

GFL型およびGFM型インバータ電源による電力系統の dq インピーダンス解析モデルを用いた安定余裕評価

L506-C1 6-236

三宅 諒汰*, 吉川 涼太, 井手 智也 (関西学院大学・産業技術総合研究所)
平瀬 祐子 (関西学院大学), 織原 大, 橋本 潤 (産業技術総合研究所)



0. 目次

1. 背景と目的
2. 解析インピーダンスの算出
3. 解析結果
 - 3.1. Grid + GFL型IBR
 - 3.2. Grid + GFM型IBR
 - 3.3. GFL + GFM型IBR
4. まとめ

1. 背景

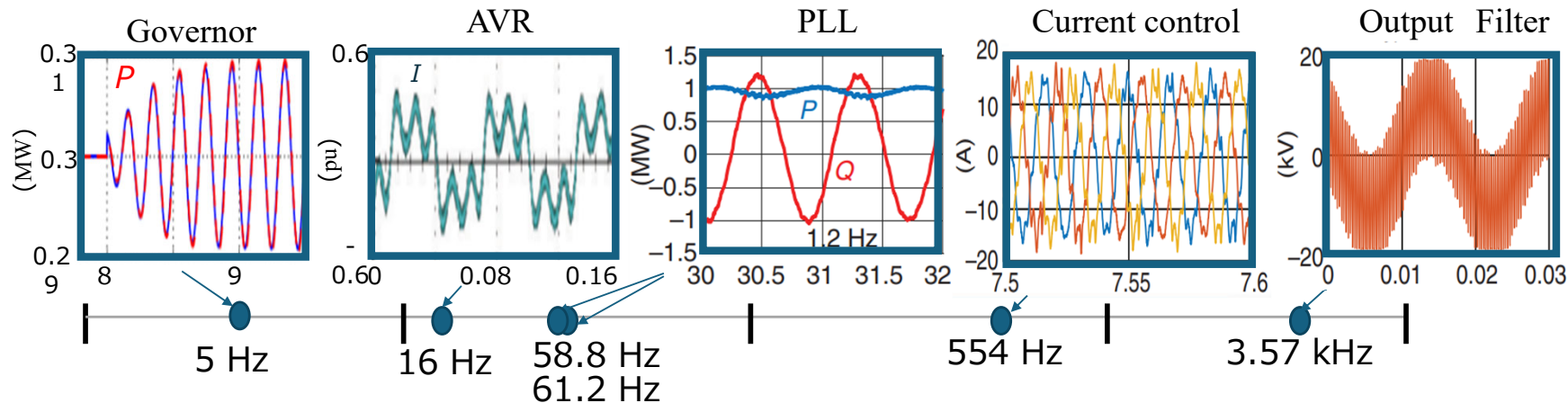
IBR起因による電力動揺

[Ref.]

NREL (10.1109/MELE.2020.3047166)

S. Chen (10.1109/TPEL.2025.3557035)

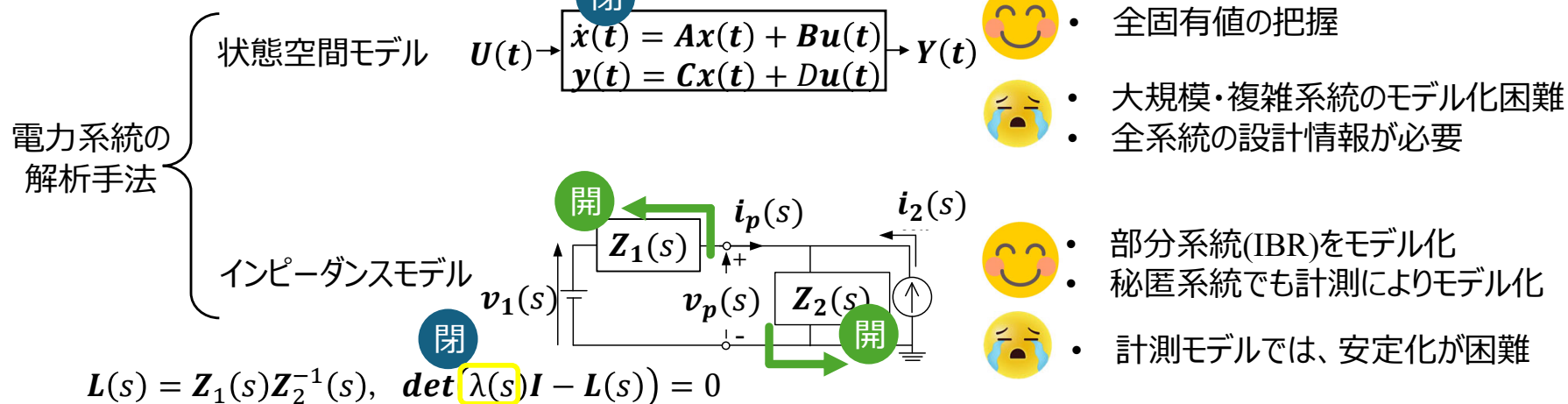
J. Wang (10.35833/MPCE.2024.000903)



- インバータベース電源(IBR)が大量導入され、IBR由来とされる電力動揺が発生
- 電力システムの解析および安定化指針が必要

1. 目的

電力系統の解析手法分類

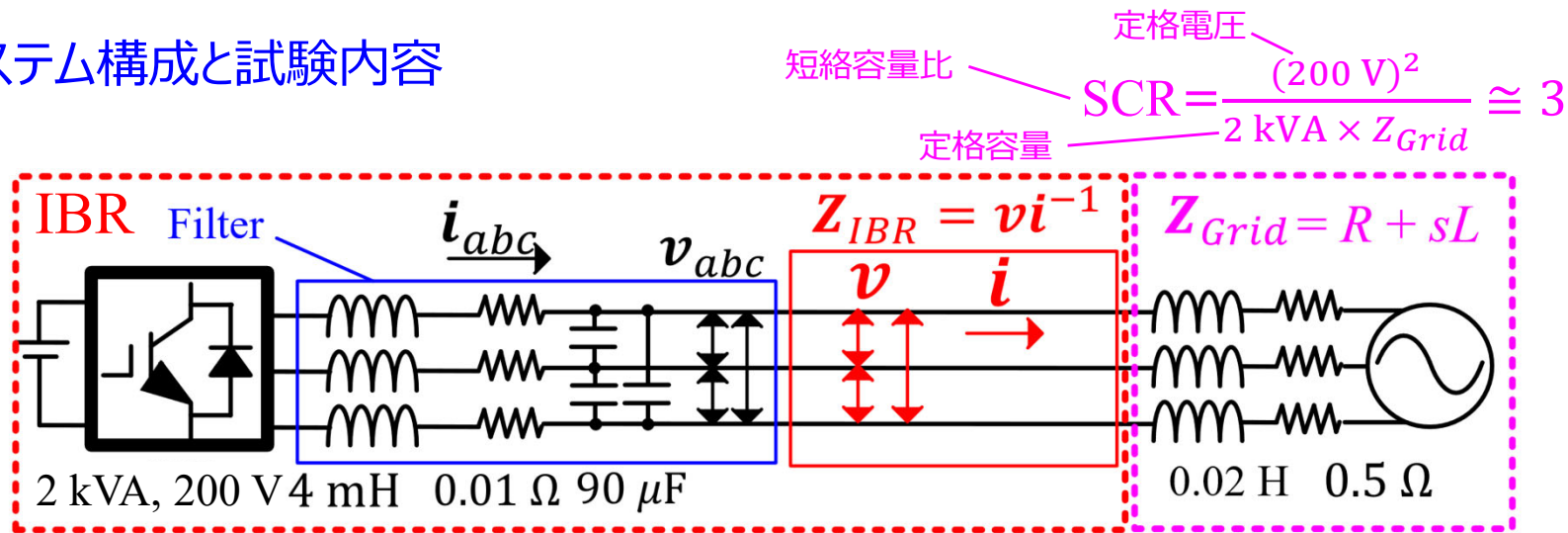


本研究の目的

- これまでに確立された計測インピーダンスではなく、解析的なインピーダンスを導出する。
- 標準的なIBRの解析インピーダンスから、系統安定化のためのパラメータ調整指針を示す。

2. 実施内容

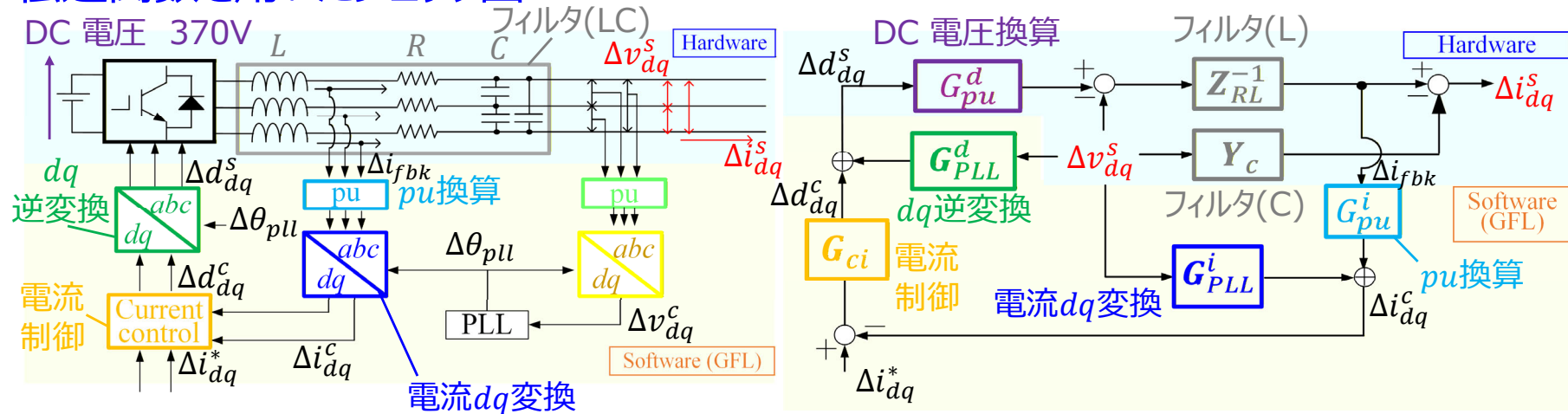
システム構成と試験内容



- IBR制御手法としてGrid Following (GFL) 型制御とGrid Forming (GFM) 型制御を考える
- 各IBRを弱系統に接続して、インピーダンスを算出する。
- 算出インピーダンスどうしを組み合わせたマイクログリッド (MG)の安定性を解析。

2.解析インピーダンス：GFL型IBR

伝達関数を用いたブロック図

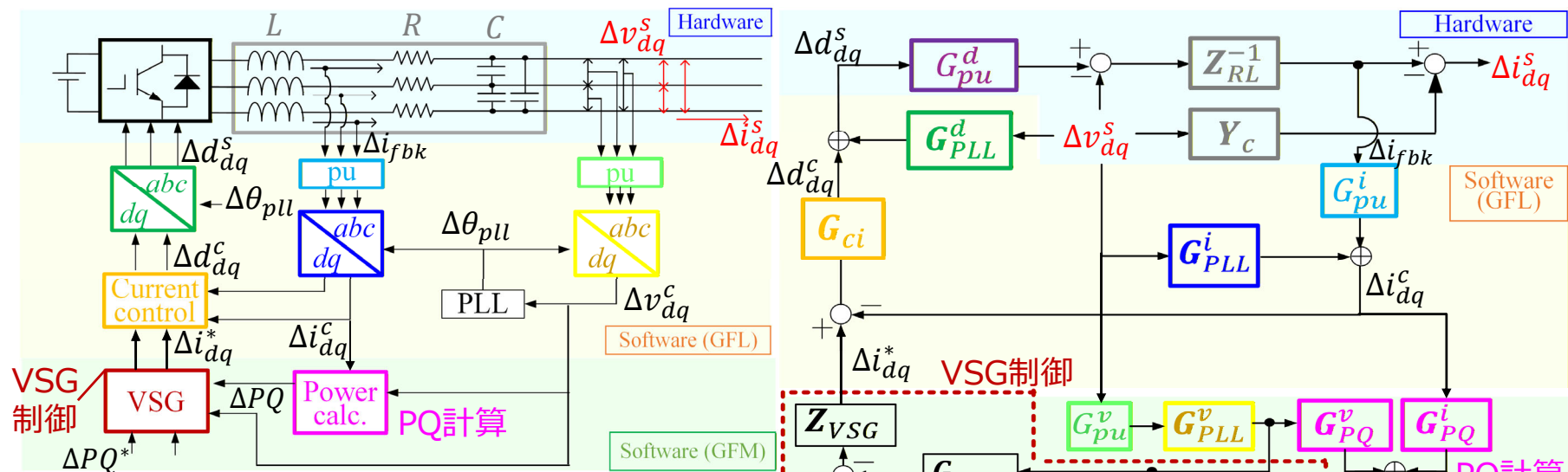


GFL型IBRの解析インピーダンス

$$\mathbf{Z}_{GFL} = \frac{\mathbf{Z}_{RL}(s) + G_{pu}^d G_{pu}^i G_{ci}(s)}{G_{pu}^d \left(\mathbf{G}_{PLL}^d(s) + G_{ci}(s) \left(-\mathbf{G}_{PLL}^i(s) - G_{pu}^i Y_c(s) \right) \right) - \mathbf{I} - Y_c(s) \mathbf{Z}_{RL}(s)}$$

2.解析インピーダンス：GFM型IBR

伝達関数を用いたブロック図



GFM型IBRの解析インピーダンス

$$\mathbf{Z}_{GFM} = \text{num}/\text{den}$$

$$\text{num} = -\left(\mathbf{Z}_{RL} + \mathbf{G}_{pu}^d \left(\mathbf{G}_{ci} \mathbf{Z}_{VSG} \mathbf{G}_{VSG}^\delta \mathbf{G}_{VSG}^{PQ} \mathbf{G}_{pu}^i \mathbf{G}_{pu}^v \mathbf{G}_{PQ}^i + \mathbf{G}_{pu}^i \mathbf{G}_{ci} \right)\right),$$

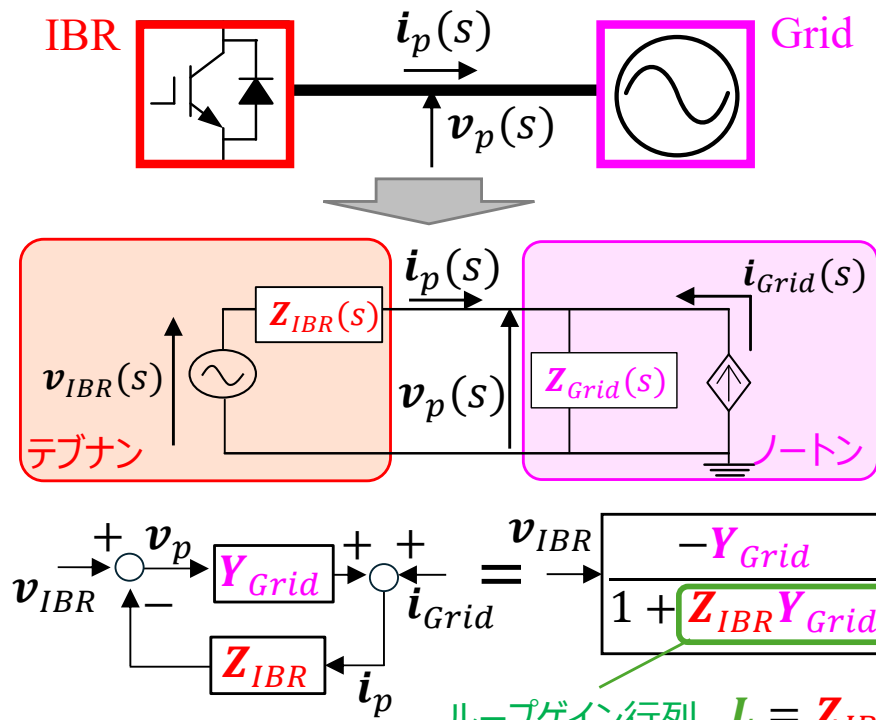
$$\text{den} = \mathbf{I} + \mathbf{Z}_{RL} - \mathbf{G}_{pu}^d \mathbf{G}_{PLL}^d$$

$$- \mathbf{G}_{pu}^d \mathbf{G}_{ci} \left(\mathbf{Z}_{VSG} \left(\mathbf{G}_{VSG}^\delta \mathbf{G}_{VSG}^{PQ} \left(\mathbf{G}_{pu}^i \mathbf{G}_{pu}^v \left(-\mathbf{G}_{PQ}^i \mathbf{Y}_c - \mathbf{G}_{PQ}^i \mathbf{G}_{PLL}^i - \mathbf{G}_{PQ}^v \mathbf{G}_{PLL}^v \right) \right) + \mathbf{G}_{pu}^v \left(-\mathbf{G}_{VSG}^\delta \mathbf{G}_{VSG}^v \mathbf{G}_{PLL}^v - \mathbf{G}_{VFLT}^v \mathbf{G}_{PLL}^v \right) \right) - \mathbf{G}_{pu}^d \mathbf{G}_{pu}^i \left(-\mathbf{Y}_c - \mathbf{G}_{PLL}^i \right) \right).$$

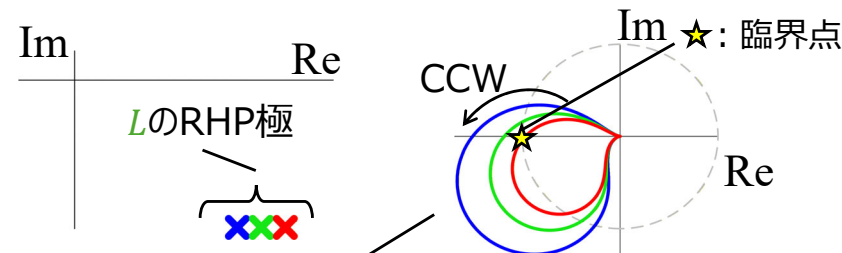
2.解析インピーダンス：一般化ナイキスト基準 (GNC)

$$L = \frac{0.5}{(s - k + j)(0.5s + 1)}$$

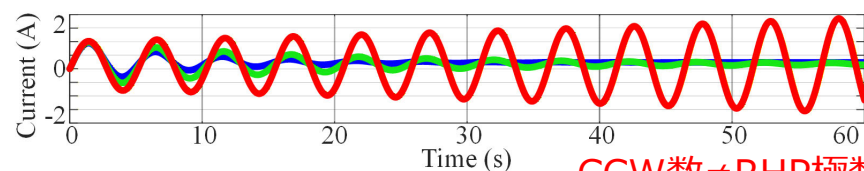
インピーダンスモデルに基づく解析の特徴



ループゲイン行列 $L = Z_{IBR} Z_{Grid}^{-1}$
 安定性は Z_{IBR} と Z_{Grid} によって決定



特性方程式 $\det(L - \lambda I) = 0$ を満たす固有値 (λ) の軌跡



CCW数 $\neq$ RHP極数
 より不安定

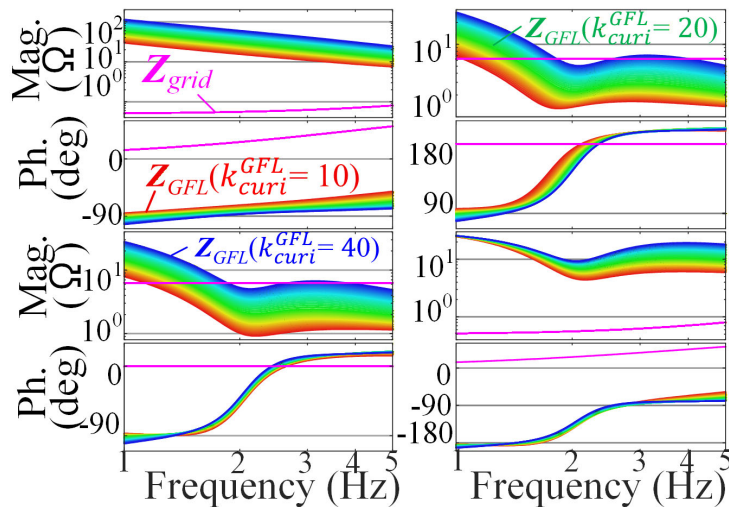
一般化ナイキスト基準 (GNC)

パラメータ(k)	青	緑	赤
CCW	1	1	0
RHP極	1	1	1

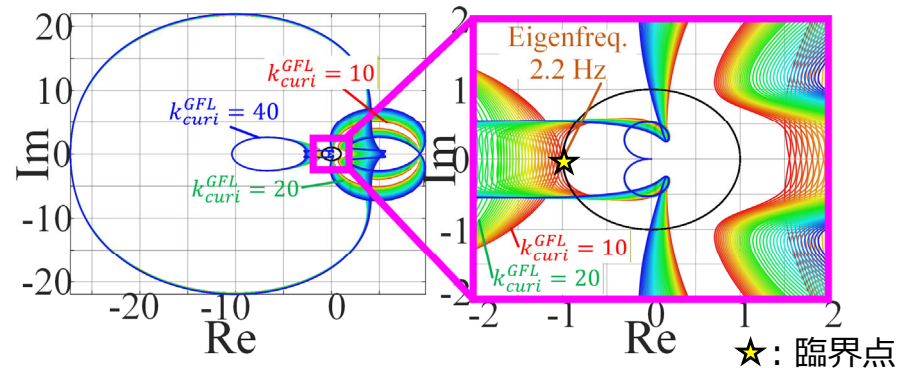
現実的にはGNCではなく
 固有値の臨界点への近接度を評価する

3. 解析結果：Grid + GFL型IBR

解析インピーダンス($\mathbf{Z}_{Grid}$, $\mathbf{Z}_{GFL}$)

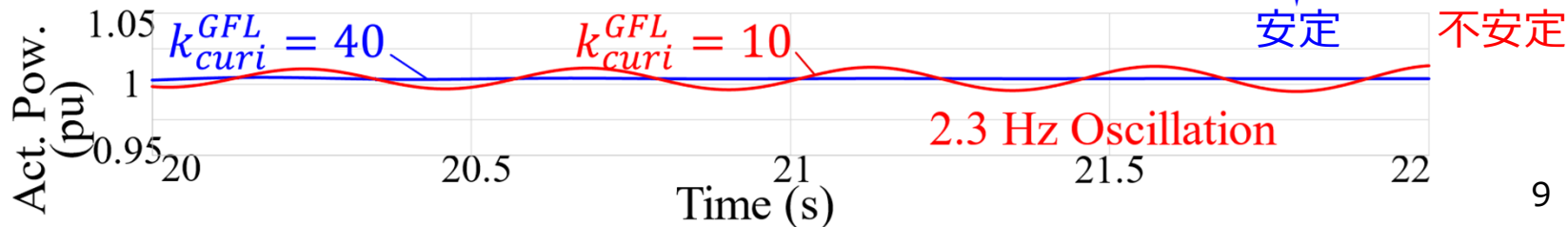


ループゲイン行列 $\mathbf{L} = \mathbf{Z}_{Grid} \mathbf{Z}_{GFL}^{-1}$ の固有値軌跡



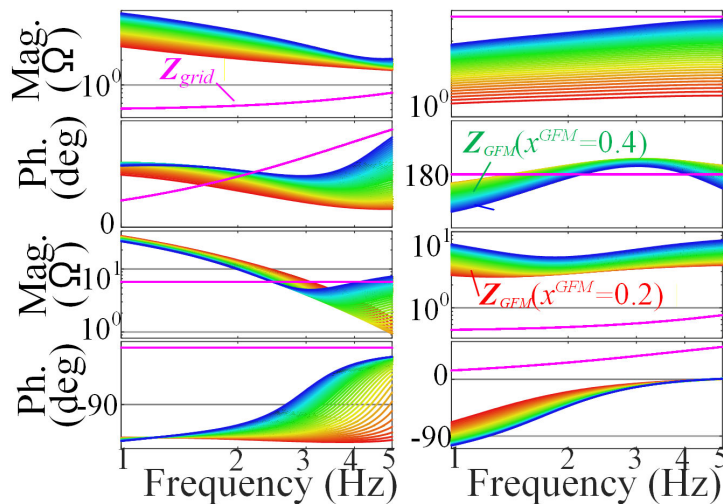
一般化ナイキスト基準(GNC)

k_{curi}^{GFL}	40	20	10
CCW	2	2	1
RHP極	2	2	2

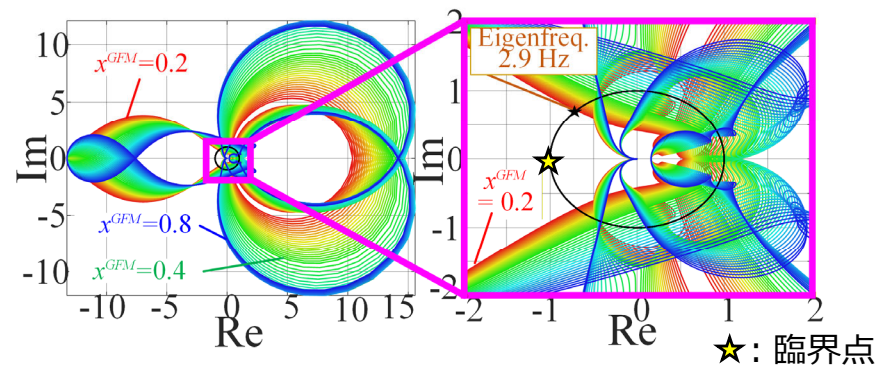


3. 解析結果：Grid + GFM型IBR

解析インピーダンス($\mathbf{Z}_{Grid}$, $\mathbf{Z}_{GFM}$)



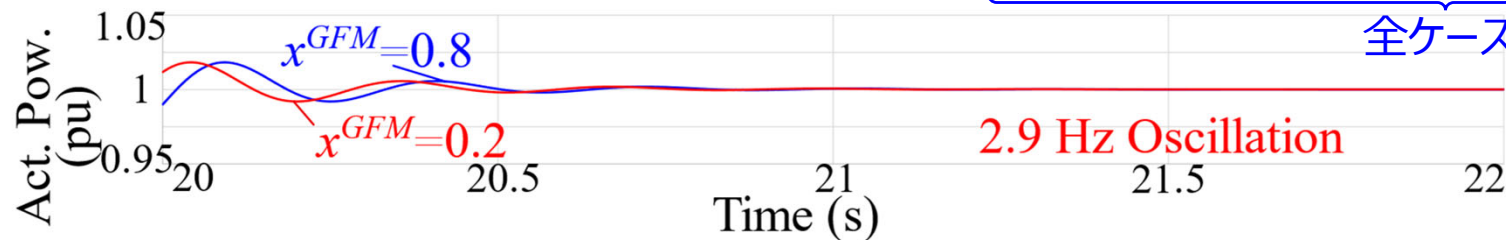
ループゲイン行列 $\mathbf{L} = \mathbf{Z}_{Grid} \mathbf{Z}_{GFM}^{-1}$ の固有値軌跡



一般化ナイキスト基準(GNC)

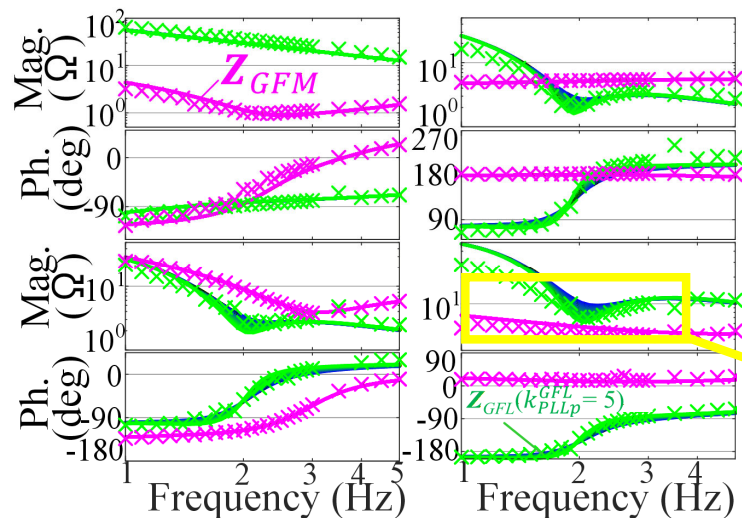
x^{GFM}	0.8	0.4	0.2
CCW	1	1	1
RHP極	1	1	1

全ケース安定

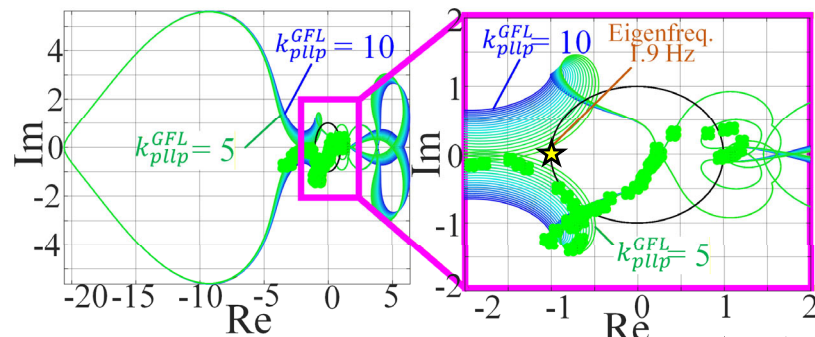


3. 解析結果：GFL型IBR + GFM型IBR

解析インピーダンス($\mathbf{Z}_{GFL}$, $\mathbf{Z}_{GFM}$)



ループゲイン $\mathbf{L} = \mathbf{Z}_{GFL} \mathbf{Z}_{GFM}^{-1}$ の固有値軌跡

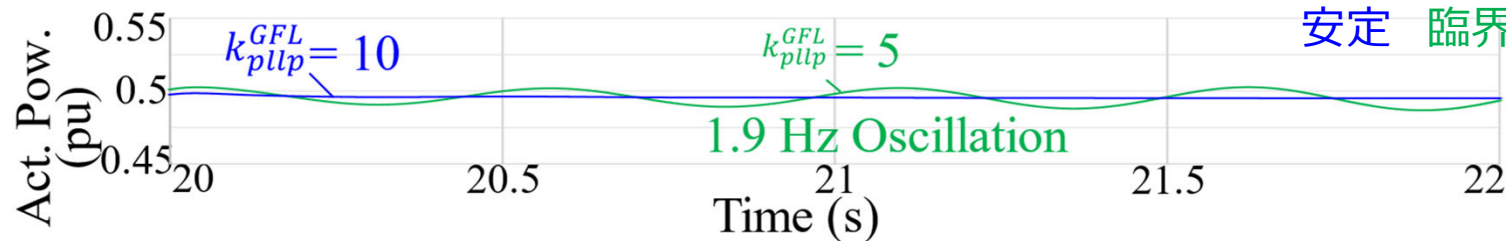


★: 臨界点

一般化ナイキスト基準(GNC)

k_{pll}^{GFL}	10	5
CCW	1	1
RHP極	1	1

安定 臨界点近傍



本研究の成果

- IBRの dq インピーダンスを解析的に算出し、制御パラメータの安定性への影響を評価した。
- 系統連系時には安定であったIBRでも、これらを並列してMGを構築すると、不安定となる可能性があることがわかった。

本研究成果の活用提案

- IBRメーカーが解析インピーダンスモデルを構築することで、SSO発生後にこれを制振可能なパラメータを適切・迅速に選定することができる。
- IBRメーカーの解析インピーダンスモデルを集約することで、系統運用開始前にSSOの可能性を発見し、発生を回避することができる。

ご静聴ありがとうございました

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業（JPNP22003）およびJSPS科研費助成（JP22K14246）を受けて得られた結果です。

三宅 諒汰: hiq38179@kwansei.ac.jp

