

第7回

大量普及への道を開いた 太陽光発電の系統連系技術開発

Development of grid interconnection techniques for PV power generation,
which opened a way to the massive penetration

小林広武*

1. はじめに

1973年の第一次石油危機を契機に、1974年に策定された「サンシャイン計画」では、石油代替エネルギー候補の一つとして、それまで人工衛星や灯台用の電源など、一部の特殊用途で使用されていた太陽光発電が取り上げられ、一般電力用の電源として実用化するための技術開発が始められた。この中では、当時ワット当たり2～3万円もしていた太陽電池の低コスト化技術、高効率化技術に加えて、その普及を図るために、集中設置のメガワット級システムや、住宅等の需要家設置の小形分散システムなど、種々の利用形態が考え出された。出力が不安定である太陽電池を効率的、安定的、経済的に利用するために、これらのシステムは殆どが電力系統に連系して運転することを前提とされた¹⁾。

しかしながら、太陽光発電システムの系統連系は、それまでに事例や検討例が全く無く、①出力変動や太陽光発電設置の需要家側からの電流の流し込み（逆潮流）による系統電圧の不安定化、②交流変換するインバータのスイッチング動作による系統へのノイズ波（高調波）の流し込み、③事故発生区間や作業区間を安全確保のために系統から分離した時に、その区間に危険な電圧を掛けてしまう単独運転の発生、等、電力系統の電力品質や安全性に影響を及ぼすことが想定された。これにより、系統連系運転を実現させるためには、このような影響の解明とその対策技術の確立が求められた¹⁾。

このため、「サンシャイン計画」推進機関の通商産業省（当時）は、1978年度より、電力系統への影響の解明と対策技術の検討を目的とした研究「光発電システムの研究」を（財）電力中央研究所（以下、電中研）に委託し、太陽光発電の逆潮流有りの

系統連系技術に関わる研究開発を開始した。

1981年度からは、委託元が、1980年設立の新エネルギー総合開発機構（NEDO、現在の新エネルギー・産業技術総合開発機構）に移り、以降はNEDO委託により進めた。

研究開発は、当時から我国で目指すべきシステム形態と見なされていた配電線連系の中・小容量分散システムを対象に、1978～1991年度にわたり、電中研泊江地区での基礎実験研究から、関西電力（株）六甲アイランド実験場での実規模スケールの実証研究開発まで3つのフェーズで段階的に行った。

最終成果は、1992年度に資源エネルギー庁通達の「系統連系技術要件ガイドライン」に反映され、これにより、送配電線の全ての電圧階級において、逆潮流有りの連系運転が可能となり、本格的な導入への道を開くかたちとなった。なお、筆者は1982年に入所し、以降、元当学会会長の武田行弘氏、太陽光発電系統連系の神様と呼ばれた滝川清氏らの諸先輩の指導・鞭撻を仰ぎながら本研究開発に携わった。

以下に、14年に及んだ系統連系技術開発の経緯と成果について紹介する。

2. 系統連系技術開発の経緯と成果

2.1 第1フェーズ（1978～1980年度）：電中研泊江地区での系統連系基本技術の実験検討

電中研泊江地区において、我国で最初となる実験用の系統連系形太陽光発電システムを構築し、基礎的な研究に着手した¹⁾。

初めに、当時、交直変換所やCVCF等に採用さ

*（一財）電力中央研究所 名誉シニアアドバイザー

れていた直交変換技術等を参考にしながら、系統連系用のインバータとして、3kW 他励式インバータ（スイッチングを連系点交流電圧波形等の外部信号により行うもの）、および 3kW 自励式インバータ（スイッチングを発振器等による内部信号により行うもの。他励式より変換効率や経済性面でやや劣るが、高調波の抑制や無効電力の制御が比較的容易）をそれぞれ試作した。

次いで、当時、無人中継所等の特殊用途で製造されていた太陽電池モジュールを各メーカから購入し、3kW 級太陽電池アレイ 2 セットを製作・設置するとともに、各インバータ出力側を構内の模擬電力系統設備に接続した。これらにより実験用の系統連系形太陽光発電システムを構築した（図 1）。なお、当時の太陽電池価格はワット 1 万円以上、モジュール変換効率は 5～7% 程度であった。

当システムによる実験研究を通じて、太陽電池から効率よく電力を取り出すための太陽電池アレイ構成法やアレイ出力電力制御方式、各インバータの自動起動・停止法を含めた運転制御方式、高調波抑制方式、システム内部事故や配電線の事故、停電を検出するための保護リレーの種類と各整定値、等の系統連系形システムの基本的な構成法、運転制御方式、ならびに系統保護方式を取りまとめた。併せて、年間での発電電力量や、雲による日射強度変動時の出力変動特性等の運転データを取得した。

2.2 第 2 フェーズ（1981～1985 年度）：電中研赤城試験センターでの実証と連系技術要件案の作成

次のステップとして、小形分散システムの具体的な連系技術要件案を作成するため、実配電線への導入形態により近い構成での実験システムを構築し、実証試験により、前フェーズにおける検討結果の妥当性評価や改良点を検討した²⁾。この中では、2～

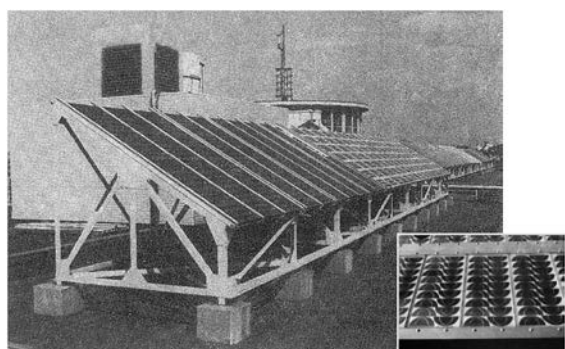


図 1 我国最初の実験用系統連系形太陽光発電システムの太陽電池アレイと使用した太陽電池モジュール例（電中研泊江地区の本館屋上）

5kW 級の 7 システム（自励式インバータ連系 6 システム、他励式インバータ連系 1 システム、計 21kW）を新たに設計、製作し、電中研赤城試験センターのこう長 1.8km の 6.6kV 実験用配電線の 3 地点にそれぞれ低圧配電線を介して分散連系させた。これらによって実験システムを構築した（図 2）。

本試験設備により、配電線の電力品質、安定性、安全性に関わる各種実証試験を繰り返して行った。

これらの試験結果、ならびに明らかになった問題点についての対応策の検討結果を踏まえて、小形分散システムの連系運転方式、系統保護方式に関わる具体的な連系技術要件案を次のように取りまとめた²⁾。

- ・高調波電流の抑制：配電線の電圧歪み率（50Hz 等の基本波電圧に対する高調波電圧の割合）を、各電力会社で目標としている 5% 以下に保つため、インバータ出力電流の歪み率を総合 5% 以下、各次 3% 以下に抑えるようにする。
- ・運転力率：連系運転による配電線の電流増や電圧変動を抑制するため、0.95 以上で一定制御する。
- ・配電線適正電圧の維持：電気事業法で規定されている供給電圧範囲（ $101 \pm 6V$ ）を維持する。特に逆潮流時に配電線のインピーダンス（抵抗体）により電圧が上昇し、上限（107V）を逸脱する場合があるため、出力抑制等の逸脱防止機能を搭載する。
- ・インバータスイッチング方式：力率調整と高調波電流抑制が容易な PWM 制御の自励式を推奨する。
- ・系統保護方式：システム内部故障の波及防止、配電線短絡事故検出、および配電停止区間の単独運転防止のため、交流過電流検出リレー、交流過電

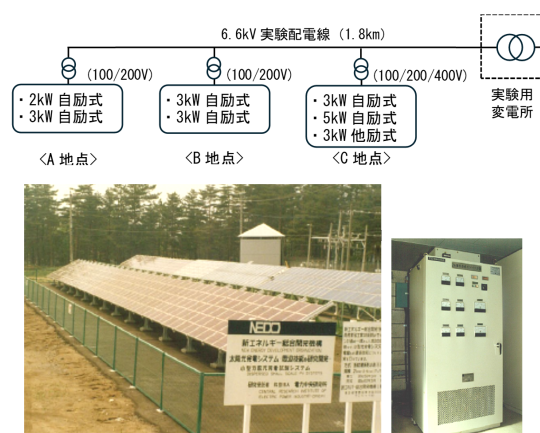


図 2 実験システム構成と A 地点の太陽電池アレイ、自励式インバータ（電中研赤城試験センター）

圧／不足電圧検出リレー，および周波数上昇／低下検出リレーを搭載する。またシステムの安定性を保つため，過電流検出リレーを除き，各検出リレーには適切な検出時限を設け，瞬時電圧低下等の軽微な系統じょう乱に対し不要検出しないようにする。

2.3 第3フェーズ（1986～1991年度）：六甲アイランド実験場による総合実証と連系技術の確立

第2フェーズで取りまとめた小形分散システムの連系技術要件案とその対応技術の妥当性を最終的に検証し，逆潮流有りでの実配電線連系運転を可能とする系統連系技術を確立させることを目的に，関西電力（株）との共同受託により，神戸市の関西電力六甲アイランド実験場に，負荷装置併設の住宅用2kW級太陽光発電システム100台と設備容量500kVAの6.6kV高圧模擬配電系統から構成される実スケールの実証試験設備を建設した³⁾（図3，図4）。本設備は，当時，世界的にもユニークなもので，設備や成果は，国際会議やIEA活動を通じて，欧米等の各国からも注目を集めた。

この中の100台の連系用インバータは，住宅向けのプロトタイプ機として国内メーカ6社に分担発注し，それぞれ第2フェーズで取りまとめた連系技術要件案に従った各種連系機能を搭載させた。6.6kV



図3 200kW 太陽光発電配電線連系実験設備
（関西電力（株）六甲アイランド実験場）

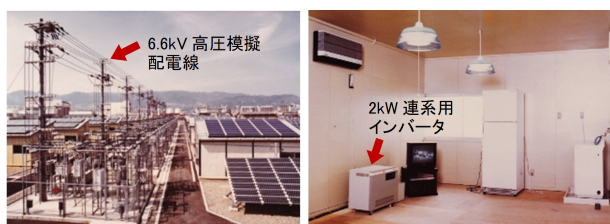


図4 6.6kV 高圧模擬配電設備（左）と模擬住宅内の2kW太陽光発電用インバータと家電負荷（右）

高圧模擬配電線は，電氣的に最大10kmまでのこう長を模擬できるようにし，これら100台のシステムを，それぞれ低圧線を介して分散連系させた。

本実証試験設備により，配電線の電力品質，安定性，安全性に関わる各種実証試験を実施し，連系技術要件案と対応技術について総合評価した。

その結果，新たな課題や改良点として，①電力品質関係では，導入量が増加すると逆潮流による配電線電圧上昇が顕著となり，電圧上限逸脱の防止には，各インバータに進相無効電力運転機能（出力電流の位相を連系点電圧に対して進ませる機能，配電線インピーダンスとの兼ね合いで配電線電圧が低下）を追加し，出力抑制方式と併用することが効果的であることを明らかにした。②安全性関係では，単独運転の防止において，モーター負荷の存在などの条件によっては，発電電力と負荷消費電力がバランスまたはそれに近い状態の時に，単独運転区間の電圧，周波数の変化がともに小さくなり，前フェーズで提案した電圧・周波数異常検出リレーのみでは検出できない場合のあることが明らかになった。

②の単独運転の発生は，確率的には低いケースと考えられるが，安全確保上の新たな重要課題となり，1989年度より3ケ年をかけて，多数台での連系運転ケースを含め，このような発電電力と負荷消費電力がバランスしている場合でも確実に検出できる単独運転検出方式の開発と実証に取り組んだ。

単独運転検出方式の研究は，上記②の結果の国内外学会での公表等により，海外を含め，大学，研究所，メーカ等の外部機関でも盛んに行われた。本プロジェクトでは，独自で考案・改良した方式のほか，これら外部機関で考案された方式も取り入れ，その分類として，インバータ自らが能動的に出力や周波数に変動を与えるか否かで，受動的方式，能動的方式に分け，各々以下の各方式を候補として選定した。

- ・受動的方式：位相監視方式（電圧位相跳躍検出，周波数変化率検出），高調波電圧監視方式（3次高調波電圧急増検出方式など）
- ・能動的方式：周波数変動方式（周波数シフト方式，周波数バイアス方式），出力電力変動方式（有効電力変動方式，無効電力変動方式）

各々の方式について実証試験，ならびに数値シミュレーションを行った結果，不検出となる発電電力と負荷消費電力の比率範囲は，いずれも電圧・周波数異常検出リレーのみの場合よりは狭まるものの，複数台連系時を含めて不検出となる条件が無く，確実に検出できる方式は見つからなかった。

この課題は、本系統連系技術開発の上での最後のハードルとなったが、最終的に、各方式の不検出範囲を精査した結果、例えば、高調波電圧監視方式と周波数変動方式では不検出範囲が重ならず、両者を組み合わせることで、不検出範囲が無くなることを見出した。実際にインバータ 25 台に上記の組み合わせによる検出方式を搭載し、25 台全台を連系運転させた状態で試験を行った結果、最大でも 2 秒以内で全台の単独運転を停止でき、不検出範囲は無くなることを検証した³⁾ (図 5)。

以上により、発電電力と負荷消費電力バランス時の単独運転検出は、前記の受動的方式および能動的な方式からそれぞれ 1 方式以上を選択し、これらを組み合わせることで解決できる見通しを得た。

以上の結果を含めて、小形分散太陽光発電システムの逆潮流有りでの最終的な連系技術要件案と対応技術を取りまとめ³⁾、実配電線への逆潮流有りでの連系を可能とする系統連系技術を確立させた。

3. 成果の系統連系ガイドラインへの反映

1988 年にクローズアップされた地球環境問題により、系統連系形太陽光発電の早期導入への気運が高まる中、本成果は、プロジェクト終了翌年度の 1992 年度に資源エネルギー庁通達の「系統連系技術要件ガイドライン」に、また、1993 年度にそれを補完・補足する民間自主指針である「分散型電源系統連系技術指針 (JEAG 9701)」(現在の「系統連系規程 (JEAC 9701)⁴⁾」の前身)に、それぞれ、ほぼ提示した連系技術要件案通りの内容で盛り込まれた。これにより、これらガイドライン、指針に準拠することで、それまで容認されなかった低圧配電線

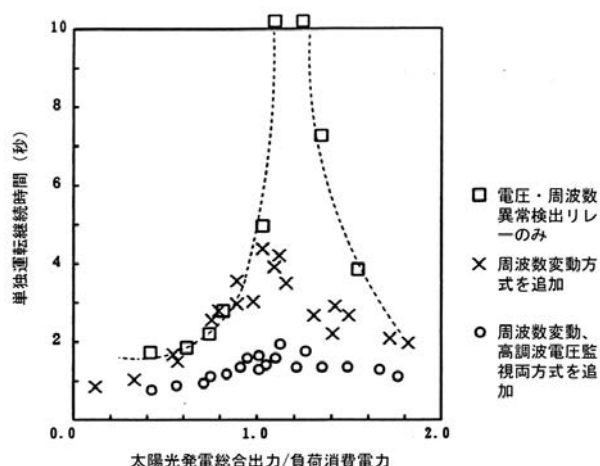


図 5 単独運転継続時間の比較
(2kW 級太陽光発電システム 25 台連系運転時)

連系を含め、送配電線の全ての電圧階級において、逆潮流有りでの連系運転が可能となった。

4. あとがき

サンシャイン計画での太陽光発電の系統連系技術開発は、筆者を含め受託機関合せて総勢 70 名に及ぶ研究員により 14 年もの長期にわたって実施された。

改めて振り返ると、結果的には、その成果は、カーボンフリーに向けた太陽光発電大量普及への道を開いたかたちとなり、我国のエネルギー・環境問題解決に向けての大きな意味をもった研究開発の一つであったと言える。また、筆者にとっては、その後の研究活動に役立った多くの経験が得られ、本研究開発に携われたことは大変意義深いものであったと改めて感じている次第である。

連系技術要件は、その後、国の導入目標値の改訂や実際の導入量に合わせて、逐次、改良・追加が行われ現在に至っている⁴⁾。一方、第 7 次エネルギー基本計画では、2040 年までに太陽光発電を更に現状の 3 倍程度 (2 億 kW 程度) 導入する見通しとしている。これにより、今後は国全体での余剰電力問題や系統全体での安定化問題がますます顕在化することが想定され、引き続き、系統連系に関わる技術開発課題は多く存在している。今後とも、若い方を含め、出来るだけ多くの方がこのような問題に関心を持ち、技術開発に鋭意参加されることを期待する。

参考文献

- 1) 昭和 54 年度サンシャイン計画委託研究成果報告書 太陽光発電システムの研究開発 (光発電システムの研究開発), (1980 年)。
- 2) (サンシャイン計画) 昭和 60 年度新エネルギー総合開発機構委託業務成果報告書 太陽光発電システム実用化技術 周辺技術の研究開発, (1986 年)。
- 3) (サンシャイン計画) 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 (総括版) 太陽光発電システム実用化技術 周辺技術の研究開発 (系統連系制御技術の実証研究開発), (1992 年)。
- 4) 系統連系規程 (JEAC 9701-2024), (2024 年), (一社) 日本電気協会系統連系専門部会編。

著者略歴



小林広武（コバヤシ ヒロム）

北海道大学工学部電子工学専攻修士課程修了後，1982年に電力中央研究所に入所．太陽光発電を中心とした分散型再エネ電源の電力系統連系技術，分

散型電源大量導入に対応する次世代配電システムなどの研究開発に従事．現在，同研究所名誉シニアアドバイザー，博士（工学），明治大学理工学部兼任講師，日本太陽エネルギー学会理事・フェロー，電気学会，米国電気電子学会（IEEE）会員．