



# 2030年自然エネルギー主力電源化へ向けて 大量導入と電力システムの安定性・柔軟性

## 再生可能エネルギーが果たす系統安定の役割

GE Renewable Energy  
大西英之  
12月17日, 2018

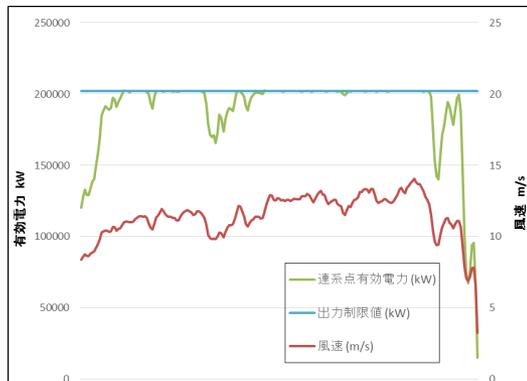
Confidential. Not to be copied, distributed, or reproduced without prior approval.

トピックス：

1. 風力発電の系統安定化能力
2. グリッドコード (系統連系要件)の役割
3. 問題可視化・共有化の必要性

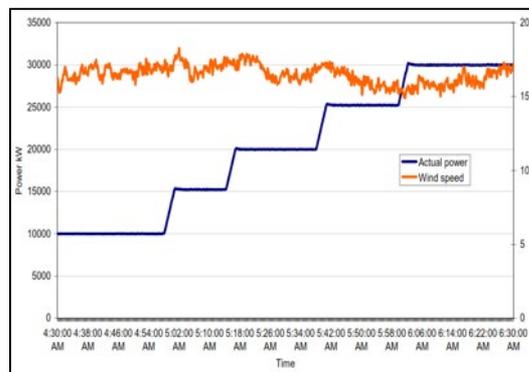


# 風力発電は系統安定化が可能な電源



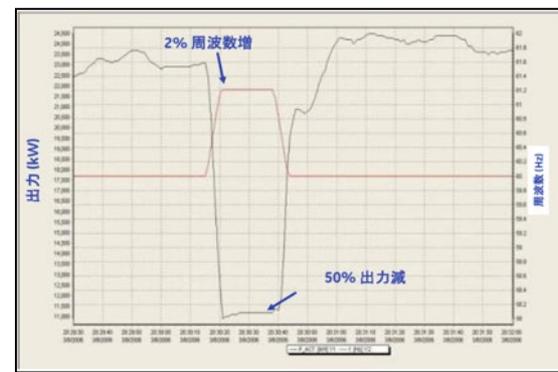
## 出力制限

あらかじめ定められた連系点出力以上に発電所が出力を出さない様抑制する運用



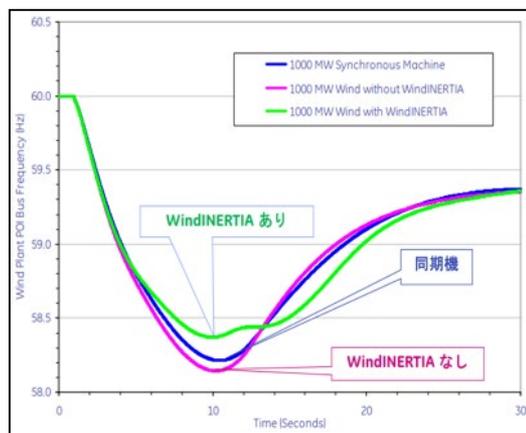
## 出力変化率制限

系統運用上の理由により、出力変化率に制限を伴った制御が求められるケースがあり各風車の出力を変化させる制御を行う



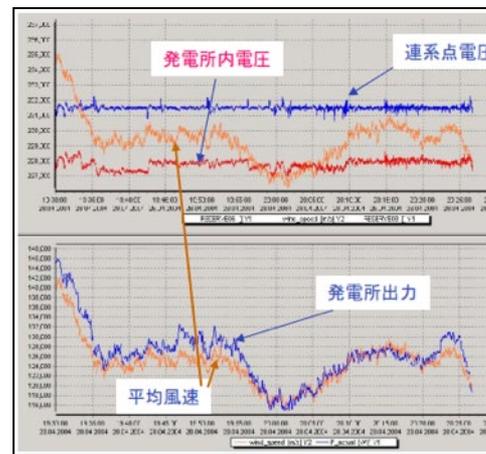
## 周波数ドロープ

周波数が低下すると出力が上昇し、周波数が上昇すると出力が減少するよう自動制御される機能



## 慣性応答 (イナーシャ)

大規模電源等の事故時、電力系統においては供給力の不足による周波数低下が発生するが、同期発電機が持つ回転エネルギーによりエネルギーが供給され(慣性力)、系統の崩壊を未然に防ぐ役割を果たしている。



## 電圧制御

風車の無効電力を連続的に制御することで、連系点において電圧を一定にする機能を有する。

出典：GE

風力発電は既に出力抑制、上方・下方予備力、無効電力の供給とを行う事ができ、従来火力プラントが果たしている系統安定化や調整力の機能を果たす事ができる

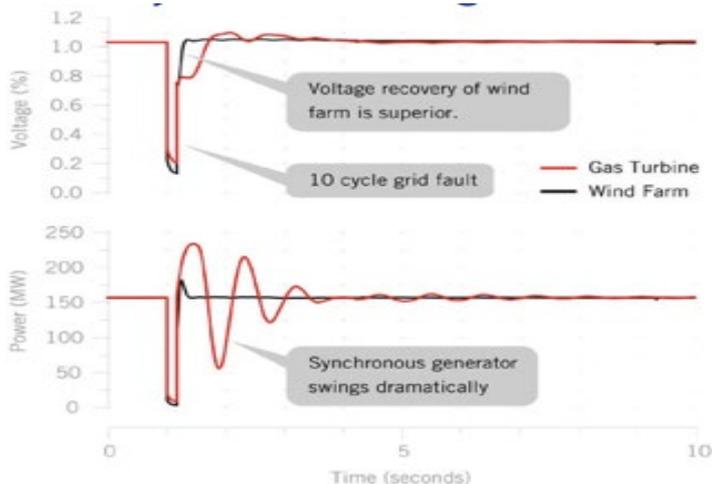
風力発電は「風まかせ」ではない



# 風力発電の系統安定化技術の例

Demonstrated, commercially available functionality that is in use today around the world

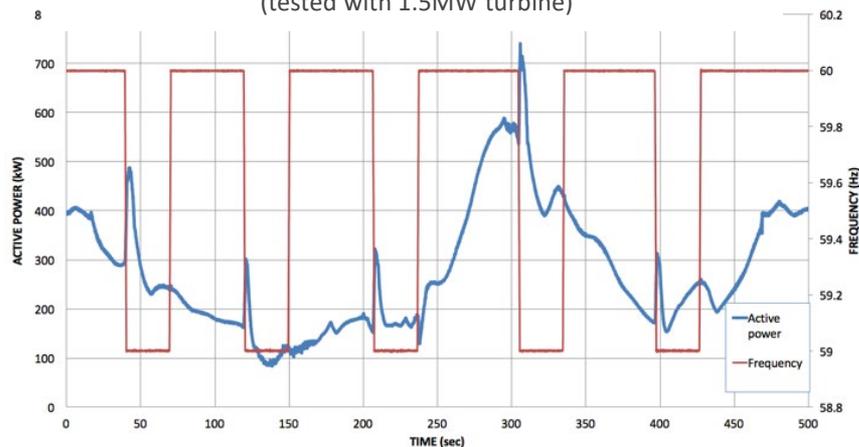
## Primary frequency response



Source: MacDowell, GE, UVIG Albuquerque, 9/12

## Inertial response

(tested with 1.5MW turbine)



Source: V. Gevorgian, National Renewable Energy Laboratory, 2017

- 新しいタイプの風車は一般的なガスタービンよりシステムの負荷変動追従に優れている
- ガスタービンがトリップするような条件でも追従できる
- (上の例は10/60 secの変動に対する発電所の反応)

- 慣性応答能力はケベック州で初めに要求され、今ではアイルランドやオンタリオ州で求められる様になった。
- 大型の発電機がトリップした時の様なグリッドイベントに対応する時に必要となる性能
- ブラジルでは定格出力10%を5秒の要求がある

## 風力発電によるアンシラリーサービス

- 特に系統から早い反応が求められる事象に対しては一般的な火力発電所より対応が良い場合が多い
- 一方で、系統の慣性（イナーシャ）に関しては火力発電所（Synchronous）の方が優れているが、最新の風車はすでにこの機能も備えており、実用化されている
- PFR (Primary frequency response) などはテキサス、アイルランド、カナダではすでに7～8年の実績がある

# グリッドコード (系統連系要件、系統運用規則) の一例

風力制御機能			アイルランド本国		デンマーク			
			5MW以上の発電所	その他	11kW から 50kW以下の 発電所	50kWから 1.5MW以下の 発電所	1.5MWから 25MW以下の 発電所	25 MWを越えるか 100 kV以上の 送電線接続の発電所
ウィンド ファーム レベルの 制御	無効電力 (電圧) 制御機能	力率一定制御 または 一定無効電力制御 Power Factor Control 及び Reactive Power Control	必須 (要求数値は、 低風速シナリオで発電する 風車数により設定し、 事業ごとに異なる)		必須	必須	必須	必須
		電圧制御 Voltage Control			必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし	必須
	有効電力 (出力) 制御機能	有効電力(出力)制御 Active Power Control	必須 (TSOとの協議のより、 事業ごとに異なる数値が設定)		必須	必須	必須 (定格出力の40%- 100% 範囲で制御可 能であること)	必須 (定格出力の20%- 100% 範囲で制御可 能であること)
		出力変化率制御 Ramp Rate (Limit) Control	必須 (TSOとの協議のより、 事業ごとに異なる数値が設定)		必須 (最大標準値は 100kW/s)	必須 (最大標準値は 100kW/s)	必須 (最大標準値は 100kW/s, 定格出力 の40%-100% 範囲 で制御可能であるこ と)	必須 (最大標準値は 100kW/s, 定格出力 の20%-100% 範囲 で制御可能であるこ と)
	周波数制 御機能	周波数調定率制御 (ガバナフリー模擬制御) Frequency Control 及び Frequency Response	必須 (ドループの範囲は 2-10%, 初期設定は 4%, TSOとの協議 のより、 事業ごとに異なる数 値が設定、周波数 カーブが設定)	必要条件なし	周波数応答機能 のみ必須 (TSOとの協議で、 事業ごとに異なる数 値が設定)	周波数応答機能 のみ必須 (TSOとの協議で、 事業ごとに異なる数 値が設定)	周波数応答・制御機 能とも必須 (TSOとの協議で、 事業ごとに異なる数 値が設定)	周波数応答・制御機 能とも必須 (TSOとの協議で、 事業ごとに異なる数 値が設定)
		デルタ制御 Active Power Reserve Control			必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし	必須 (TSOとの協議で、 事業ごとに異なる数 値が設定)
		慣性力模擬制御 又は イナーシャ制御 Inertial Control	必要条件なし		必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし
	各風車 レベルの 制御	瞬時停電 運転継続 機能 Low Voltage Ride through	必須 (最小値 15%)		必要条件なし	必要条件なし	必須	必須
		零電圧運転継続機能 FRT Zero Voltage Ride Through	必要条件なし		必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし	必要条件なし

Sources: Eirgrid Grid Code Version 6.1 および Energinet.dk Technical regulation 3.2.5 for wind power plants above 11 kW

- (再生可能) 発電所にどの程度系統安定の貢献・責任を求めるかをルール化したもの
- グリッドコードは、個々の国の背景をベースに段階的に適応・発展を繰り返し、常に新しいあり方を模索している。
- 経済性及び系統安定化に寄与できる規模レベルを鑑み、発電所の規模の違いで、要求する内容・設定を変えている国もある。



# グリッドコード：テキサス州での風力導入事例

## テキサス

- 最高電力需要：70GW peak (82GW ERCOT)
- 既設風車 (2017)：21 GW
- 風車の発電量：12.6% in 2016
- 最大風力発電率：50% (3/23/17)
- 蓄電：52MW 電池  
(317MW/96hr CAES 圧縮空気 実証試験)
- 広域連系線：1,106MW to East & Mexico

## テキサスの成功は…

- 新しいマーケットルールの構築  
15分から5分 nodal pricing への移行  
再生可能エネルギーの機能を利用  
風車に厳しい系統安定化の役割分担を要求  
(Voltage ride-through, Primary Frequency response)  
風力の発電量予想を導入
- Competitive Renewable Energy Zone (CREZ) 整備地域を指定して送電線を整備
- ダイナミックプライシング
- 現在も新しいアンシラリーサービスのあり方を検討中  
(超短期周波数安定化、イナーシャ)



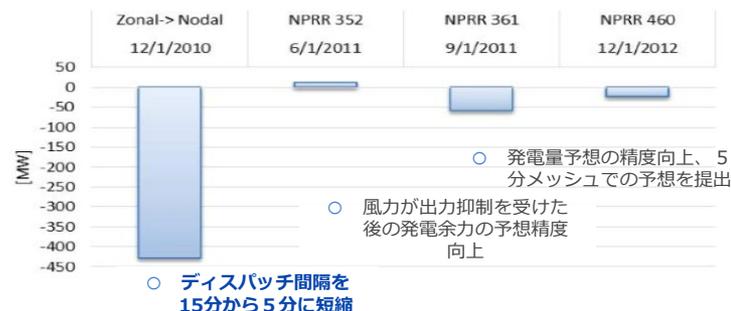
## ERCOTでの調整予備力電源の必要量変化



- 2011年から2016年にかけてテキサスで導入された風力は7 GW (9=>16GW)増加
- その間にERCOT管内でのRegulation Reserve (~1分の調整力)の必要量は25%減っている (560MW =>420MW)

Source: University of Texas report: Impact of Renewable Generation on Operational Reserves Requirements

## ERCOTでの系統ルール変更とその調整予備力電源の必要量変化



- 2007年から2014年に施行された23件のProtocol revisionsのうち、風力に直接関係する11件の貢献度を分析した
- ディスパッチの間隔を15分から5分とした変更の寄与度が一番大きい
- また発電量予想の精度向上からの貢献も大きい

Source: Impact of Renewable Generation on Operational Reserves Requirements: When More Could be Less

# グリッドコード：アイルランドの風力導入例

## アイルランド

- 最高電力需要：6,800 MW peak
- 既設風車 (2017)：3,800MW
- 風車の発電量：25% in 2016
- 最大風力発電率：68% (12/24/'16)
- 蓄電：292MW 揚水  
(300MW/6hr CAES 圧縮空気 実証試験)
- 広域連系線：500MW to Great Britain

## アイルランドの成功は…

- 恵まれた風況を活かし、国としての明確な再生可能エネルギー導入ターゲットを設定 (2020年, 40%)
- 系統周波数安定化を図るために、SNSP (System Non-Synchronous Penetration)インデックスの導入、現在60%を達成、将来100%目指す  
(2020年再生可能40%を達成する一環として、現在のSNSPを60%を75%にあげることで、風力発電の抑制が14% から7%に減るという試算もある)

## アイルランドでの経験

### (蓄電装置、広域連系線は必須か?)

- 2010年2月、定期点検中の4基の揚水発電に不具合が見つかった。4基は修理のために2012年の夏まで使用不可能となった
- 2011年8月から2012年1月までの5ヶ月間、HVDC 広域連系線に問題が発生。その間、アイルランドは外部との接続を失った
- 1,600MWの風車が平均17%の電気需要を満たした (瞬間最大導入量50%)
- 現在もFFR(Fast Frequency Response) にフォーカスした新しいアンシラリーサービスの構築 風車の機能を使った周波数安定化を試みている

- アイルランド、テキサス共、大きな蓄電装置なしで大量の再生可能エネルギーの導入に成功している。
- ルールや運用は段階的に適応・変更、効果を検証しながら常に新しいあり方を模索している。



# 系統分析/コンサルティングサービス -問題の可視化-

## GE Energy Consulting Service

- 電力事業者、ISO, 行政などからの依頼プロジェクト
- 世界中で計100GW以上の再生可能のインテグレーション分析
- 経済性、技術的課題、環境インパクト等を総合分析し再生可能エネルギー大量導入に関わる提言を行う

## USにおけるプロジェクト例

### 2004 New York

3 GW Wind  
10% Peak Load  
4% Energy

### 2005 Ontario

15 GW Wind  
50% Peak Load  
30% Energy

### 2006 California

13 GW Wind  
3 GW Solar  
26% Peak Load  
15% Energy

### 2007 Texas

15 GW Wind  
25% Peak Load  
17% Energy

### 2009 Western U.S.

72 GW Wind  
15 GW Solar  
50% Peak Load  
27% Energy

### 2010 New England

12 GW Wind  
39% Peak Load  
24% Energy

### 2012 Nova Scotia

~1500MW Wind  
40% Energy

### 2013 PJM

96GW Wind  
22GW Solar  
30% Energy

### 2014 Minnesota

8 GW Wind  
4.5 GW Solar  
50% Energy

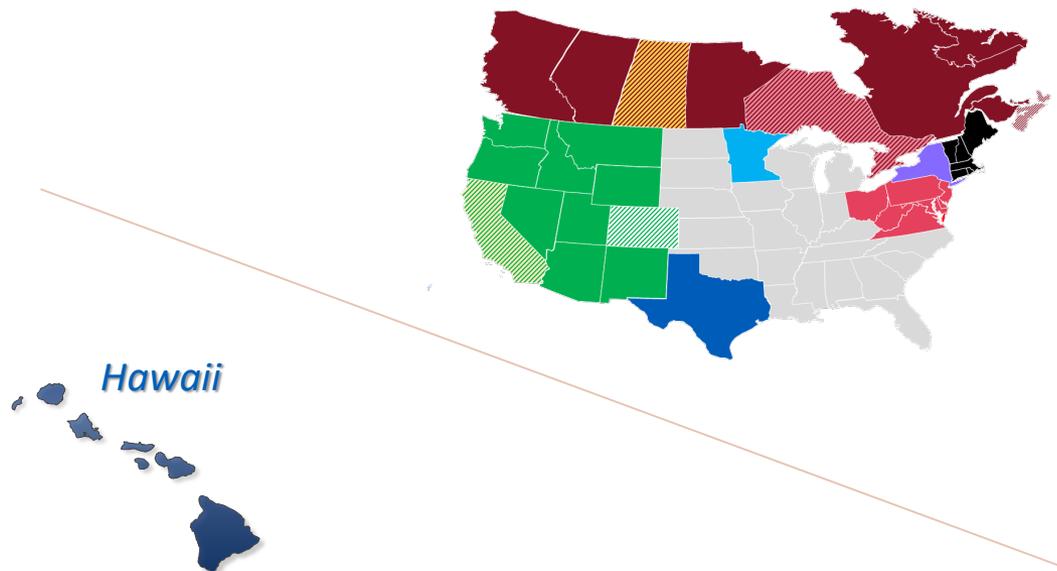
### 2016 Pan-Canadian

~72GW Wind  
30% Energy

### Underway

■ Saskatchewan

■ Colorado Springs



Hawaii

Source: GE Energy Consulting

Evaluation of Sustainable Energy Options for the Big Island

Oahu Wind Integration and Transmission Study (OWITS)

Oahu-Maui Interconnection Study (Stage 2)

Oahu Distributed PV Study (In Progress)



Maui Wind Integration Study

Hawaii Solar Integration Study (HSIS)

Hawaii RPS Study



# まとめ

1. 風力発電は出力の制御はもとよりディスパッチ、アンシラリーサービスが可能な電源。  
この機能を見逃したシステム運用・調整力確保は不必要な投資を招く。
2. グリッドコードは、個々の国の背景をベースに段階的に適応・発展を繰り返す、常に更新されている。再生可能エネルギーにどの程度システム安定の貢献・責任を求めるかを規定するものでもある。
3. テキサスやアイルランドの事例から調整力向上は蓄電のみならず、システムの運用方法や幅広い技術を経済性を考慮し、グリッドコードに反映して計画的に高めるべき。
4. まずは外部の視点（コンサルティングサービス）を入れ運用上の問題・チャレンジの可視化を。
5. 広域運用、再生可能エネルギーの導入に際して、発電側、システム運用側にインセンティブの導入が必要。

