自然エネルギー導入のための系統解析技術

藤原修平*
黒田憲一*
小島康弘**

Power System Analysis for Renewable Energy

Shuhei Fujiwara, Kenichi Kuroda, Yasuhiro Kojima

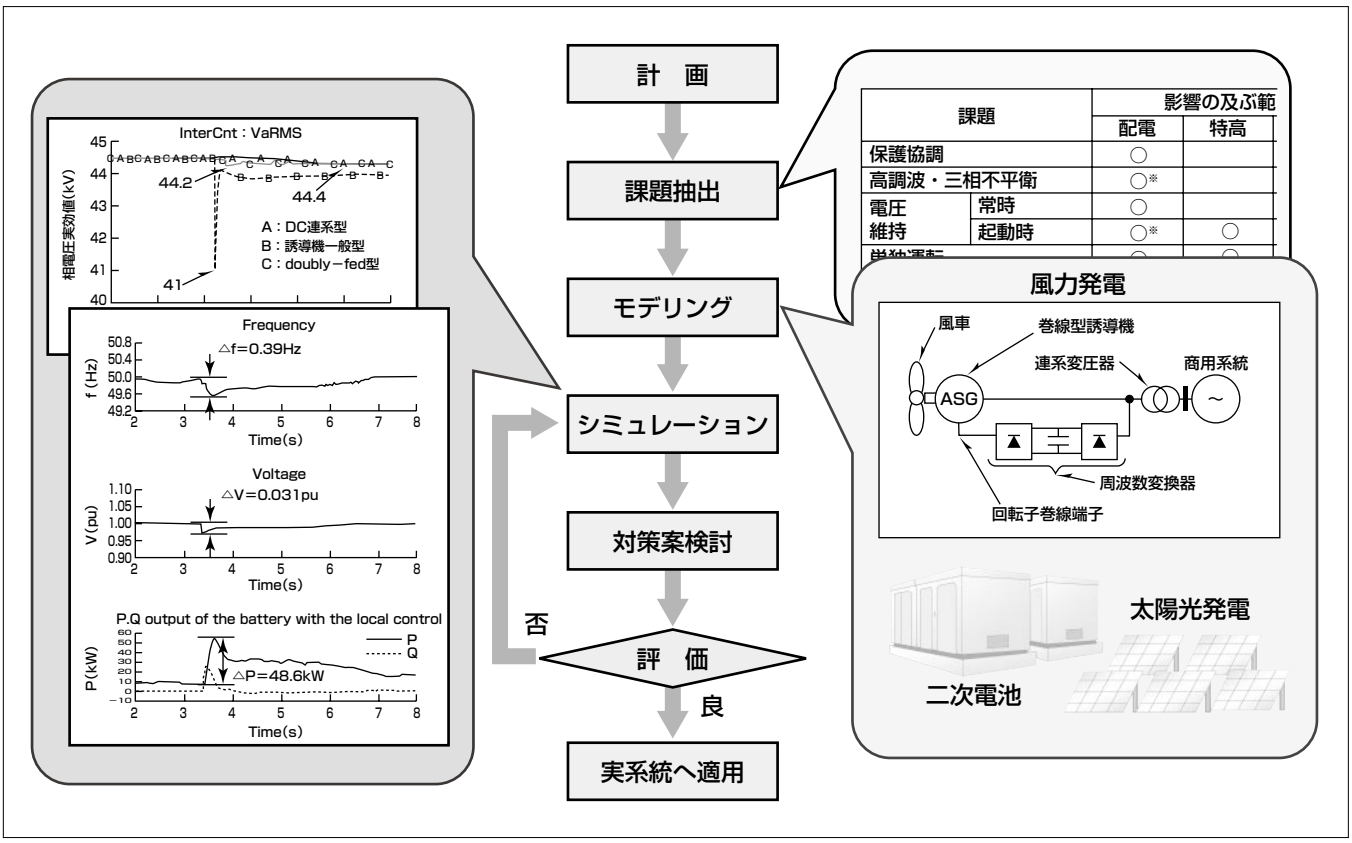
要　旨

近年，地球温暖化の原因と言われているCO_2を削減する方策の一つとして，風力や太陽光などの自然エネルギーによる発電設備の導入が積極的に進められている。しかし自然エネルギーを利用した発電設備はその出力が気象条件に大きく影響を受け，また立地が遠隔地である場合も少なくないため，系統に与える影響が大きくなる傾向にある。そのため系統に大量に導入する際には，電圧維持・高調波など局所的な電力品質に対する課題や，全系周波数の維持といった系統全体の安定運用に関する課題など，多くの課題を解決していく必要がある。

これらの課題を検討する際には，自然エネルギーによる発電設備が系統に与える影響や，対策を講じた場合の効果を事前に把握することが重要となる。そこで本稿では，これらの検討をする際に必要となる系統解析技術として，モデリングと解析例について述べる。

まず自然エネルギーを利用した発電設備が連系したときの系統課題について述べたあと，それらの課題を検討した系統解析技術の実例として風力発電システム（中部電力㈱との共同研究）と八戸市マイクログリッドプロジェクト（NEDO（（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構）からの委託事業）について述べる。

風力発電システムについては，シミュレーションモデルの用途，構成要素，計算時間の高速化，局所的な電力品質の計算例として起動時の電圧低下について述べる。また八戸マイクログリッドについては，自然エネルギーを利用した電源からなるマイクログリッド系統における，周波数問題，電圧問題，不平衡問題，高調波問題に対する検討事例及び実証試験結果について述べる。



自然エネルギー導入時の系統解析手順の例

自然エネルギーによる発電設備を導入する際には，系統に与える影響や対策を講じた場合の効果を事前に評価するため，対象機器のモデリング，シミュレーションといった系統解析技術が重要となる。

*系統変電システム製作所　**先端技術総合研究所（工博）

1. まえがき

本稿では風力，太陽光などの自然エネルギーによる発電を導入する場合の課題・対策を示し，その評価，計画のための解析技術を，実績とともに述べる。

2. 自然エネルギー発電導入時の系統課題と対策

表1に，自然エネルギーを利用した発電が連系したときの系統課題を示す。配電系統では，電圧維持・高調波など局所的な電力品質が課題となり，系統全体では，全系周波数の維持など安定運用が課題となってくる。これらの課題に対処するにはSVC(Static Var Compensator)等の電圧安定化装置の導入，AFC(Automatic Frequency Control)容量の増大，事故時運転継続などが挙げられる。対策を検討する際には，系統に与える影響をシミュレーションによって把握することも重要となる。**3章**では，これらの課題をシミュレーション検討する際のモデリングと解析例について述べる。

3. 風力発電システムの解析技術

3.1 風力発電システムの解析モデル

三菱電機は中部電力㈱と共同で瞬時値ベースのシミュレーションモデルをEMTP-RV(Electro Magnetic Transients Program-Restructured Version)上で開発している[1]。風力発電のタイプとして3種類の風力発電(誘導機直接接続型，doubly-fed型，DC連系型)を対象とし，風車，発電機，変換器，制御系などを詳細に模擬し，またモデルの高速化によって長時間の風速変動による系統への影響解析にも対応している[2]。開発した解析モデルは，回転数上下限，ピッチ角，出力停止の制御を反映しパラメータ調整を実施することで，実機に近い結果を得られるようにした。現在構築したモデルの妥当性を評価中である。この開発によって主要な方式の風力発電システムがモデル化され，シミュレーションの際には各方式の導入比率に合った解析が可能となっている。

図1，**図2**に例としてdoubly-fed型の概念と解析モデルを示す。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)で構成された周波数変換器から巻線型誘導機の回転子に加える励磁電圧・周波数を変化させる。回転数によらず一定の有効・無効電力の入出力が可能であるため，起動時などの電圧変動を抑制できる特長がある。

表1．自然エネルギー発電導入時の系統課題

課題		影響の及ぶ範囲		
		配電	特高	全体
保護協調		○		
高調波・三相不平衡		○*		
電圧維持	常時	○		
	起動時	○*	○	
単独運転		○	○	
短絡容量			○	
過渡安定度			○	
全系周波数維持・供給力				○*

＊　本稿で言及する系統課題

3.2 解析例

超高圧系統に接続した風力発電システムの，起動時の電圧変動解析を実施した例を**図3**に示す。図に示すように，誘導機直接接続型の電圧変動が大きく出ており，系統に与える評価を各方式に応じて定量的に評価することが可能となっている。

4. 八戸市マイクログリッドにおける系統解析技術

4.1 八戸市マイクログリッドプロジェクトの概要

NEDOからの委託事業“新エネルギー等地域集中実証研究”における“八戸市水の流れを電気で返すプロジェクト”として，複数の発電設備と需要家から構成され，その内部で需給制御を行うマイクログリッドを構築し，2005年10月から2007年度末まで実証試験を行った。八戸マイクログリッドの構成を**図4**に示す[3]。

このマイクログリッドは，太陽光発電130kW，風力発

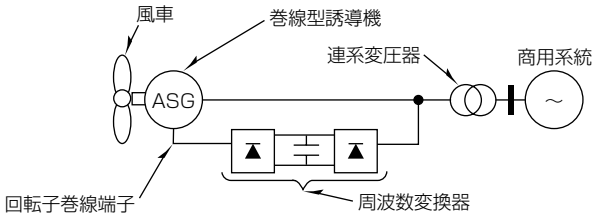


図1．doubly-fed型の概念図

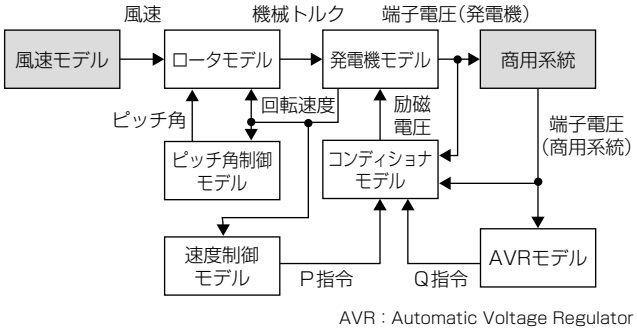


図2．doubly-fed型の解析モデル

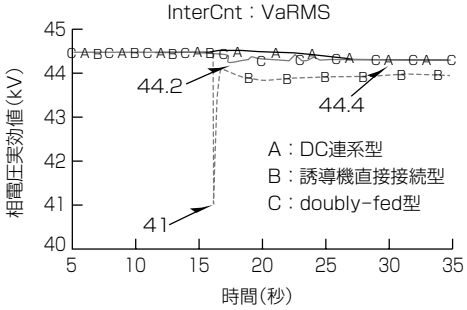


図3．系統連系時の電圧変動解析例

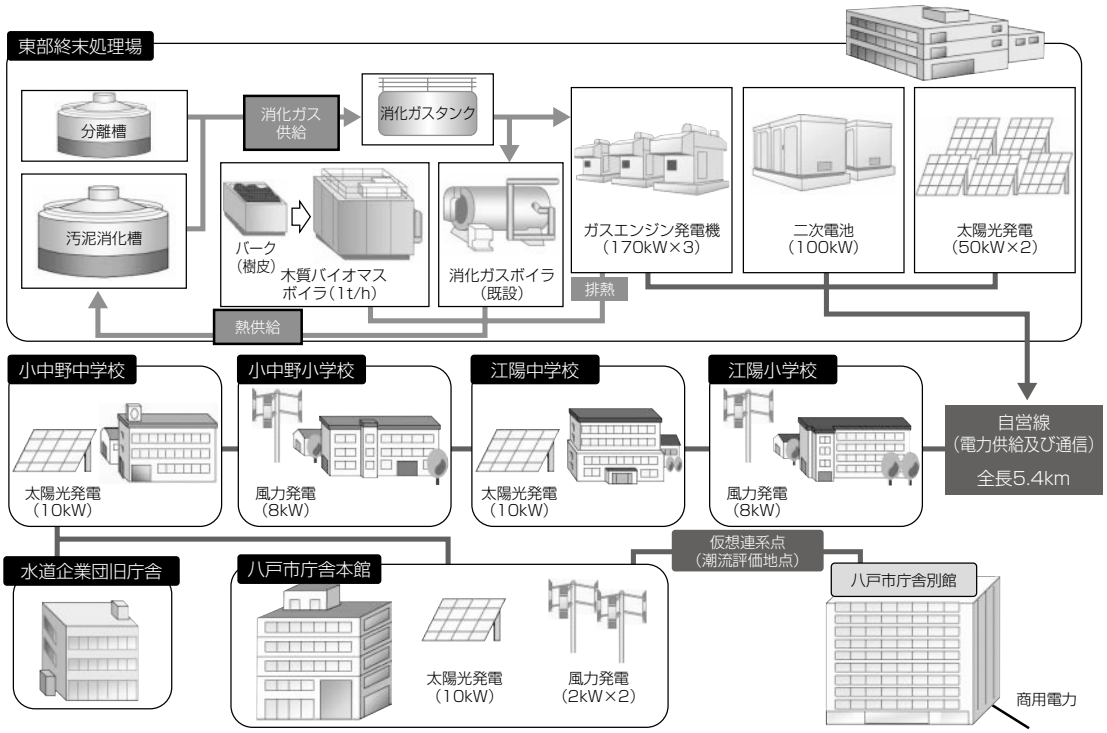


図4．八戸マイクログリッドの構成

電20kWを導入し，制御可能な再生可能電源としてバイオガスエンジン170kW×3台を組み合わせ，6か所の需要家に対して自営線を用いて電力供給を行うものである。マイクログリッドは市庁舎本館で商用系統と一点連系しており，自営線を用いた自立運転が可能である。

自然エネルギーの出力や需要の変動による需給アンバランスは，商用系統との連系時は連系点潮流変動となる。一方，商用系統から切り離した自立運転では，系統容量が小さくなることによる課題とともに，**表1**の分散電源課題がより如実に現れるため，周波数問題，電圧問題，不平衡問題，高調波問題など各種事象に対して，系統解析によって事前に影響を評価し，対策を検討しておくことが重要である。次に検討例について述べる。

4.2　周波数問題

再生可能電源のみからなるマイクログリッドで，商用系統に準じた電力品質を維持する場合，商用系統への連系運転での技術課題に加え，負荷への高速追従という新たな課題が発生する。系統解析によって空調機起動時の周波数低下は1.5Hzに達すると予測された。このためこのプロジェクトでは，当初計画していた需給制御システムにミリ秒単位で周波数制御が可能なローカル制御を追加し，経済性・環境性最適運転と電力品質の維持を両立した4階層の需給システムを構築した[3]。特に，瞬間的な負荷変動に対しては，リアルタイムシミュレータ等を用いた事前検討によってローカル制御機能の制御ブロック検討，パラメータ調整を行い，高速追従性を実現した[4]。

このマイクログリッドの電力品質に対して最も厳しい負荷は，市庁舎の空調機用ファン（誘導機37kW）であるが，

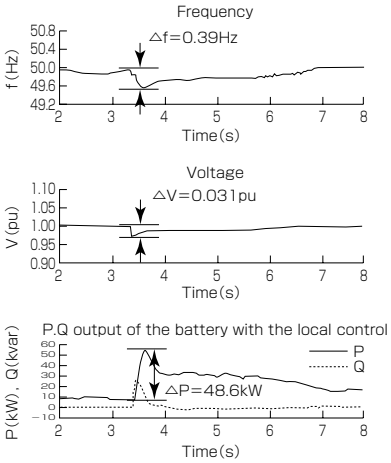


図5．空調機起動時の周波数及び電圧

その起動時の実測波形を**図5**に示す。空調機起動によってマイクログリッド系統の周波数及び電圧は急激に低下しているが，先に述べたローカル制御によって二次電池が高速に有効・無効電力を出力し，周波数及び電圧の低下が抑制されている。

4.3　不平衡問題

今回検討したマイクログリッドは，一定地域を対象とした小規模系統であるため，負荷電流の不平衡（三相アンバランス）が生じやすく，負荷不平衡が生じると系統内に逆相電流が発生する。商用系統への連系運転では逆相電流の多くは商用系統へ流出し，広い商用系統内で他の逆相電流と相殺するため，マイクログリッド内の発電設備への負担は小さい。しかしながら，同期発電機を主電源とした自立運転では，逆相電流はすべて発電機負担となり，その耐量を超えた場合は保護リレー動作によって発電機が停止し，

全停へとつながるおそれがある。

八戸マイクログリッドでは，**図4**のガスエンジン発電機が主電源であり，低負荷時には1台運転となる。使用したガスエンジン発電機1台あたりの許容逆相電流は2.8Aであったが，マイクログリッド内では最大9A以上の逆相電流が発生していた。そこで，マイクログリッド内の単相負荷の消費電力を数日間計測し，逆相電流が最小となる組合せを算出し，実証試験システムの負荷接続相を変更した。接続相変更前後の各日逆相電流最大値を**図6**に示す。接続相変更を行った7月15日以降の逆相電流最大値は，期間中最大で5A程度となっており，負荷接続相変更による逆相電流低減効果が確認できる。しかしながら，ガスエンジン発電機の許容逆相電流値を依然超過しており，更なる対策を行った。

一般に，逆相電流補償装置としては，アクティブフィルタなどの専用のパワエレ機器が用いられるが，この実証試験システムでは，三相出力太陽光発電用電力変換装置（PVパワーコンディショナ，以下“PVPC”という。）定格50kVAを有効活用し，逆相電流補償機能を開発することで，ガスエンジン発電機に流れる逆相電流を低減した。これらの逆相電流対策を行ったあと，約8日間の自立運転を行った。自立運転期間中の発電機逆相電流合計値の実測結果を**図7**に示す。先に述べた対策を行うことによって，自立運転期間中の発電機逆相電流を1A程度以下に抑制でき，発電機逆相電流大量（2.8A/台）の範囲内に収めることができた。

4.4　高調波問題

マイクログリッド内の負荷には様々な高調波発生負荷があり，自立運転時には商用系統への連系運転時とは系統インピーダンスが大きく異なるため，過大な電圧歪（ひずみ）が発生するおそれがある。そこで，マイクログリッド内の高調波発生負荷のタイプ，容量，数量などを調査し，シミュレーションによって自立運転時の電圧歪率を算出した。その結果，比較的単相の高調波発生負荷が多く，また自立運転時にはマイクログリッド内の変圧器などのインダクタンス成分と，力率改善コンデンサなどのキャパシタンス成分のLC共振周波数が3次（150Hz）付近となっているため，3次電圧歪が増加する可能性が高いことが明らかになった。ただし，高調波ガイドライン[5]で定められた総合電圧歪率5%以下に収まり，新たな対策は必要ないとの見通しを得た。自立運転試験前及び試験中の電圧歪率実測結果を**図8**に示す。自立運転試験中の各次電圧歪率はいずれも2%以下であり，高調波ガイドラインを満たしている。また，シミュレーション検討のとおり，自立運転を開始した11月3日午後の時点で，3次電圧歪が増加し，5次，7次電圧歪が減少している。昼間より夜間に電圧歪が大きくなっているが，負荷の多い昼間には抵抗負荷がLC共振回路のダンピングとして作用し，共振のピークが低くなるためである。さらに，今回のマイクログリッド系統の場合，夜間に蛍光灯や市庁舎外灯などの高調波発生負荷の割合が大きくなることも，夜間の電圧歪が増大する一因であると考えられる。

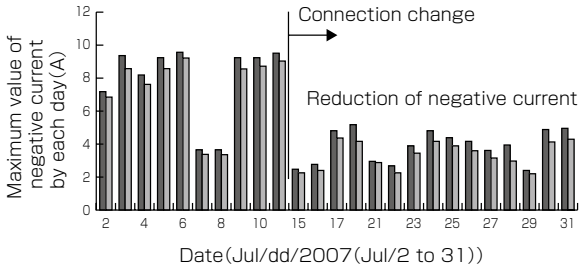


図6．負荷接続相変更前後の逆相電流

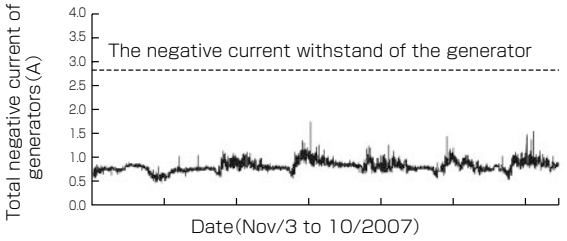


図7．自立運転時の発電機逆相電流合計値

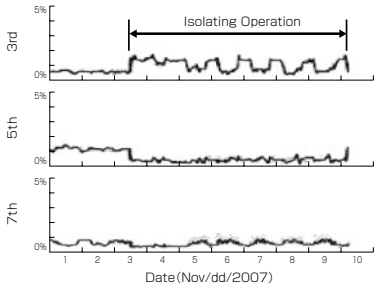


図8．自立運転試験前後の各次電圧歪率

5. む　す　び

自然エネルギー発電導入時の系統課題と対策について述べるとともに，系統解析技術の例として風力発電システムと八戸市マイクログリッドについて述べた。

参 考 文 献

(1) 山田富士宏，ほか：Development of Doubly-fed Wind Energy System Model for DG embedded Power System Studies，PCC Nagoya（2007）
(2) 山田富士宏，ほか：風力発電機のシミュレーションモデルの高速化，平成21年電気学会全国大会（2009）
(3) 高野富裕，ほか：八戸市マイクログリッドにおける自立運転の実証，電気学会論文誌B，**129**，No.4，499～506（2009）
(4) 天満耕司，ほか：マイクログリッド自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発，電気学会論文誌B，**126**，No.10，1032～1038（2006）
(5) 高調波抑制対策技術指針JEAG9702-1995