風力発電の系統連系システム

矢後　賢次（やご　けんじ）　　腰　　一昭（こし　かずあき）

1　まえがき

風力発電は自然エネルギーを利用しており，地球環境に優しいことなどから年々導入量が増加している。一方，風力発電は，計画的に発電電力を制御することが困難であることから，電力系統へ連系する風力発電設備容量が増大するにつれて電圧安定度や周波数安定度に関する電力品質の維持に支障をきたす可能性がある。必要対策の筆頭に挙げられるのが，時々刻々変化する発電電力を併設した蓄電設備へ充電または蓄電設備から放電することにより，風力発電所系統連系点の電力を平滑化する「風力発電電力安定化装置」である。

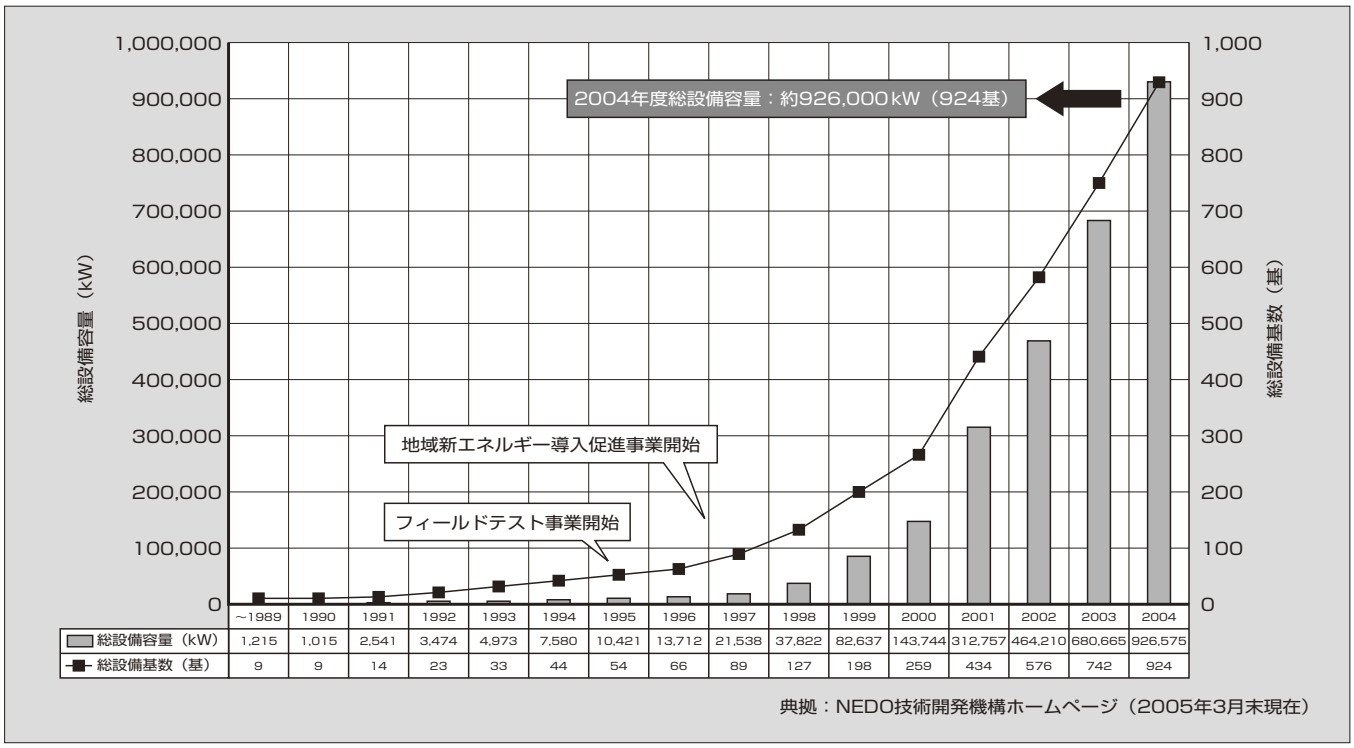
本稿では富士電機の風力発電へのかかわり，風力発電システム用の電力安定化装置に関して述べる。

1.1　風力発電の国内動向

日本の風力発電導入量の推移を**図1**に示す。1995年から国による風力開発フィールドテスト事業補助制度，新エネルギー導入促進対策補助制度が実施され，さらに電力会社が事業用風力購入メニューを開発したことなどにより，2000年以降急速に導入量が増加している。2005年3月末時点の導入量は約92.6万kW，924基であり，国の新エネルギー導入目標（うち，風力発電の2010年度における導入目標は300万kW）に対して約1/3を達成している。

1基あたりの平均出力を1,000kWと仮定すると，今後5年間に2,000基を新たに建設する必要がある。しかしながら系統連系にかかわる問題が顕在化しつつあり，目標達成には何らかの対策が必要となってきている。このため経済産業省，学識経験者，電力会社，風力発電事業者などか

図1　日本における風力発電導入量の推移



	~1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
総設備容量（kW）	1,215	1,015	2,541	3,474	4,973	7,580	10,421	13,712	21,538	37,822	82,637	143,744	312,757	464,210	680,665	926,575
総設備基数（基）	9	9	14	23	33	44	54	66	89	127	198	259	434	576	742	924

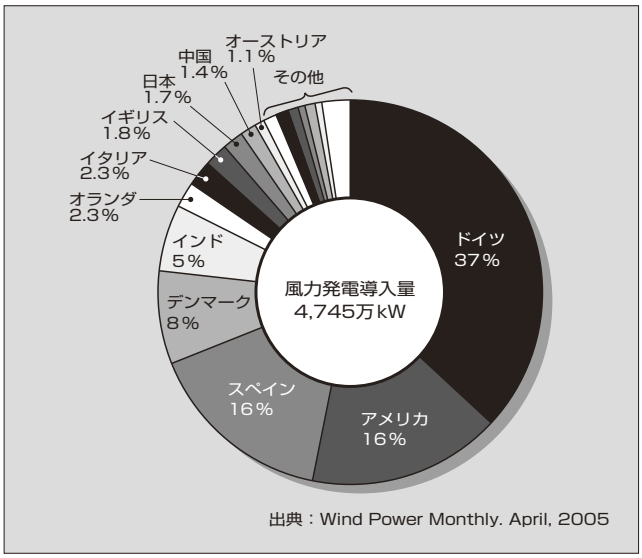
矢後　賢次

水力発電修繕および消化ガス燃料電池の環境技術を経て新エネルギーの技術業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社e-ソリューション本部エネルギーソリューション統括部EMシステム二部主任。

腰　　一昭

変電システムの技術・企画，ESCO事業の企画・技術を経て新エネルギーの技術業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社e-ソリューション本部エネルギーソリューション統括部EMシステム二部長。

図2　風力発電導入量国際比較



ら構成される「総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会風力発電系統連系対策小委員会」が設置され，2004年7月27日に中間報告書（案）を発行，さらに2005年6月23日に中間報告書に盛り込まれた対策のレビュー結果を公表している。その後も，2010年導入目標量の達成に向けて関係者間で具体的な対策実施方法などに関して検討を継続している。

1.2　世界の風力発電導入量

世界の風力発電導入量と導入国比を**図2**に示す。

2005年3月末時点の導入量は，約4,745万kWであり，1位のドイツは，単年度で日本の2010年度までの導入目標量である300万kW以上の建設が行われている。日本は，前述のとおり2000年から導入量が急増し，2004年から世界のベストテン入りを果たしているが，ベストファイブの国々と比べると，まだまだ導入量が少ないといえる。これは欧米諸国との政策の違いに加えて，日本は平坦（へいたん）地が少なく風の乱れが大きいこと，風況が良い地点は北海道・東北・九州に集中していること，台風や落雷対策が必要であることなどが要因である。

2　富士電機における風力発電への取組み

富士電機は，豊富な経験を有する発電・変電・系統制御分野の製品群と技術力，プラント取りまとめ力および系統解析技術力などを基に，積極的に風力発電システムに取り組んでいる。主な実績を以下に述べる。

1993年に国内初の本格的風力発電設備を導入した山形県立川町（100kW × 3基）へ，また1999年には国内初の本格的ウインドファームである株式会社ユーラスエナジー苫前の苫前グリーンヒルウインドパーク（1,000kW × 20基）へ，さらに2001年には当時の国内最大容量である株式会社ユーラスエナジー岩屋の岩屋ウインドファーム（1,300kW × 25基）へ系統連系設備を納入した。これらの国内の記録的風力発電所を含めて，2004年度までに納入した風力発電設備用系統連系設備の合計値は，出力で163,150kW，基数で106基である。

また，2003年には岩谷産業株式会社が受注した島根県企業局隠岐大峯山風力発電所（600kW × 3基）において，系統連系設備を含むプラント建設を実施した。大峯山風力発電所は，離島のため系統容量が小さく風速や風向変動に起因する風車の有効電力変動により系統の周波数変動許容値を超過することが想定された。この対策として，単位時間あたりの風力発電所出力変動量を抑制する世界初の「超高速フライホイール電力安定化装置」も納入した。この風力発電システムは，島根県企業局とともに，平成15年度新エネルギー大賞「新エネルギー財団会長賞」を受賞した。

さらに，2003年12月には富士電機システムズ株式会社100％出資の株式会社ウインパワーを設立し，風力発電の適地開発，風況精査（445ページの「解説」参照），環境調査，システム設計などを行い，西目風力発電所（1,250kW × 1基，600kW × 1基）のフルターンキージョブを実施した。

これらの実績により，系統連系設備のみならず風車を含む風力発電システムすべてを，各風力発電事業者に対して，安心と満足をともに提供することができると確信している。

なお西目風力発電所は，2005年3月から順調に風力発電事業を実施している。

3　系統連系に係る問題点と対策

風力発電機の発電電力は，風速の3乗に比例するので，わずかな風速変動も大きな発電電力変動につながる。また風速は，周期・量ともにランダムに変動するので風力発電導入量が増加し，発電電力の変動量が増大すると，電力系統の電圧変動や周波数変動を引き起こし電力品質の低下を招く場合もある。

電圧変動に対しては，他の発変電設備と同様に風力発電機の運転力率を適正値に保つことや無効電力補償装置を併設することなど，局地的対策が可能であるが，周波数安定は系統全体の問題となる。

前述の風力発電系統連系対策小委員会では，周波数安定対策の具体的な手段として，以下を提示している。

① 風況予測に基づく風力発電量予測システムの構築
② 解列・出力制御方式の検討
③ 蓄電設備などの導入による風力発電の出力変動平滑化
④ 電力会社間連系線の活用

また経済産業者は，具体的な対策実施に係る支援制度および技術面の調査・検討に着手している。

以下に，周波数変動の発生要因とその対策，特に「電力安定化装置」に関して述べる。

3.1　周波数変動発生要因

周波数変動は系統全体に生じる問題であり，系統連系中

の発電設備による合計発電電力と消費電力とのバランスが崩れることにより発生する。電力会社では，時々刻々変化する消費電力の変動に応じて常に発電電力をバランスするように該当発電所の発電電力制御を実施している。その概念を**図 3** に示す。

(1)　微小変動分

ガバナフリー（水力や火力発電所の調速機が有する自動制御機能）機能により対応する。

(2)　短周期成分

LFC（中央給電指令所にて，周波数偏差に応じて行う水力や火力発電所の出力制御）機能により対応する。

(3)　長周期成分

EDC（中央給電指令所にて需給予測を行い，水力や火力発電所の運転・停止を含め出力制御）により対応する。

3. 2　風力発電システムの発電電力変動

風力発電機の発電電力変動例を**図 4** に示す。風速や風向変動に伴い，数十秒周期，数分周期，数十分周期，数時間周期の発電電力変動がランダムに組み合わされていることが分かる。風速変動の影響を抑制する方法として，風速変動を発電電力変動ではなく回転速度変動にて吸収する可変速度機の採用が挙げられるが，可変速度範囲の制約などにより数秒周期以上の変動は吸収することができない。すなわち，固定速度機の場合は，さらに数秒周期の変動成分が加わることになる。

風力発電機の発電電力変動と負荷変動（消費電力変動）が互いに相殺されるケースでは問題ないが，最悪のケースでは，両方の変動値が加算されることになり，ガバナフリーや LFC による周波数調整容量が不足し，周波数を系統運用目標値内に保つことができなくなる可能性がある。これが，離島など系統容量が小さい地点に風力発電設備を設置する場合や，系統容量が大きくても系統容量に対して一定比率以上の風力発電設備を集中して多数導入する場合の問題点となる。

さらに台風などにより，風速が 20 ～ 25 m/s 以上に達すると風車はカットアウト（停止）するが，これは風車の発電電力を定格値から短時間でゼロに減じることから，電力系統の動態および過渡安定領域での問題も引き起こす可能性がある。

3. 3　周波数変動（有効電力変動）抑制策

電力会社の LFC 調整力（量と応答速度），負荷変動量，許容風力発電変動量の関係を**図 5** に示す。

図 5 に示すように風力発電導入量を増加させる手段としては，次の 4 方式がある。

①　所要 LFC 調整量を増加する。

②　LFC 制御遅れ角を小さくする。

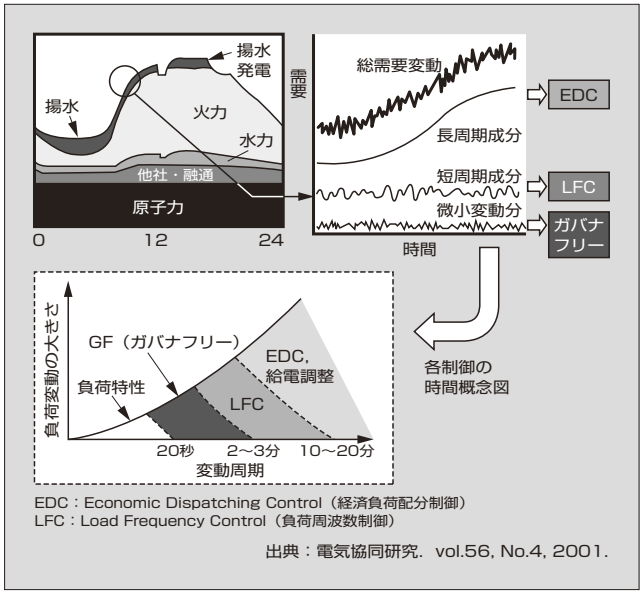
③　負荷変動量を少なくする。

④　風車出力変動率（ε）を小さくする。

しかしながら，①および②は，各電力会社の設備構成などにより決定されているので，風力発電のために短期間で設備構成などを変更・新増設することは困難である。また，③は需要家の消費電力変動であり，これを抑制するのは不可能である。

したがって，風力発電導入量を増加させるためには，当該系統における LFC 調整力，あるいはガバナフリー調整

図 3　需要変動に対する周波数制御



出典：電気協同研究．vol.56, No.4, 2001.

図 4　可変速度機の発電電力変動例

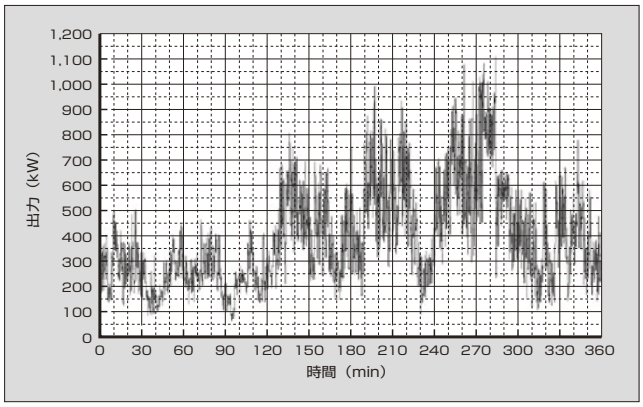
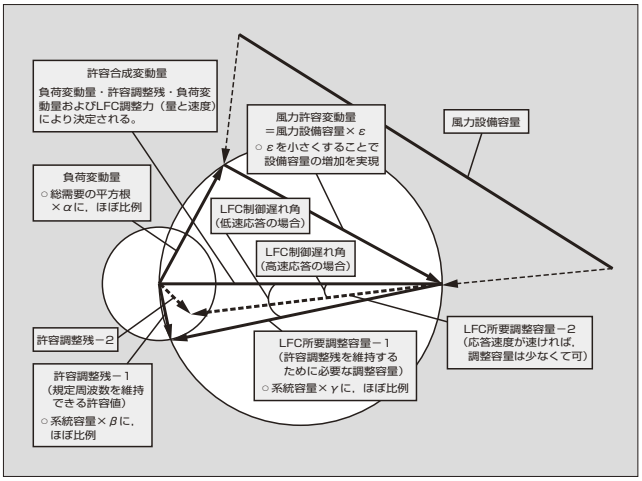


図 5　負荷，風力発電変動抑制と LFC 調整の関係



能力に応じて，風力発電機の合計発電電力変動量を，風車許容変動量以下に保つ必要がある。これを実現する手段が，時々刻々変化する発電電力を蓄電設備へ充電，または蓄電設備から放電することにより風力発電所系統連系点の電力を平滑化する「電力安定化装置」である。

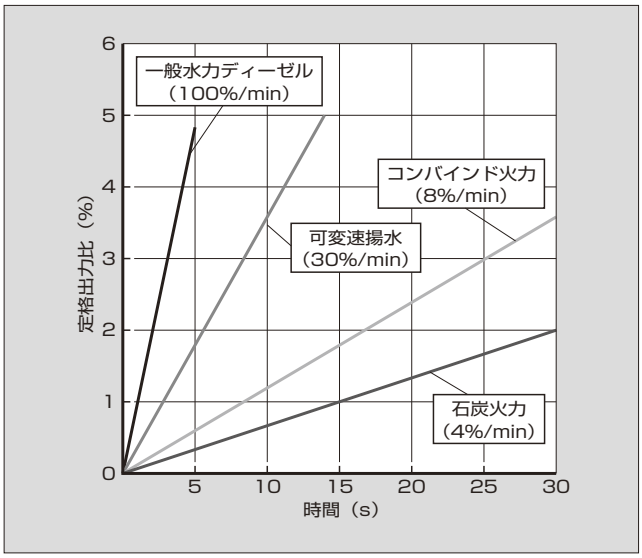
離島など単独系統においては，ディーゼル発電設備を主体に電力供給を行っている。ディーゼル発電機は，約1分間で最大出力から最低出力まで制御することが可能であり，比較的短い変動周期の消費電力変動および風力発電機の発電電力変動を吸収・制御することが可能である。ただし，頻繁な出力制御はディーゼル発電設備の寿命面に悪影響を与える可能性があり，調速装置の高感度化には制約がある。したがって，離島など単独系統においては，**図3**のガバナフリー領域に属する周期が数分以下の微小変動分発電電力変動量を抑制することが必要である。

一方，基幹の電力系統は，主に火力発電所の運転・停止を含む発電電力制御により，消費電力変動や風力発電設備の発電電力変動を吸収し，発電電力と消費電力とのバランスを保つことにより周波数を規定値に維持している。しかしながら火力発電所の発電出力制御速度は，ディーゼルや水力発電所に比して遅く，十数分から数十分を必要とし，かつ最低出力制限や制御可能幅制限などがある。

したがって，多数（大容量）の風力発電設備を基幹の電力系統に連系するには，ガバナフリー周波数領域の負荷変動抑制に加え，LFC領域の短周期変動，つまり周期が数十分以下の発電電力変動量を抑制することが必要である。各種発電設備の出力調整可能率の例を**図6**に示す。

なお，本稿では詳細な記述を省略するが，**図3**に示したとおり夜間は需要電力が少ないため，EDCにより運転している発電所数が少なくなる。このため，電力系統の調整力も少なくなっているので，夜間に風力発電許容変動値を保つには，さらに平滑可能力の大きな蓄電設備の設置または風力発電機の停止が必要となる場合もある。

図6　発電設備の出力調整可能率



3.4　電力貯蔵装置の種類と特徴

風力発電設備を系統連系するためには何らかの電力貯蔵装置との組合せが必要であることを述べたが，その種類と特徴を**表1**に，各電力貯蔵装置の実用的な最大電力と貯蔵電力量との関係を**図7**に示す。また代表的な方式について

図7　電力貯蔵装置の最大電力と貯蔵電力量

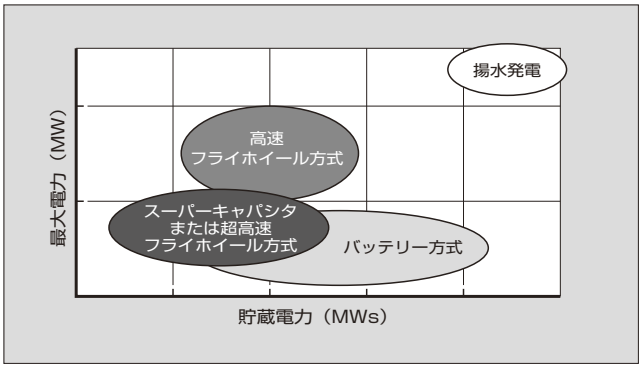


表1　電力貯蔵装置の種類と特徴（1）

（出典：電気協同研究．vol.56, no.4, 2001.）

	新型電池	超電導コイル	フライホイール	キャパシタ	圧縮空気貯蔵	揚水発電	超高速フライホール〈注2〉
特　　徴	高密度，分散適合	長寿命，高速応答	長寿命，高速応答	高速応答，長寿命，分散適合	大容量，長寿命	大容量，長寿命	高速応答，長寿命，分散適合
貯蔵効率	70～80％	70％	80％（目標）	80％（目標）	70％	70％	90％
応答速度	～数秒	～1秒	～1秒	～1秒	～数分	～数分	～0.2秒
寿　　命	10～15年 毎日フル充放電時	30年 毎日フル充放電時	30年 毎日フル充放電時	20年 毎日フル充放電時	30年 毎日フル充放電時	30年 毎日フル充放電時	20年 毎分フル充放電時
開発状況	一部は実用化段階	要素技術開発	要素技術開発〈注1〉	基礎研究モデル実証	パイロット機開発段階	実用化済み	一部は実用化済み
課　　題	低コスト化，高効率化	低コスト化，高超電導技術開発	大型化，高速回転化	高密度化，低コスト化	低コスト化	環境調和，用地確保	低コスト化
コスト							
現状（万円）	60～150				300	15～20	5～10
目標（万円）	15～25	10～30	～35	20	15～20	15～20	～5

〈注1〉沖縄電力株式会社にて，26.5MVA　210MJ機が運転中
〈注2〉出典には記載なし（最近の調査結果を記載）：100kW 30秒機および200kW 45秒機が実用化済み

説明する。

(1)　電気エネルギー（各種蓄電池，電気二重層キャパシタ）活用方式

各種蓄電池は静止型であり必要容量の蓄電池を自由に配置できるが，高サイクルの充放電回数に制約があるので，**図 3** に示す短周期および長周期成分の抑制に適している。また，蓄電池を高サイクル微小変動分の抑制に使用するためには，kWh 容量を大きくし放電深度を考慮する，または充放電制御量シフト方式の採用などにより，蓄電池長寿命化を図る必要がある。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO 技術開発機構）では，長周期変動抑制をも考慮した風力発電所出力平準化システムの実証試験を実施しており，蓄電池の種類として，レドックスフロー電池，ナトリウム・硫黄（NaS）電池および鉛電池が適用されているが，今後はニッケル水素蓄電池なども登場すると思われる。

また，化学反応を介さずイオン移動で電力を貯蔵する電気二重層キャパシタは，補機が不要であること，高効率であること，フル充放電サイクル寿命が長いことなどから今後の活用が期待されている。ただし単位体積あたりの蓄積エネルギー量の面からは，後述の超高速フライホイールと同様に，変動周期が早い微小変動成分の抑制に最適な機種である。

(2)　運動エネルギー（フライホイール）活用方式

フライホイール方式には，高速フライホイール方式と超高速フライホイール方式とがある。回転体の蓄積エネルギー量は回転速度の 2 乗に比例する。超高速フライホイールは，定格回転速度を高速フライホイールの 10 倍以上の 40,000 min^{-1} 程度とし，同一質量の回転体蓄積エネルギーを 100 倍以上に増加させた方式である。

この方式は，発電機の外形寸法を小さくできるとともに，即応性が高く，高効率でかつフル充放電回数にほぼ制約がないという特徴があるが，エネルギー蓄積量に制約があることから，微小変動分の抑制に最適である。

また，回転速度を検出することにより蓄積エネルギー量を正確に把握できるので，適切な制御方式を適用することにより，電力安定化装置の kWh 容量を低減することが可能である。

3. 5　風力発電所用電力安定化装置

ここでは電力安定化装置として電気エネルギー活用または運動エネルギー活用方式について述べる。電力安定化装置の構成例を**図 8** に，適用する蓄電装置の種類と特徴を**表 2** に示す。

この方式は，双方向インバータを使用しているので，入出力電流位相角の制御が可能である。したがって有効電力制御に加えて無効電力も同時に制御することが可能であるので，風力発電システムの電力系統連系に際して，もう一つの検討課題である電圧変動問題に関する対策装置の機能を兼ね備えている。

超高速フライホイール電力安定化装置の実動作結果の一

図 8　電力安定化装置の構成例

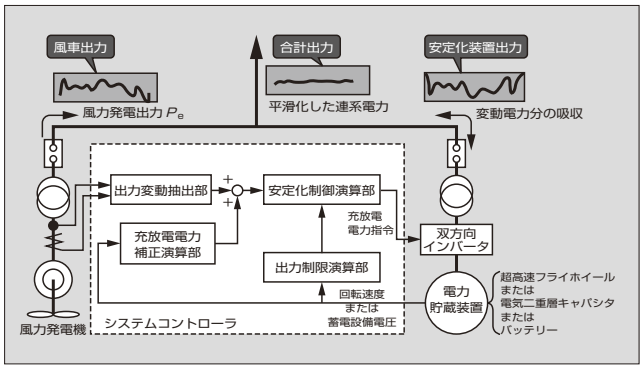


図 9　有効電力インディシャル応答特性例

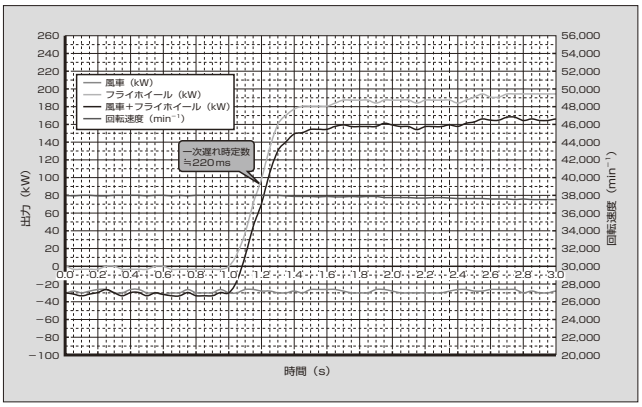


表 2　電力貯蔵装置の種類と特徴（2）

（出典：電気協同研究．vol.56, no.4, 2001.）

	超高速フライホイール（FFW-300S）		電気二重層キャパシタ（スーパーパワーキャパシタ）		二次電池（鉛，NaS，レドックスフロー）	
蓄電方法	○	運動エネルギー	◎	物理的なイオン移動（電気を電気で直接充放電）	○	化学反応
蓄電量の把握	◎	回転速度（2乗に比例）	◎	電圧（2乗に比例）	△	電圧（非線形：正確な把握困難）
最大電力	○	インバータ容量で決定（蓄電装置の直並列接続）	○	インバータ容量で決定（蓄電装置の直並列接続）	○	インバータ容量で決定（蓄電装置の直並列接続）
応答速度	○	100ms以下	◎	10ms以下	△	1,000ms以下
繰返し頻度（寿命）	◎	短周期繰返し可能（特性劣化なし）	○	短周期繰返し可能（若干の特性劣化あり）	×	短周期繰返し困難（特性劣化あり）
補機	△	フライホイール用コンバータ，真空ポンプ，チラー（冷却機）	○	冷却用ファン	△	鉛電池：なし 他電池：循環ポンプ，ヒータ，その他

図 10　有効電力変動抑制特性例

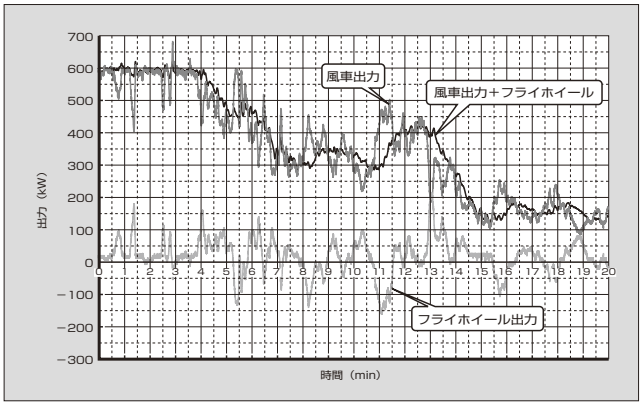
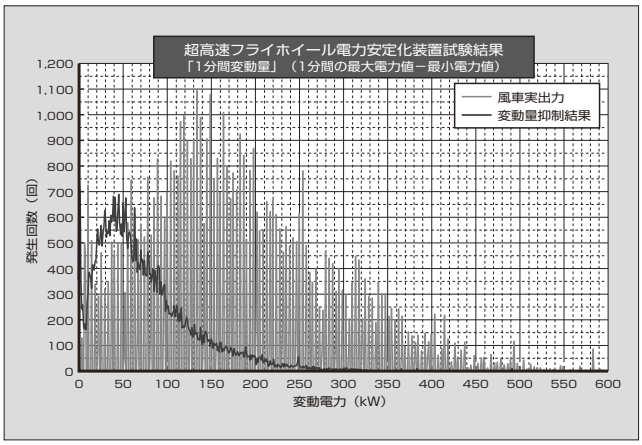


図 11　有効電力変動値と発生頻度例



部を以下に述べる。電力安定化装置に要求される応答速度，制御対象となる変動周期，必要最大電力および必要電力量などは，各種蓄電池や電気二重層キャパシタなどほかの電力貯蔵手段を用いた場合も同じである。

(1)　超高速フライホイール方式のインディシャル応答特性

超高速フライホイール方式の有効電力インディシャル応答特性例を**図 9** に示す。この電力安定化装置は，微小変動分の変動周期も制御対象としているので，応答速度は一次遅れ時定数換算で数百 ms 以下が望ましい。インディシャル応答試験結果では，有効電力変換器の遅れ時間を含めて，一次遅れ換算時定数は約 220 ms であり，無効電力制御回路の一次遅れ換算時定数は 38 ms であった。

(2)　超高速フライホイール方式の有効電力変動抑制特性

システムコントローラの制御定数設定値の最適設定化により，超高速フライホイールが吸収・放出するエネルギーの周波数領域（有効電力変動周期）を任意に変更できることを確認している。最大出力，貯蔵電力量などの関係から，微小変動分のみを抑制の対象とする場合は，電力安定化装置の応答領域を変動周期で 10 ～ 100 秒程度に設定することが望ましい。また，最大出力および貯蔵電力量を増加することにより短周期成分も変動抑制の対象とすることが可能であるので，この場合は電力安定化装置の応答領域を変動周期で 10 ～ 1,000 秒程度に設定することが望ましい。

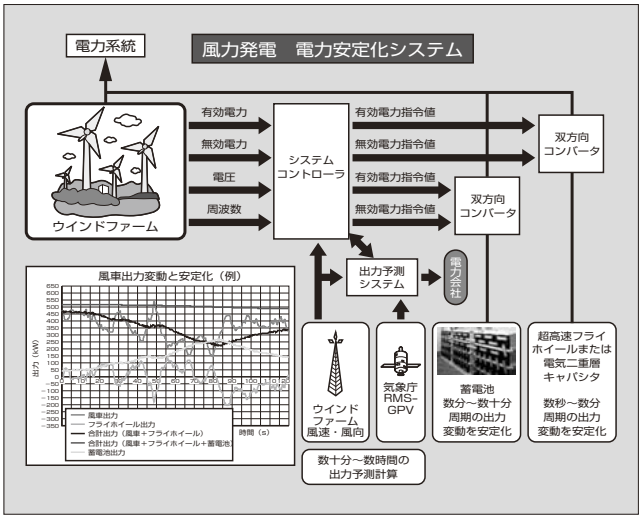
離島の微小変動分を抑制対象とした超高速フライホイール電力安定化装置の有効電力変動抑制特性例を**図10**に示す。風力発電機からの発電電力は数秒から数分周期で 100 kW から 300 kW の範囲で有効電力の変動が認められるが，超高速フライホイール電力安定化装置は，上記値を 100 kW 以下に低減していることが分かる。

この離島の発電設備は，合計容量 31,000 kW のディーゼル発電機であり，2000 年度における最大需要は 24,900 kW，夜間の最小需要は 8,500 kW，昼間の最小需要は 12,400 kW であった。この電力系統に 600 kW の風車 3 台を連系し，数分以内の有効電力変動量を規定値以下に抑制するとともに電圧変動値も規定値以内とすべく，有効電力抑制範囲 ± 0 ～ 200 kW，貯蔵電力量 ± 9,000 kWs，無効電力制御範囲 ± 0 ～ 200 kvar の超高速フライホイール電力安定化装置を採用した。

採用した超高速フライホイールは回転速度（エネルギー貯蔵量）を規定値以内に保ちつつ，有効電力変動量を規定値以下とすべく，制御定数の最適化を図っている。

1 分間における発電電力の変動値（最大値 – 最小値）とその発生頻度および電力安定化装置を併設したことによる変動抑制結果を**図11**に示す。電力安定化装置の効果により，100 kW 以上の変動発生頻度が大幅に低減されていることが分かる。

図 12　ハイブリッドシステムの構成例



3. 6　ハイブリッド電力安定化システム

3. 5 節で紹介した風力発電設備用超高速フライホイール電力安定化装置は，微小変動成分および短周期成分の電力変動を抑制する場合に適したシステムである。同様に電気二重層キャパシタ電力安定化装置も，この領域での電力変動抑制用として適用することが可能である。

さらに長周期成分をも対応するには，気象予測にも対応できる各種電力貯蔵装置からなるハイブリッド電力安定化システムが有効である。

なお，気象予測に関しては，すでに資源エネルギー庁および NEDO 技術開発機構により調査・研究が進められている。ハイブリッドシステムの構成例を**図12**に示す。

4　あとがき

風力発電は，地球温暖化などの環境問題対策に大いに寄与するが，電力品質を維持するための系統連系制約や建設・運用にかかわる関係機関の規制などにより，政府の導入目標値達成に対するハードルは高いものとなっている。このため「風力発電系統連系対策小委員会」では，2010年度までに300万kWを達成すべく，種々の対策方式を提示するとともに，対策の実施状況などの把握に努めており，必要に応じて，さらなる対策の立案・推進を行うことも明言している。

富士電機は，風力発電システムの性能・信頼性の向上に努力し，各風力発電事業者および電力会社へ安心と満足を提供するとともに，風力発電関連団体，委員会との連携協力により，着実な風力発電推進に対して積極的に取り組んでいく所存である。

また電力安定化装置に関しては，ライフサイクルコストダウンを図るために，用途に応じた適切な電力貯蔵装置の選択または組合せの研究，kW容量およびkWh容量を必要最低限とすべく各種制御方式の研究・開発・実証を継続して推進していく。

関係各位のさらなるご協力・ご指導をお願いする次第である。

参考文献

(1)　斉藤哲夫ほか．新エネルギーソリューション．富士時報．vol.75, no.11, 2002, p.615–620.

(2)　足利工業大学総合研究センター．第5回風力エネルギー利用総合セミナーテキスト．2004.

(3)　Wind Power Monthly. April, 2005.

(4)　電力品質に関する動向と将来展望．電気協同研究．vol.55, no.3, 2000.

(5)　分散型電源技術と電力系統の将来展望．電気協同研究．vol.56, no.4, 2001.

(6)　電力系統の電圧・無効電力制御．電気学会技術報告．no.743, 1999.

(7)　電力系統の標準モデル．電気学会技術報告．no.754, 1999.

(8)　斉藤哲夫．電力貯蔵技術風力発電システムへの適用．太陽エネルギー．vol.28, no.1, 2002.

(9)　風力発電電力系統安定化等調査（NEDO技術開発機構）．2000.

(10)　蓄電池併設風力発電導入可能性調査（NEDO技術開発機構）．2001.

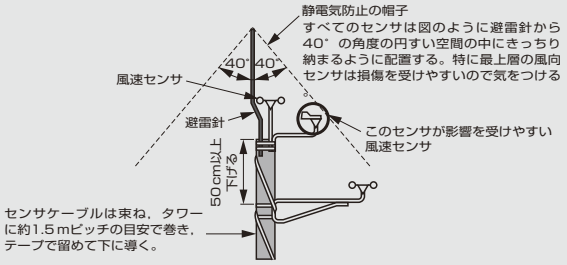
解　説　風況精査

風況とは，風の状態，性質のことを示す。広い意味では，風の状況を表すすべての特性（平均風速の状況，瞬間風速の状況，風向の出現率・状況，風速の出現率・状況，風の乱れなど）を評して風況と呼ぶが，狭い意味では，これらの特性のうち一つの量の状態を指して風況と呼ぶこともある。風力発電導入の検討は，良好な風況が期待される地域を風況データから抽出し，その地域の周辺環境条件の調査に基づき設置候補地点の選定を行わなければならない。その地点における詳細な風況を調査することを風況精査という。

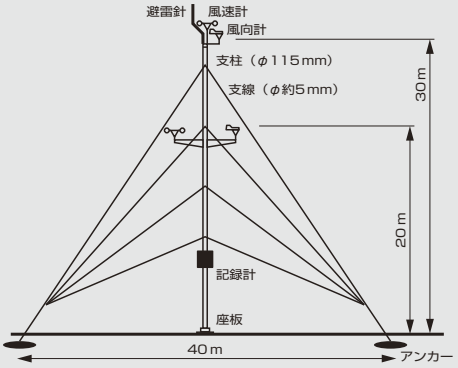
この測定を実施することにより，発電できる電力量および発電した電力を売電し，事業採算性を想定する。測定は1年間をかけて実施し，季節による変動を見込む。

測定にかかわる詳細は，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO技術開発機構）からマニュアルが発行されているのでそちらを参照いただきたい。

受風面積が40 m^{2}以下（直径約7 m以下）の小型風車の建設は，費用の面から実施されないことが多い。また，風車の性能確認には，JIS C 1400–12（IEC 61400–12）による計測方法が必要となる。



(a) 測定部詳細



(b) 風況測定ポール全景

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。