自然エネルギーの発電出力安定化技術

特集

仁井　真介（にい　しんすけ）　　神通川　亨（じんつうがわ　とおる）

1　まえがき

2005年3月に総合資源エネルギー調査会需給部会において，「2030年のエネルギー需給展望」が答申されている。この中で，2010年度における新エネルギー導入量として，太陽光発電482万kW，風力発電300万kWなどの目標値が設定されている。これを受けて，近年，太陽光，風力などの自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への連系が増加している。しかし，自然エネルギーを利用した分散型電源は，風速などの自然条件に応じて時々刻々と出力が変動するため，系統の周波数や電圧の変動を生じさせ，問題となる場合がある。

そこで，二次電池やフライホイールなどの電力貯蔵装置を用いて充放電を行うことにより，自然エネルギーを利用した分散型電源の出力変動を補償する出力安定化装置が開発されている。また，自然エネルギー発電を含む複数の分散型電源と電力貯蔵設備，ならびに不特定の負荷を接続して，マイクログリッドを構成することで，自然エネルギー発電の変動を平滑化する手法が研究されている。

本稿では，自然エネルギーの発電出力を安定化させる技術の概要を紹介する。

2　安定化の手段

2.1　自然エネルギー発電の問題点

電力系統においては発電電力と消費電力とのバランスが崩れると周波数変動が生じる。そのため，電力会社では，負荷の変動周期に応じた各種周波数制御によって，時々刻々変化する消費電力と発電電力を常にバランスさせるように発電機の出力増減の調整を実施している。数分以下の微小変動に対しては，発電機の回転数をガバナフリーで制御することにより瞬時に対応する。数分から数十分までの短周期変動に対しては，給電システムのLFC（負荷周波数制御）で発電機出力を制御することで対応する。LFCはガバナフリー制御と比較すると応答速度はやや遅いが，対応できる変動幅は大きくなる。数十分以上の長周期の変動に対してはEDC（経済負荷配分制御）で発電機の経済性を考慮した負荷配分を行っており，対応できる変動幅はさらに大きくなるが，応答速度は遅いという特徴がある。

一方，風力や太陽光など自然エネルギーを利用した分散型電源の電力系統への連系が近年増加している。これらの分散型電源は，風速，日射などの自然条件に応じて時々刻々と出力が変動するため，系統全体の周波数を変動させる要因となる可能性がある。例えば，風力発電設備においては，風速がカットアウト風速を超えた場合，風車保護のため回転を止め，これによって風力発電機の出力が最大出力からゼロ出力に大きく変化する場合がある。このような過大かつ急激な電力変動が発生した場合，EDCでの制御は困難であり（EDCは対応できる変動幅は大きいが応答速度は遅いため，ゆっくりとした変動にしか対応できない），EDCで対応できない電力変動はLFCおよびガバナフリーで対応することになる。しかし，LFCおよびガバナフリーは周波数調整容量が少ないため，変動量によっては，周波数を系統運用目標値内に保つことが困難となる可能性が懸念される。

これに対し，自然エネルギー発電による発生電力を電力貯蔵装置からの充放電電力と合成して平滑化し，自然エネルギー発電を連系しても系統周波数への影響を小さくできる出力安定化装置が開発されている。

2.2　出力安定化装置の原理

変動する発電出力を安定化させるためには，変動分と逆位相の電力を連系点に注入し，電力を合成する。すなわち，変動電源の発電出力が増加した場合には，電力貯蔵装置の放電電力を減少または充電電力を増大させる。一方，変動電源の発電出力が減少した場合には，電力貯蔵装置の充電電力を減少または放電電力を増大させる。これにより，変動電源と電力貯蔵装置の連系点の電力変動が補償され，平滑化された出力が得られる。**図1**に構成を示す。

この補償を行うために，一般には発電機の変動に応じた電力を出力できる電力貯蔵装置が用いられる。電力貯蔵装置は，電力貯蔵要素（二次電池，フライホイール，電気二

仁井　真介

分散型エネルギーシステムのエンジニアリング業務に従事。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エネルギーシステム部担当部長。電気学会会員。

神通川　亨

電力システムのシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部技術開発統括室。電気学会会員。

図 1　出力安定化装置の原理図

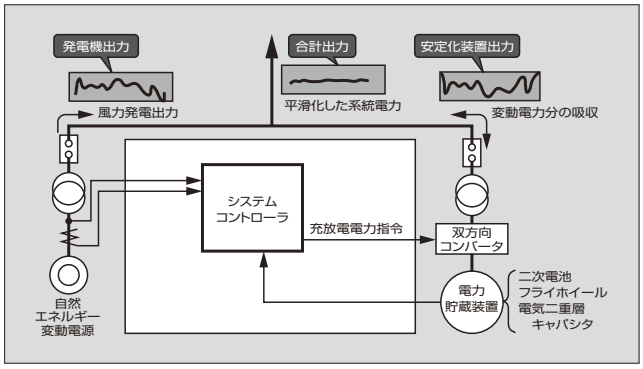
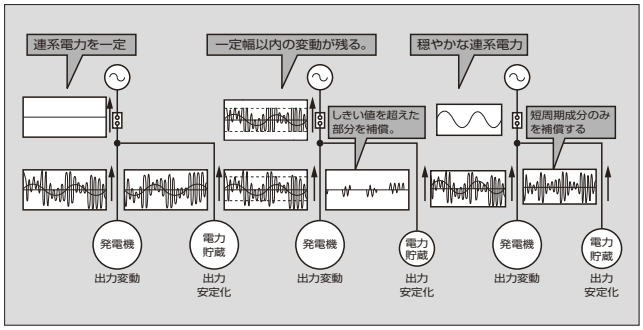


図 2　補償方法と電力貯蔵容量



重層キャパシタなど）と系統連系用の電力変換装置で構成される。変動分の補償は，系統連系点での変動をできるだけ小さくする目的で行われる。

電力安定化方式の一つにフラット運転がある。この場合，（風力）発電事業者は各時間帯の発電電力目標値を電力会社に事前通告する。フラット運転では連系点電力が事前通告した発電電力目標値を保つように電力の補償を行う。しかし連系点電力が一定となるよう，風力発電出力の変動を補償するためには電力貯蔵装置の容量を大きくしなければならない。

一方，変動量の大きい時間帯のみを補償する方式も考えられる。この場合，あるしきい値を超えた電力変動に対してのみ補償を行えばよいため，電力貯蔵容量は小さくて済む。例えば，LFC の周波数調整容量に影響するような過大な電力変動に対してのみ補償を行うといったことが可能である。しかし，しきい値以下の電力変動は残ってしまう。

基本的に電力貯蔵量と発電電力の電力品質はトレードオフの関係にあり，補償量が大きいほど電力品質はよくなり，補償量が小さいと品質の改善は小さい。できるだけ電力貯蔵容量を小さくしつつ，系統への影響を小さくする方法として平滑化運転がある。これは変動分の中の短周期成分のみを抽出して補償する方法であり，連系点には大きく緩やかに変化する変動分（長周期成分）だけが残る。なお，緩やかであれば比較的大きな変動にも EDC あるいは LFC で対応可能であり，電力品質が問題となることはない。またフラット運転と比べ，少ない電力貯蔵装置の容量で系統への影響を最小限にできる。

表 1　各種エネルギー貯蔵方式の比較

	二次電池	キャパシタ	フライホイール
種　類	鉛・NAS・NiH など	電気二重層 電解コンデンサ	フライホイール
基本構成	蓄電池直列接続	キャパシタ直列接続	はずみ車＋発電機
放電時間 電圧変動 温度特性	1分～1時間程度 中 低温で特性低下	0.3～1秒程度 大 特性変化少ない	1～10秒程度 小 特性変化少ない
回復時間	10時間	1～数分	数分
寿　命	5～7年（25℃）	10年（40℃）	15～20年
設置場所の規制	火災予防条例	一般電気室	一般電気室
環 境 性	○水素ガスの発生あり ○鉛など廃棄処理が必要	○有害ガスの発生なし ○一般廃棄物	○有害ガスの発生なし ○一般廃棄物
騒　音	－	－	70～75 dB
信 頼 性	◎	◎	△（実績少）
蓄電量の把握	電圧（非線形：正確な把握困難）	電圧（2乗に比例）	回転数（2乗に比例）
繰返し頻度(寿命)	短周期繰返し困難（特性劣化あり）	短周期繰返し可能（特性劣化あり）	短周期繰返し可能（特性劣化なし）

出典：電気協同研究．vol.56, no.4, 2000.

図 2 に補償方法と電力貯蔵容量の関係を示す。貯蔵容量の大小は円の大きさで示している。また以降は，平滑化運転方式を行う場合の電力安定化装置について述べる。

2. 3　電力貯蔵装置

電力貯蔵装置は，一般に二次電池，フライホイール，電気二重層キャパシタなどのエネルギー蓄積装置と系統連系用変換装置で構成される。

主要なエネルギー貯蔵方式の比較を**表 1** に示す。二次電池および電気二重層キャパシタは電気エネルギーを蓄積し，フライホイールは機械の回転エネルギーを蓄積する。

二次電池は，高サイクル充放電に制約があるため放電深度の考慮などによる長寿命化対策を行う必要があるが，短周期（数秒から数分まで）および長周期（数分から数時間まで）の変動抑制に適している。

電気二重層キャパシタは，補機が不要で短周期繰返しが可能であるという特徴を有する。ただし，エネルギー密度が低いため大容量化が困難であるので，微小変動分（数秒以下）の抑制に適している。

フライホイールには，高速フライホイールと超高速フライホイールがある。フライホイールは，回転数の 2 乗に比例する回転エネルギーを蓄積する。このため，回転数が高いほど小型化でき，超高速フライホイールでは数万回転/分の回転数で運転される。フライホイールは充放電サイクルによる制約がほとんどないが，エネルギー蓄積量に制約があるため微小変動分の抑制に適する。

系統連系用変換装置は，システムコントローラからの指令を受けて双方向コンバータによりエネルギー蓄積装置の充放電を行う。キャパシタなどの直流電圧の変動範囲が大

きいエネルギー蓄積装置では，直流電圧が低下した場合でも定格出力を確保するために，大きな電流を流す必要がある。このため，定格容量の大きなコンバータを選定する必要がある。したがって，エネルギー蓄積装置の種類によってはチョッパを挿入して直流電圧を制御し，直流電圧を一定にするほうが経済的に有利となる場合があり，検討を要する。

電力安定化装置では充放電を随時行うため，エネルギー蓄積装置のエネルギー残量を監視・制御する必要がある。すなわち，常時充放電を可能とするためには，蓄積されるエネルギー量を半分程度に制御し，充電方向へも放電方向へも動作が可能な状態にする必要がある。そのために，蓄積エネルギーの残量管理が必要となる。

電気二重層キャパシタの残存エネルギーは，電圧の２乗に比例するので，電圧の計測によりほぼ正確に残量を把握できる。また，フライホイールは回転数の２乗に比例するので，回転数の検出によりほぼ正確に把握できる。一方，蓄電池は電圧と残存エネルギーの関係が非線形であり，使用条件により変化するため正確な把握が困難である。したがって，いったん満充電か放電終止の状態を作り，その後の電流値の累積で残量を推定するか，残量を管理する電圧値に幅を持たせ，余裕ある運用をするなどの工夫を凝らしている。

図３　風力発電安定化装置制御ブロックの例

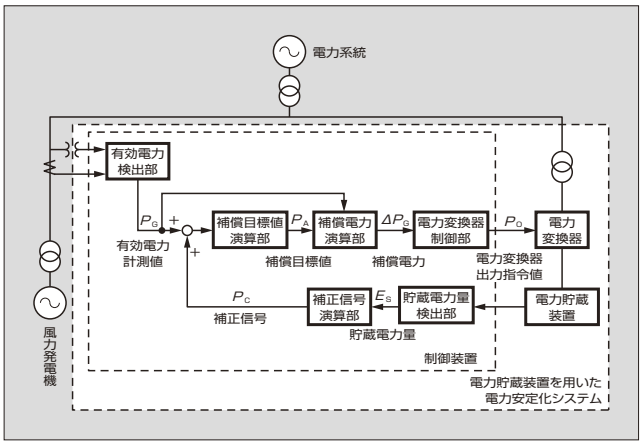
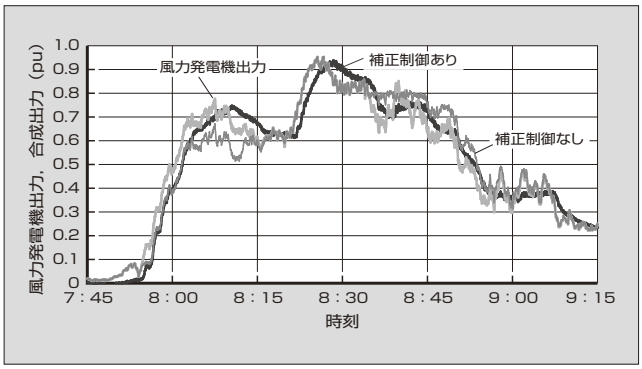


図４　各種補正制御の有無による補償結果の比較



3　各種安定化技術

3.1　風力発電安定化装置

二次電池やフライホイールなどの電力貯蔵装置を用いて，充放電を行うことにより，出力変動，負荷変動，潮流変動などの電力変動分を補償することが可能であるが，ここでは風力発電機の出力安定化を目的としたシステムを採り上げる。エネルギー蓄積装置の容量は有限であり，なおかつ運転許容範囲が存在する。このため，運転許容範囲を逸脱すると，例えば二次電池では過充電・過放電による電池寿命の低下，フライホイールでは回転数オーバーによる装置の停止や回転数不足による運転の不安定化につながる。また，電力貯蔵量が上限あるいは下限に達するとそれ以上の電力補償ができなくなる。このため，風力発電の出力変動を安定化するための充放電制御のほかに，適切な電力貯蔵量を確保するために各種補正制御が行われる。**図３**に制御ブロックの例を示す。**図３**では補正制御の例として，電力貯蔵量に応じて補正信号を加算する手法を示す（補正信号を加算し，充放電電力を充電方向，あるいは放電方向にシフトすることで適切な電力貯蔵量を確保する）。そのほかにも電力変動量に応じて補償目標値演算部の平滑化フィルタ時定数を可変制御する手法などがある（平滑化フィルタ時定数を連続的に変化させ，補償周波数帯域を調整することで適切な電力貯蔵量を確保する）。

補正制御なしの場合，風車の立上り時，大きな補償を行い電力貯蔵量が上限に達してしまうために，以後の補償ができなくなるなどの不具合が発生する。これに対し，各種補正制御ありの場合は，電力貯蔵量が上下限値に達しないように制御を行うことで，補償動作を継続できる。**図４**に，各種補正制御の有無による補償結果の違いを，シミュレーション結果により示す。図中，補正制御なしの場合は，風車立上り時にエネルギー蓄積装置の補償容量を使い切っているために，立上り後（8：03 以降）平滑化ができていない。一方，補正制御ありの場合は立上り中に補償量を制御

図５　ハイブリッド安定化システム

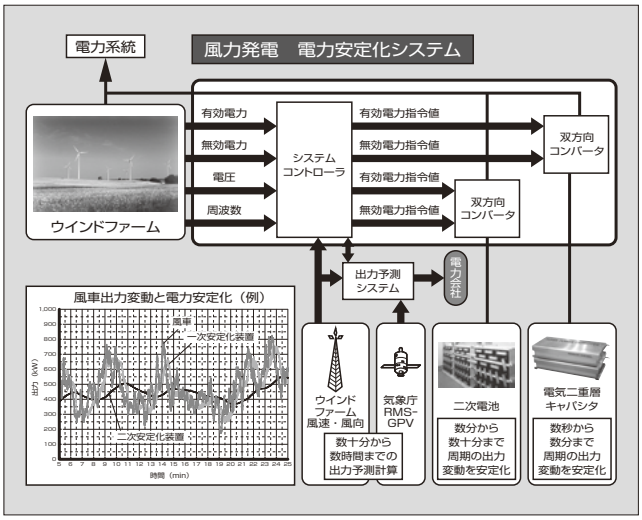
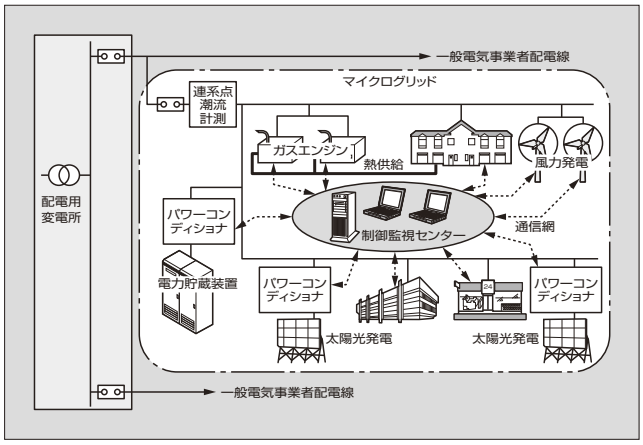


図6　マイクログリッド概念図



し補償容量を残しているため，立上り後も平滑化を持続している。

3.2　ハイブリッド出力安定化装置

数秒から数分までの補償は，主としてLFCに対する対策となるが，系統への連系条件として，EDCの制御領域である長時間の変動に対する補償が必要な場合がある。短時間の変動と長時間の変動を補償する方式として，**図5**に示すようなハイブリッド方式が用いられる。これは，数秒から数分までの短周期成分は，電気二重層キャパシタあるいはフライホイールなどにより補償し，数分から数時間までの長周期成分は鉛蓄電池やNi-H電池などで補償する。長周期補償に関しては，将来気象情報を考慮したシステムとすることで，電池容量のさらなる適正化が期待できる。

3.3　マイクログリッド

マイクログリッドは**図6**に示すように，一般に分散型電源と負荷および電力貯蔵装置を接続した小さい系統であり，ITにより発電機，負荷の情報をリアルタイムで計測し，グリッド全体を高速に制御する。分散型電源には自然エネルギー発電が含まれるが，グリッド全体の需給調整を行うことにより，自然エネルギーの変動分を吸収して，系統連系点での潮流を安定化させることが可能である。

マイクログリッドでは，グリッド内の発電量と負荷量を短時間間隔で調整して需給バランスをとる制御（同時同量制御）が行われる。自然エネルギー発電変動分の中の長周期成分と負荷変動分は，主としてガスエンジンなどの出力制御可能な電源で補償し，自然エネルギー発電変動分の中の短周期成分や負荷の急変分は電力貯蔵装置で補償する。これにより，連系点電力を零あるいは一定にすることを可能としている。

4　あとがき

自然エネルギー発電は，地球温暖化防止対策として期待されている反面，電力系統にとっては不安定で扱いにくい電源である。その欠点を補う手段として，出力安定化装置やマイクログリッドが有効であり，本稿では，それらの電力安定化技術について述べた。地球温暖化問題への対応は，国家レベルの施策として展開されているが，自然エネルギー導入促進による2010年度導入目標の達成は，重要な課題となっている。

富士電機では，発電出力安定化技術により自然エネルギーの導入が促進されることを期待しており，発電出力安定化の核となる出力安定化装置について，現在，電池メーカーなどと共同で実証研究を推進中である。

今後とも出力安定化技術の開発を推進し，自然エネルギーの導入促進に寄与していく所存である。

参考文献

(1)　矢後賢次，腰一昭．風力発電の系統連系システム．富士時報．vol.78, no.6, 2005, p.439-445.
(2)　伊原木永二朗ほか．分散型エネルギーシステムを支える技術．富士時報．vol.78, no.6, 2005, p.423-430.
(3)　高野富裕．自然エネルギー発電と電力貯蔵技術．電気学会論文誌B．vol.126, no.9, 2006.
(4)　総合資源エネルギー調査会需給部会．2030年のエネルギー需給展望．2005-3.

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。