

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-2

再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発/擬似慣性 PCS の実用化開発

高圧連系用慣性低下対策PCSの実用化開発

発表：2025年7月15日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 西田 悠介

団体名 東京電力ホールディングス(株)、東京電力パワーグリッド(株)、(国研)産業技術総合研究所、(一財)電気安全環境研究所、(一財)電力中央研究所、(学)早稲田大学、環境エネルギー技術研究所(株)、(国)東京大学、(国)広島大学、呉工業高等専門学校、(国)北海道大学

問い合わせ先 東京電力ホールディングス株式会社経営技術戦略研究所技術開発部

E-mail:nishida.yusuke@tepcoco.jp TEL:090-6720-4635

研究の背景、目的

背景

- 再エネ大量導入に伴う系統慣性力の低下対策
⇒国内において慣性低下対策PCS開発が未成熟のため、実用化開発を国プロ(NEDO事業)にて実施
- 災害等による大規模停電発生時のレジリエンス向上
⇒地域グリッドに関する規程・ガイドラインが未整備のため、課題解決に向けた検討を国プロ(NEDO事業)にて実施

目的

- 慣性力低下対策の実用化を目指す
 - ①高圧連系用慣性低下対策PCSの実用化開発 を実施【WG1】**
- 再エネ導入地域グリッド運開・運用の円滑化を目指す
 - ②再エネ導入地域グリッドの実現に向けた課題解決に関する研究開発 を実施【WG2】**

系統慣性低下の課題（再エネ 慣性 ）

- 再エネの大量導入に伴いインバータ電源が増加し、火力等の同期発電機（回転機）が減少するため 系統慣性の低下が懸念されている

●同期発電機（火力、水力、原子力、地熱）

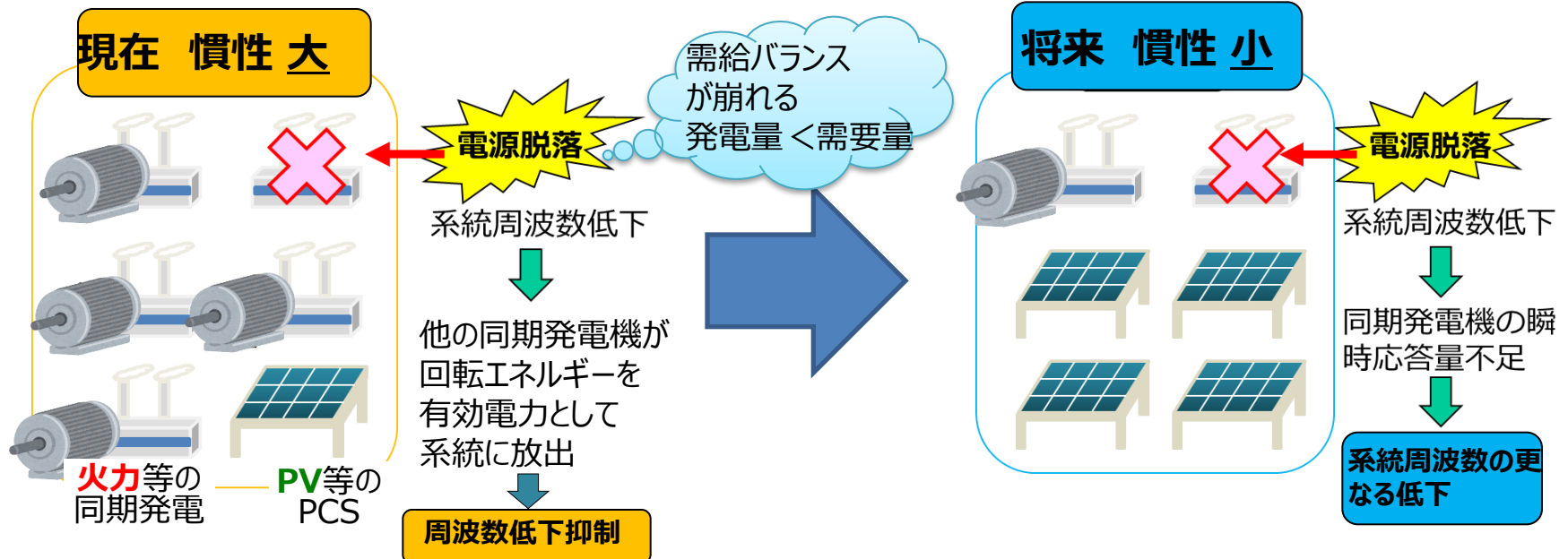
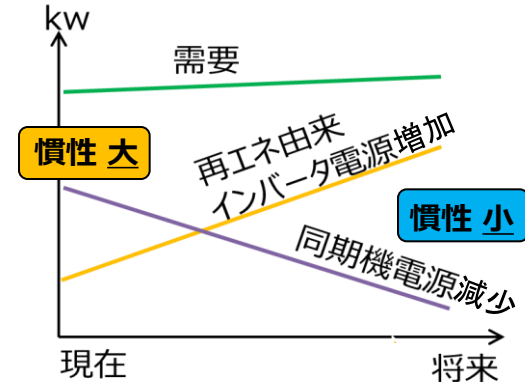
…回転体（タービン、発電機）による

慣性（回転エネルギー）を有する

●インバータ電源（太陽光、蓄電池）

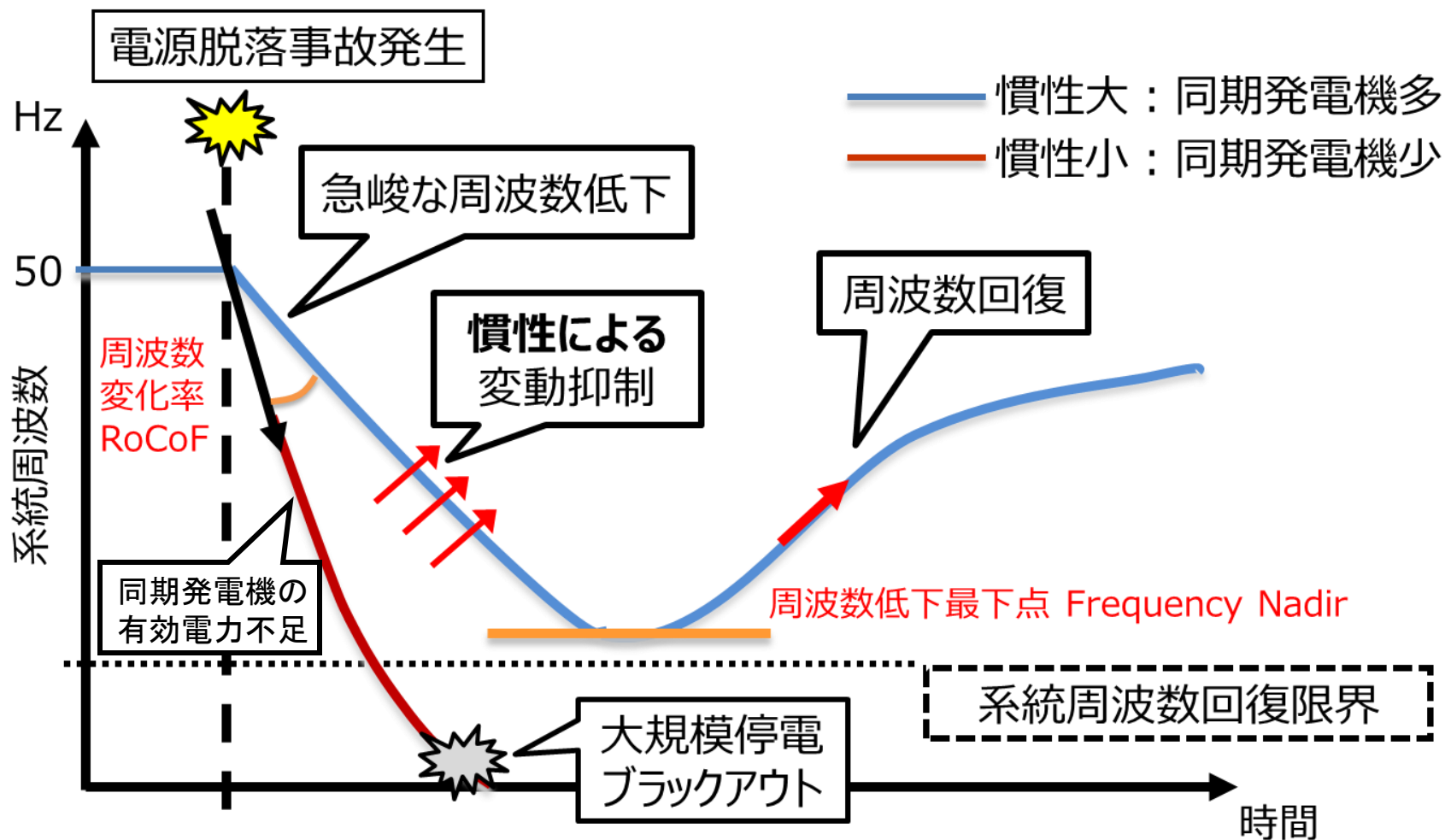
…変換器を介して電力系統に連系しており、

慣性（回転エネルギー）は有していない



系統慣性低下の課題（慣性低下⇒ブラックアウトの懸念）

- 系統慣性が低下した状態で、大規模な電源脱落事故等が発生し周波数が大きく変動すると、周波数低下リレーが動作することで健全な他の電源も解列し、最悪の場合ブラックアウトに至る



慣性低下対策手法の比較

①技術的なブレークスルー
②標準化

慣性低下に伴う
周波数変動対策

①回転機による対策

原子力発電再稼働
(脱炭素○)

火力発電所維持
(脱炭素△)

揚水発電維持

同期調相機、フライホイール
M-Gセット

②PCSによる対策
(蓄電池・PV)

③負荷遮断

系統側での
負荷遮断

需要家側での
負荷遮断

NEDO事業で研究開発

コストが
掛かる！

お客さまに
迷惑が
掛かる！

PCSによる対策確立により

脱炭素・対策コスト削減・負荷遮断量削減を実現

本NEDO事業の目的および概要①

①-(1)慣性低下対策PCSの開発

慣性低下対策PCSの開発

- ・設計・仕様検討
- ・試作機製作



蓄電池向けPCS

- ・メーカ3社程度が参画予定
- ・東京電力HDより外注

太陽光向けPCS

- ・実用化に向けて難易度が高い。
- ・蓄電池向けと並行して検討を実施。

ラボ試験

- ・認証等を想定したラボ試験
- ・HILを活用した仮想実証試験



模擬系統試験

- ・実規模の配電系統における試験
- ・ラボ試験では困難な試験を実施



①-(2)慣性低下対策PCSの評価試験



事業目的

- ・要求仕様案・標準機器仕様案作成

試作機改良

- ・系統連系試験・要件への適合
- ・標準機器要求仕様へ反映



連携

①-(3)慣性低下対策PCSの導入効果、影響評価検討

将来シナリオの検討・策定

IBRsの導入を踏まえた
需給シナリオ策定

シナリオに基づく
次世代IBRの効果検証



系統解析技術開発・検証

系統縮約技術
等の開発

実効値解析モデルの開発
・系統安定性評価



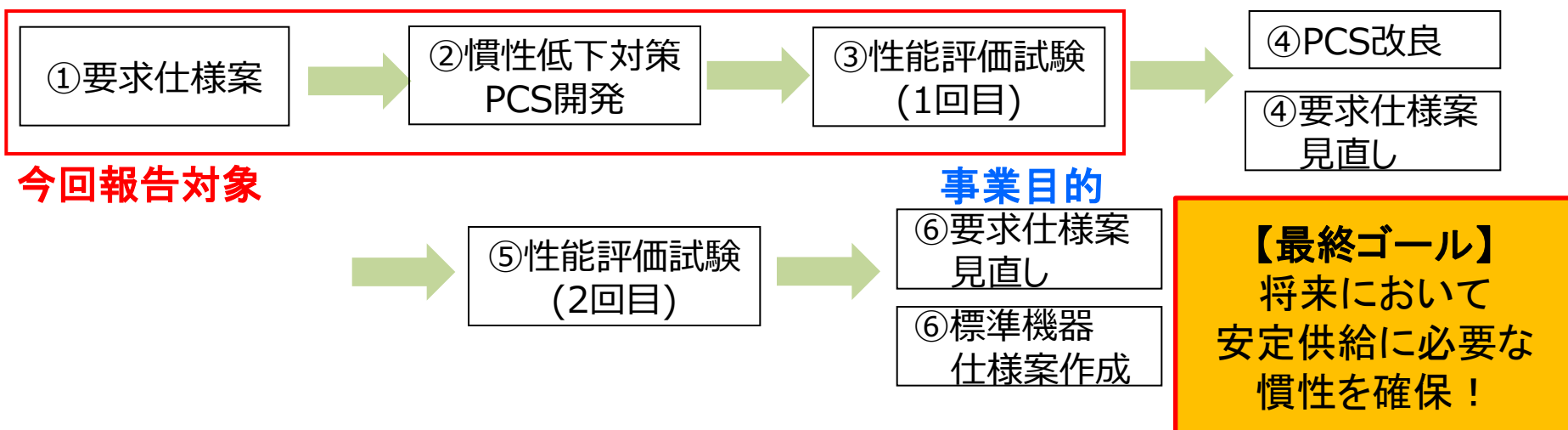
基礎特性解析

瞬時値解析による特性評価



本NEDO事業の目的および概要②

- 事業目的：慣性低下対策PCSにおける要求仕様案および標準機器仕様案の作成
- 対象とする電圧階級：高圧 ※本報告では弊社幹事の高圧向けPCSについて報告。
特高向けPCSについて電力中央研究所幹事にて実施
- 研究スケジュール：2022年度～2026年度
※グリッドコード検討会のスケジュールにでは2030年頃に慣性低下対策PCSは要件化予定
- 今回は開発・評価の内容について主にご説明
- 性能評価試験においてはラボ内における単機試験および模擬系統における他機器を含めた複合試験をセットで実施。上記の異なる目的の試験を1セット×2回実施



要求仕様案：慣性低下対策として必要なこと

■ 主に下記性能について慣性低下対策PCSに要求することとした【一部抜粋】

【要求事項①】

周波数変動に適切に動作すること！

系統の周波数が変動した際に、変動を抑制する方向へ電力を出力すること

【要求事項②】

不要にPCSが停止しないこと！

PCS容量を超える過剰な電流によりPCSが停止しないこと

【要求事項③】

公衆安全が確保されていること！

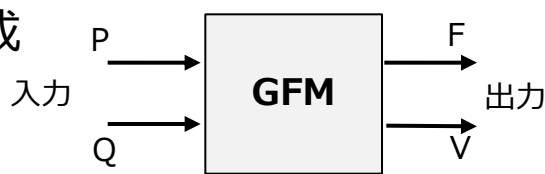
単独系統となった際に、単独運転※を検出して**PCSが停止**すること

※分散型電源については系統事故などで単独系統(大規模電源の系統から切り離された系統)となった際に、作業員の安全面等から運転停止することが求められている

ラボ試験、模擬系統試験を行い仕様に反映

慣性低下対策PCSの開発

- 慣性低下対策PCSの制御方式について、従来型インバータに系統周波数の変動を抑制する機能を追加した**電流制御型**(Stabilizing-Grid Following：以下S-GFL)と、同期発電機を模擬してPCS自ら周波数・電圧を形成する**電圧制御型**(Grid Forming：以下GFM)を開発

制御方式	方式①：電流制御型（S-GFL）	方式②：電圧制御型（GFM）
制御ロジック	系統周波数の変化率・変化量に応じて電力を出力 	系統実測値を基に、周波数・電圧を自ら形成 
メリット	従来の制御方式に機能を追加するため <u>従来PCSからの移行が容易</u>	自ら周波数・電圧を形成するため、 <u>再エネ比率が高い場合においても安定動作する</u>
デメリット	S-GFLの比率が高くなった場合、 <u>系統の周波数変動時において制御が困難となる</u>	新しい制御方式であり、 <u>系統連系規程等の制度面も含め、見直し検討が必要</u>

ラボ試験内容

- S-GFLおよびGFMの性能評価試験を実施したが、S-GFLについては概ね要求事項を満たしたため、本報告では課題が抽出されたGFMの試験結果について報告する
(模擬系統試験についても同様)
- 系統模擬電源の周波数を変化させて慣性応答性能を評価【要求事項①、②】
- 開閉器を開放することで単独運転試験を実施【要求事項③】

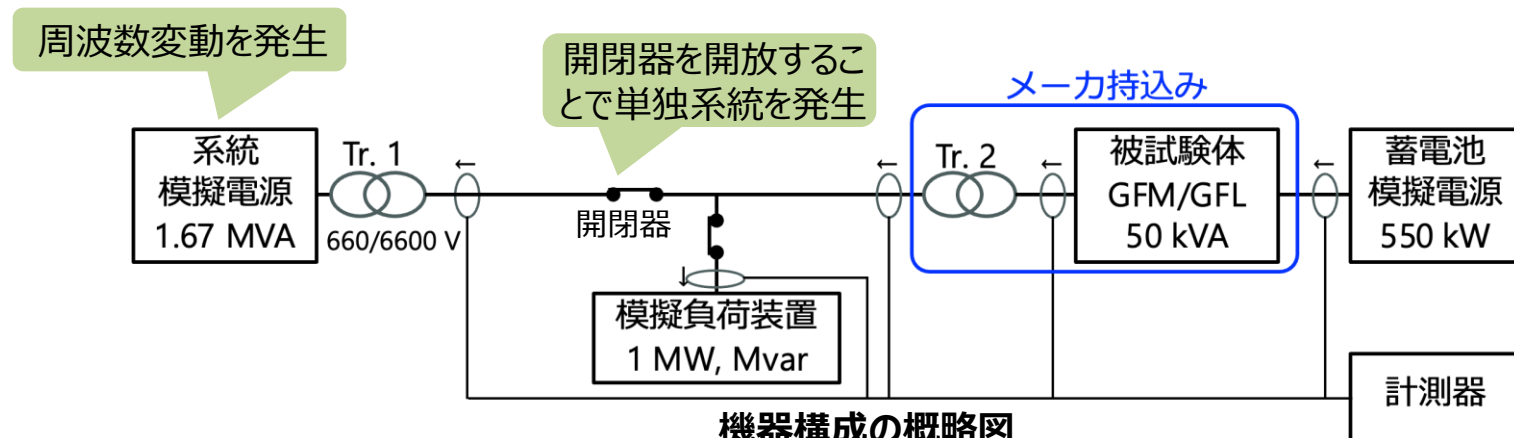


Fig. A社のラボ試験外観



Fig. B社のラボ試験外観



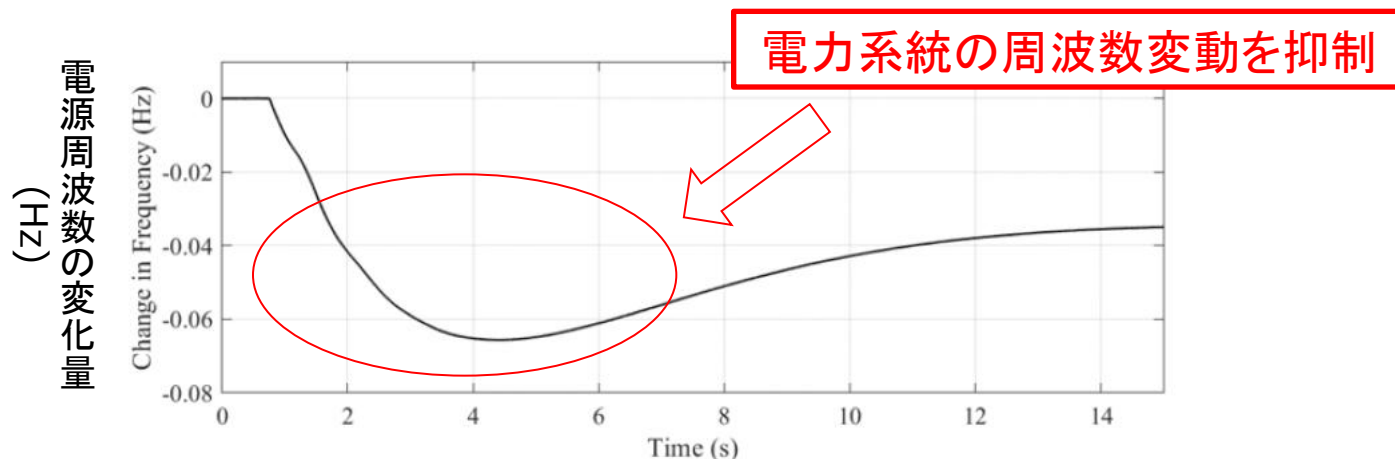
Fig. C社のラボ試験外観

ラボ試験結果①

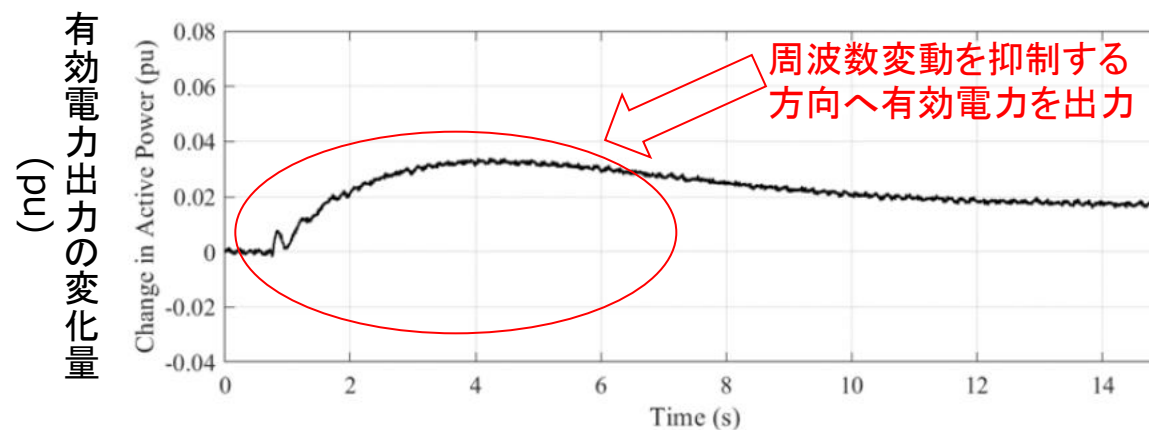
周波数変動に適切に動作すること！

10

- 【要求事項①】電源脱落事故を模擬し系統の周波数を低下させた際に、慣性低下対策PCSの有効電力が増加し、**周波数変動を抑制する効果が確認**できた



図：電源周波数の変化



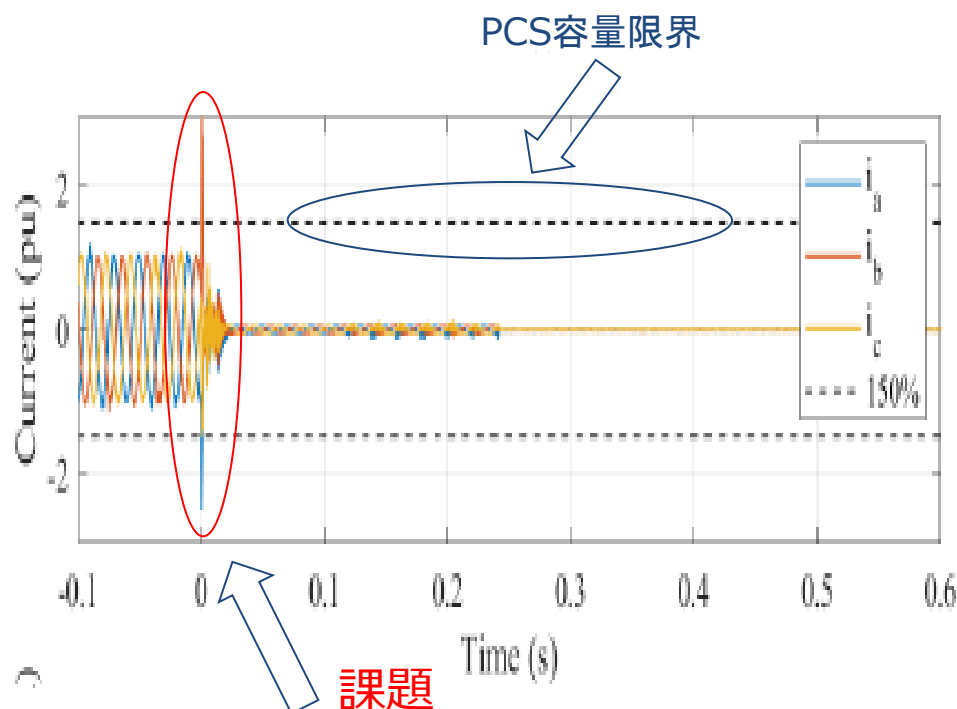
図：慣性低下対策PCSの有効電力出力

ラボ試験結果②

不要にPCSが停止しないこと！

公衆安全が確保されていること！

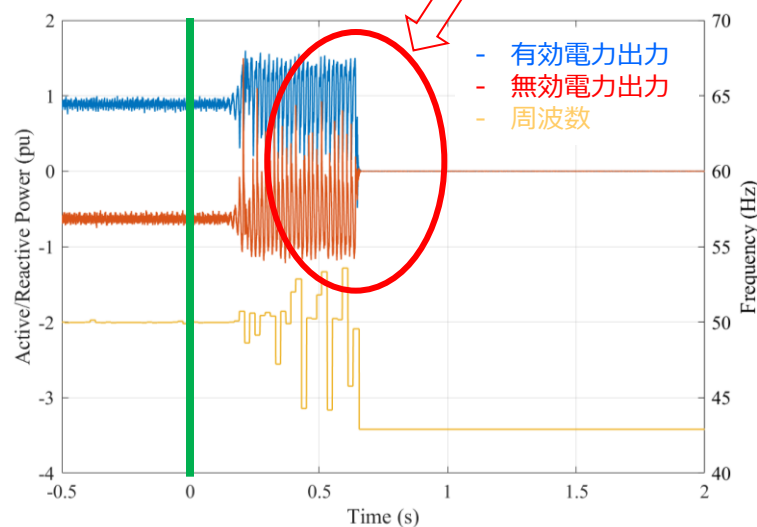
- **【要求事項②】**周波数変化時にPCSの容量限界以上の電流が発生し、PCSが停止する課題が抽出された
- **【要求事項③】**単独系統となった際に、現状規程では本来分散型電源が停止することが求められるが、単機においては停止する事が確認された



PCS容量を超える過電流が発生しPCSが停止

①周波数変化時における過電流停止

単独系統発生



単独運転を検出し
出力を停止

②PCSの単独運転検出による
出力停止

模擬系統試験内容

- 実系統規模の配電線路内において、他機器を接続した試験を実施
- **【要求事項③】**従来型の太陽光PCSを同一の配電線内に接続した場合において、単独系統を発生した際に、慣性低下対策PCSと太陽光PCSが単独運転を検出するか試験を実施
- 結果については慣性低下対策PCSが単独運転を検出しない場合は、太陽光PCSについても検出しない想定のもと、試験を実施



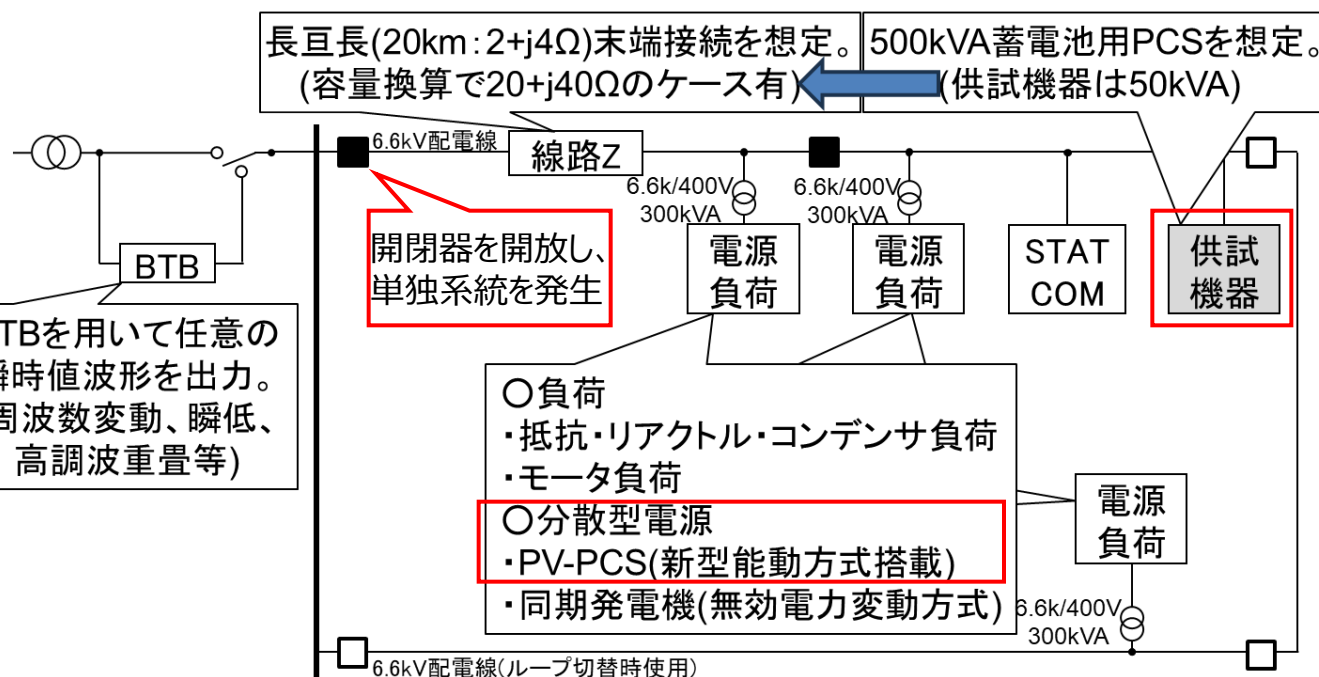
A社S-GFL・GFMインバータ設備



B社GFMインバータ設備



C社S-GFL・GFMインバータ設備

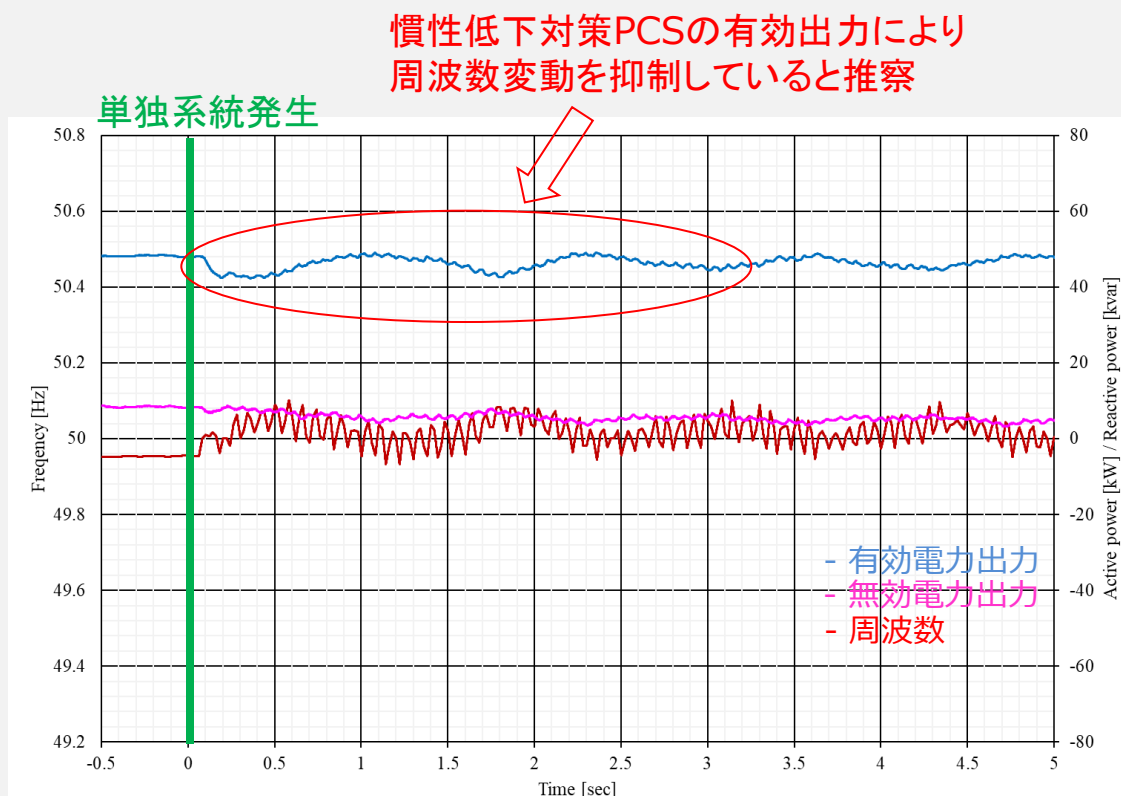
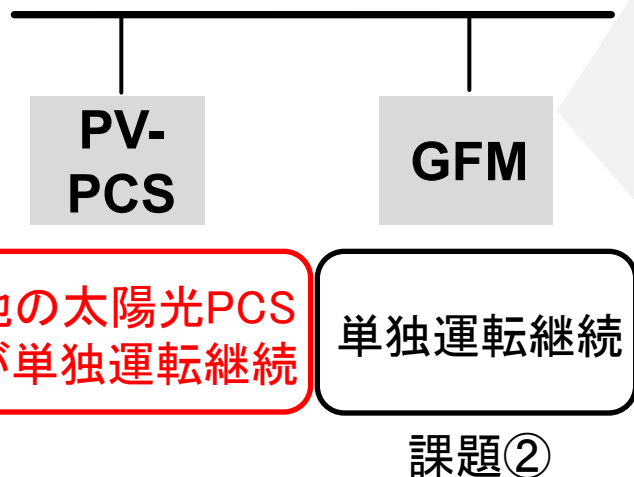


※BTB:交流を直流に一旦変換した後で再度交流に変換する装置で任意の電源波形を作ることが可能

模擬系統試験結果

公衆安全が確保されていること！

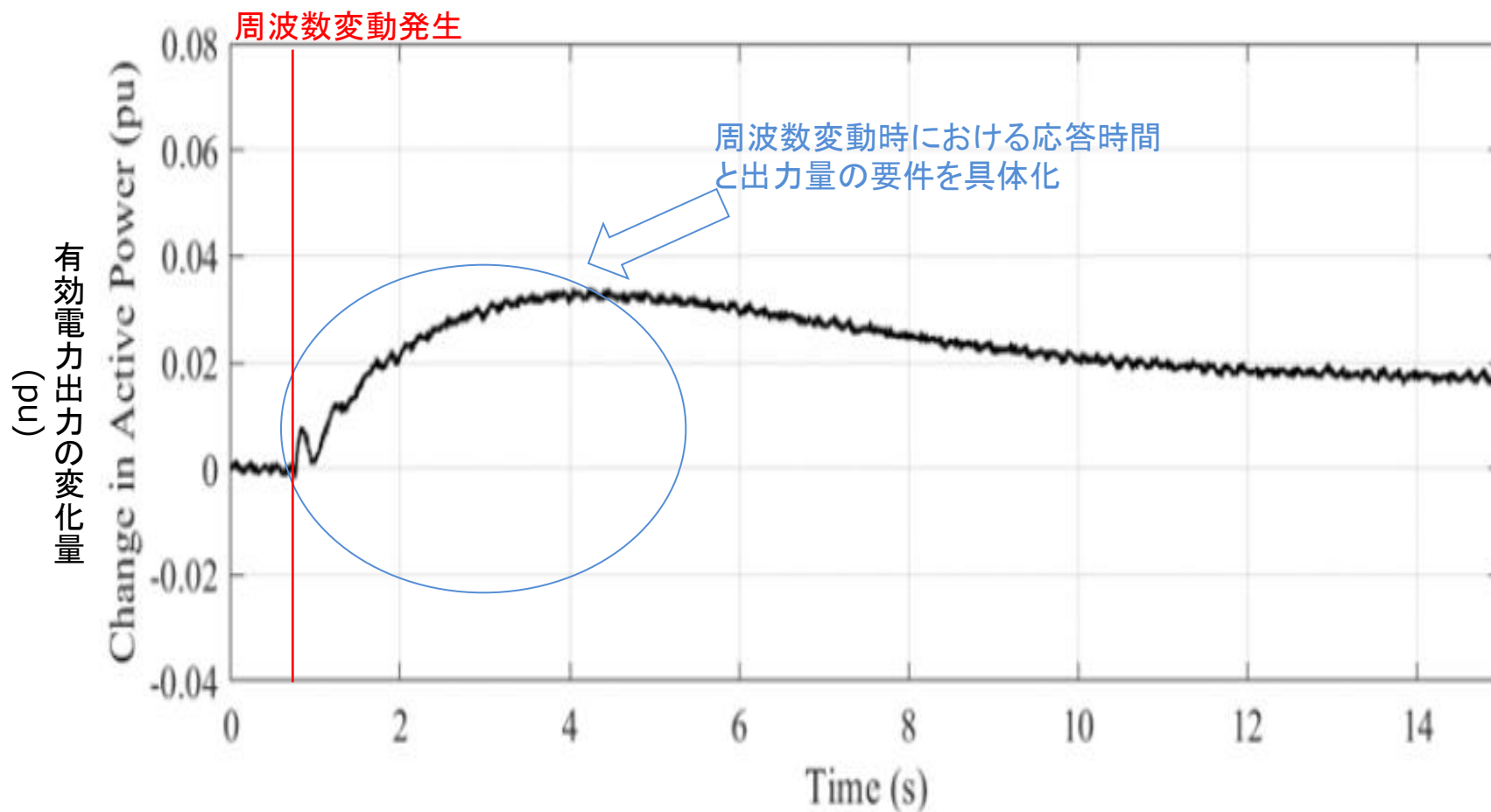
- **【要求事項③】**想定通り、**慣性低下対策PCSと太陽光PCSが単独運転を検出せず運転を継続し**、想定を裏付ける結果が得られた
- 慣性低下対策PCSの有効出力により周波数変動を抑制していると推察



図：単独系統時における慣性低下対策PCSの挙動

試験結果を踏まえた要求仕様への反映

- 慣性低下対策PCSによる周波数変動を抑制する効果を確認することができたが、周波数変動時における出力応答時間や出力量などの要件を具体的に検討していく予定
- 過電流停止する課題については要求仕様案を満たすようPCSを改良していく



図：慣性低下対策PCSの有効電力出力

まとめ

2024年度までの本資料に記載した主な成果

周波数変動に適切に動作すること **達成!!**

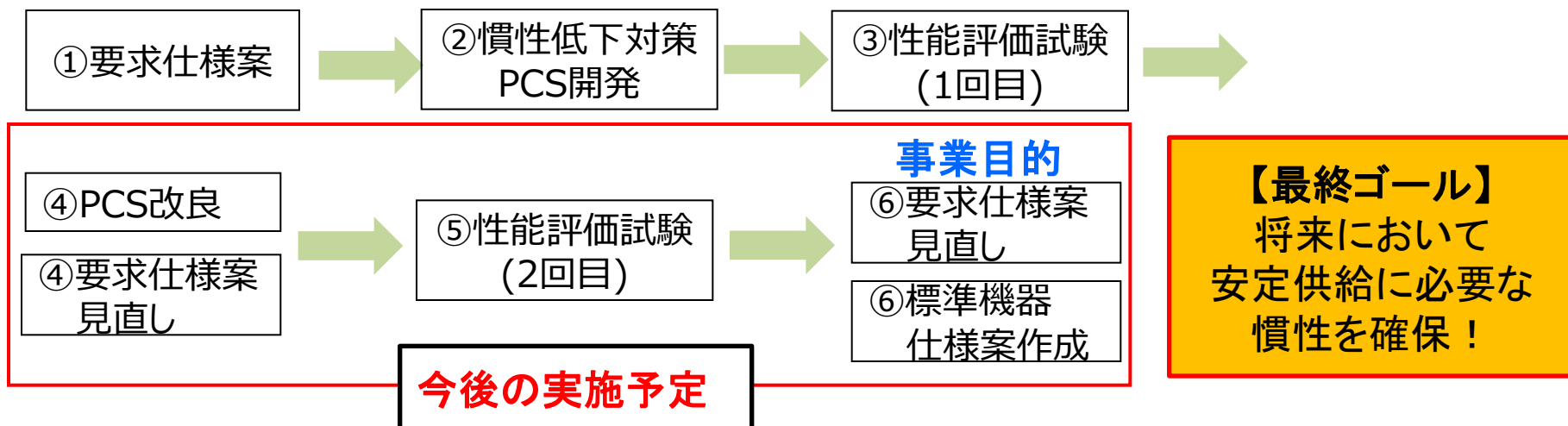
不要にPCSが停止しないこと！

公衆安全が確保されていること！

課題解決に向けて再挑戦!!

今後の予定

○慣性応答など概ね要求仕様案を満たすことが確認できたが、課題が抽出されたため
2030年の要件化に向けて、PCS改良に加えて、運用面の見直しについても検討を進める



以下参考

①-(1)慣性低下対策 PCS の開発【PV】

環境エネルギー技術研究所

- 20kW機に制御を実装してFREAにて試験を実施。FRT対応試験として電圧低下(3LS, 2LS, 1LG)および周波数・電圧同時変化試験を実施
- 成果として力率 ± 0.8 運転、電圧低下時(FRT)の運転継続、周波数変化および電圧変化に対するDroop特性を確認した
- 課題としては有効電力の立上りが遅いことと振動が残ることであるが、現在用いている山登り法に代わる高速な制御を検討しており、応答遅れを現在の1/10程度にできると考えている
- 今年度は上記制御の設計と実装および単独運転検出の開発を実施する

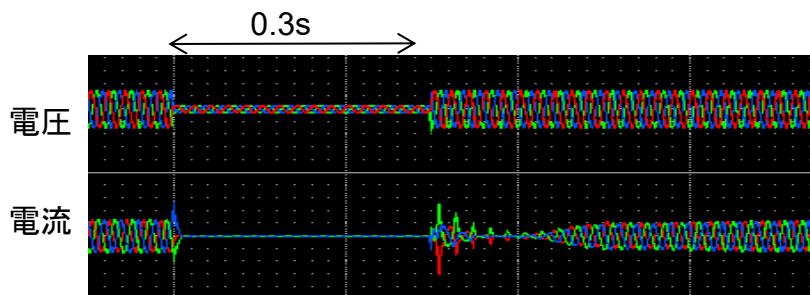
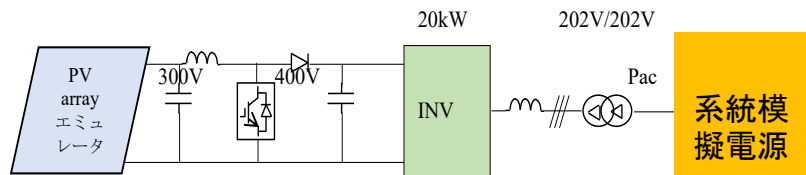


図1: 3LS残電圧20%試験



DCチョッパ

GFMインバータ

MPPT制御

400V一定制御

交流側AQR or AVR制御

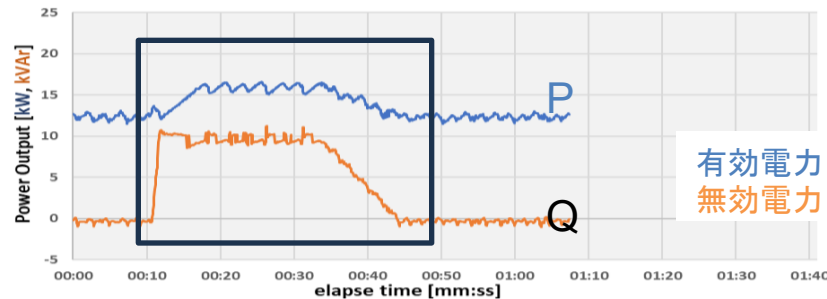
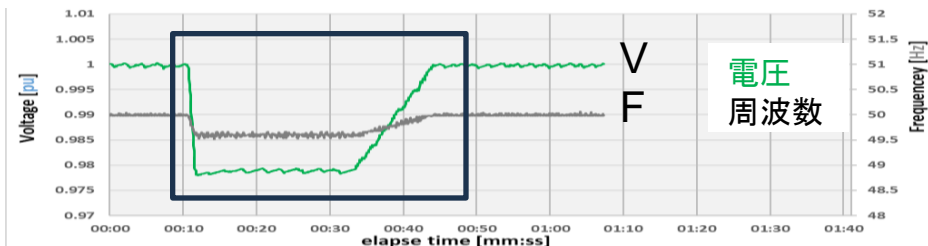


図2: 周波数・電圧の同時変化試験(AVR制御の場合)

日射強度=1000W/m²、Pref=0.6puにて周波数を50Hz→49.6Hz、電圧1pu→0.976puへ同時に1sランプ変化

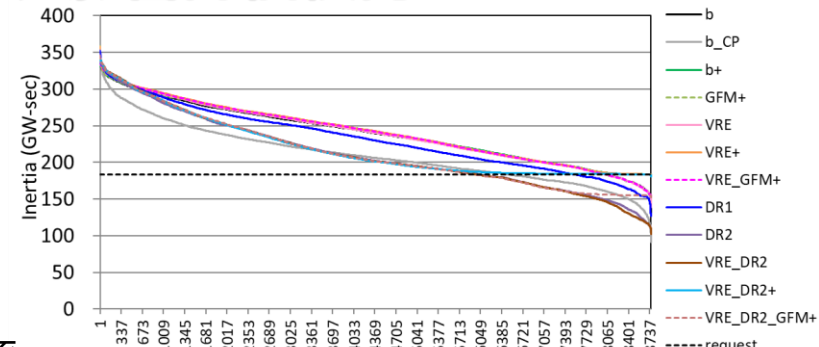
①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 東京大学(1/2)

【2024年度の実施項目、進捗】

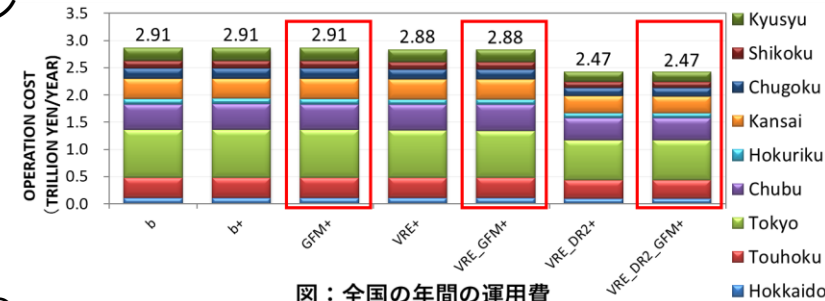
- 2024年度検討の解析に用いる複数のシナリオについて解析G内で定期的に議論を実施
- 新たに需給調整市場の1次～3次②調整力必要量を模擬
- 12月には暫定シナリオで、予測無し、全国を対象としたMRで需給解析を実施し、2040年度の系統慣性低下およびGFM付蓄電池導入効果の分析を行った。（第41回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスにて成果発表）
- 今回は、第7次エネ基ベースのシナリオで、2040年度の需給解析を実施した。
- 系統慣性の値は従来より大きくなり、東北・東京では60Hzエリアより多い慣性不足時間となった。
- 系統用蓄電池20.9GWのうち15.8GWへGFMインバータの導入により年間の運用費用の低減はベースケースで9億円、分散資源活用ケースで最大44億円となった。
- 短絡容量については、秋田エリアなどで短絡容量が最小の値が発生した。

【2025年度の実施予定項目】

- 解析G内の議論でシナリオを更新する。
- GFM付蓄電池以外の対策技術の導入の効果分析等を実施する。
- 2040年度の短絡容量の時間・地点による変化などを分析する。



図：50Hzエリアの系統慣性の年間の持続曲線
(2040年度 東北-東京)



図：全国の年間の運用費

第7次エネ基ベ-ス	-9 億円	-6 億円	-44 億円
第6次エネ基ベ-ス	-123 億円	-136 億円	-511 億円

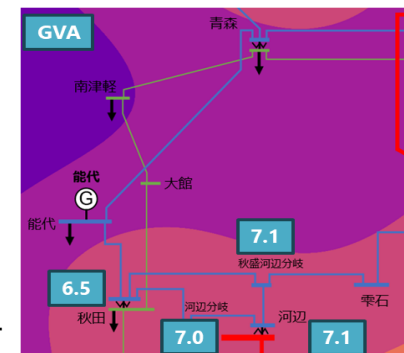


図 秋田変電所近傍の275kV母線の短絡容量値ヒートマップ

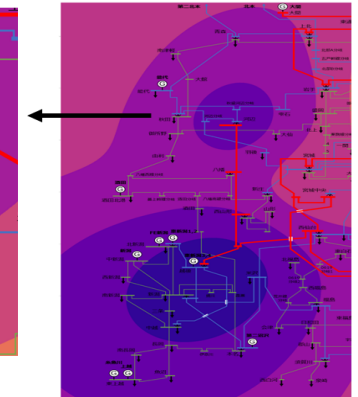


図 2040/4/6, 8時 500kV母線の短絡容量値ヒートマップ

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 東京大学(2/2)

【2024年度の実施項目、進捗】

- 予測を考慮し、東北・東京を対象としたUCによるDR無、蓄電池有(対策技術・調整力供給無)の年間解析で、PV予測を当日に更新した方が運用費が低減する一方、系統慣性が低下しやすいことを確認

【2025年度の実施予定項目】

- 対策技術を始めとして、計画停止の反映、ヒートポンプのDRモデル、出力制御モデルの回線、DERからの調整力供給モデルなどを設定、適用する。

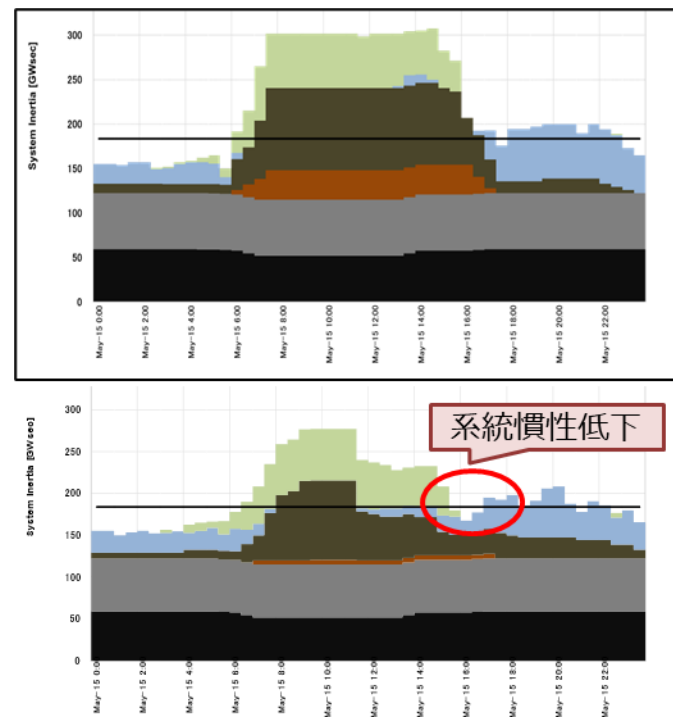
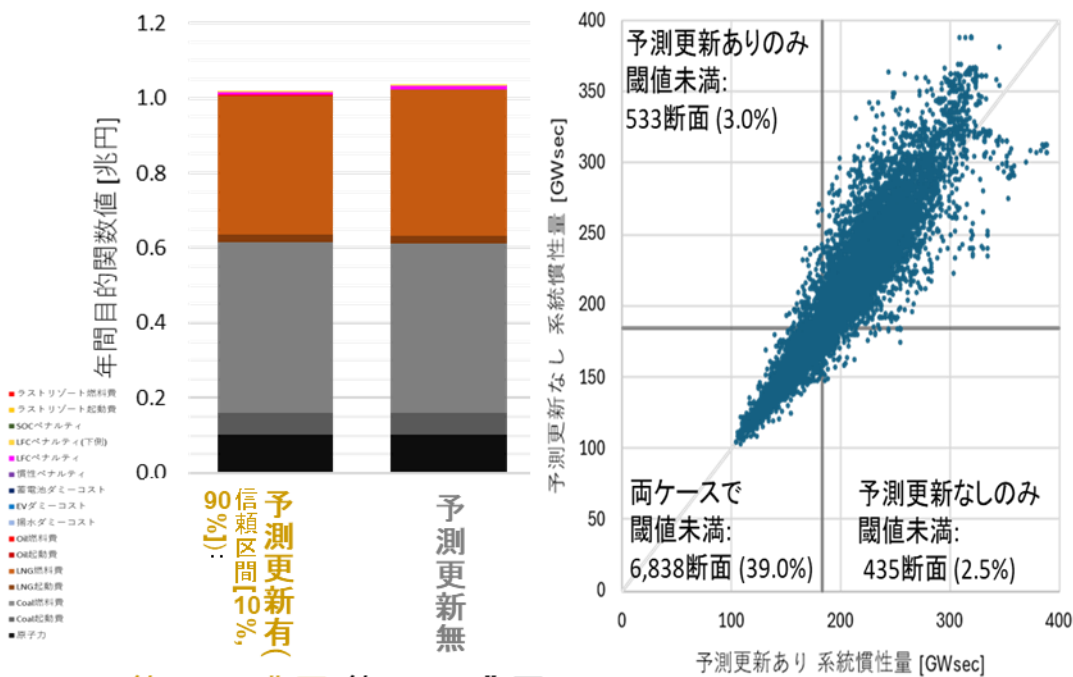


図: 2040年5月15日の慣性維持制約を課さない場合の系統慣性
(上)当日PV予測更新無 (下)同有の場合

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 早稲田大学(1/2)

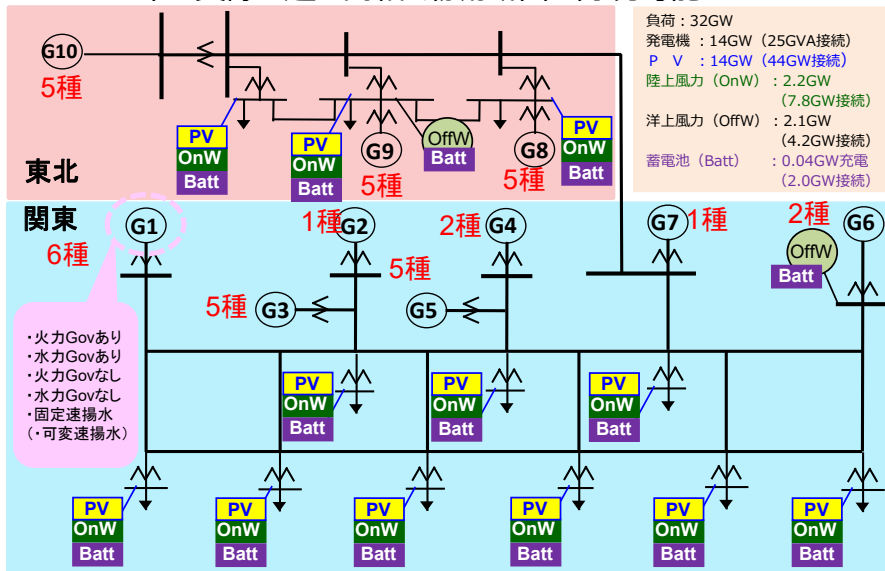
【2024年度の実施項目・進捗】

- 2030年シナリオに基づく拡張EAST10系統での慣性低下対策PCSの導入効果を評価・・・代表ケースに対し評価
- 2030年新シナリオの作成，系統モデルへの反映と慣性低下対策PCSの導入効果の評価
・・・需給シミュレーション実施後，最過酷断面抽出。拡張EAST10への反映／拡張WEST10作成に着手（A）
- 【北大連携】下位系統縮約モデルを接続した広域モデルの構築と評価検証・・・下位系統詳細モデルの作成完了（B）

A. 2030年新シナリオの作成，系統モデルへの反映と慣性低下対策PCSの導入効果の評価

【東日本】シナリオ見直し後，拡張系統モデル作成中

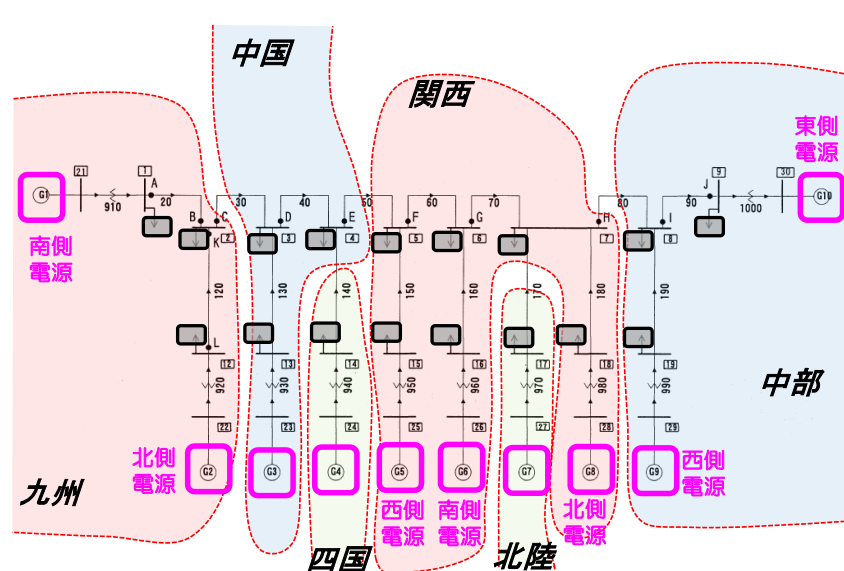
- ・シナリオ作成チーム議論を踏まえ，蓄電池容量等の見直し
- ・需要，PV，陸上風力，蓄電池を県単位での個別模擬
→2030年の実際に近い需給・潮流断面を再現可能



2030年新シナリオでの拡張EAST10系統モデル

【西日本】WEST30の電源種別や分布を反映した地域割付済

- ・電気学会標準系統モデルWEST10を拡張する方向
- ・WEST10での地域情報を補完するためのWEST30の分析実施
→設備実態の反映を検討し，解析用モデルの作成する予定

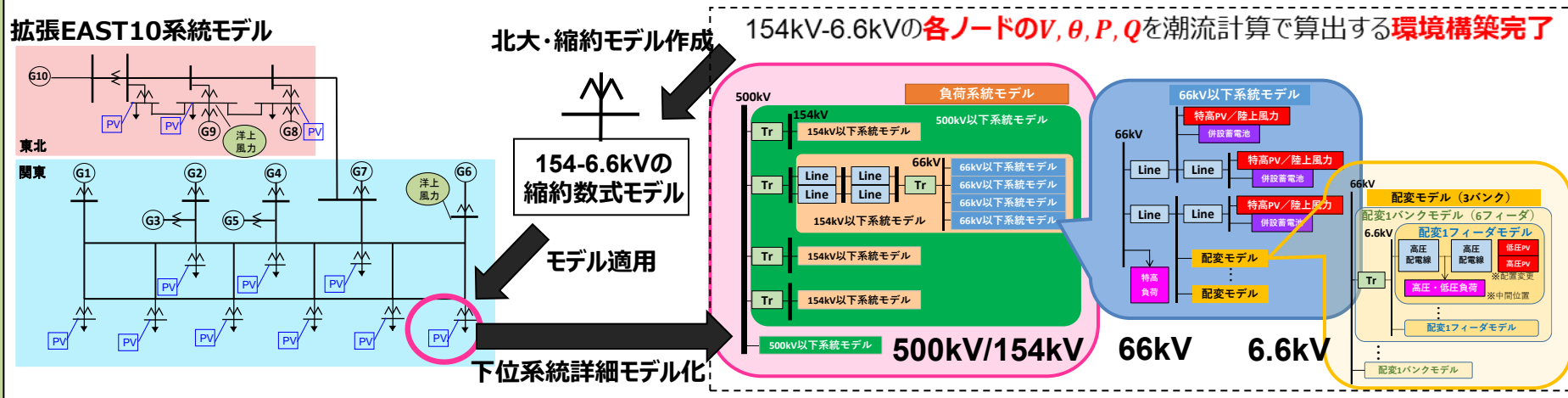


拡張WEST10系統モデルの地域割付け

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 早稲田大学(2/2)

B.【北大連携】下位系統縮約モデルを接続した広域モデルの構築と評価検証

拡張EAST10系統モデルの1 負荷系統を詳細モデルに置換した系統を対象に、縮約モデルの作成に必要な各ノードの V , θ , P , Q を取得するための**潮流計算環境の構築を完了**。縮約モデルの作成に向け、北大とのやり取りを継続中。



【2024年度の達成見込みの内容】

- ・ 2030年シナリオにおける拡張EAST10系統での慣性低下対策PCSの評価環境の構築と基礎検討の開始。
- ・ 2030年新シナリオに基づく拡張EAST10およびWEST10モデルの作成準備完了。
- ・ 下位系統縮約モデル作成に向けた下位系統詳細モデルの作成を完了し、縮約に必要なデータ算出環境を構築。

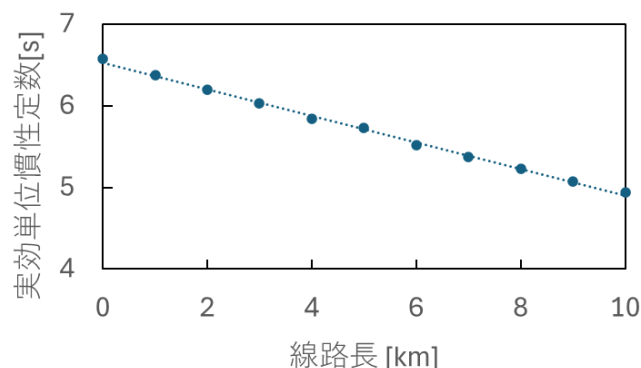
【2025年度の実施予定】

- 2030年新シナリオにおける拡張EAST10系統での慣性低下対策PCSの評価と2030年拡張WEST10モデルの作成および評価の着手
- 下位系統縮約モデルを接続した広域系統モデルにおける慣性低下対策PCSの評価検討

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 北海道大学(1/2)

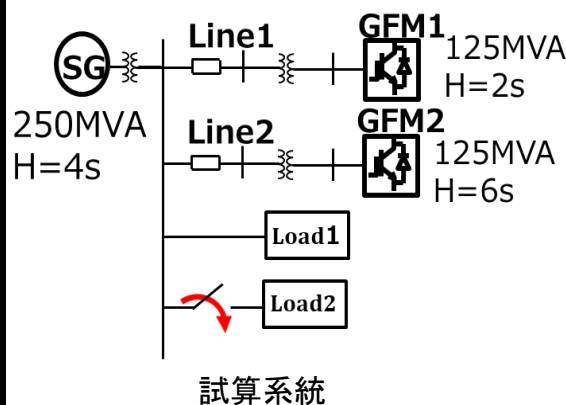
【2024年度の実施項目、進捗】

- 異なる制御方式の慣性低下対策PCSを含む下位系統の縮約モデル導出
- GFM Inv.に直列連系している電線路及びGFM Inv.導入容量がGFM Inv.の擬似慣性に与える影響の調査
- GFM Inv.群の慣性力推定手法の開発



GFM Inv.と擾乱発生地点間の線路長と
実効慣性の関係

- 実効慣性は線路インピーダンス(電氣的距離)の増加に対して**ほぼ線形に変化**
- GFM1機の場合は、**異なる2つの線路長での実効慣性をもとに、任意の線路長での実効慣性を推定可能**

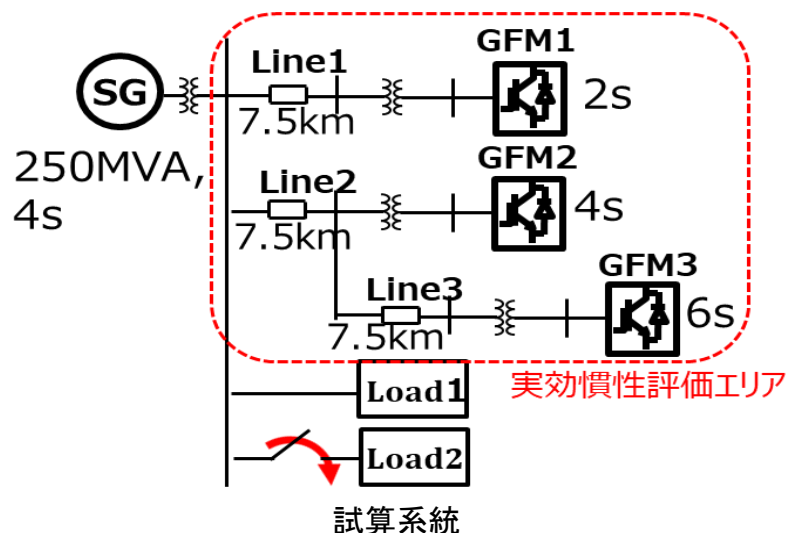


各線路長における実効慣性

	試算結果	加重平均
(a)0km,0km	6.25s	6.25s
(b)5km,5km	5.41s	5.40s
(c)5km,10km	5.02s	4.97s
(d)10km,5km	5.17s	5.16s

- GFM Inv.群の実効慣性は各GFM Inv.の実効慣性の**容量加重平均とほとんど一致**

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 北海道大学(2/2)



GFM1機での実効慣性

		GFM制御システムの慣性設定値				
		2	3	4	5	6
線路長 [km]	7.5	4.69	5.40	5.70	5.96	6.10
	15	4.22	4.75	4.97	5.15	5.25
	22.5	3.75	4.10	4.24	4.34	4.40

<GFM Inv.群の実効慣性推定手順>

1. GFM Inv.1機における線路長(インピーダンス)と実効慣性の関係を導出
2. 擾乱発生地点から見た各GFM Inv.までのインピーダンス(p.u.)を算出し、1の場合とインピーダンスが等しくなる時の実効慣性をそれぞれ算出
3. 2で算出した各GFM Inv.の実効慣性の容量加重平均を求め、GFM Inv.群の実効慣性を推定する

実効慣性 : 4.79s

加重平均 : 4.69s

GFM Inv.が連系するノードが異なる場合でも実効慣性を推定可能

【2025年度の実施項目、進捗】

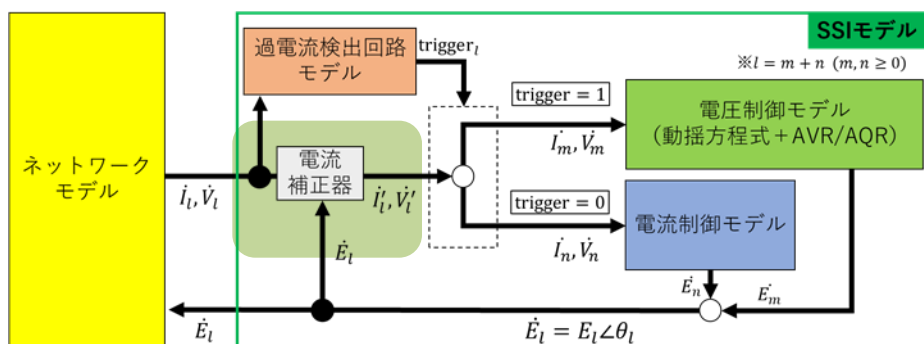
- 基幹系統大での効果検証
下位系統が保有する実効慣性を変化させた際のシミュレーションおよび、下位系統が保有する実効慣性と同等の同期発電機を連系した場合との周波数安定度の比較を行う。
- 早稲田大学が行うシミュレーションにおける下位系統の縮約モデルの提供

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討

広島大学・呉高専(1/2)

【2024年度の実施項目・進捗状況】

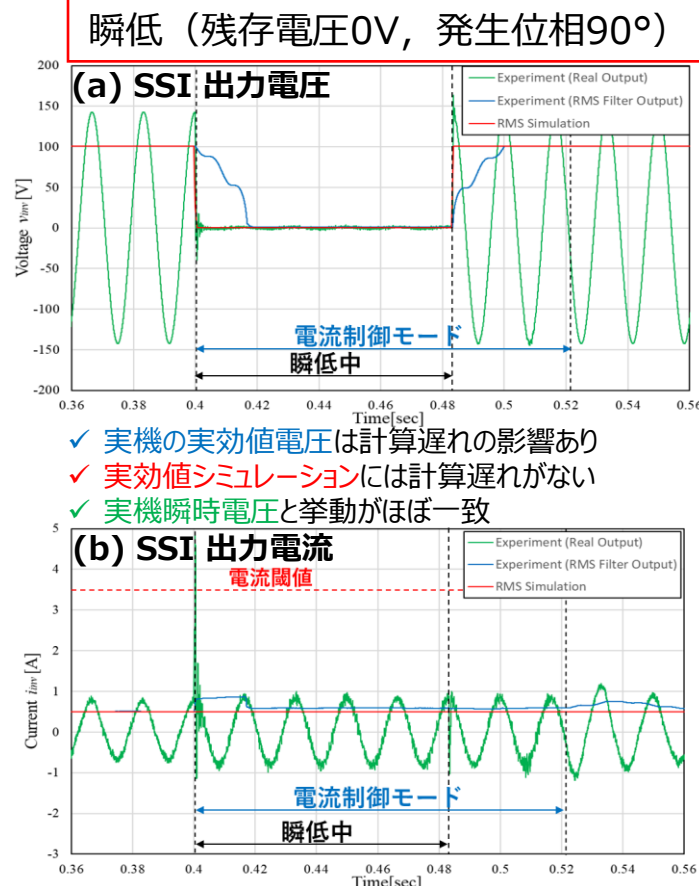
- 広島大と呉高専では、**提案済みの電流制限機能を実効値モデルに実装・改良**し、実機との挙動合わせ込みを実施。開発した実効値モデルを導入した基幹系統モデルでの周波数安定性の検討を実施。



- ✓ ネットワークモデルでの再計算を行うことで、瞬低発生から電流モードへ移行するまでの電流を補正する**電流補正器を新たに実装**
- ✓ パルス電流を含む電圧・電流を過電流検出回路モデルに入力し、**過大電流を取り除くことに成功**

【2024年度の成果 (その1)】

- 提案済みの電流制限機能を実装した、実効値モデルを用いて、実機実験との挙動合わせ込みを検討完了。
- 基幹系統モデルでの周波数安定性の基礎的検討を完了。



- ✓ 実機の実効値電圧は計算遅れの影響あり
- ✓ 実効値シミュレーションには計算遅れがない
- ✓ 実機瞬時電圧と挙動がほぼ一致

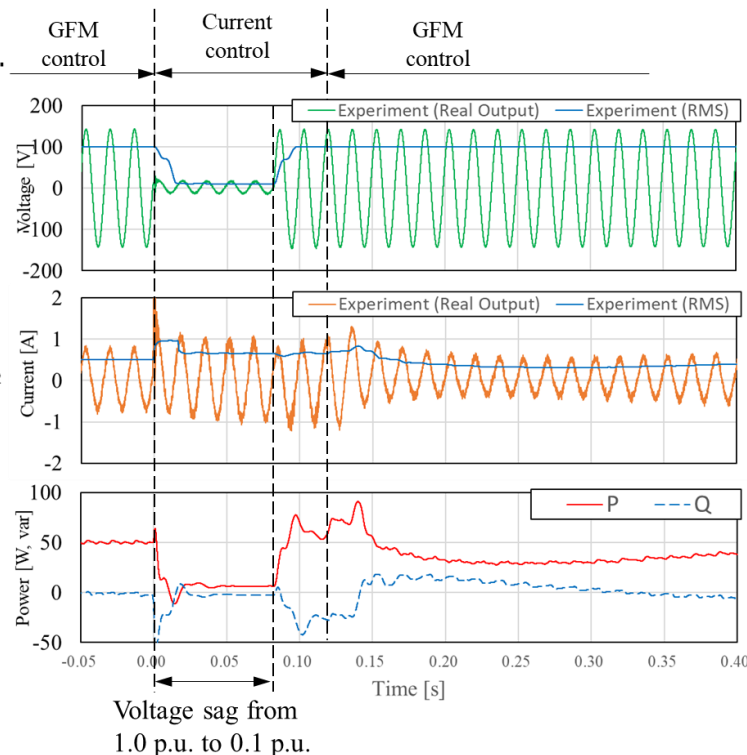
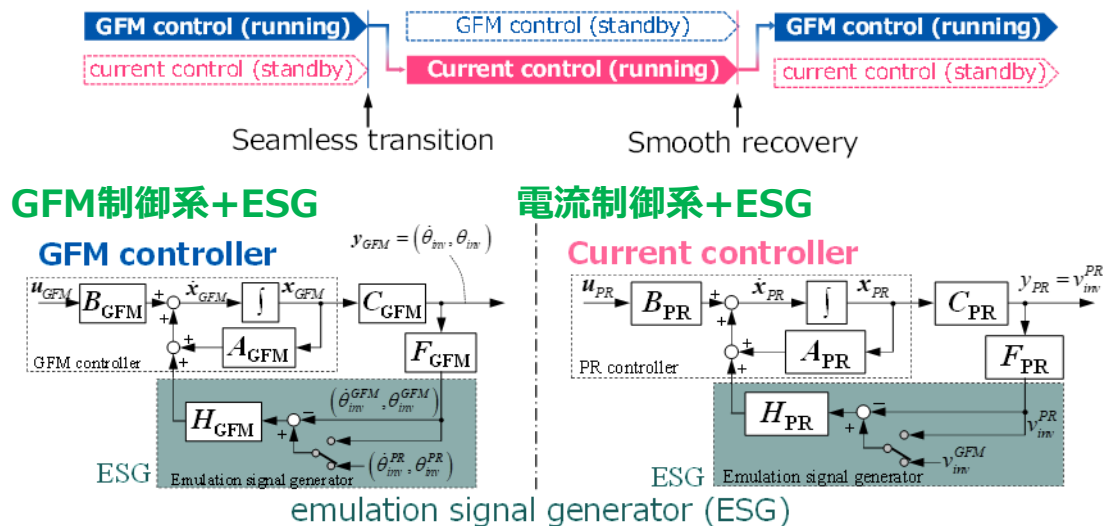
- ✓ 実機の実効値電流は計算遅れの影響あり
- ✓ 実効値シミュレーションは計算遅れなし(理想電流源)
- ✓ 実機の瞬時電流と大まかな挙動が一致

①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 広島大学・呉高専(2/2)

【2024年度の実施項目・進捗状況】

- 広島大では、2つ目として、**新しい電流制限機能**(GFM制御と電流制限のシームレスな切替および、故障除去後のスムーズな復帰を実現する)を提案。この新機能を実装した、シミュレーションと実機実験を実施。

- Operate the **GFM** and **current** controllers in parallel with seamless transitions.
- Smoothly recover from **current control** to **GFM control** after fault clearance.



[1] Shinya Sekizaki, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Naoto Yorino, Keisuke Higashi, Kohei Miyamoto, Toshihiro Yamada, "Single-phase synchronous inverter control for fault management using emulation signal generators," *Electric Power System Research*, vol. 234, 110681, (2024)

実験結果(上: 出力電圧, 中: 出力電流, 下: 出力電力)

【2024年度の成果 (その2)】

- 新たに提案した機能について、シミュレーションおよび、実機実験で、提案手法の有効性を検証完了。

【2025年度の実施項目】

- 開発機能を追加した実効値モデルを基幹系統モデルへ導入、慣性低下対策PCSの周波数安定性向上効果の評価

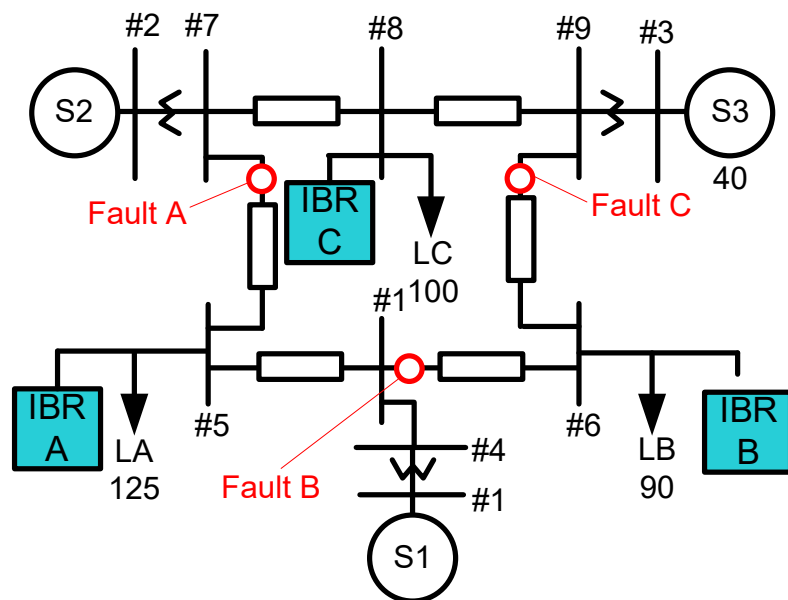
①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 (1/2)

産総研

【2024年度の実施項目、進捗】

- 2023年度までの1機、2機系のモデルでの検討に続き、今年度は9busモデルを対象に過渡安定性を評価
- **IBRの分布による影響、並列する同期発電機の過渡安定性への影響を中心に解析**

【モデル】



【解析条件】

- ・ 事故点：3種類 (Fault A/B/C)
- ・ IBRの分布：4パターン (左下表のとおり)
- ・ IBRの制御方式：12方式
 - ・ 主制御：Droop(制動のみ)/ VSM(制動+慣性)
 - ・ 電流制限：d軸優先/q軸優先/d-q比優先
 - ・ 位相発散抑制機能：あり/なし

【評価項目】

- ・ 系統全体の過渡安定性における**適切な対策装置の配置および制御方式**

【IBR容量 (MVA)】

Case	IBR A	IBR B	IBR C
均一分布	80	80	80
集中A	160	40	40
集中B	40	160	40
集中C	40	40	160

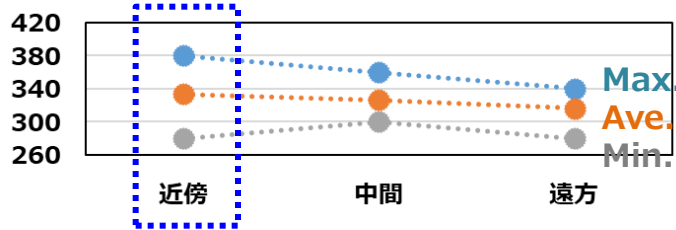
【評価指標】

- ・ CCT：臨界故障除去時間
 - ・ 発電機の脱調（運転継続不可の状態）を生じない最長の事故継続時間。長いほど過渡的に安定性であること意味する。

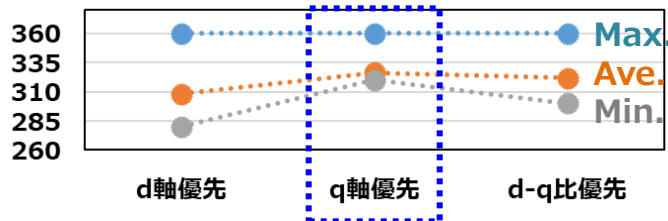
①-(3)慣性低下対策 PCS の導入効果、影響評価検討 (2/2)

産総研

■ 脱調電源(SG)とIBR集中箇所の距離の影響

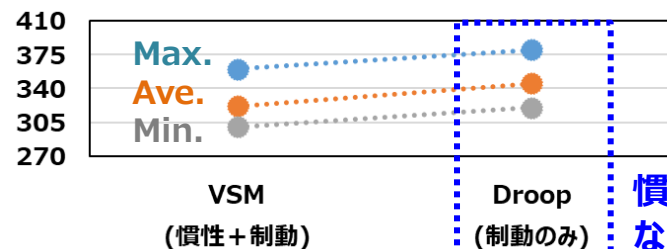


■ 電流制限の方式の影響



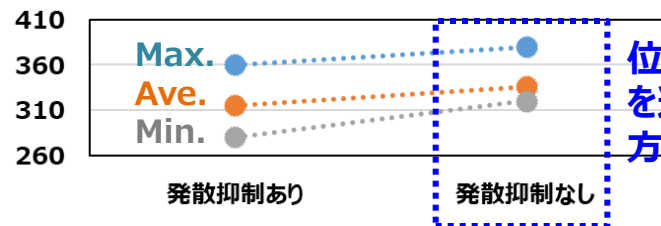
脱調電源近傍の電圧維持をサポートするような
IBRの分布・機能選択が有効

■ GFMの主制御方式の影響



慣性模擬が
ない方が安定

■ 位相発散抑制機能の影響



位相発散抑制
を適用しない
方が安定

GFM自身のFRT能力を向上させる機能選択が
脱調電源を相対的に加速させ脱調を助長する場合がある

【2024年度達成見込みの内容】

- 脱調電源の近傍に高速な電圧制御機能を持つ対策装置がある場合、過渡安定性が向上することを示した。
- GFMの位相発散(脱調)を抑制する機能が並列する同期機の脱調を助長する場合があることを示した。

【2025年度の実施予定】

- 過渡安定性を向上させる適応的なGFM制御手法の開発
- 対策装置が定態安定性に与える影響を解析するためのモデル開発