



当社の系統連系技術について

Our Technology for Grid Interconnection

荻原 義也
Ogihara Yoshiya

概要

カーボンニュートラルの実現に向け、再生可能エネルギーの主力電源化と電力安定供給（電力レジリエンス強化）のための基盤技術開発が求められている。

本稿では、その基盤技術を支える系統技術、パワーエレクトロニクス技術について、系統とインバータ電源、あるいは系統と発電機を接続する連系技術と広くとらえ、注入回路の適用、系統への直列電圧補償、限流型高速スイッチなどをキーワードに、当社が取組んできた各種連系技術として紹介する。

Synopsis

To pave the way for realizing “the Carbon Neutrality Target” by 2050, our society will have to take every measures simultaneously and extensively such as ; making renewable energy resources for main power generation, electrifying transportation vehicles, producing basic materials without using fossil fuels, and establishing widely supportive rules and subsidies by the government strategies.

We have constructed and demonstrated “SPSS (Smart Power Supply Systems)” facilities as an optimum energy solution for our customers, in our Maebashi works where the effective combination of cogeneration, photo-voltaic generation, Li-ion battery energy storage, and “ENERGYMATE” (energy management system) have been operated since 2014.

However, the Carbon Neutralization requires more challengeable and innovative technology developments, therefore, we are now tackling stable operation among inverter-based power sources on both of AC distribution system and DC distribution system to realize renewable-resource-driven microgrids with high resiliencies against unexpected power outages.

As core technologies for the above-mentioned, we will describe our noteworthy interconnection technologies composed of power system engineering and power electronics ;

- 1) Technology of harmonic current injection into power grid with reduced capacity of inverter through coupling circuit
- 2) Voltage dip compensation technology by series voltage injection from compact energy storage system
- 3) Semiconductor switch technology with current-rise limiting circuit between power grid and synchronous generator
- 4) Interconnection of PV system and battery energy storage system to power grid
- 5) Interconnection of large-scale windfarms to power grid through long AC cable transmission

1. はじめに

2020年に菅首相が世界に対して宣言した「2050年までにカーボンニュートラルを目指す」目標に向かって、再生可能エネルギー（再エネ）の主力電源化、輸送手段の電動化、化石燃料を使わない生産プロセスの開発、あるいはそれらを支える各種制度の立ち上げが同時並行して精力的に進められている⁽¹⁾。

当社は、2011年の東日本大震災を契機に、省エネルギーと経済性、電力安定供給を実現するためのソリューションである SPSS^(*) (Smart Power Supply Systems) を提唱し、当社前橋製作所での実証とお客様への提案活動を進めてきた。コジェネ発電機、太陽光発電（PV）設備、蓄電池設備、負荷設備とそれらを束ねるEMS（エネルギー・マネジメント・システム）により、購入電力量の削減、CO₂発生量の削減に大きな効果をあげてきた⁽²⁾。

しかし、カーボンニュートラル化にはさらに踏み込んだソリューション提案とそのための技術開発が必要であり、現在は需要家側での再エネ主力電源化と電力安定供給（電力レジリエンス強化）のための基盤技術開発を進めているところである。

本稿では、その基盤を支える系統技術、パワーエレクトロニクス（パワエレ）技術について、系統とインバータ電源、あるいは系統と発電機を接続する連系技術と広くとらえ、当社が取組んできた以下の技術について紹介する。

- (1) 高調波電流をインバータから系統に効率よく注入する技術
- (2) 系統の瞬時電圧低下に対してインバータで直列に電圧補償する技術
- (3) 同期発電機と系統を限流型高速スイッチで連系する技術
- (4) PV設備、蓄電池設備における系統連系技術
- (5) 大規模風力発電所と電力系統をつなぐ長距離ケーブル連系システム技術

さらに、再エネ主力電源化、電力レジリエンス強化に向けた取組みについても紹介する。

2. 高調波電流をインバータから系統に効率よく注入する技術

当社は、分散電源の単独運転状態を検出する「エネリンク^(*)」という独自の装置を製品化している。これはインバータ、注入回路、次数間高調波など、当社がこれまで培ってきた複数の技術の融合した連系技術によるものであり、以下に技術の展開に沿って紹介する。

2. 1 注入回路を用いたアクティブフィルタ（AF）

交流の電力系統とインバータ電源を安定して系統に接続するためには、少なくともインバータ出力電圧は系統電圧と電圧振幅、周波数、位相を一致させる必要がある。特に、インバータにより特定の高調波電圧を発生させ、系統に高調波電流を注入することで、①系統の高調波電圧歪を抑制するAFや、②系統側の高調波インピーダンスを計測する装置では、「基本波電圧（系統電圧に対抗）+高調波電圧」をインバータ部から発生する必要がある。このため、本来の目的に対して、基本波電圧発生分だけインバータ容量が大きくなるという課題があった。そこで、系統とインバータ部の間に「注入回路」と呼ぶ、コンデンサとリアクトルの直列接続回路を設け、インバータ部に加わる（インバータが出力すべき）基本波電圧を小さく抑制する方式をAFに適用した。注入回路を用いたAFの回路構成例を図1に示す⁽³⁾。

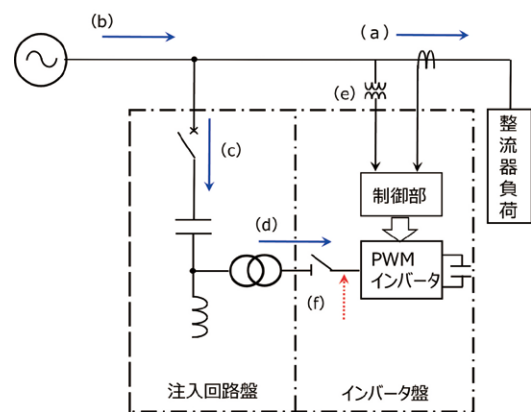


図1 注入回路を用いたアクティブフィルタ

AFは、整流器のような負荷から発生する高調波電流を系統側で打ち消す方向に、AFのインバータ部から高調波電流を発生させるのが一般的である。

図1の各部における代表的な出力電圧・電流波形を図2に示す。

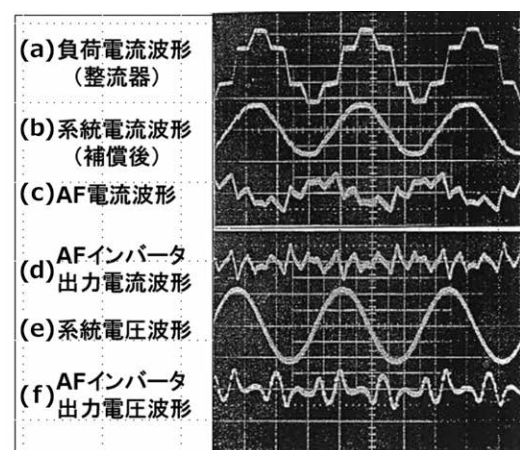


図2 図1の各部における電圧・電流波形

図2では、典型的な整流器負荷の電流波形 (a) に対して、AF電流波形 (c) を加えることで補償後の系統電流波形 (b) が得られる。一方、インバータ出力電圧波形 (f) に含まれる基本波成分は小さく、ほとんどが高調波電圧成分であること、インバータ電流 (d) にも基本波成分がほとんど見えないことから注入回路によりインバータ容量の大幅な低減効果が得られていることがわかる。インバータの直流側は電解コンデンサのみであり、注入回路を通して現れる小さな基本波電圧を使って同位相電流を流すことで直流電圧を一定に維持している。また、都心部に於て系統側と需要家の直列リアクトルのない進相コンデンサの間で高調波 (共振) 拡大が発生する可能性があるが、AFを高調波に対して等価抵抗 (共振に対するダンピング効果) となるよう制御することが有効である⁽⁴⁾。この場合は、インバータの直流側に有効電力が流入するが、インバータの直流電圧一定制御により基本波電流の形で系統に電力を返すことになるため、AFの見かけ上の運転効率が向上する。

2. 2 系統の高調波特性測定技術

AFと同じ原理で、インバータ側から系統側に基本周波数の非整数倍の高調波 (次数間高調波) 電流を注入することで、接続点から系統を見た「周波数/インピーダンス特性」を知ることができる。たとえば、系統の基本波電圧に同期させて微小振幅の次数間高調波電流 (4.5次と5.5次) を電力系統に注入する。この場合の注入点次数間高調波電圧・電流値から求めた、4.5次と5.5次の次数間高調波インピーダンスの平均を系統の5次調波インピーダンスとして算定できる。

負荷も含めた系統側の特性 (高調波電圧・電流や、周波数—インピーダンス特性) を知ることで、高調波発生源の探索に活用することを狙って図3のような可搬型の装置を製作し、実系統の高調波特性測定に使用した。主回路は主に、注入回路とインバータで構成している⁽⁵⁾。



図3 系統の高調波特性測定装置「HARMONIC DOCTOR」

2. 3 次数間高調波注入による単独運転状態の検出技術

この次数間高調波注入技術を用いた系統の特性測定技術をさらに発展させ、図4のように分散型電源と系統の接続点に設置して、系統側の開放停電状態 (分散型電源の単独運転状態) を検出する単独運転検出装置「エネリンク」を2001年に製品化した⁽⁵⁾。

注入する次数間高調波電流は、2次調波と3次調波の間の周波数 (100Hz~180Hz) を使い、系統側のインピーダンスを常時監視する原理である。また、常時の系統に発生する次数間高調波電圧は系統電圧の0.1%程度としている。したがって、フリッカを発生することも無く、分散型電源 (図4の発電機) の有効電力/無効電力制御に影響を与えることも無い。このような特徴ある単独運転状態の検出方式 (能動的方式) により、大規模太陽光発電所、風力発電所、小規模水力発電所などに適用され、高い信頼性を発揮している。

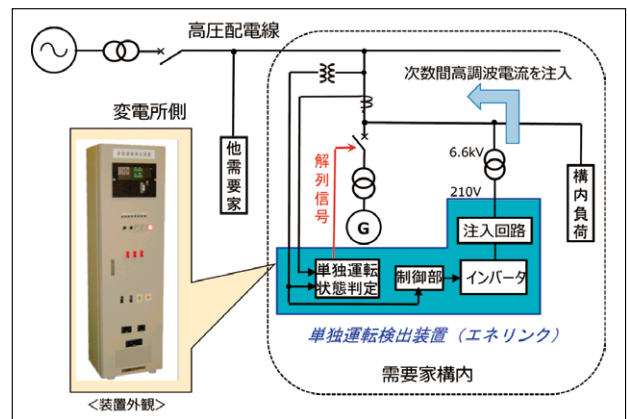


図4 次数間高調波注入による単独運転検出装置「エネリンク」

3. 系統の瞬時電圧低下に対してインバータで直列に電圧補償する技術

我が国の電力系統は停電頻度が極めて少なく、電力供給の中断は、雷などの自然災害に起因するごく短時間 (0.05~0.2秒。最長で2秒程度) の電圧低下 (瞬低) が大部分である。これに着目し、電圧低下分のみをインバータ電源により直列に加算・補償する原理の瞬低対策装置 (低圧回路用「ユニセーフ」、高圧回路用「MEGASAFE^(*)」) を製品化してきた⁽³⁾。

瞬低対策装置の動作原理を図5に示す。

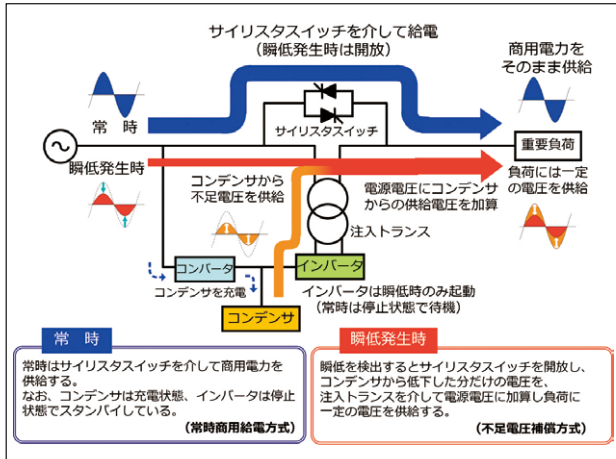


図5 瞬低対策装置「MEGASAFE」の動作原理⁽³⁾

系統側の電圧が正常時は、サイリスタスイッチを通して重要負荷に電力を供給する。系統側に電圧低下が発生すると、それを高速に検出し、インバータから不足分の補償電圧を供給すると同時に、インバータ出力電圧を利用して、サイリスタスイッチをターンオフさせることにより、重要負荷には安定した電圧・電流を供給するものである。

短時間かつ低下電圧分だけの補償となるため、必要なエネルギー供給量は少なく済み、エネルギー蓄積要素に直流コンデンサを使用することができる。直流コンデンサは、蓄電池に比べて劣化や周囲温度の影響が小さく、保守負担の低減、装置の小型、高効率化に貢献している。

図6に瞬低補償時のオシロ波形例を示す。

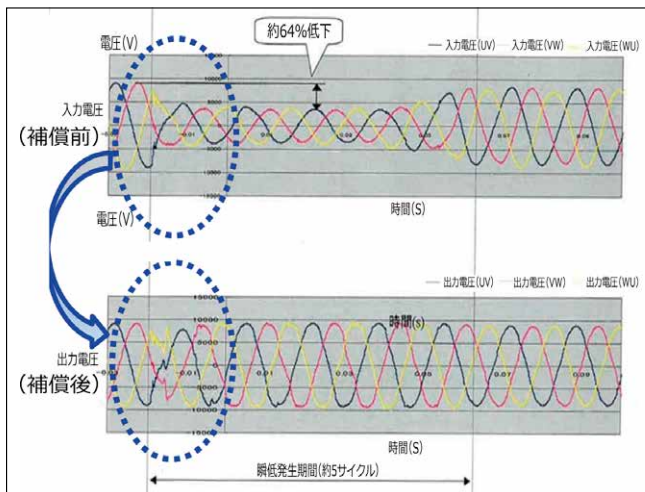


図6 瞬低対策装置「MEGASAFE」のオシロ波形例

■ 4. 同期発電機と系統を限流型高速スイッチで連系する技術

従来のコジェネ発電機システムでは、系統連系運転中に、電力系統に瞬低が発生すると、発電機から系統側（瞬低を引き起こした短絡故障点）に大きな電流が流れ、発電機の回転軸に過大な機械トルクが加わる。この時、発電機の軸が損傷しないよう保護するためのシェアピンが破断するという課題があった。また、系統と発電機の接続点電圧も低下するため、重要負荷が停止してしまうという可能性もあった。そこで、図7に示す高速限流遮断装置「CG-PACK^(*)」を製品化した⁽³⁾。

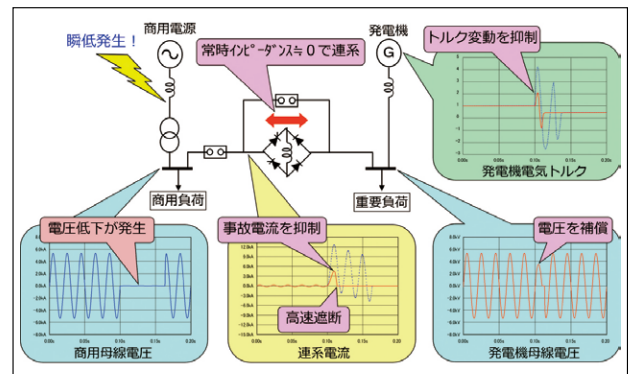


図7 高速限流遮断装置「CG-PACK」の動作原理⁽³⁾

「CG-PACK」は、ダイオードとサイリスタの混合ブリッジに直流リアクトルを加えて構成している。

常時はサイリスタを連続オンすることにより、発電機と系統の連系線潮流が一定の直流電流として直流リアクトルに流れるため、「CG-PACK」の内部インピーダンスはゼロとなり、常時の電圧変動は極めて小さくなる。

しかし、瞬低が発生した場合、健全な発電機電圧と系統電圧の差電圧が「CG-PACK」に加わるため、混合ブリッジの直流リアクトルが電流増加をブロック（電流増加速度を抑制）する。同時にサイリスタのゲート信号をオフすることで、「CG-PACK」は過電流を抑制しながら、半サイクル程度の高速で系統との連系線を遮断でき、発電機回転軸への過大な機械トルクの抑制と重要負荷の瞬低対策の双方において効果を得ることが可能である。

■ 5. PV設備、蓄電池設備における系統連系技術

当社は、某実験場で行われた家庭用PV発電装置の多数連系試験に供する単相2kWの太陽光発電用パワーコンディショナ（パワコン）「SOLAR PACK」

を1988年に開発している⁽⁷⁾。本装置は、MOSFET素子を使った20kHzスイッチングのPWM (Pulse Width Modulation) インバータと商用連系変圧器の組み合わせ（自然空冷）で非常に低い運転音を実現した。当時は、系統電圧波形に同期した正弦波信号を基準に、系統に力率1の正弦波電流を供給するための電圧を加算して、PWM制御の指令値 (Vref) とするシンプルな電圧制御型であった。制御ブロック図を図8に、外観写真、運転時の電圧・電流波形を図9に示す。

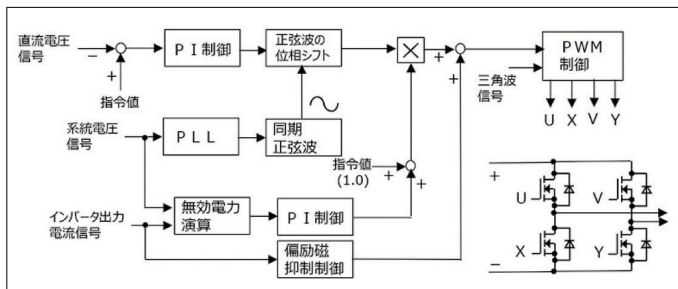


図8 2kWインバータの制御ブロック図

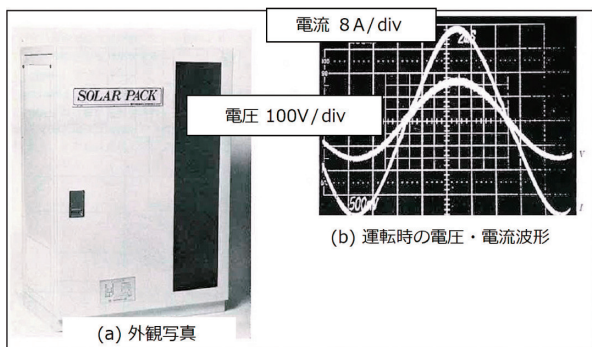


図9 2kW太陽光発電用インバータと運転時の電圧・電流波形

上下アームのMOSFET素子の同時オン（例えば、UとXにオンの誤信号）を避けるためにデッドタイムを設けるが、これにより出力電圧の低下と高調波電圧歪が発生する。デッドタイムの影響を抑制するために系統同期した矩形波の微小電圧をVrefに加えることで、図9に示すようにきわめて歪の小さい電圧・電流波形が得られている。

その後、パワコンの制御として、出力電流の波形歪を抑制し系統電圧変動に強い、瞬時電流制御方式を取り入れた。

一方、PV導入量が増えるにつれ、系統で瞬低などが発生した際にPV用パワコンが一斉に解列し、系統の需給バランスに悪影響を及ぼすことが懸念され、系統連系規程⁽⁸⁾により、FRT機能（系統の瞬低時でも運転継続する機能）が要求されるようになった。そこで、瞬低発生時の過電流抑制と復電時の速やかな出力

復帰を行うパワコン制御方式の開発を行った。

系統電圧波形の過渡的な乱れの影響を受けない同期正弦波信号を作り、これをもとに電流指令値を作成することで、瞬低発生・復帰時の過渡的な乱れも無く速やかな出力回復が可能である⁽⁹⁾。

社内の試験設備（30MVA短絡発電機など）を用いて模擬系統を構成し、実際に瞬低（短絡故障）を発生させてパワコンのFRT機能の検証を行った結果を図10に示す。系統電圧が三相とも瞬時にゼロに低下する厳しい条件に対しても、パワコンの過電流を抑制し、波形の乱れを最小に抑制する安定制御を実現していることがわかる。

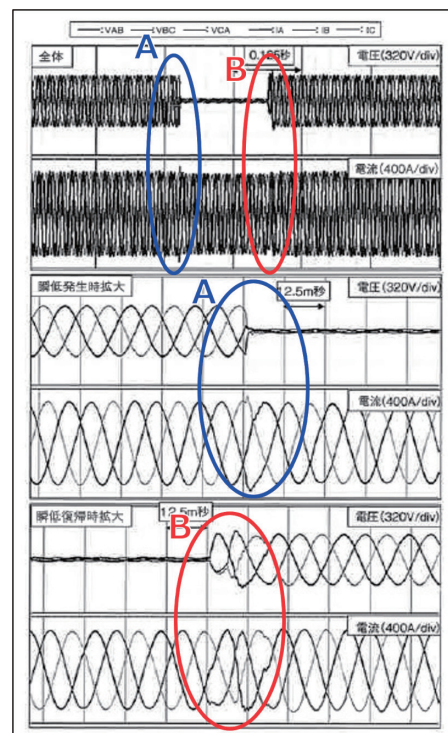


図10 FRT機能の確認試験（三相短絡）

PV用パワコンは、2012年度に導入されたFIT制度を機に飛躍的に生産台数が増加するとともに、大容量化のニーズ拡大をとらえ、当社は、最大単機容量1000kWまでシリーズ化「スマートパワコン^(*)」を行っている⁽¹⁰⁾。

蓄電池用パワコンも基本的には、PV用パワコンと同じ連系技術を採用している。図11は、当社の主なパワエレ製品の開発の流れを示したものである。

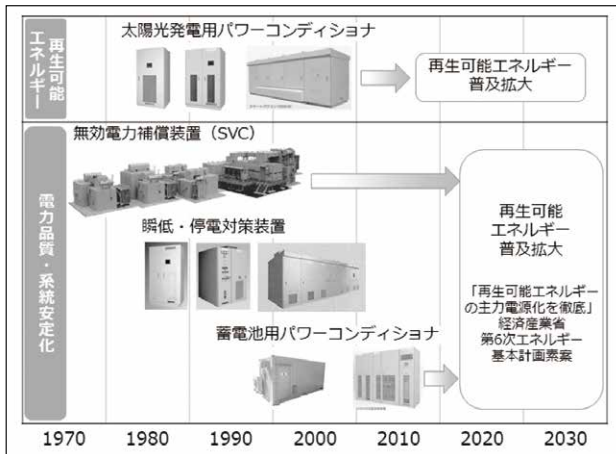


図11 当社の主なパワエレ製品

静止型無効電力補償装置（SVC）は、1973年に当社が世界に先駆けてサイリスタ位相制御リアクトルを用いた装置を実用化したことからスタートし、アーク炉電流起因の電圧フリッカの抑制、電力系統における電圧安定度向上などで貢献してきた。1996年には、大容量化の進展が目覚ましかったGTO素子を活用し、矩形波インバータとPWMインバータの直列構成による、±7MVA、22kV定格の自励式SVC（「VSVC」）を開発した⁽¹¹⁾。

矩形波インバータは、系統電圧と同じ振幅位相の基本波電圧を出力する。PWMインバータは、無効電力の供給・消費に応じて系統電圧の10～20%程度の電圧成分を、前述の電圧に加算・減算して制御する。

VSVCは、大容量低損失の矩形波インバータと、高速応答が可能な小容量高周波スイッチングのPWMインバータの組み合わせにより、「低損失で高速応答」の自励式SVC実現を狙ったものである。その後、GTO素子に比べて駆動が容易かつスイッチング損失の小さなIGBT素子の大容量化により、IGBT素子を用いた自励式SVCを風力発電設備向けなどに提供している。

6. 大規模風力発電所と電力系統をつなぐ 長距離ケーブル連系システム

再エネ主力電源化の中で、陸上／洋上の風力発電所が果たす役割は非常に大きい。いずれも風況の良い場所は変電所から遠く、かつ送電線敷設の制約が少ないという理由から、長距離地中ケーブルによる送電形態（発電事業者の自営線）が採用されており、今後も増加していくと考えられる。

一般的な電気回路上の特性としては、インダクタンス（L）とキャパシタンス（C）の存在により、過渡的な振動現象や、定常的な特定周波数成分の共振拡大

が起きることが知られている。一般に、上位の電力系統はL特性（誘導性）を示す。地中ケーブルは主導体とシース／大地が誘電体をはさんだ電極となる構造であるため、C特性（容量性）であり、地中ケーブルの長距離化により、 ωCV^2 （ $\omega=2\pi f$ f：商用周波数、C：静電容量、V：接続回路電圧）で表される充電容量が増え、ケーブル系統の電圧上昇をもたらすことが知られている。

同時に、共振現象が発生する周波数（高調波次数）が低い側にシフトし、系統側に顕著に存在する高調波次数と一致すると、その高調波電圧を拡大して他の需要家に悪影響を及ぼすことが懸念される。

このような、長距離ケーブルの導入において留意しなければならない交流系統の代表的な回路現象を表1に示す⁽¹²⁾。

表1 長距離ケーブル系統における代表的回路現象と対策例

事象	回路現象と対策例
電圧変動	長距離ケーブル開閉時の電圧変動(特に電圧上昇)
	【対策例】分路リアクトル(ShR)、SVCの設置
ケーブル残留電圧	線路開放時に、ケーブルには最大でピーク電圧が残留する。この状態で線路遮断器を投入すると、過電圧が発生し接続機器に悪影響を及ぼす。
	【対策例】VTを線路側に設置しケーブル残留電荷を放電(巻線の耐量確認要)
遮断器電流のゼロミス現象	ケーブルの充電電流とShR電流が重なると交流成分が打ち消され、過渡直流成分によって電流ゼロ点を迎えない時間が発生して、遮断器が遮断不能となる可能性がある。
	【対策例】系統運用による対策、抵抗器付き遮断器の採用
高調波拡大(共振)現象	ケーブルの静電容量Cと系統側インダクタンスLとの共振周波数に近い系統既存の高調波次数の電圧を拡大させる。 共振周波数 $=1/(2\pi\sqrt{LC})$
	【対策例】高調波フィルタの設置

これらの検討や対策は、発電事業者が実施することとされており、当社では、電力会社や発電事業者から提示された条件（回路データ）をもとに、系統解析により課題有無や最適な対策の提案を行っている。

たとえば、高調波の検討にあたっては、まず高調波解析により対策の要否を見極める必要がある。高調波解析には、信頼度の高い周囲回路条件（系統背後の高調波電圧値、系統との連系点近辺の回路条件、特に他のケーブル系統の存在・設置計画）を数値データとして提示いただくことが必要である。

7. まとめ

カーボンニュートラル実現には、再エネの主力電源化と電力レジリエンス強化の両立が必要である。系統の安定運用の観点から、過渡現象（雷撃による送電線地絡故障、発電機脱落など）に対する系統周波数の維持や電圧安定化が必要となるため、電源を系統に接続する際のルールとなる技術要件として、グリッドコードの制定検討も進められている⁽¹³⁾。

鉄やセメントなどの生産プロセスは、供給が安定している化石燃料を燃やすプロセスから自然由来で供給が不安定な再エネ電源利用にシフトしていくと考えられる。電力の安定供給に向けた取組みは、今後ますます必要となり、経済産業省から、需要家リソースを活用した「地域マイクログリッド構築の手引き」が公開されている⁽¹⁴⁾。

これを受け、当社ではSPSSの適用拡大に向けて、地域マイクログリッドの要となる蓄電池パワコンの制御技術開発に取り組んでいる⁽¹⁵⁾。

また、従来の交流電気設備に対して、蓄電池、PV、EV充電器などを直流ネットワークにつなぐ形で、交流配電と直流配電の並列運転の実現も考えられる。当社で実証試験中の直流配電システムは、交流系統とは単純なダイオード整流器を介して接続されており、系統への逆流や、単独運転による波及もなく、グリッドコードの制約を受けないと考えられる⁽²⁾。

2050年のカーボンニュートラル達成に向かう道は平坦ではないが、当社はカーボンニュートラル化を支えるSPSSの提案メニュー拡充に向けた技術開発と提案を、今後も続けていく所存である。

参考文献

- (1) 「総理の一日 2021年4月22日 地球温暖化対策推進本部」 首相官邸ホームページ
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/actions/202104/22ondanka.html(2022年10月17日に利用)
- (2) 藤原 他「持続的な成長を支えるスマート電力供給システム (SPSS)」日新電機技報Vol.66 No.2 (2021年1月)
- (3) 河崎 他「電力品質を改善する製品」日新電機技報Vol.59 No.2 (2014年10月)

- (4) 荻原 他「LC結合回路方式アクティブフィルタの66kV回路試験結果」電気学会 電力技術研究会 PE-88-157 (1988年6月)
- (5) 「電力品質に関する動向と将来展望」電気協同研究会 第55巻 第3号 (2000年1月)
- (6) 石倉 他「次数間高調波注入方式による単独運転検出の製品改良とその適用状況」SEIテクニカルレビュー第190号 (2017年1月)
- (7) 栗尾 他「2kW家庭用太陽光インバータ」日新電機技報Vol.33 No.2 (1988年4月)
- (8) 日本電気協会「系統連系規程JEAC 9701-2019」(2019年5月)
- (9) 宇田 他「太陽光発電用パワーコンディショナの理想的なLVVRT特性の実現」日新電機技報Vol.59 No.2(2014年10月)
- (10) 内藤 他「SDGsの達成に貢献するパワーエレクトロニクス技術」日新電機技報Vol.66 No.2 (2021年11月)
- (11) 松川 他「パワーエレクトロニクス製品の歩み」日新電機技報Vol.62 No.1 (2017年3月)
- (12) 黒田 他「再生可能エネルギー導入拡大に対応した系統技術」SEIテクニカルレビュー 第190号 (2017年1月)
- (13) グリッドコード検討会 電力広域的運営推進機関
<https://www.occto.or.jp/iinkai/gridcode/>
- (14) 「地域マイクログリッド構築の手引き」経済産業省資源エネルギー庁 2021年4月16日
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/pdf/015_s01_00.pdf(2022年10月17日に利用)
- (15) 柏原 他「地域マイクログリッドにおけるパワーコンディショナ自立運転時の課題とその対策への取組み」日新電機技報Vol.67 No.1 (2022年5月)

- (*1) 「SPSS」は、日新電機株の登録商標です。
- (*2) 「エネリンク」は、日新電機株の登録商標です。
- (*3) 「MEGASAFE」は、日新電機株の登録商標です。
- (*4) 「CG-PACK」は、日新電機株の登録商標です。
- (*5) 「スマートパワコン」は、日新電機株の登録商標です。

執筆者紹介



荻原 義也 Ogihara Yoshiya
特別フェロー