

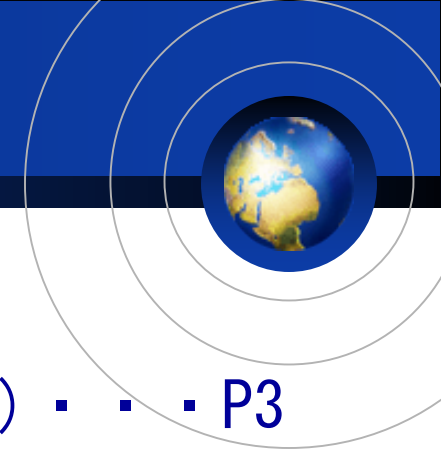
風車の制御機能の活用に向けて



2018年1月30日

一般社団法人 日本風力発電協会

<http://jwpa.jp>



1. 風車の制御機能確認試験結果報告(中間報告) . . . P3
2. 風車の周波数制御機能活用
及び制御機能活用による蓄電池容量低減 . . . P13
3. 合理的な蓄電池容量算定の方方向性 . . . P18

1. 風車の制御機能確認試験結果報告(中間報告)

1.1 サマリー



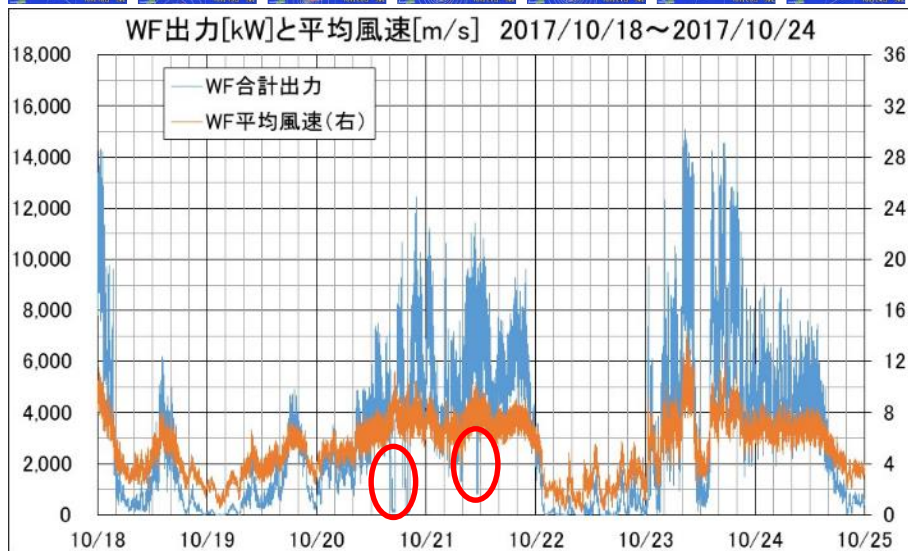
■ 東北エリアのウインドファーム(青森県/市浦風力発電所)にて、稼働中の風車の制御特性を測定した。測定項目、得られた結果の概略を以下に示す。

現地測定試験サマリー

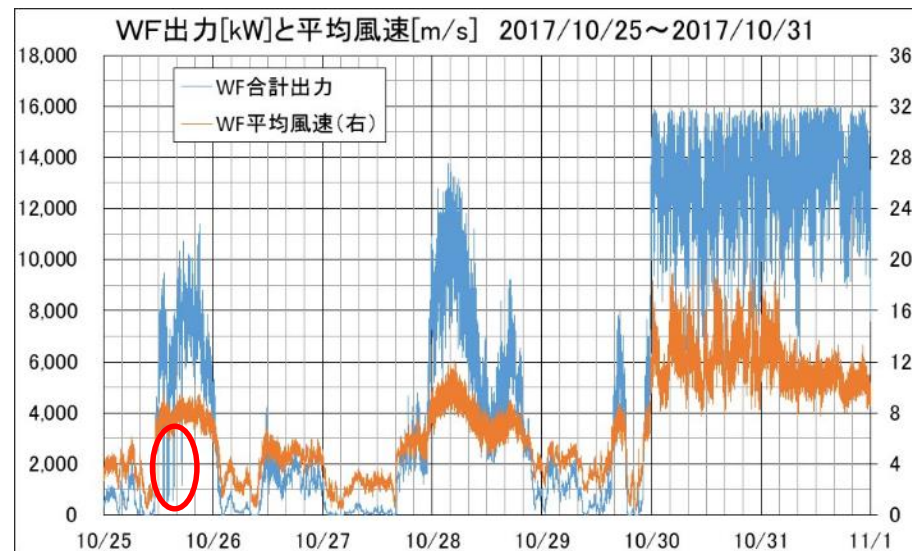
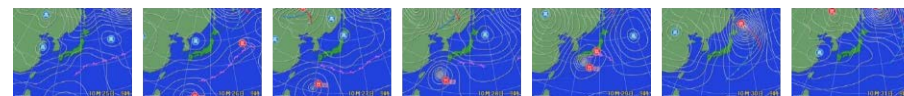
項 目	詳 細	試 験 結 果
現地試験期間	2017年10月18日～11月1日	機能毎にON/OFFの切替が出来ないため ・前半1週間は以下の制御機能全てOFFで測定 ・後半1週間は以下の制御機能全てONで測定
主な測定項目、機能	・出力、風速、周波数	
	・風車起動時特性の測定(出力変化率制限機能有無) 出力変化率制限機能: 出力の増減時に出力変化率を設定された値以内に制限する機能	変化率制限設定値通りの特性で起動時の出力増加が行われることを確認した
	・出力変化率制限+最大出力抑制 最大出力抑制機能: 出力を設定された上限値以内に抑制する機能	出力変動量緩和に効果があることを確認した
	・周波数調定率制御(不感帯=0.05Hz、調定率=0.5%) 周波数調定率制御機能: 設定された不感帯を超えて周波数が上昇した場合に、設定された傾き(調定率)に従い、出力を自律的に低減させ、周波数が復帰した場合は逆に出力を増加させる機能	・設定値通りの特性で、周波数が不感帯を超えて上昇した時に出力低減制御を行うことを確認した ・周波数が不感帯内に復帰後は、変化率制限特性に従い出力増加することを確認した
	・ストーム制御(+出力変化率制限機能) ストーム制御: 風速が増加し、カットアウト風速(25m/s)以上になっても急激に停止せず、風速の増加に応じて緩やかに出力を低減し、一定風速以上(30m/s)で出力をゼロにする機能 最大出力からゼロへの急激な変化を防止できる	・ストーム制御によりカットアウトせずに出力を低減することを確認した ・風速復帰後は、出力変化率制限特性に従い出力増加することを確認した

1.2 試験期間中のWF出力と風況（1）

- 2,000kW級風車が8基の丘陵地域WF（号機毎に出力と風況が異なる）
 - － 2017年10月18日～24日：制御機能OFF
 - 23日に、台風21号が静岡県御前崎市に上陸
 - － 2017年10月25日～11月1日午前：制御機能ON
 - 30日に、東京と近畿地方で木枯らし1号（台風22号通過後）



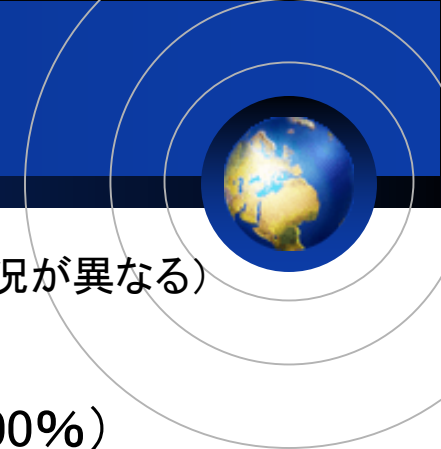
制御機能OFF



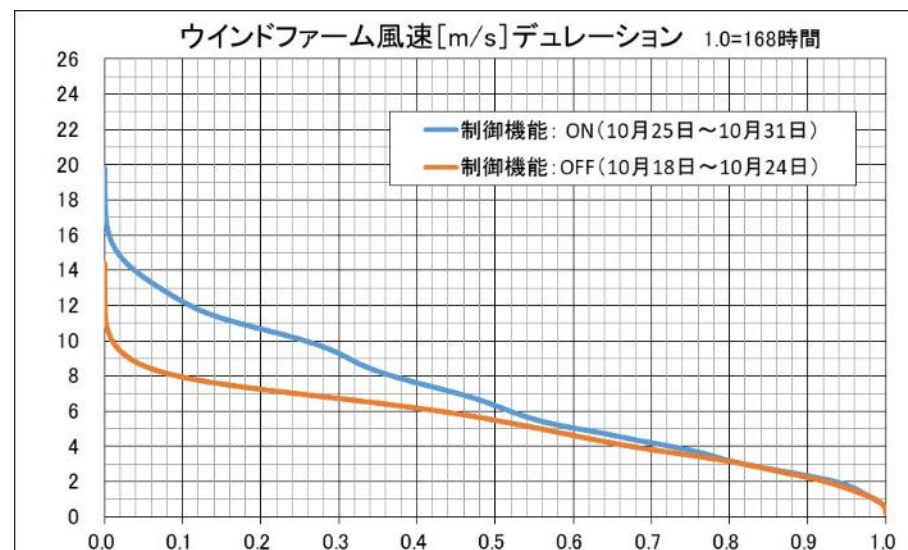
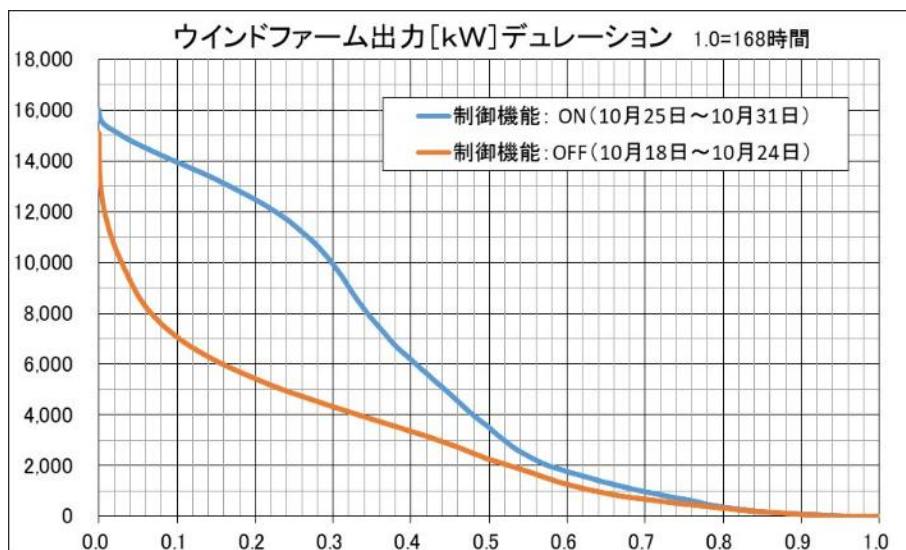
制御機能ON

（注：赤丸範囲は、最大出力抑制試験などによる人為的な出力低下）

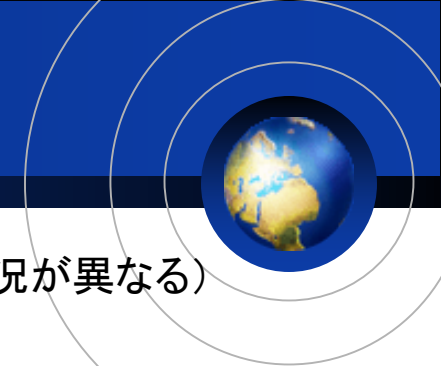
1.3 試験期間中のWF出力と風況(2)



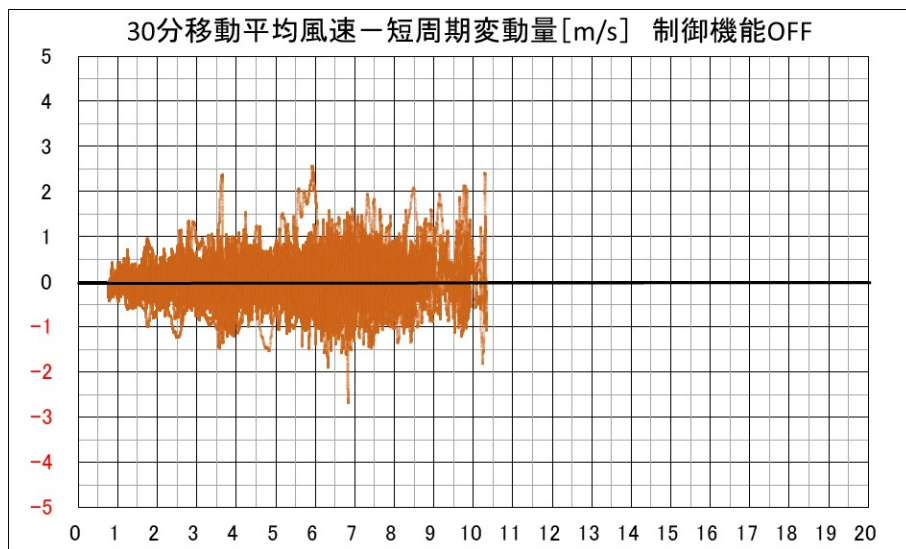
- 2,000kW級風車が8基の丘陵地域WF(号機毎に出力と風況が異なる)
 - 2017年10月18日～24日: 制御機能OFF
 - 平均出力=3,019kW(100%) 平均風速=5.3m/s(100%)
 - 2017年10月25日～11月1日午前: 制御機能ON
 - 平均出力=5,764kW(191%) 平均風速=6.9m/s(130%)
 - 理論的に出力は風速の3乗に比例するが
平均出力は、平均風速の約2.4乗に比例であった。 $1.3^{2.4} \div 1.9$



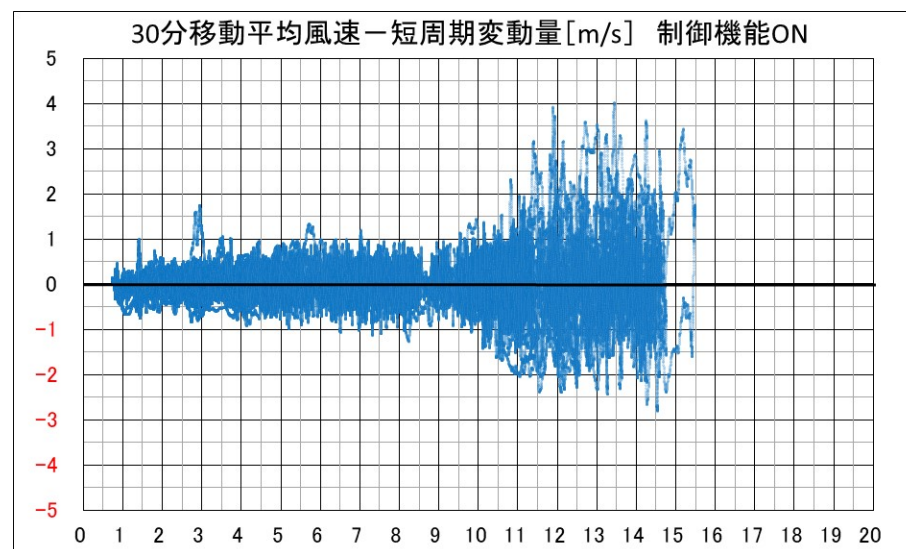
1.4 試験期間中の短周期WF風速変動量



- 2,000kW級風車が8基の丘陵地域WF(号機毎に出力と風況が異なる)
 - 2017年10月18日～24日: 制御機能OFF
 - +側最大値=2.55m/s(100.0%) 一側最小値=-2.70m/s(100.0%)
 - 2017年10月25日～11月1日午前: 制御機能ON
 - +側最大値=4.00m/s(156.9%) 一側最小値=-2.83m/s(104.8%)
 - ON期間中の風速変動量は、OFF期間中に比して、大きい



制御機能OFF期間



制御機能ON期間

1.5 制御機能確認試験結果－1：出力変化率制限(1)

(出力変化率制限機能と起動時特性)

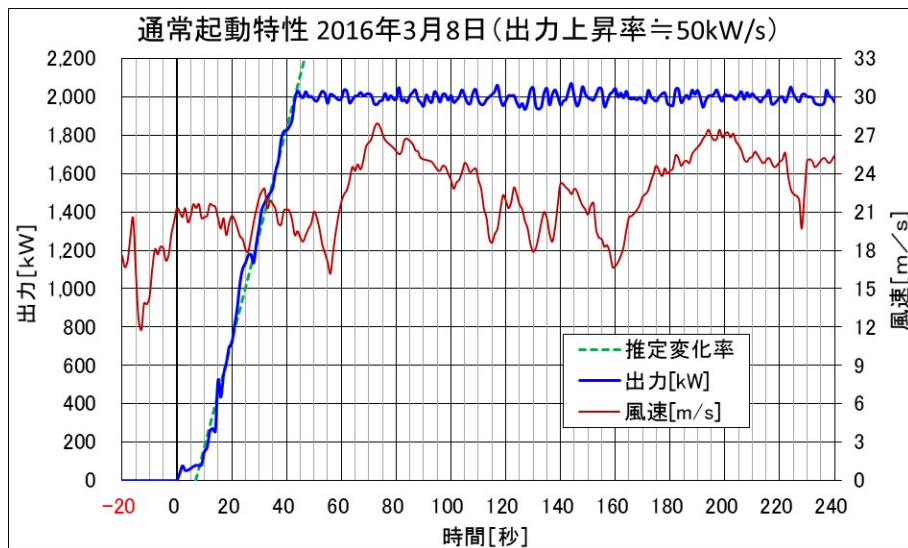


－ 制御機能ON：8kW/秒 (2,000kW/250秒 $\div$ 2000kW/4.2分)

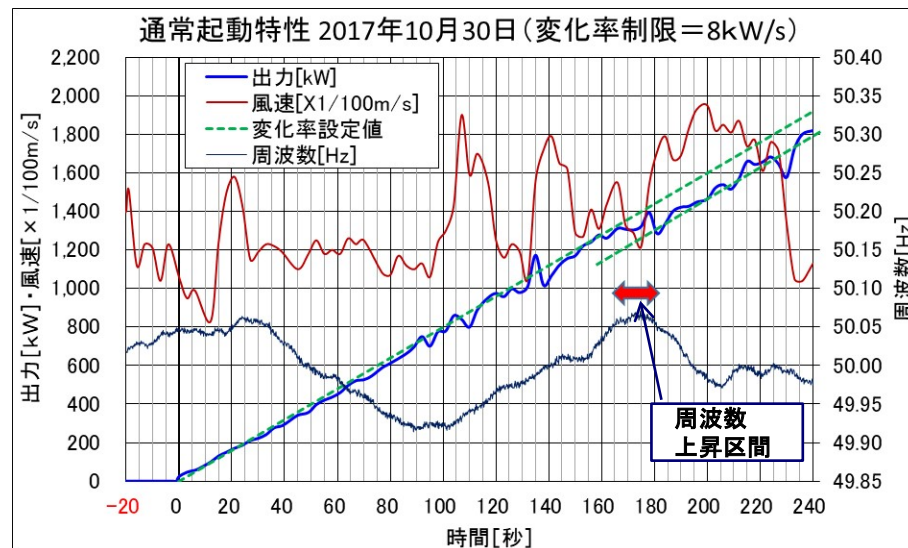
- 変化率制限設定値通りの特性で、出力を増加することを、確認した。
 - － 周波数が50.05Hz以上の時に、周波数調定率制御により出力低減制御が行われたが、50.05Hz未満に復帰後は、再び8kW/秒の変化率で出力増加

－ 制御機能OFF

- 50kW/秒の出力増加率であった。(過去に実施した試験結果)



制御機能OFF



制御機能ON

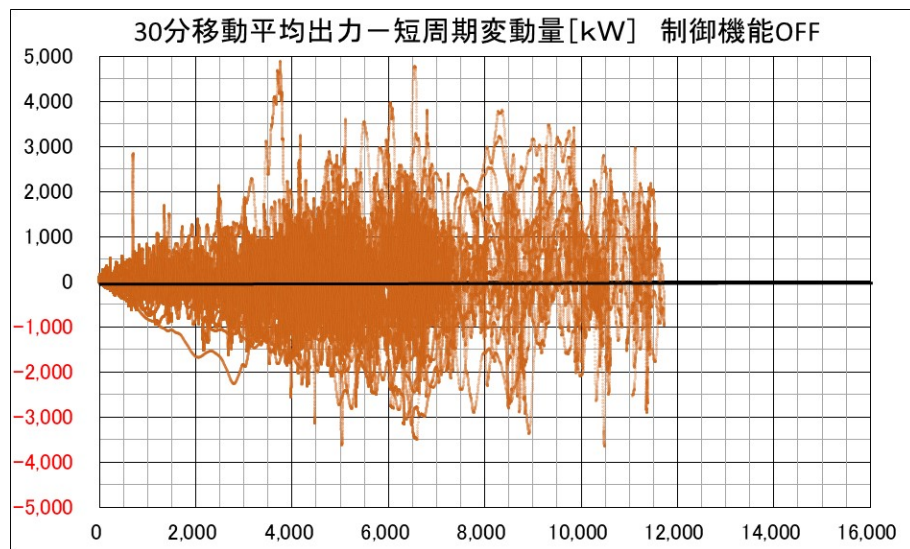
注：各データは、データ伝送方式・速度などの影響により、若干の時刻ズレなどがある

1.6 制御機能確認試験結果－1：出力変化率制限(2) (短周期出力変動量の抑制効果－1)

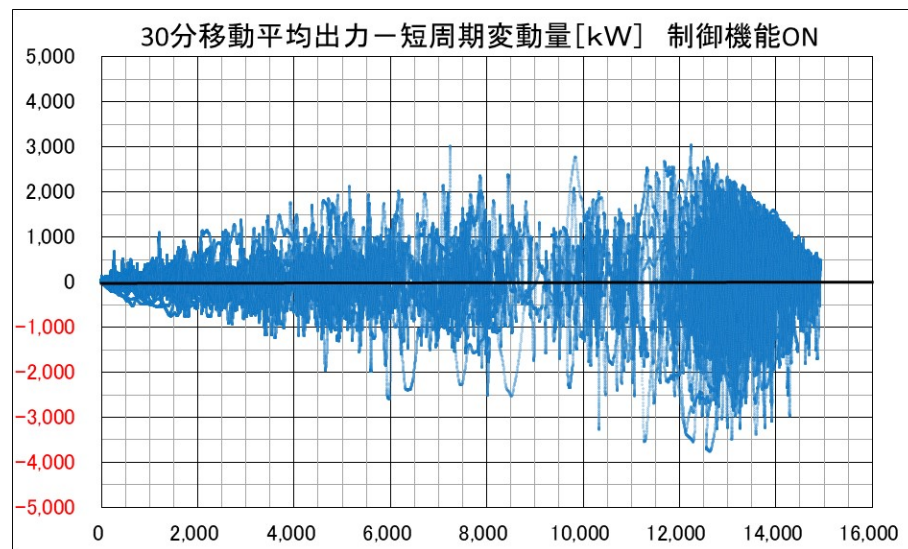


■ 風力発電の出力変動量を抑制し、周波数変動要因を低減 － 短周期出力変動量

- 制御機能OFF：＋側最大値＋4,882kW(100.0%)、－側最小値－3,672kW(100.0%)
- 制御機能ON：＋側最大値＋3,033kW(62.1%)、－側最小値－3,778kW(102.9%)
- 制御機能ON時の風速・風速変動量が大いにも係わらず、出力変動量が小さく抑えられている。又、通常運転中の出力変化率制限制御は、増加方向のみの制限制御であるので、増加方向の変動量の抑制効果が、発揮されている。



制御機能OFF期間



制御機能ON期間

1.7 制御機能確認試験結果－1：出力変化率制限(3) (短周期出力変動量の抑制効果－2)

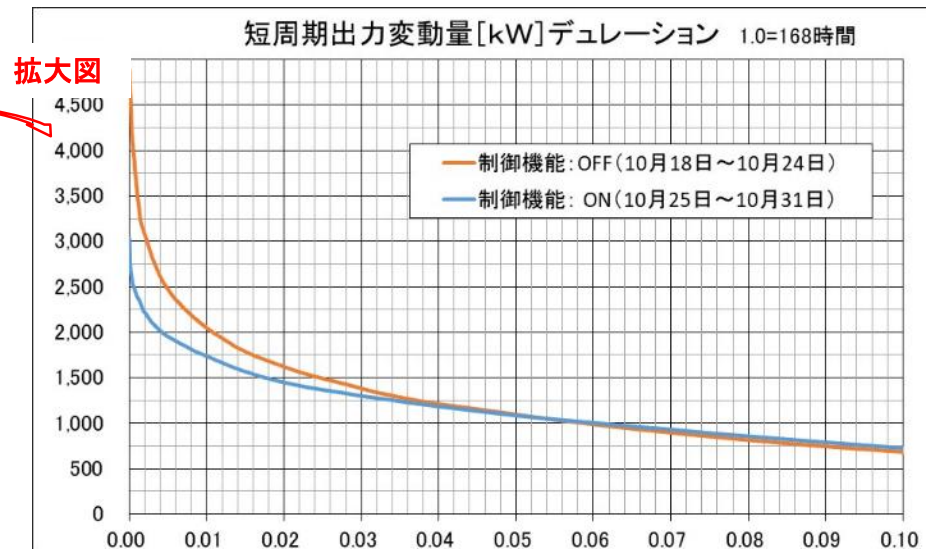
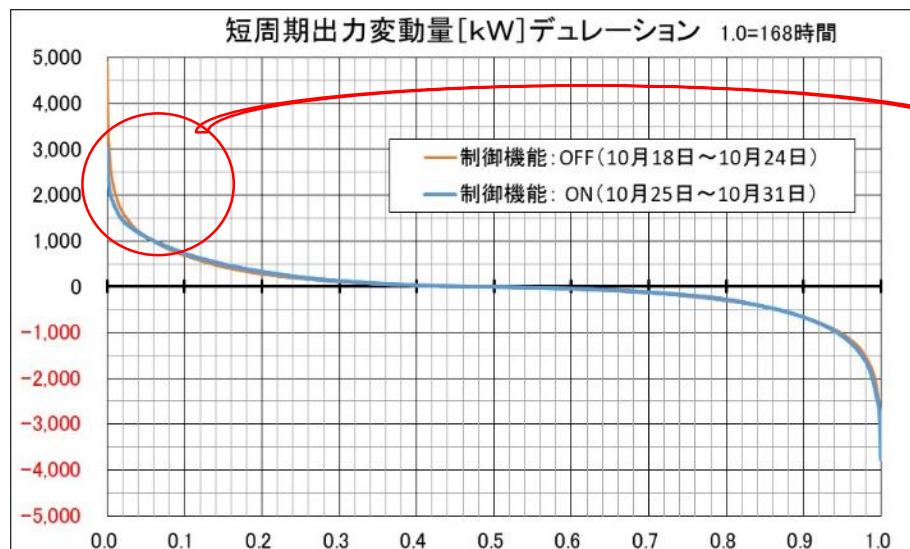


－ 短周期出力変動量

- 制御機能OFF：＋側最大値＋4,882kW(100.0%)、－側最小値－3,672kW(100.0%)
- 制御機能ON：＋側最大値＋3,033kW(62.1%)、－側最小値－3,778kW(102.9%)

－ 制御OFF期間における制御機能適用時の変動量推定値

- 出力変動量が風速変動量(スライド6参照)に比例すると仮定した場合
＋側最大値＋1,934kW(39.6%)、－側最小値－3,604kW(98.2%)
- 出力変動量が風速変動量(スライド6参照)の二乗に比例すると仮定した場合
＋側最大値＋1,230kW(25.2%)、－側最小値－3,439kW(93.7%)



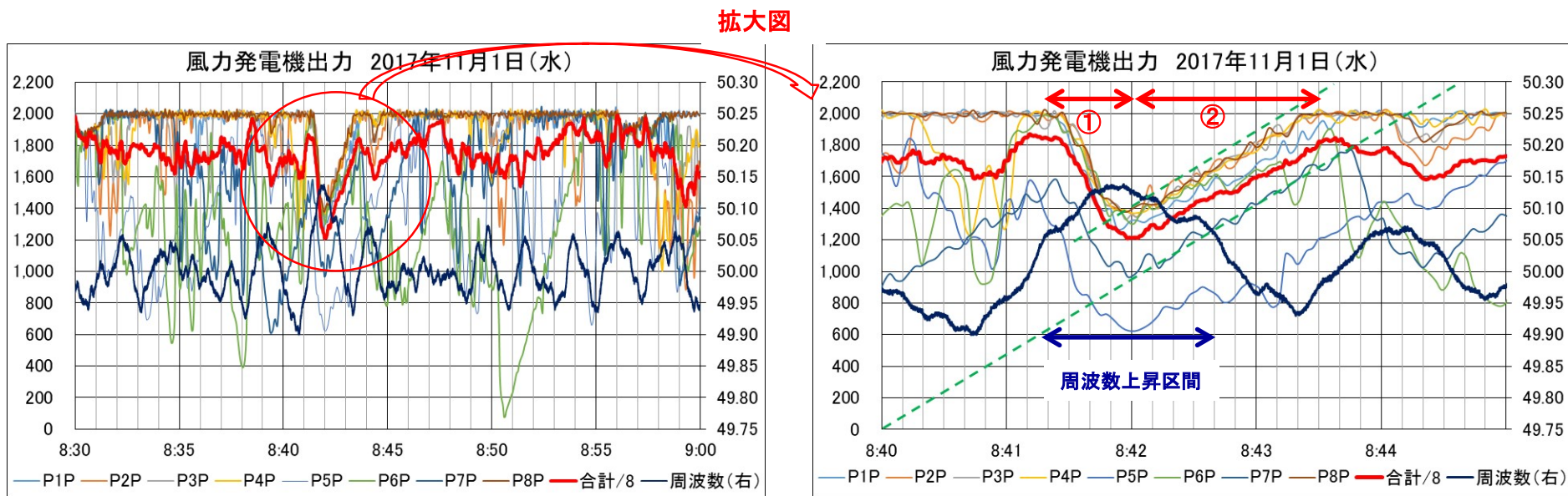
1.8 制御機能確認試験結果－2：周波数調定率制御



■ 周波数上昇時に出力を低減し、周波数安定化を図る

－ 制御機能ON：不感帯＝0.05Hz、調定率＝0.5%（出力可能値2,000kW時）

- 本制御機能は、個別風車の自律制御であり、周波数調定率設定値通りの特性で、周波数上昇時に出力低減を行うことを、確認した。（下図①区間）
- 周波数偏差低下時は、変化率制限設定値通りの特性で、出力増加を行うことを、確認した。（下図②区間）



（注：各データは、データ伝送方式・速度などの影響により、若干の時刻ズレなどがある）

1.9 制御機能確認試験結果－3: ストーム制御



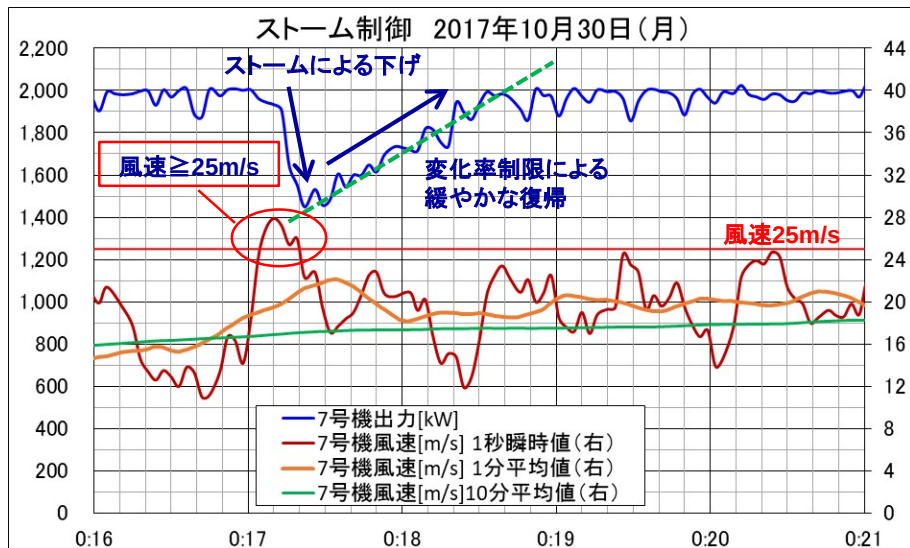
■ 短時間での100%出力変動を抑制し、周波数変動要因を低減

－ ストーム制御ON＋変化率制限ON

- 風速が、25m/s以上の場合に、出力低減運転を行うことを、確認した。
- 風速復帰時は、変化率制限制御による出力増加を、確認した。

－ ストーム制御ON＋変化率制限OFF(過去の試験結果)

- 風速が、25m/s以上の場合に、出力低減運転を行うデータが得られている。
 - － 風速変動の度合いが大きいと予想されるWFでは、出力変化率制限機能と併用にしないと、短時間での出力変動が大きくなる。(右グラフ)



変化率制限制御ON



変化率制限制御OFF(青点線は、変化率制限制御実施時推定)

注: 各データは、データ伝送方式・速度などの影響により、若干の時刻ズレなどがある

(参考) 風力発電導入拡大に向けたJWPAの取り組み

第12回系統ワーキンググループ 資料2-2より抜粋



目的

今後の風力大量導入を踏まえ、風車が有する電力・周波数制御機能を活用して風力発電設備が電力系統へ調整力を提供する道筋を付け、周波数・電圧安定性を維持した上での、風力発電の導入量の増大を図る(蓄電池等調整力削減や出力抑制時間の短縮にも寄与)

ロードマップ・タイムテーブル (赤字が進捗コメント)

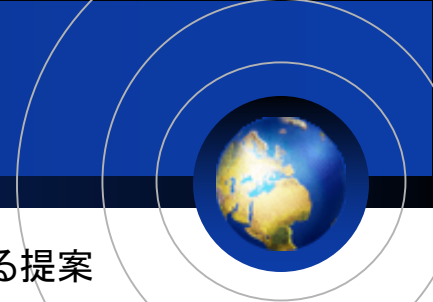
No.	実 施 項 目	2017年度	2018年度		2019年度		2020年度以降	備 考
		下期	上期	下期	上期	下期		
1	制御機能確認試験	 ▲中間報告						・実系統における制御機能確認試験により、有効電力・周波数制御特性を測定・把握 ・2月に、建設中の最新WFで、制御特性を測定する予定
2	周波数シミュレーション等による有効性を確認							・JWPAおよび研究機関が実施予定 ・IEC61400-21-1をベースに測定し、各制御機能単独と、組み合わせた場合の総合特性を把握し、周波数安定化に寄与することを確認
3	各機能の特性と有効性を報告適用に向けた協議・お願い	 						①各制御機能の特性と有効性を関係機関等へ報告 ②欧州先行事例を参考に、新規建設WFに実装する制御機能を暫定的に設定 ③適用に向け、系統連系要件化のための要求仕様を関係機関等と明確にし、規程化を図る
4	有効電力・周波数制御機能の装備							・原則、新規建設WFには標準装備 ⇒そのためにはJWPAとして統一した指針策定が必要
5	制御機能を活用し実運用							・2019年以降、順次実用化

▲東北北部電源募集プロセス完了(予定)

▲北海道系統蓄電池募集プロセス完了(予定)

2.1 風車の周波数制御機能活用(1)

(JWPAの考える将来の運用案)



「風車による周波数制御が効果的なのは、抑制側だけではないのか？」というご意見に対する提案

風力の出力変動対策は、**周波数上昇側(出力余剰側)**については、大部分を**風車の出力抑制機能を用いて行い、周波数低下側(出力不足側)**については、**他の電源及び蓄電池は最低負荷等での運転や、満充電運用等で出力補償に備えた運用とすること**で、組合せた電源の全体合理的な運用を図る。

周波数上昇(出力余剰)側 → 風車の出力抑制機能を最大限活用(他の手段を最小化)

周波数低下(出力不足)側 → 風車以外の手段を組合わせて活用

→これを実現するためには、技術的には研究開発や実証等が必要であり、調整容量市場の創設等の環境整備も必要

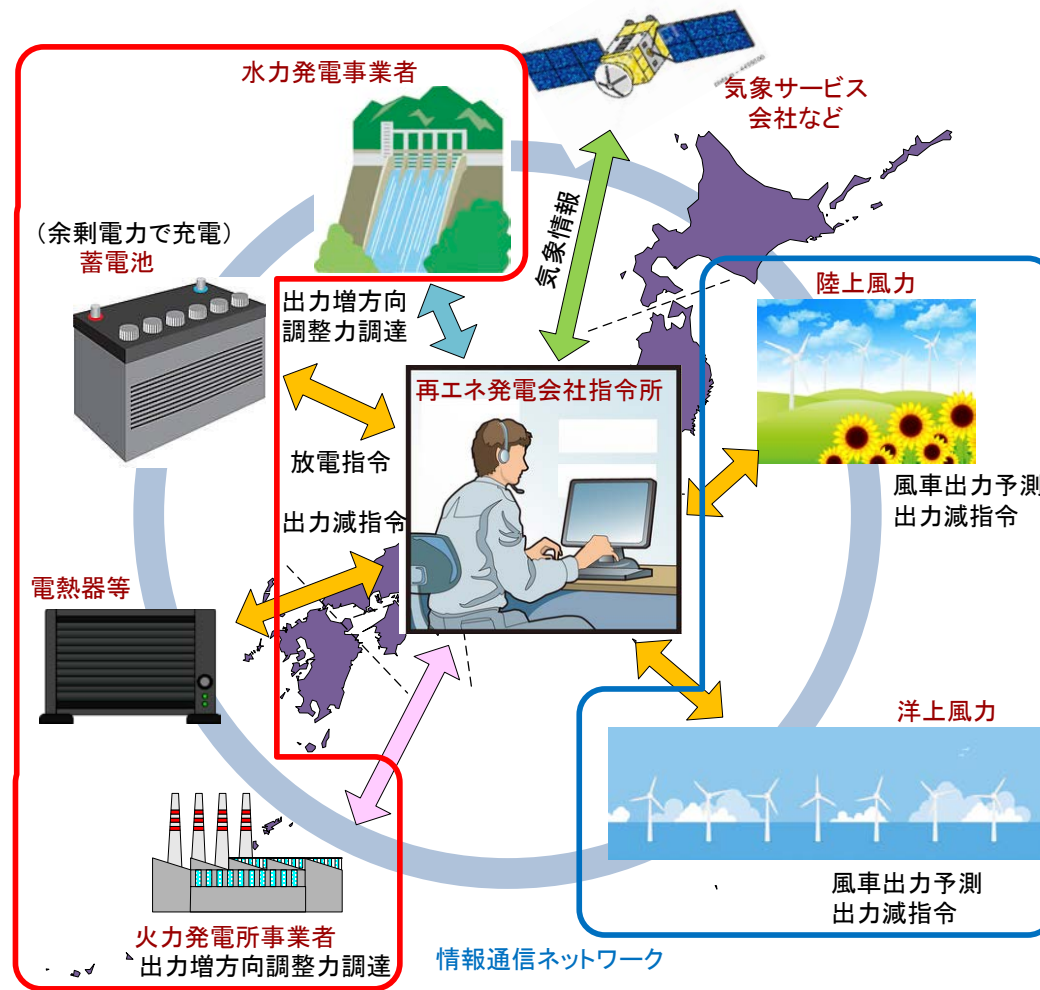
上記が実現した場合のインパクト

手段	影響
風力	出力を増加させる制御は必要ないので、常時最高効率点で運転し、周波数が一定以上した場合等の、必要な場合にのみ出力を抑制すれば良い。出力増時の出力変化率制限機能との組み合わせで、短時間での出力変動を抑えることが可能。
蓄電池	風力出力調整用の場合、常に満充電しておき、風力出力減時にのみ放電して補償する運用とする。蓄電池の充電は、再エネ余剰時の電気を活用すれば、充電電力費用が安価に済む。蓄電池は常時充電待機状態となるので、非常用などにも使える(別の形で費用を回収できる)。蓄電池は放電側の方が電流容量の変動範囲が大きく、(放電速度の可変範囲が広い)。充電側は、特に充電レベルが上がってくると、充電電流が小さくなり、制御には使いにくくなるが、充電は出力変動抑制に使わず、ゆっくり行うことにすれば、蓄電池システムの設計が楽になる(kW容量が小さくて済む)。
火力	風力の出力変動補償用としては下げ代を考えなくても良いので、低負荷で運転しておき、必要な時のみ出力を上げればよい。このような運転を行うことで、温暖化ガスの排出を抑制でき、大きな上げ代を確保できる。(但し火力機の利用率が下がるので、容量メカニズム等の対応が必要)
水力(揚水)	必要時に発電出力を増大(揚水動力を減少)させる必要がある。流れ込み式以外の水力は、現在も調整用に用いられていることが多く、現状の運用とそれほど変らない。
熱利用など	ヒーターや製氷装置等の負荷で余剰電力を消費させることで出力増対策をさせる場合、通常はこうした負荷を目一杯運転しておき、風力の出力減のときのみ、出力を絞れば良い。上げ代を考えなくて良いので、運転効率が高くなる。

風車による周波数制御機能は、**出力の抑制側しか動作できないが、抑制側だけでも風車だけで十分に対応できれば、他の手段(特に需要側の対策)と組み合わせることで、合理的な安価な出力変動対策を構築することができるのではないか？**

2.2 風車の周波数制御機能活用(2)

(JWPAの考える将来の運用案のイメージ)



風車の周波数制御機能活用の将来イメージと具体的な方策

- ・風力の出力過多で周波数が上昇した場合には、風力が自動的に出力減となる。また出力上昇速度も、系統に影響を与えないよう抑制される。
- ・風力の出力が不足あるいは急減して系統に影響を与えるような事象に対して

- ①事業者間で、水力発電や火力発電等の出力を融通し、風力の出力不足時に出力補償を実施する
- ②調整力市場から風力の出力不足時の出力を調達し、出力補償を実施する

実現には、技術面や制度面での十分な検討が必要

風車の出力不足時に、出力補償

出力増(余剰)側は主に風車自体で制御

各デバイスの特性に応じた制御分担で、系統対策コストを軽減

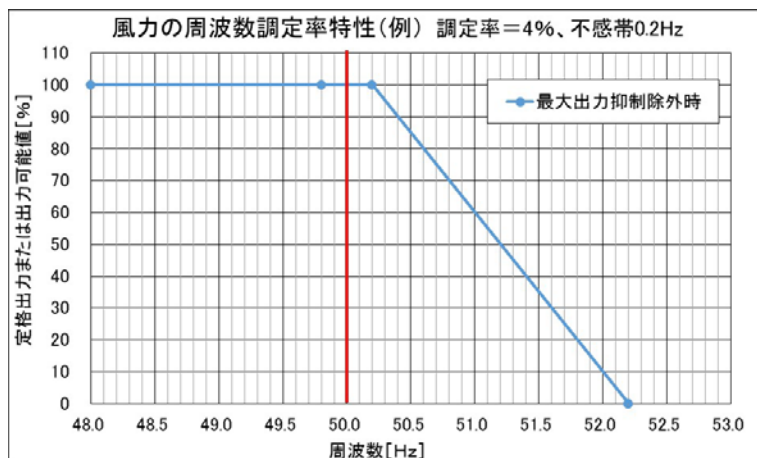
2.3 周波数制御機能活用による蓄電池容量低減(1)

(周波数上昇時の周波数調定率制御)

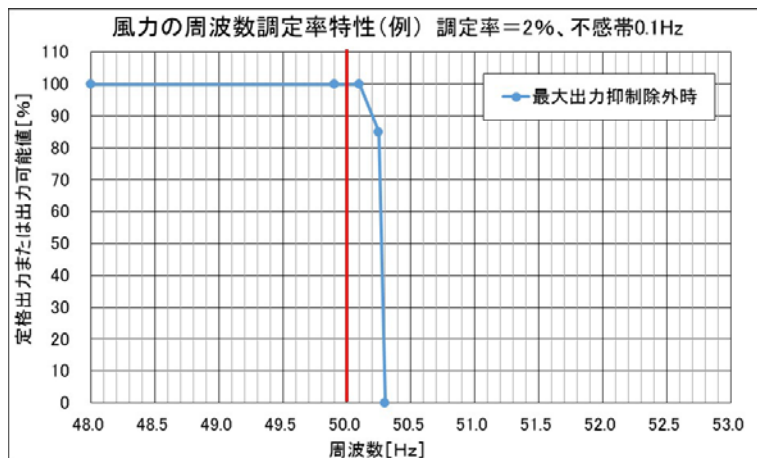


周波数上昇時は、風力発電機の出力を自動的に低減(自律制御)

⇒ 周波数上昇時における系統側での余剰電力吸収を代替え

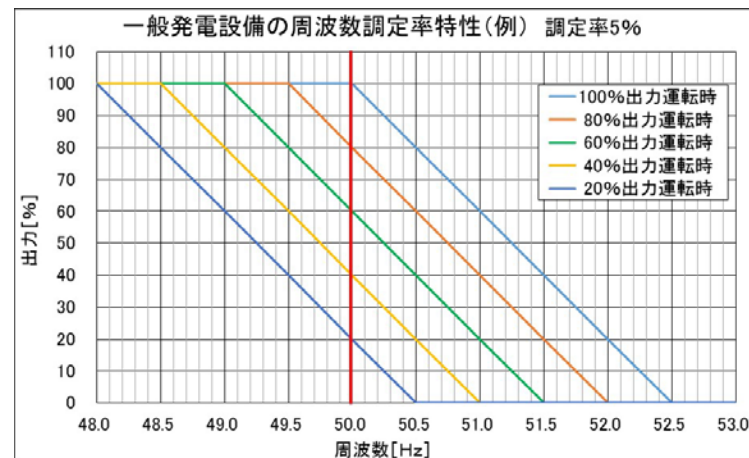


【 風力の周波数
調定率特性(例) 】
ドイツのデフォルト値
不感帯=0.2Hz、
調定率=4%



【 風力の周波数
調定率特性(例) 】
ドイツのデフォルト値の1/2とし、
50.3Hzで出力をゼロとする場合
不感帯=0.1Hz、
調定率=2%

【 一般発電設備の周波数
調定率特性(例) 】
不感帯=0.0Hz、
調定率=5%



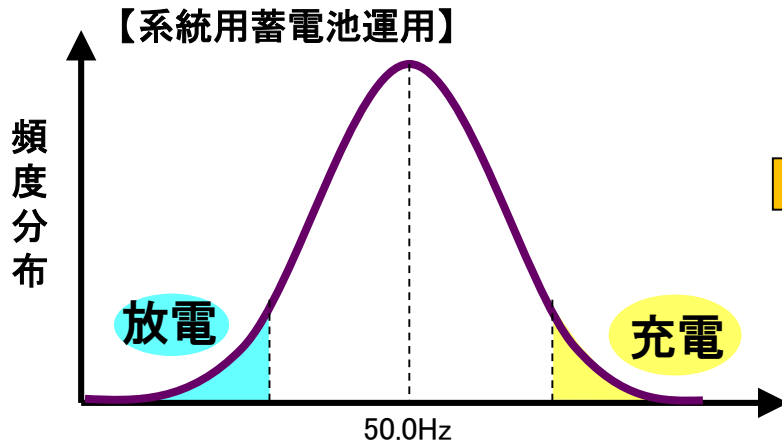
(注)周波数調定率制御は、
比例制御であり偏差が残る
ので、電力系統のLFC制御と
の分担・協調を考慮して調定
率設定値を決定する必要が
ある。

2.4 周波数制御機能適用による蓄電池容量低減(2)

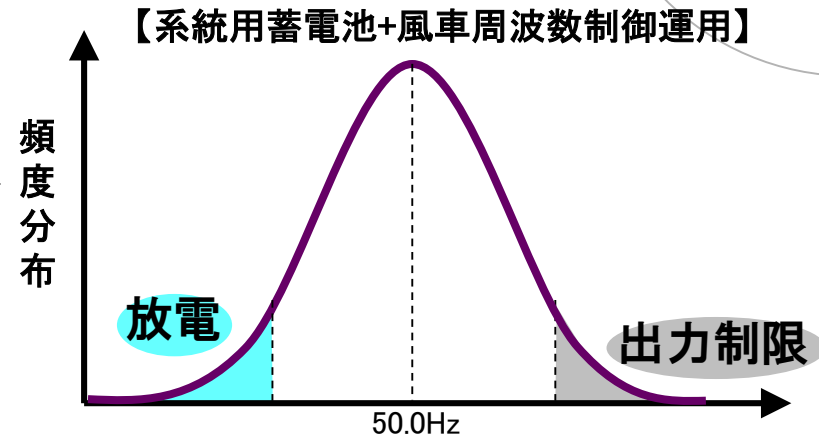
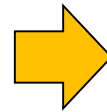
(蓄電池容量の低減案に関する一例としてのJWPAの考え方)



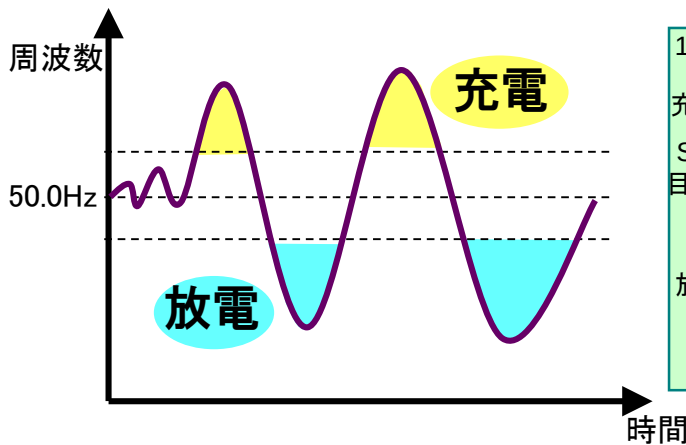
下図に周波数頻度分布(概念図)を示す。周波数上昇時に、周波数制御機能を利用することで、系統側蓄電池の最大充電分kWh容量分を削減できる可能性がある。



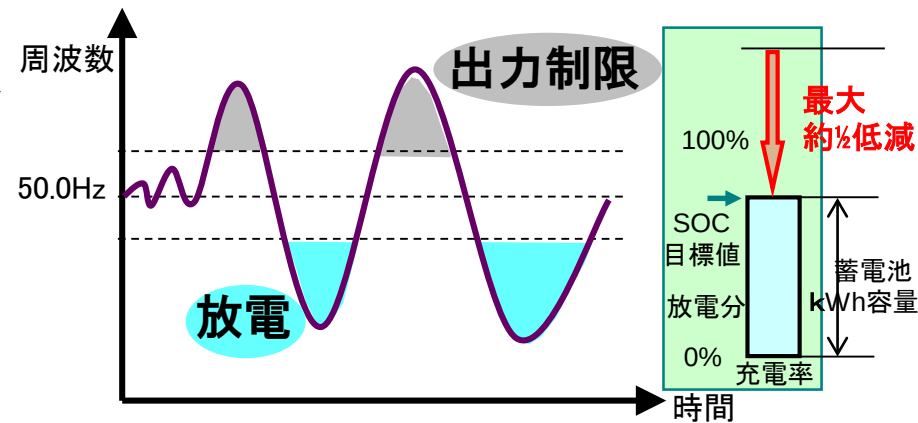
周波数頻度分布(系統用蓄電池併設)



周波数頻度分布(風車周波数制御利用)



系統用蓄電池制御概念図



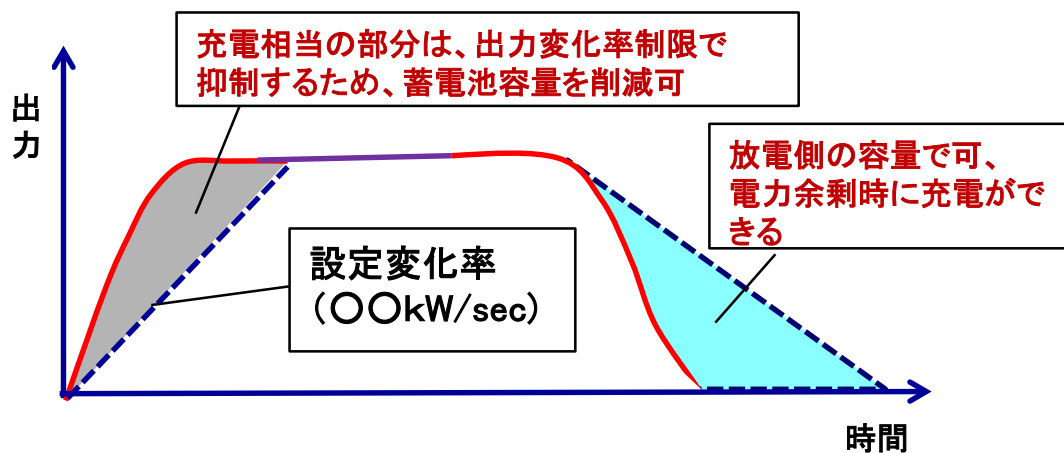
風車周波数制御+系統用蓄電池制御概念図



2.5 出力変化率制限適用による蓄電池容量低減 (蓄電池容量の低減案に関する一例としてのJWPAの考え方)

風車始動時、風速の急増時等の出力急増時に、出力変化率制限機能を使用し、風力発電機の出力増加率を設定値内に抑える。

⇒ 系統側で(出力増加率を抑制する)余剰電力の吸収は最小量で済む。



【風車の変化率の抑制】

出力調整用としては、蓄電池の「放電側」のみ使い、充電は発電の多い時間に適宜実施しておく運用となり、以下のメリットがある。

- ・充放電サイクル減による蓄電池寿命延長
- ・周波数上昇時に充電するようにすれば出力制御のロスを減らすことができる
- ・放電側にスペックを合せられる。(放電側の方がkW容量が大きいので、kW容量を大きく設定できる)
- ・通常は満充電に近い状態にしておけば良いので、運用が簡単
- ・蓄電池がほぼ常時充電されており、非常用として使いやすくなる

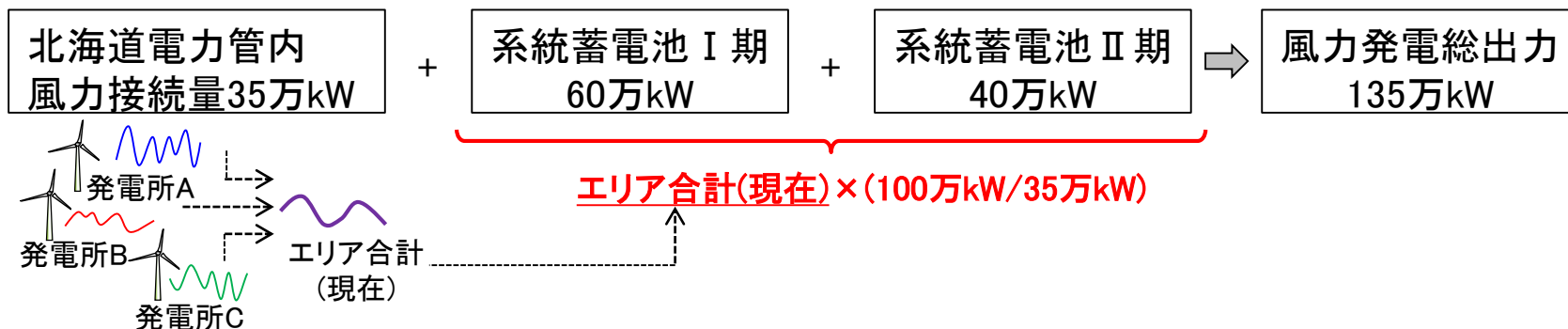
3.1 合理的な蓄電池容量算定の方向性(1)

(シミュレーション手順の一例としてのJWPAの考え方)

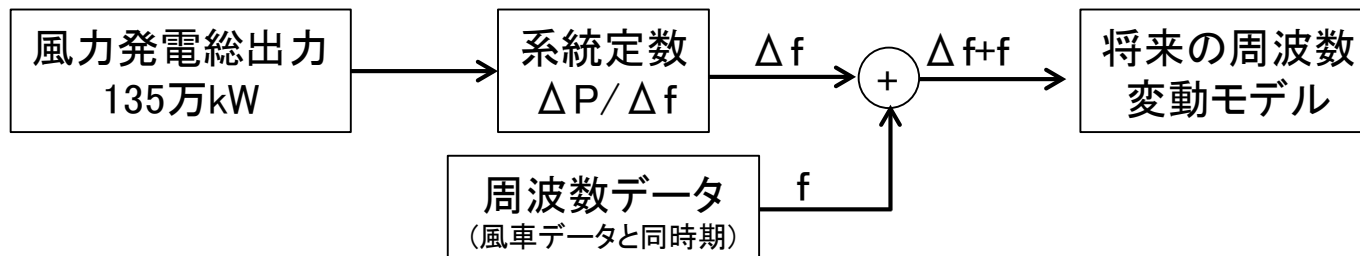


シミュレーションによる蓄電池容量の算定(手順の一例)

1. 北海道エリア内の風力発電出力より、将来の総導入出力を算出

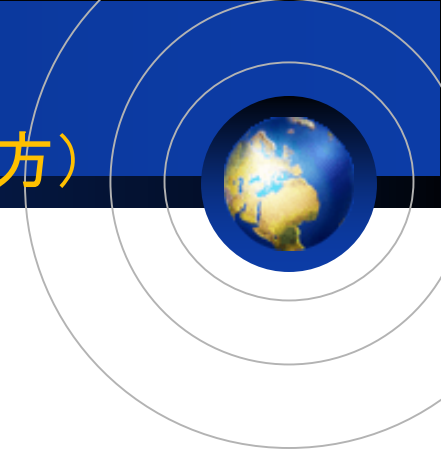


2. 系統定数と周波数データより、将来の総導入出力による 将来の周波数変動モデルを算出



3.2 合理的な蓄電池容量算定の方向性(2)

(シミュレーション手順の一例としてのJWPAの考え方)

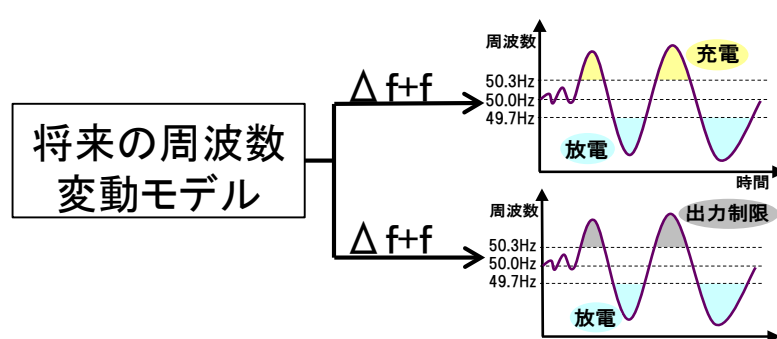


3. 周波数変動モデルから

①系統蓄電池のみ

②風力の周波数制御＋系統蓄電池

③風力の出力変化率制限＋風力の周波数制御＋系統蓄電池
の各ケースで、蓄電池システムの必要kW、KWh容量を算出

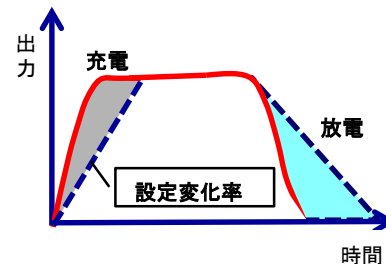


①系統蓄電池のみ

充電: 最大〇〇kW, 〇〇kWh
放電: 最大〇〇kW, 〇〇kWh

②風力の周波数制御＋系統蓄電池

充電: 最大△△kW, △△kWh
放電: 最大△△kW, △△kWh



③変化率制限を付加(充電相当の容量は不要)

充電: 最大〇〇kW, 〇〇kWh
放電: 最大〇〇kW, 〇〇kWh

(参考): 海外における制御機能活用状況

■ オーストラリア

- 面積は日本の約20倍(地域間連系線容量は僅か)
- 人口は日本の約20%(主に海に面した地域)
- 需要電力量は、東京電力と同等
- 風力発電制御機能を活用中
 - 周波数制御: 不感帯 = $\pm 0.15\text{Hz}$ 調定率 = 4%
不感帯を、更に小さくすることを検討中
 - 変化率制限: 連系容量/6分
- 2016年から、風力のみならず低圧の家庭用太陽光を含むインバータ連系設備に、周波数調定率制御、電圧調定率制御を適用(新設機対応)
 - オーストラリア規格 AS/NZS477.2 2015
- サウスオーストラリア州の目標は、再エネによる電力量供給率を、2025年までに50%。

■ アイルランド、デンマークのグリッドコード

- 第3回再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題に関する研究会(2017年6月14日) 資料3「世界の風力発電動向と日本における課題」GE: スライド21参照

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/saisei_dounyu/pdf/003_03_00.pdf

2016年: 風力実績

