再生可能エネルギー電源との調和に向けた 先進グリッド技術の国内動向

上級会員 林 泰弘*

Japanese Trend of Advanced Smart Grid Technology for Harmonization of Renewable Energy Resources and Power Systems

Yasuhiro Hayashi*, Senior Member

In tandem with the penetration of Renewable Energy Sources (RES) such as photovoltaic and wind power generation to reduce CO₂ emissions and conserve energy, development of advanced smart grid technologies is needed to secure a stable power supply of grid with RES by controlling power quality (voltage and frequency) within each secure range. This paper describes Japanese trend of the advanced smart grid technologies to harmonize RES and conventional bulk power system. Furthermore, several ongoing field tests to try to realize Japanese version of smart grid are briefly introduced.

キーワード：スマートグリッド，再生可能エネルギー電源，電力系統，蓄電池，電圧制御，周波数制御，実証事業

Keywords: smart grid, renewable energy resource, power systems, secondary battery, voltage control, load frequency control, field tests

1. はじめに

21 世紀のエネルギー問題の課題として、①安定供給 (Energy security)、②環境適合 (Environment)、③経済効率性 (Economic efficiency) の 3E の同時達成が挙げられている。この課題解決の一つの施策として、欧米を中心とした世界各国で「スマートグリッド^{(1)~(3)}」と呼ばれる先進グリッドが政策と投資をきっかけに注目を浴びている。先進グリッドとは、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギー電源 (RES: Renewable Energy Sources) や蓄電池ならびに可制御負荷が連系された電力ネットワーク全体を対象として、最適化技術や ICT などの先進技術を駆使して、安定化、低炭素化、省エネ化といった多目的最適化が同時達成可能なエネルギーネットワークであると捉えることができる。

我が国でも、経済産業省資源エネルギー庁が、次世代送配電システム制度検討会とスマートメーター制度検討会の二つの検討会を 2010 年 5 月末に立ち上げ、国レベルで先進グリッドに対する制度検討が進められている⁽⁴⁾。我が国では、住宅用を中心とした太陽光発電システムの導入目標 (2020 年 2800 万 kW, 2030 年 5300 万 kW) に示されるよ

うに、特に太陽光発電の大量導入に対する電力安定供給維持が先進グリッド実現の技術の鍵となる。

電力ネットワーク全体の安定供給のために確保すべき電力品質としては、電圧と周波数がある。RES の導入期は、何も対策を施さなければ、RES の系統連系地点での適正電圧範囲の逸脱により、電圧面での安定供給問題が顕在化する。さらに、RES の導入が急速に進む普及期になると、電力系統全体での総発電電力と総負荷電力をバランスさせるための需給調整容量の確保が困難となり、無対策では周波数の適正範囲を逸脱してしまうことになる。つまり、RES の導入期には電圧逸脱問題、普及期には電圧逸脱問題に加えて周波数逸脱問題が生じることになる。したがって、社会インフラであるグリッドの安定供給を長期にわたり実現するために、RES の大量導入を見据えたシステム技術の研究・開発が国内でも活発になされてきている^{(5)~(10)}。

本稿では、RES の大量導入に対する安定供給と低炭素化の観点から、電力系統側と RES 側という二つの側面をもとに先進グリッドを捉え、①電力系統側からの制御技術、②RES 側からの制御技術、③電力系統と RES との協調制御技術、という三つの切り口で、安定供給を実現するための RES との調和に向けた先進グリッド技術の国内動向について概説する。ただし、これまでに様々な観点から幾つかの解説記事^{(6)~(10)}が執筆されているので、本稿ではそれらを統括する形で記述する。また、次世代グリッドの実現に係る国内での実証事業の動向についても取り上げる。

* 早稲田大学大学院 先進理工学研究科 電気情報生命専攻
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

Graduate School of Advanced Science and Engineering, Major in
Electrical Engineering and Bioscience, Waseda University
3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

2. RES との調和を目指す 先進グリッド技術

〈2・1〉 電力系統側からの制御技術 太陽光や風力発電などの RES の導入拡大により、CO₂ 排出量は削減できるが、それに伴い従来の安定供給が損なわれてはならない。つまり、再生可能エネルギーの導入拡大により CO₂ 排出量削減は担保できるが、同様に電気エネルギーの安定供給も担保されなければならない。したがって、電力系統側は、RES の導入拡大に対しても、系統電圧制御機器を用いた電圧変動抑制技術や需給バランスの維持による周波数調整制御など、安定供給を維持する先進技術が不可欠となる。

(1) 系統機器による系統電圧制御 RES が配電系統に連系される際に、電圧上昇が発生し、適正電圧範囲の上限値を逸脱することが安定供給上の課題となっている。電圧上昇を抑制するために、電力系統側の制御機器により RES が連系された配電線全体の電圧を適正範囲内に制御する研究・開発がなされてきている⁽⁸⁾。系統側電圧制御機器としては、主に負荷時タップ切替変圧器 (LRT: Load Ratio control Transformer)、線路用電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator)、静止型無効電力補償器 (SVC: Static Var Compensator) が挙げられる。本来、LRT や SVR や SVC は自端計測情報に基づき自律型の電圧制御を行う制御機器であるが、近年では、センサ内蔵開閉器からの電圧・電流の計測情報を活用した自律型や集中型の電圧制御技術の研究開発が進められている。これらの RES の導入拡大に伴う配電系統電圧制御の技術動向の詳細については、文献 (8) の解説記事に譲る。我が国が目指す家庭用太陽光発電システムの導入拡大に対しては、配電線の電圧逸脱抑制制御を実現するための LRT と SVR の整定値の同時最適化技術などが、まず必要になってくると予想される。今後、自端計測情報に基づく自律型電圧制御から多地点計測情報に基づく集中型電圧制御へと移行していくであろう。

(2) 系統側蓄電池による周波数制御 火力発電機や水力発電機による出力制御で需給バランスの調整を行うことで周波数が適正範囲内に制御されている。RES は、CO₂ 排出量削減という環境面での貢献は大きい、日射や風況などの自然環境によって発電電力が左右される制御不可能な不安定出力電源であり、火力・水力発電機のように電力系統の安定供給を維持するための周波数調整能力は持たない。そのため、RES の導入拡大に伴い、系統全体の周波数調整能力が低下してしまう。系統の周波数を適正範囲内に維持するために、系統全体の周波数調整能力を確保することが不可欠であり、その一つの対策として、系統側に蓄電池を設置して、周波数調整能力の確保と周波数制御に関する検討がなされている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

〈2・2〉 RES 側からの制御技術 RES の出力が系統に流れ込むことによって生じる電圧と周波数の逸脱に対する制御を電力系統側にだけ負担させるのではなく、RES 側で系統制御に負担をかけないように制御することで、RES の導入拡大を推進するための技術開発がなされている。RES

側の対策技術としては、主として、連系インバータによる制御と、併設した蓄電池による制御に大別できる。

(1) 連系インバータ制御による系統連系地点の電圧制御 RES の連系地点での電圧上昇が配電線全体の電圧を底上げすることになる。これを回避するために、連系インバータの空き容量を用いて、連系地点電圧が適正範囲の上限を逸脱する時には、電力系統への無効電力を制御することにより、連系地点の電圧上昇を抑制制御する技術が研究・開発されている⁽⁸⁾。

(2) RES 併設蓄電池による制御 電力系統側の周波数制御に対する負担を軽減するために、RES に蓄電池を併設して、蓄電池の充放電制御により不規則な発電電力変動を補償することで、周波数変動の原因となる RES からの大きな出力変動が系統側に直接流れ込まないようにする技術が検討・実用化されている⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

蓄電池併設型の太陽光発電システムについては、例えば、太陽光発電所に併設された NAS 電池システムによる発電所出力変動抑制技術が検討されている。各種日射量の短周期変動に関する分析結果をもとに、大きな PV 出力変動に対して相対的に小さな MW 容量の NAS 電池システムで効果的に変動抑制を行う手法が提案されている⁽¹¹⁾。

一方、蓄電池併設型の風力発電システムについては実用化が進んでおり、実証試験を経て、蓄電池を併設した出力一定制御型風力発電の系統連系が 2009 年 12 月から技術要件を満足すれば受け付けられることになった⁽¹²⁾。

〈2・3〉 RES と電力系統の協調制御技術 RES の導入量が総負荷電力に占める割合が大きくなってくると、〈2・1〉節の電力系統側での対応技術と〈2・2〉節で記述した RES 側の対応技術を相互に最適に協調させることで、グリッド全体で制御の最適化を図る必要が出てくる。これらの必要性に基づく先進グリッドの概念として、国内でも分散型電源と電力系統との協調運用形態に関連する幾つかのシステムの提案がなされている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。これらの協調運用形態を単なるシミュレーションでの検証でなく、次世代グリッドを模擬可能な実験システムに実装してその妥当性を実験検証することが今後重要となってくる。例えば、図 1 に示

図 1 次世代配電ネットワーク模擬実験システム (ANSWER)

Fig. 1. Advanced distribution network equipment (ANSWER).

すように、RES や蓄電池の模擬装置などが連系された次世代配電ネットワーク模擬実験システム（ANSWER：Active Network System With Energy Resources）が構築され、分散型電源と配電ネットワークとの協調運用形態の検証実験が実施されている⁽¹⁵⁾。この模擬実験システムでは、制御ロジックを外部から自在に開発可能にした電圧制御装置、自動開閉器付線路装置、RES 模擬装置、負荷模擬装置、蓄電池模擬装置などを、実験の目的に応じて自在に接続し、様々な配電ネットワークを再現可能であり、そこに研究開発した先進グリッド制御技術を実装すれば、制御・計測結果からその有用性が検証可能となっている。

以上より、表 1 に示すように、RES の導入拡大（RES による低炭素化）に伴い、安定供給（電力品質維持）を実現していくには、電力系統側だけの機器制御技術から、RES 側の機器制御技術、そして、電力系統側と RES 側との機器の協調制御技術へと、対象制御機器も RES の導入拡大に合わせて拡張した上で、研究・開発が移行していく必要があ

り、それらの妥当性は実験を通して着実に実証していかなければならない。

3. 国内での次世代グリッドの実証事業の動向

RES との調和を目指した実現可能な次世代グリッドの構築に向けて、国内の電力会社を中心として、離島マイクログリッド実証事業、分散型新エネルギー大量導入促進系統安定化対策事業、分散型電源大量導入系統影響評価基盤整備事業、次世代送配電系統最適制御技術実証事業などの様々な実証事業が始まっている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。これらの概要を表 2 に示す。とりわけ、次世代送配電系統最適制御技術実証事業⁽¹⁷⁾については、3 大学、10 電力、15 企業の全 28 法人で、今回の実証事業を通じて、電気エネルギーの最適利用を高度化するとともに、低炭素社会の鍵となる日本版スマートグリッドの基礎技術の確立に取り組んでいる。系統側では、さまざまな電圧制御機器を最適に組み合わせた配電系統の電圧変動を抑制する技術の確立や、高機能な次世代電圧制御機器の開発などが行われ、配電系統シミュレータ、または配電系統を模擬した実験設備（図 1 の ANSWER を大幅に拡張したもの）を用いて効果が検証される。需要側では、系統状況に応じて太陽光発電の余剰電力を需要家内に設置された蓄電・蓄熱機器（電気自動車、ヒートポンプ式給湯機など）で効率的に活用する需給制御技術の確立や、需要家内機器制御機能（スマートインターフェース）の開発などが行われ、中央給電指令所の機能を備えた全系統シミュレータを用いて実現可能性の検証が行われる。この実証事業の概要を図 2 に示す。

表 1 RES の導入拡大に対応した電力品質の制御機器

Table 1. Power quality control equipment for penetration of RES.

		電力品質	
		電圧	周波数
主な制御機器	電力系統側	・LRT ・SVR ・SVC	・火力/水力発電機 ・揚水発電機 ・系統側蓄電池
	RES 側	連系インバータ	RES 側蓄電池

注：網掛けの色の濃さは、系統全体に対する RES の導入比率の大きさを視覚的に表現

表 2 現在進行中の次世代グリッドに係る国内実証事業

Table 2. Ongoing Japanese field test of next-generation grid.

実証事業名称	期間	採択事業者	概要
離島マイクログリッド実証事業	2009 2013	九州電力 沖縄電力	独立した系統となっている離島において、相当量の太陽光発電等を導入するとともに、蓄電池等を活用した系統システムの制御を実証的に行うことを通じて、今後の太陽光発電の大量導入に対応した次世代送配電ネットワーク構築に向けての課題を整理
分散型新エネルギー大量導入促進系統安定化対策事業	2009 2011	10 電力会社	太陽光発電の大量導入による電力系統への影響を見極めるため、全国 100 カ所以上で太陽光発電出力や日射量データ等を収集し、太陽光発電の出力変動幅や広域的視点でみた出力の平滑化効果を分析。あわせて、太陽光発電の総出力量を推定するための基盤データについても取得。
分散型電源大量導入系統影響評価基盤整備事業	2009 2010	電力中央研究所	新エネルギー大量導入時における電力系統への影響等を評価するため、模擬太陽光・模擬風力発電設備、模擬電力設備（発電所、変電所、送電線）や模擬負荷設備（インバータ・抵抗、回転機）等から構成される電力系統シミュレータを構築し、電力系統への影響や系統事故時の現象について実験検証。 (1) 周波数の変動：周波数安定性に及ぼす影響の解明、周波数異常防止技術の開発 (2) 電圧の変動：系統全体に与える電圧安定性への影響の解明、対応策の検討 (3) 同期安定度の変動：系統の同期安定度に及ぼす影響の解明、制御技術の開発 (4) 系統潮流量の変動：リアルタイムの潮流把握、評価技術の開発
次世代送配電系統最適制御技術実証事業	2010 2012	東京大学 東京工業大学 早稲田大学 東京電力 他 24 社	参加事業者の大学・企業・電力会社が共同で、政府が掲げる 2020 年度までに太陽光発電 2800 万 kW の導入目標の達成に向けて必要不可欠となる、大規模電源から家庭まで発電・送電・配電システム一体となった全体制御・協調による高信頼度・高品質の低炭素電力供給システムの実証。具体的には、配電線電圧上昇・余剰電力発生などを解決するための技術確立や機器開発などを、系統側・需要側両面で取り組む。

Fig. 2. Concept of field test of next-generation optimal control technologies in transmission and distribution systems.

CO₂ 排出削減効果を有する RES の導入拡大に伴い、電圧と周波数という電力品質面で電力系統全体の安定供給を長期にわたって維持するために、電力系統と RES の双方で安定供給と低炭素化を実現する先進グリッド技術が不可欠となる。RES の導入当初は、その導入量が少なかったため、電力系統側での制御により電力品質を維持できたが、今後 RES の導入拡大が急速に進むと予想される中で、系統側の機器制御だけでなく、RES 側の機器制御、さらには、系統側と RES 側との機器の協調制御といった、様々な角度での技術開発が必要であると考えられる。また、ヒートポンプ式給湯機による負荷制御やプラグインハイブリッド車・電気自動車の充放電制御など、需要側の可制御負荷を活用した先進グリッド技術の研究開発も今後さらに進むことが予想される。

文 献

- (6) 高野富裕：「自然エネルギー発電と電力貯蔵技術」，電学論 B, Vol.126, No.9, pp.857-860 (2006-9)
- (7) 石川忠夫：「分散形電源の電力系統連系技術の最新動向」，電学論 B, Vol.126, No.10, pp.964-968 (2006-10)
- (8) 林 泰弘：「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望」，電学論 B, Vol.129, No.4, pp.491-494 (2009-4)
- (9) 横山明彦：「大容量化が進む風力発電-5 電力系統からみた大容量風力発電」，電学誌, Vol.129, No.5, pp.299-302 (2009-5)
- (10) 辻 隆男・原 亮一・大山 力：「分散電源と需給運用制御技術」，電学論 B, Vol.129, No.9, pp.1066-1069 (2009-9)
- (11) 赤塚元軌・原 亮一・北 裕幸・伊藤孝充・植田喜延・三輪修也・松野直也・滝谷克幸・斉藤正美：「NAS 電池を用いた大規模太陽光発電所の出力変動抑制」，電学論 B, Vol.130, No.2, pp.223-231 (2010-2)
- (12) 東北電力ホームページ，http://www.tohoku-epco.co.jp/news/normal/1180734_1049.html
- (13) 林 泰弘・小崎章司・松木純也・若尾真治・馬場句平・北條昌秀・横山明彦・小林直樹・平井崇夫・生石光平：「分散型電源の導入拡大に対応した配電ネットワークの協調運用形態」，電学論 B, Vol.127, No.1, pp.41-51 (2007-1)
- (14) 「募集型座談会テーマ：日本型スマートグリッドを考える」，平成 21 年電気学会電力・エネルギー部門大会，<http://www2.iee.or.jp/ver2/pes/sys/02-conference/01-09.html> (2009-8)
- (15) 酒井重和・林 泰弘・小崎章司・松木純也・馬場句平・横山明彦・北條昌秀・若尾真治・森健二郎・不破由見：「分散型電源連系課題解決支援実験システム (ANSWER) の構築と分散型電源と配電ネットワークとの協調運用形態の実験検証」，電学論 B, Vol.130, No.5, pp.473-483 (2010-5)
- (16) 資源エネルギー庁ホームページ調達情報，<http://www.enecho.meti.go.jp/info/tender/>
- (17) 東京電力ホームページ，<http://www.tepco.co.jp/cc/press/10052103-i.html>

Dr. Y. Nakamura