

「再エネ主力電源化」に向けた 技術的課題及びその対応策の検討状況について

～今後の系統現象の計測環境整備について～

2025年1月28日

調整力及び需給バランス評価等に関する委員会事務局

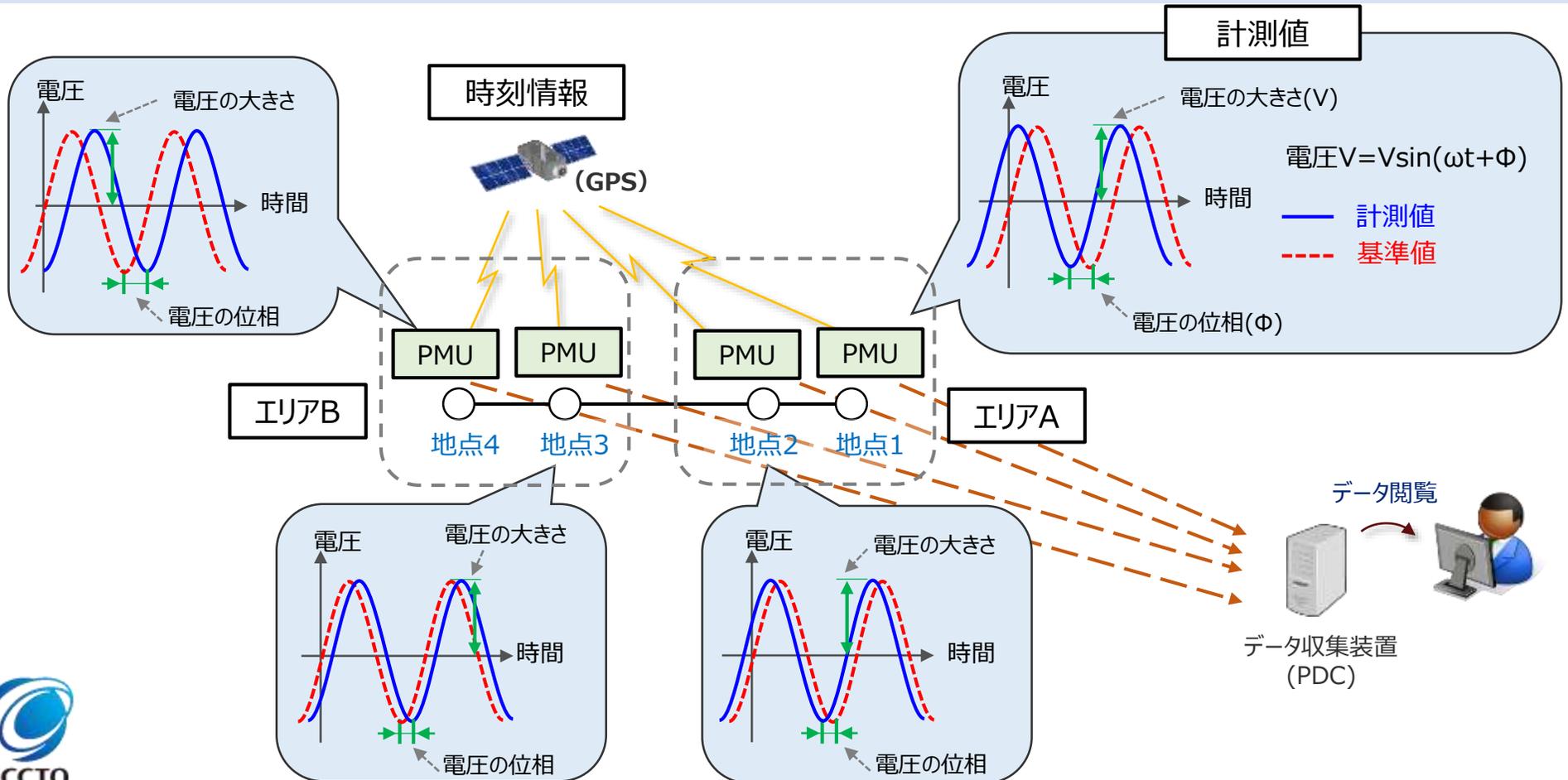
- 「再エネ主力電源化」に向けて、これまで本委員会において、慣性力低下による電源脱落時の周波数変化率 RoCoF増加対策や、短絡容量低下（電圧維持能力低下）による系統事故時の急峻な電圧・周波数変動で生じるインバータ電源停止の対策の課題整理を行ってきた。
- これらは再エネ主力電源化（インバータ電源の導入拡大）・同期電源減少によって電力系統を構成する環境が変化し、次世代側のネットワークに転換する過程で生じうる課題に対応するものであった。
- 将来にわたって系統安定性を維持し安定供給を果たしていくためには、新たな環境での系統現象を把握する計測環境を整備し、将来において生じうるリスクに対して合理的な対応策を予め構築することが重要である。
- 将来に向けた系統現象の計測装置として、一般送配電事業者がPMU（Phasor Measurement Unit：同期フェーザ計測装置）を新たに導入することが必要と考えられるため、ご議論いただきたい。

1. PMUとは

2. PMUの導入によって期待される効果

3. PMUの設置の進め方

- PMUとは、電力系統における各地点の**電圧・電流・位相**の計測情報を、**GPSの時刻情報に同期**して時系列の計測情報として**常時計測**する装置である。
- 従来の計測装置では計測できていなかった位相を計測できる点や、オンラインで短周期に電力系統の情報を収集できる点にPMUは優位性を持っており、PMUを活用した電力系統の広域的な計測（Wide Area Measurement System : WAMS）の導入が世界的に進められている。



- これまで一般送配電事業者が設置しているPQVF（計測装置）は、多くの場合、系統事故などのじょう乱発生時に計測を行う仕様となっており常時の計測は行っていない
- また、計測装置間のデータの同期を正確には行っていないため、位相の計測はできていない。
- ただし、PMUは常時計測およびネットワークを介したデータ送信を行うことから、高サンプリング化によるデータ量の増加や、セキュリティ対策等によってPQVFよりもコストが増加する。

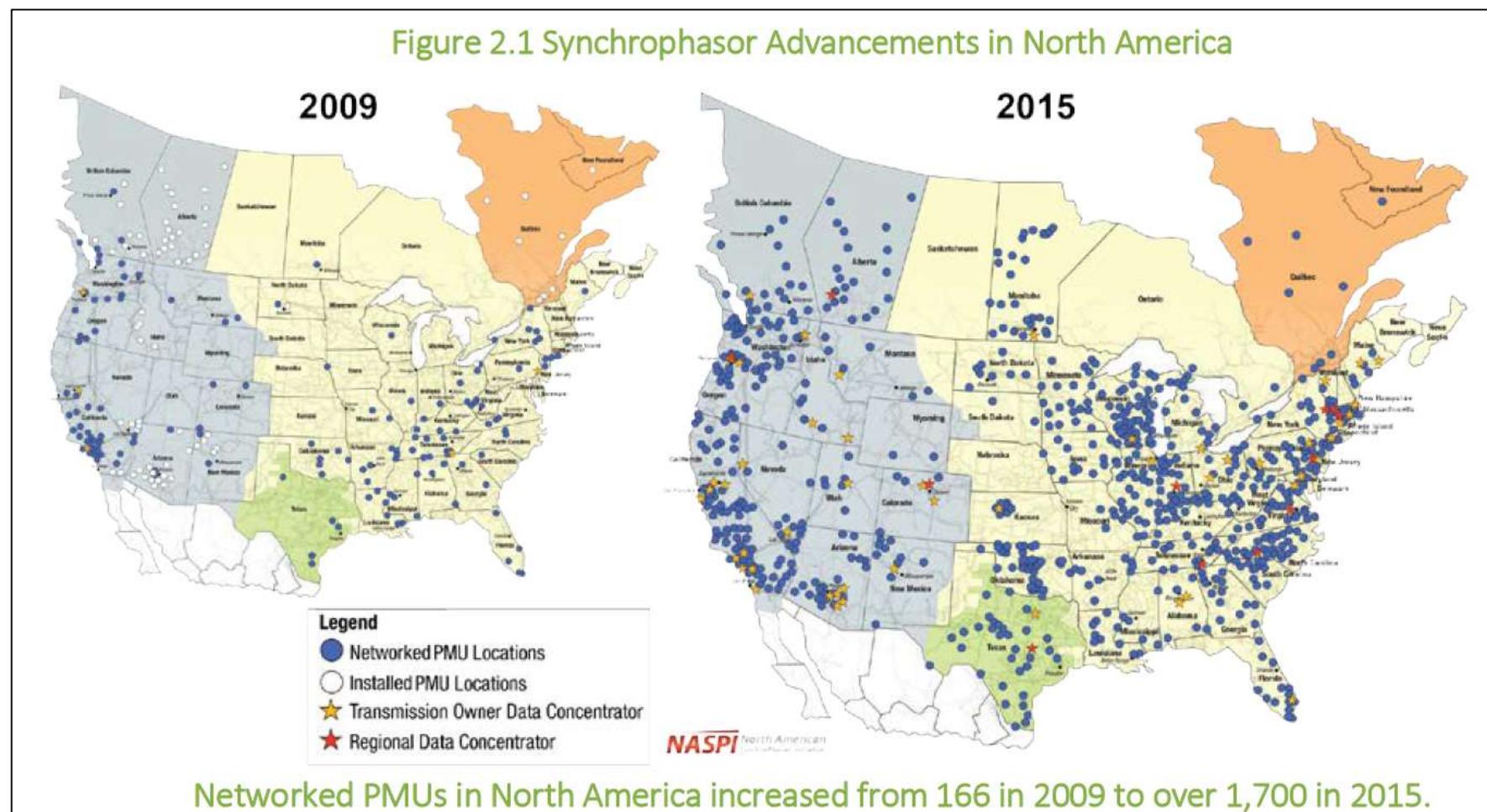
	既存の計測装置PQVF（中部電力PGの例）	PMU
イメージ	<p>各エリアごとに計測</p> <p>システムじょう乱時に計測データを蓄積</p> <p>サーバー</p> <p>データ閲覧</p>	<p>広域的に計測</p> <p>(GPS)</p> <p>基準</p> <p>常に計測データを蓄積</p> <p>データ閲覧</p> <p>データ収集装置</p>
測定項目	有効電力、無効電力、電圧、周波数	電圧、電流、 位相 (演算により有効電力、無効電力、周波数の算出可能)
計測方法	システムじょう乱時 （指定時刻、強制起動も可）	常時計測
演算幅 サンプリング周期	2サイクルあたり128サンプリング 2サイクルごとの実効値を出力	1サイクルあたり256サンプリング 1サイクルごとの実効値を出力 (NEDO実証の仕様の例)

- 今後、洋上風力など再エネの更なる導入、蓄電池の大量連系、HVDCなど、インバータ機器の導入増加が見込まれており、電力システムを取り巻く技術的環境が大きく変わり、従来は生じなかった系統現象が生じることが想定される。
- このような環境変化に向けて、電力システムの詳細な計測データをもとに電力システムの適切な解析モデルの構築・解析技術の向上を行い、安定供給を損なう事象（系統不安定性）の防止や影響の最小化が必要である。
- したがって、電力システムの各地点の情報を高精度かつ広域的に同期をとった計測が可能である**PMUを一般送配電事業者が導入することは、再エネ主力電源化に向けた基盤構築の一つとして、重要な施策になりえる**と考えられる。

PMUを活用した運用の高度化のイメージ

系統現象への 対応 望ましい 計測環境	発生リスクを低減させる ➤ 適切な事前評価を行うため、 系統解析モデルの精度を 高める	発生を防ぐ ➤ 不安定現象の発生の 予兆を捉え、運用等で 発生を極力回避する	再発を防止する ➤ 発生後の原因究明、 事後対策を速やかに 実施する
	必要な環境	必要な環境	必要な環境
高サンプリング化	・データ精度を高めることで系 統解析モデルの精度を向上	・発生の予兆を把握するための 十分な計測精度を確保	・現象を分析するための十分な 計測精度を確保
測定データへの 位相情報追加	・地点間のデータを精緻に比 較することで系統解析モデル の精度を向上	・短絡容量や慣性の推定等を 行うため、位相情報を取得	・地点間の精緻な比較により、 相互干渉の状況を把握し速 やかに分析・対策を検討
常時計測化	・平常時の応動等も分析可能 とすることで、系統解析モデル の精度を向上	・常時計測により、不安定な 系統現象等の予兆を確認	・過去の状況を遡って分析でき ることで対策を検討に寄与

- PMUは諸外国でも導入が進められており、北米においては、2015年時点では1700か所に設置されほぼ全域をカバーできるまで導入が進められている。



1. PMUとは

2. PMUの導入によって期待される効果

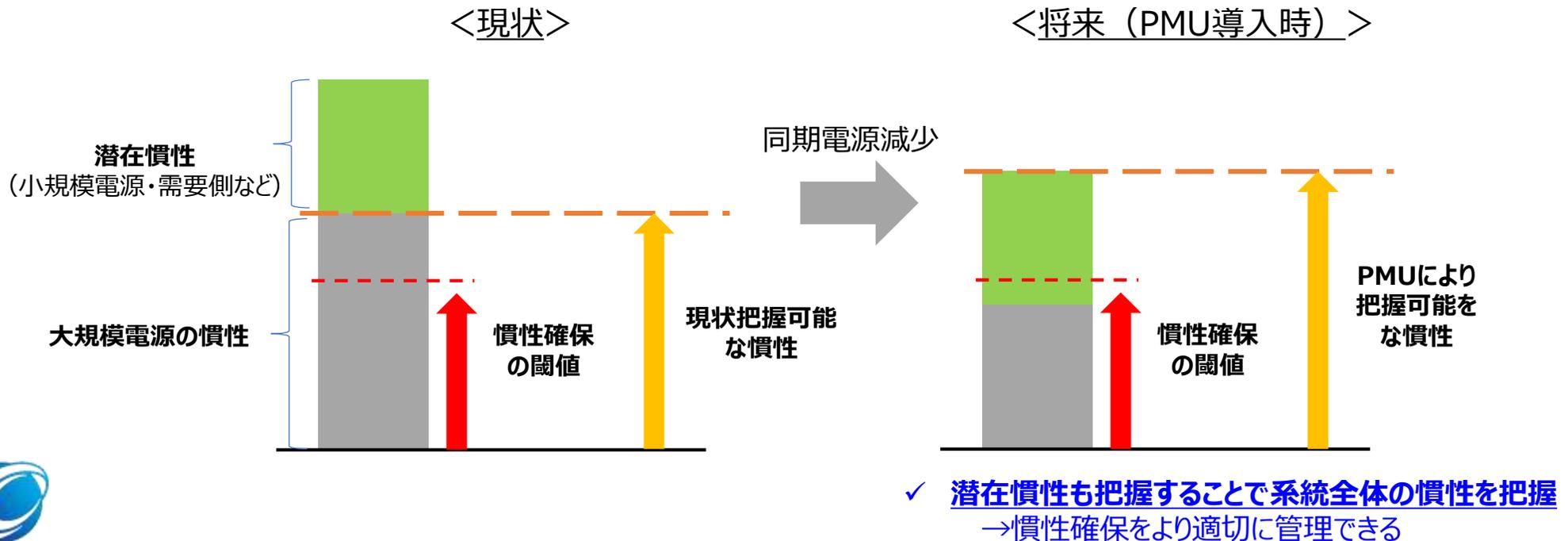
3. PMUの設置の進め方

- PMUの計測情報を活用した運用方法の高度化の具体例として、リアルタイムの系統監視の高度化（同期安定性・電圧安定性などの監視）、広域的な系統情報の把握、系統事故状況の分析、電力系統の機器の応動モデルの構築などが海外で取り組まれている。
- 日本において、今後どのような活用方法が考えられるか、①慣性の把握、②系統不安定現象（SSO）への対応、③広域的な同期安定性制約への運用高度化を一例としてお示しする。

北米におけるPMUの活用事例

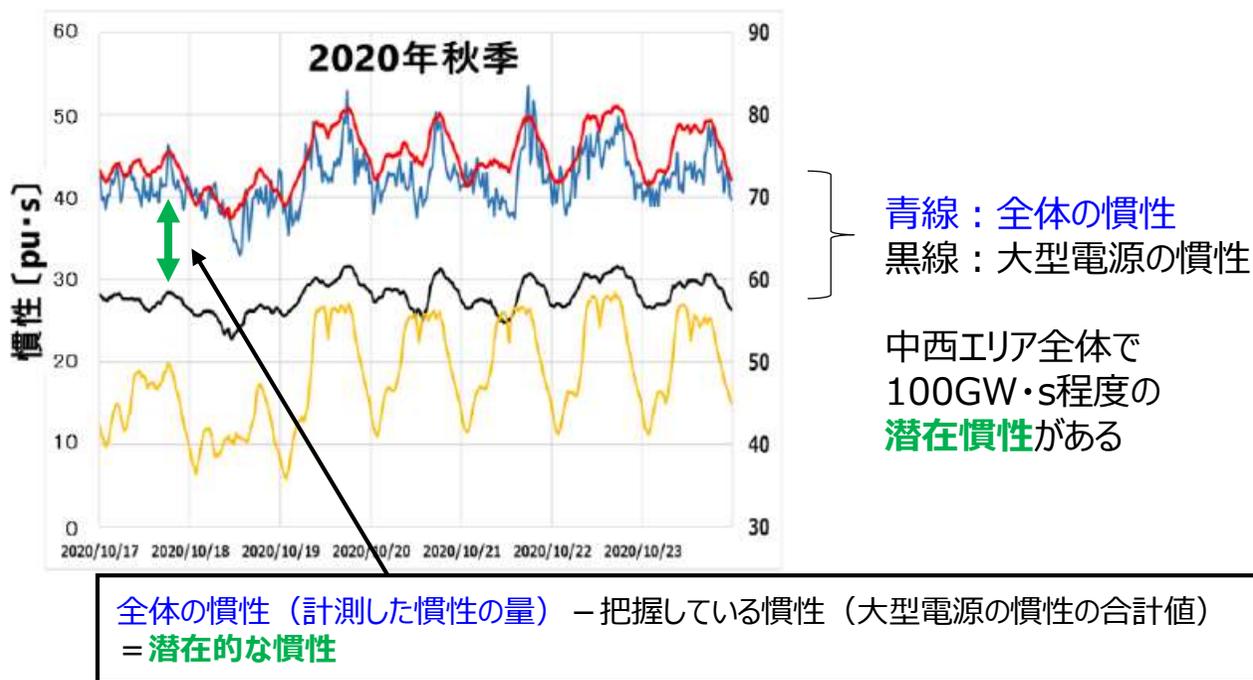
CAPABILITIES	ATC ¹	CCET	Duke Energy	Energy	FPL	Idaho Power	ISO-NE	Lafayette	Midwest Energy	MISO	NYISO	PJM	WECC / Peak Reliability
リアルタイムモード													
電圧位相監視	Blue	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green
振動検出・監視	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green
電圧安定性監視	Blue	Green	Green	Blue	Green	Green	Blue	Green	Grey	Green	Green	Green	Green
イベント検出・管理・復旧	Blue	Green	Blue	Green	Green	Green	Blue	Green	Grey	Green	Green	Green	Green
単独系統検出・管理・復旧	Blue	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
設備問題検出	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
広域系統状況認識	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Grey	Green	Green	Green	Green
研究モード													
系統モデル検証・校正	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Blue	Green
イベント事後解析	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green
再エネ統合	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
運用者訓練	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Green	Green	Green
KEY to status of capabilities development: 計画済み 開発中 運用中													
<small>Note 1: ATC had two projects: a PMU project and a Communications project. The Communications project supports capabilities listed for the PMU project.</small>													

- 電力システムの慣性は、一般送配電事業者が容易に把握可能な火力発電所等の大型同期発電機から供給されるものに加え、現状においては一般送配電事業者が把握することが難しい小規模電源や需要側から供給されるもの（潜在慣性）も存在している。
- 潜在慣性を把握する手法として、PMUの計測情報を用いる手法の技術開発がこれまでも行われており、潜在慣性を把握することで、電力システムに存在する慣性をより正確に把握することができるようになる。
- 潜在慣性を把握することで、対策コストを要する慣性確保対策（同期電源の追加運転等）を減少させられる可能性がある。



- NEDO実証において、需要側を含めた系統全体の慣性の推定が行われており、中西系統においては、100GW・s程度の潜在慣性が存在することが推計されていた。
- この潜在慣性が第81回本委員会で報告した中西6エリアの慣性不足量（年間4日間で25GW・sの不足）を補填できるとすると、PMUの導入による慣性の把握の効果として、最大で2.1～8.2億円／年の効果が生じる[※]。

※ 慣性の効果は慣性不足箇所との電氣的距離によって変わる（感度係数がある）ため、潜在慣性の数値がそのまま効果として発揮されるものではない
またFRT要件の見直しによっても、慣性不足量は変わりえる



2050with (ベースシナリオ) 慣性力不足に対する対策費用算定結果

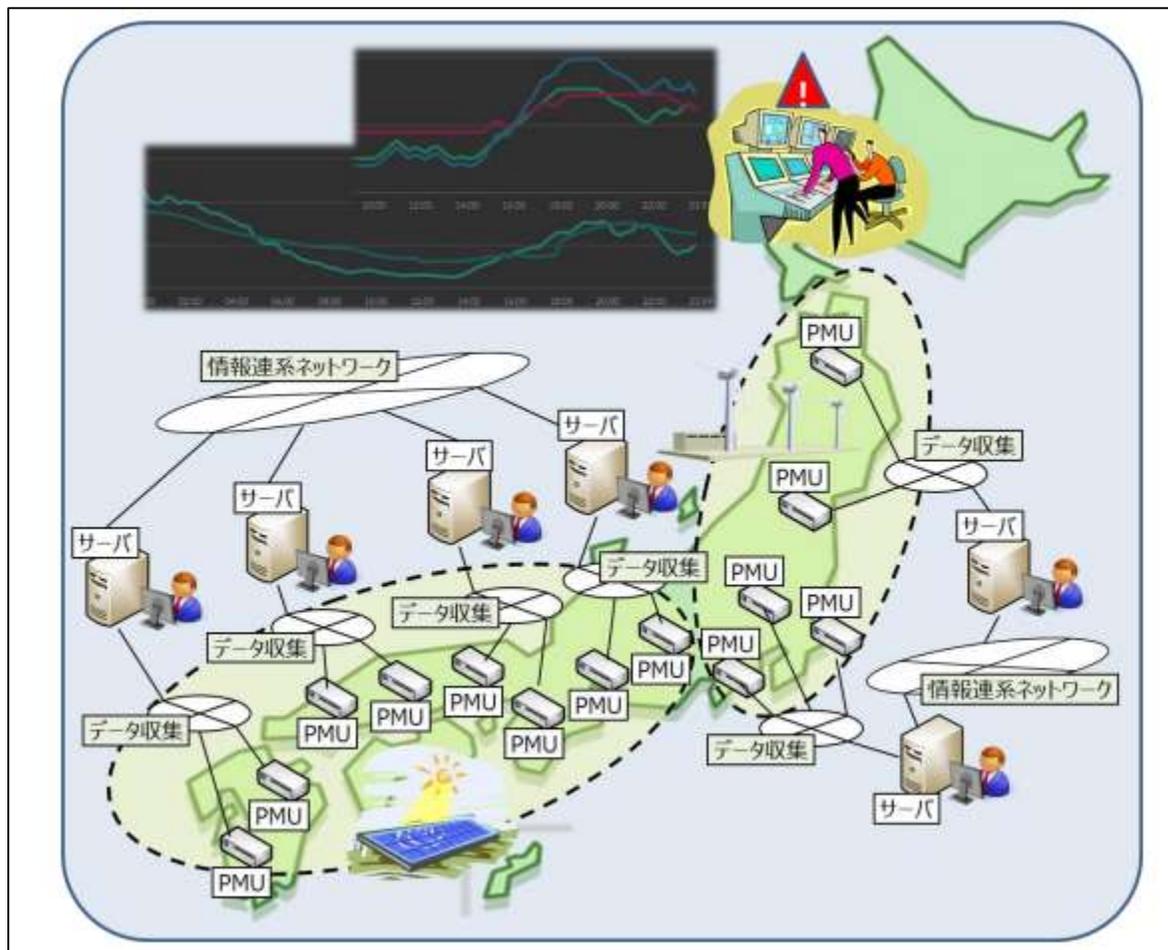
- 系統増強等の影響により、withoutと比較し代表断面 (Msys最小断面)におけるRoCoFが小さくなったことから、**北海道エリア、東北・東京エリアは対策不要、中西6エリアの対策コストも減少し、2.1~8.2億円程度/年の対策費用概算値**となった。

※1,2,3		2050withベースシナリオ (今回算定)	【参考】 2050withoutベースシナリオ
北海道 エリア	日数/年	0日	0日
	対応策	なし	なし
	コスト	0億円/年	0億円/年
東北・東京 エリア	日数/年	0日	11日
	慣性不足量※4	なし	157GW・s・日
	対応策	なし	電源
	コスト	0億円/年	4.9~19.1億円/年
中西6 エリア	日数/年	4日	76日
	慣性不足量※4	25GW・s・日	812GW・s・日
	対応策	電源	電源、同期調相機
	コスト	2.1~8.2億円/年	69.4~233.0億円/年
合計	コスト	2.1~8.2億円/年	74.3~252.1億円/年

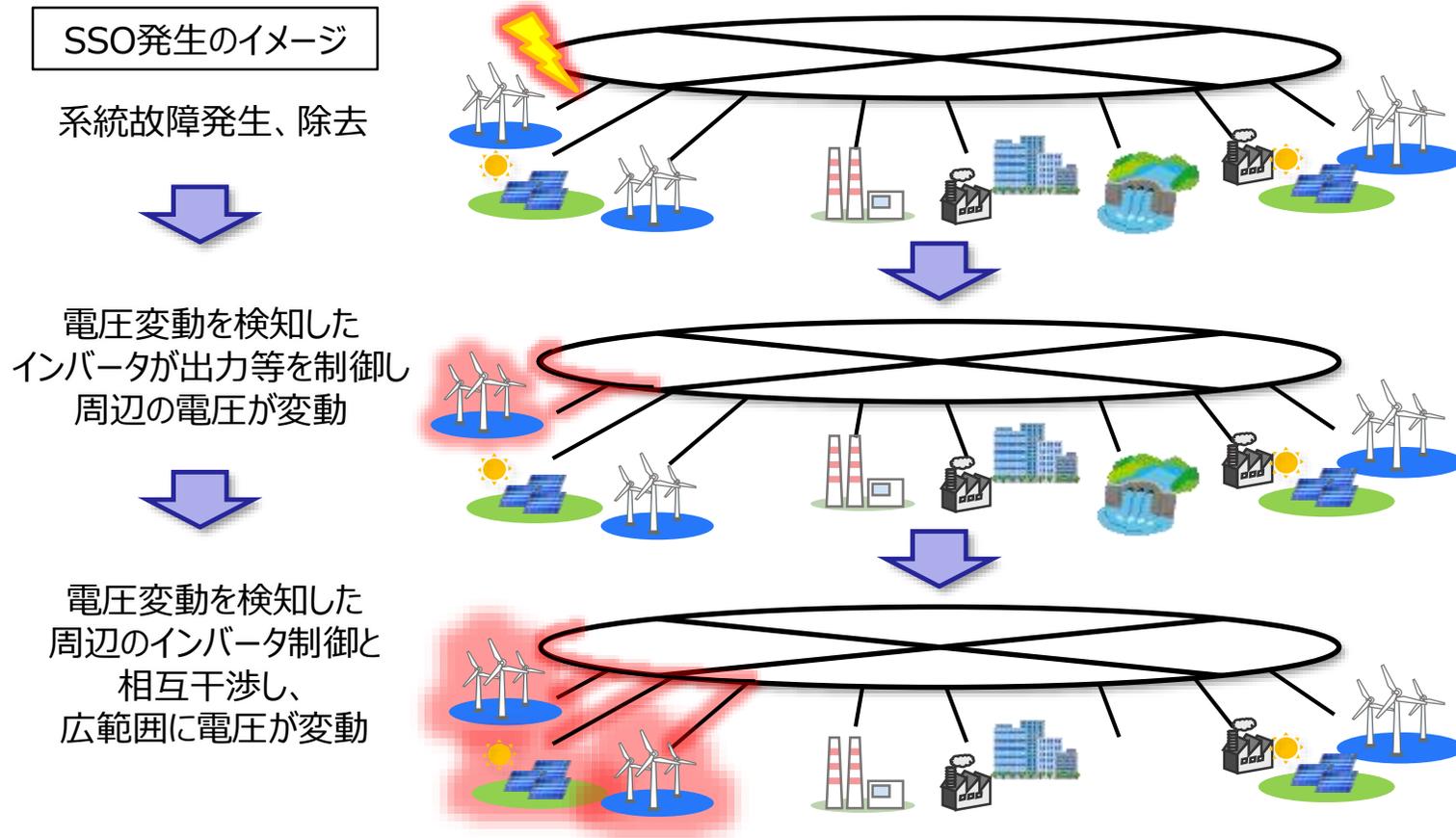
※1 対策費用の諸元は、第64回調整力等委員会と同様。
同期電源：費用が270万~1,050万円/GW・s・日、
費用対効果逆転日数が176日~45日以下
同期調相機：費用が4.75億円/GW・s・年

※2 需要や供給力の想定が変われば、算定結果も異なることに留意が必要
※3 発電機Msys最小断面(代表断面)による結果であり、前提条件が見直されれば、
算定結果も異なることに留意が必要
※4 各日の慣性力不足最大値をその日の不足量として算出

- NEDO実証（「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」）において、慣性力等の把握や運用手法の確立を目指し、PMUを用いた常時監視システムを構築するための基盤技術開発が行われた。

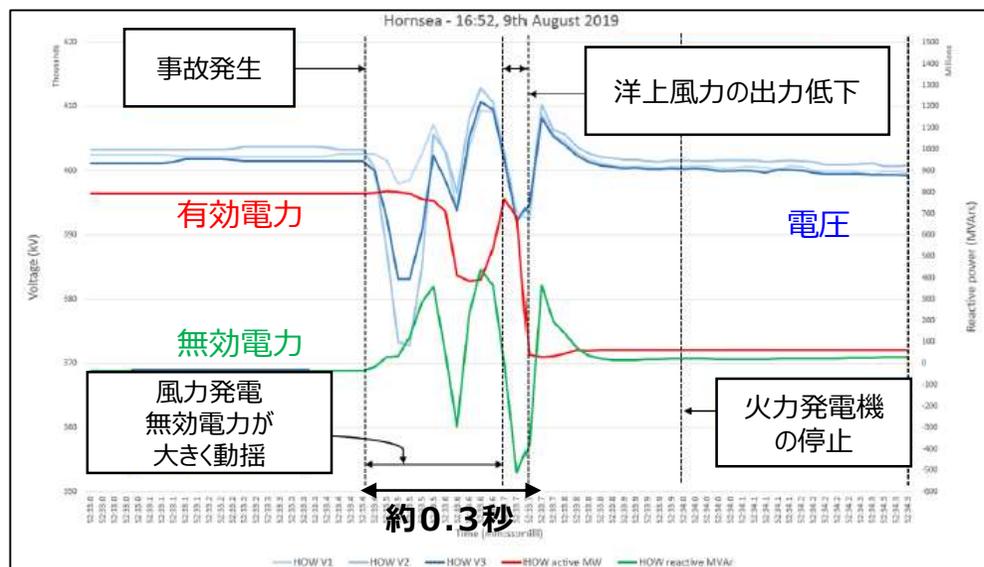


- 再エネ（インバータ電源）の連系量の増加により、短絡容量（系統電圧維持能力）が低下する。その環境下で、系統電圧の変動をきっかけに、あるインバータ機器の制御が周辺のインバータ機器の制御と相互干渉し、SSO（Sub Synchronous Oscillation：商用周波数以下の動揺）という系統不安定現象を引き起こす可能性があり、海外ではSSOに起因した大規模停電が発生したこともある。

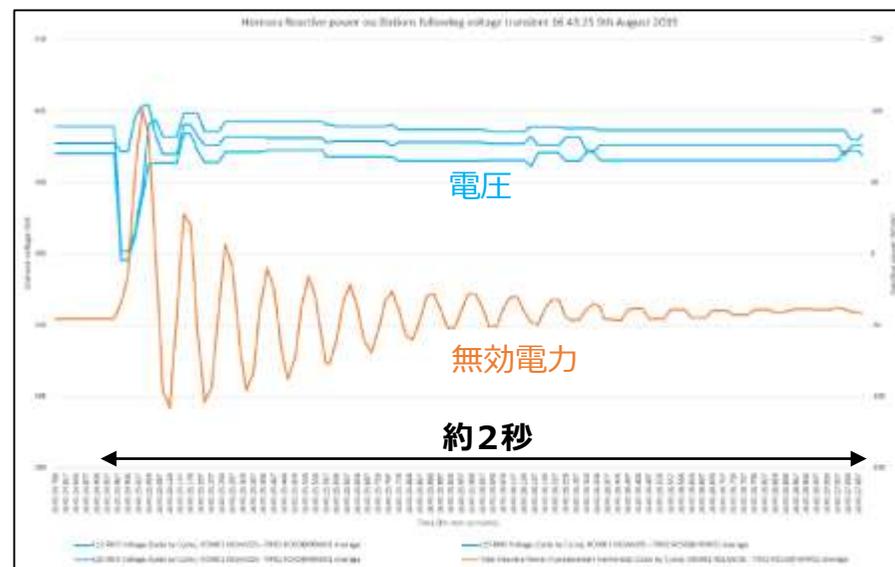


- SSOによる停電事例として、2019年英国大停電が報告されている。この停電は、基幹送電線の事故（雷撃）に伴う下位系統の分散電源の停止後に、大型洋上風力や火力電源が連鎖脱落（約1900MW）が生じたことで周波数低下が生じ、負荷制限による大停電（約900MW）に至った。
- この現象は事故後に生じたSSOに起因するものであり、またこの停電が起きる直前においても、風力発電所の制御系のパラメータ設定が不適切であったことにより、大型洋上風力の連系箇所近傍では電圧振動が発生しており、SSOの予兆があった。

事故後の応動

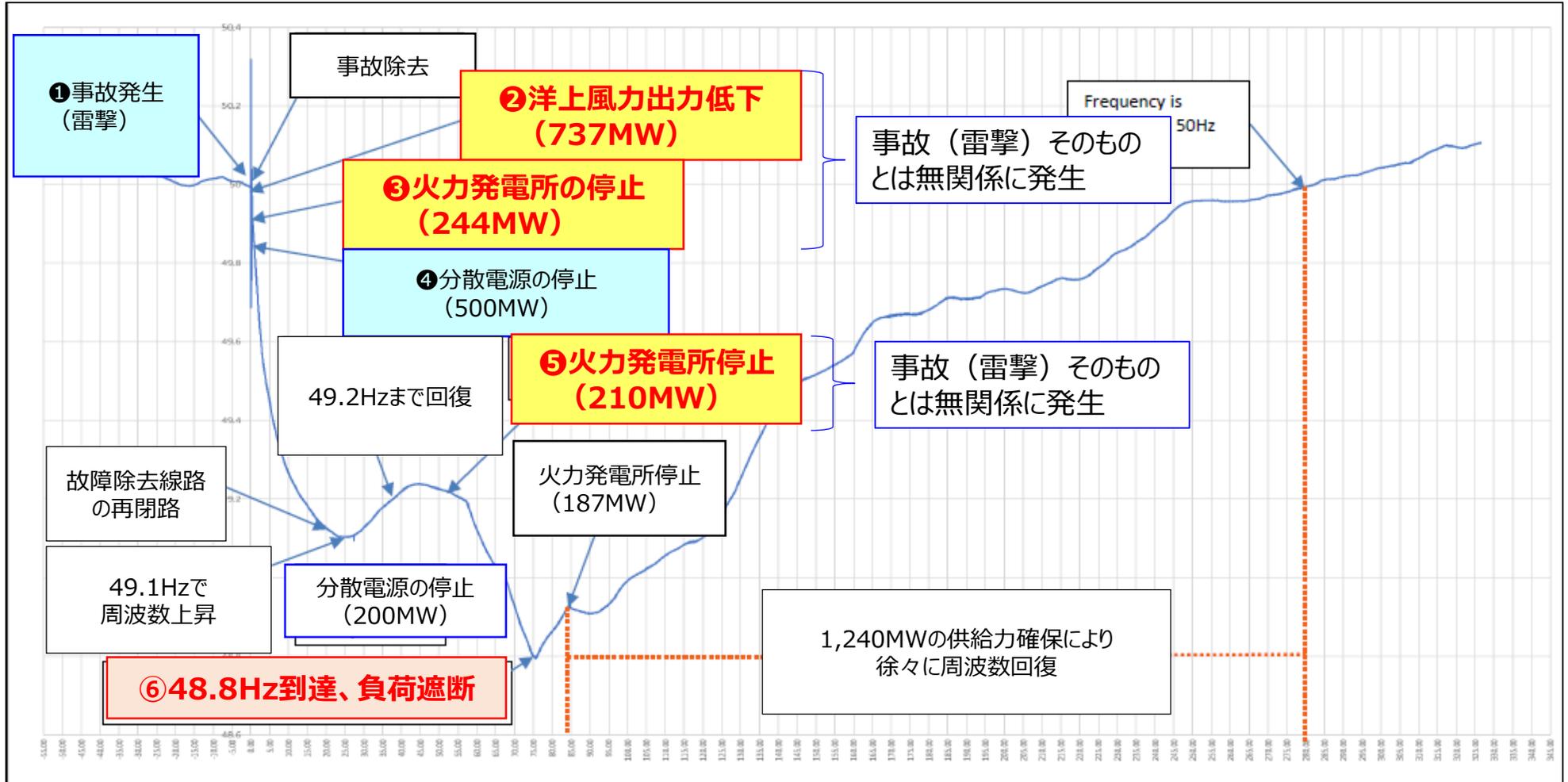


事故前の応動

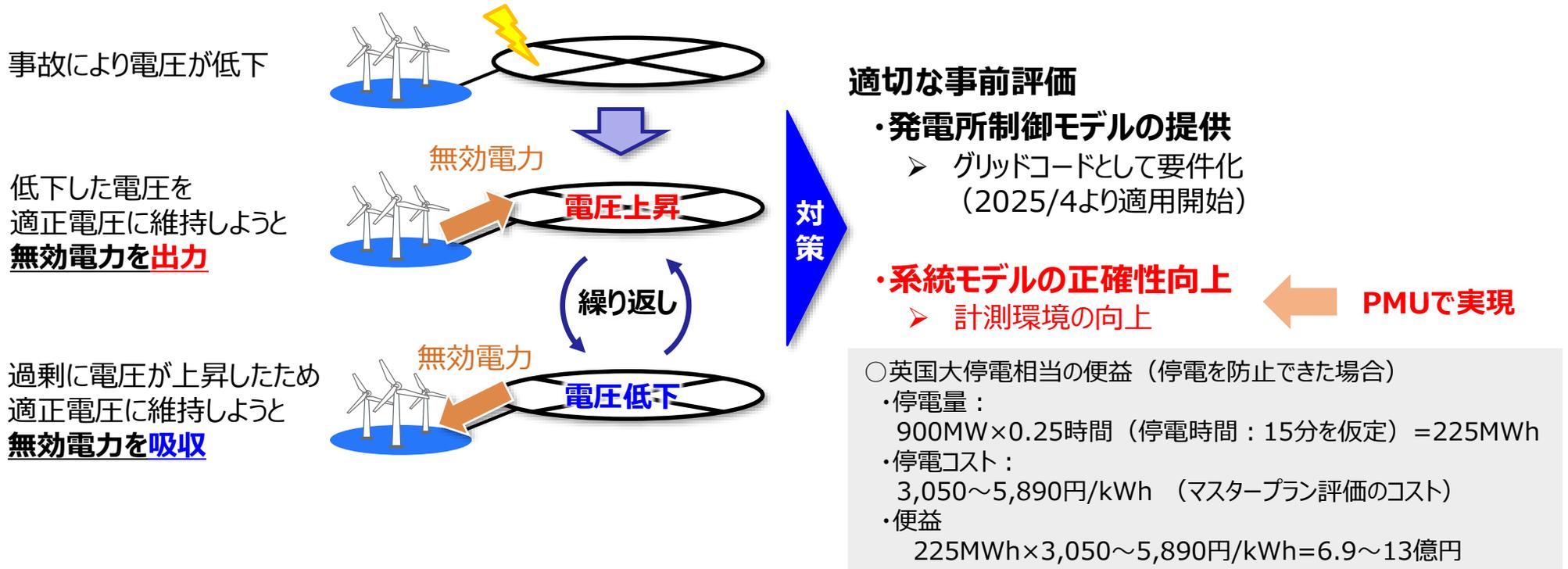


出所) National Grid ESO "Appendices to Technical Report on the events of 9 August 2019"より抜粋 (一部加工)
https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2019/09/es0_technical_report_-_appendices_-_final.pdf

- 系統事故（雷撃）によって直接的に引き起こされた電源の停止（④）に加えて、系統事故に直接起因したものでなく事前に予見されなかった電源の停止・出力低下（②・③・⑤）によって、大規模な停電まで至った。



- SSOを回避するためには、インバータ機器の制御モデルを把握してパラメータを適切に設定する（適切な事前評価を行う）ことや、系統の強さ（短絡容量の大きさ）を適切に保つことなどが効果的である。
- PMUを導入することで、詳細な地点間の計測情報を比較検討することでインバータ機器がどのように相互干渉しているのかを把握でき、効果的な対策を速やかに講じることが可能になる。
- これまで日本ではSSOの問題は顕在化していないが、今後、再エネやHVDCなどのインバータ機器の拡大や短絡容量の低下が想定されることから、将来的なリスクになりえ、その備えとしてPMUが重要であると考えられる。
- なお、英国大停電の事象を参考にすると、大規模停電を回避できた場合に6.9～13億円の効果があるといえるか（一般的に見込まれる効果という訳ではない）。



■ インバータ機器の増加によって、近年世界各地でSSOの発生が報告されている。

地域	事例	動揺周波数	連系箇所	電源種	動揺の継続時間	動揺の発生頻度
英国	2019年英国大停電	9Hz	送電系統(400kV)	風力	0.3s程度	不明
	2021年スコットランド	8Hz	送電系統(400kV)	風力	20-25s程度	不明
中国	2015年中国西部	30Hz	送電系統 (主として220kV)	風力	不明	これまでに58回
	2019年中国南部	126Hz	送電系統	風力	不明	不明
豪州	2015-2019年 West Murray	7Hz	送電系統 (主として220kV)	風力	不明	不明
	2020年West Murray	19Hz	送電系統 (主として220kV)	風力	不明	2021年は少なくとも8件以上
北米	2011年テキサス州	4Hz	送電系統(69kV)	風力	不明	不明
	2015年Hydro One	20Hz (IBRの動揺は80Hz)	配電系統 (44kV)	太陽光	不明	不明
	2017年First Solar	7Hz	不明	太陽光	1h20min程度	不明
	2021年Dominion	22Hz	不明	太陽光	不明	不明

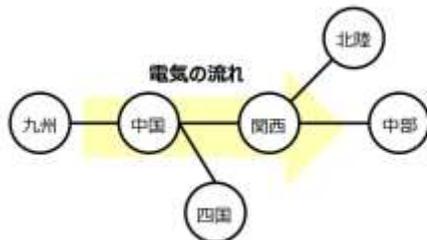
出所) Yunzhi Cheng 他 "Real-World Subsynchronous Oscillation Events in Power Grids with High Penetrations of Inverter-Based Resources"を元に作成
http://power.eng.usf.edu/docs/papers/2022/IBRSSO_TF1.pdf

- 電力システムの技術課題の一つに同期安定性がある。この安定性を維持できなくなると、発電機等の設備損壊や大規模停電が発生するリスクがある。そのため、同期安定性維持のために様々な対策が実施されている。
- 同期安定性の制約の一つとして、中西安定度という課題がある。中西系統は交流の長距離くし形系統であるため、エリア間を超えて長周期（数秒程度）の電力動揺が発生するというものである。
- 実運用では、九州と関西の電圧位相を比較評価することで、同期安定性の限界を超えないようにしている。
- この点、PMUは電圧位相の計測に優れた装置であり、PMUで計測したデータをもとに広域的な同期安定性制約への運用高度化を図ることは、将来的な慣性力・同期化力低下等による同期安定性の低下に対する備えとして必要と考えられる。

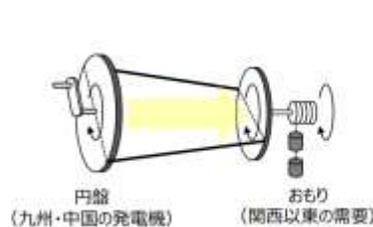
同期安定性制約の概要 (3 / 3)

26

- また、同期安定性制約は、必ずしも単一送電線のみを対象とした制約という訳ではなく、理論上は同期連系系統であれば生じる可能性がある。
- 実際に、西日本の60Hz連系系統は長距離交流くし形系統であることから、数秒程度の地域間をまたぐ長周期電力動揺（中西安定度の問題）が存在しており、電力系統に想定し得る故障が生じた際には、この電力動揺が増大し、不安定となる（中西全体の系統間脱調が発生する）可能性がある。
- そのため、N-2故障（次頁参照）において、60Hz連系系統の同期安定性が維持できるよう、60Hz連系系統の西から東向きの潮流に対する安定度指標として、西九州変電所（九州）と西播磨変電所（関西）の500kV母線電圧の位相角の差（中西運用目標相差角）を設定し、実運用において、超過しないよう監視している。
- 中西運用目標相差角を超える場合には、発電機態勢の変更（電源持ち替え）等により上限値以内となるよう調整がなされている。



西日本60Hz（交流）連系系統概略図

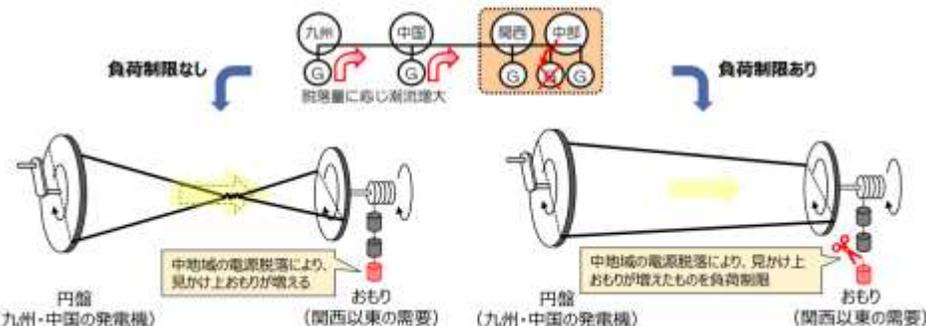


力学系モデルでのイメージ

同期安定性制約を拡大するための方策（負荷制限）

34

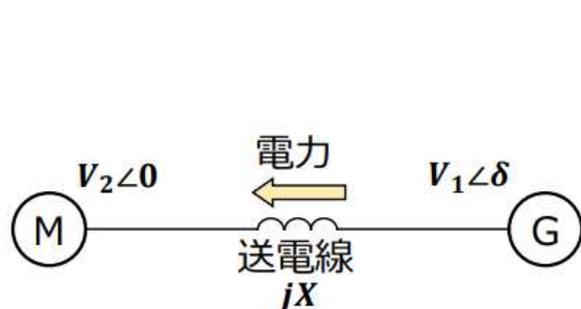
- また、同期安定性の向上には、瞬間的な（数百msオーダーの）負荷制限も効果的である。
- 負荷制限は、力学系モデルのおもりを減らすことに相当するため、故障後にインピーダンスの増加（ゴム紐の長さが伸びる）があつたとしても、同期運転を継続することができ、同期安定性を拡大することができる。
- なお、負荷制限は供給支障を伴うことから、N-2以上の故障時にも可能な方策となり、一例としては先述の中西安定度を維持するために、中地域の電源脱落（電源線ルート断）故障に対し、中地域の負荷制限を行うことで、西から東向きの潮流を抑制し、中西全体の系統間脱調が生じないようにしている実績（適用例）が存在する。



同期安定性制約の概要 (1 / 3)

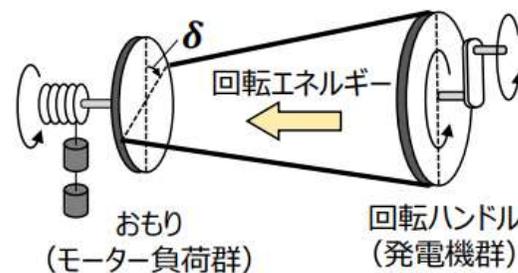
24

- 電力系統に連系する発電機の多くは同期発電機であり、右図の力学系モデルに例えられる。
- 電力設備を流れる潮流は、発電機とモーター負荷を結ぶゴム紐に加えられる「ねじれのカ」に例えられ、これを伝達するためには、**ゴム紐が絡まらず、すべての発電機が同じ速度で回転し続ける必要がある (同期運転状態)**。
- 何らかの擾乱により、このゴム紐が絡まる場合、発電機は加速 (空回り) し、**脱調 (同期はずれ) 状態**となり、こうした現象は**数百msオーダーで起こる**ことが分かっている。

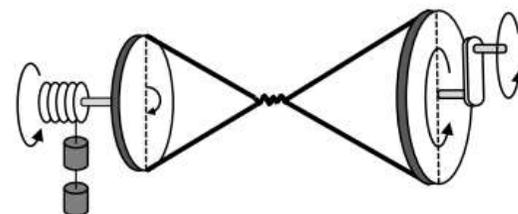


(G) : 発電機 (群)
 (M) : モーター負荷 (群)

(モデル系統)



(同期運転状態)



(脱調 (同期はずれ) 状態)

- PMUの計測データの活用方法は様々なものが考えられ、その一例として、①慣性力の把握、②系統不安定現象（SSO）への対応、③広域的な同期安定性制約への運用高度化をお示した。
- このように、PMUの計測データを活用して系統運用技術の高度化を図ることは、今後更なる変化が見込まれる電力系統の環境下においても安定供給を維持する施策である。
- 今回お示した例のうち、①慣性の把握や②SSOへの対応について、過去の検討や海外事例をもとにすると、様々な仮定のもとではあるが一定程度の定量的な効果が生じうるとも考えられる。
- なお、PMUの設置費用は、NEDO実証と同等の規模の設置数の場合には 0.68億円／年 程度と想定される※1ため、過剰な設備投資ではない水準感と言えるか。

※1 計測装置（35か所）設置費用：約3億円※3、データ収集装置（6か所）設置費用：約4億円※3を元に算定
なお、具体的な設置個所・設置数が変われる等、設置費用は変われるため一例として記載
※2 マスタープラン評価と同様に経費率10.7%、割引率4%とした
※3 NEDO実証での費用相当データ収集装置は10年更新と仮定

1. PMUとは

2. PMUの導入によって期待される効果

3. PMUの設置の進め方

- 再エネの更なる大量導入や蓄電池の導入、HVDCの計画策定プロセスが2030年頃に向けて今後進んでいくことを踏まえて、一般送配電事業者においてPMUの設置を進めていくべきではないか。
 - まずは、2030年代前半を目途に上位2電圧（基幹系統）の主要変電所など、必要性が高いと考えられる箇所にPMUを設置。
 - その他の系統については、個別に系統ごとの必要性を踏まえながらPMUを設置（詳細な系統現象を把握可能にする範囲を順次拡大）。
- そのうえで安定供給維持のために、併せて系統運用技術の高度化を進めていくことが必要である。

PMUの設置方針案

設置区分	現状	2030年代前半	以降
上位2電圧（基幹系統）の主要変電所など	PQVFを設置	・PMUを順次設置	
上記以外の変電所など	PQVFを設置	・個別に必要性が生じた場合、PMUを設置	
<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p><電力ネットワークの環境変化></p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; background-color: #e0f0e0;">太陽光などのインバータ機器の導入拡大</div> <div style="font-size: 2em; color: red;">➔</div> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; background-color: #e0f0e0;">洋上風力の連系やHVDCの導入などによる更なるインバータ機器の拡大</div> </div> </div>			
<div style="border: 1px solid orange; padding: 10px; background-color: #ffe0b2; display: inline-block;"> PMUの計測データを用いた電力系統の運用の高度化 </div>			