

特 集 論 文

再生可能エネルギーの多様化に応える電力供給システム

Power Supply Systems Responding to Diversification of Renewable Energy Sources

安達 哲也* 三谷 寛資*
T. Adachi H. Mitani

概要

本稿では、単に受電、変電、配電するだけの受変電設備ではなく、様々な再生可能エネルギー源を安定的に電力系統と連系・送電する電力供給システムとしての取り組みについて紹介する。

Synopsis

In this paper, we will describe our power supply systems and equipments for the interconnection of various kind of renewable energy sources such as solar-power, wind-power, and biomass-power generation.

1. まえがき

1950年代、日本は再生可能エネルギー大国であり自給率は水力を中心に58%を誇っていたが、現在はわずか8%にすぎない。1970年代、2度の石油ショックを契機に、ガスや原子力などの石油代替エネルギーへのシフトが行われてきた。しかし、2011年、東日本大震災が発生、原子力発電が停止し火力発電への依存が高まった。この結果、電力料金が高騰するに加え、CO₂排出量が増加した。

このような状況下、エネルギー資源が少ない日本国内においては、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの活用は必須であり、国がさらなる導入・普及を促進している。

再生可能エネルギーの設備容量は、2009年から実施された太陽光発電限定の余剰電力買取制度により、今までは年平均5%の伸び率であったものが9%に拡大した。さらに2012年からスタートした固定価格買取制度（FIT）により再生可能エネルギー導入に拍車をかけ、年平均伸び率は26%まで上昇することとなり、投資家をも巻き込んだ「発電事業」が急速に拡大する結果となった（図1）。

このような背景により再生可能エネルギーの導入は加速度的に増加し、当社が納入する設備も工場やビルな

どの単に受電、変電、配電する設備だけではなく、安定的に再生可能エネルギー源を電力系統と連系するための受変電システム製品を納入する事例が増加している。ここでは様々な再生可能エネルギー源と電力系統を連系する電力供給システムへの当社の取り組みについて紹介する。

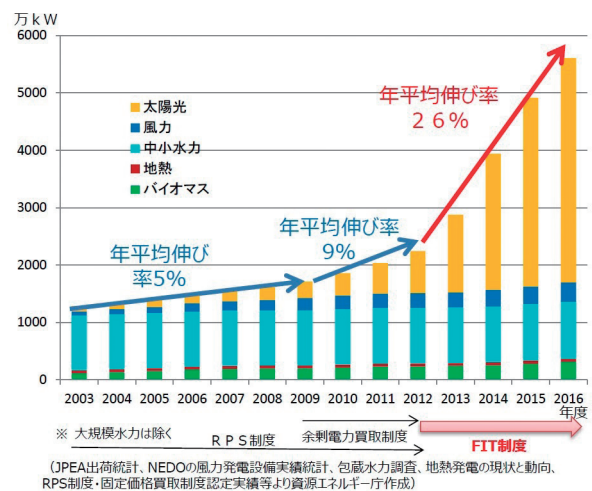


図1 再生可能エネルギー設備容量の推移

*電力・環境システム事業本部

2. 太陽光発電設備

当社では1980年代初めに太陽光発電用系統連系インバータを開発後、パワーコンディショナ（PCS）を製品化し、すでに30年以上の実績を有している。

また、1990年代初めに太陽光発電システム設置に関する助成制度ができて以降、事前検討から施工、運用開始まで発電システムの建設計画全体にも一貫して取り組んできた。1993年に設置した山梨県企業局丘の公園の95kW設備では、20年以上の稼働実績を有している（図2）。



図2 山梨県企業局丘の公園 95kW

2. 1 太陽光発電設備の導入拡大

2012年にスタートしたFITの施行に伴い、太陽光発電の導入量が急増、特に専用の連系設備を備え全量販売する発電所の増加が目覚ましかった。

FIT施行前は助成制度を活用し、温室効果ガスの排出抑制や省エネなどの環境貢献を目的として導入されるケースが一般的であったが、FIT施行後は発電事業目的のものが大半を占めるようになった。それに伴い、市街地の施設に自家消費を主とした小規模なシステムを設置するケースが主流であったものが、郊外の遊休地や工場・倉庫などの屋根に大規模なシステムを設置するケースが主流へと変化した。

図3に大規模太陽光発電（メガソーラー）の導入例として、鹿児島七ツ島メガソーラー70,000kW設備を示す。発電事業目的の太陽光発電設備では、設備の大容量化が進んだ。FIT施行前は低圧や高圧連系設備であったものが、FIT施工後は特高連系設備が多くなり、当社の特高受変電機器への需要が高まった。



図3 鹿児島七ツ島メガソーラー 70,000kW

2. 2 システム設計の技術課題

2. 2. 1 高効率

システムの総合的な発電効率の評価指数として、システム出力係数（＝年間発電量/定格容量/年間日射量）がよく用いられる。この値が大きいほど同じ日射条件下で年間の発電量が高くなることを示しており、直流および交流の線路損失の低減、PCSや変圧器等の機器損失の低減がシステム設計上重要となる。PCSは冷却方式を従来のエアコンから熱交換器に変更し、ファンと併用することでランニングコストを低減しているスマートパワコンもラインアップしている。

2. 2. 2 高信頼性

固定買取期間である20年間、所定の発電性能を維持すること、安定して運転し続けることが発電事業にとって非常に重要となる。発電性能の維持は、太陽電池の経時変化による出力性能に大きく依存し、太陽電池をPCS容量より多く設置する過積載とすることで発電量の低減を回避するのが一般的になってきている。安定運転はPCS等の機器自体の長期信頼性と適切な維持管理、定期的な保守による異常の未然防止と不具合時の早期復旧が重要となっている。このため機器メーカー等と長期の保守契約を結び、メンテナンス回数を削減、部品交換の回数を減らす製品を選定する例も増えてきている。

2. 2. 3 多様な設置環境

太陽光発電の導入量が増えてきたことにより、塩害地域、強風地域、多雪地域など特殊な環境条件で設置検討するケースが増えている。従って設置環境に配慮した仕様の設備選定が欠かせない状況である。

2. 2. 4 低コスト、コンパクト化

太陽電池を地上設置とする場合、その地点の緯度に応じて年間発電量が最大となる傾斜角を試算することができる。一方、傾斜角が小さいほどアレイ間隔を詰めて設置面積を減らすことができ、地代や施工コストを低減できる。このため総合的に発電コストが最小となるような傾斜角を選定することが重要となる。またPCS盤の高さを低減することで、PCS盤自体の影の影響を最小限に抑える対応も行っている。

2. 3 系統連系上の技術課題

2. 3. 1 電圧上昇対策

系統に太陽光発電を連系し逆潮流した場合は配電線の電圧が上昇する。図4に示すように連系点から見た系統側のインピーダンスを $R+jX$ とし、太陽光発電所から系統に逆潮流した有効電力を P 、無効電力を Q （供給を+方向）とすると、連系点の電圧上昇 ΔV は、 $\Delta V = RP + XQ$ の式で表される。このため系統側が軽負荷時に発電量が増えた場合等に系統電圧が上昇し規定値を上回る可能性がある。その際はPCSが無効電力 Q を消費することによって電圧上昇を抑制する機能が標準的にPCSに備えられている。

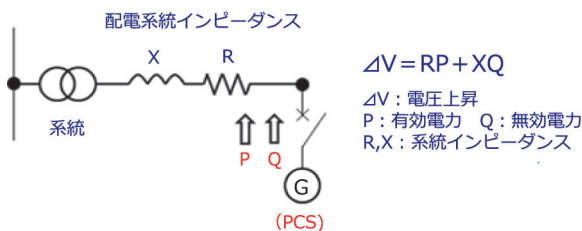


図4 配電線の電圧上昇

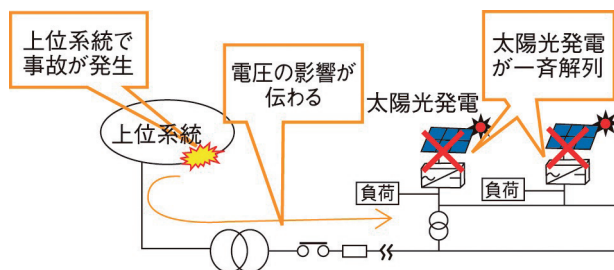


図5 系統擾乱時の不要解列

2. 3. 2 系統擾乱時における運転継続性 (FRT)

PCSは系統側の停電等の異常を検出した際には運転を停止する機能を有する。図5に示すように上位の基幹系統に起因する瞬時の電圧低下を検知して運転を停止した場合、系統に繋がる太陽光発電が一斉に停

止し電力品質に大きな影響を与えてしまうことになる。これを防ぐために、一定条件の範囲での電圧低下や周波数変動でも運転を継続する機能をFRT機能と呼んでいる。2014年4月から、PCSにこの機能を搭載することが系統連系規程において要求されており、当社では2014年時点で2017年に求められるFRT機能を先行して標準搭載している。

2. 3. 3 電圧フリッカ対策

単独運転検出として受動型および能動型の二通りの方式がPCSに内蔵されており、後者の代表的な方式の一つに無効電力変動方式がある。その原理の概念図を図6に示すが、無効電力を周期的に変動させるためフリッカ値に影響を及ぼす。無効電力変動量および系統インピーダンスが大きいほど影響が大きくなるため、出力の大きな発電設備を系統の弱い地域に設置する場合には規定値を上回る可能性がある。その場合は無効電力変動量の低減や、フリッカへの影響の無い次数間高調波注入方式の単独運転検出装置（エネリンク）の設置などにより対応する必要がある。

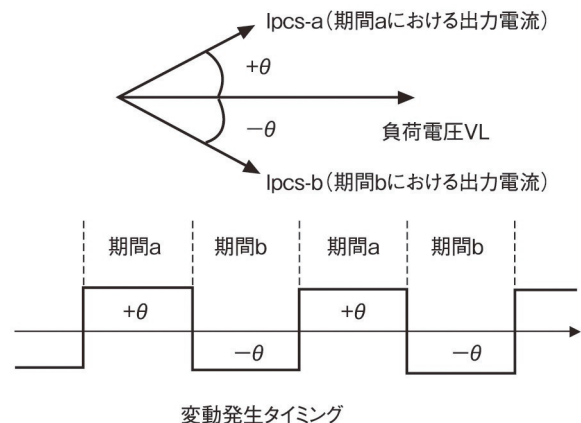


図6 無効電力変動方式による単独運転検出

2. 4 自家消費型太陽光発電システムへ

FITにより太陽光発電所の建設が急激に加速したことで、建設コストが下落方向にある。また、補助金制度が利用できること、東日本大震災以降、電気料金が高騰していることなどにより、自家消費型太陽光発電システムでもFIT制度と同等の事業採算性を得ることが可能になってきている。今後の市場拡大が期待できる分野であり、当社でも積極的な提案活動を行っている。

自家消費型太陽光発電システムにおいては、発電電力が構内消費電力を上回った場合に発生する余剰電力を電力系統へ逆潮流させてはいけない場合がある。一般に逆電力リレー（RPR）を設置することで対

応しており、RPRが動作した場合は発電が停止してしまう。発電電力を最大限に活用するためには、RPRの検出頻度を低減する対策が重要であり、その一例について紹介する。

2. 4. 1 余剰電力対策

(1) 余剰電力をデマンドレスポンスで活用

余剰電力の発生時に構内負荷を増やすことで発電電力を全て消費するシステムである。

後述の蓄電池システムを用いた余剰電力活用のような充放電のプロセスが無いことから、省エネ効果を最大限に高めることのできるシステムとなる。

(2) 蓄電池システムによる余剰電力の活用

余剰電力を蓄電池に充電し、消費電力ピーク時など逆潮流の懸念が無い時間帯に放電するシステムである。

本システムを用いることで余剰電力を有効活用することが可能となるので、再エネ比率の高いシステムとなる。

(3) 出力制御機能の活用

構内消費電力を監視し、系統からの買電電力が少なくなったとき（逆潮流が発生する直前）に監視装置からの指令で、PCSの出力を抑制するシステムである。

この操作により、RPRを動作させることなくPCSの運転を継続させることが可能となる（図7）。

3. 風力発電設備

地球温暖化問題への関心の高まりや、2011年東日本大震災の電力供給不足及び、燃料費高騰を受け、風力発電の導入が進んでいる。近年、風力発電設備の大規模化や大容量・長距離送電の増加に伴い系統連系要件に係る課題が顕在化し、その対応が必要となっている。

当社では、これまで培った数百メガワットを超える連系設備の豊富な実績を基に、系統解析技術を活かした電力品質対策機器と独自の特徴ある受変電設備による最適なソリューションを提案することで、大規模風力発電の分野にも積極的に展開している。

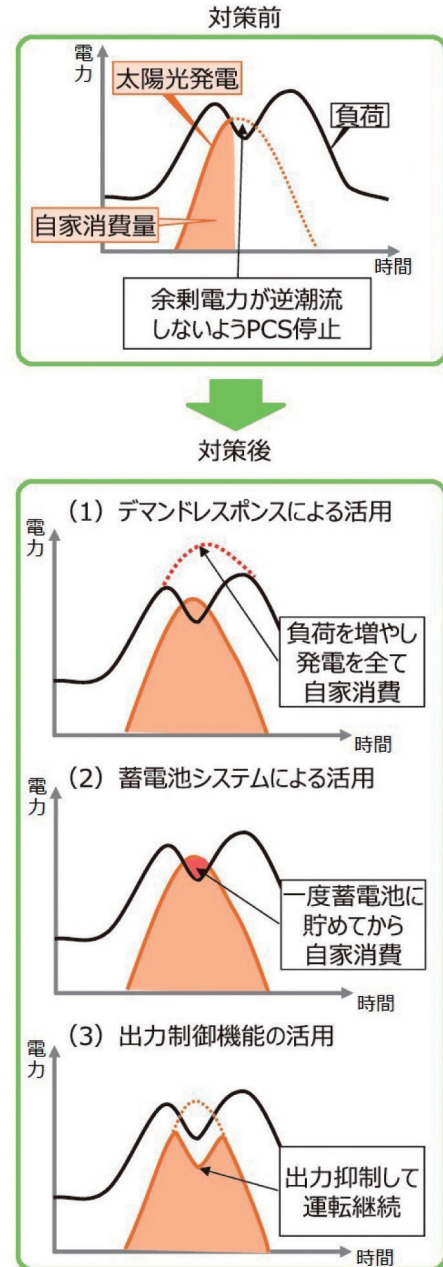


図7 太陽光発電設備の余剰電力対策

3. 1 系統連系上の技術課題と対策

大規模風力発電では、その発電電力の変動による系統電圧変動を無視できないケースがある。このため電圧変動対策用のSVC（静止形無効電力補償装置）等を設置するが、電圧変動に対する抑制効果を事前に解析することにより系統条件に合わせた最適な対策装置の設計を行うことができる。

また近年計画されている洋上風力発電や、陸上風力発電でも電力会社の変電所から離れているケースでは長距離交流ケーブルを採用することが多くなっている。長距離交流ケーブル送電ではケーブルの対

地静電容量に起因する特異現象の発生が懸念されるため十分な事前検討が必要である。

以下に対策検討事例を示す。

3. 1. 1 電圧変動対策

長距離送電ケーブルの充電容量 (Q_c) が大きくなると、ケーブルが発生する無効電力によりケーブルの送電可能な有効電力が減少する。この対策として分路リアクトル (図8) を設置し、無効電力を消費することでケーブルから発生する無効電力を補償する。

また、連系要件では常時電圧変動は概ね $\pm 1\sim 2\%$ と規定されている。長距離ケーブルシステムを開閉すると、ケーブル充電容量 (進み電流) により電圧変動が発生し規定値を逸脱することがある。この対策として複数群の分路リアクトルやSVCを設置し、ケーブル充電容量を相殺することが行なわれる (図9)。



図8 分路リアクトル 201014

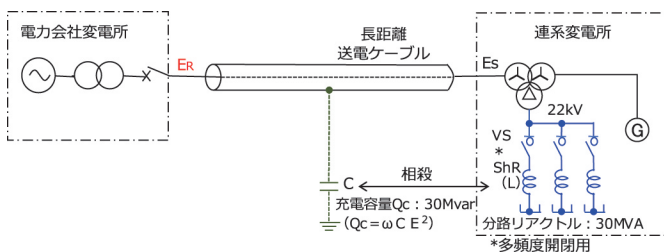


図9 分路リアクトル設置による電圧変動対策例

3. 1. 2 ケーブル残留電荷放電対策

長距離ケーブルシステムで遮断器を開放すると、ケーブルの誘電体 (静電容量C) にピーク電圧が残留することがある。この状態で遮断器を投入すると、過電圧が発生し、機器を損傷する可能性がある。そこで、電圧変成器VTの巻線を通して残留電荷を大地へ放電する対策が採用されている。

3. 1. 3 電流零ミス現象の対策

電源投入や地絡発生により、中性点リアクトルに系統電圧が印加されると励磁突入電流 (遅れ電流+直流分電流) が流れる。この遅れ電流はケーブル充電電流 (進み電流) により打ち消され電流零点のない期間が発生するので、この期間内で遮断器を開放しようとする電流遮断できない恐れがある (図10)。

この対策として、リアクトル等の励磁突入電流を抑制したり、中性点抵抗を設置する等、系統構成に適切な運用を図ることが必要である。

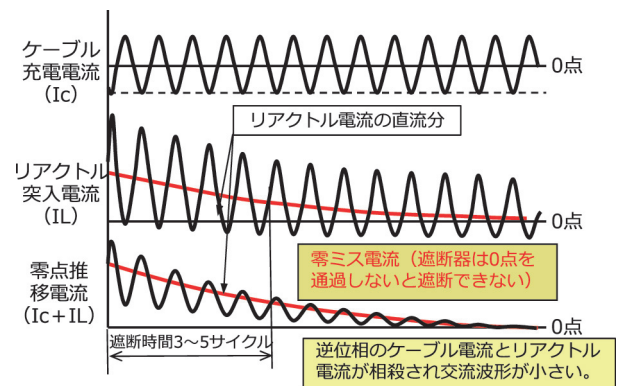


図10 電流零ミス現象の説明

3. 1. 4 大容量変圧器投入時の突入電流抑制対策

大容量変圧器を系統に接続する際、変圧器の過大な励磁突入電流により、系統電圧を著しく低下させることがある。以下のような抑制対策があるが、設備構成に応じて対策を検討する必要がある。

- ① 遮断器の投入位相角制御の採用……変圧器の残留磁束を測定し遮断器の投入位相 (タイミング) を制御する。
- ② 抵抗投入方式の採用……抵抗回路と直列に接続された遮断器を先行投入して突入電流を抑制し、その後に主遮断器を投入する。
- ③ 逆励磁方式の採用……非常用発電機で変圧器の低圧側から印加電圧を徐々に増加させ励磁が完了した時点で系統電圧位相に合わせて高压側遮断器を同期投入後、発電機を切り離す。

3. 1. 5 高調波共振現象の対策

長距離送電ケーブル設置により静電容量 (C) が大きくなると、システムのインダクタンス (L) との共振周波数が低下し、特定の高調波が拡大する。

$$\text{共振周波数} = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$$

共振周波数が低下すると、例えば第5次や7次高調波にて共振することがあり、システムの電圧歪が拡大し、高調波ガイドラインの規定値を超過させてしまうことがある。対策としては、高調波フィルタを設置して共振を回避する (図11,12)。

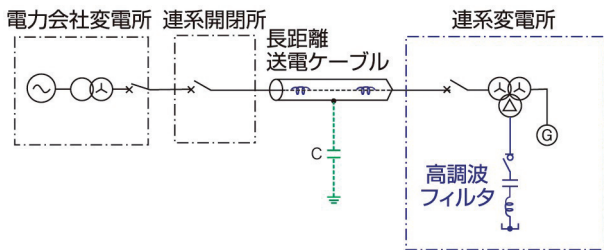


図11 長距離交流ケーブル送電を伴う風力発電システム

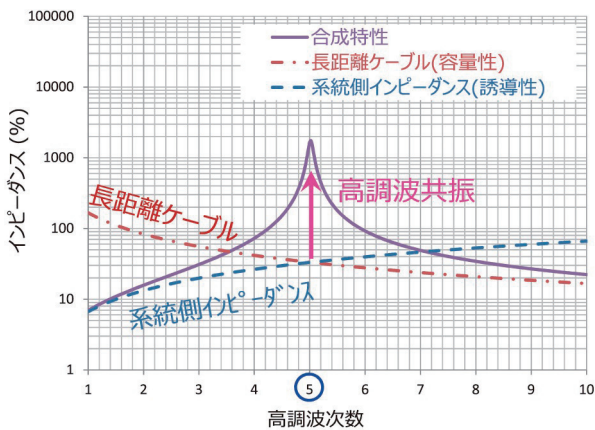


図12 周波数—インピーダンス特性：
長距離交流ケーブル系での高調波共振例

3. 2 今後の対応

ウインドファームあるいはメガソーラーにおいて長距離交流ケーブルを介して系統連系する場合には、本稿で紹介したような回路現象が発生することがある。ここで挙げた対策はあくまでも一例であり、当社では、電力品質対策に関して保有する知見と技術をもとに、事業者様・電力会社様の双方にご納得いただける提案活動を進めている (図13)。

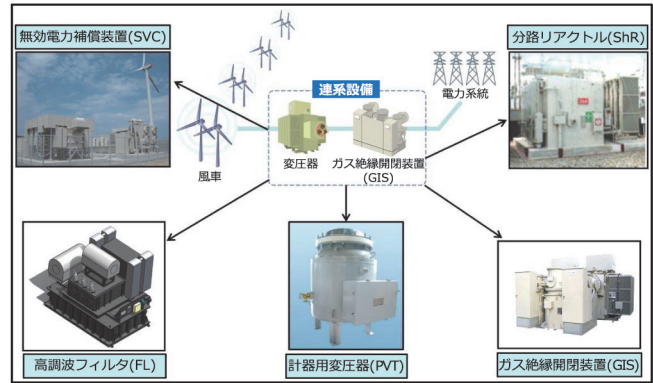


図13 電力品質と安定送電を支える電力供給システム

4. バイオマス発電設備

動植物由来する有機物を燃料として使用するバイオマス発電は、FIT認定による再生可能エネルギーの連系増加に伴い、国内でも2017年9月には1,300万kWを超過した。当社でもバイオマス発電設備の連系設備を納入する事例が増加しているが、2,000kWを超える大容量発電機または発電機台数が多い大規模な連系設備が多い。

5. まとめ

今回は再生可能エネルギーのうち、太陽光、風力、バイオマスのみを取り上げその連系設備や回路現象について紹介した。我が国においては2030年には総発電電力に占める再生可能エネルギーの比率が22~24%との見通しである。したがって、再生可能エネルギーの導入は継続して推進され、当社の連系設備を採用頂く機会はますます増加するものと期待される。

今後も、当社のコア技術である系統解析技術や、蓄電池用PCS、電力品質改善装置などのパワーエレクトロニクス技術、コンパクト、高信頼の電力機器を通して、良好な電力品質を確保した再エネ電源の系統連系に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁「エネルギー白書2018」(2018.6.8)
- (2) 後藤、他：「太陽光発電システム導入拡大と顕在化する技術課題」、日新電機技報、Vol. 59、No. 2、pp. 9-14 (2014.10)
- (3) 藤原、他：「スマート電力供給システム (SPSS) ～前橋実規模検証から5つのソリューション提案～」、日新電機技報、Vol. 63、No. 1、pp. 47-57 (2018.4)
- (4) 黒田、他：「再生可能エネルギー導入拡大による課題とその解決に貢献する当社系統解析技術」、日新電機技報、Vol. 61、No. 1、pp. 27-35 (2016.4)

✎ 執筆者紹介



安達 哲也 Tetsuya Adachi
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング部
西部産業技術部長



三谷 寛資 Hiroshi Mitani
電力・環境システム事業本部
システムエンジニアリング部
西部産業技術部 グループ長