無効電力制御解析のための配電系統モデル縮約手法の評価

喜久里 浩之*，Ustun Taha Selim，織原 大，橋本 潤，大谷 謙仁

産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所（FREA）

分散電源には系統サポート機能が求められる時代に

海外

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

国内

3．今後の対応と課題

JPEA 12

【日本版グリッドコード案】
以上の結果を踏まえ、日本版グリッドコード案を示す。
（既存の規格に現在不足している機能を**赤字**で追記）

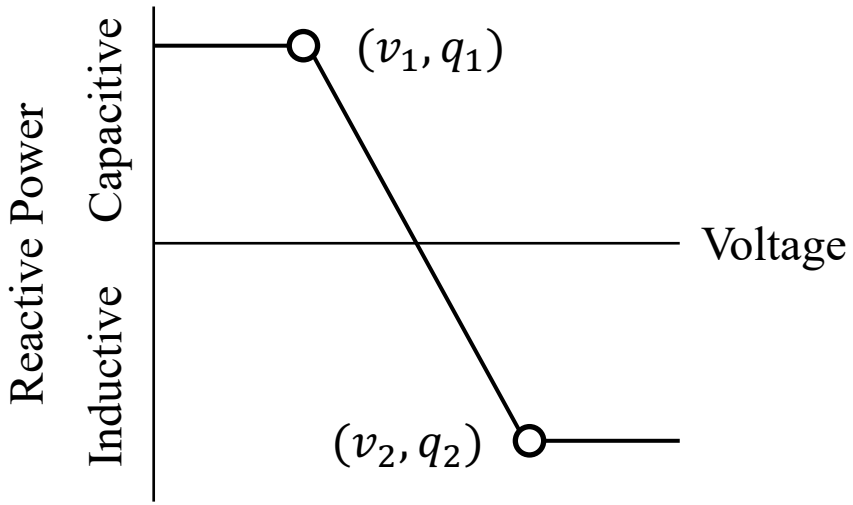
要件		機能			基準	電力系統の電圧区分 [○：必要、△：選択、●：今後必要] 低圧 逆潮流なし	低圧 逆潮流あり 住宅	低圧 逆潮流あり 非住宅	高圧 逆潮流なし	高圧 逆潮流あり 500kW未満	高圧 逆潮流あり 500kW以上	特高 逆潮流なし	特高 逆潮流あり
1	適正電圧・周波数の維持	系統電圧上昇の制限（OVR）			あり	○	○	○	○	○	○	○	○
		系統電圧低下の制限（UVR）			あり	○	○	○	○	○	○	○	○
		系統周波数上昇の制限（OFR）			あり		○	○		○	○		
		系統周波数低下の制限（UFR）			あり	○	○	○	○	○	○	○	○
2	受電点の電圧調整	自動電圧調整	有効電力制御（Volt-watt）		あり		○	○		○	○	○	○
			無効電力制御（Volt-var）	進相	あり		○	○		○	○	○	○
				遅相	**なし**						△		●
		力率一定制御			あり		○	○		○	○		
		動的無効電流制御（Dynamic Volt-var）			**なし**						△		△
3	不要解列の防止	保護協調（事故範囲の局限化）	発電電圧異常（OVR、UVR）		あり	○	○	○	○	○	○	○	○
			系統側短絡事故（UVR）		あり	○	○	○	○	○	○	○	○
			系統側地絡事故	地絡過電圧リレー	あり				△	△	△	△	△
				電流差動リレー	あり							△	△

Japan Photovoltaic Energy Association

経済産業省 第23回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会／電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会　系統ワーキンググループ　資料９
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/023.html

無効電力制御（Volt-Var）

- 主目的は配電系統の電圧制御
- Volt-Var 曲線を設定
  自端電圧に応じ無効電力出力量を自動調整



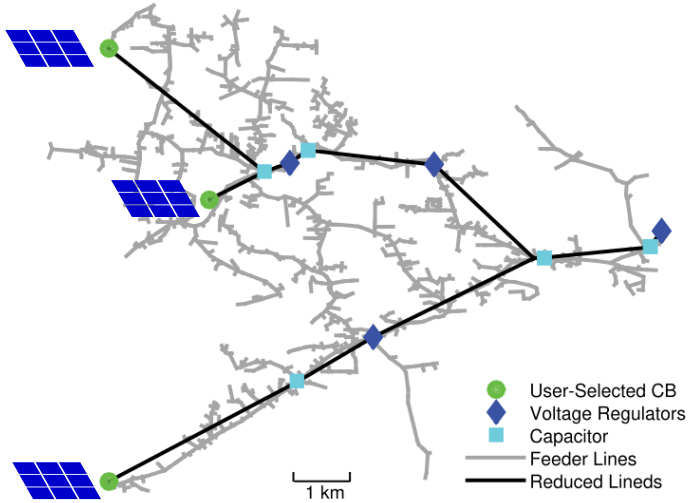
$$\boldsymbol{VVC} = \{(v_1, q_1), (v_2, q_2)\}$$

- 複雑化する潮流状態の把握が重要
- 計算負荷が気になる…
  - 解析ケース数
  - リアルタイムシミュレーション（RTS）

計算負荷を小さくする手法

- 潮流計算の高速化手法 [Qureshi, *et al.*, 2018]
  - ケース数回せる
  - 商用ソフトへの実装が困難（RTS困難）

- 配電系統の縮約手法 [Nagarajan, *et al.*, 2017], [Pecenak, *et al.*, 2019]
  - ケース数回せる
  - 商用ソフトへの実装が容易（RTS容易）
  - 複数の分散電源による
    無効電力制御が考慮されていない

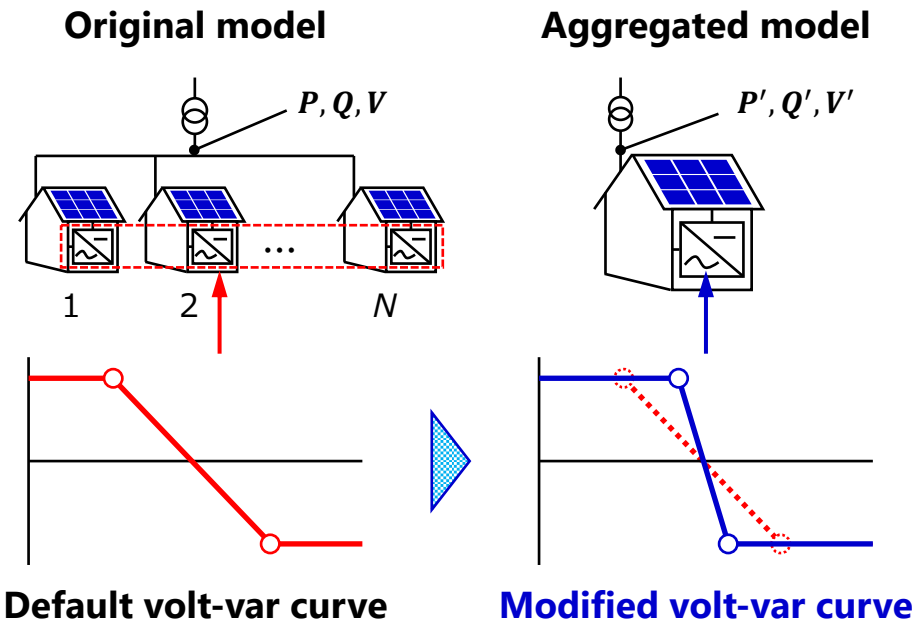


[Pecenak, *et al.*, 2019]

複数の分散電源による無効電力制御を考慮した系統モデル縮約

- 分散電源の接続箇所によって電圧が異なるため無効電力出力量とタイミングが異なる

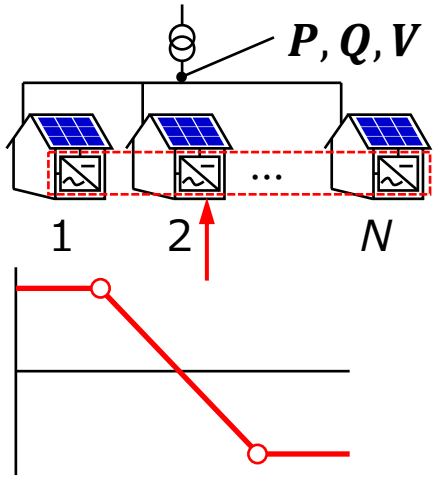
- 複数のPVによる無効電力制御を考慮した配電系統モデル縮約手法 [Kikusato, *et al.*, 2019]
  - 縮約モデルのVolt-Var曲線を修正することで電圧と無効電力の誤差を低減
  - 検証が不十分…



[Kikusato, *et al.*, 2019]

無効電力制御解析のための配電系統モデル縮約手法[Kikusato, *et al.*, 2019]

Volt-var 曲線

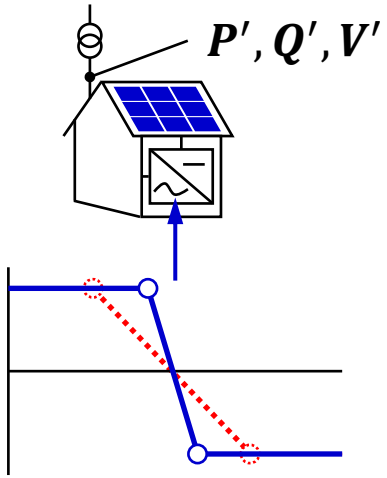


Default volt-var curve

VVC_{d}

潮流計算

$$\underset{VVC}{\operatorname{argmin}}\ V(x, VVC_{\mathrm{d}}) - V'(x', VVC)$$



Modified volt-var curve

VVC_{m}

需要家数 N 1

PVプロファイル (kW) $\boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}} = \{\boldsymbol{x}_1^{\mathrm{pv}}, \boldsymbol{x}_2^{\mathrm{pv}}, \ldots, \boldsymbol{x}_N^{\mathrm{pv}}\}$

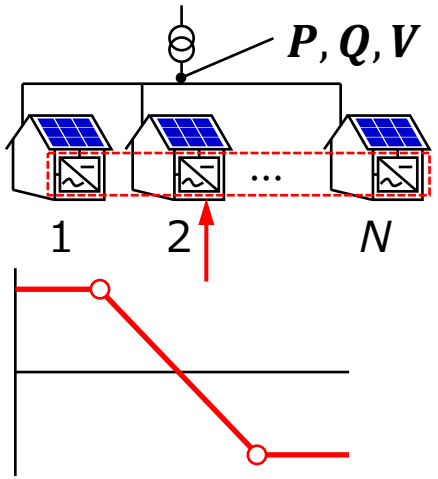
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}\prime} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{x}_n^{\mathrm{pv}}$$

負荷波形 (kW) $\boldsymbol{x}^{\mathrm{ld}} = \{\boldsymbol{x}_1^{\mathrm{ld}}, \boldsymbol{x}_2^{\mathrm{ld}}, \ldots, \boldsymbol{x}_N^{\mathrm{ld}}\}$

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

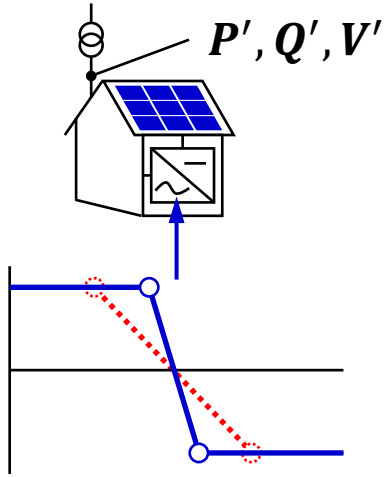
手法の汎用性の確認

縮約モデル構築



Default volt-var curve

VVC_{d}



Modified volt-var curve

VVC_{m}

評価

$$|V(x, VVC_{\mathrm{d}}) - V'(x', VVC_{\mathrm{d}})|$$

誤差比較

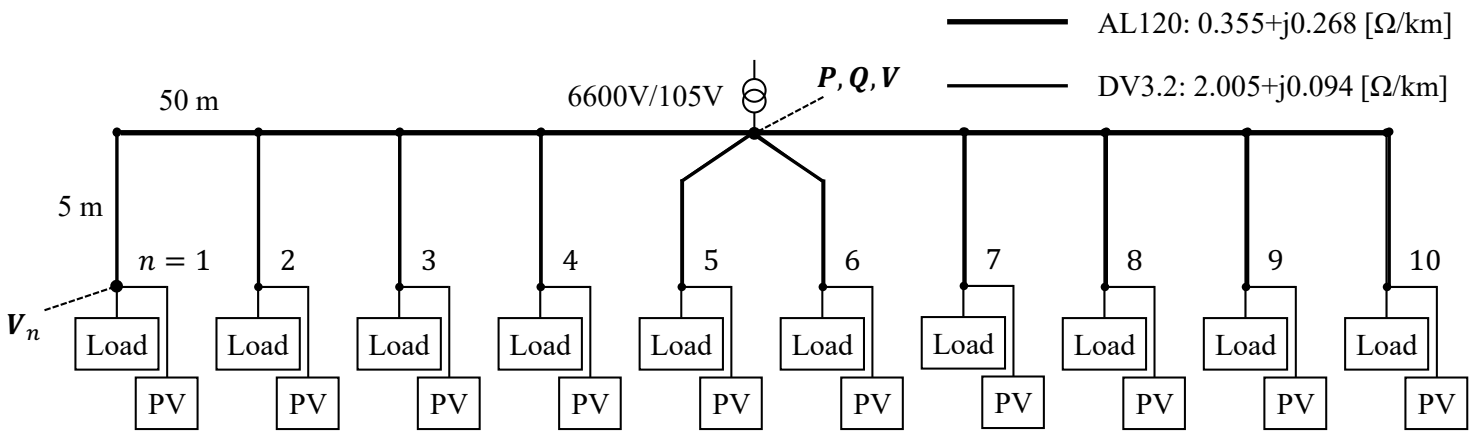
$$|V(x, VVC_{\mathrm{d}}) - V'(x', VVC_{\mathrm{m}})|$$

以前：モデル構築用＝評価用

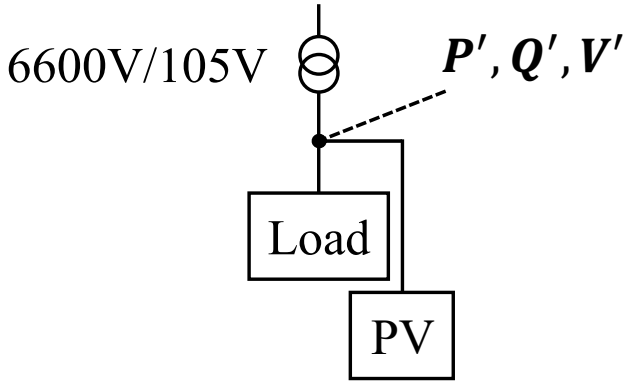
今回：モデル構築用≠評価用

手法の汎用性を確認

シミュレーション条件：低圧配電系統モデル



縮約前



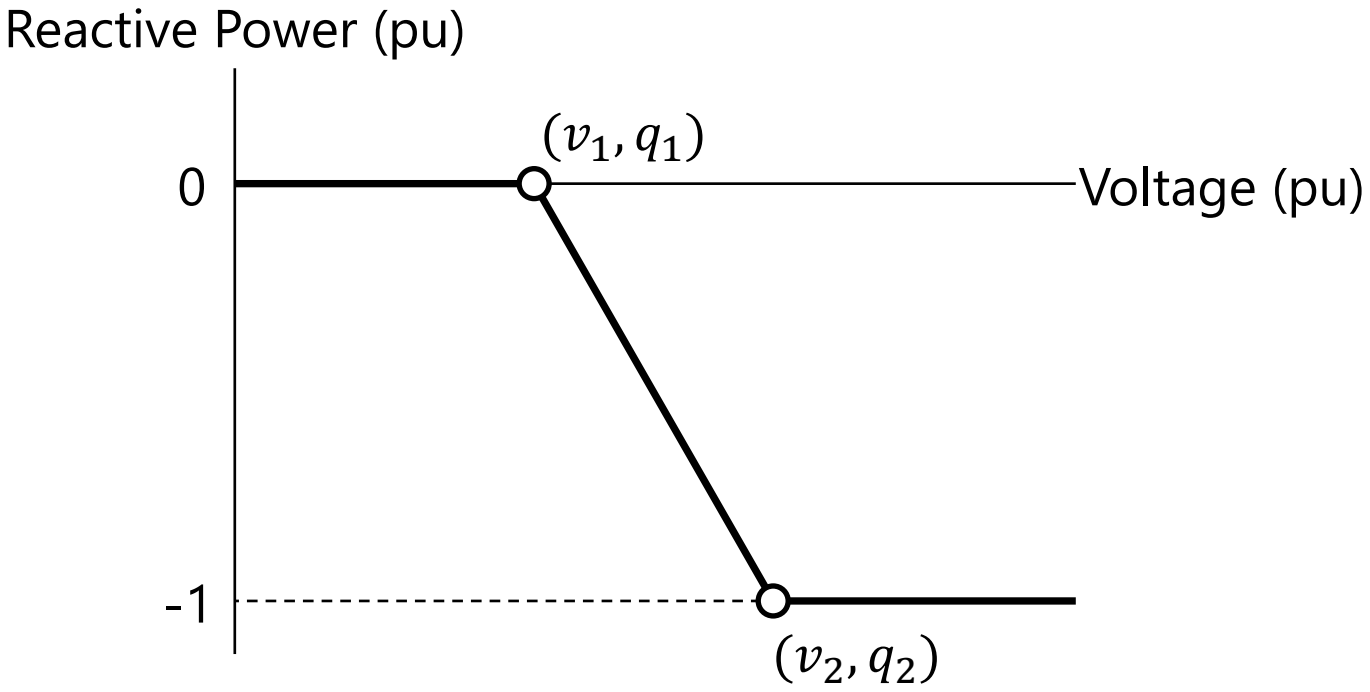
縮約後

シミュレーション条件：PV・負荷プロファイル

- 30日分のデータ（1分刻み）を利用 [Broden, et al., 2017]
  - PVは全需要家で同一
  - 負荷は各需要家で異なる

- モデル構築用データ・評価用データ
  - Case 1：モデル構築用・1～10日，評価用・その他20日分
  - Case 2：モデル構築用・11～20日，評価用・その他20日分
  - Case 3：モデル構築用・21～30日，評価用・その他20日分

シミュレーション条件：Volt-Var曲線

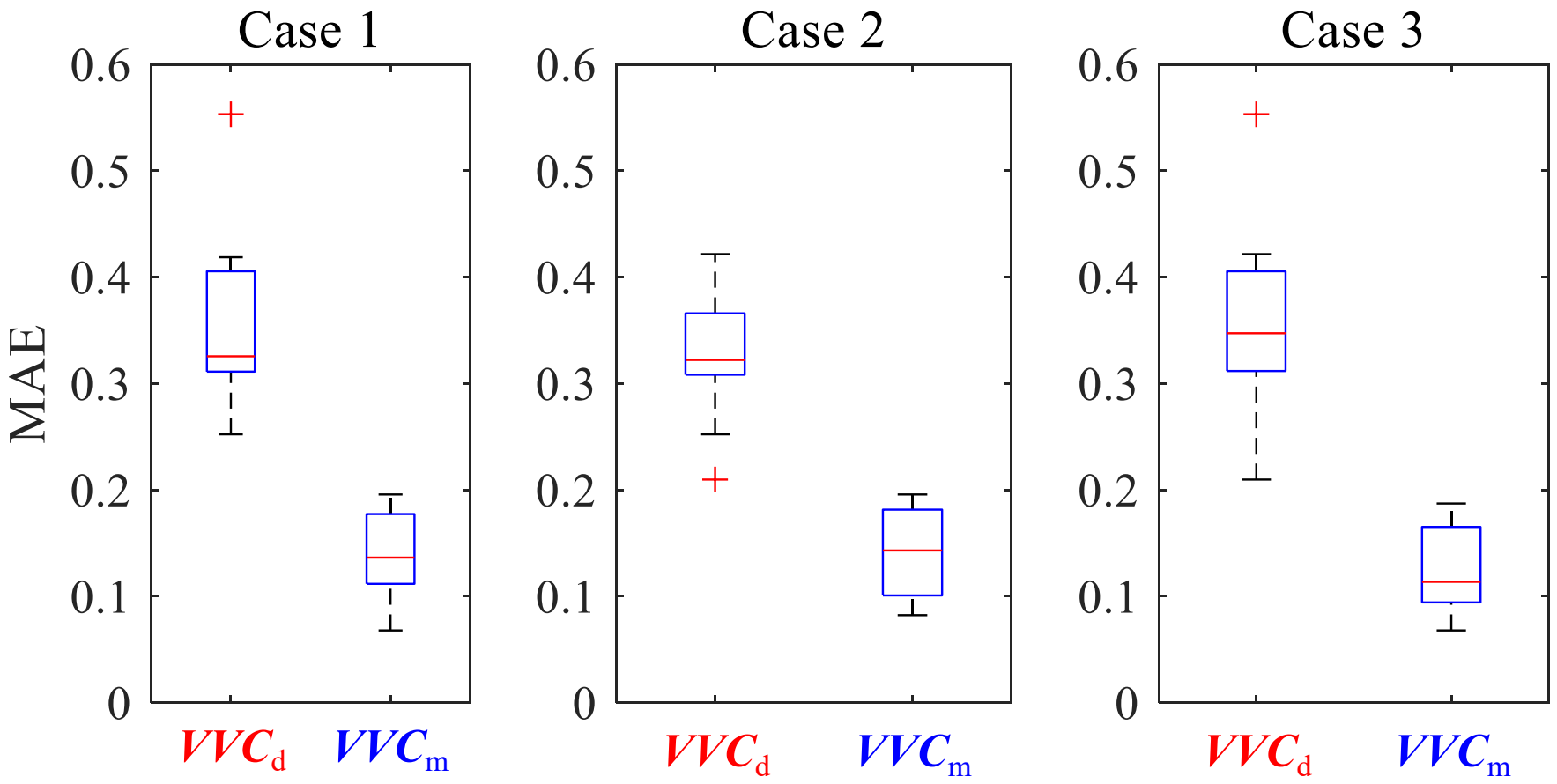


- $v_1 < v_2$ となる組合せについて探索

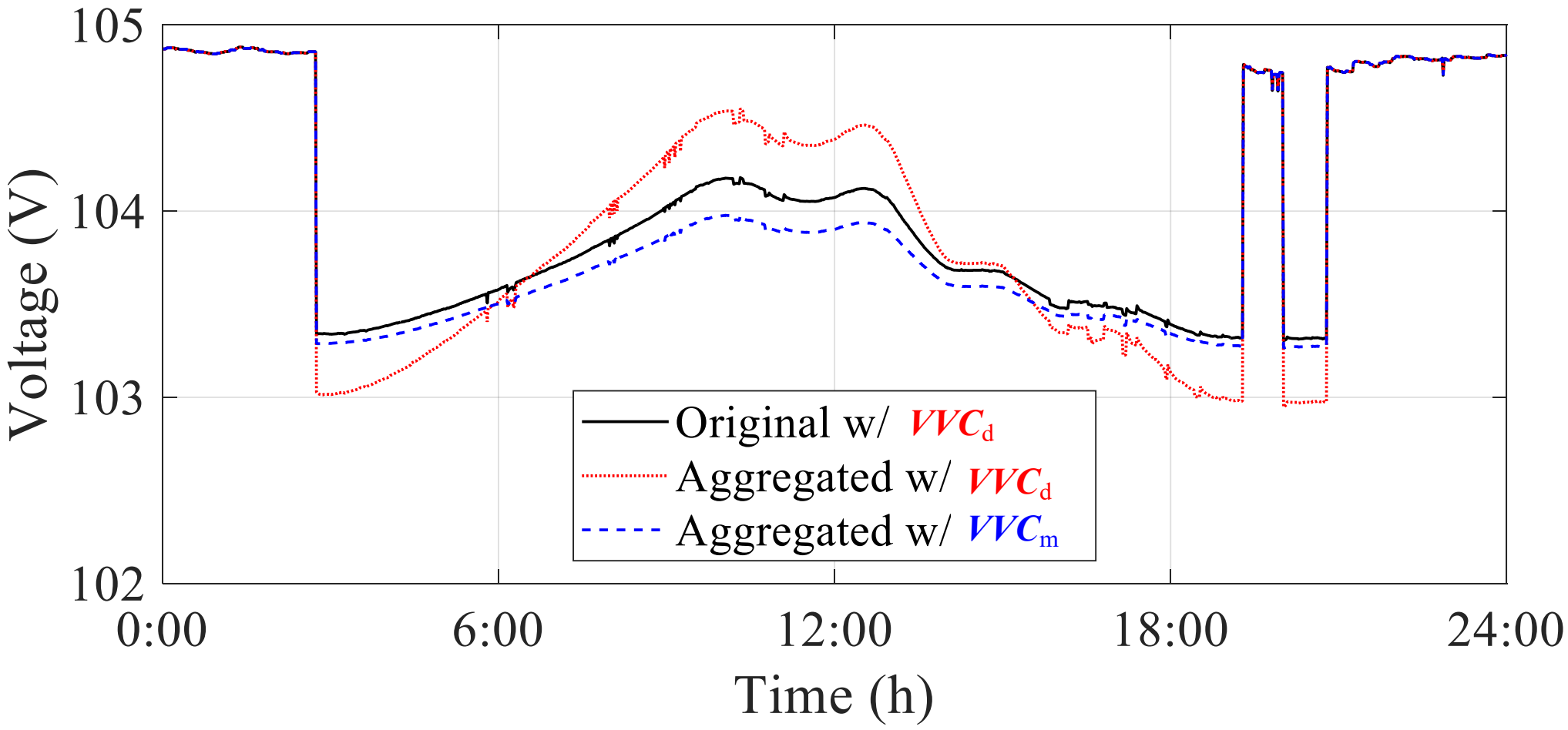
v_1: 0.95, 0.96, …, 1.06

v_2: 0.96 0.97, …, 1.07

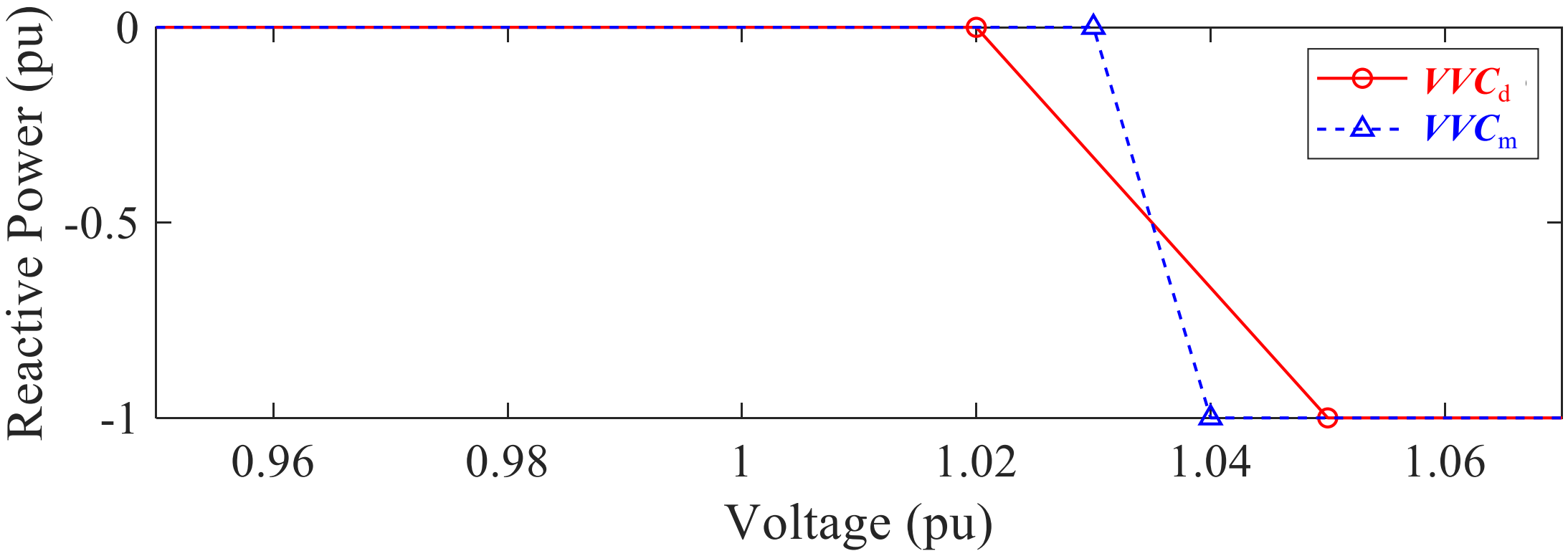
電圧の平均絶対誤差（V）：20日分の箱ひげ図 × 3ケース



電圧プロファイル


105
104
103
102
Voltage (V)
0:00
6:00
12:00
18:00
24:00
Time (h)
Original w/ VVCd
Aggregated w/ VVCd
Aggregated w/ VVCm

電圧プロファイルとVolt-Var曲線



まとめ

- 分散電源に系統サポート機能が求められる
- 解析時の計算負荷増加の懸念
  - ケース数
  - リアルタイムシミュレーション

- 複数の分散電源による無効電力制御（Volt-Var）を考慮した系統モデル縮約手法
  - Volt-Var曲線を修正することで電圧誤差を削減

- 手法の汎用性評価
  - 30日分のPV・負荷データを利用
  - 縮約モデル構築用（10日分）と評価用（20日分）でデータを分割
  - 全ての組合せ（３通り）で電圧誤差が小さくなることを確認

- 今後の方針
  - 高圧配電系統への応用
  - モデル構築用データの選び方

Appendix

Default Volt-Var Curve

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

$$V^{\mathrm{c}} = 101$$