PCS

擬似慣性機能付きインバータの PHILシミュレーションに基づく周波数応答性能試験

喜久里 浩之*
織原 大
橋本 潤
高松 尚宏
大関 崇
（産業技術総合研究所）

松浦 隆祥
宮崎 聡
濱田 拓
宮崎 輝
（東京電力HD）

電気学会 電力技術/電力系統技術/
半導体電力変換 合同研究会
@壱岐文化ホール/オンライン
March 10-11, 2022

発表内容

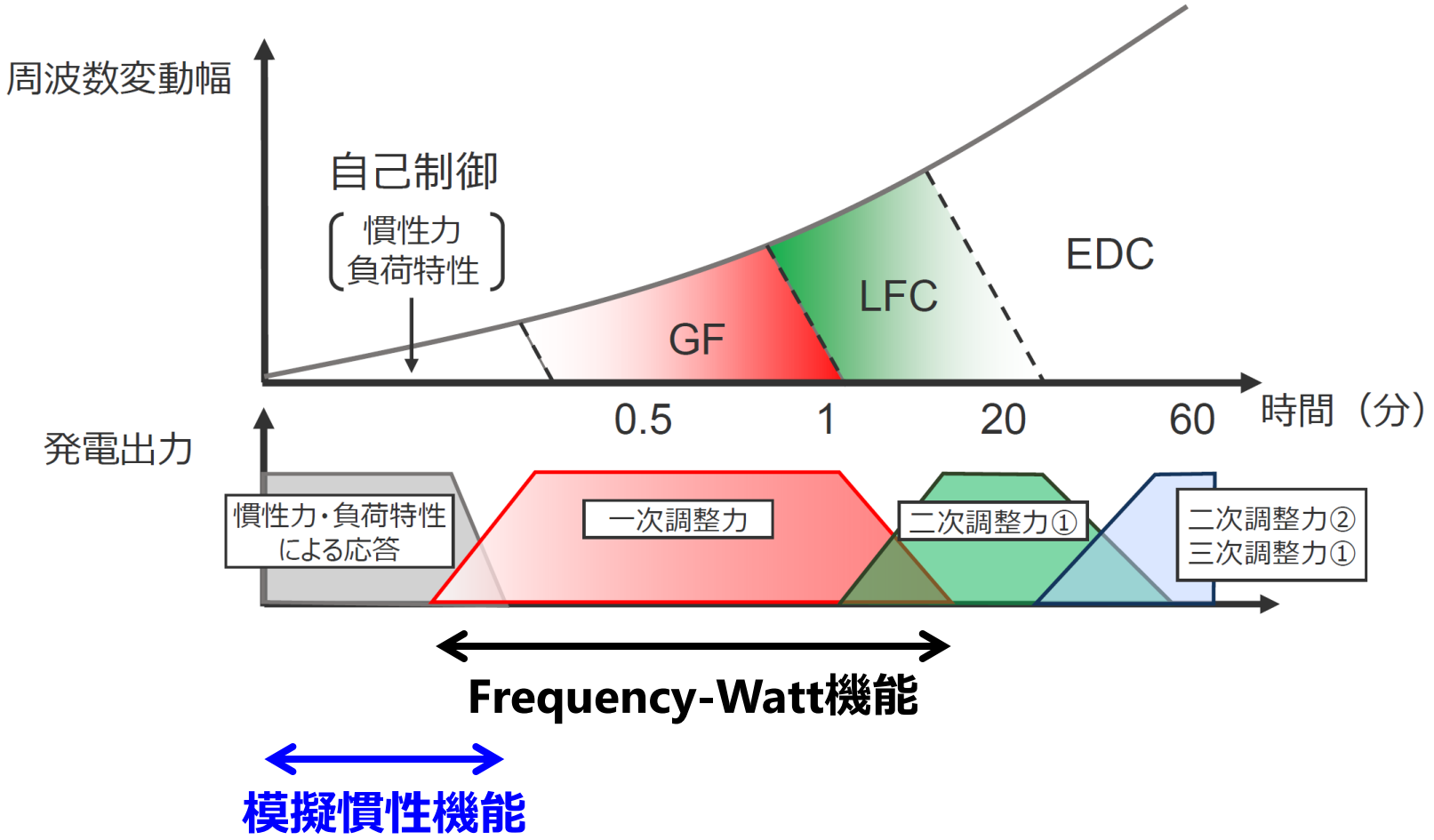
- PCSの擬似慣性機能の必要性
- 擬似慣性機能の性能評価で
  Power hardware-in-the-loop (PHIL) 試験を行う理由
- PHIL試験による擬似慣性機能付きPCSの検証

発表内容

- PCSの擬似慣性機能の必要性
- 擬似慣性機能の性能評価で
  Power hardware-in-the-loop (PHIL) 試験を行う理由
- PHIL試験による擬似慣性機能付きPCSの検証

PCSには同期発電機のアンシラリー機能を多く引き継ぐことが期待されている

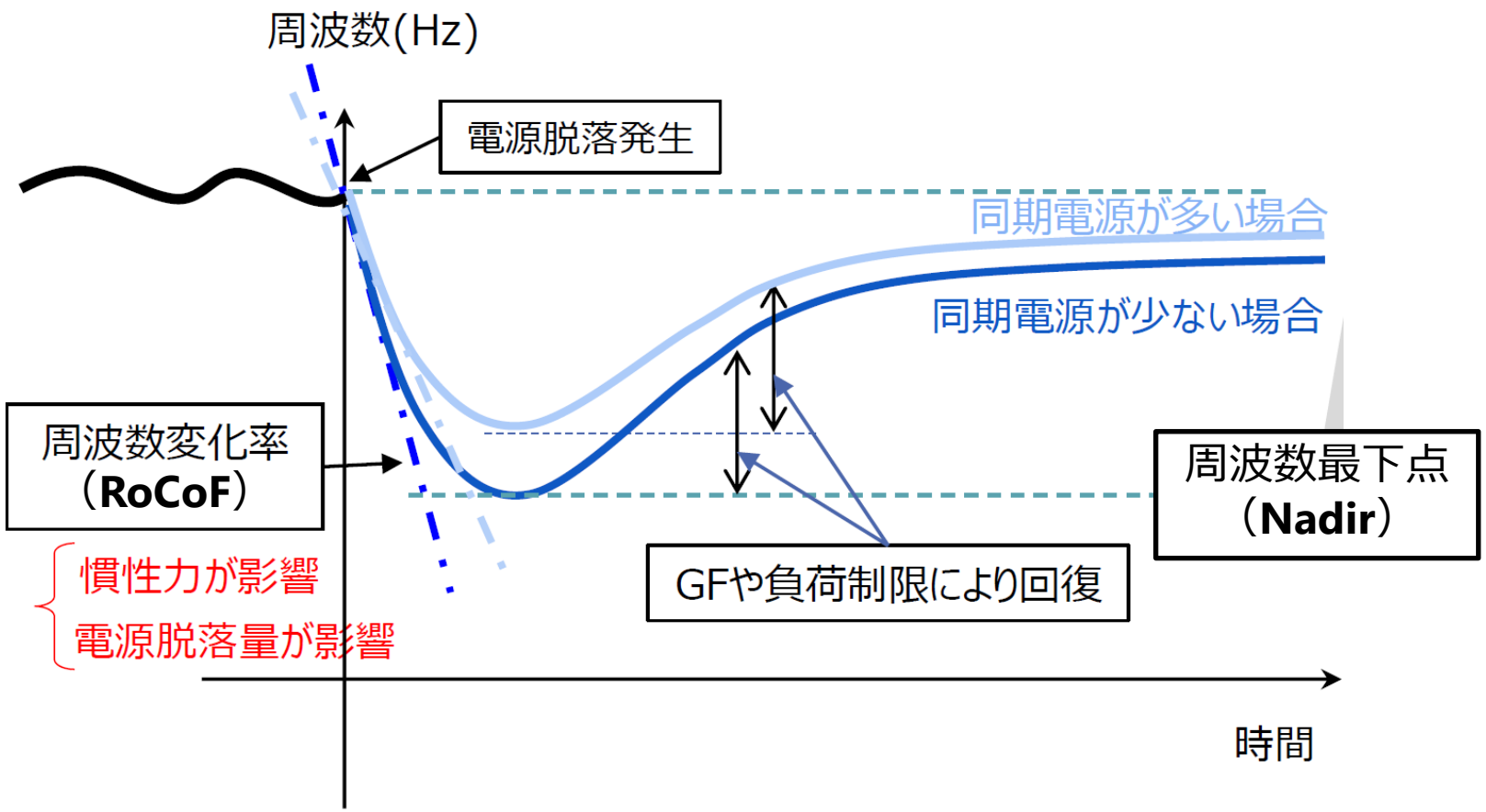
- PCSの擬似慣性機能：（１秒未満の）高速な周波数応答が想定されている



Source: 「OCCTO, 第19回需給調整市場検討小委員会 資料2-2, 2020.09.29」をもとに作成
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2020/2020_jukyuchousei_19_haifu.html

PCSの擬似慣性機能に期待される効果

- 系統事故時の周波数変化率（RoCoF）増加および周波数最下点（Nadir）低下の緩和
  - 分散電源の単独運転検出機能等の不要動作を回避



Source: 「OCCTO, 第55回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 資料3, 2020.10.27」をもとに作成
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/chousei_jukyu_55_haifu.html

発表内容

- PCSの擬似慣性機能の必要性
- 擬似慣性機能の性能評価で
  Power hardware-in-the-loop (PHIL) 試験を行う理由
- PHIL試験による擬似慣性機能付きPCSの検証

擬似慣性機能付きPCSを試験する目的

- 多数の擬似慣性機能が提案されている中で、
  - 実機への実装を確認
    - PCSメーカが試作機を製作し、FREAで試験を実施
  - 多様な系統条件における性能を確認
    - **PHIL試験環境を構築し、系統の周波数安定化への効果を評価（本発表の主題）**
  - 他機能との干渉を確認
    - JET試験を実施し、保護機能との干渉を検証（喜久里 他、令和4年全国大会）

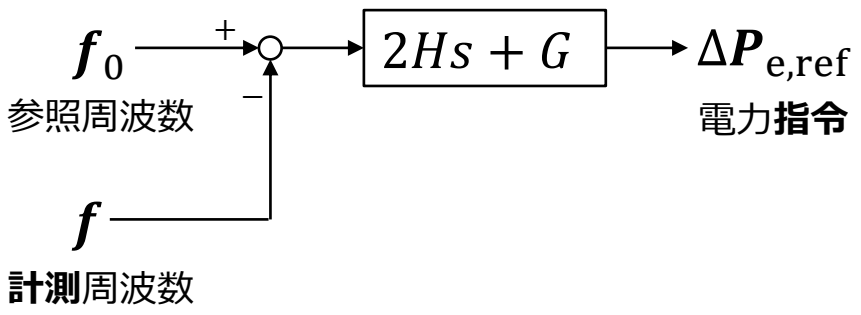
擬似慣性機能付きPCSの試作機を複数メーカ・制御方式で製作

	Grid-following 方式		Grid-forming 方式		
名称	GFL 1	GFL 2	GFM 0	GFM 1	GFM 2
制御方式	DFDT	DFDT	VSM	Droop	VSM
定格容量 (kVA)	20	49.9	12	20	50
交流定格電圧 (V)	200	200	420	200	440

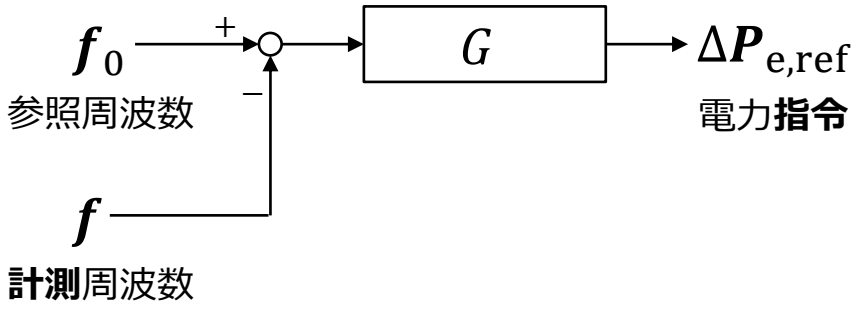
Grid-following 方式とGrid-forming 方式の主たる制御系の**一例**

- Grid-**following** 方式
  - **電流源**の特性をもつ

- **DFDT**（df/dt+df）

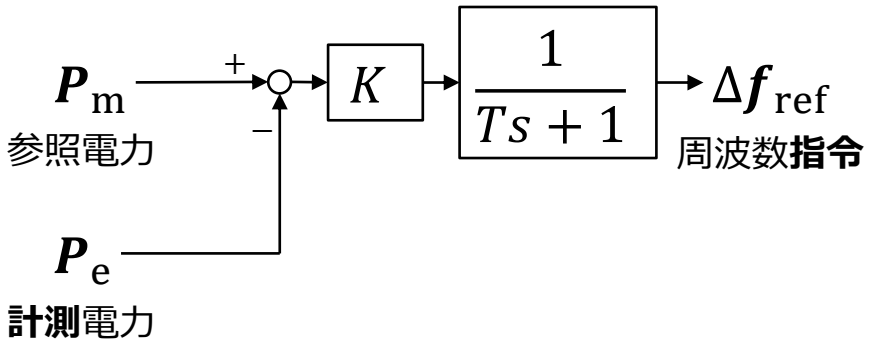


- Frequency-Watt、FFR

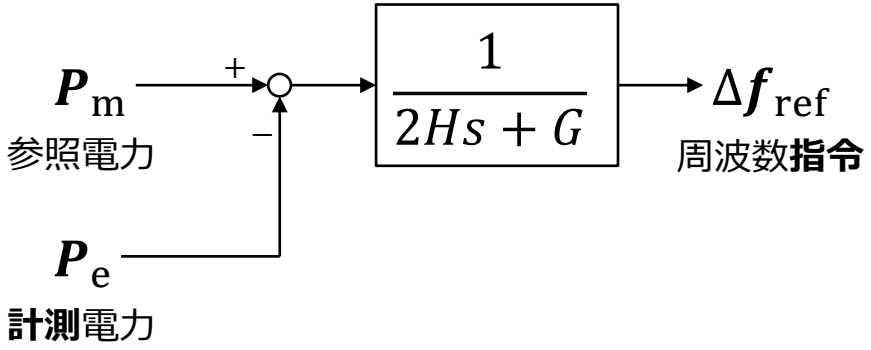


- Grid-**forming** 方式
  - **電圧源**の特性をもつ

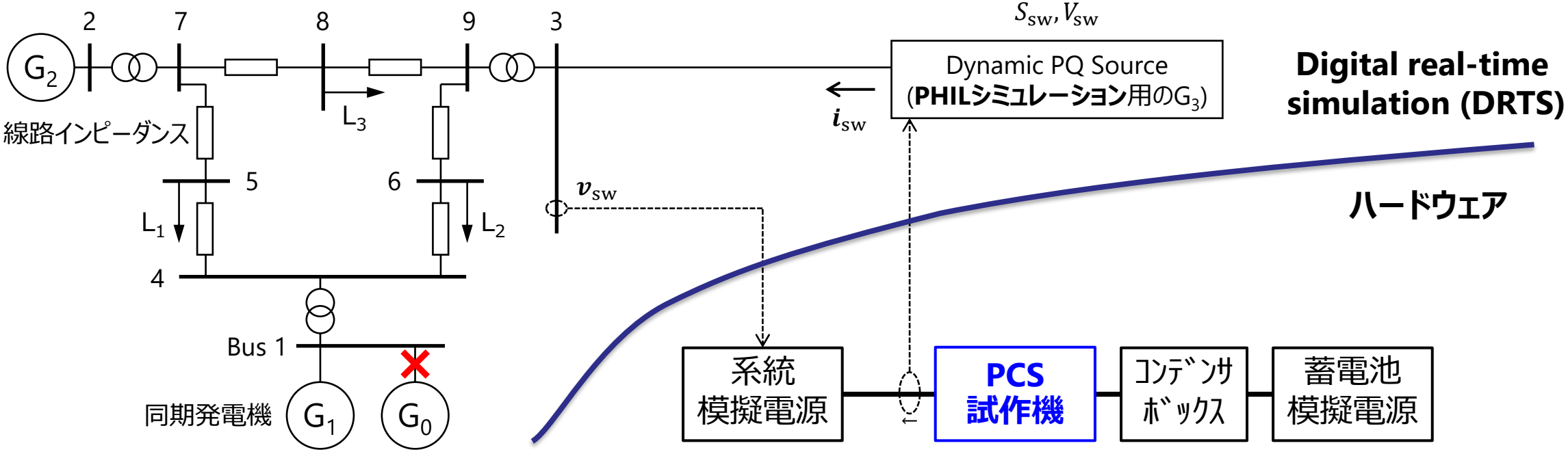
- **Droop**



- Virtual synchronous machine (**VSM**)



DRTS内の３機系統モデルにPCS試作機を仮想的に連系したPHIL環境



PCS試作機の模擬慣性機能評価と親和性が高いPHIL試験

- 擬似慣性機能に求められること
  - a. **PCS比率が増加した系統**で、
  - b. 事故発生時の**周波数変化を緩和する**ための、
  - c. **サブ秒程度の応答性能**を有すること

- 擬似慣性機能の評価方法に求められること
  - A. PCS比率が変更できる系統で、
  - B. 周波数変化の影響が評価でき、
  - C. **試作機のサブ秒程度の応答性**が検証できること（喜久里 他、令和3年全国大会）

	数値実験	**PHIL試験**	実証試験
A	O	O	X
B	O	O	X
C	X	**O?→O**	O

発表内容

- PCSの擬似慣性機能の必要性
- 擬似慣性機能の性能評価で
  Power hardware-in-the-loop (PHIL) 試験を行う理由
- PHIL試験による擬似慣性機能付きPCSの検証

PHIL試験によるPCS試作機の擬似慣性機能の検証

- 検証内容
  - 周波数変動緩和効果
    - 制御方式：GFL、GFM、従来PCS（数値実験）
    - PCS比率：20, 40, 60, 80%
    - 制御パラメタ：単位慣性定数 H (s)、ガバナゲイン G (puMW/puHz)
      - 基本設定：H=2.35、G=25
      - H+： H=**7.05**、G=25
      - G+： H=2.35、G=**75**
      - H0： H=**0.05**、G=25
  - 単独運転検出機能との干渉の影響
  - 複数台並列による影響

- 評価指標
  - 周波数：同期発電機 G_1・G_2の内部周波数の加重平均
  - Nadir：最大周波数偏差
  - RoCoF：100ms ごとの周波数変化率の最大値

PCS比率の増加に伴い、従来PCSは不安定化、GFLはパラメタ設定裕度が狭まり不安定化の懸念、GFMは安定化を維持

GFL 1

PCS比率	基本設定	H+	G+	H0
20%	O	O	O	O
40%	O	O	O	O
60%	O	O	O	O
80%	X	X	X	O

GFL 2

PCS比率	基本設定	H+	G+	H0
20%	O	O	O	O
40%	O	O	O	O
60%	O	N/A	O	O
80%	N/A	N/A	N/A	O

GFM 0, 1, 2

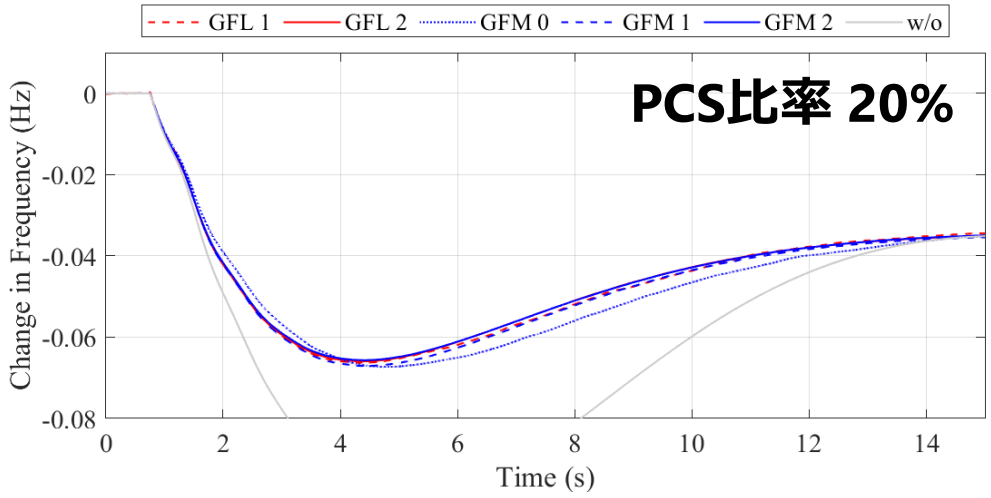
PCS比率	基本設定	H+	G+	H0
20%	O	O	O	O
40%	O	O	O	O
60%	O	O	O	O
80%	O	O	O	O

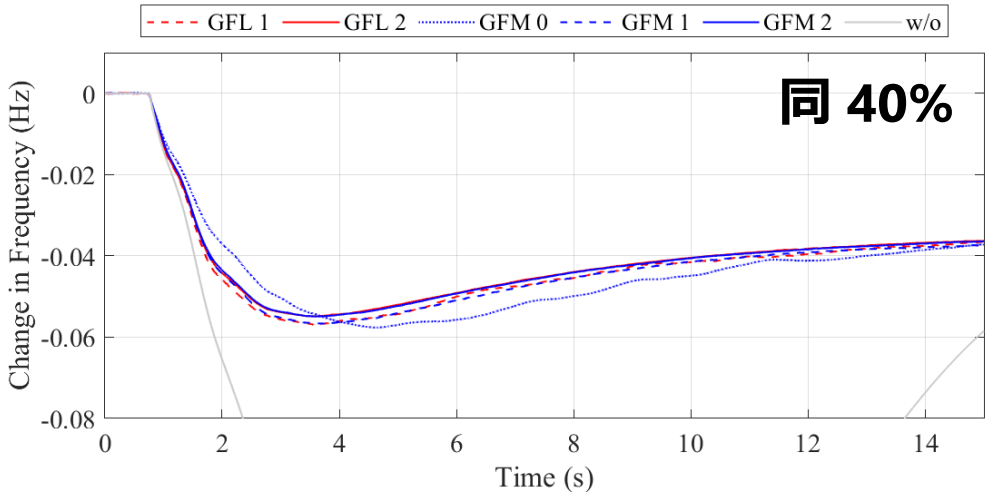
従来PCS（数値実験）

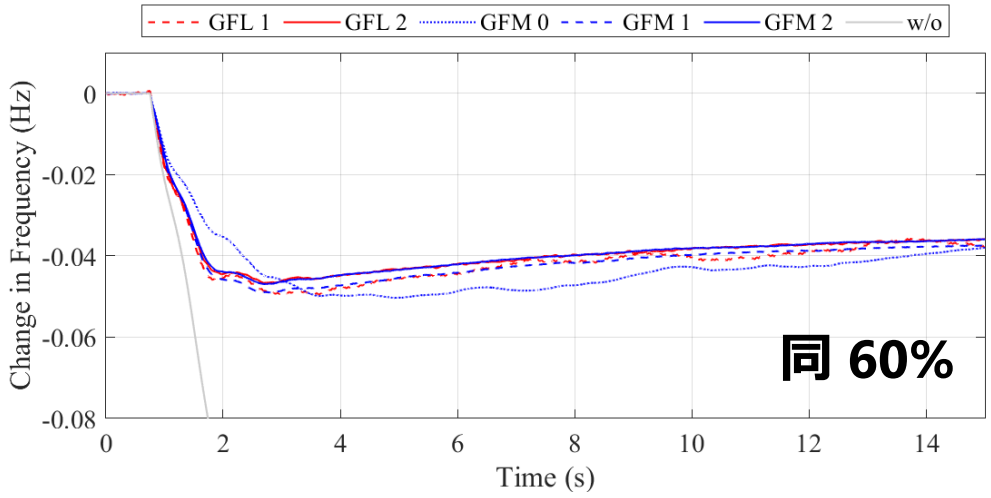
PCS比率	定電力出力
20%	O
40%	O
60%	O
80%	X

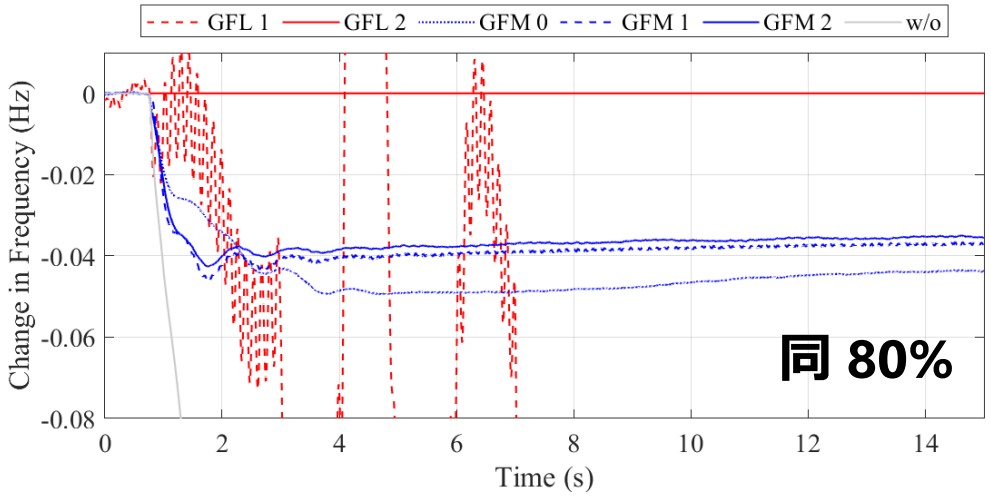
電源脱落後に周波数が、O：安定化、X：不安定化。N/A：初期条件に到達できないケース。

PCS比率の増加に伴い、周波数変化が増加する従来PCS、緩和するGFL/GFM

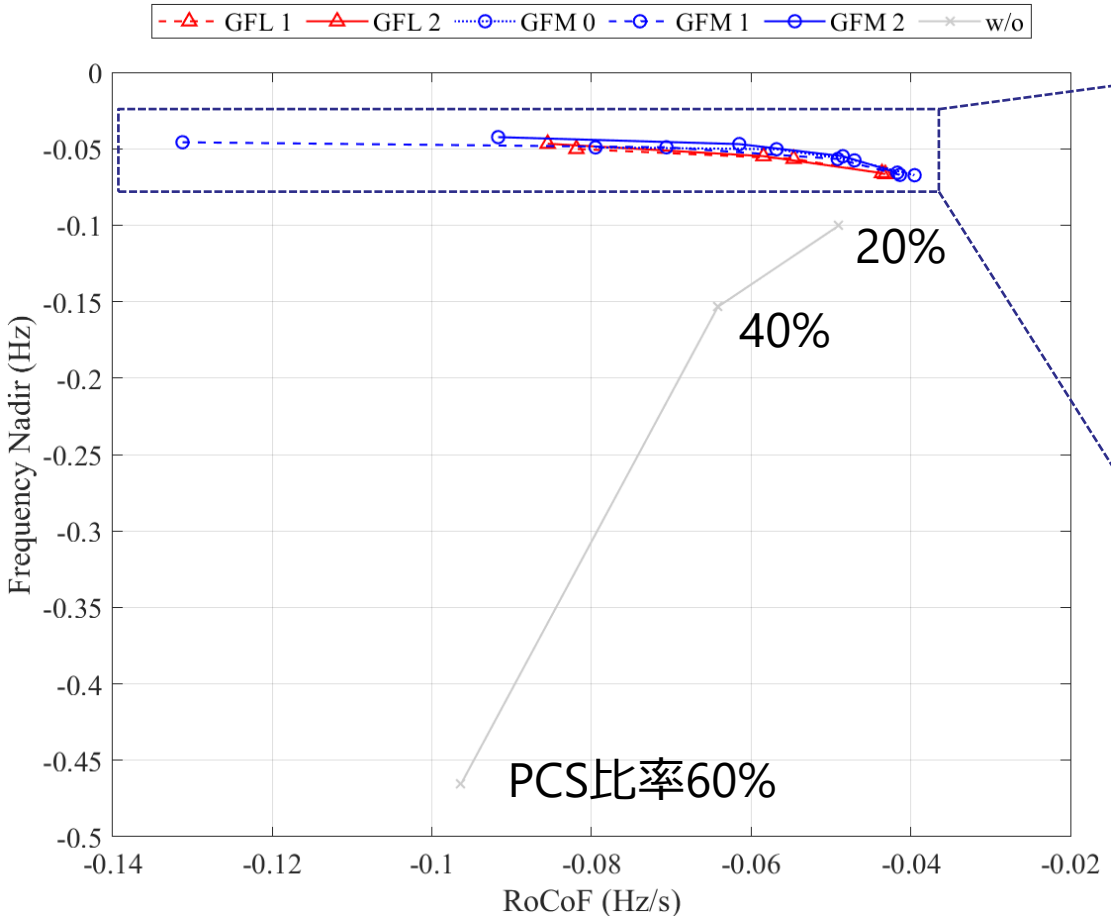


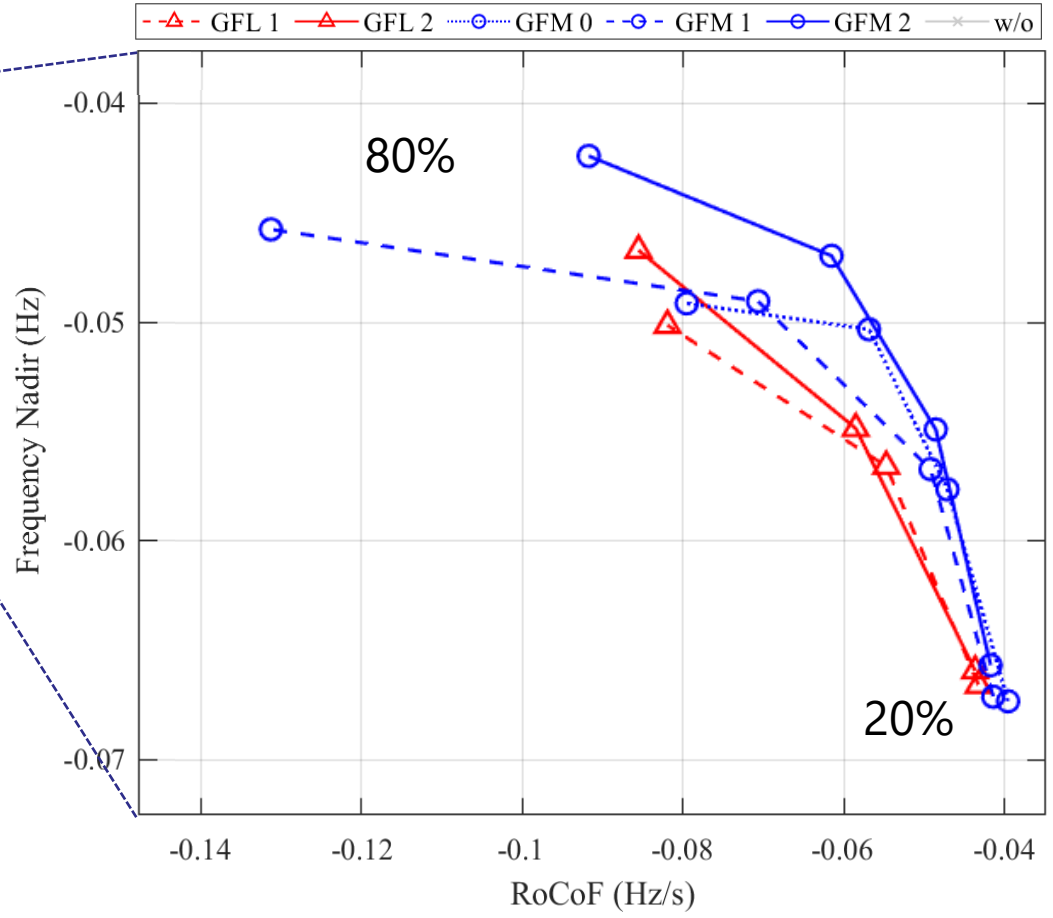




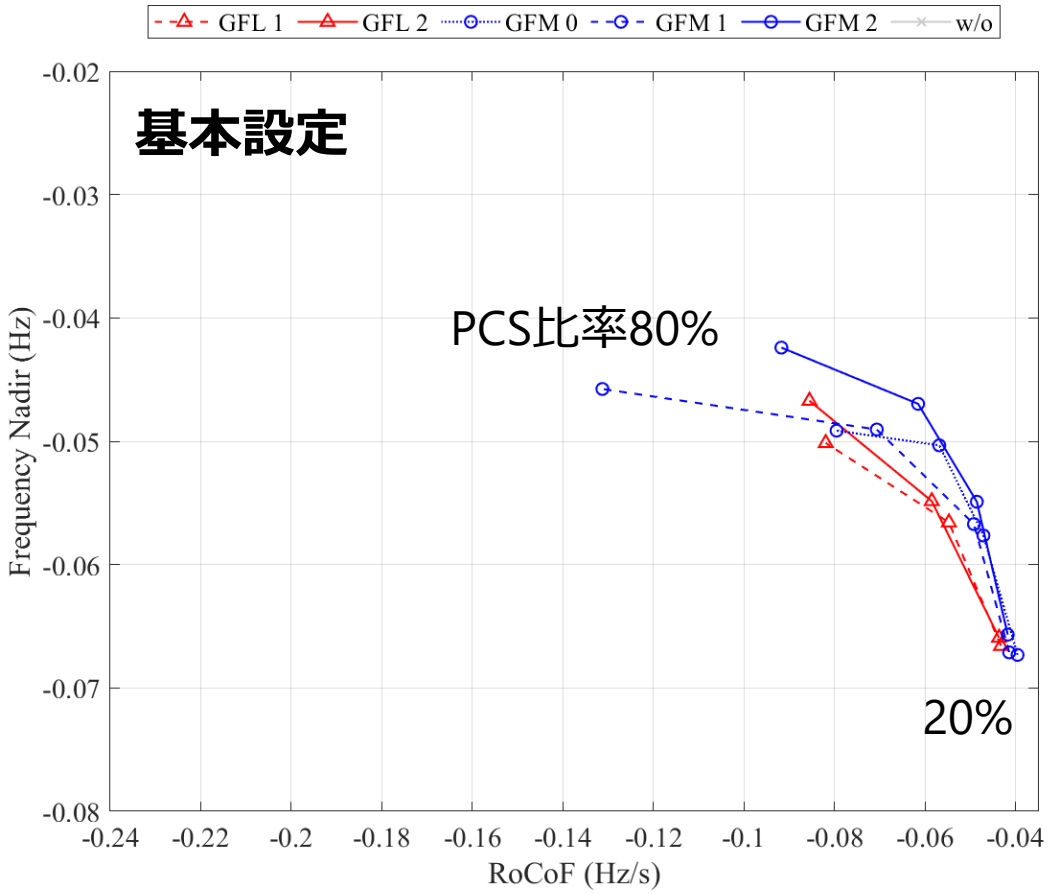


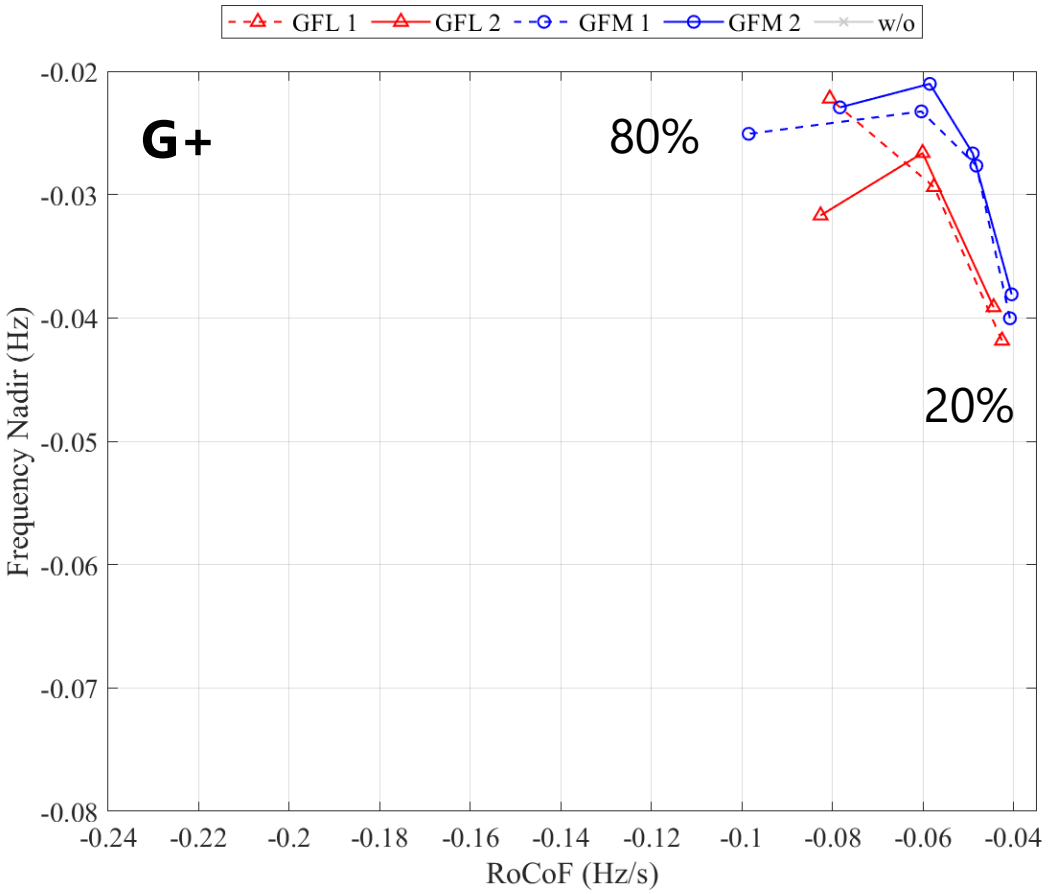
Nadir 改善効果：従来PCS<<GFL≒GFM
RoCoF 改善効果：従来PCS<GFL<GFM



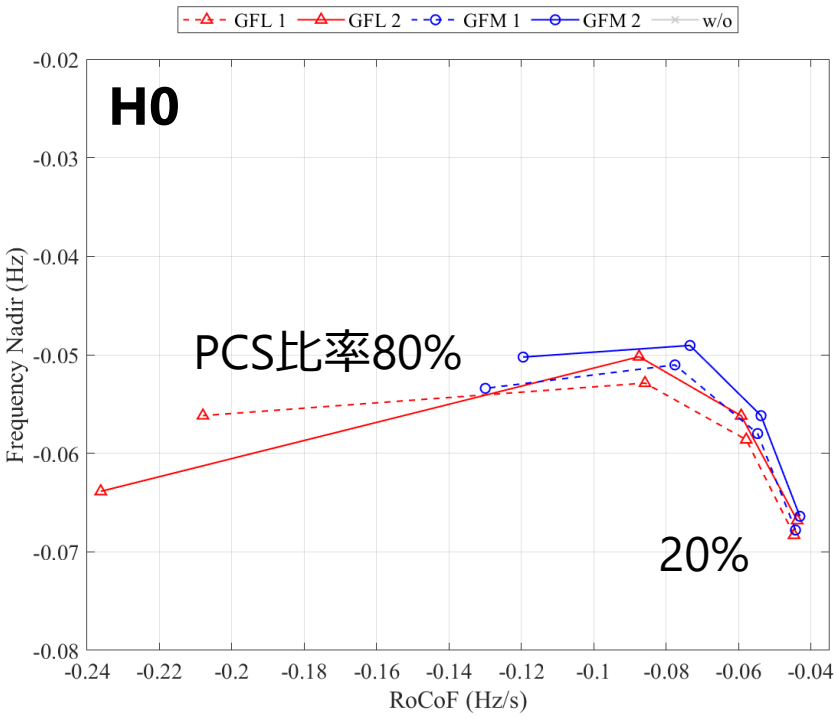


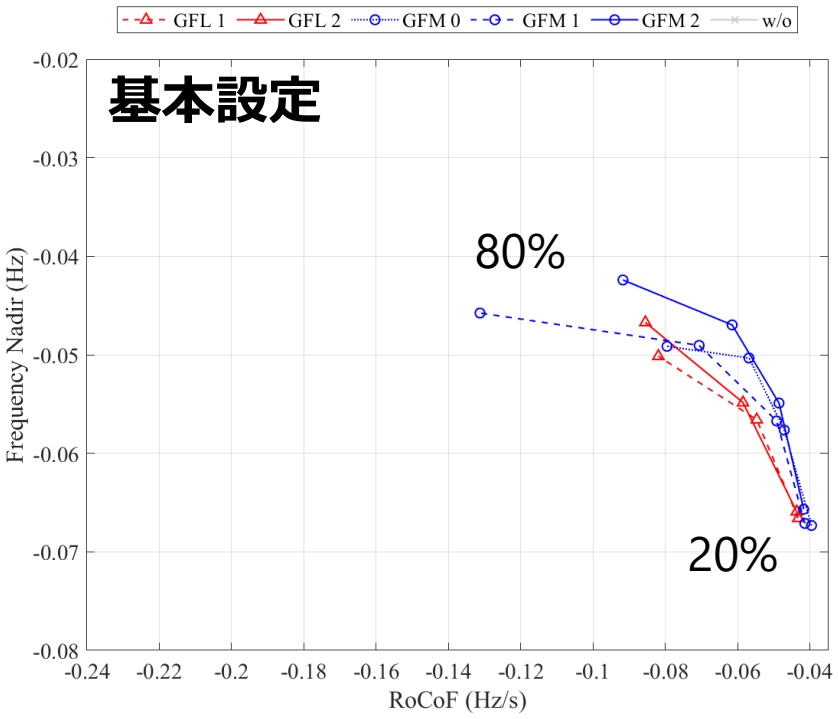
ガバナゲインGはNadirの改善に大きく寄与する傾向がある

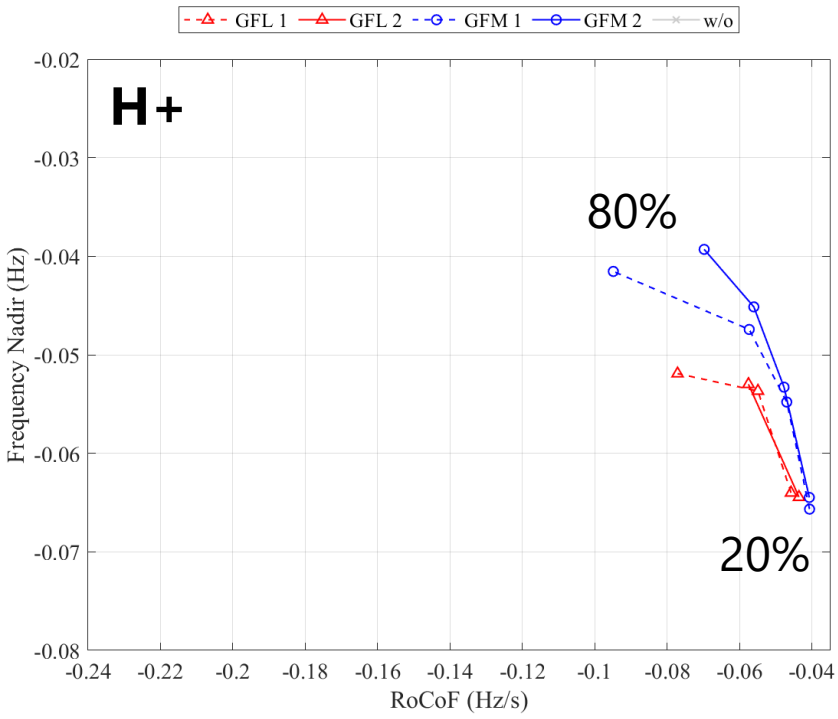




単位慣性定数HはRoCoFの改善とGFLの安定性に寄与する傾向がある

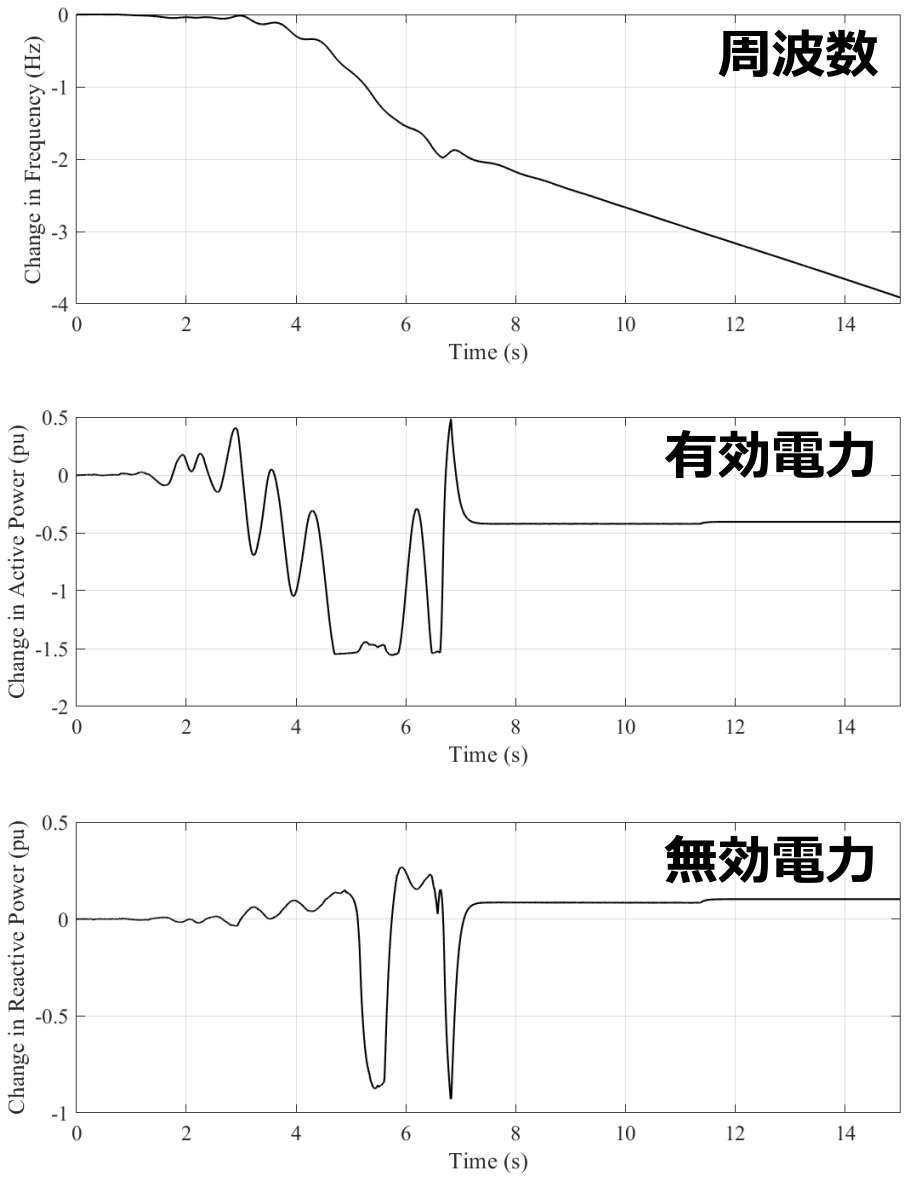






GFMでは、擬似慣性機能と単独運転検出機能両立が課題

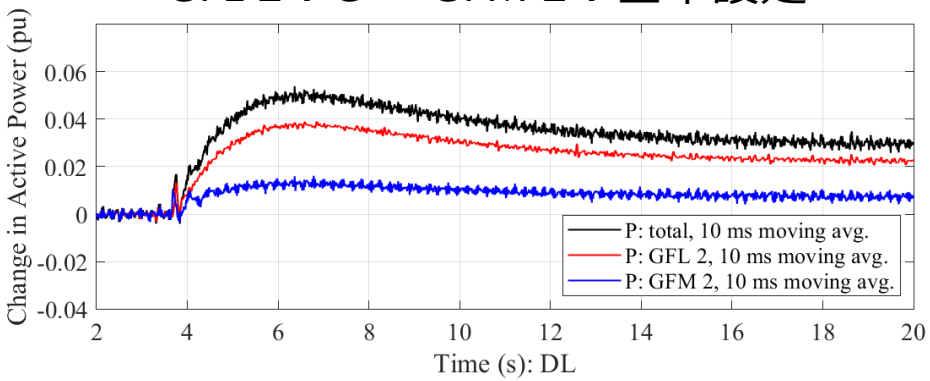
- 単独運転検出機能の無効・有効時で比較
  - GFM 0
    - 未実装
  - GFL 1、GFL 2、GFM 1
    - 有意な違いなし
    - ただし、GFM 1は単独運転防止試験には不適合（GFL 1、GFL 2は適合）
  - GFM 2
    - 無効時に周波数が安定化ケースが、有効時に不安定化
    - 能動的方式の影響だと考えられる
    - だたし、単独運転防止試験には適合
- **※擬似慣性機能検証のための試作機の結果**

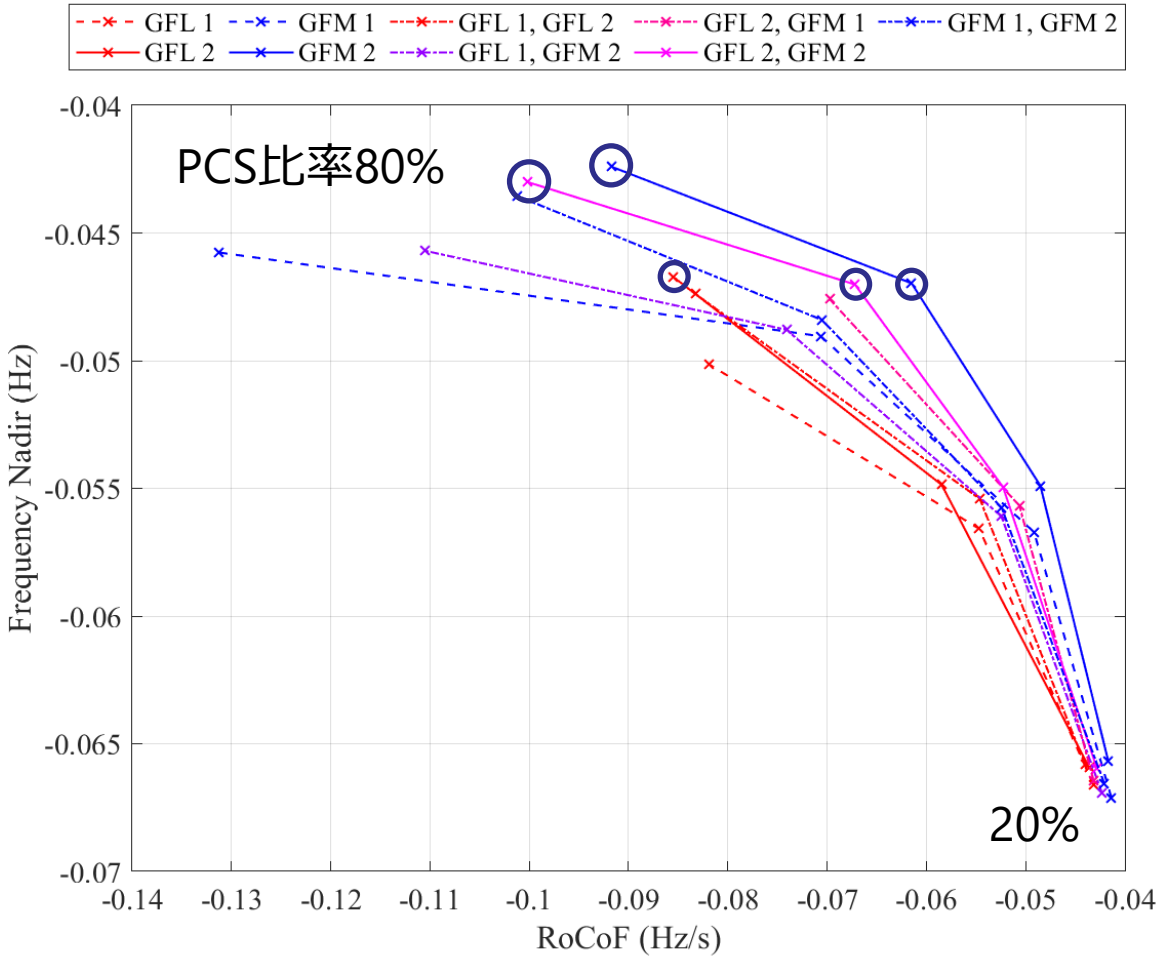


異なる２台のPCSを並列しても、顕著な干渉は確認されなかった

- 並列するPCSの条件
  - GFL同士、GFM同士、GFLとGFM
  - 並列するPCSの容量と制御パラメタが同等になるように設定
- 試験結果
  - 周波数安定化性能は、各PCSの単機試験結果の概ね中間の性能を示す傾向
  - 制御パラメタ変更で出力分担が変化

GFL 2：G+　GFM 2：基本設定





まとめと今後の方針

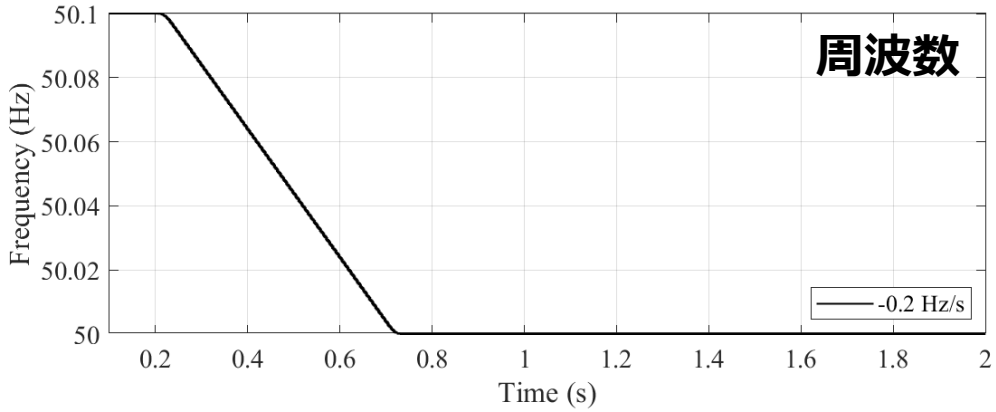
- PCS試作機の擬似慣性機能をPHIL試験により検証した
  - 周波数変動緩和効果：従来PCS<GFL<GFM
  - GFMと単独運転検出機能（能動的方式）の両立が課題
  - 2台のPCSを並列することによる顕著な干渉なし

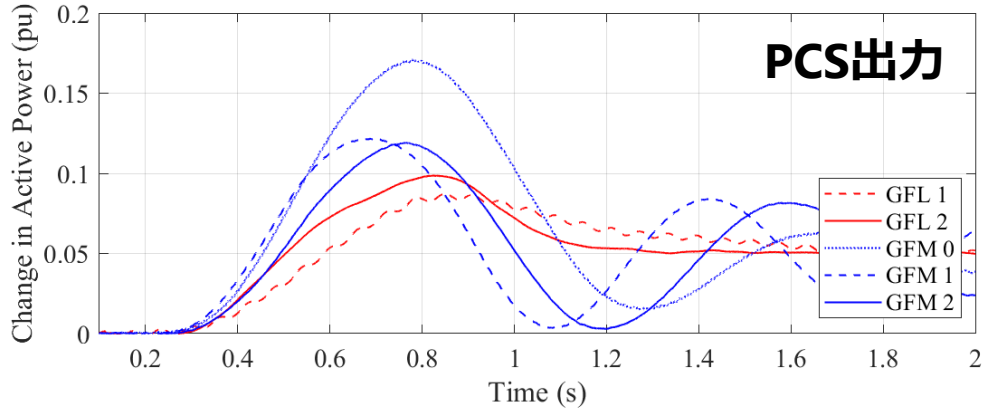
- 今後の方針
  - 複数のIBRで構成される発電所の評価
  - IBRが系統に分散する影響を考慮した評価

- 本成果は、NEDOの委託業務（JPNP19002）の結果得られたものである。また， 試験にご協力いただいた PCS メーカー各社，産総研 鈴木正一氏，菅原秀一氏，高橋正光氏には心より感謝申し上げます。

Appendix

（参考）系統周波数変化時のPCS試作機の周波数応答

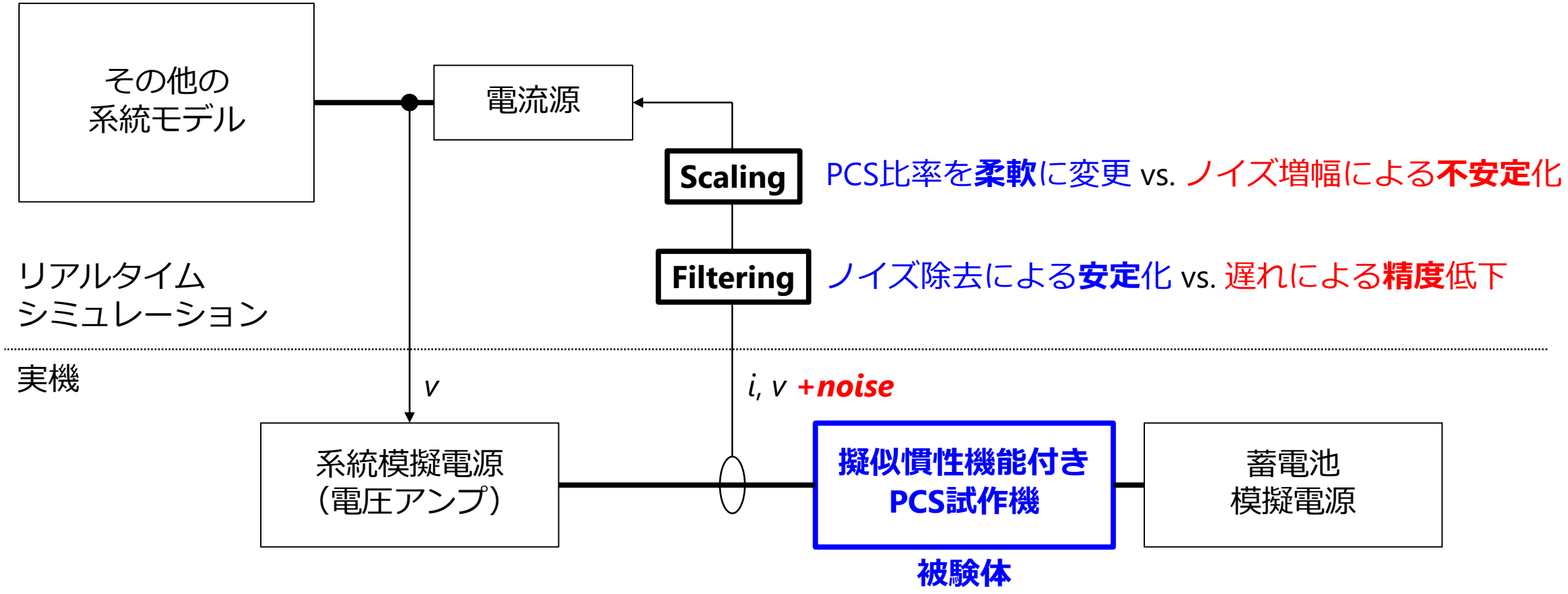




- 主たる制御パラメタを同等に設定して比較
  - GFL、GFMの比較
    - 周波数応答速度：GFL < GFM
    - 動揺の大きさ：GFL < GFM
  - GFL同士、GFM同士の比較
    - 大きな推移はほぼ同等
    - 遅れなどの影響がやや異なる模様
  - 制御パラメタを変更しても同様の傾向

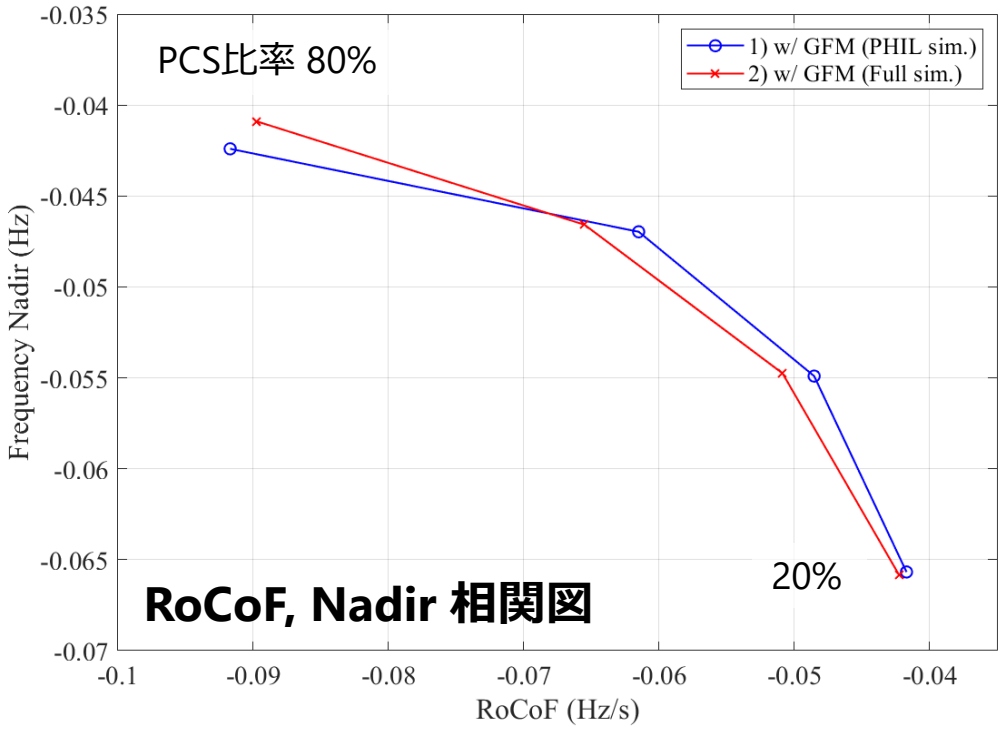
PCS試作機のサブ秒程度の応答性を評価できるPHIL試験環境の構築

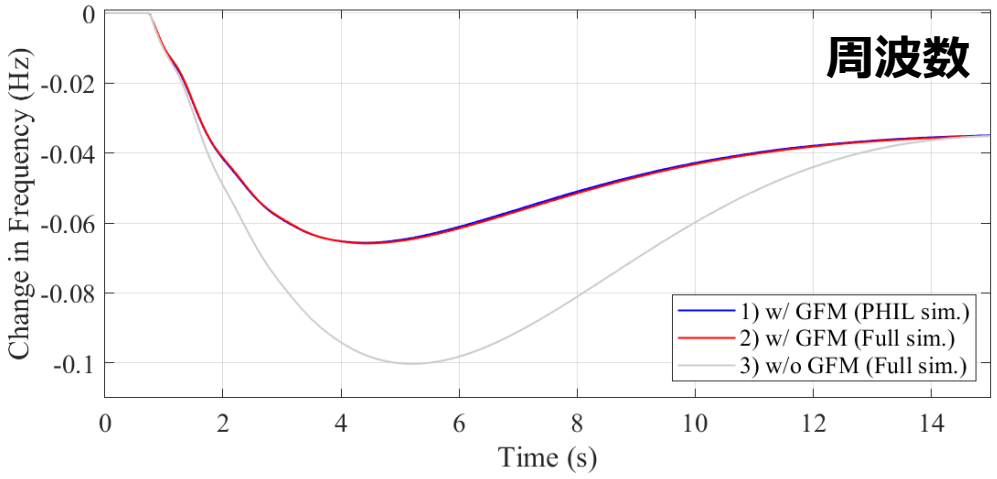
- PHIL試験では**安定性**と**精度**がトレードオフ
- 安定かつ十分な精度になるような**インターフェース**の設計が必要

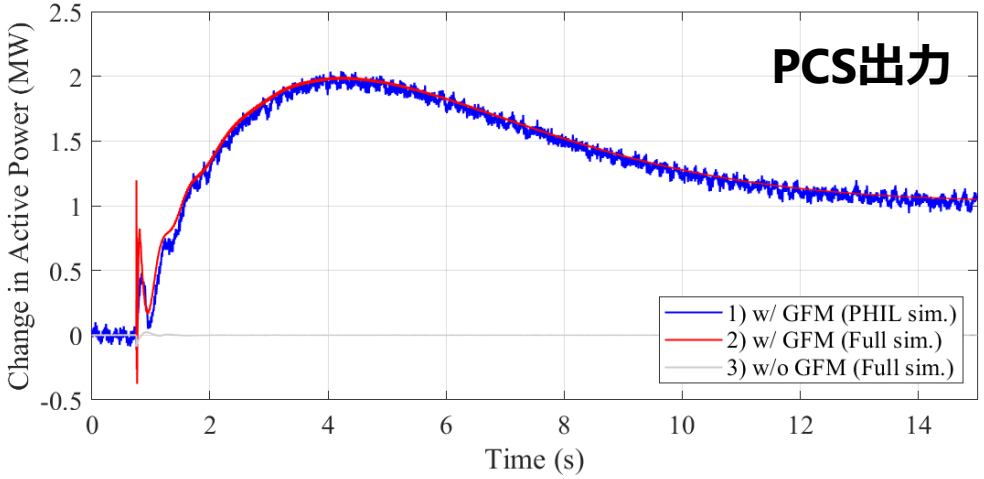


PHIL試験と数値実験を比較し、周波数の相対評価には十分に有用だと確認

- 擬似慣性機能の評価方法に求められること（再掲）
  - A. PCS比率が変更できる系統で、
  - B. 周波数変化の影響が評価でき、
  - C. **試作機のサブ秒程度の応答性**が検証できること







他機能との干渉を確認

JET試験を実施し、保護機能との干渉を検証

JET試験により擬似慣性機能が従来の保護機能に与える影響を検証

- 現行の認証試験であるJET試験で、系統電圧・周波数・位相が変化する試験項目を実施
  - GFL：一部条件付きだが全項目で適合の見込み
  - GFM：一部を除き不適合の見込み。試験条件や判定基準の見直しを含めた議論が必要

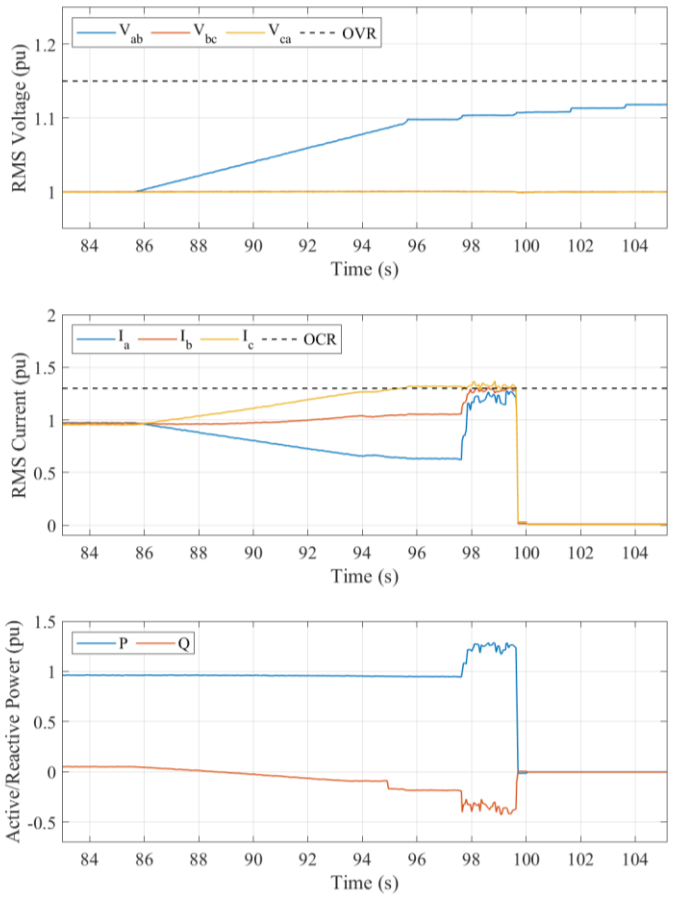
	GFL 1	GFL 2	GFM 0	GFM 1	GFM 2
交流過電圧及び不足電圧試験	P*1	P	F	F	F
周波数上昇及び低下試験	P*1	P	F	F	F
単独運転防止試験 1	P*1	P*1	-	F	P*1
系統電圧急変試験	P	P	F	P	P
系統電圧位相急変試験	P	P	P	F	F
瞬時電圧低下試験（FRT試験）	P*1	P*1	F	F	F
周波数変動試験（FRT試験）	P	P	F	F	P

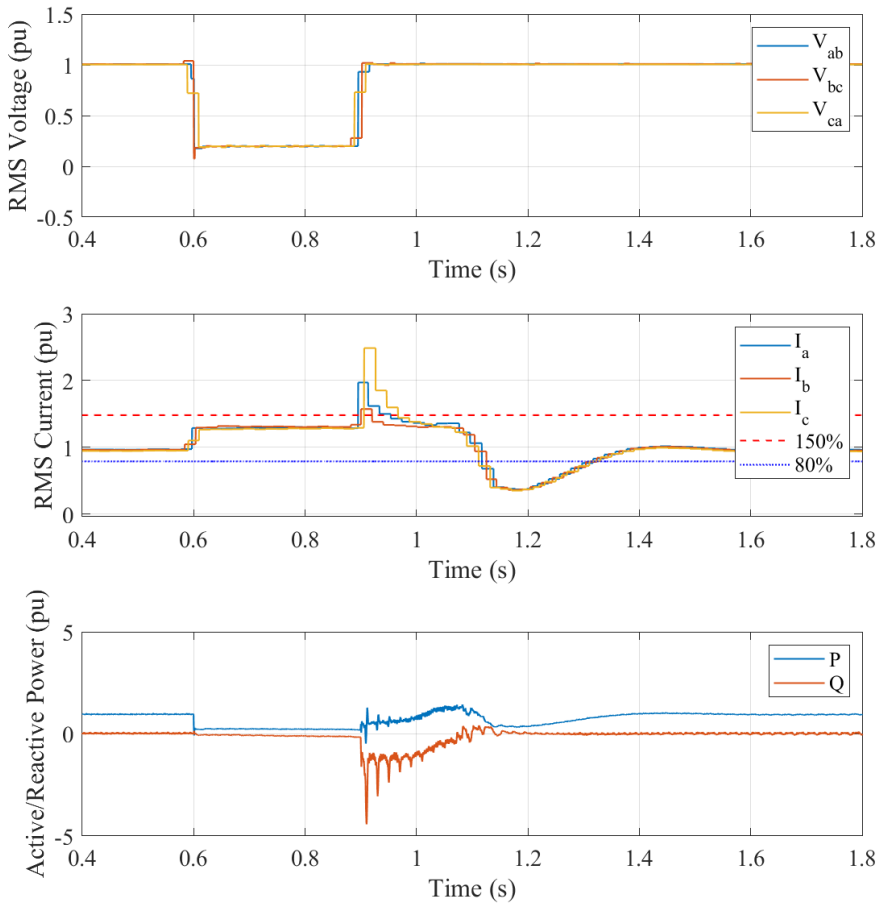
P：適合（Pass）、F：不適合（Fail）、-：未実施

*1 機器構成やロジック等の軽微な修正で適合が見込める

GFMで不適合になった３つの主な要因を確認

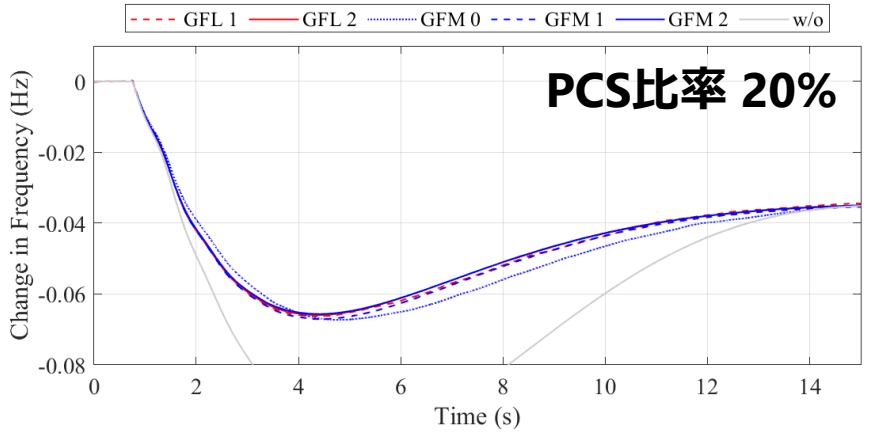
- １．系統電圧・周波数・位相変化時の過電流継電器（OCR）による停止
- ２．瞬時電圧低下から復帰後の出力動揺
- ３．単独運転検出機能と擬似慣性機能の両立が困難

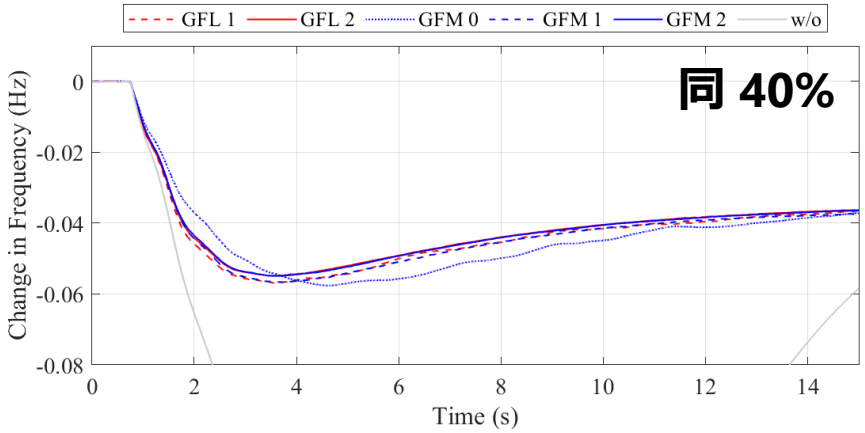


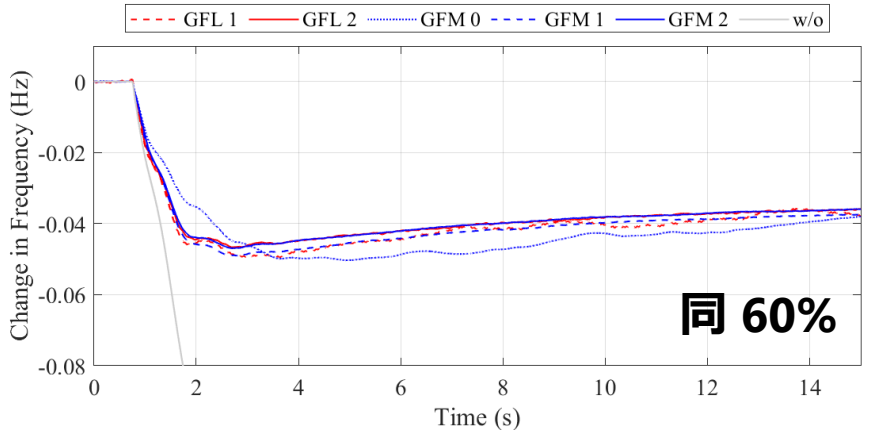


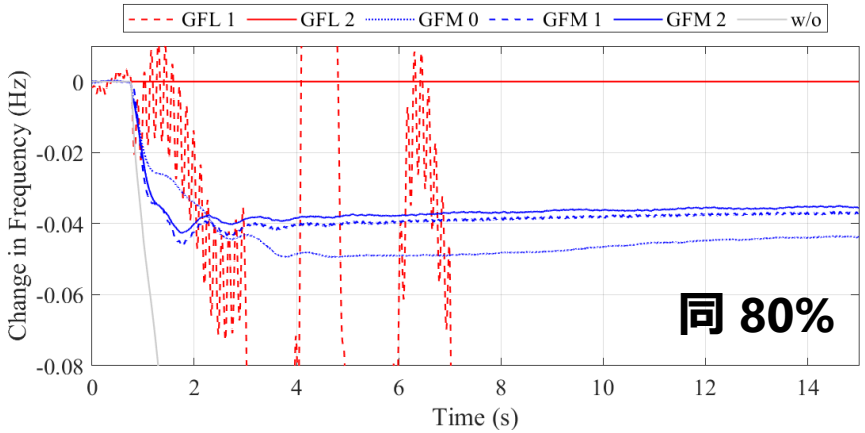
PCS比率増加に伴い、周波数変化が大きくなる従来PCS、小さくなる擬似慣性機能付きPCS

- GFL、GFMは従来PCSよりも周波数変動緩和効果がある
- PCS 20-60%ではGFL、GFMの性能に大差なし。PCS 80%でGFLは不安定化、GFMは安定
  - だたし、GFLはパラメタ調整、電圧制御機能併用等で安定化の可能性あり
- PCS比率増加に伴い、パラメタ設定の裕度が GFLは狭くなり、GFMは広い傾向









各PCSの単独運転検出機能

	受動的方式	能動的方式
GFL 1	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数フィードバック方式
GFL 2	周波数変化率方式	周波数シフト方式
GFM 0	未実装	未実装
GFM 1	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数フィードバック方式
GFM 2	電圧位相跳躍検出方式	ステップ注入付周波数フィードバック方式