

H[∞]性能改善に着目したゲイン調整法の検討

Study of gain tuning method for improve H[∞] performance

児島研究室 M2 谷口将大

1. はじめに

電力系統への再生可能エネルギー大量導入が進んでいる。
課題点^[1]

- 発電量が環境依存し、系統の安定性に問題がある。
- 系統の慣性量が減少し、周波数変動が生じやすくなる。



Fig. 1 Renewable energy

研究目的

- BMI (双線形行列不等式)で定式化された定数出力フィードバック問題を解き、H[∞]制御性能を良好にするゲイン調整法を明らかにする。
- 提案法を負荷周波数制御系に適用し、達成可能な性能を明らかにする。

2. H[∞]性能改善に着目したゲイン調整法

制御対象に応じてH[∞]性能改善を達成する制御則を導く

□ 制御系の観測行列が $C_2 = [I \ 0]$ となるように等価変換を行う^[2].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) = C_1x(t) + D_{11}w(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) = C_2x(t) \end{cases}$$

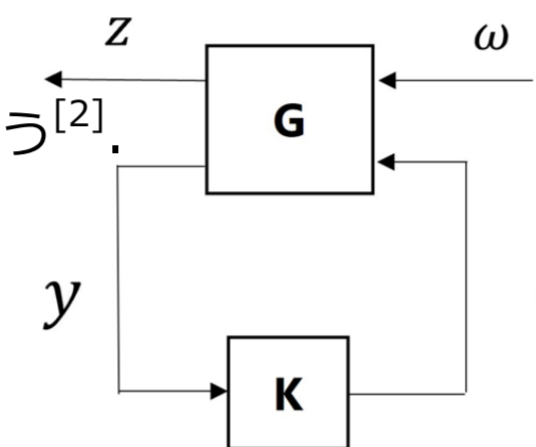


Fig. 2 Generalized plant

□ 閉ループ系の H[∞]ノルムが γ 未満となる条件

制御対象の外乱 w から評価出力 z までの H[∞]ノルムを γ 未満にする条件は、決定変数を用いて、以下の行列不等式で表現することができる^[2,3]。そして本条件は、BMI条件であるため、それぞれの変数を逐次的に最適化することで求解する。

Find $X_1 > 0, X_2, Y_1, N, \gamma$:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 & X_1N \\ N^T X_1 & X_2 \end{bmatrix} > 0, \quad Y = [Y_1 \ Y_1N],$$

$$\begin{bmatrix} (AX + B_2Y) + & (*) & (*) \\ (AX + B_2Y)^T & -\gamma \cdot I & (*) \\ C_1X + D_{12}Y & B_1^T & D_{11}^T - \gamma \cdot I \end{bmatrix} < 0$$

制御則: $[K \ 0] = KC_2 = YX^{-1}$

- 実行可能解 X_1, X_2, Y_1, γ をもつように変数 N を与える。
- γ を最小化するように X_1, X_2, Y_1, γ を最適化。
(N は固定)
- 2.で得た制御器ゲイン K を用いて、ある条件を満たす新たな変数 N を与える。
- γ が減少し、収束するまで2.と3.を繰り返す。

STEP 1で与える変数 N の決定方法

初期制御ゲイン \tilde{K} は閉ループ系 $A + B_2\tilde{K}C_2$ を安定にする制御器ゲインとする。このとき、行列不等式が実行可能な変数 N は、以下のLyapunov方程式

$$Q > 0, \quad (A + B_2\tilde{K}C_2)\tilde{X} + \tilde{X}(A + B_2\tilde{K}C_2)^T + B_1B_1^T + Q = 0,$$

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

の解 \tilde{X} を用いて $N = \tilde{X}_{11}^{-1}\tilde{X}_{12}$ で与えることができる。

STEP 3で与える変数 N の決定方法

STEP2で決定される X, Y から制御器ゲインを求め、その閉ループ系に対して、以下の H[∞]ノルム条件を最適化する変数 N を決定する。

$$\hat{A}_c := A + B_2\tilde{K}C_2, \quad \hat{C}_c := C_1 + D_{12}\tilde{K}C_2$$

$$\min_{\hat{X} > 0} \gamma \quad \begin{bmatrix} \hat{A}_c\hat{X} + \hat{X}\hat{A}_c^T & (*) & (*) \\ \hat{C}_c\hat{X} & -\gamma \cdot I & (*) \\ B_1^T & D_{11}^T & -\gamma \cdot I \end{bmatrix} < 0, \quad \hat{X} := \begin{bmatrix} \hat{X}_{11} & \hat{X}_{12} \\ \hat{X}_{12}^T & \hat{X}_{22} \end{bmatrix} > 0$$

を満たす変数 \hat{X} を用いて $N = \hat{X}_{11}^{-1}\hat{X}_{12}$ で与えることができる。

3. 負荷周波数制御系とゲインスケジュールド制御

- 電力需給の差で表現される周波数変動の抑制を目的としたフィードバック制御。

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

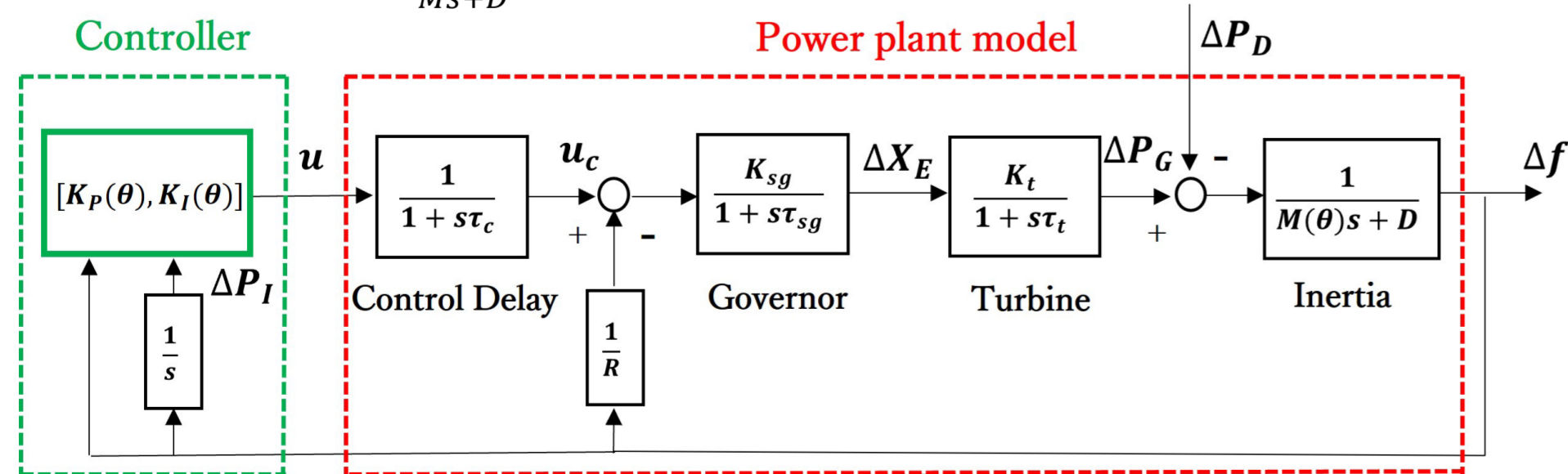


Fig. 3 LFC model^[4]

参考文献

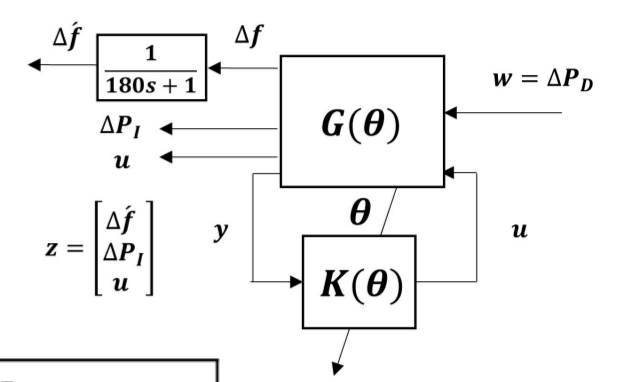
- [1] 経済産業省 自然エネルギー庁, "エネルギー白書 2022", 経済産業省 自然エネルギー 庁, 2022
- [2] E. Prempain, I. Postlethwaite, "Static output feedback stabilization with H[∞] performance for a class of plants", Systems & Control Letters 43, 159/166, 2001
- [3] 蛭原義雄, "LMIによるシステム制御 ロバスト制御系設計のための体系的アプローチ", 森北出版株式会社, 2012
- [4] S.Sivanagaraju, and G.Sreenivasan, "Power System Operation and Control", Pearson Education India, pp. 255-362, 2009

- 火力機LFCモデルに対して、H[∞]性能改善を達成するGS制御則を設計する。
- 外乱 $w(t) := \Delta P_D(t)$, 評価出力 $z(t) := [\Delta f(t) \ \Delta P_I(t) \ u(t)]^T$
- LPVシステムにおけるH[∞]ノルム条件はパラメータ依存の条件として表現される。
→ Bernstein 基底上の表現より、パラメータ非依存の条件式に緩和する。

□ GS制御則 ($K(\theta) = K_0 + \theta \cdot K_1, \theta \in [0, 1]$)

Case 1 提案法によりGS制御則を決定する。

Case 2 右図のように周波数変動の評価出力にLPFフィルタを導入し、提案法によりGS制御則を決定する。



	Control gain K_0	Control gain K_1
Case 1	$K_0 = [-0.0051 \ -0.0998]$	$K_1 = [-0.0347 \ -0.0021]$
Case 2	$K_0 = [-0.0175 \ -0.0972]$	$K_1 = [-0.0971 \ 0.0102]$

- Case 1, 2どちらの場合も H[∞]性能改善を確認できる。(Case 1 < Case 2)
- Case 2の方が計算回数が多い。
→ フィルタ設計により、状態の次数が大きくなる。

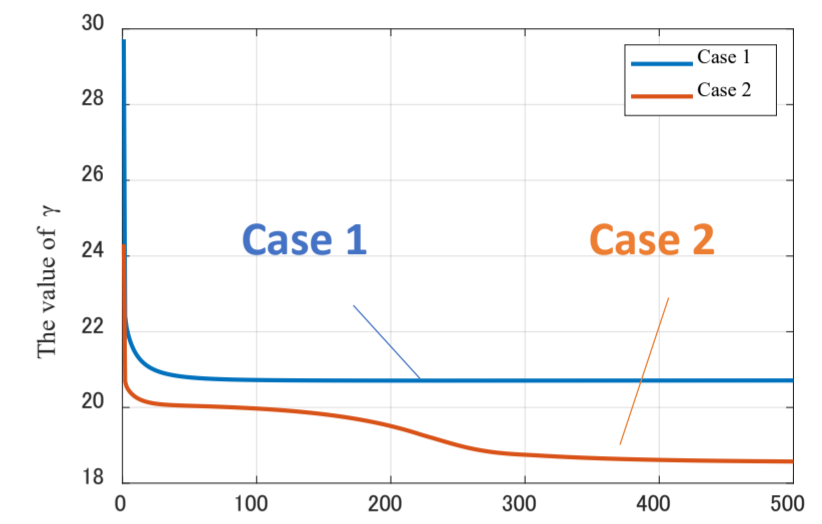


Fig. 4 Change in the value of γ

4. シミュレーション

- 文献値 $[K_P \ K_I] = [0 \ -0.150]$ ^[4] を初期制御則として設定し、ゲイン調整法によりGS制御則を設計する。
- シミュレーションで用いる需要変動 ΔP_D は白色雑音を元に生成する。(Fig.5)
- 文献値とGS制御則それぞれの場合でLFCを構成し、周波数変動の抑制効果を比較する。(Fig.7)

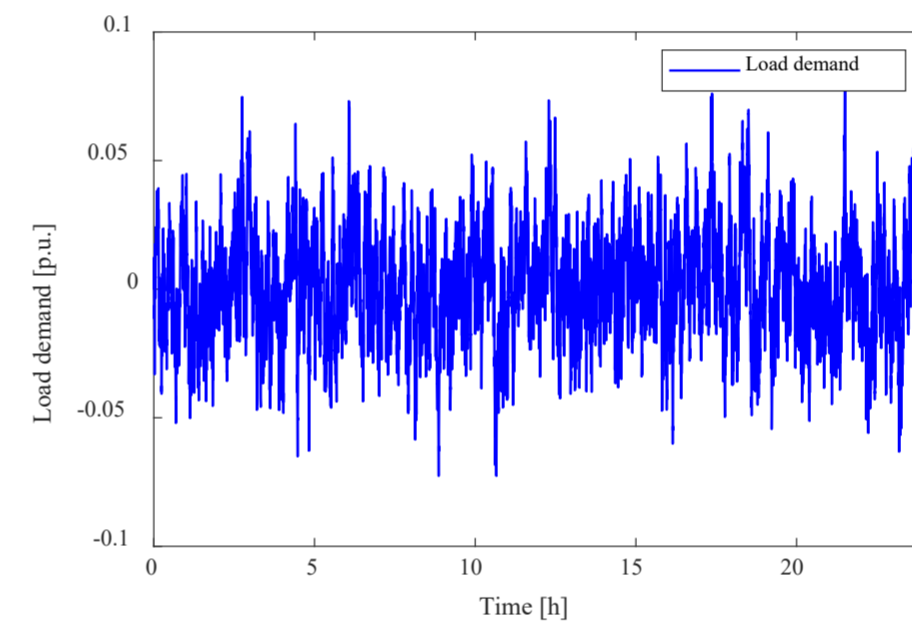


Fig. 5 Load demand ΔP_D

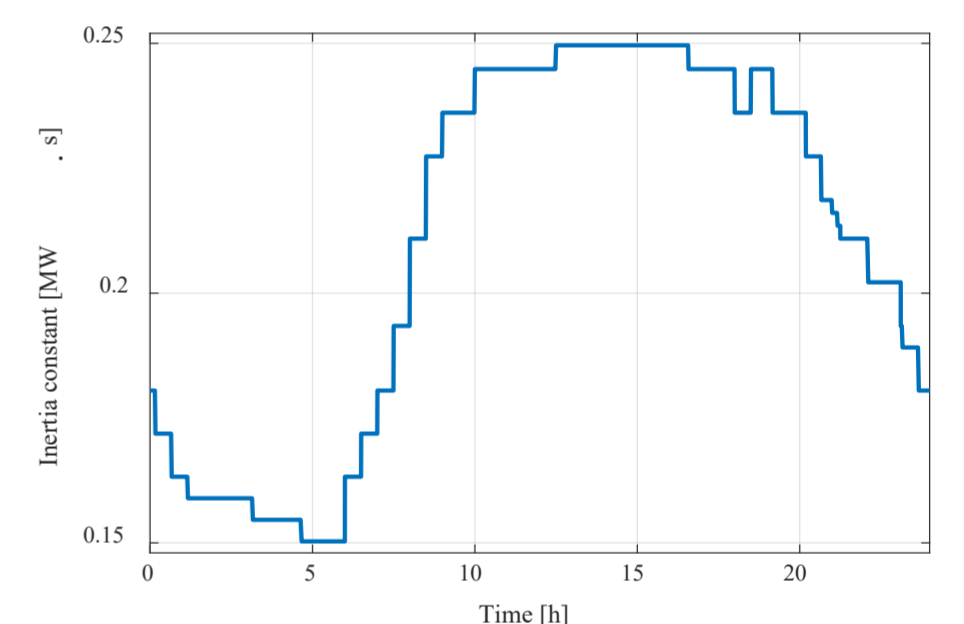


Fig. 6 Inertia constant

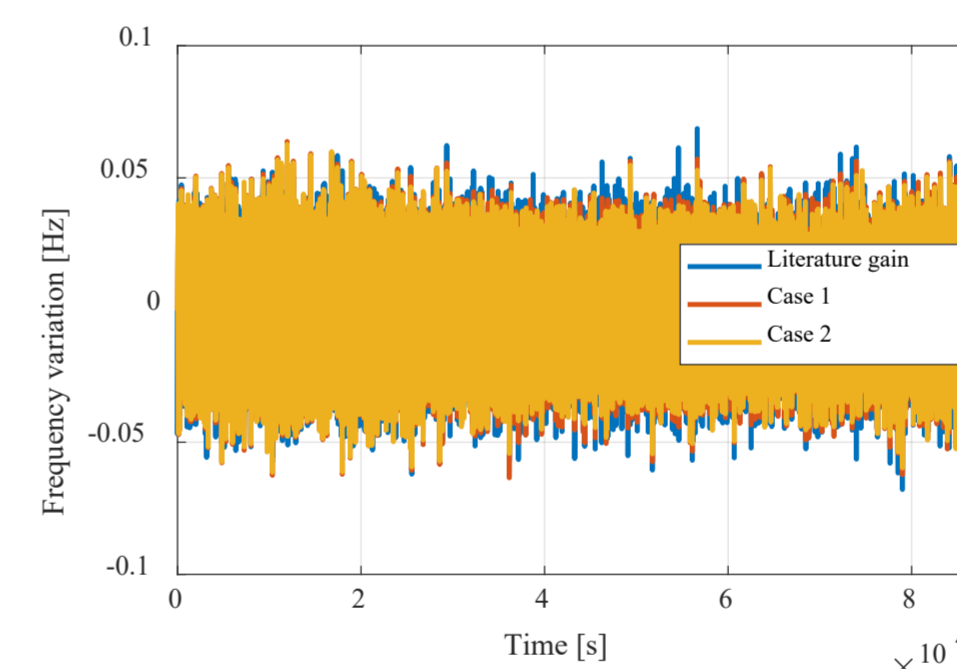


Fig. 7 Comparison of frequency variation Δf

Table 1 RMS value

Control gain	RMS value [Hz]
$K = [0 \ -0.150]$	0.0149
Case 1 (LPV法)	0.0143
Case 2 (LPV法, フィルタ設計)	0.0138

$$\Delta f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta f_i^2}$$

- 文献値ゲインのRMS値を基準とすると、どちらの場合でも周波数変動抑制効果を確認できる。(Table 1)
- Case 1と2を比較すると、Case 2の方が抑制効果大きいことから、周波数特性を考慮した設計も比較的容易に行うことができ、特定の周波数帯においてより性能改善される設計が可能であるといえる。

5. まとめ・今後の展望

まとめ

- 定数出力FB問題から、H[∞]性能改善に着目したゲイン調整法を提案した。
- 提案法をGS制御則設計に発展させ、LPVモデルとして定めたLFC系において達成可能な性能を評価した。

今後の展望

- 保守性を軽減する設計検討や逐次最適化計算の再検討を行う。
- 提案法の一般的な性能評価 (LFC系以外の一般系に対しても有効かどうか)