

1. はじめに

安全なエネルギー供給, 温室効果ガスの排出削減のために, 再生可能エネルギーの大量導入が進められている^[1](Fig. 1).

- ▶ 発電量が不安定であるため, 電力系統の**安定性を損なう**.
- ▶ 火力発電の発電割合が減少し**系統慣性が減少**するため, 周波数変動が生じやすくなる^[1].

研究目的

- H²制御性能を改善するゲイン調整法を明らかにし, LMI に基づく逐次最適化が可能なことを示す.
- 導いた調整法を負荷周波数制御に適用しその特徴を調べる.

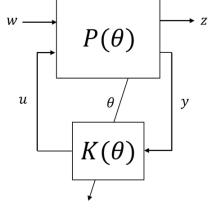
- ✓ 電力系統の慣性変動に対してH²制御性能を保証する**ゲインスケジュールド (GS) LFC**を提案.

2. H²性能を改善するゲイン調整法

制御対象に応じてH²性能を改善するPI制御則を設計する.

変数変換をした状態方程式

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum \theta_i A_i x(t) + \sum \theta_i B_{1i} w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) \end{aligned}$$



LMIに基づく逐次最適化

閉ループ系のH²ノルム条件

$Y = K\tilde{C}_2 X$ とにおいて以下の内部構造を導入^[2].

$$X = \begin{bmatrix} X_1 & X_1 N \\ X_1 N & X_2 \end{bmatrix}, Y_i = [Y_{1i} \quad Y_{2i} N]$$

閉ループ系のH²ノルムが γ 未満になる条件

$$\begin{bmatrix} \text{Her}[\tilde{A}X + \tilde{B}_2 Y_i] & \tilde{B}_1 \\ * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad \begin{bmatrix} W_i & \tilde{C}_1 X + \tilde{D}_{12} Y_i \\ * & X \end{bmatrix} < 0$$

$$\text{Trace}\{W_i\} < \gamma^2, \quad X > 0, \quad W_i > 0$$

逐次最適化による求解

Step1: LMIが実行可能解 $X_1, X_2, Y_{1i}, W_i, \gamma$ をもつように N を与える.

Step2: N を固定して γ を最小化するように, X_1, X_2, Y_{1i}, W_i を最適化. ($\gamma \rightarrow \gamma_{opt}$)

Step3: X_1, Y_1, γ_{opt} を固定して $\lambda_{max}(X)$ を最小化するように N, X_2, W_i を最適化.

γ が収束するまでStep2とStep3を繰り返す.

制御器ゲイン K はつぎのように求められる.

$$[K \quad 0] = K\tilde{C} = YX^{-1}$$

Fig. 2 Optimization overview

Step1を満たすNの与え方

$\tilde{A}_i + \tilde{B}_2 K_i \tilde{C}_2$ を満たす制御器ゲイン K が分かっているとす. 以下のLyapunov方程式の解 \tilde{X} から初期値 N はつぎのように与えられる.

$$(\tilde{A}_i + \tilde{B}_2 K_i \tilde{C}_2)\tilde{X} + \tilde{X}(\tilde{A}_i + \tilde{B}_2 K_i \tilde{C}_2)^T < 0,$$

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \tilde{X}_{12} \\ \tilde{X}_{12}^T & \tilde{X}_{22} \end{bmatrix} > 0 \quad (\tilde{X}_{11} > 0)$$

$$N = \tilde{X}_{11}^{-1} \tilde{X}_{12}$$

3. 負荷周波数制御モデル

負荷周波数制御(Load Frequency Control : LFC)

- ✓ 電力系統の**周波数変動を抑制**するための制御. 様々な周期をもつ需要変動の内3~20分程度の周期をもつ変動に対処する.
- ✓ 電力需要量と供給量を一致させることにより, 周波数変動を抑制する.

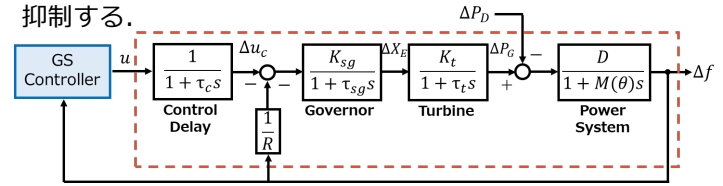


Fig. 3 : LFC model

Table 1 : Parameters

Sign	Definition		
ΔP_i	Integral command input	Δf	Frequency variation
Δu_c	Command input to generator	u	Control input
ΔX_E	Turbine valve displacement	ΔP_D	Load demand
ΔP_G	Supplied active power		

- ▶ 発電量 ΔP_G と負荷変動 ΔP_D のインバランスが周波数変動 Δf として表れる.

$$\text{周波数変動} : \Delta f = \frac{D}{1+Ms} (\Delta P_G - \Delta P_D)$$

- ▶ 電力系統モデルに対して**H²制御性能を改善するPI制御器を設計**.

4. 負荷周波数制御への応用

文献値ゲインと初期値ゲインで比較を行い, 白色雑音を想定したシミュレーションにより, **周波数変動の抑制効果を確認**する.

比較対象

Case 1 : 従来法であるI制御

Case 2 : 慣性変動に対応する**GS-PI制御**

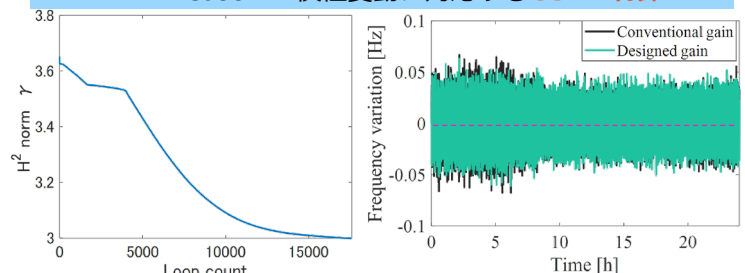


Fig. 4 H² norm transition

Fig. 5 Frequency variation

Table 2 : Simulation results

	Maximum value of frequency variation [Hz]	RMS value of frequency variation [Hz]
Fixed controller	5.20×10^{-2}	1.78×10^{-6}
GS controller	4.82×10^{-2}	1.73×10^{-6}
Ratio	92.7 %	97.6 %

- ▶ 逐次最適化によって閉ループ系のH²ノルムを抑制した(Fig. 6).
- ▶ 提案法により制御性能が改善され, **周波数変動の最大値とRMS値の抑制**されることを確認した(Fig. 7, Table 2).

5. まとめと今後の展望

- ▶ 慣性変動に応じてPIゲインを調整するGS-LFCを提案し, 周波数変動の抑制効果を示した.
- ▶ 今後は負荷変動に対処するためのGS-LFCを検討する予定である.
- ▶ 本研究はJSPS科研費 JP18K04209 により行われた. 記して謝意を表します.

参考文献

- [1] ビーター・メルク, 桑畑玲奈, ステファン・レーベ, 分山達也, 市村将太, ディミトリ・ベシア, "2030年日本における変動型自然エネルギーの大量導入と電力システムの安定性分析", 公益財団法人自然エネルギー財団研究レポート, 2018.
- [2] E.Prempain, I.postlethwait, Static output feedback stabilization with H[∞] performance for a class of plants, Systems & Control Letters 43, 159/166 (2001).