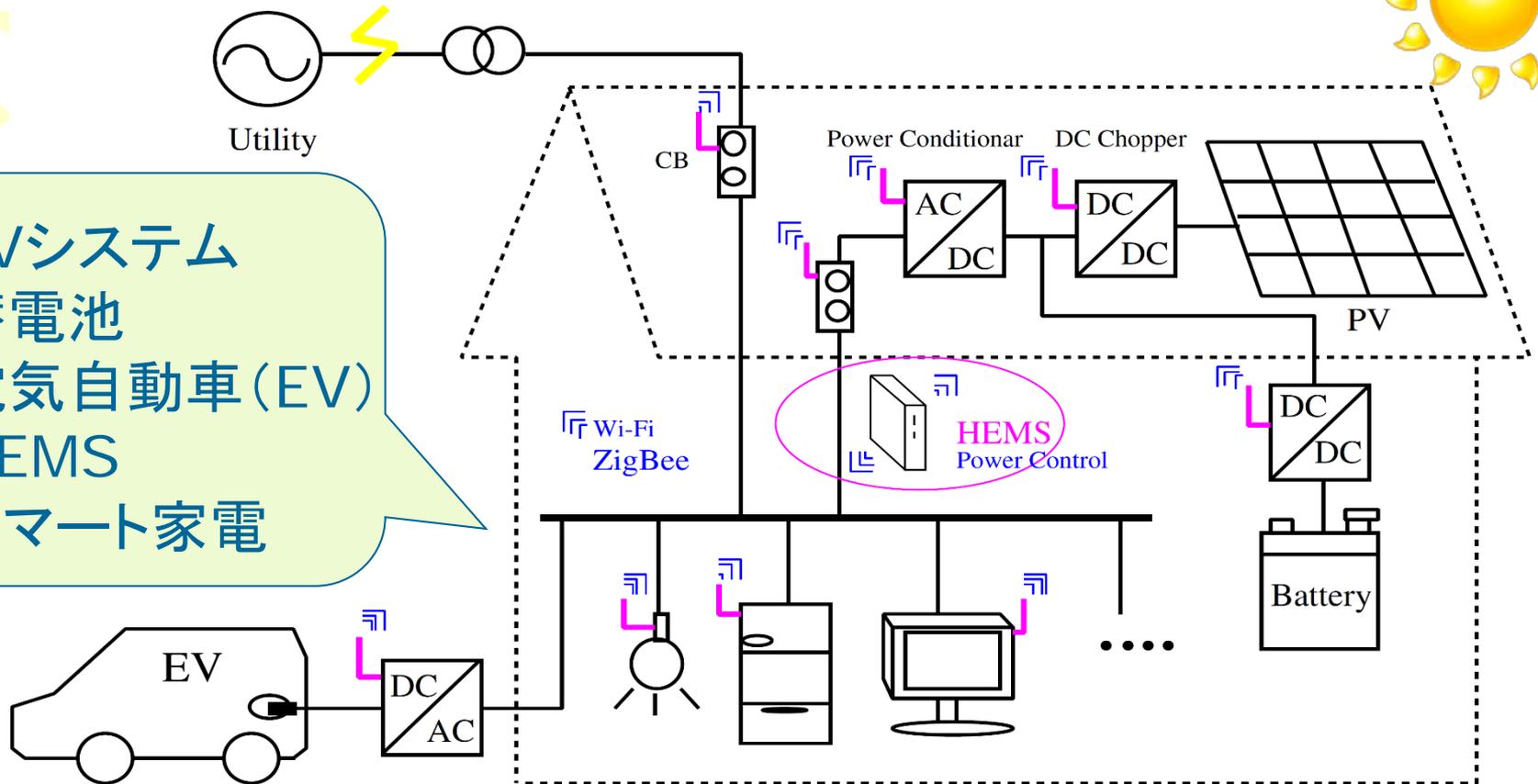
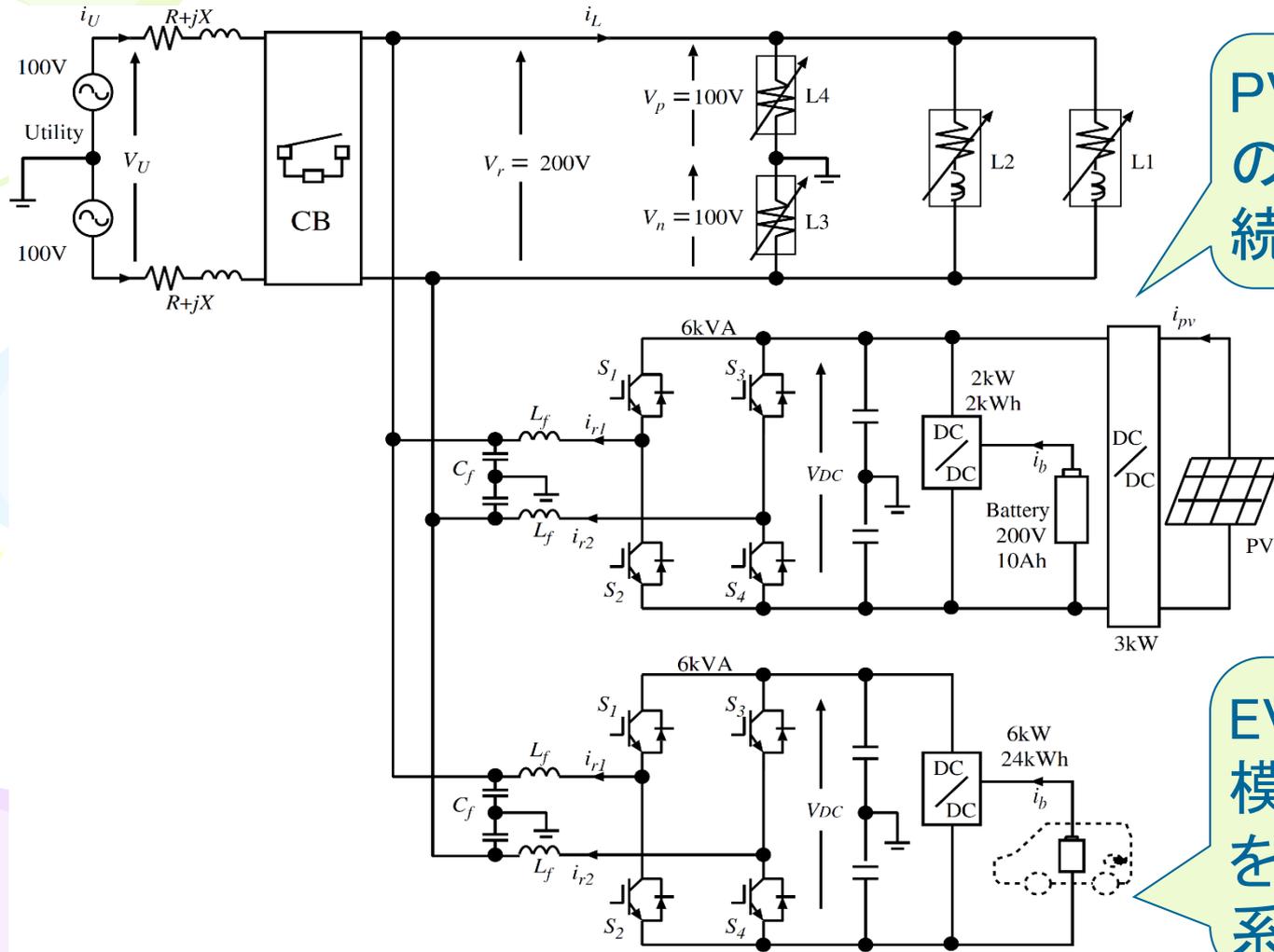


図1 スマートハウスモデル

# 2.2 システム構成



PVと蓄電池は共通の直流リンクに接続している

PV側蓄電池 : 2kWh  
EV用蓄電池 : 24kWh

EVは直流電源で模擬し、インバータを介して系統へ連系している

図2 シミュレーション回路

## 2.3 FRT機能

### 従来のPVシステム

配電系統故障時、単独運転状態が継続すると、保安上の障害となるため単独運転検出機能を有する

PVが多数連系された系統において擾乱が生じた際に、PVの単独運転検出機能によりPVが一斉解列



**系統内の需給バランスが崩れ、大規模停電発生**

### FRT (Fault Ride Through) 機能

擾乱発生後から一定時間運転を継続する不要解列防止機能

## 2.3 FRT機能

日本電気技術規格委員会による系統連系規定[2]において、「保護協調に係るFRT要件として配電電圧低下時に残電圧が20%以上の場合、1秒間は低出力で継続運転を行い、継続運転中に配電電圧が適正範囲に復帰した場合、PV出力を復帰させる」と規定

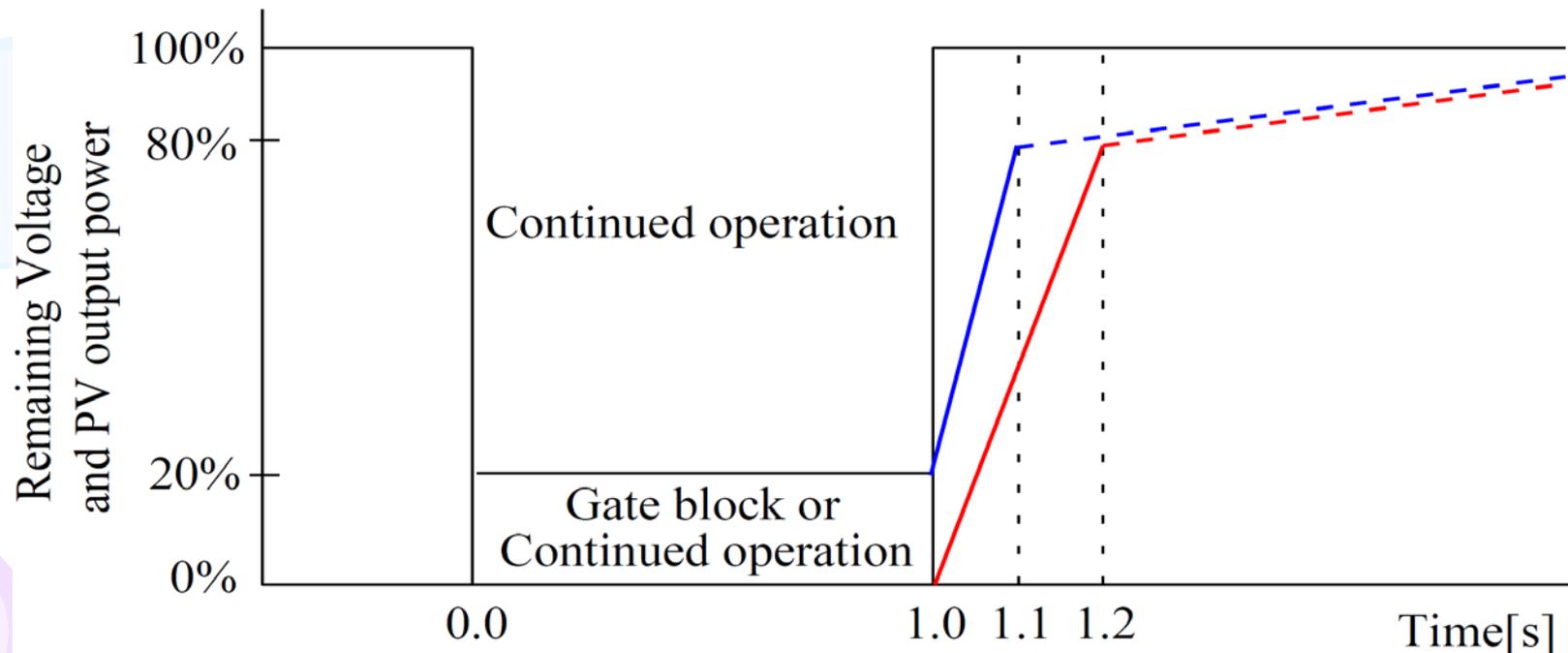


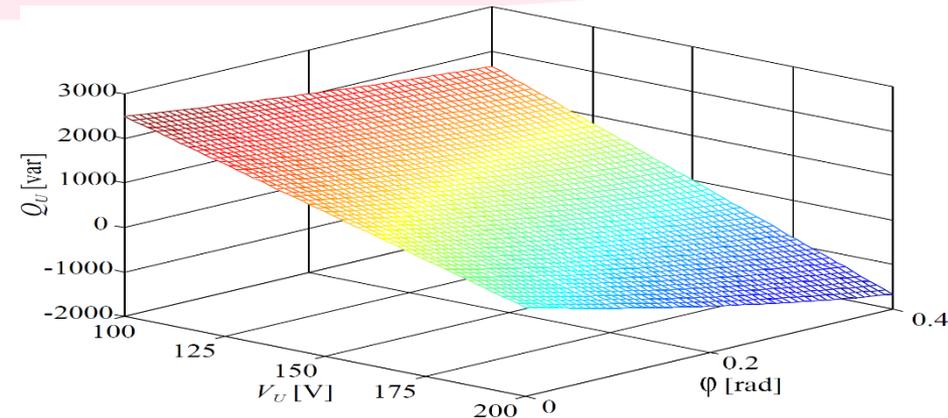
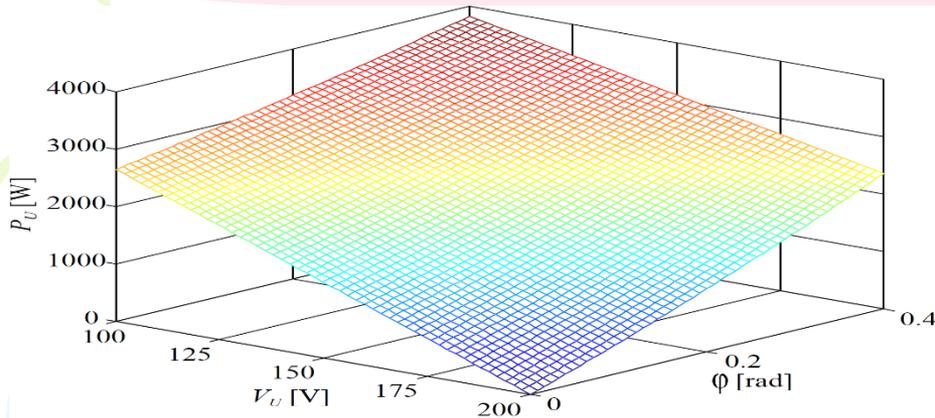
図3 FRT要件 [1]

[2]日本電気技術規格委員会:「系統連系規定[2013年追補版(その1)]」,

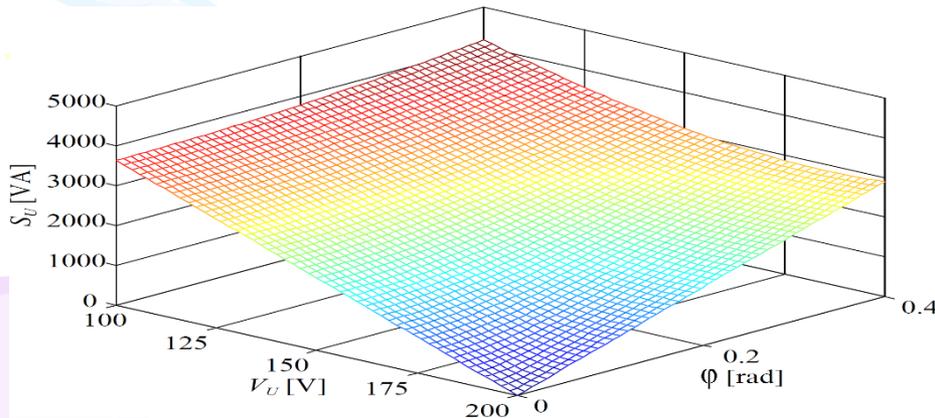
[http://www.jesc.gr.jp/jescassent/private/jesc\\_e0019\\_e06.html](http://www.jesc.gr.jp/jescassent/private/jesc_e0019_e06.html).

## 2.4 制御手法

### 4.2 FRT動作時の最適な有効無効電力注入量



(a)位相角対配電電圧対有効電力 (b)位相角対配電電圧対無効電力



(c)位相角対配電電圧対皮相電力

線路インピーダンス

$$R = 2\Omega \quad X = 1.88\Omega$$

受電端電圧

$$V_r = 200\text{V}$$

## 2.5 制御手法

### 4.2 FRT動作時の最適な有効無効電力注入量

FRT動作時に最小皮相電力を注入することで受電電圧を  $V_m = 200V$  に維持するためには、配電電圧  $V_U$  と受電端電圧  $V_m$  の位相角  $\varphi$  が  $\varphi = 0\text{rad}$  を満たす必要がある。この条件を満たす最適有効無効電力注入量  $P_U^*$ 、 $Q_U^*$  を次式により決定する。

$$P_U^* = \text{Re} \left[ V_m \times \left( \frac{V_m - V_U e^{-j0}}{R + jX} \right)^* \right] = \frac{R(V_m^2 - V_m V_U)}{R^2 + X^2} \quad (3)$$

$$Q_U^* = \text{Im} \left[ V_m \times \left( \frac{V_m - V_U e^{-j0}}{R + jX} \right)^* \right] = \frac{X(V_m^2 - V_m V_U)}{R^2 + X^2} \quad (4)$$

$R + jX$  : 線路インピーダンス

# 2.6 シミュレーション結果

条件:  $t=1.3\text{s}$ にて配電電圧低下  $200\text{V}\rightarrow 100\text{V}$ , FRT制御開始  
 $t=2.3\text{s}$ にて自立運転開始,  $t=2.8\text{s}$ にて故障除去, 再連系運転

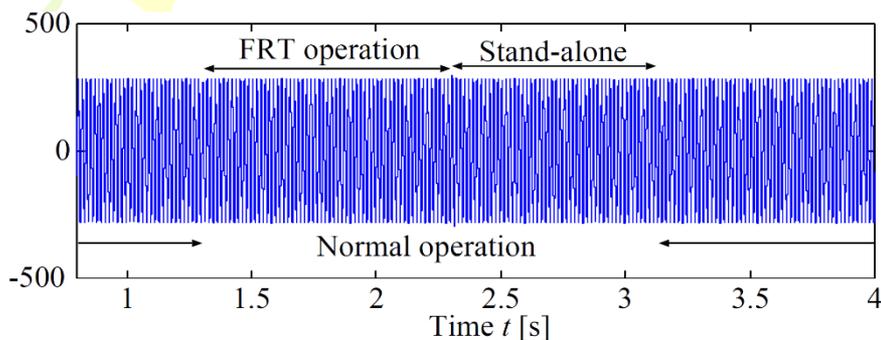


図5 受電端電圧  $V_r$

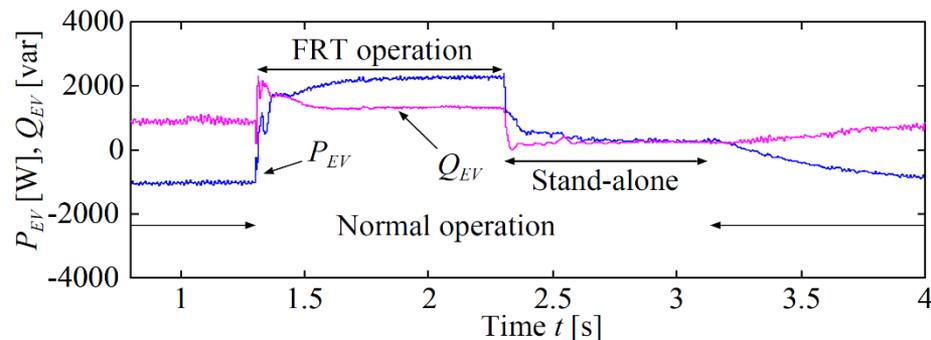


図6 EV側インバータの出力有効無効電力  $P_{EV}$ ,  $Q_{EV}$

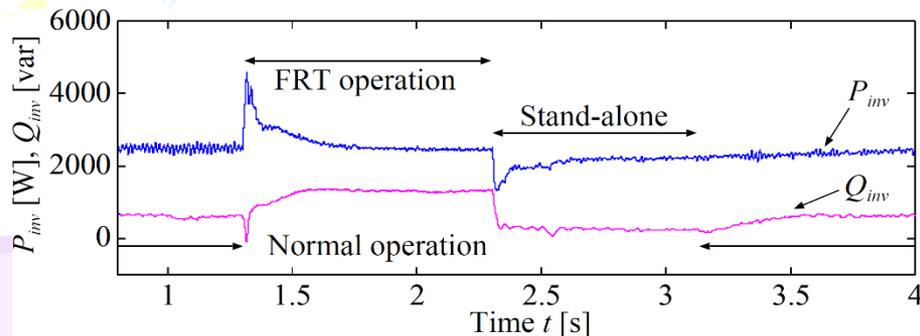


図7 PV側インバータの出力有効無効電力  $P_{inv}$ ,  $Q_{inv}$

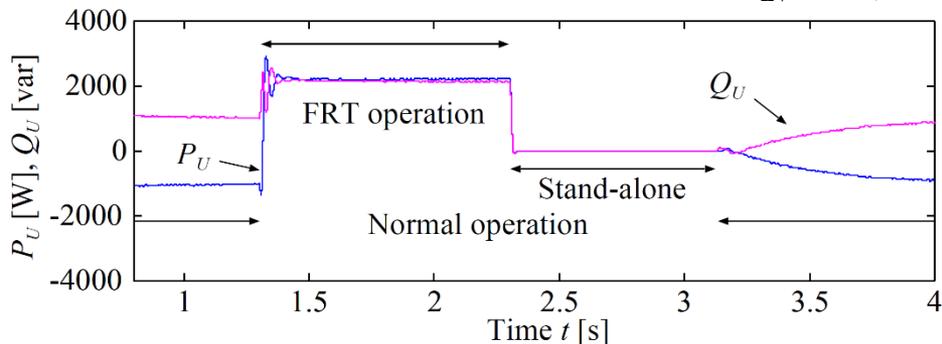


図8 配電系統へ注入される有効無効電力  $P_U$ ,  $Q_U$

## 2.6 むすび

### 防災対応型無瞬断スマートハウスにおける FRT制御時の最適な有効無効電力注入

- PVが多数連系された系統において故障が発生した際に

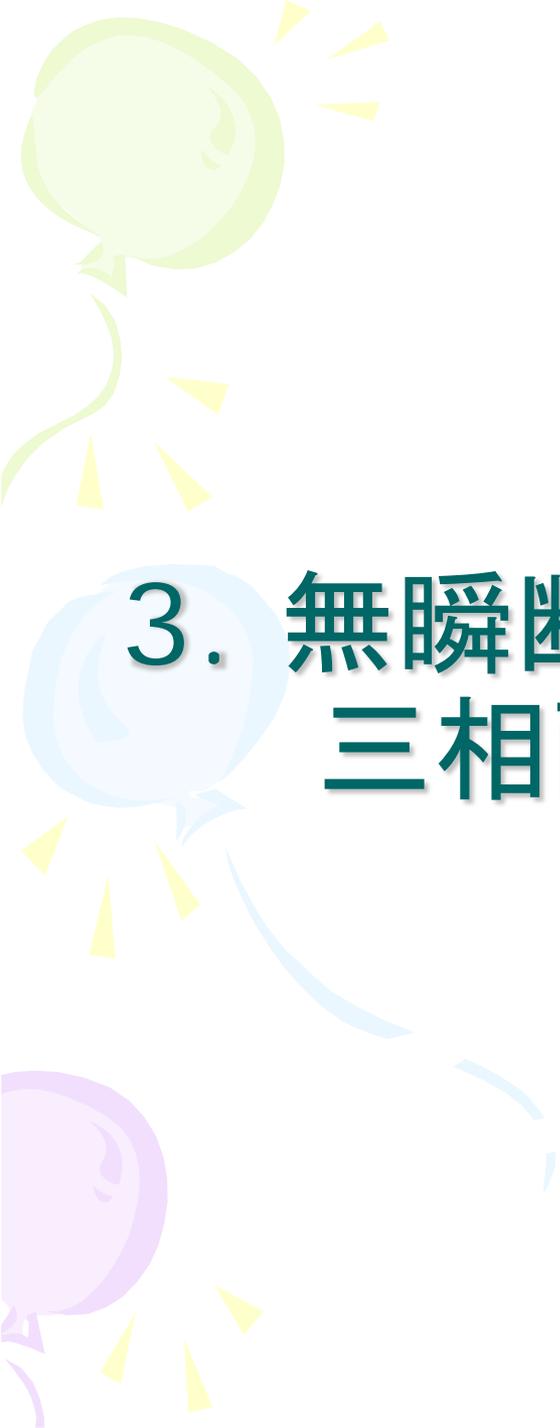
FRT機能を導入することで**PVの不要一斉解列が防止**  
系統需給バランス崩壊による**大規模停電の発生を回避**

FRT動作中, スマートハウスにおいて...

- PVシステムのインバータから配電系統へ最適な有効  
無効電力を注入

最小皮相電力で**受電電圧の一定制御が可能**  
宅内供給電圧低下を回避し、**安定電力供給を達成**





### 3. 無瞬断スマートハウスを用いた 三相配電電圧不平衡補償

# 3.1 まえがき

PVの発電量は天候に応じて変動し、発電電力の不確実性を有している。

各線間に多数連系させたPVシステムから三相配電系統へ不平衡な発電電力を流入させる

## 問題点



系統内電力需給バランスが崩れ、著しい電圧不平衡

そこで...

需要家側インバータの空き容量を有効利用した  
協調的な無効電力注入制御による

**配電電圧不平衡補償**

## 3.1 まえがき

### 提案

# 需要家側インバータを用いた 三相配電系統における電圧不平衡補償

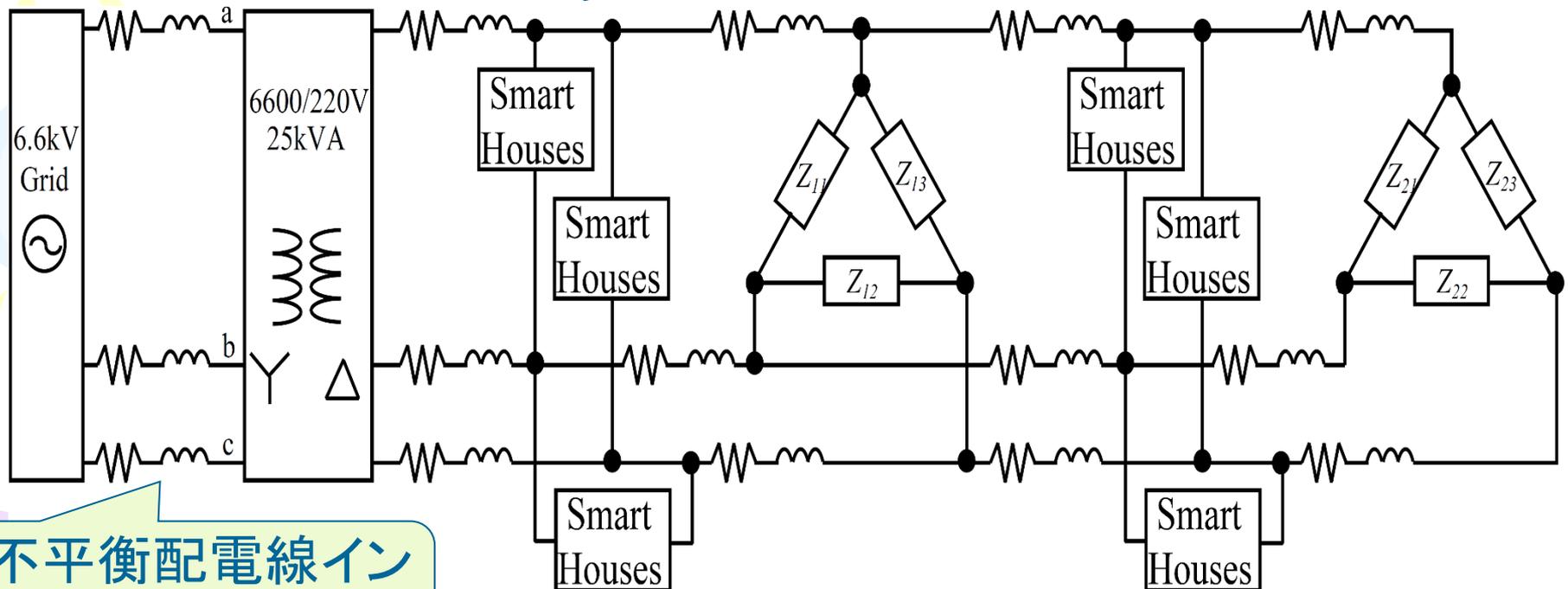
- 配電電圧適正值および需要家の受電電圧適正值に対して多目的最適化を適用
- 多目的最適化により決定された適切な無効電力を需要家側インバータから協調的に注入し、最適な配電電圧不平衡補償



PVシステムの多数連系に起因した配電電圧不平衡の改善  
需要家側インバータの設備利用率の向上

## 3.2 システム構成

各線間には5軒のスマートハウスが  
連系されている



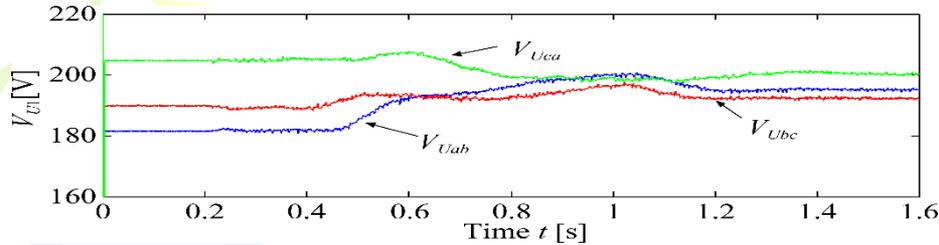
不平衡配電線イン  
ピーダンス

図9 三相配電システムモデル回路

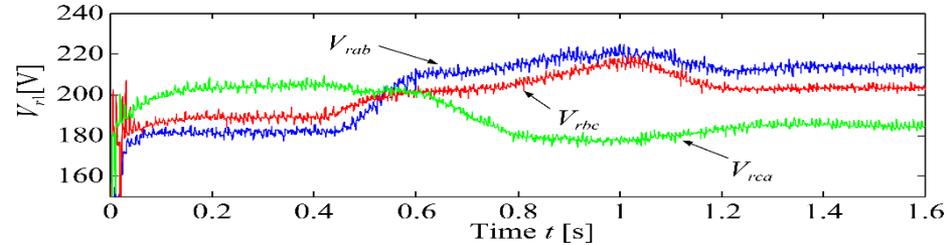
# 3.3 シミュレーション結果

シミュレーション条件

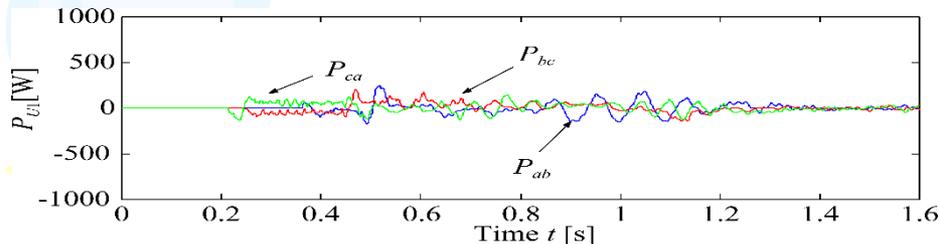
$t=0.0s$ : SH自立運転開始,  $t=0.4s$ : SH連系運転開始, 配電電圧不平衡補償開始(山登り法による探索開始),  $t=1.2s$ :最適配電電圧不平衡開始



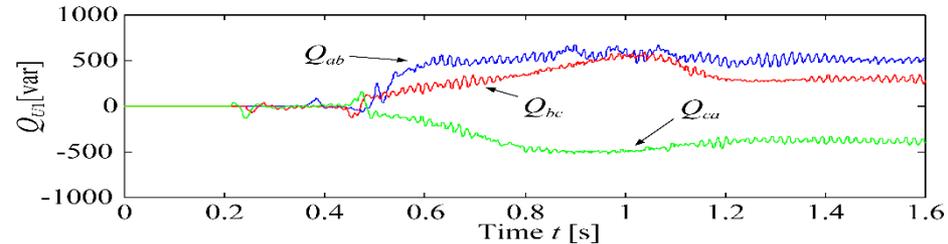
(a) 配電電圧  $V_{U1}$



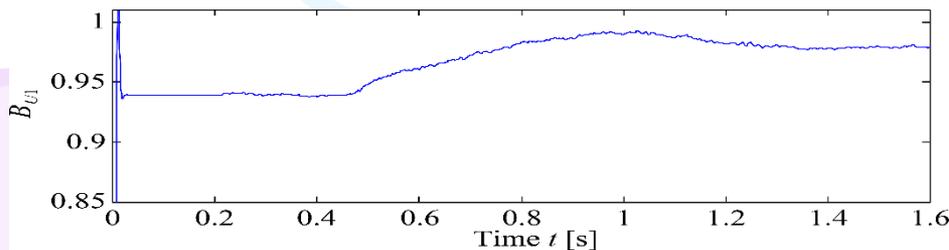
(b) 受電電圧  $V_{r1}$



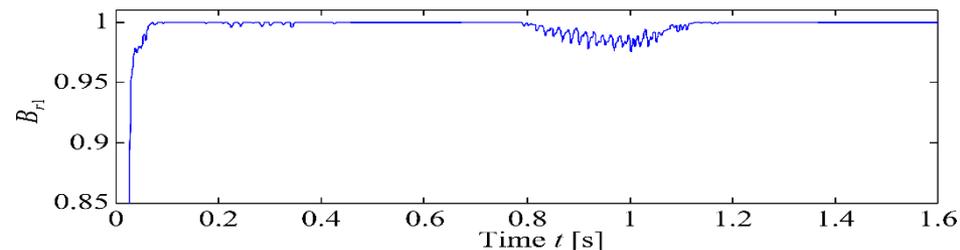
(c) 配電線へ注入される有効電力  $P_{U1}$



(d) 配電線へ注入される無効電力  $Q_{U1}$



(e) 配電電圧適正率  $B_{U1}$



(f) 受電電圧適正率  $B_{r1}$

図10 エリア1におけるシミュレーション結果

## 3.4 むすび

需要家側インバータを用いた  
三相配電系統における電圧不平衡補償

- 配電電圧適正率と需要家の受電電圧適正率との間に  
存在するトレードオフ



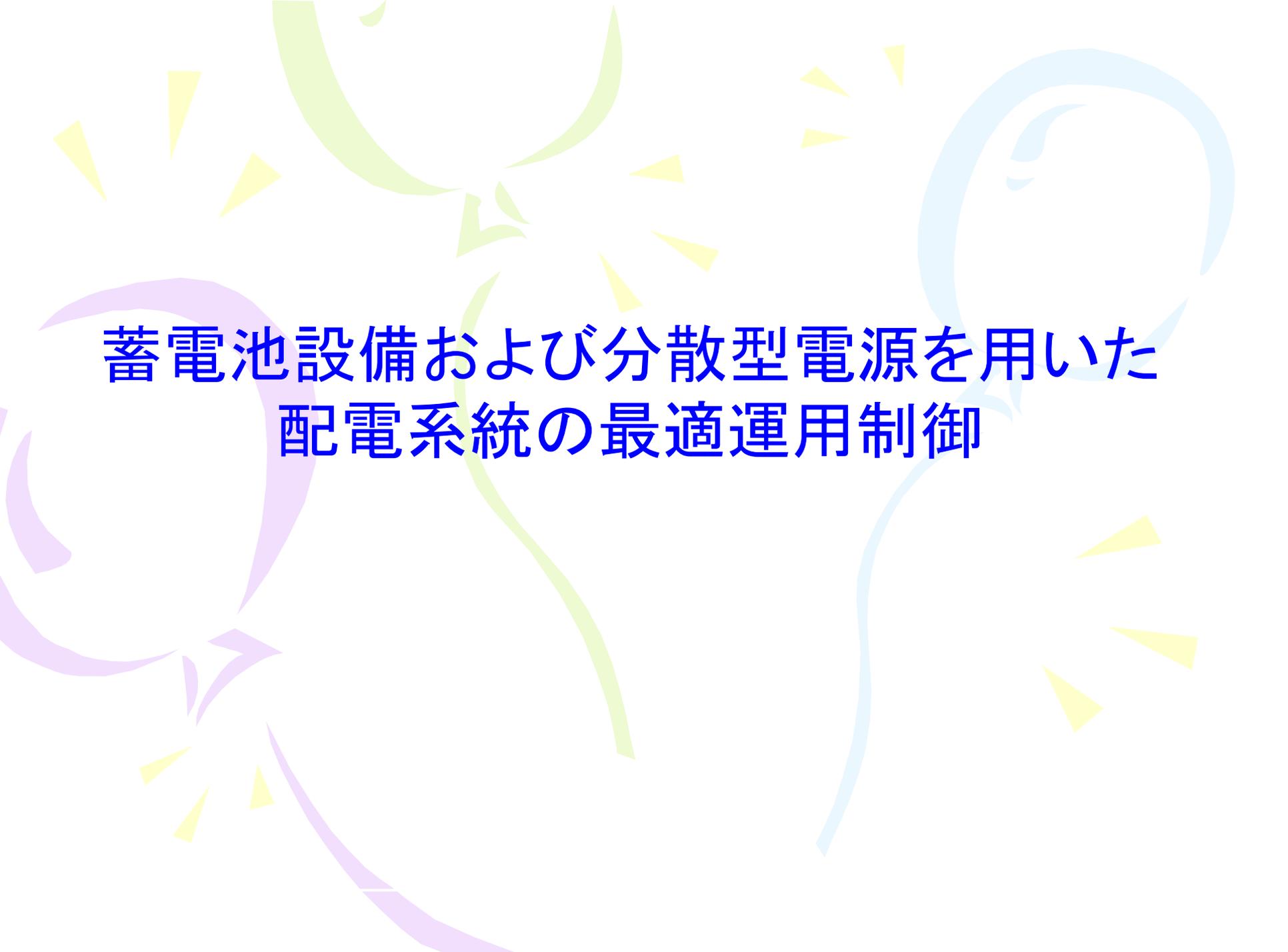
多目的最適化を適用



最適な配電電圧不平衡補償が可能

- 再生可能エネルギー源による分散型電源が多数連系された場合に生じる著しい配電電圧不平衡を改善
- 需要家側インバータの設備利用率向上

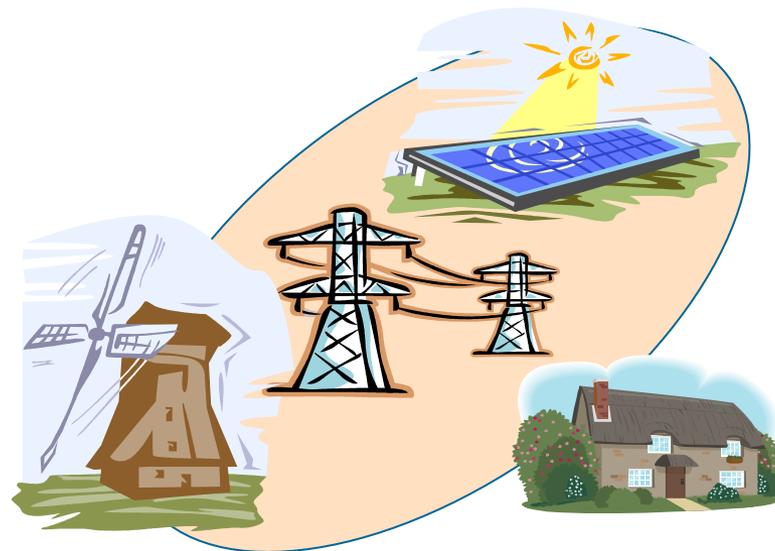




# 蓄電池設備および分散型電源を用いた 配電系統の最適運用制御

# § 内容

- 1 研究背景と目的
- 2 制御手法
- 3 シミュレーション結果
- 4 むすび



# 1. 研究背景と目的

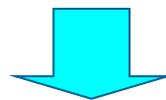
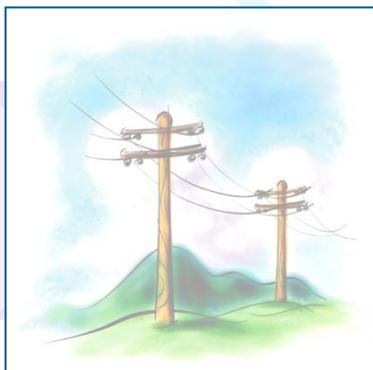


低炭素社会実現への取り組み

➡ 分散型電源の積極的な導入

## 問題点

- ・配電系統は分散型電源の連系を想定していない
- ・再生可能エネルギー利用は発電出力が変動

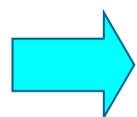


電圧分布の複雑化、変動  
系統電圧適正值からの逸脱

## < 電圧変動問題に対する従来の研究 >

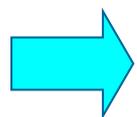


### ■ 無効電力調整機器の設置



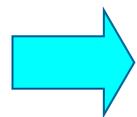
追加的なコスト、配置に関する問題

### ■ 変電所LRT (Load Ratio Transformer) やSVR (Step Voltage Regulator) の変圧比タップ切替



急激な変動への対処が困難

### ■ 分散型電源側における無効電力制御



急激な電圧変動への対処が可能  
追加コストが不要

## <無効電力制御に関する従来の研究>

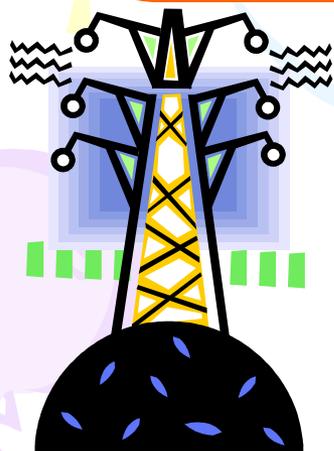


- 近隣の機器と通信
- 系統全体の情報を集約して集中制御
  - 最適な指令値決定に要する計算時間
  - 分散型電源間の無効電力出力配分に関する検討
- ファジー制御を導入した無効電力制御手法
  - 自端情報による、系統状態に応じた無効電力制御
  - 分散型電源間の無効電力出力分担に対する考慮
  - 上位系統との連系点における大幅な電力潮流変動が生じる

## <提案内容>

### 上位系統との連系点へ蓄電池設備を導入

- × 既存電圧調整装置  
(変電所LRT、SVR) → 最適性を考慮したタップ位置制御
- × 分散型電源連系  
インバータ → 連系インバータの容量内で  
無効電力出力制御
- × 系統連系点における  
蓄電池設備 → 系統連系点潮流の変動抑制を目的とした  
有効・無効電力出力制御



- ノード電圧の適正值維持
- 系統全体における配電損失の低減
- 系統連系点における電力潮流の平準化

## 2. 制御手法

### ■ 太陽発電設備無効電力制御システム

現行のガイドライン

分散型電源の運転力率に制限



配電電圧が適正範囲を逸脱しないように力率を制御

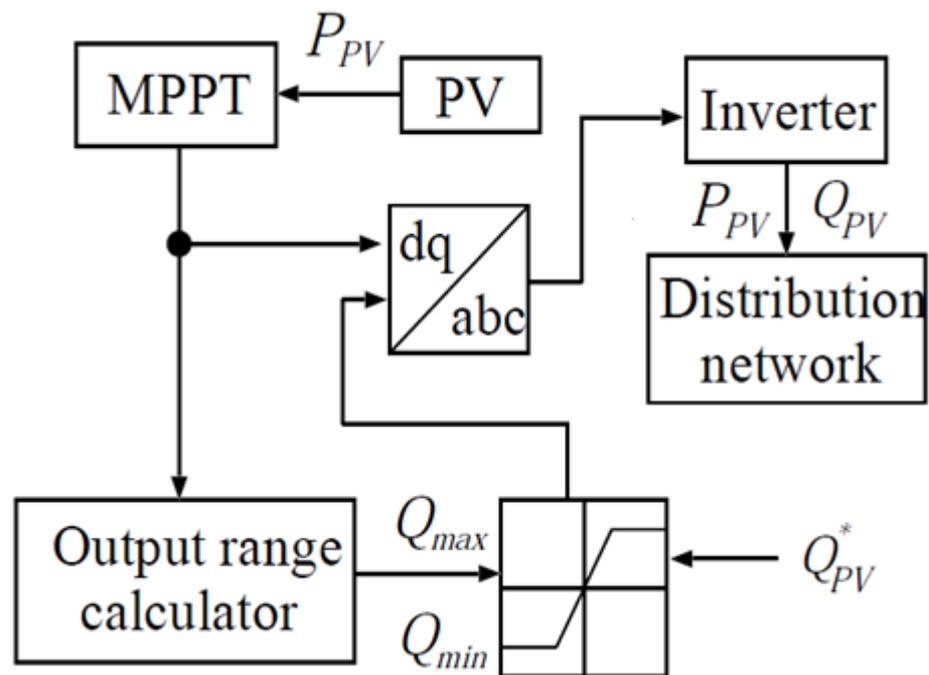


図1 無効電力制御システム

## 蓄電池設備制御システム

上位系統との連系点へ蓄電池設備を導入

最適化計算に基づく、

- ・ 系統連系点有効電力潮流指令値
- ・ 蓄電池設備連系点における  
電圧指令値
- ・ 蓄電池設備の有効電力指令値

に基づき、蓄電池設備の有効・無効電力出力制御を行う

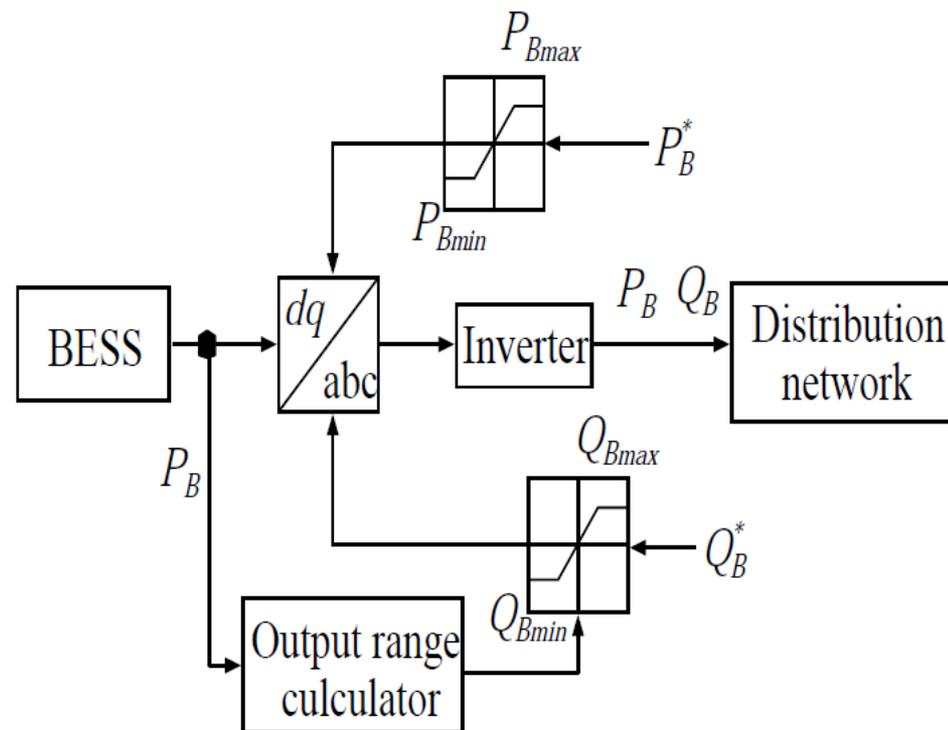


図2 蓄電池設備制御システム

# 3. シミュレーション結果

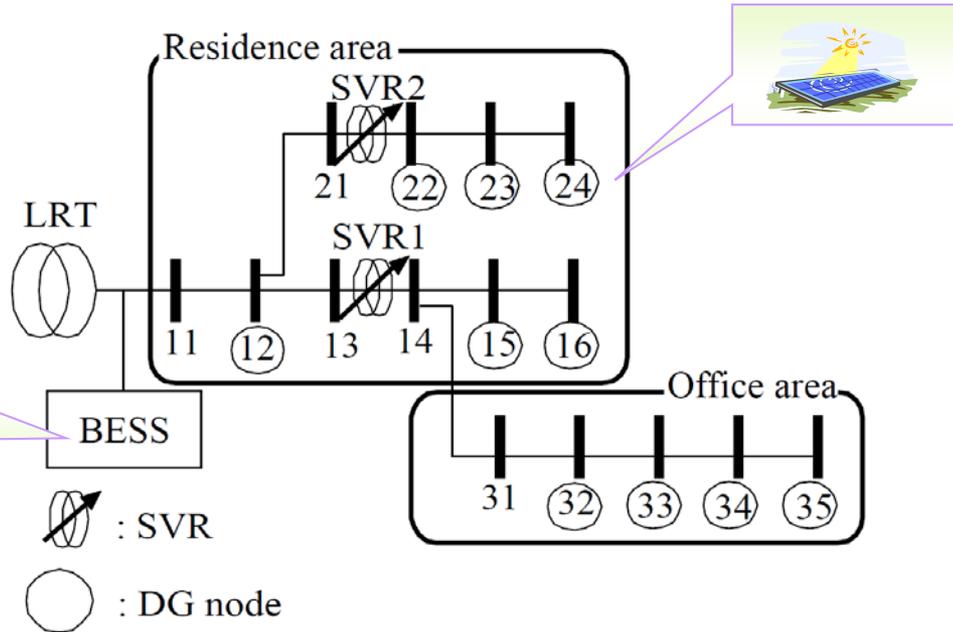


図5 配電システムモデル

表1 系統に関する諸定数

各線路のインピーダンス	$0.04 + j0.04\text{pu}$
負荷の力率	0.8
PV 定格出力	0.08pu (400kW)
PV 連系インバータ容量	0.08pu (400kW)
BESS 貯蔵容量	5.0pu (25MWh)
BESS 連系インバータ容量	0.40pu (2MW)

## 4.3 シミュレーション結果

### ■ シミュレーションパターン

**Case 1 : 蓄電池設備を導入せず、既存の電圧調整装置  
および分散型電源についても制御を行わない**

**Case 2 : 蓄電池設備を導入せず、既存の電圧調整装置  
および分散型電源の制御を協調的に行う**

**Case 3 : 蓄電池設備を導入し、さらに既存の電圧調整装置  
および分散型電源とともに協調制御**

## ■ 太陽光発電出力および日負荷曲線

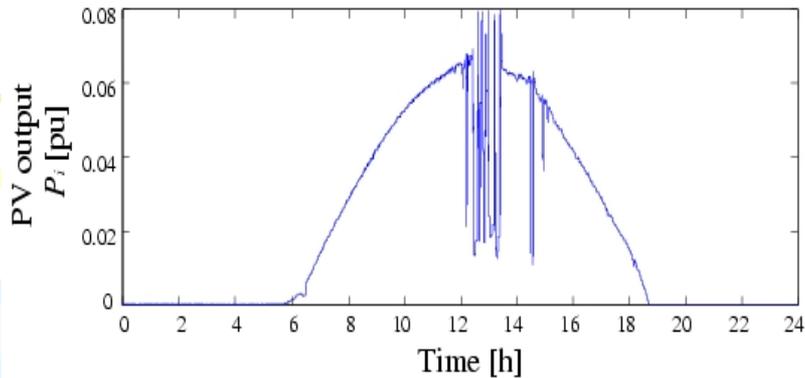
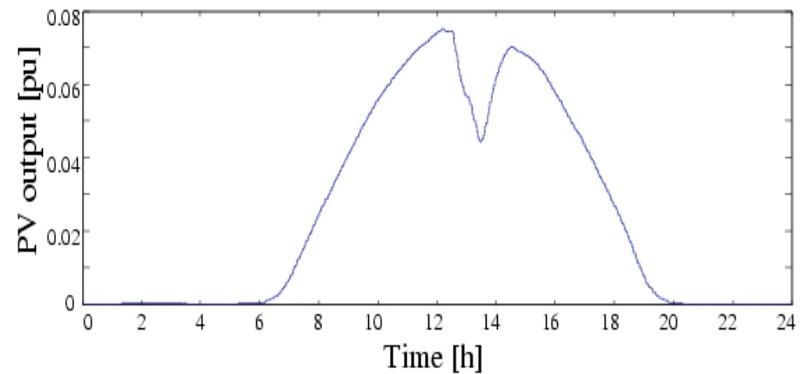


図4 太陽光発電出力



図A 太陽光発電出力予測値

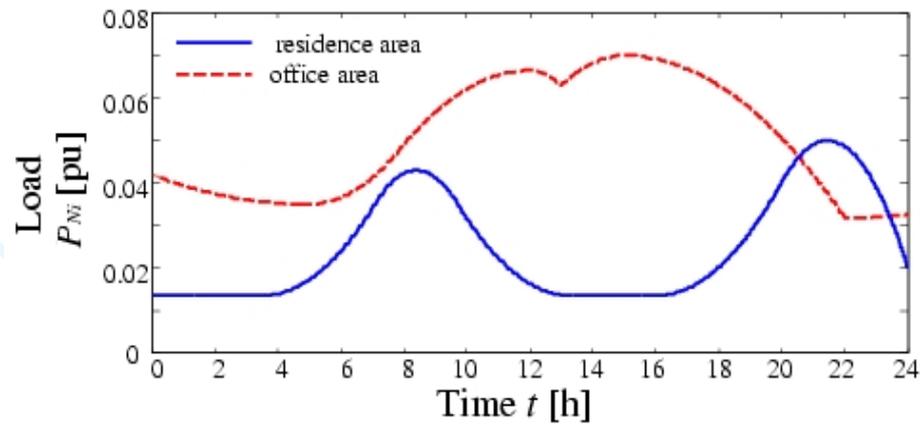
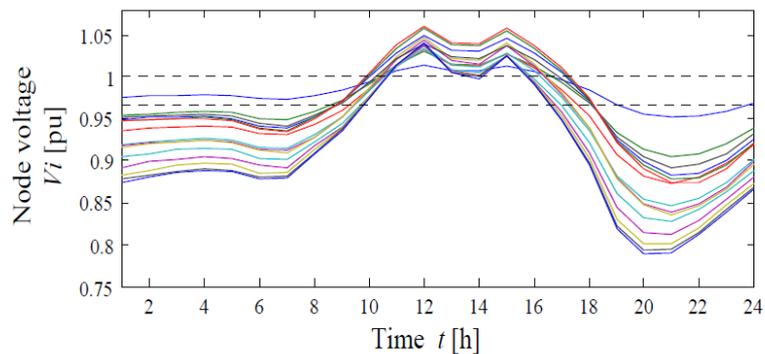
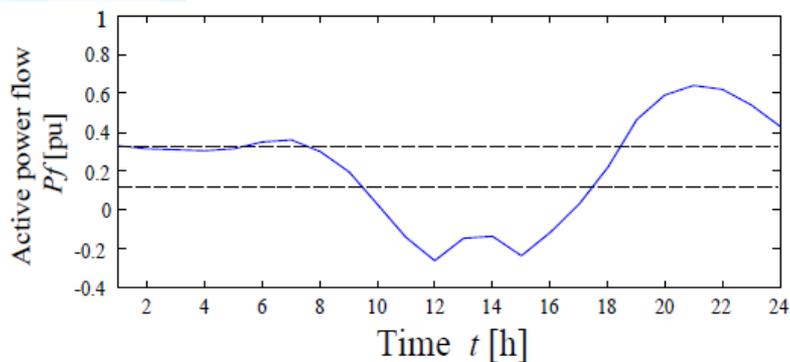


図5 日負荷曲線

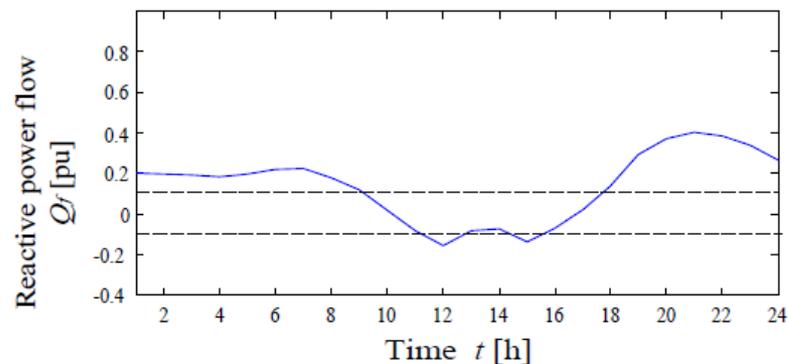
## Case1におけるシミュレーション結果



(a) 各ノード電圧



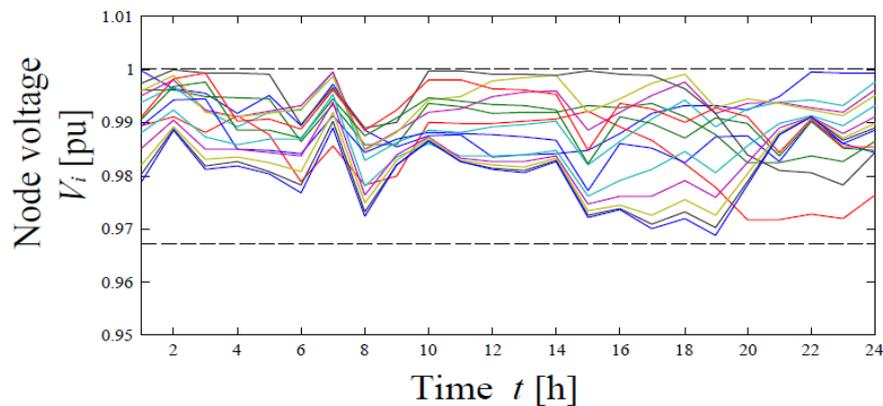
(b) 系統連系点有効電力潮流



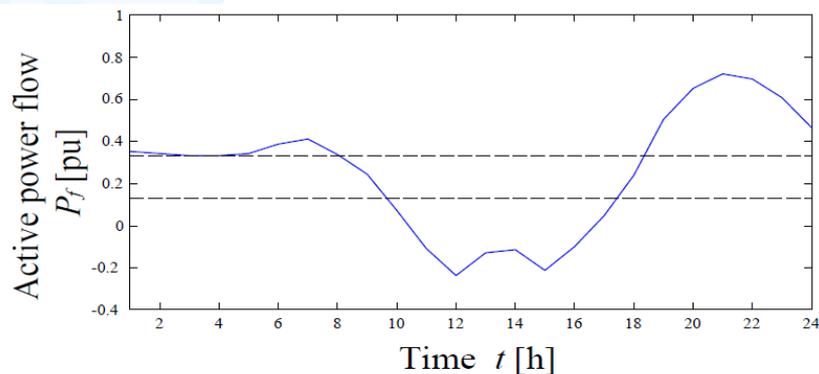
(c) 系統連系点無効電力潮流

図6 ケース1におけるシミュレーション結果  
(無制御時)

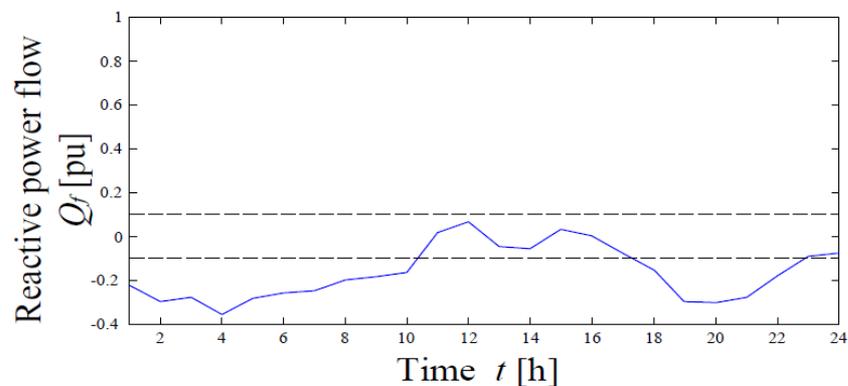
## Case2におけるシミュレーション結果



(a) 各ノード電圧



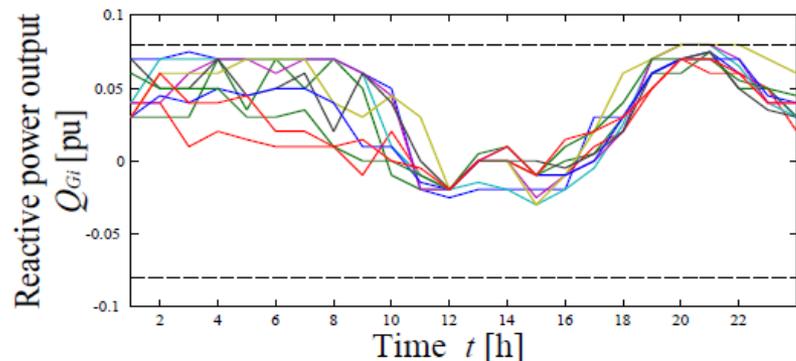
(b) 系統連系点有効電力潮流



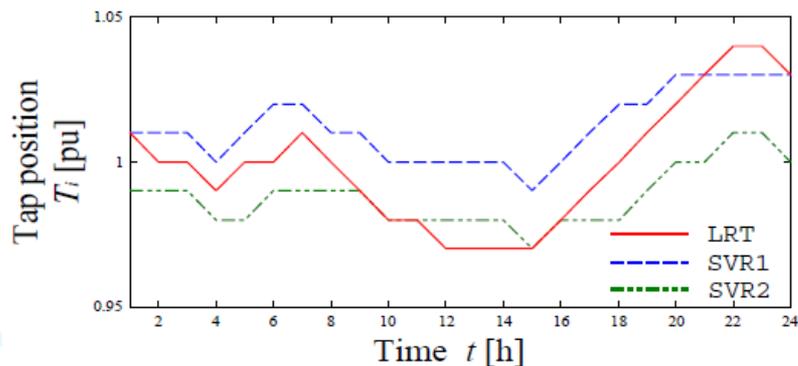
(c) 系統連系点無効電力潮流

図7 ケース2のシミュレーション結果  
(分散型電源及び既存の電圧制御装置)

## Case2におけるシミュレーション結果



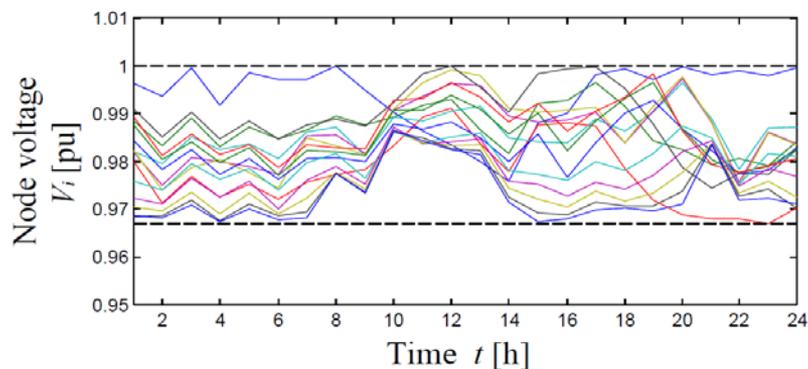
(d) 分散型電源連系インバータによる無効電力出力



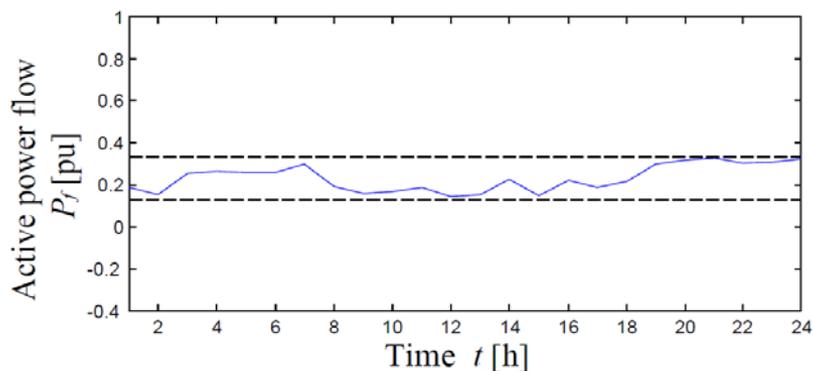
(e) 既存の電圧調整装置に関するタップ位置

図7 ケース2のシミュレーション結果  
(分散型電源及び既存の電圧制御装置)

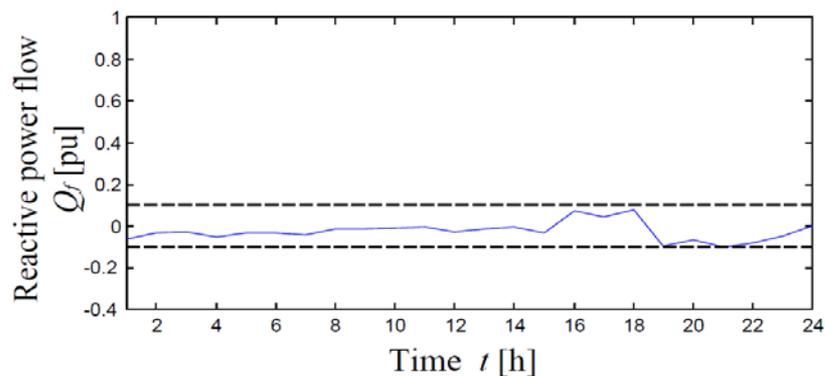
## Case3におけるシミュレーション結果



(a) 各ノード電圧



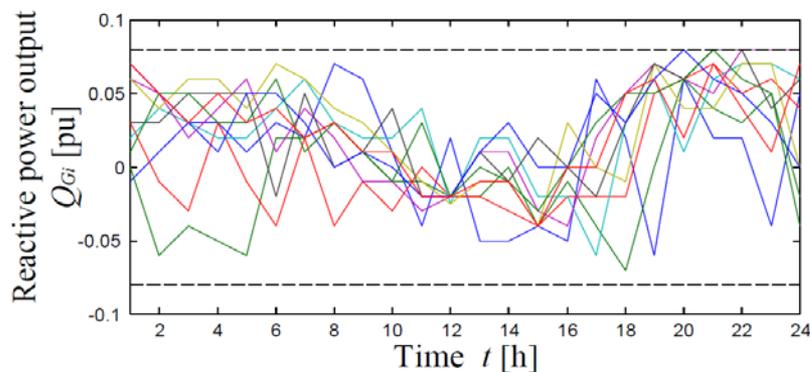
(b) 系統連系点有効電力潮流



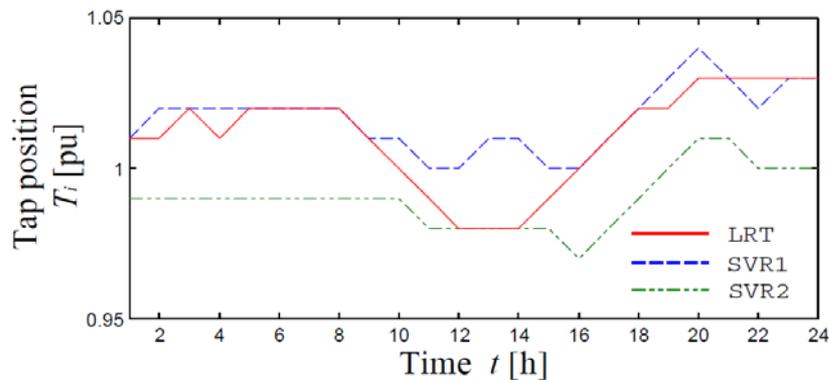
(c) 系統連系点無効電力潮流

図8 ケース3におけるシミュレーション結果  
(分散型電源、既存の電圧制御装置および蓄電池設備の協調制御)

## Case3におけるシミュレーション結果



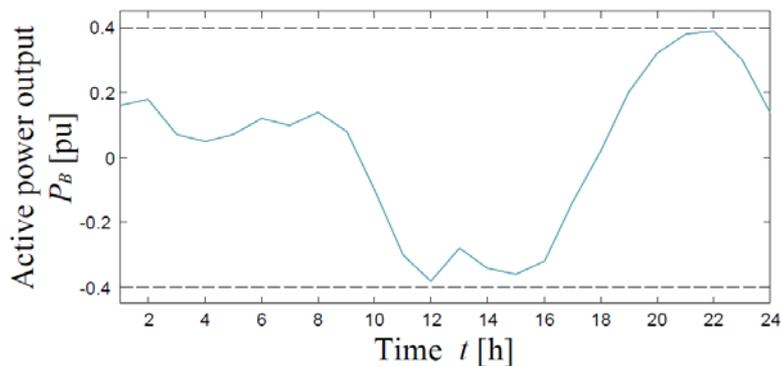
(d) 分散型電源連系インバータによる無効電力出力



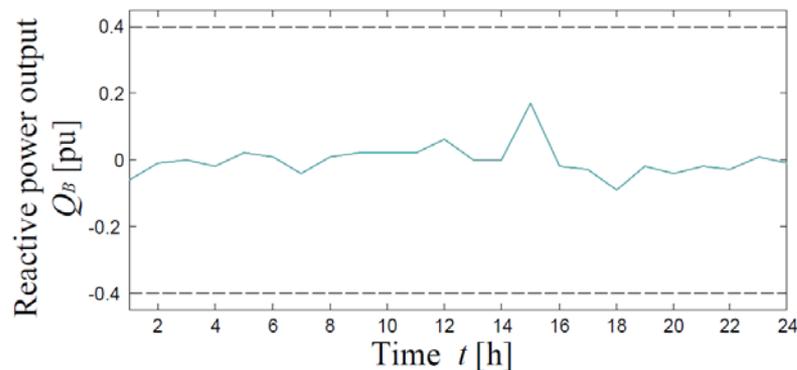
(e) 既存の電圧調整装置に関するタップ位置

図8 ケース3におけるシミュレーション結果  
(分散型電源、既存の電圧制御装置および蓄電池設備の協調制御)

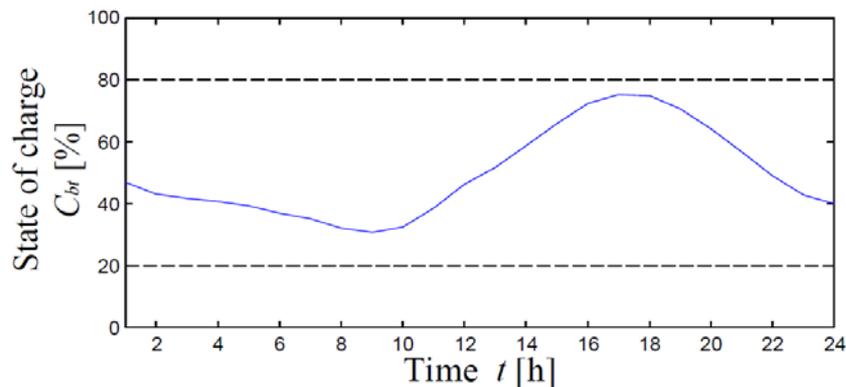
## Case3におけるシミュレーション結果



(f) 蓄電池設備による有効電力出力



(g) 蓄電池設備による無効電力出力



(h) エネルギー残存率

図8 ケース3におけるシミュレーション結果  
(分散型電源、既存の電圧制御装置および蓄電池設備の協調制御)

## ■ 各制御手法における系統全体の配電損失

表2 ケース2、3における系統全体の損失

	系統全体における損失
Case 2 (比較手法)	6,929 kWh
Case 3 (提案手法)	4,879 kWh (−30%)

$$P_L [\text{kWh}] = \frac{\sum P_L [\text{pu}] \times spt \times P_B}{3600 \times 10^3}$$

$\sum P_L$  : 各サンプルの配電損失合計値

$P_B$  : 系統容量

$spt$  : サンプルングタイム(1h)

## 5. むすび

### 提案手法

分散型電源が大量連系された配電系統において上位系統との連系点へ蓄電池設備を導入し、スケジュールに基づき既存の電圧調整装置および分散型電源と共に協調制御を行う



- 系統電圧の**変動抑制**
- 系統連系点における**有効・無効電力潮流平準化**
- 系統全体における**配電損失の抑制**





**ご清聴ありがとうございました**