

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-4

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/

M-Gセットの実用化開発

発表：2025年07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（一財）電力中央研究所 永田 真幸,父母 靖二

*団体名（一財）電力中央研究所,（国）東京科学大学

問い合わせ先 （一財）電力中央研究所 <https://criepi.denken.or.jp/>

本NEDO事業の背景と目的

背景

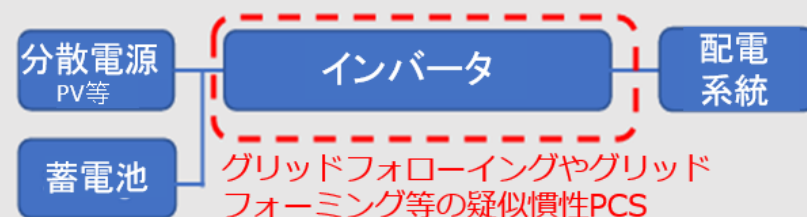
- ・再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入に伴って、回転系の発電設備が減少すると電力系統は瞬間的な大きな変動に耐えられず大停電に至るおそれがあることから、慣性力を確保する技術の重要性が高まっている。
- ・電力広域的運営推進機関の勉強会や送配電網協議会のロードマップにおいて、再エネ主力電源化に向けた今後の技術的課題として、短絡容量の低下が示されているが、具体的な研究開発はまだ行われていない状況にある。

目的

前事業「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発」で得られた成果を踏まえ、最新の技術動向及び政策動向を把握し、将来の電力系統の技術的な課題及び制度的な課題までを見据えた上で、慣性力低下対策の実用化及び新たな課題である短絡容量の低下に関する技術開発を行う。

1. 疑似慣性PCSの実用化開発

単独運転検出機能と周波数制御機能の両立



東京電力HD、東京電力PG、電力中央研究所、産業技術総合研究所、広島大学、北海道大学、東京大学、環境エネルギー技術研究所、三菱電機、沖縄電力、ネクステムズ

2. M-Gセットの実用化開発

系統事故発生時、同期発電機のように振る舞う分散電源と蓄電池を伴うM-Gセット



電力中央研究所、東京科学大学

本プレゼンでの報告内容

研究開発項目 2 における開発目標

【中間目標】（2024年度末）

再エネと蓄電池を伴うM-Gセットを開発し、GFMインバータ、系統安定化機能付きGFLインバータや同期調相機等とともに基幹系統等での連系運転及び系統事故時に適切な動作を行うことを検証する。

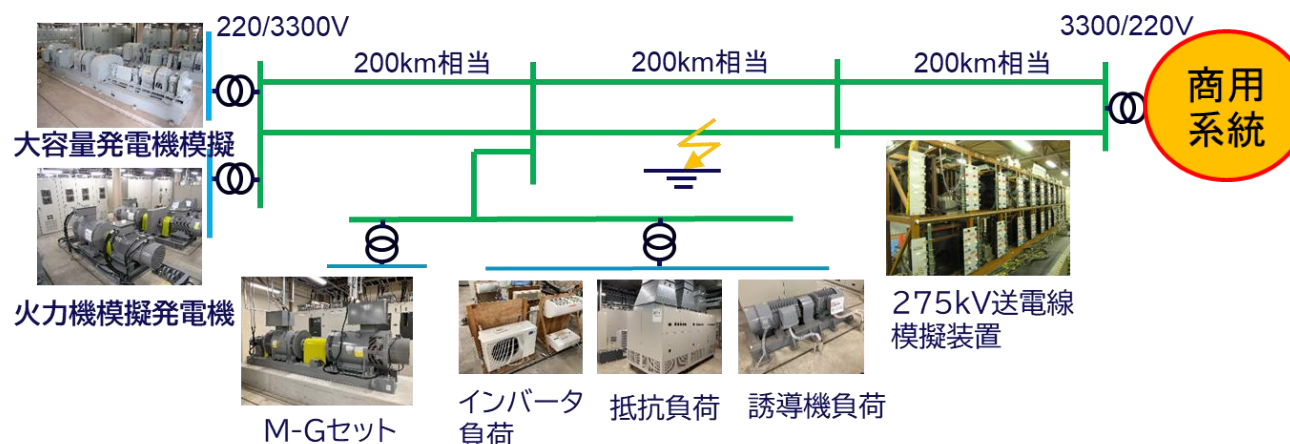
【最終目標】（2026年度末）

M-Gセット（または同期調相機）、GFMインバータ、系統安定化機能付きGFLインバータを組み合わせて連系した系統で、系統事故時に適切な動作を行うことを検証する。

研究開発項目 2 における開発項目

(研究開発項目 2 M-Gセットの実用化開発)

基幹系統を模擬したアナログ電力系統シミュレータ（下図・下表）を用いて、再エネと蓄電池を接続したM-Gセットの技術的成立性の検証、および、M-Gセットをはじめとする各種系統安定化対策の系統安定性維持機能の検証を行う



主なミニチュアモデルと仕様	
回転型発電機	100kVA × 3、90kVA × 1、60kVA × 1 14kVA × 2、25kVA × 1
負荷	インバータ負荷、誘導機負荷、抵抗負荷
送電線	275kV模擬送電線、66kV模擬送電線

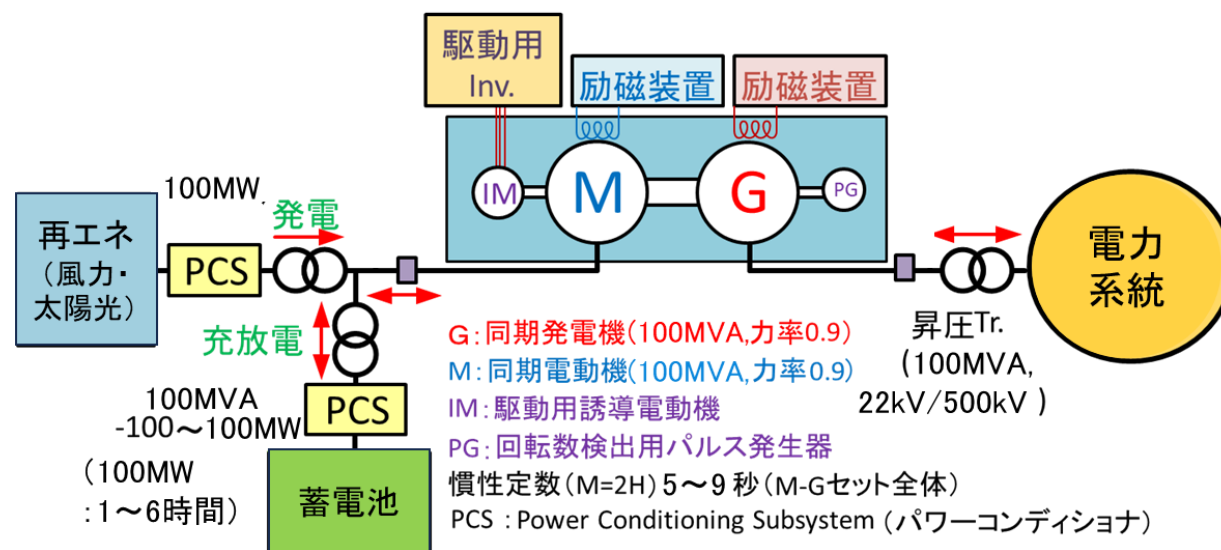
電中研が保有するアナログ電力系統シミュレータ

アナログ型電力系統シミュレータは、基幹系統・負荷系統をミニチュア装置で模擬したもので、系統事故が発生したときの電力系統に与える影響を評価します。

再エネと蓄電池を伴うM-Gセットについて

再エネ導入拡大を進めるための方策の一つとして電中研はM-Gセットを提案している

- 電力系統側から見れば発電機が並列されているのと同価
 - ✓ 同期発電機が持つ性質・系統安定化能力をすべて保有
(慣性・同期化力・基幹系統の電圧維持能力など)
 - ✓ 系統に必要な同期機比率の確保に寄与
 - ✓ 系統事故時にも特段の配慮が不要
(事故電流を供給)
- 再エネ側から見れば系統事故の影響を緩和

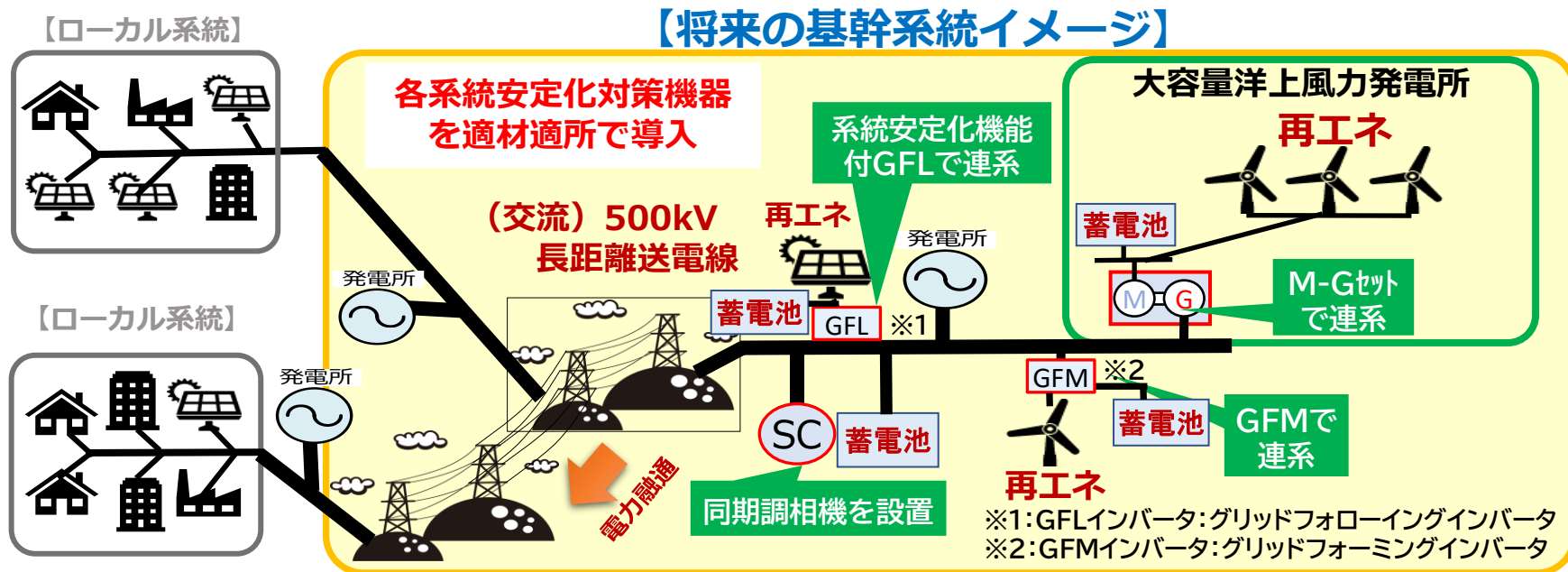


実系統への導入を想定した再エネと蓄電池を伴うM-Gセット

M-Gセット実証設備

本事業での取り組み

- ✓ 電中研狛江地区のアナログ型電力系統シミュレータを活用し、M-Gセット、同期調相機、系統安定化機能付きGFL/GFMインバータの実験環境を構築する
- ✓ これら系統安定化機器の有する能力は必ずしも同一ではないことから、系統事故時を模擬した実験的検証により系統安定性維持の観点から比較評価し、導入時の留意点や得失を明らかにする
- ✓ これらにより、効果的な系統安定性維持対策を評価することが可能となる



実施内容

◆ 本事業での主な実施項目と内容

各種系統安定化対策の実験環境構築（電力中央研究所）

- ・アナログ電力系統シミュレータに、供試機として系統安定化機能付GFLインバータ（以降、S-GFLインバータ）、GFMインバータを各 1 台導入

各種系統安定化対策の実験的検証（電力中央研究所）

- ・系統事故時を模擬した実験的検証により系統安定性維持の観点から比較評価し、導入時の留意点や得失を整理

各種系統安定化対策の電力系統への導入に関わる解析的検討（東京科学大学）

- ・蓄電池を伴う設備はコスト増となるため、GFMの高い制御性を活用した蓄電池を有しない新たな制御方策として、再エネ連系のGFMインバータについて蓄電池がない構成を考慮

各種系統安定化対策に関する海外調査（電力中央研究所）

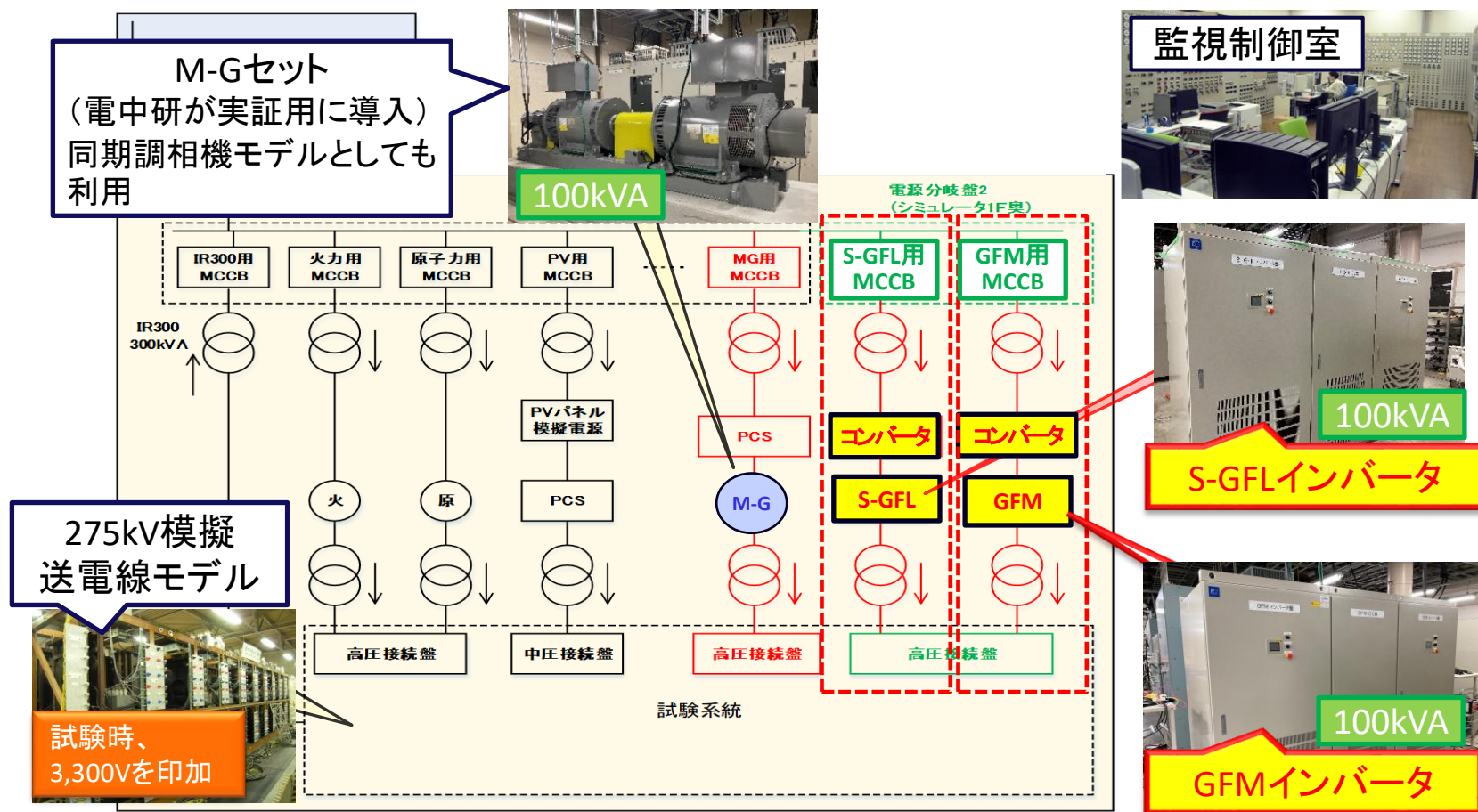
- ・諸外国の動向として、特に基幹系統の安定性の課題・諸制度や取り組み状況、研究開発の状況等について調査を実施

研究スケジュール

事業項目	2022 年度				2023 年度				2024 年度				2025 年度				2026 年度			
M-G セットをはじめとする各種系統安定化対策の実験環境構築																				
S-GFL インバータの導入			仕様検討			装置製作・設置														
GFM インバータの導入			仕様検討			装置製作・設置														
M-G セット/S-GFL/GFM 用計測制御 IF および検証環境の製作																				
各種系統安定化対策の実験的検証																				
M-G セット、同期調相機による系統安定化対策の実験的検証						単体装置での連系試験					必要により追加試験								組合せ試験	
GFM インバータ、S-GFL インバータによる系統安定化対策の実験的検証													単体装置での連系試験						組合せ試験	
各種系統安定化対策の電力系統への導入に関わる解析的検討																				
電源脱落時における再エネ用 GFM の制御法開発																				
電源脱落時における再エネ用 GFM と背後リソースの協調制御法の開発																				
地絡事故時における再エネ用 GFM の制御法開発																				
M-G セットをはじめとする各種系統安定化対策に関する海外調査																				
実系統への導入に向けた仕様検討と試験環境の開発																				

各種システム安定化対策の実験環境構築の成果

メーカ保有の技術および論文等を参考に将来普及が予想される技術を織り込んだ仕様をもとに、供試機となるS-GFLインバータおよびGFMインバータを各1台製作・導入

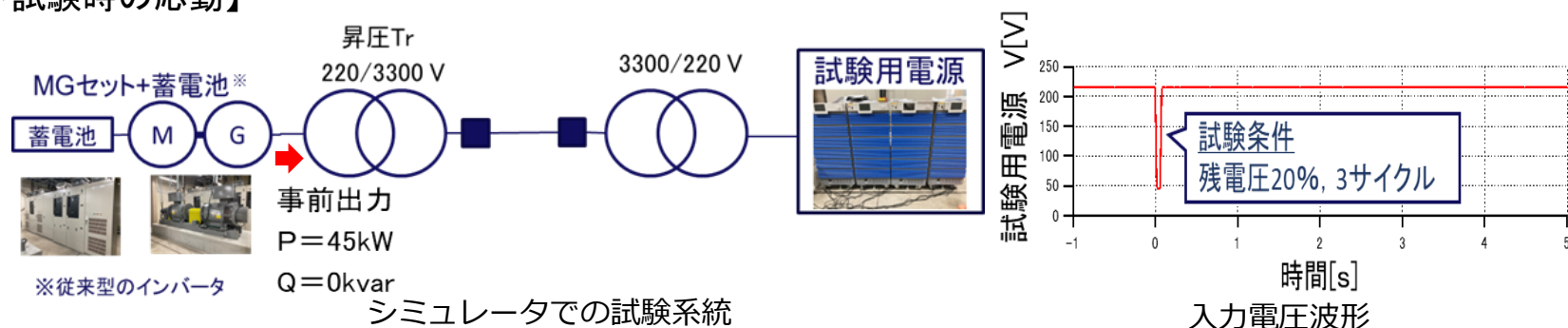


基幹系統を模擬したアナログ電力系統シミュレータ

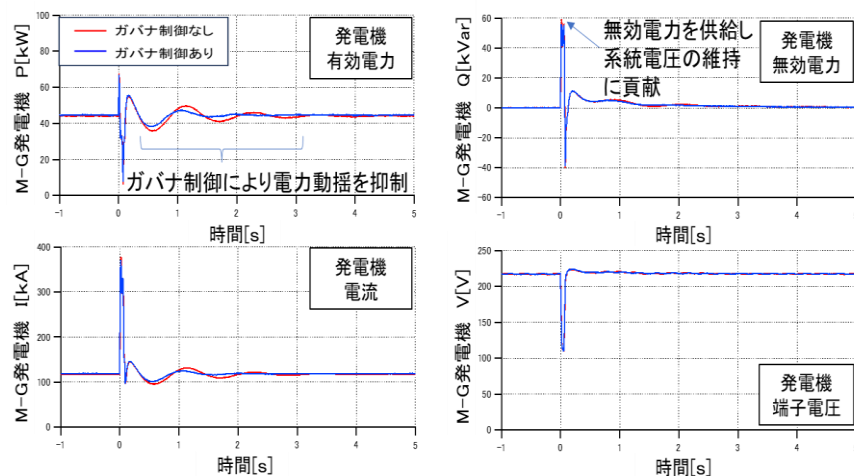
各種系統安定化対策の実験的検証の成果 (M-Gセットの技術的成立性)

M-Gセットについて、電圧低下・周波数低下試験や系統事故試験にて同期機の性質や系統安定化機能が所望の性質・能力を発揮することを確認

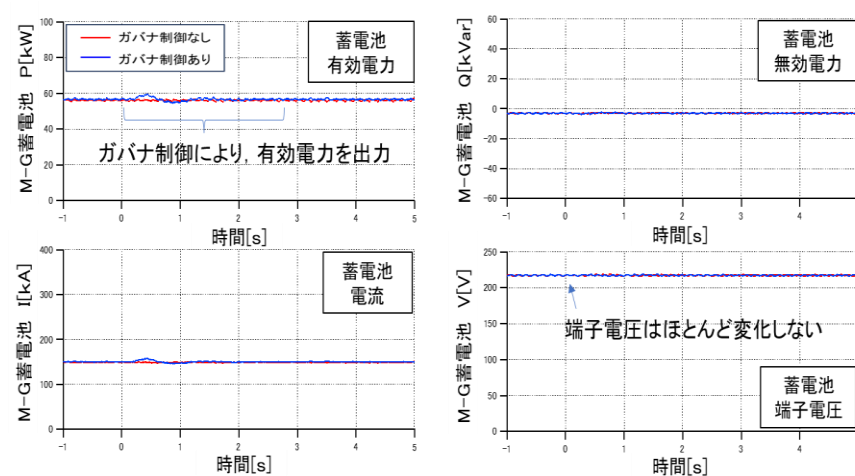
【電圧低下試験時の応動】



G側発電機出力波形 → 従来の同期機と同様の挙動



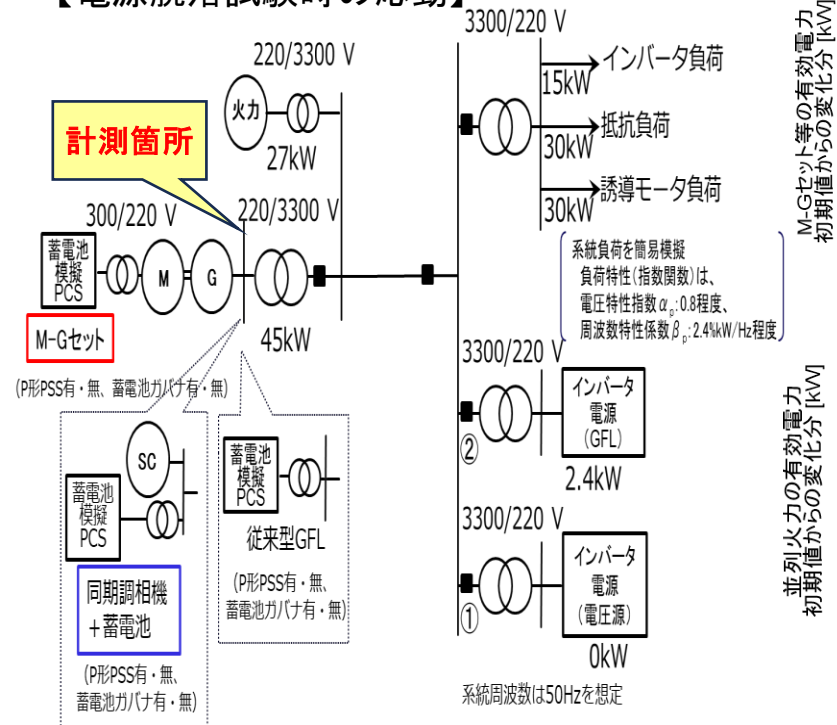
M側蓄電池出力波形 → 電圧低下の影響が及ばない



(M-Gセットと同期調相機+蓄電池を検証)

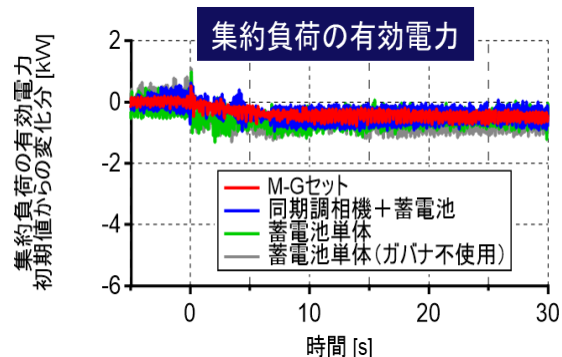
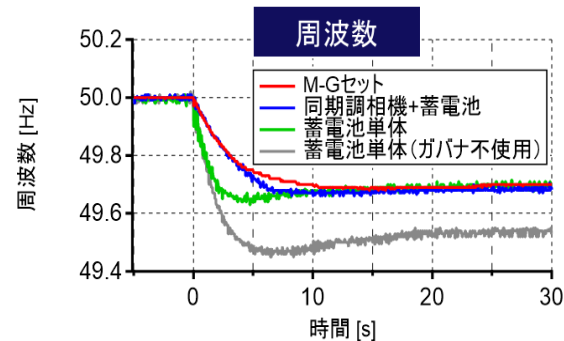
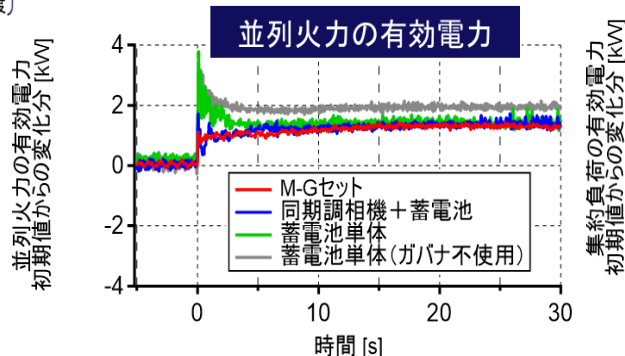
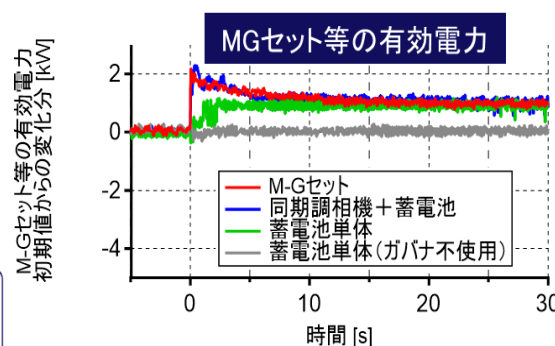
「M-Gセット」および“再エネ活用”と“同期機能力の活用”の観点からM-Gセットに準じるものとして「同期調相機＋蓄電池」について各種系統事故試験を実施し、安定化能力を比較
設備形態の違いにより一部試験での応動の相違はみられたものの、いずれも同期機の性質・系統安定化能力を活用する系統安定化対策であり、現時点で適用する上で大きな性能差はないことを確認

【電源脱落試験時の応動】



シミュレータでの試験系統

- ①、②（計測 0 秒時点）の順で遮断器を開放

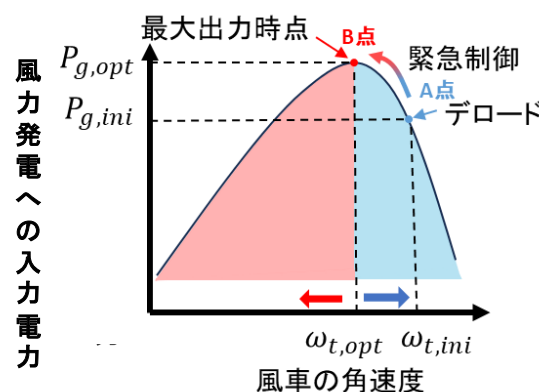
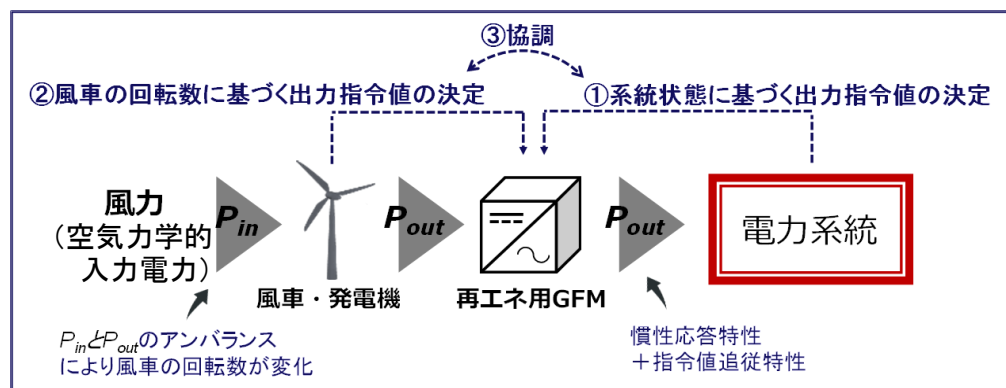


電源脱落時の試験結果

慣性および蓄電池のガバナフリーによって出力を増加させることで、RoCoFおよびNadirの観点でほぼ同等の周波数維持能力を示した。また、「蓄電池（GFL）単体」と比較して、高い能力を発揮した。

各種系統安定化対策の電力系統への導入に関わる解析的検討成果

再エネ用GFMモデル（慣性応答特性と出力指令値追従特性を具備）を開発
蓄電池を有しないGFM型Type 4 風力発電システムの構築のため、再エネ用GFMモデルを用いた電力系統の周波数安定化制御と風車の回転数制御の協調制御手法を開発中



風車の角速度と入力電力の関係

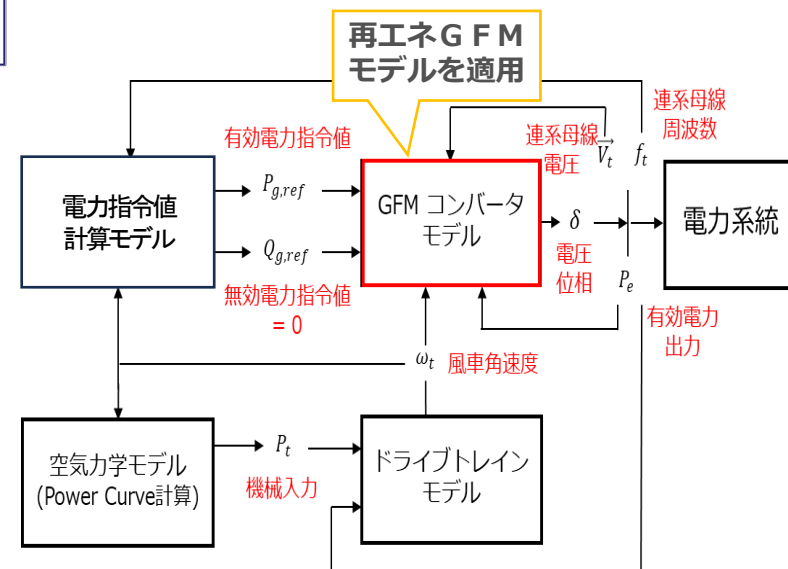
風車の回転数の変化や、それに伴う風力発電への入力電力の変化を考慮

- 平常時は出力制御 (de-loading control) によりA点で運転することを想定
- 緊急時にA点からB点に移行させることで、慣性エネルギーの放出と入力電力の増加が見込まれる。(風速・ピッチ角は一定)

蓄電池を有しない風力発電へのGFMの適用

GFMの出力制御に際して、風車の回転数の変化を考慮が必要

- 風車の回転数が運転可能範囲を逸脱すれば風力発電システムは停止
- 風車や発電機の運動エネルギーの利用により、蓄電池の併設なしで慣性応答実現の可能性

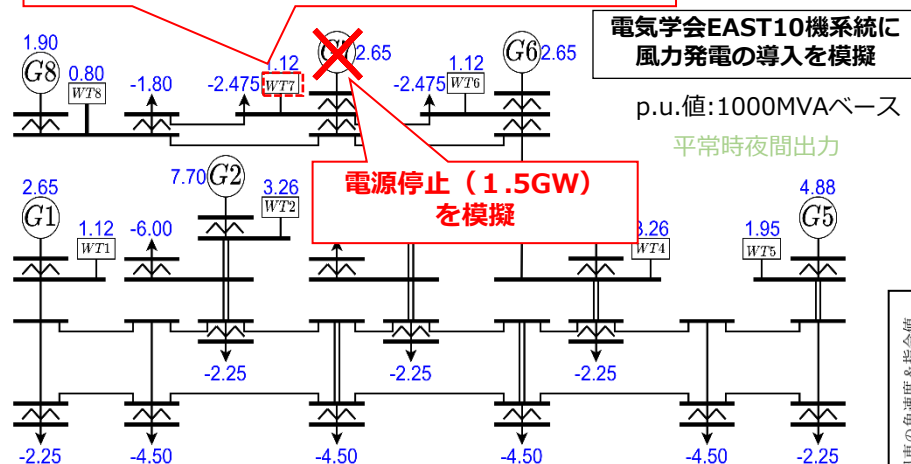


構築中のGFM型Type4風力発電システムの概要

各種系統安定化対策の電力系統への導入に関わる解析的検討成果

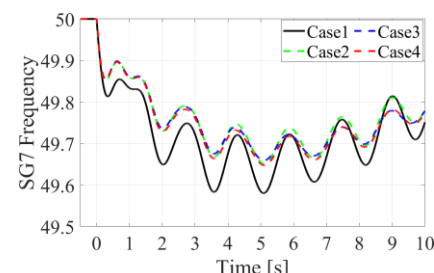
再エネ用GFMではS-GFLと同様に有効電力を指令値に追従させられるため、風車の角速度も指令値に追従させられる（運転停止のリスクが低い）ことを確認

停止電源近傍の風力発電の制御手法の違い
による周波数安定化効果を評価

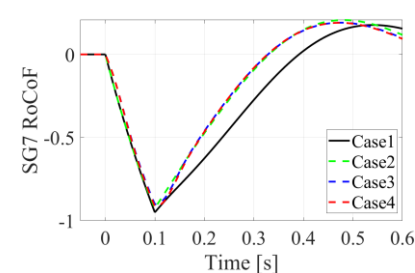


ケース	WT7のコンバータ制御手法	緊急制御
Case1	GFL	×
Case2	S-GFL	○
Case3	GFM(Droop)	○
Case4	再エネ用GFM(VGC*) 現時点では可変ゲインは1に固定する	○

*Variable Gain Control : 可変ゲイン制御手法 (提案法)

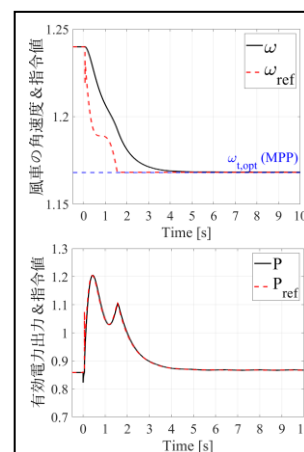


(a) 周波数

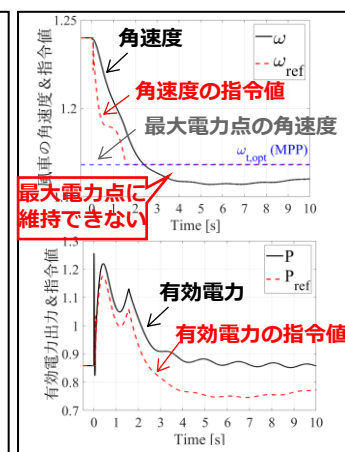


(b) RoCoF

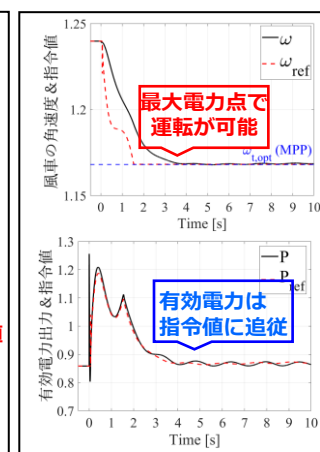
停止電源近傍の発電機の周波数とRoCoF



Case 2(S-GFL)



Case 3(Droop)



Case 4(VGC)

WT7の風車の角速度(上図)と有効電力(下図)

各種系統安定化対策に関する海外調査の成果

再エネ導入の進む各国でIBRの増加や同期発電機の減少による慣性力の低下、短絡容量の減少などが顕在化。このため、系統安定化機器による設備対策（同期調相機、STATCOM、GFMインバータ等）やグリッドコードの整備、市場の検討などを実施

各国の安定性維持に関する検討状況一覧（１）

	英国 	ドイツ 	イタリア 
系統安定性に関する課題意識	- 慣性力の低下 - 短絡容量の減少	- 慣性力の低下 - 無効電力供給能力・電圧維持能力の低下	- 慣性力の低下 - 短絡容量の減少 - 電圧維持能力の低下
系統安定性維持のための制度的対応	- グリッドコード改定（RoCoFリレーの整定変更、2028年以降新規連系IBRにGFM機能具備要件化予定） - GFMの導入に向けた取り組み（ロードマップの策定、安定性市場の導入、ベストプラクティスの発行）	- 風力発電からの無効電力供給範囲の拡大・および報酬スキームの必要性 - 無効電力の市場ベースの調達の検討 - GFMの技術要件の発行 - 系統安定性ロードマップ作成	- Fast reserveの調達のみ（2022年度時点） - 将来的なRfG※の改訂は想定しているものの、国内への反映は状況に応じて検討予定 ※欧州のグリッドコード
系統運用者の取り組み	- Stability Pathfinderによる安定性サービス調達（同期調相機、GFM型蓄電池等） - 英国初GFM型蓄電池の本格運用開始（2024年度） - 周波数応答サービス見直し - Stability Market導入実証	- STATCOM等の対策機器の設置 - TSO間、DSO連携での無効電力融通	- 同期調相機等の対策機器の設置 - VSC型HVDCを活用した系統安定性対策の実施 - フライホイール付同期調相機やGFM機能のシミュレーションによる効果検証等

各種系統安定化対策に関する海外調査の成果

各国の安定性維持に関する検討状況一覧（２）

	米国 		豪州 
	テキサス（ERCOT）	ハワイ（HECO）	
系統安定性に関する課題意識	- 慣性力の低下 - 短絡容量の減少・系統電圧維持能力の低下 - コンバータ起因不安定性現象	- 慣性力の低下 - 短絡容量の減少・系統電圧調整維持能力の低下	- 慣性力の低下 - System Strength（系統強度）の低下
系統安定性維持のための制度的対応	- FFRの市場調達開始(2022年)、アンシラリーサービス市場再編（2023/6） - 一定容量以上発電事業者に対してPMU設置義務化 - 電圧・周波数RT要件および事故波形計測装置設置要件の改定作業中	- 第三者からの系統安定化に係るサービス調達（GSPA）により容量（供給力提供）やFFR等を調達 - 短絡電流、慣性、電圧調整能力についても将来的に第三者からの調達を検討	- 高速応答（数msec）を行うFFR契約の枠組みを整備 - GFMに関する予備的なガイダンス文書をAEMOが発行 - 新規電源接続申請時、連系電源による接続地点のSystem Strengthへの影響分析の実施を規定化
系統運用者の取り組み	- 慣性低下対策として、周波数維持限度の基準となるCritical Inertiaの管理とFFRの調達 - Weak Grid対策として、<u>同期調相機 2 台設置済</u>、今後 6 台新設予定	<u>同期調相機の導入を計画</u>（廃止火力機の同期調相機への転用など） - 再エネ公募調達において、蓄電池（再エネ併設含む）に<u>GFM機能を要件化</u>	<u>同期調相機の新設・改修</u> <u>GFM型蓄電池の導入</u> - FFRの調達 - 石炭火力廃止計画の見直し送電線新設・増強によるインピーダンスの低減

今後の技術課題

◆ GFMインバータの過電流時等の応動

- ✓ 供試機として導入した各インバータの評価を今後実施。特にGFMインバータで課題となる当該機器の過電流時に系統安定性維持に寄与できる応動が可能かどうか
- ✓ 基幹系統送電線の事故発生から系統連系維持のために実施する高速再閉路実施までの間において機器の運転継続が可能かどうか

◆ 基幹系統への各種安定化対策機器適用時の得失整理

- ✓ 下記の観点において、M-Gセットや同期調相機、GFMインバータ、S-GFLインバータなどの各種安定化対策機器にどのような相違があるか
 - ①同期安定性 ②事故時の電圧維持能力 ③周波数安定性
 - ④安定化対策機器に求められる事故時の運転継続性
 - ⑤低短絡容量条件下での制御安定性 など

◆ GFM型風力発電システムの系統安定化効果の整理

- ✓ 平常時の風力発電のデロード率の違いや、風力発電の慣性定数の違いが、系統安定化効果にどのような影響を与えるか

まとめ

研究開発項目2（M-Gセットの実用化開発）の取り組み

- ◆ 近年検討が進み、一部諸外国では実機導入されているGFMインバータやS-GFLインバータの系統安定性維持能力を評価する試験環境を構築
- ◆ M-Gセットの技術的成立性を実証機を用いてアナログ電力系統シミュレータにて検証
- ◆ 蓄電池を有しないType4風力発電に適用可能なGFMインバータの制御手法（再エネ用GFM※）を開発し、シミュレーションによって系統安定化効果の解析的検討を実施
 - ※蓄電池に対しても適用可能
- ◆ 再エネ導入が進む、諸外国の系統安定性維持のための対策機器、制度等について調査