

# 系統連系システムの状態推定

首都大学東京大学院 知能機械システム学域 M2 發知 諒 (児島研究室)

## 1.はじめに

次世代電力システムにおいて、系統はより大規模複雑化し、複数発電機が連系したシステムにおける状態推定技術の発達が期待されている<sup>[1]</sup>。

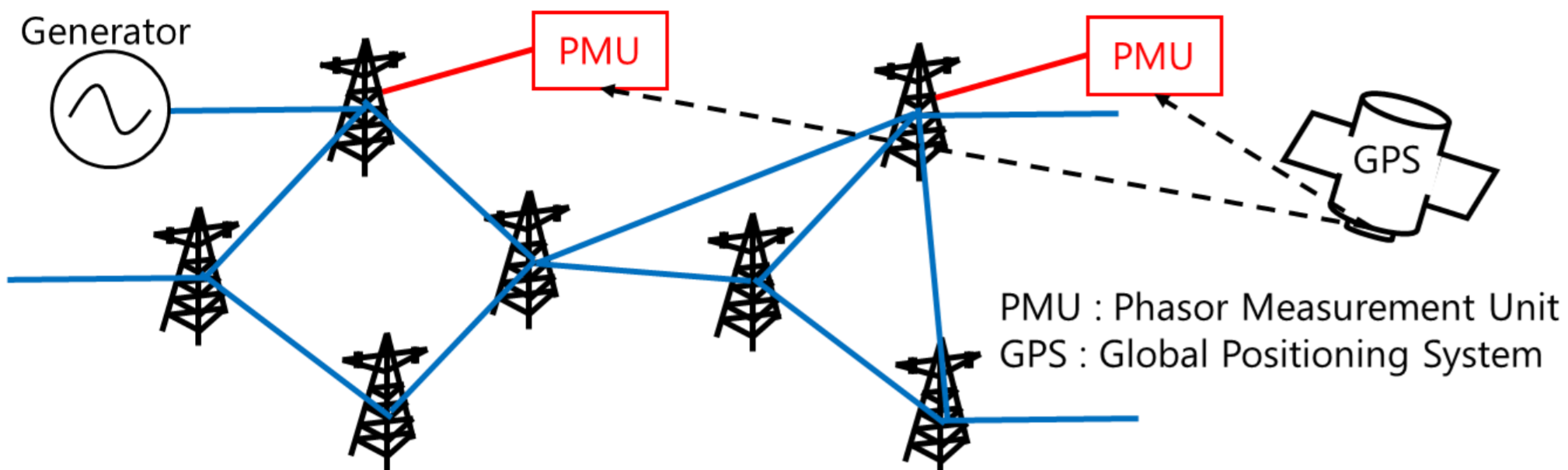


Fig. 1 Interaction among power systems, PMUs and GPS satellite

✓ PMU を用いて同期された複数地点の電圧・位相を計測し、GPS を用いて遠方の発電機出力情報を正確に捉えることができる (Fig. 1)。

### 研究目的

Moving Horizon Estimation を電力系統の状態推定に応用し、さらに推定値の確からしさを推定誤差集合を用いて評価する。

## 2. 複数火力機の電力システム

Fig. 2 に示すベンチマークシステム (WSCC 3-machine 9-bus system) を用いて、3機の発電機で構成された電力系統の状態推定を行う。

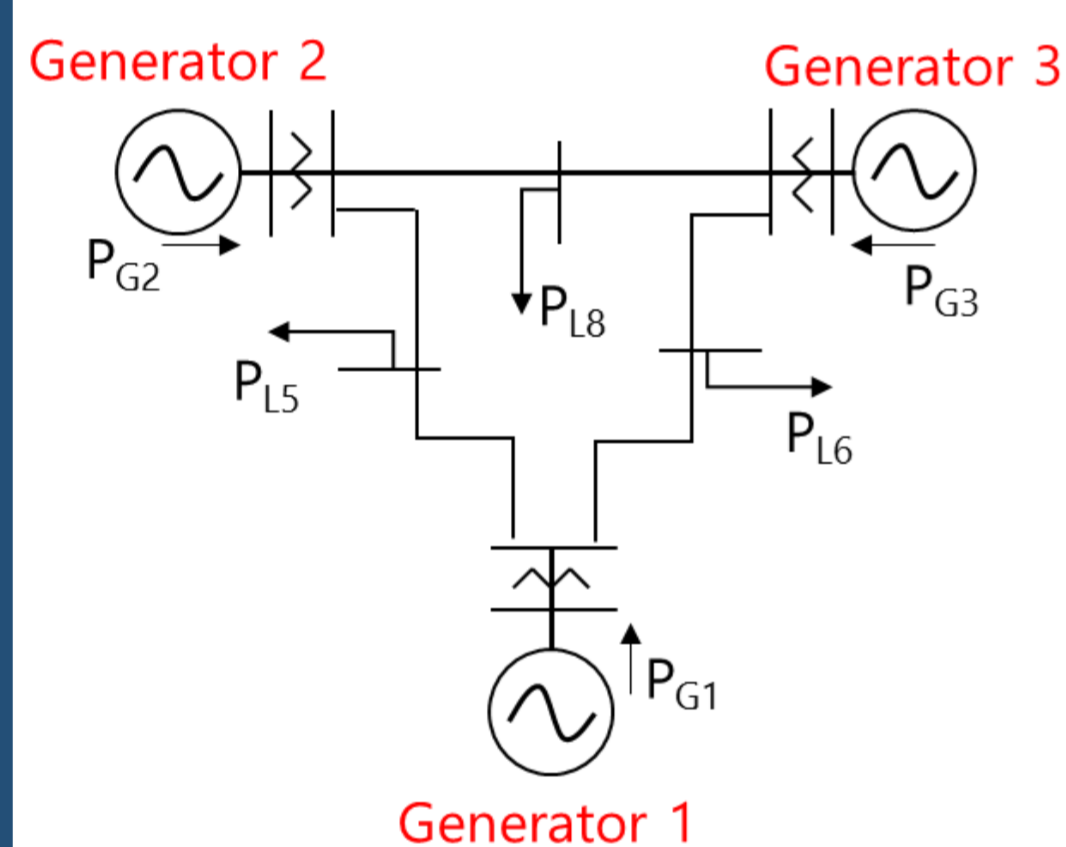


Fig. 2 3-machine 9-bus system

Table 1 State variables

$\Delta\delta$	Rotor angle [rad]
$\Delta\omega$	Rotor speed [rad/s]
$\Delta E'_d$	d axis voltage [p.u.]
$\Delta E'_q$	q axis voltage [p.u.]
$\Delta E_{fd}$	Exciter field voltage [p.u.]
$\Delta V_R$	AVR voltage [p.u.]
$\Delta R_F$	Rate feedback [p.u.]

✓ 3機の発電機から構成され、各々の発電機はネットワークで接続されており相互に影響を及ぼす<sup>[2]</sup>。

### 状態方程式

$$x_{t+1} = Ax_t,$$

$$y_t = Cx_t + v_t,$$

$$x = [x^1 \ x^2 \ x^3]^T,$$

$$x^i = [\Delta\delta^i \ \Delta\omega^i \ \Delta E'_d{}^i \ \Delta E'_q{}^i \ \Delta E_{fd}{}^i \ \Delta V_R{}^i \ \Delta R_F{}^i]^T,$$

$$y = [\Delta\omega^1 \ \Delta\omega^2 \ \Delta\omega^3]^T$$

✓ 回転子速度の基準値からの偏差  $\Delta\omega^i$  を出力とし、その他の内部状態 (Table 1) を推定する。

## 3. 状態推定とシミュレーション

本研究では、推定手法として Moving Horizon Estimation (MHE)<sup>[3]</sup> を用いる。また、推定誤差のダイナミクスより 誤差の不変集合を求める。

### シミュレーション条件

- ✓ 観測ノイズ (標準偏差  $\sigma_v = \sqrt{R_v}$  のホワイトノイズ) で駆動されるシステムにおける状態推定を行う。
- ✓ カルマンフィルタおよび MHE の性能を初期値応答より比較する。
- ✓ MHE の推定誤差が推定誤差集合内を遷移することを示す。

## Moving Horizon Estimation

✓ 過去の推定値と出力を用いて最適化計算より現在の推定値を得る手法である (Fig. 3)。

Pass estimation between overlapping data windows

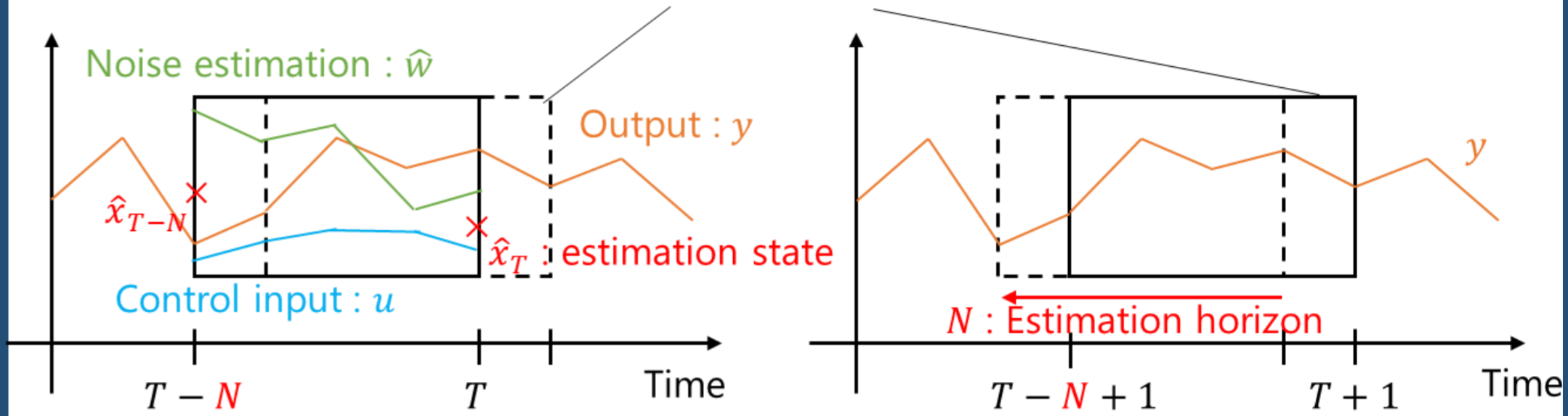


Fig. 3 Overview of Moving Horizon Estimation

$$\min_{\hat{x}_{T-N|T}} \|\hat{x}_{T-N|T} - x_{T-N|T}\|_{P^{-1}}^2 - \|y - O\hat{x}_{T-N|T}\|_{W^{-1}}^2 + \sum_{k=T-N}^T \|\hat{v}_k\|_{R^{-1}}^2$$

$$\text{s.t. } \hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k, y_k = C\hat{x}_k + \hat{v}_k$$

### 誤差ダイナミクスと集合

✓ 誤差の動特性  $e_t$  から mRPI set を導出する。

$$e_{t+1} = 2A^N H^{-1} A (A^N)^{-1} e_t - 2A^N H^{-1} c a^T \cdot \text{diag}(R^{-1}) v$$

$$= A_{err} e_t + Dv$$

$$e_t := x_t - \hat{x}_t, v_k \in \mathcal{V} := \{v_k \in \mathbb{R}^r \mid -3\sqrt{R_v} \leq v_k \leq 3\sqrt{R_v}\}$$

### ケーススタディ

$\Delta\delta_0^2 = 5\pi/100$  とし初期値応答を観察し、カルマンフィルタと MHE の状態推定結果を比較し、加えて誤差集合を示す。

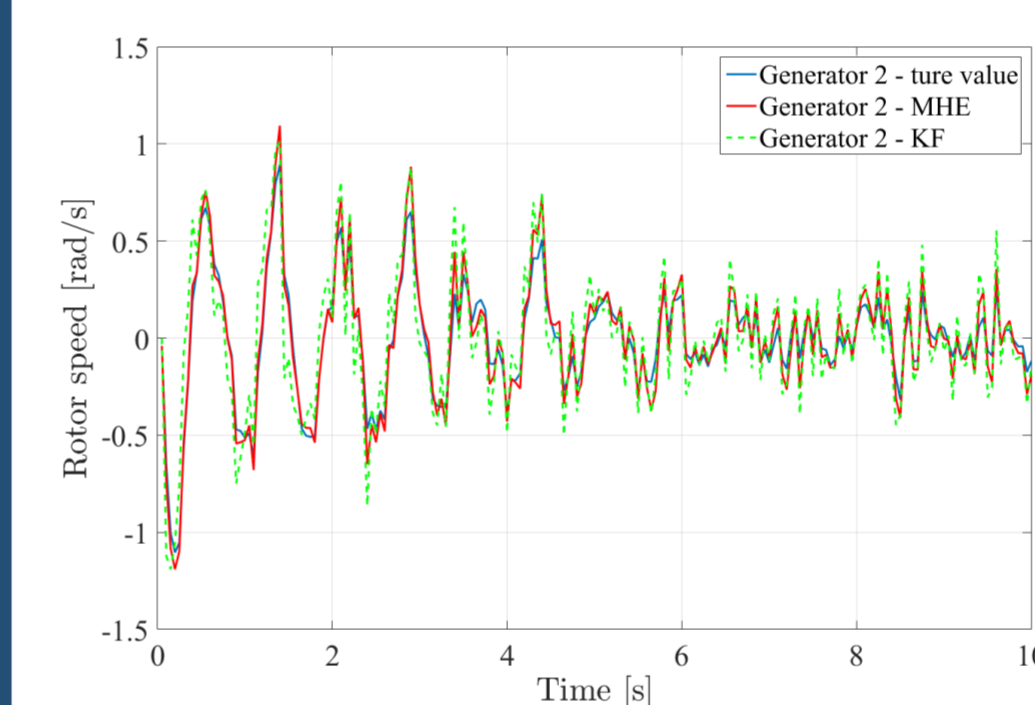


Fig. 4 Initial time response

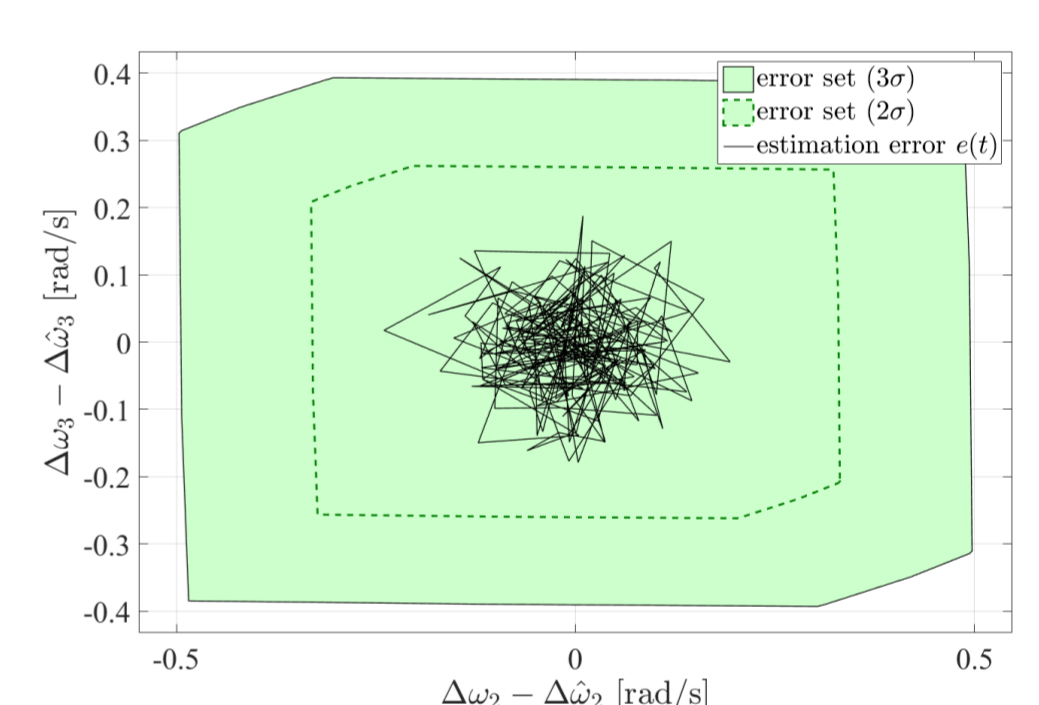


Fig. 5 RPI error set

✓ Fig. 4 は発電機2の出力を示し、カルマンフィルタよりMHEの方がよりよく推定できていることを示し、Fig. 5 より推定誤差の時間応答 (黒線) が集合内を遷移することを確認した。

## 4. おわりに

### まとめ

- ✓ 発電機3機を縮約した電力システムにおいてMHEとカルマンフィルタで状態推定を行い、MHEの方がカルマンフィルタに比べ高精度に推定できることを確認した。
- ✓ 推定誤差の動特性から、誤差の不変集合を導出し、推定値とその存在する範囲を同時にモニタリングを行った。

### 今後の展望

- ✓ MHEおよび推定誤差の不変集合を用いて、推定誤差を考慮した出力フィードバックモデル予測制御を構築し、電力システムに応用する。

### 参考文献

- [1] Y. F. Huang et al., "State Estimation in Electric Power Grids: Meeting New Challenges Presented by the Requirements of the Future Grid", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 29, no. 5, pp. 33-43, 2012
- [2] A. Chakrabarti, "Power System Dynamics and Simulation", *PHI*, 2013
- [3] A. Voelker et al., "Moving horizon estimation: Error dynamics and bounding error sets for robust control", *Automatica*, vol. 49, no. 4, pp. 943-948, 2013