

中国のスマートグリッド市場における 地域自立・環境調和型電力システムの制御技術

Control Technologies for Regionally Independent and Environmentally Conscious Electricity Supply Systems in Chinese Smart Grid Market

関 勇 魯 宗相 林 秀樹 小林 武則

■ MIN Yong ■ LU Zongxiang ■ HAYASHI Hideki ■ KOBAYASHI Takenori

地球温暖化の防止に向けて再生可能エネルギーの効果的な導入と利用拡大が課題となっており、その必要性はますます高まっている。その手段として、電力流通システム分野では、双方向の情報通信技術 (ICT) を活用したスマートグリッド技術が注目されている。なかでも、広大な国土と豊富な自然エネルギーを持つ中国では、地域自立を志向した環境調和型の電力供給を実現する“マイクログリッド”が重要な技術であると考えられる。

清華大学と東芝は、中国における市場性の高い典型モデルとして、都市型マイクログリッド及び大規模風力発電連系による遠隔地域型マイクログリッドの二つに着目し、それぞれの制御方式及びアルゴリズムを共同で開発した。現在、実フィールドでの検証試験でそれらの有効性の確認を進めている。

The effective introduction and utilization of renewable energy has become a serious issue for the reduction of greenhouse gas emissions. In the field of power transmission and distribution systems, smart grid technologies based on bidirectional information and communication technology (ICT) are a promising solution for the promotion of renewable energy utilization in power grids. In particular, regionally independent and environmentally conscious electricity supply systems, or so-called microgrid systems, will be a key technology for the smart grid in China.

Tsinghua University and Toshiba have developed control schemes and algorithms for two typical and marketable microgrid models in China: (1) photovoltaic (PV) microgrid systems in urban distribution systems, and (2) large-scale wind power integration into power grids. The effectiveness of these systems is now being evaluated in field demonstration tests.

1 まえがき

地球温暖化の防止に向けた再生可能エネルギーの導入と利用拡大は世界的に共通した課題であり、その必要性はますます高まってきている。再生可能エネルギーの中でも、特に太陽光や風力など自然エネルギーによる発電への期待が高いが、それらが大量に導入されると、電力供給の品質と信頼性の観点から、気象条件による発電出力の変動が問題となる。これらの不確実な自然エネルギーを安定的に利用する手段として、近年、双方向のICTを活用したスマートグリッド技術が注目されている。

スマートグリッドの構成や機能については定まった定義はなく、地域や目的に応じて様々な形態が検討されている。なかでも、限られた区域内で複数の分散型電源と蓄電池を組み合わせることで電力を供給する“マイクログリッド”は、自然エネルギー発電の出力変動を区域内で吸収することで大規模電力網（電力系統）への影響を軽減することができる。この地域自立・環境調和型の電力供給技術は、広大な国土と豊富な自然エネルギーを持つ中国においては、スマートグリッドの重要技術と考えられる。

清華大学と東芝は、中国におけるマイクログリッドの特徴について調査、分析し、市場性が高く有望な典型モデルとして、

“都市型マイクログリッド”と“大規模風力発電連系による遠隔地域型マイクログリッド”に着目した。それぞれの制御方式と制御アルゴリズムを共同で開発し、その成果の検証試験を2010年から順次、実フィールドで開始している。ここでは、それらの概要を述べる。

2 中国におけるマイクログリッドの状況

2.1 マイクログリッドの特徴

中国のマイクログリッドは、その特徴により、以下の2種類に大別される(表1)。

- (1) 都市型マイクログリッド 住宅団地や、ホテル、病院、商店、オフィスビルなどが対象になる。このタイプのマイクログリッドは、電力需要家に安定で高品質な電力を供給することが主な目的で、容量が数百kW～10MW、電圧が10kVの中電圧配電網に接続される。北京や、上海、広東省などのような経済の発達している都市で先行して展開し、実現形態としてビルと一体の屋上太陽光発電施設によるマイクログリッドを目指している。
- (2) 遠隔地域型マイクログリッド 農村型マイクログリッドと企業型マイクログリッドという二つのタイプがあり、大規模電力網と連系する場合、基本的に電力授受は少ない

表1. 中国マイクログリッドの特徴
Features of microgrid systems in China

マイクログリッドタイプ	都市型マイクログリッド	遠隔地域型マイクログリッド	
		農村型マイクログリッド	企業型マイクログリッド
運転方式	GD, IG	GD, GI, IG	
分布地域	経済発展都市	農村, 郊外, 草原, 山村など遠隔地域	
電圧レベル	中電圧配電網 (10 kV)	低電圧配電網 (400 V)	中電圧配電網 (10 kV又はそれ以上)
電源容量	数百kW~10 MW	数kW~数百kW	数百kW~10 MW
主要目的	事故状態下での重要電力供給源の保障, 電力供給安定性, 高品質な電力の確保, 省エネと廃棄物削減及び災害対応力	再生可能エネルギーを利用, 遠隔地域での電力供給, 農村都市化の進展を促進	電力供給の安定性とエネルギー利用率を向上, コストダウンを図る
主要分散型電源タイプ	クリーンエネルギー発電 (燃料電池, マイクロガスタービン, ディーゼルエンジンなど) 及び再生可能エネルギー発電 (太陽光発電など)	再生可能エネルギー発電 (風力発電, 太陽光発電, バイオマス発電など)	従来電源タイプ

GD (Grid Dependent Mode) : 大規模電力網に連系して電力を授受する
GI (Grid Independent Mode) : 大規模電力網とは連系しているが電力の授受は行わず, 自区域内で発電し地産地消を行う
IG (Isolated Grid Mode) : 大規模電力網とは連系せずに自立運転する

か又は送電方向であり, 現地の分散型電源から電力を供給し, マイクログリッドに故障が発生した場合は大規模電力網に切り替えて, 分散型電源をバックアップ電源として利用できる。

農村型マイクログリッドは遠隔地域での電力供給を主な目的とし, 地域の基本的な電力需要を満たしたり, 大規模電力網へ送電したりすることを目指している。遠隔地域は, 再生可能エネルギーに恵まれ, 風力発電や, 太陽光発電, バイオガス発電などの立地条件が良いところが多い。

企業型マイクログリッドは, 工場など企業構内のエネルギー総合利用率の向上と電力消費コストの削減を目的としている。ただし, 石油化学や鋼鉄などの大規模企業は, 中電圧配電網ではなく大規模電力網を利用する。

2.2 中国マイクログリッド市場の展望

中国におけるマイクログリッドに関連する市場としては, 以下の3パターンが有望と考えられる。

- (1) 都市型太陽光発電 中国では, 2006年末現在, 都市建築物に付設した太陽光発電の設備容量が3.8 MW_p^(注1)に達し, 太陽光発電市場における総容量の4.8%を占めている。都市化の進展と省エネ意識の強化に伴い, この技術が成熟しつつある。2020年には, 都市建築物に付設する太陽光発電の設備容量が700 MW_pに達し, 太陽光発電の39%を占める見込みである。現在, 中国の総建築面積は400億m², 屋上面積は40億m² (総日当たり面積は50億m²)になる。そのうちの20%の面積が太陽

(注1) ワットピークと読み, 太陽電池パネルの最大出力の単位を表し, 基準となる条件で換算したもの。

光発電に利用されれば, 総容量は100 GW_pになる。

- (2) 遠隔地域型大規模風力発電 中国では, 2009年末現在の風力発電の設備容量は26 GWであり, 2020年の風力発電の開発目標は, 設備容量で150 GWに達する見込みである。過去10年間で風力発電の平均伸び率は46%であり, 長期的な目標では, 今後10~15年間で中国の総電力設備容量の8~10%を占める。風力発電は中国で巨大な市場潜在力がある。
- (3) 農村地域の電化 農村の電化を実現するためには, 太陽光発電技術が不可欠な技術である。2006年末までに, 農村の電化に用いられた太陽光発電の設備容量は33 MW_pになり, 太陽光発電市場における総容量の41.3%を占めた。中国では, 2005年末現在, 270万世帯(約1,100万人)への電力供給が実現できていない。そのうち, およそ200万世帯が従来の大規模電力網と, 小水力発電からの電力供給や, 国内移住などの方法によって解決する見通しである。残りの約70万世帯は, 太陽光発電や, 風力と太陽光のハイブリッド発電で賄うことになる。貧困地域の標準需要(年間電力使用量200 kWh/世帯)で計算すれば, 太陽光発電の設備容量が約140 MW_pになり, 遠隔地域の都市の標準需要(年間電力使用量1,000 kWh/世帯)で計算すれば, 太陽光発電の設備容量が700 MW_pと見込まれる。

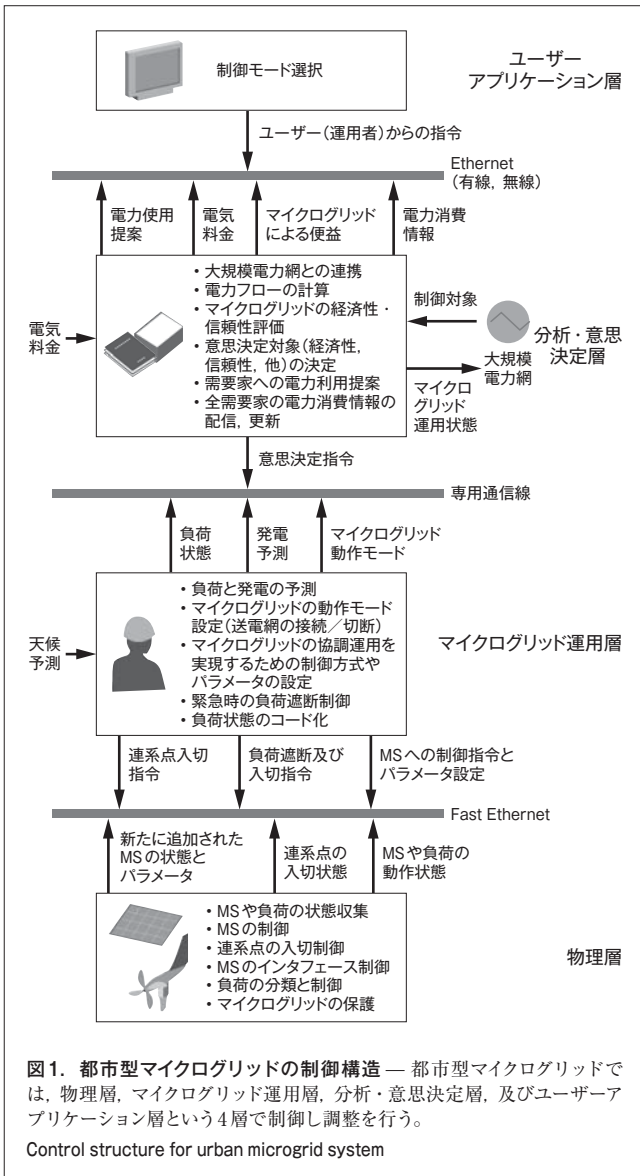
3 都市型マイクログリッドの研究

3.1 都市型マイクログリッドの制御構造

都市型マイクログリッドは, 大規模電力網に対して, 従来の意味での受動的な配電や電力使用ではなく, 能動的な配電形態を意味する。このような受動から能動への転換は, 適切な制御方式の導入により, 需要家への電力供給の信頼度の向上と高品質性に役立ち, システムの省エネ, 二酸化炭素(CO₂)排出量削減目標の達成, 及び故障発生時の電力供給能力の改善に役立つ。

今回開発した都市型マイクログリッドの制御構造は, 図1に示すように, 物理層, マイクログリッド運用層, 分析・意思決定層, 及びユーザーアプリケーション層という4層に分かれ, 各層で制御し調整を行う。各層の間は通信により連携される。このような構造は, マイクログリッドが持つ分散型特性や柔軟性などの特徴に適合する。

物理層は, 各種の分散型電源や電力貯蔵装置(以下, 併せてMS (Micro Sources) と記す), 各種の負荷, グリッド連系スイッチ, MS制御装置, 保護装置, 各種センサなどから成る。MSは独自制御ができ, 時定数がミリ秒(ms)~秒(s)レベルであり, 物理層は, MSの制御とマイクログリッドの運転状態のモニタリングが主な役割である。



マイクログリッド運用層は、マイクログリッドに対して、主にMSと負荷の予測と制御や、グリッド連系スイッチの制御などを含む電気制御を行う。この層の時定数は分 (min) レベルであり、主な役割は下位層へ制御指令を送り、上位層へマイクログリッドの運転状態や負荷の電力使用量を送る。マイクログリッド運用層と物理層の間の通信には、Fast Ethernetなどの高速伝送ラインを用いる。マイクログリッド運用層は、大規模電力網のエネルギー管理 (EMS: Energy Management System) に相当し、マイクログリッドの主要なコントローラとなる。

分析・意思決定層は主に、マイクログリッドの内部意思決定と分析を担っている。具体的には、マイクログリッドのネットワーク状態の分析や、電力フローの計算、下位層から転送されてきたマイクログリッドの内部情報 (例えば、MS情報や負荷情報など) に対して経済性と信頼性の評価を行う。分析・意思決定層の時定数は時間 (h) のレベルにあり、主に下位層

への指令と上位層への電力使用情報の報告、電力使用に関する計画提示を行う。分析・意思決定層とマイクログリッド運用層の間の通信は、主に専用通信ラインを用いる。分析・意思決定層は、大規模電力網との連携と制御を効率的に実現する制御システム全体の中核機能に相当する。総合的な分析、意思決定を行った後、需要家のニーズや、大規模電力網の運用目標を満たすように機能するものである。

ユーザーアプリケーション層は、分析・意思決定層が提供した電力需要や、電気料金、個人ニーズなどの情報に基づいて、ユーザー (運用者) によるマイクログリッド及び負荷制御モードの選択、あるいは指令を分析・意思決定層に伝える。ユーザーアプリケーション層と分析・意思決定層の間の通信は、主に有線・無線 Ethernet によって行われる。

3.2 実証試験に向けて

3.1節で述べた制御構造は、中国科学院电工研究所 (Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences) の実験室に設置されたマイクログリッドのプラットフォームで実証、評価する予定である。マイクログリッドプラットフォームの構成を図2に示す。

配電網は三相4線式の電気回路で模擬される。電力貯蔵設備は3種類あり、鉛蓄電池 (80 kVA-8,000 Ah)、スーパーキャパシタ (30 kVA)、及びフライホイール (10 kVA-1 kWh) である。分散型電源は4種類あり、風力発電模擬装置 (15 kW)、太陽光発電模擬装置 (30 kW)、ディーゼルエンジン発電機 (25 kW)、及びマイクロガスタービン (30 kW) である。風力発電模擬装置は、同期電動機と誘導発電機などで構成され、制御装置によって風速データに応じた風力発電機の出力が模擬できる。太陽光発電模擬装置は、整流回路やインバータ回路などで構成され、太陽光発電データに基づく発電出力が模擬できる。マイクロガスタービンは、米国 Capstone 社製の C30 発電ユニットを採用し、熱電併給が可能である。

4 大規模風力発電連系による遠隔地域型マイクログリッドの研究

中国では、近年、風力発電がもっとも主要なクリーンエネルギーとして急速な発展を遂げている。しかし風力は、一次エネルギーとしては変動性とランダム性が強く、また、風力発電機の誘導機特性によって無効電力消費が大きい。このため、風力発電を従来の大規模電力網に接続するためには、有効・無効電力の調整、制御が必要である。

今回、風力ファーム (Wind Farm)^(注2)の有効・無効電力の3階層制御手法を開発した。ここで3階層とは、風力ファーム

(注2) 多数台の大型風力発電機を集中的に配置して構成される大規模な風力発電設備。

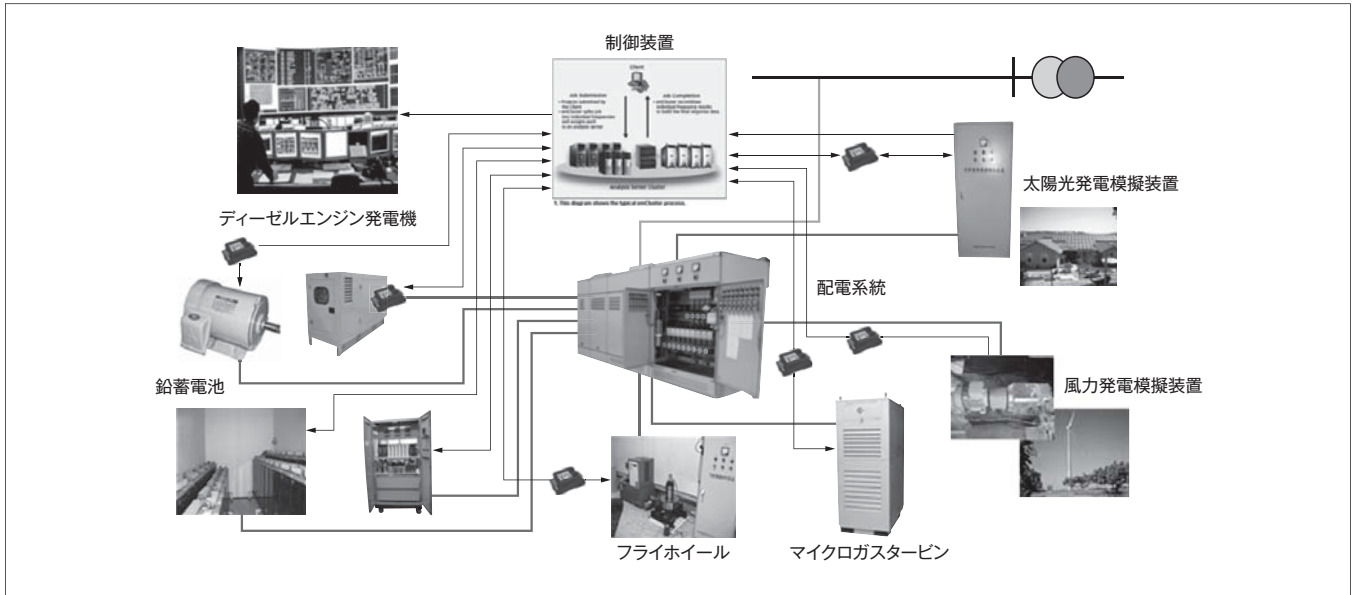


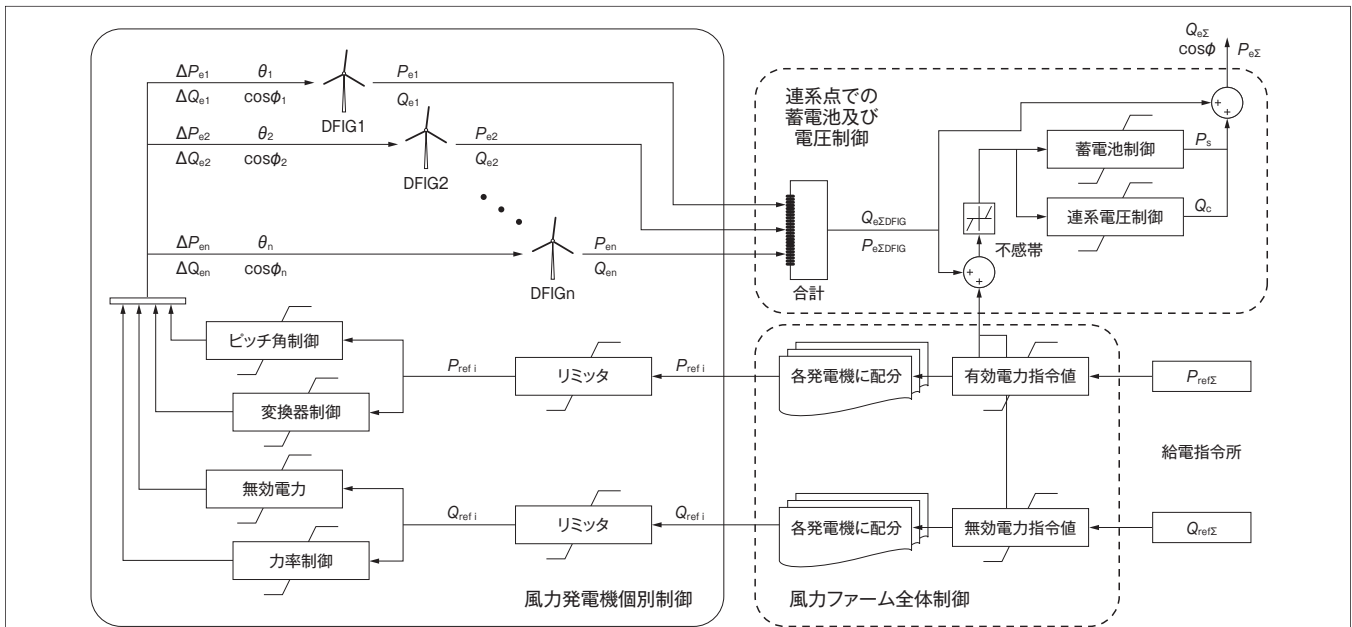
図2. 実験室マイクログリッド全体構造 — 中国科学院電工研究所の実験室に設置されたマイクログリッドのプラットフォームで実証試験, 評価する予定である。
Configuration of experimental microgrid system

の全体制御, 風力発電機の個別制御, 及び連系点での蓄電池及び電圧制御で構成される。制御ブロック図を図3に示す。この制御方法は, 時間単位の異なる目標に対して, それぞれの階層で制御を行う。風力発電機及びその近傍に集中配置されている電力貯蔵装置や, コンデンサ, 無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator) などの設備を活用すること

で, 最終的に風力ファームとして有効・無効電力制御を効率よく行うことを目指している。

4.1 風力ファームの自動発電制御 (AGC) 技術

AGCの目的は, 風力ファームの有効電力出力を給電指令所からの指令値に追従させるため, 風力の変動に伴う有効電力の変動を平準化させることである。



DFIG: 風力発電機(二重給電誘導発電機)
 P_e : 有効電力 Q_e : 無効電力 Δ : 現在値からの変化分 θ : ピッチ角 $\cos\phi$: 力率
 P_{ref} : 有効電力指令値 Q_{ref} : 無効電力指令値

図3. 風力ファームの3階層有効・無効電力制御ブロック図 — 風力ファームの有効・無効電力の3階層制御手法によって効率の良い制御を目指している。
Block diagram of three-tier active/reactive power control of wind farm

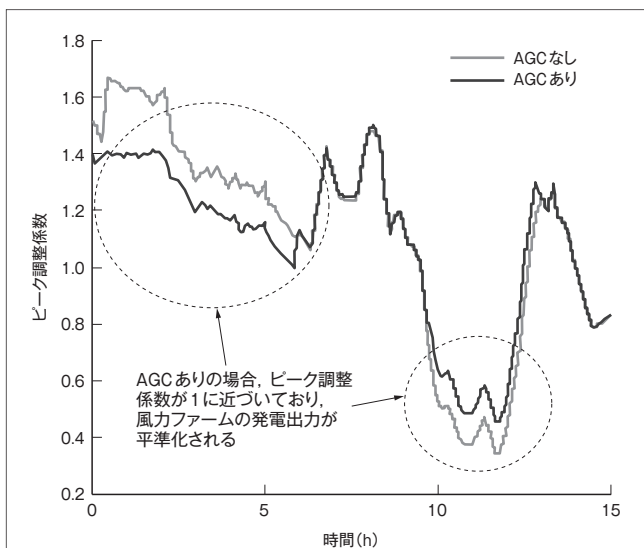


図4. 風力ファームのAGCの効果 — AGCシステムによって大規模風力発電が出力する有効電力のピーク調整係数^(注3)が1に近づいており、制御が有効に機能していることがわかる。

Active power control efficiency of wind farm using automatic generation control (AGC)

図4のシミュレーション結果では、AGCシステムによって風力ファームが出力する有効電力のピーク調整係数^(注3)が1に近づいており、出力が平準化されていることがわかる。

今回の開発では、風力発電機の運転の安定性に対しても検討しており、二重給電型誘導発電機の制御安定性を分析したうえで、固定子側の過渡状態を考慮した回転子電流のデカップリングアルゴリズムを考案した。この制御アルゴリズムを用いることで、過渡状態での回転子電流を有効に減らし、二重給電型誘導発電機を用いた風力発電機の安定性を向上できることを、シミュレーションで確認している。

この制御技術は今後、風力ファームでの実証試験に用いる計画である。

4.2 風力ファームの電圧自動制御 (AVC) 技術

AVCの目的は、風力ファームが大規模電力網との連系点（一般に、風力ファームの主変圧器の高電圧側）で無効電力や電圧変動を想定範囲に抑え、また、その範囲が電力網の要求に基づき、随時調整できることである。風力ファームと大規模電力網との連系を強化するこの技術は、大量の風力発電電力を遠隔地域の大規模電力網に連系した場合の電圧維持にも対応でき、更に、このような地域の風力発電への導入拡大にも役だつ。

今回採用した風力ファームの電圧自動制御の概念を図5に示す。図中の Z_0 はあらかじめ設定した基準範囲である。風力ファームの連系点の電圧-無効電力平面において、変動がこ

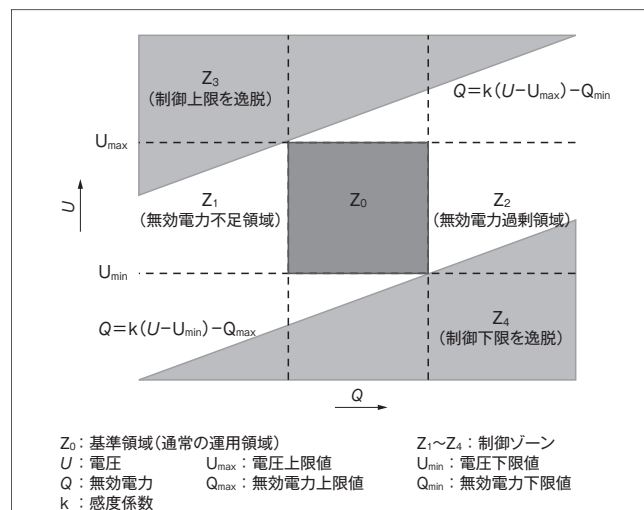


図5. 風力ファーム電圧自動制御の概念 — 連系点の電圧-無効電力平面において、 Z_0 を逸脱した場合、 $Z_1 \sim Z_4$ の各ゾーンごとに定めた制御則により、運用状態を Z_0 に戻す。

Concept of wind farm automatic voltage control (AVC)

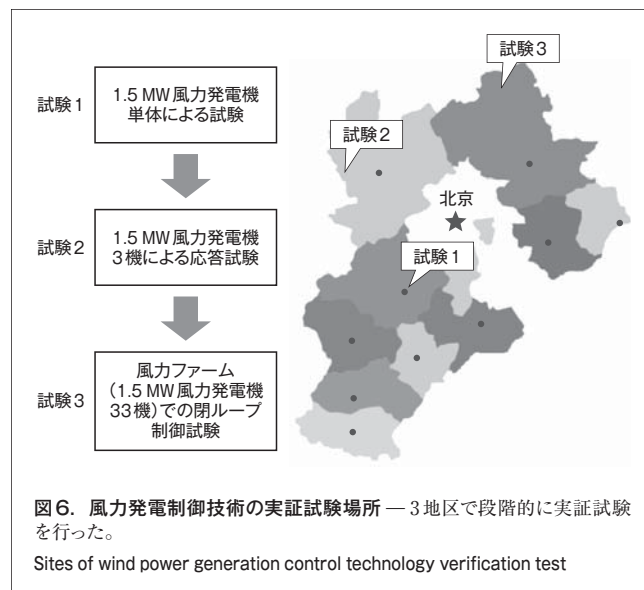


図6. 風力発電制御技術の実証試験場所 — 3地区で段階的に実証試験を行った。

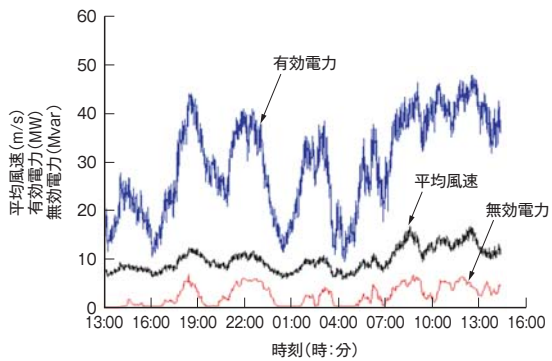
Sites of wind power generation control technology verification test

の範囲を逸脱したら、各制御ゾーン $Z_1 \sim Z_4$ ごとに定めた制御則により、運用状態を Z_0 に戻す。風力ファーム向けのAVCアルゴリズムを開発し、図6に示した3地区で試験を実施した。二重給電型風力発電機の無効電力の調整能力に対する試験を、まず単機に、次に複数のユニットに適用し、最後に風力ファーム全体のAVCシステム試験を実施した。

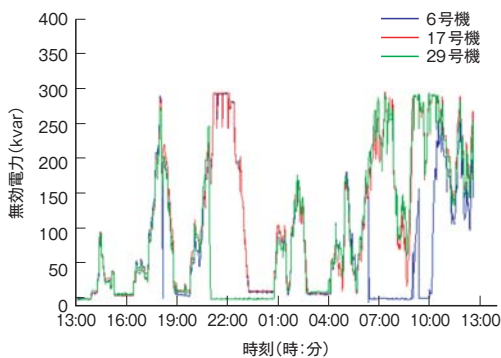
風力ファームのAVCシステム実証試験の結果を図7に示す。ここで、試験での制御目標として、風力ファームの主変圧器高電圧側の力率は1に設定し、電圧は0.95~1.05 p.u.^(注4)の

(注3) 有効電力出力の1日の平均値に対する比率。

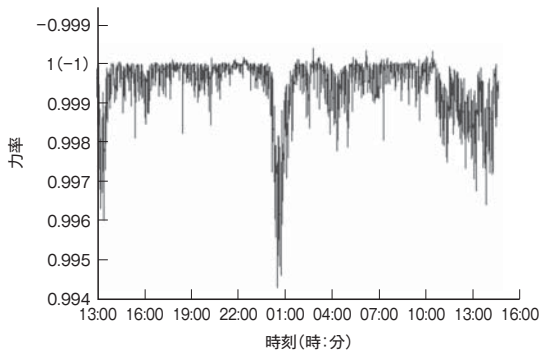
(注4) 単位法 (Per Unit System) による表記で、基準値 (この場合は基準電圧値) に対する割合を p.u. で示す。



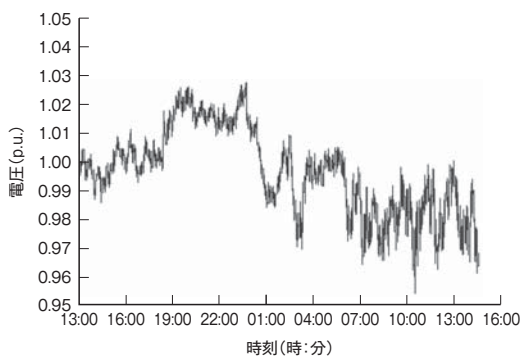
(a) 風力発電機33機分の平均風速、有効電力、及び無効電力



(b) 風力発電機の無効電力の一例(33機中3機のデータ)



(c) 主変圧器の高電圧側力率



(d) 主変圧器の高電圧側電圧

図7. 風力ファームのAVC実証試験結果 — AVCアルゴリズムにより、各風力発電機の無効電力調整能力が活用され、主変圧器高電圧側の力率と電圧を設定した範囲に維持することができた。

Results of wind farm AVC verification test

範囲に保持することにした。今回開発したAVCアルゴリズムにより、二重給電型誘導発電機を用いた各風力発電機の無効電力調整能力が活用され、主変圧器高電圧側の力率と電圧を設定した範囲に維持することができ、良好な試験結果が得られた。

5 あとがき

実証試験は現在も継続中であり、取得したデータを踏まえ、制御方式のいっそうの改良と性能改善を予定している。また、需要家側の電力消費や蓄電池活用の可能性を考慮したデマンドレスポンスについても検討することを予定している。

地球温暖化の防止は世界共通の認識であり、スマートグリッドに寄せられる期待は大きい。中国の豊富な自然エネルギーの有効活用と効率的なエネルギー利用に向けて、マイクログリッドをはじめとした運用制御技術の早期実用化と普及を進めることで、低炭素社会の実現に取り組んでいく。



閔 勇 MIN Yong, Ph.D.

清華大学 電気科教授、工博。電力システムの安定性解析、分散型電源及びマイクログリッド技術の研究に従事。北京電気工学会副理事長、中国電工技術学会常務理事。

Tsinghua University



魯 宗相 LU Zongxiang, Ph.D.

清華大学 電気科副教授、工博。電力システムの信頼性解析、風力発電、分散型電源及びマイクログリッド技術の研究に従事。中国電力業界信頼性管理委員会、中国電気工学会信頼性専門委員会委員。

Tsinghua University



林 秀樹 HAYASHI Hideki, D.Eng.

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 スマートグリッド技術責任者、工博。スマートグリッドシステムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Transmission & Distribution Systems Div.



小林 武則 KOBAYASHI Takenori, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電力ソリューション・配電システム開発部グループ長、工博。電力システムに関する研究・開発に従事。電気学会、IEEE会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center