スマートインバータ連系 低圧配電系統モデルの縮約手法

喜久里 浩之，ｳｽﾂﾝ ﾀﾊ ｾﾘﾑ，橋本潤，大谷謙仁
（産業技術総合研究所）

発表内容

- スマートインバータとは
- Volt-Var機能検証時の系統縮約に関する課題
- 本研究の目的
- 提案手法
- シミュレーション結果
- まとめ

スマートインバータとは

EPRI ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

Common Functions for Smart Inverters

4th Edition

3002008217

EPRI, "Common Functions for Smart Inverters: 4th Edition", 2016

スマートインバータとは

- 系統サポート機能（電圧，周波数，ライドスルー，通信等）を有するPCS

CONTENTS

ABSTRACT V

1 INTRODUCTION 1-1

11 VOLT-VAR FUNCTION 11-1
- Scope of This Function 11-1
- Requirements/Use Cases 11-1
- Prior Bodies of Work 11-1
- Proposal 11-1

12 VOLT-WATT FUNCTION 12-1
- Scope of This Function 12-1
- Requirements/Use Cases 12-1
- Prior Bodies of Work 12-1
- Proposal 12-1

13 FREQUENCY-WATT FUNCTION 13-1
- Scope of This Function 13-1
- Requirements/Use Cases 13-1
- Prior Bodies of Work 13-1
- Proposal 13-2

16 LOW/HIGH VOLTAGE RIDE-THROUGH FUNCTION 16-1
- Scope of This Function 16-1
- Requirements/Use Cases 16-1

17 LOW/HIGH FREQUENCY RIDE-THROUGH FUNCTION 17-1
- Scope of This Function 17-1
- Requirements/Use Cases 17-1
- Prior Bodies of Work 17-1
- L/HFRT Proposal 17-2

EPRI, “Common Functions for Smart Inverters: 4th Edition”, 2016

スマートインバータとは

Evolution of grid support functions

IEEE Std 1547-2003

- **Shall NOT** actively regulate voltage
- **Shall** trip on abnormal voltage/frequency

IEEE Std 1547a-2014 (Amendment 1)

- **May** actively regulate voltage
- **May** ride through abnormal voltage or frequency
- **May** provide frequency response

IEEE Std 1547-2018

- **Shall be capable of** actively regulating voltage
- **Shall** ride through abnormal voltage/frequency
- **Shall be capable of** frequency response

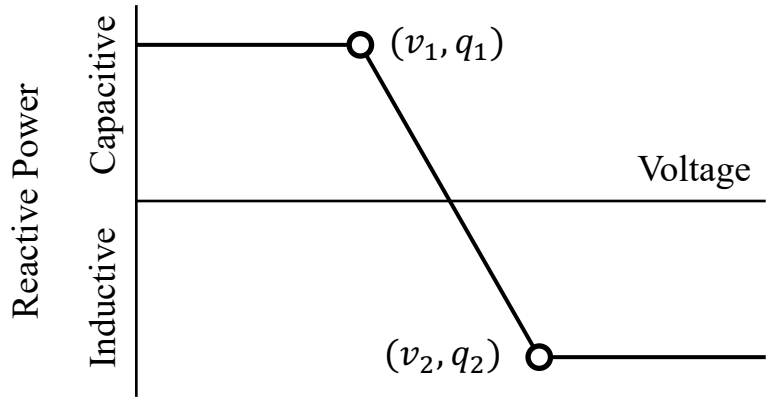
Source: NREL

IEEE STANDARDS ASSOCIATION IEEE

C. Stice, *et al.*, "IEEE Std 1547-2018", NERC SPIDER WG Meeting, 2019
https://www.nerc.com/comm/PC/System%20Planning%20Impacts%20from%20Distributed%20Energy%20Re/IEEE%20SCC21_1547_Overview_NERC_SPIDERWG_01072019.pdf

配電系統におけるスマートインバータ機能の検証

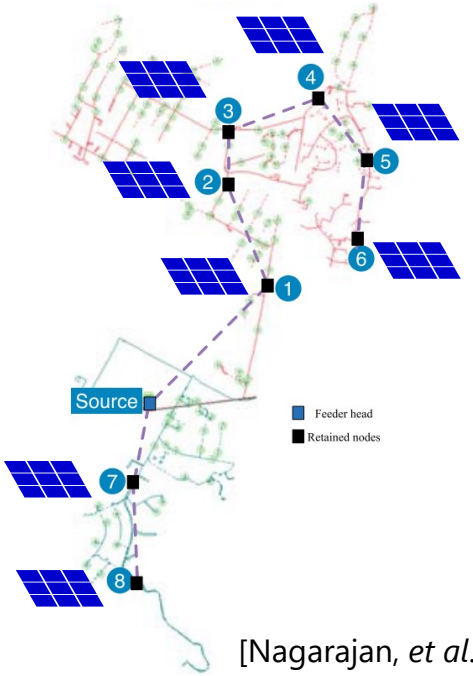
- Volt-Var機能
  - 自端電圧に応じて無効電力出力量を制御
  - 配電系統の電圧維持が主な目的
- スマートインバータが導入された配電系統
  - より複雑化する潮流状態の把握が重要
  - 十分なケース数の解析 → **計算負荷が小さいほうが望ましい**



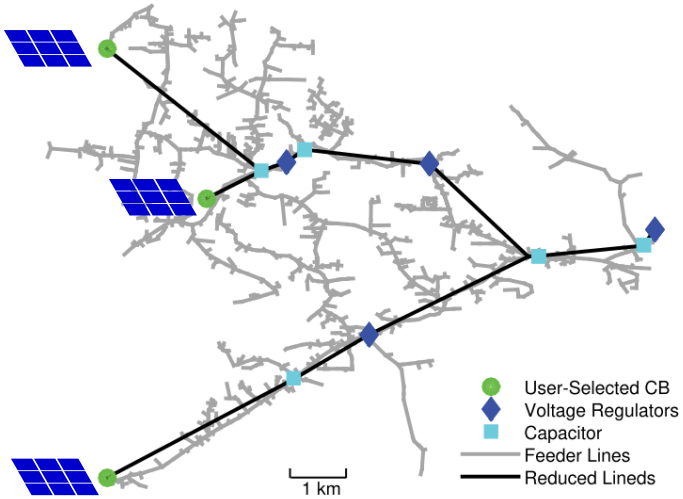
$$\boldsymbol{VVC} = \{(v_1, q_1), (v_2, q_2)\}$$

計算負荷を小さくするための手法

- 潮流計算の高速化手法 [Qureshi, *et al.*, 2018]
  - 準定常時系列計算を高速化
  - 商用のリアルタイムシミュレータ等への実装は困難
- 配電系統の縮約手法 [Nagarajan, *et al.*, 2017], [Pecenak, *et al.*, 2019]
  - 縮約前後で電圧誤差が小さくなるように配電系統のフィーダを削減
  - 縮約後の系統モデルにPVを接続



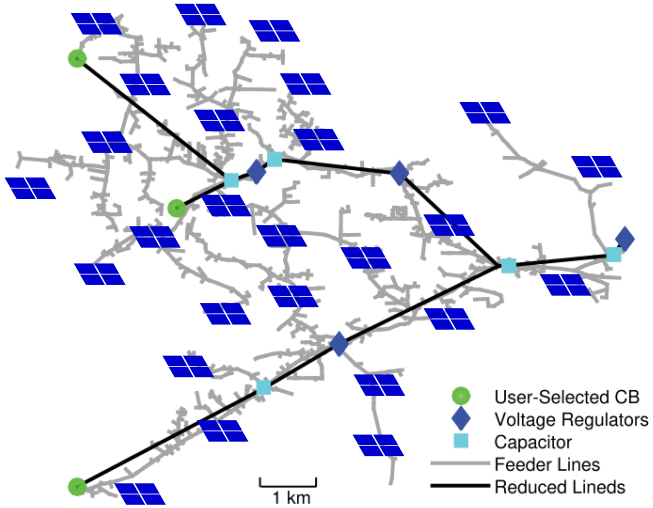
[Nagarajan, *et al.*, 2017]



[Pecenak, *et al.*, 2019]

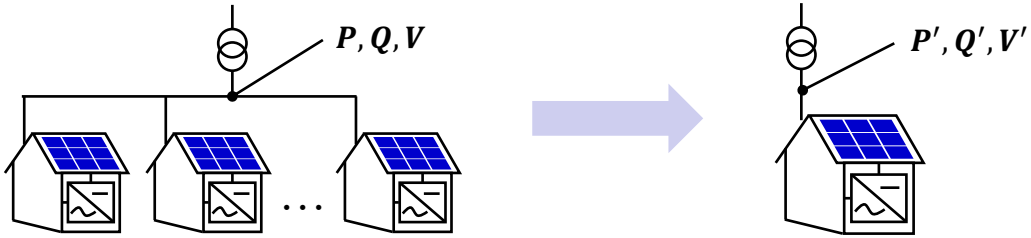
Volt-Var機能の効果検証のための低圧配電系統縮約手法

- 元の系統モデルに多数のスマートインバータが連系している場合
  - Volt-Var機能では自端電圧に応じて無効電力出力量を制御
  - 接続箇所によって無効電力出力のタイミングが異なる
  - 適切な縮約方法について十分に検討されていない



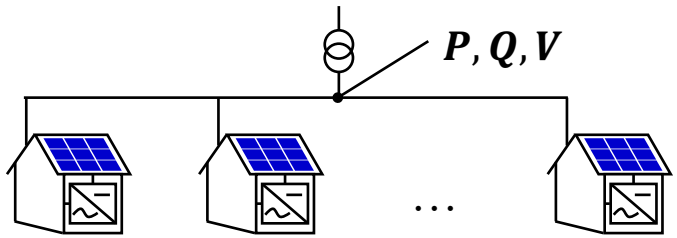
[Pecenak, *et al.*, 2019]

- 本研究の目的
  - Volt-Var機能を有する複数のスマートインバータが連系した低圧配電系統モデルの縮約手法を提案

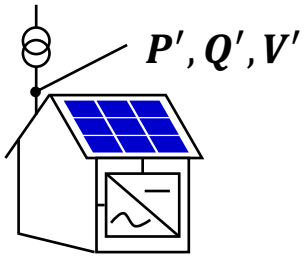


提案手法：①ノードの統合

- 元の低圧系統モデル



- 縮約低圧系統モデル



- PV容量

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{pv}} = \{\ c_1^{\mathrm{pv}},\quad c_2^{\mathrm{pv}},\quad \dots,\quad , c_N^{\mathrm{pv}}\ \}$$

$$c^{\mathrm{pv}\prime} = \sum_{n=1}^{N} c_n^{\mathrm{pv}}$$

- 負荷容量

$$\boldsymbol{c}^{\mathrm{ld}} = \{\ c_1^{\mathrm{ld}},\quad c_2^{\mathrm{ld}},\quad \dots,\quad , c_N^{\mathrm{ld}}\ \}$$

$$c^{\mathrm{ld}\prime} = \sum_{n=1}^{N} c_n^{\mathrm{ld}}$$

- PVプロファイル

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}} = \{\ \boldsymbol{x}_1^{\mathrm{pv}},\quad \boldsymbol{x}_2^{\mathrm{pv}},\quad \dots,\quad , \boldsymbol{x}_N^{\mathrm{pv}}\ \}$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}\prime} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{x}_n^{\mathrm{pv}}$$

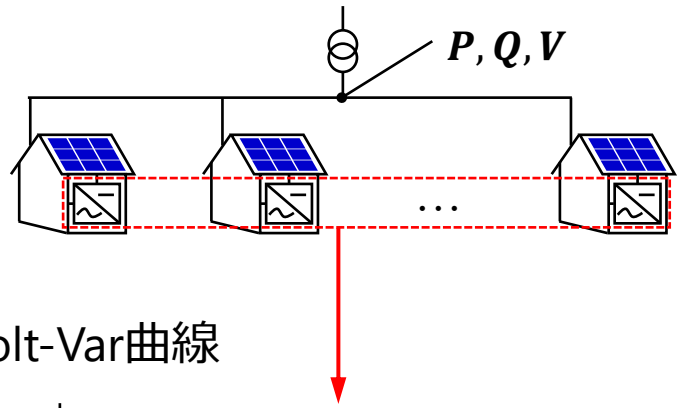
- 負荷プロファイル

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{ld}} = \{\ \boldsymbol{x}_1^{\mathrm{ld}},\quad \boldsymbol{x}_2^{\mathrm{ld}},\quad \dots,\quad , \boldsymbol{x}_N^{\mathrm{ld}}\ \}$$

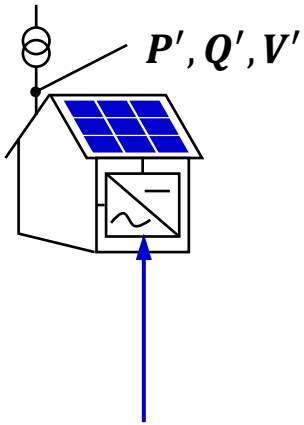
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{ld}\prime} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{x}_n^{\mathrm{ld}}$$

提案手法：②Volt-Var曲線の決定

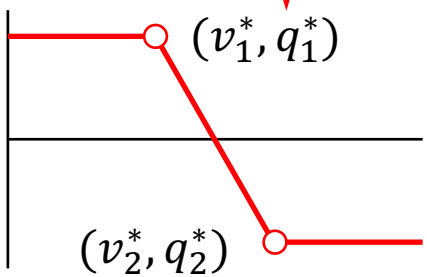
- 元の低圧系統モデル

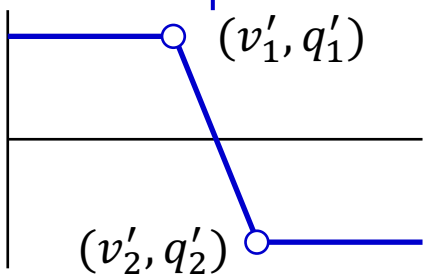


- 縮約低圧系統モデル



- Volt-Var曲線





$$\boldsymbol{VVC}^* = \{(v_1^*, q_1^*), (v_2^*, q_2^*)\}$$

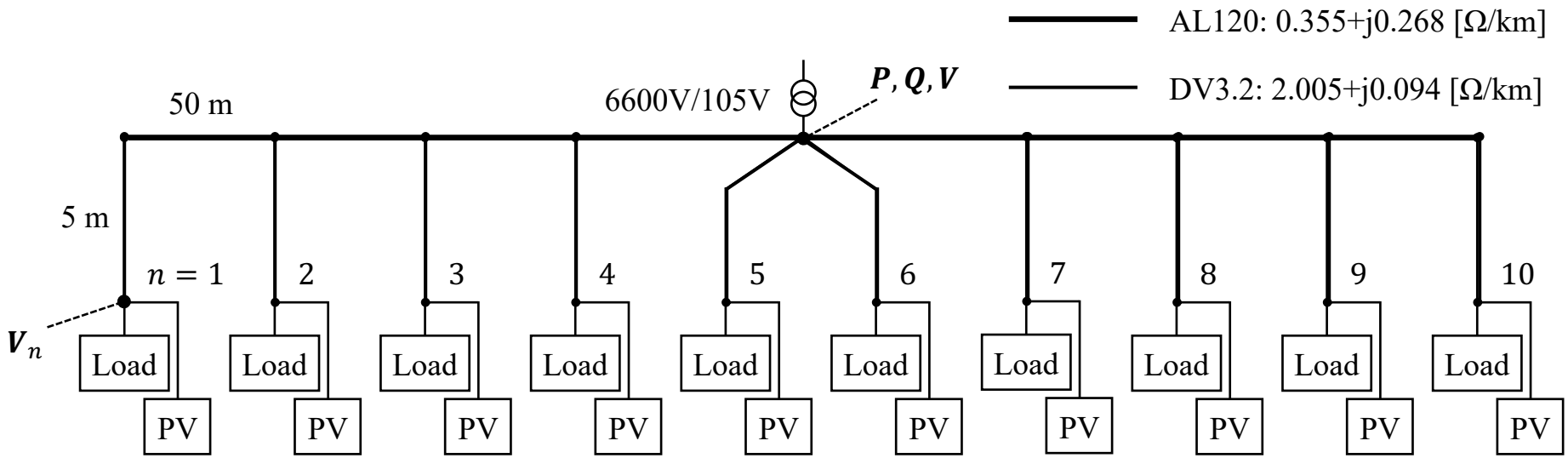
$$\boldsymbol{VVC}' = \{(v_1', q_1'), (v_2', q_2')\}$$

$$= \underset{\boldsymbol{VVC}}{\operatorname{argmin}} \sum_{n=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} \{V_{n,t}(\boldsymbol{VVC}) - V^{\mathrm{c}}\}$$

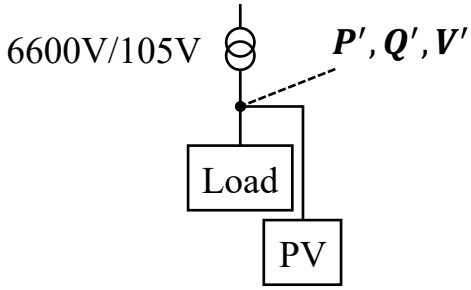
$$= \underset{\boldsymbol{VVC}}{\operatorname{argmin}} \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \{V_t(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{VVC}^*) - V_t'(\boldsymbol{X}', \boldsymbol{VVC})\}^2}$$

シミュレーション：低圧配電系統モデル

- 縮約前のモデル



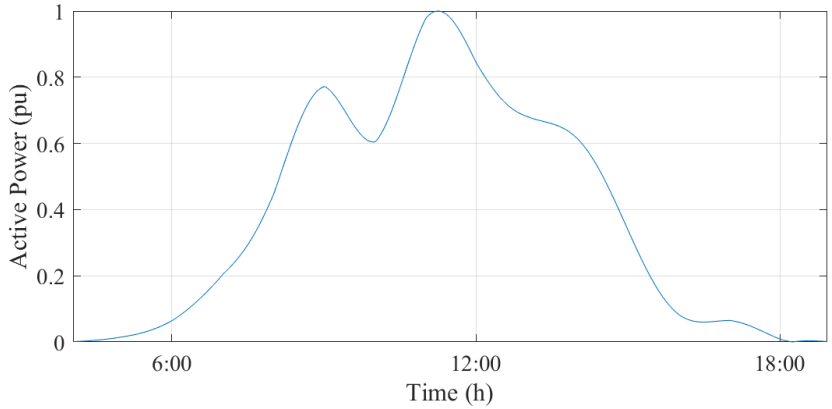
- 縮約後のモデル



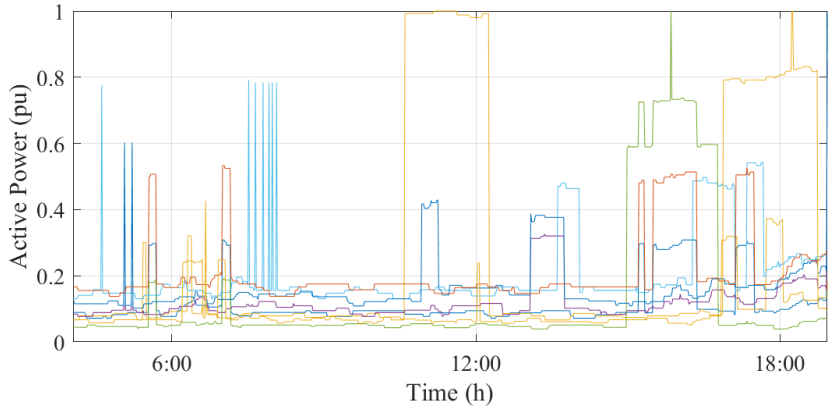
シミュレーション：PV・負荷プロファイル（1分値）

■ 縮約前

□ PV

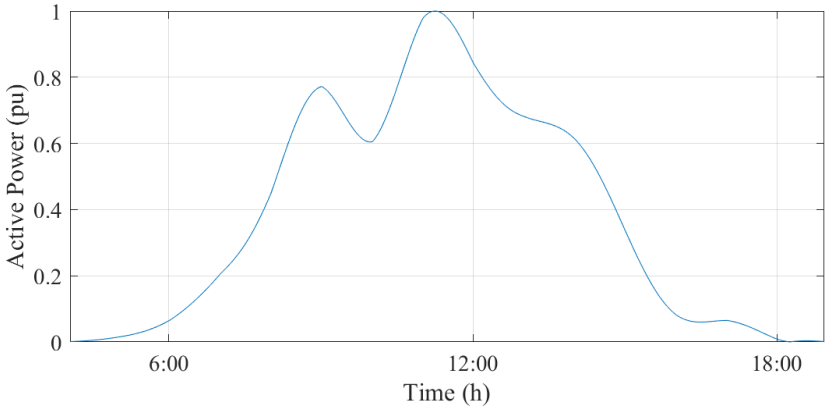


□ 負荷

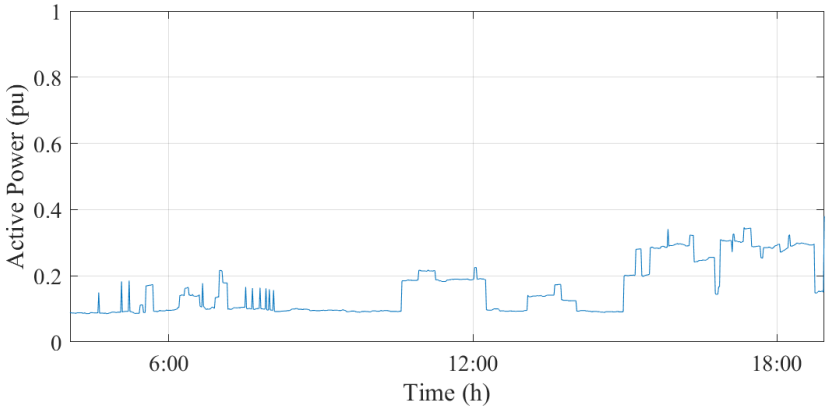


■ 縮約後

□ PV

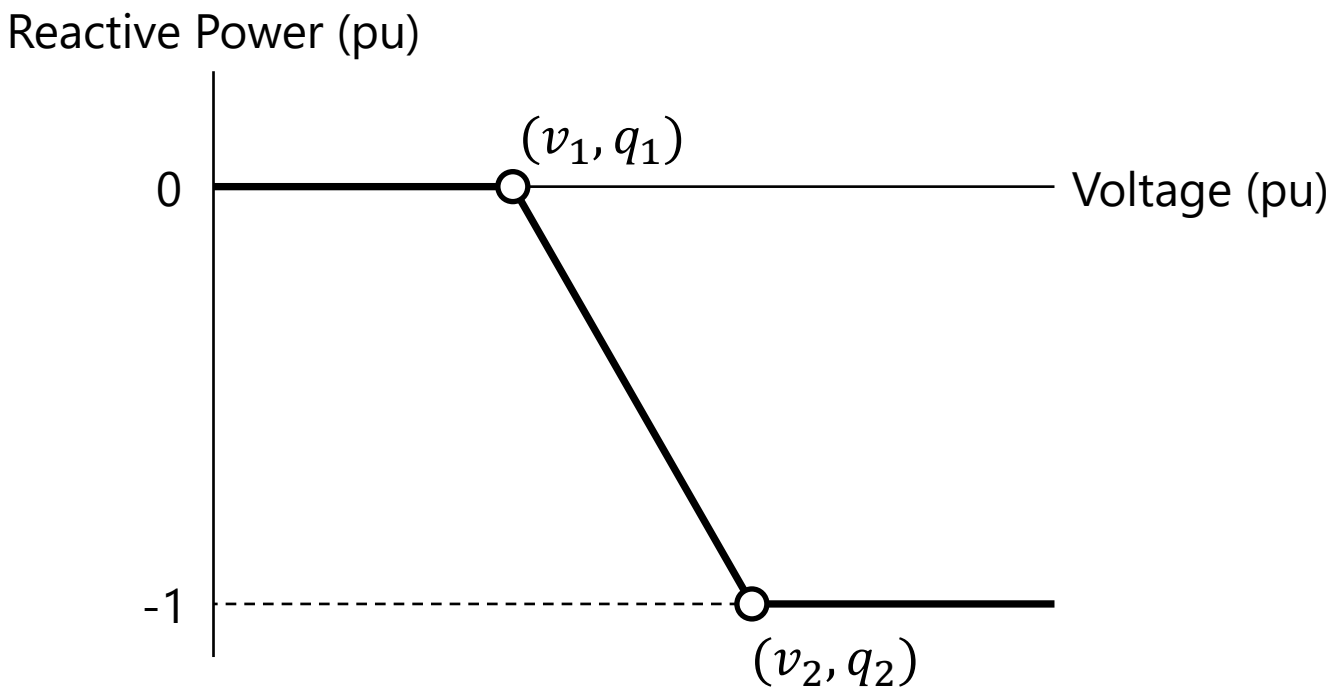


□ 負荷



D. A. Broden, K. Paridari, L. Nordström, “Matlab applications to generate synthetic electricity load profiles of office buildings and detached houses”, 2017 IEEE ISGT-Asia, Auckland, Dec. 2017.

シミュレーション：Volt-Var曲線



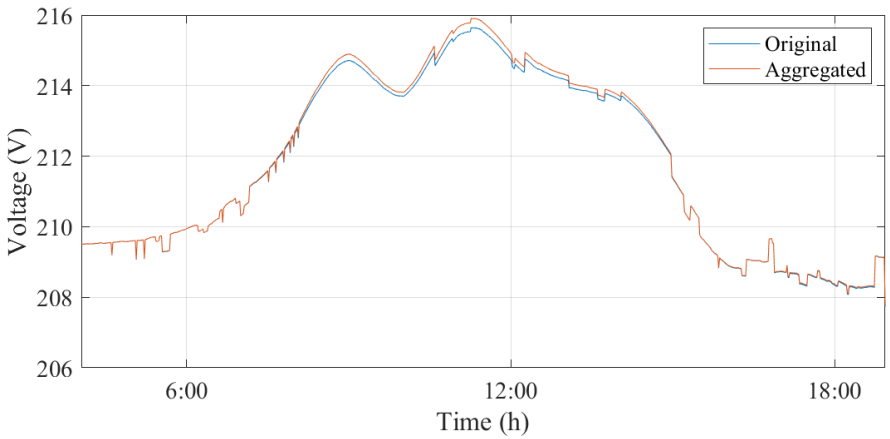
- $v_1 < v_2$ となる組合せについて探索

v_1: 0.95, 0.955, … , 1.065

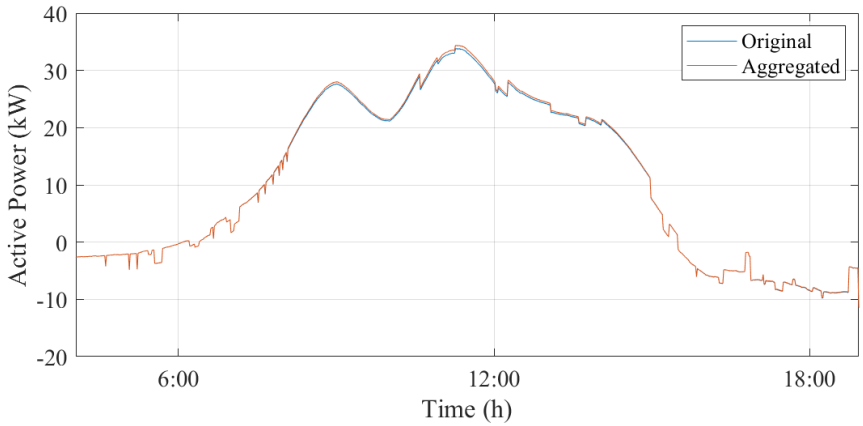
v_2: 0.955, 0.96, … , 1.07

シミュレーション結果：Volt-Var機能なし

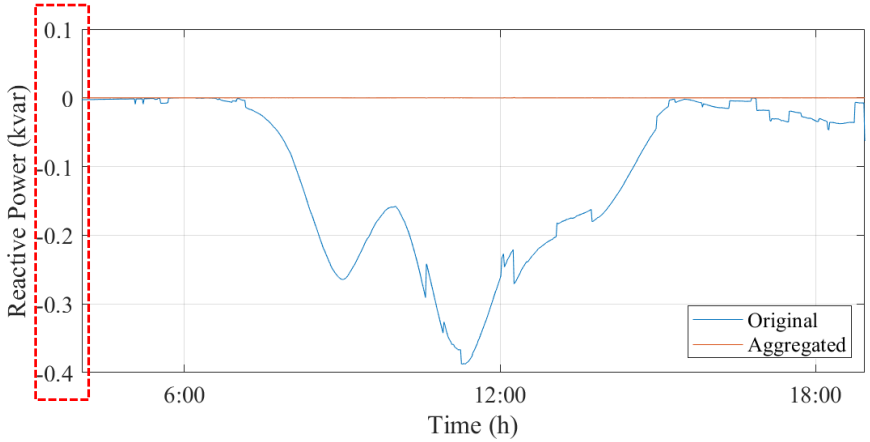
- 電圧



- 有効電力

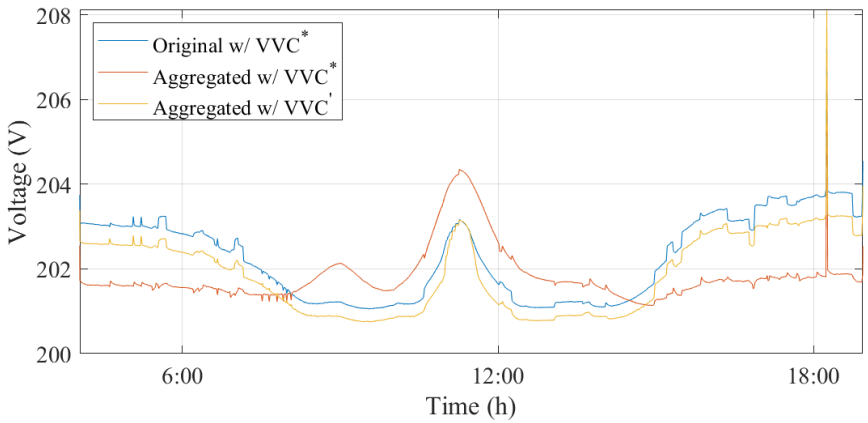


- 無効電力

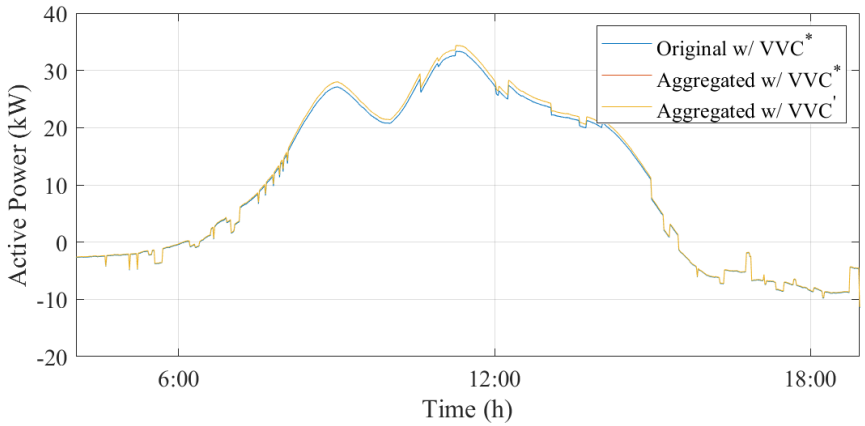


シミュレーション結果：Volt-Var機能あり

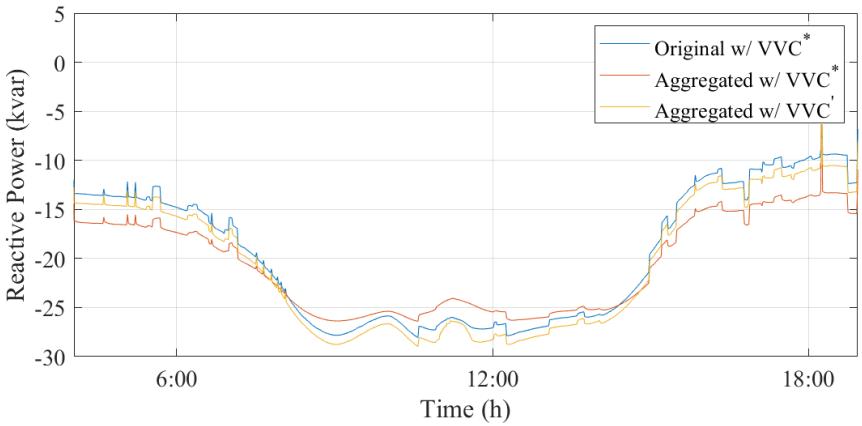
■ 電圧



■ 有効電力



■ 無効電力

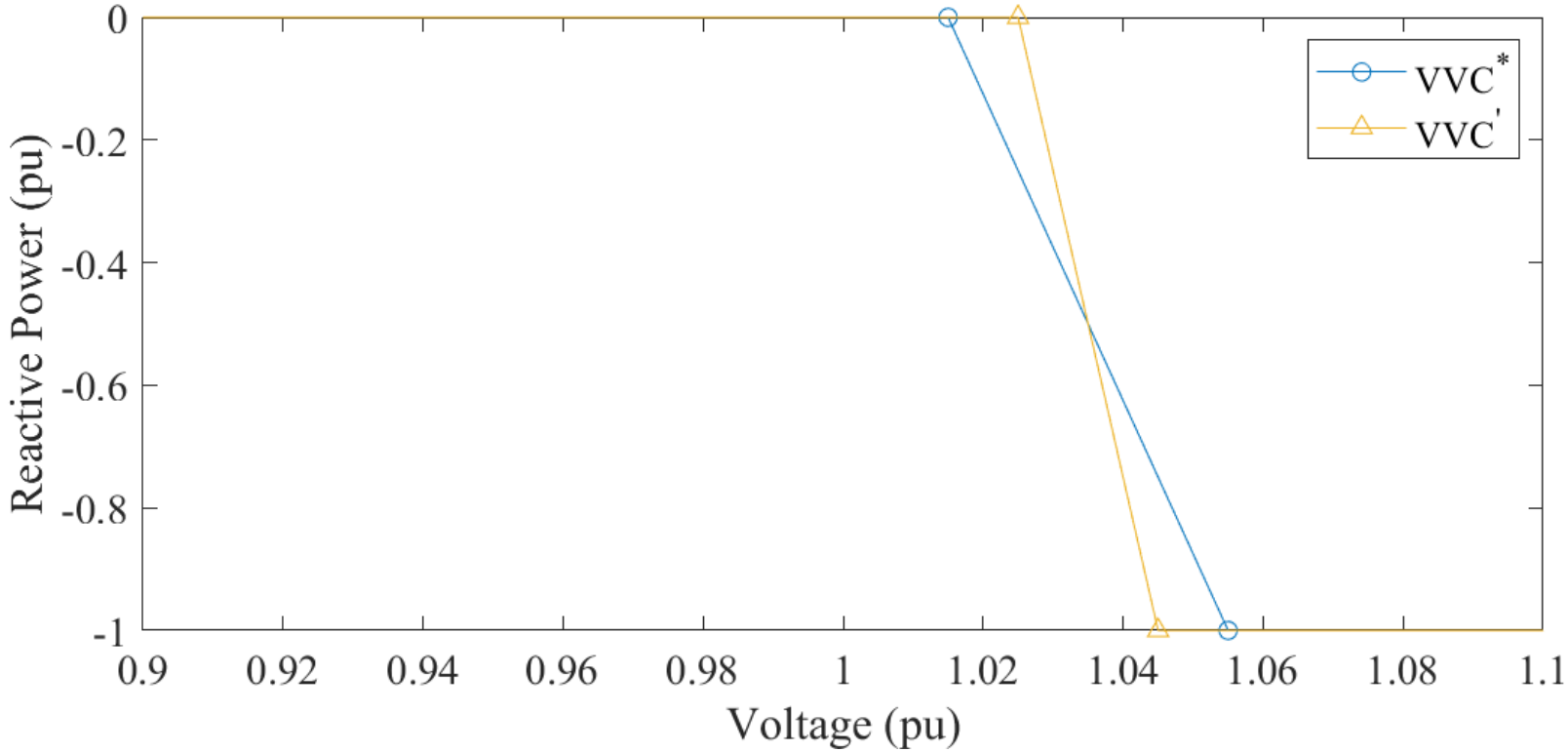


シミュレーション結果：RMSE（二乗平均平方根誤差）

	有効電力 (kW)	無効電力 (kvar)	電圧 (V)
Volt-Varなし	0.2269	0.1568	0.1079
Volt-Varあり **比較手法** VVC^*	0.2845	**5.1757**	**1.3509**
Volt-Varあり **提案手法** VVC'	0.2845	**0.4606**	**0.1904**

- 無効電力：91.1% 低減
- 電圧：85.91% 低減

シミュレーション結果：Volt-Var曲線



- 縮約モデルのVolt-Var曲線のほうが傾きが大きい
  - 無効電力出力開始・終了のタイミングが遅い
  - 連系点電圧の違いによる無効電力出力のタイミングや量の違いを補正している

まとめ

- 配電系統解析の簡易化のために系統モデルの縮約を検討
- Volt-Var機能を有する複数のスマートインバータが連系した低圧配電系統モデルの縮約手法を提案
- 提案手法により柱上変圧器二次側におけるRMSEが無効電力は91.1%，電圧は85.91%低減
- 今後の予定
  - 高圧配電系統の考慮
  - PV・負荷プロファイルの多様化