

グリッドコード改訂に伴う スマートインバータと系統連系試験技術

Smart Inverter and Interconnection conformance testing according to Grid Code

橋本 潤^{*‡}・大谷謙仁^{*}

1. はじめに

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、国内でもグリッドコード整備の議論が進められつつある。特に普及が進む太陽光発電は、パワーコンディショナ（以下、インバータ）により電力系統に連系されることから、スマートインバータと呼ばれる高機能化インバータによる系統安定化等への貢献が期待されており、その機能要件等を明示するグリッドコード整備の検討が進められている。国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、「産総研」）は、将来、分散電源（以下、DER）に必要なスマートインバータの機能に関連する研究開発を進めてきた。各国のグリッドコードに適合する海外認証を含む系統連系試験技術への対応やその試験環境を整備している。本稿では、2章で欧米を中心としたグリッドコード整備に伴う「スマートインバータや系統連系試験の動向」について述べ、3章で各国のグリッドコード改訂に伴う「産総研のスマートインバータに関する取り組み」について報告する。

2. スマートインバータと系統連系試験の動向

2.1 海外動向

再生可能エネルギーの普及に伴い欧州を中心に、DERが具備すべき系統サポート・保護機能がグリッドコードに盛り込まれ、その試験法の改訂が進められてきた。例えばドイツでは、2003年に大型風力発電所に初めて系統サポート機能の実装を求める連系要件が策定されている。

欧州各国では、それぞれの国でグリッドコードが異なる。そこで、欧州全域の市場統合および自由な電力取引の実現を目指して2009年に欧州規制「Regulation (EC) No 714/2009（国境を越える電力取引での送電網へのアクセス条件に関する規制）」

において、「欧州共通ネットワークコード（Network Code：NCs）」の策定を求められ、欧州電力系統運用者ネットワークENTSO-E（European Network of Transmission System Operators for Electricity）に策定権限が付与された。これによりENTSO-Eは、欧州全域共通のNCs策定を進め、再エネ（DER）を含む電源の系統連系要件「NC:Grid Connection（系統連系）」に関わる分散電源連系要件としてRfG（Requirement for Generators）を2016年5月に発効し、EU加盟国は2019年4月までに自国のグリッドコードをRfGに対応することを義務づけた⁽¹⁾。2019年10月現在、全てのEU加盟国でRfGに対応した国内規程の申請が完了しており、一部の国（フランス、スペイン、ポルトガル、ギリシャ、オランダ、ベルギー）を除き、発効までの対応が完了している^(2,3)。

RfGは、送電系統に必要な連系要件を目的としており、配電系統接続要件（電圧制御、保護機能等）は除外されている。これらの除外項目は、各国のグリッドコードや国際規格で定められている。配電系統設備要件に対応しかつ系統サポート機能を含む技術要件を包括した欧州規格がEN規格（EN50549-1、-2）である。TS/EN 50549-1：2019（LV）およびTS/EN 50549-2：2019（MV）は、配電系統接続要件としてRfGに対応するためCENELEC TC8X WG03により審議され2019年に改訂されている。それぞれLV（230/400V帯）及びMV（1kV - 36kV帯）を対象としており、RfGの定めるTypeA（0.8

^{*} 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所
再生可能エネルギー研究センター
主任研究員
(〒963-0298 福島県郡山市待池台2-2-9)
[‡] e-mail : j.hashimoto@aist.go.jp

kW 以上、110kV 未満)、Type B (1MW 以上、110kV 未満) 発電設備に対応している。なお、RfG では、再エネを含む全ての電源が設備容量、連系電圧等により Type A, B, C, D の 4 つに分類されている。詳細は、RfG 本文を参照されたい。現在、EN50549-1, -2 に対応した試験法である EN 50549-10 の改訂審議が進められている⁽⁴⁾。

一方、米国では、欧州で進む DER に求める系統サポート機能いわゆるスマートインバータ機能の要件化を背景に、再エネの導入が進むカリフォルニア州の配電系統接続ルールである CA Rule21 の改訂を進める Smart Inverter Working Group (以下、SIWG) 設立が 2013 年にアナウンスされた。SIWG では、分散電源に用いるスマートインバータの機能として 3 つのフェーズに分けて議論を開始。Phase1 が自端機能、Phase2 が通信機能、Phase3 が先進機能である。カリフォルニア州の動きに対応して、IEEE 1547a-2014 (追補) が 2014 年に発効され、DER に一部の系統サポート機能の動作を許容するように改訂されている。なお、IEEE 1547 (Standard for Interconnecting Distributed Resource with Electric Power System) は、DER の系統連系要件に関する標準規格であり、2006 年に定められた米国のエネルギーに関する法律である「Energy Policy Act of 2005」のセクション 1254「Interconnection Services」において準拠がもたれているものである⁽⁵⁾。翌 2015 年に、CA Rule21 の Phase1 (自端機能) の系統サポート機能を求める改訂が発効されている⁽⁶⁾。米認証機関 UL は、この対応のためインバータの系統サポート機能試験法を含めた認証規格 UL1741 SA⁽⁷⁾ を 2016 年 9 月 7 日に発行している。これに伴いカリフォルニア州は、UL1741 SA が発行されてから 1 年以内の対応を義務付けしている。2018 年 4 月に IEEE 1547-2018 全面改定版が発効され、IEC 61850-4-70 で定義されている多くの系統サポート機能をインバータに実装することが義務化された。現在は、IEEE 1547-2018 に対応した系統連系試験規格である IEEE P1547.1 の改訂が進められている。本改訂は、2020 年 3 月頃の発効が見込まれる。認証規格 UL1741 の改訂も同時並行に進められており、2020 年 6 月頃の発行が予定されている。2021 年に全ての系統サポート機能に対応した DER の市場投入が予想されている。

2.2 国内動向

我が国では、再生可能エネルギーを含む分散電源

には、電力系統の電力品質 (電圧、周波数等) の維持に積極的に貢献することは求められておらず、インバータの系統サポート機能を有効にすることは認められてこなかった。一方で、安全に重要な保護機能の強化 (FRT や単独運転防止装置等) は、欧米の対応と遅れることなく進められてきている。しかし、近年再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、系統全体のレジリエンスを強化することが不可欠となり、再エネ大量導入・次世代電力 NW 小委員会において、グリッドコード整備する方針が 2018 年 12 月に示された。これに伴い、まずは新規の風力発電が具備すべき調整機能等の検討を開始した。これらの検討を踏まえつつ太陽光発電等、他の電源についても併せて検討が進められる見込である。

3. 産総研のスマートインバータに関する取り組み

3.1 開発・評価プラットフォーム

産総研の福島再生可能エネルギー研究所 (以下、FREA) のエネルギーネットワークチームでは、再生可能エネルギーを最大限活用するため新しいエネルギー供給モデルの提案を目指した研究開発を行っている。特に、太陽光発電や風力発電のような DER の最適利用技術、マイクログリッド技術、エネルギー貯蔵・蓄電技術による複数の DER のシステム統合化技術により「安全・安心・公平」な次世代エネルギーシステムの技術開発を目指している。この研究開発のプラットフォームとして、SoRA (ソーラ) プラットフォーム (Solar Resource Application platform) の構築を進めている。このプラットフォーム戦略では、デバイスからシステムまでの開発基盤としてソフトウェア・ハードウェアの双方の試験環境や試験ツールを構築することを目指している。また産総研は、IEA ISGAN の活動の一環である国際スマートグリッド研究施設ネットワーク (SIRFN) に参画し、主要メンバーと共に、スマートインバータ等の開発・試験・標準化などの国際的に整合の取れたプラットフォームの整備を推進している。なお ISGAN とは、2011 年 4 月に国際エネルギー機関 (IEA) が、各国が有するスマートグリッド技術や経験を共有するためスマートグリッド行動ネットワーク (ISGAN: International Smart Grid Action Network) として開始し、スマートグリッドに代表されるエネルギー関連技術の開発と展開を支援することを目的としている。SIRFN は、その作業部会のひとつ (Annex 5) であり、ISGAN に参加して

いる 15 ヶ国が参加しており、スマートグリッドの研究、テストベッ施設と関連プロジェクトを連携させ知識の共有、人材交流により国際的な研究開発を推進することが目的である。

3.2 スマートインバータの導入評価ソフトウェア

スマートインバータに代表される系統サポート機能は、既に欧米で導入実績があり、対象機器への機能実装に伴う技術的な課題はほぼ解決済みである。ただし、グリッドコードの整備や機能実装と機能有効化（機能の有効／無効を含めた整定値）は別問題ととらえるべきである。系統サポート機能は、共通する連系要件として整備すべきであるが、例えば整定値などの条件は、再エネの導入比率や系統に応じて柔軟に対応できるようにすべきである。従って、地域や連系点に応じてその機能の効果を鑑み機能の有効化を進める必要がある。このスマートインバータの系統サポート機能の効果を検証するためにスマートインバータの系統サポート機能による主に配電系統への効果を検証するための系統解析シミュレーションツール（SoRA-Grid）を開発した。

SoRA-Grid は、将来普及が見込まれるスマートインバータの効果を検証する国内初のオープンソフトを目指している。評価に用いる系統モデルは、機器ライブラリを用いて容易に作成可能である。本ソフトのライブラリでは、欧米で進むスマートインバータの系統サポート機能に焦点を当てモデル化しており、国内インバータに実装されている電圧抑制機能や IEC 規格、IEEE1547 規格等で定義される系統サポート機能を網羅できるように実装機能を選定している。なお、将来的な系統サポート機能の変更を想定して汎用性の高い設計になっている。

3.3 試験環境概要

FREA には、スマートインバータ等の次世代電力変換器の研究開発プラットフォームとして、2 つ

の大きな設備、分散電源システム試験室（3.3.1 節）とスマートシステム研究棟（3.3.2 節）を有する。これらの試験設備を活用することにより、欧米で進められているグリッドコード改訂に伴う各国の認証試験を含む新たな系統連系試験への対応するための技術開発を進めている。またスマートインバータや関連機器の評価・試験や関連するスマートグリッドの研究開発などにも活用している。この 2 つの設備は、デジタルリアルタイムシミュレータ（DRTS：Digital Real Time Simulator）との組合せにより、シミュレーション上で再現した仮想系統と系統模擬電源がリアルタイムにリンクし、実際の環境に近い環境での実証試験が可能となる。DRTS を用いた HIL 試験技術については、3.5 節の次世代系統連系試験技術開発で述べる。

3.3.1 分散電源システム試験室（DER system Lab）

2014 年 4 月に整備された分散電源システム試験室（DER system lab）は、系統模擬電源（500 kVA）、双方向 DC 電源（600 kVA）、蓄電池模擬電源（200 kVA）、模擬負荷（300 kVA）等を有し、様々な系統条件を再現可能である。系統模擬電源は、電圧・周波数をそれぞれ 1 サイクル毎に変化させることができ、例えばスマートインバータの機能試験やマイクログリッド等の模擬実証が可能な設備である。

3.3.2 スマートシステム研究棟（FREA-G）

産総研は FREA に「スマートシステム研究棟（通称 FREA-G）」を 2016 年 4 月に開所した（図 1）。スマートシステム研究棟は、復興庁の 2013 年度補正予算、東日本大震災復興特別会計「グローバル認証基盤整備事業（大型パワーコンディショナ）」で整備した研究施設である。本施設の特長は、3 メガワットまでの太陽光発電用大型インバータの試験等



図 1 スマートシステム研究棟（FREA-G）



図 2 系統連系試験室（M 室）

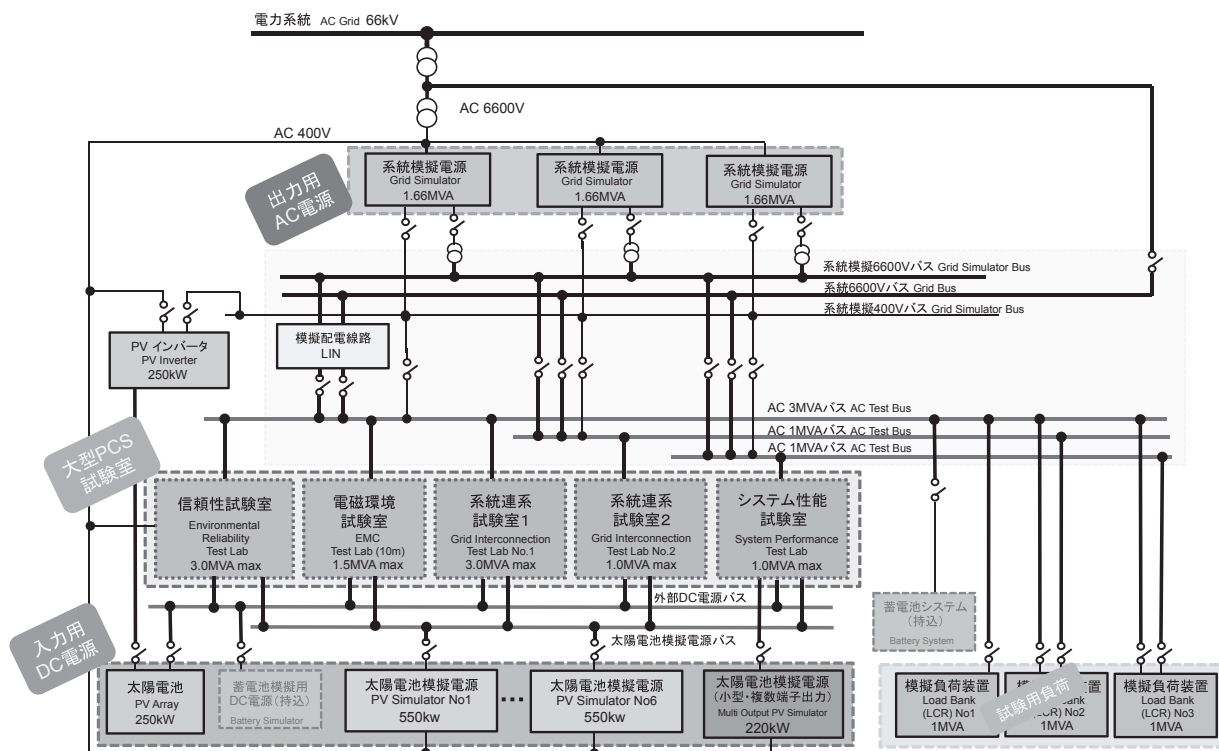


図3 スマートシステム研究棟の電気回路図

が実施可能な大型の電源設備に、耐候性の様な安全性能や、電磁放射による電磁影響の評価を行える試験設備を一つの施設に有することである。将来、分散電源が相互運用性を持つことや、直面する阻害要因を対策する研究開発を本研究棟で全て実施できる他に類を見ない研究環境を実現している。世界各国の将来の電力系統において再生可能エネルギーの導入障壁解決を目指している。

FREA-Gでは、3メガワットまでの太陽光発電・蓄電池用インバータに対し、各国の電力系統に接続するための様々な機能試験、認証試験を行うための試験室である。図2の内観写真に示すように、20フィートコンテナを収容可能な大空間としている。パワーコンディショナと試験用電源の接続については図3に構成図を示す。

同室から接続可能な太陽電池・蓄電池模擬電源（PV/ESS シミュレータ）は、最大 DC2000V まで対応可能な双方向 DC 模擬電源であり、様々な種類の太陽電池の I-V 特性を 3.3 MVA までの出力で模擬する。日射強度と太陽電池温度の時系列データを設定することで、太陽電池出力の変動をインバータに入力することが可能である。電力系統模擬電源（電力系統シミュレータ）は、5 MVA までの交流電力を様々な電圧・周波数条件で双方向に出し入れ可能な回生式交流電源である。

3.4 海外向け系統連系試験対応

FREA-Gでは、電気安全環境研究所（以下、JET）による利用を中心に多くの海外認証試験を実施している。JET は、FREA-Gを利用したタイ王国向けラボ認定の取得に続き、北米向けラボ認定（NRTL）の取得を申請している。また認証機関テュフ・ラインランド社の立ち会いによる米国・中国・インド向けの認証試験やフランフォーファー ISE 研に試験機関としての協力によるドイツ向け認証試験を実施してきている。

3.6 節に後述するスマートインバータ試験の自動化技術の開発等により UL 認証試験への対応、JET 等への技術協力・移管により各国の系統連系試験改訂による試験技術や設備増強に対応してきた。今後、SIRFN 等の国際ネットワーク等を活用し 3.5 節に後述する次世代系統連系試験への対応などにも尽力していく。

3.5 次世代系統連系試験技術開発

今後、再生可能エネルギーの普及拡大によりインバータベースの電源が大量に系統連系されるようになり、DER システムの挙動による系統への相互影響を考慮した試験の必要性が高まる。しかしながら、現在の系統連系試験では、系統と DER の相互影響を考慮できる方法が十分に検討されていない。そこで、既存の系統連系試験、特にラボ試験により把握

可能な項目に HIL 試験を適用することにより提供可能な試験法や試験環境を整理し、将来のグリッドコードおよび試験法改定に役立てることを目指している。近年は、パワーエレクトロニクス分野においても複雑化する要求への対応および開発期間の短縮を目的としたモデルベース開発の概念を取り入れた製品開発が進められており、HIL 技術の系統連系試験への適用が更なる開発期間の短縮と連系要件の複雑化および厳格化に対応した製品開発に貢献すると考えられる。また、近年 PCS の大型化により試験環境に求められる設備容量も大きくなってきている。そのため、必要に応じて制御ロジックの試験をコントローラ・ハードウェア・イン・ザ・ループ (CHIL) のような制御デバイス試験で代替することにより過剰な試験設備要求を緩和することで、コスト低減および開発期間の短縮に大きな効果をもたらすことが期待できる。米国では、審議中の DER の系統連系試験法 IEEE 1547.1 において、試験法のひとつとして Hardware-in-The-Loop (HIL) 技術が明記される見込みである。この HIL 技術は、デジタルリアルタイムシミュレータ (DRTS) を用いることでより現実に近い環境での試験を可能とする。ドイツを中心とする欧州でも風力発電システムの系統連系試験および認証に HIL 試験を認める動きが報告されており、太陽光発電や蓄電池等の分散電源にも拡大する可能性がある。各国で HIL 技術を製品開発のみならず認証へ適用するコンセプトは、欧州プロジェクト (ERIGrid) でも報告されている。

Power-Hardware-In-the-Loop (PHIL) 技術は、電力系統の状態をシミュレーションで模擬し、連系点の電圧を系統模擬電源により再現することにより、スマートインバータの系統サポート機能の効果などを検証することが可能である。図 4 に一般的な PHIL 構成を示す。一般的な PCS の PHIL 構成は、フィジカル領域とシミュレーション領域に分類される。フィジカル領域は、被試験体 (DUT) と系統

模擬電源 (Grid-sim)、シミュレーション領域は、DRTS で構成される。DRTS 内には、検証に用いる電力システムがモデルで再現され、接続点ノードの電圧信号がリアルタイムに Grid-sim へ送られる。Grid-sim は、シミュレーションに基づく電圧信号を再現する。Grid-sim に接続された DUT の電流、電圧の計測信号は、DRTS にフィードバックされシミュレーションに反映される。このように PCS 等の実機パワエレデバイスをシミュレーションで模擬された電力システムに接続し、負荷条件で機能試験や系統事故時の保護機能等を試験・評価することが可能である。この技術は、各国のグリッドコード改訂に伴うスマートインバータ等の系統サポート機能の試験にも応用が可能である。

3.6 スマートインバータ試験の自動化

SIRFN における活動の一環としてスマートインバータの試験法の開発と国際標準化に取り組んできた。これまで欧米を中心にスマートインバータの導入を前提とした系統連系規定や認証試験の改定が進められている。スマートインバータには複数の系統サポート機能が具備されており、各機能および複数の機能の組合せで動作することが想定されている。また、新たな系統サポート機能が追加される可能性もあり、試験の複雑化および試験項目の増加が見込まれ、従来型インバータの試験に比べて試験期間の長期化が懸念される。例えば、UL1741 SA に準拠した試験を手動で実施した場合、スマートインバータ機能に関する試験だけでも 3 ヶ月程度要する。従来の試験項目を含めて試験した場合、半年近く必要となるケースも有り得る。試験期間の長期化は、インバータメーカーの開発コストの増加の要因になりかねない。そこで、試験および判定に要する工程を自動化した新たな試験法を開発している。新たな試験法では、自動化により最終的に試験期間を 80% 削減可能と見込んでいる。試験自動化のプラットフォームには、SNL と SunSpec Alliance が開発を主導し、提供している SunSpec System Validation Platform (SunSpec SVP) を活用している。SunSpec Alliance は、インバータ試験ツールおよび規格の開発を専門とする業界団体であり、SIRFN 加盟研究機関には、無償で情報やツールが提供されている。一般企業も有償で加盟することにより情報やツールを利用することが可能である。FREA が有する分散電源システム試験室 (DER System Lab) とスマートシステム研究棟 (FREA-G) の 2 つの設備において SunSpec SVP の適応を目指して開発を

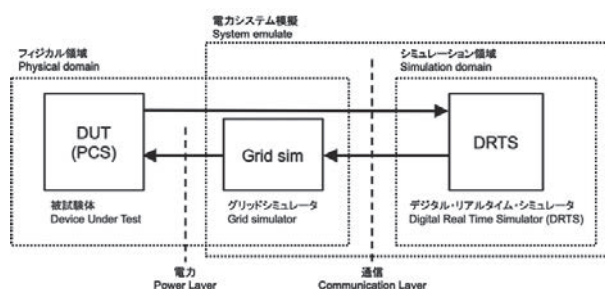


図 4 PHIL によるインバータ試験構成

進めている。500 kW 級 PCS まで試験可能な DER System Lab において SunSpec SVP 対応の自動試験環境の整備が概ね完了している。将来的には、最大 3MW 級のスマートインバータまで試験可能な大型設備である FREA-G へ拡張していく予定である。

図 5 にスマートインバータ自動試験環境の構成を示す。三社電機製作所製の系統模擬電源 (500 kVA)、双方向 DC 電源 (600 kVA)、模擬負荷 (300 kVA)、横河電機製の計測システム (WT3000, WT1800, DL850) および全ての機器を通信制御によって管理可能な制御用 PC で構成されている。最終的には、AC/DC それぞれの電流・電圧を計測し、制御用 PC 内の SunSpec SVP が自動で試験・計測・判定・レポート作成まで行うことが可能である。

図 6 にソフトウェアの構成図を示す。すべての電源設備は、三社電機製作所 (SanRex) および日本カーネルシステム (NKS) が開発した制御システムでコントロールされている。SunSpec SVP と連動して電源等を制御するためにブリッジソフト (API) を作成し、SunSpec SVP からの制御を可能にした。

自動試験項目は、現在最も SunSpec SVP の開発・対応が進んでいる UL 認証試験規格 (UL1741 SA) を対象 (表 1) として進めている。各電力会社が求める試験条件を柔軟に設定可能である。将来的に試

表 1 自動化を進める UL1741 SA 試験項目一覧

Test Case No.	Test Case Name (Advanced/ Smart Function)
SA8	Anti-islanding Protection
SA9	L/HVRT Voltage Ride Through
SA10	L/HFRT Frequency Ride Through
SA11	RR-Nomal Ramp Rate and Soft Start
SA12	SPF-Specified Power Factor
SA13	Volt/Var Mode (Q(V))
SA14	Frequency-Watt (FW)
SA15	Volt-Watt (VW)

験条件や試験手順を各国の認証試験法に準拠した計測手法および判定基準を実装できるようにプラットフォームの拡張を目指している。

4. おわりに

本稿では、各国のグリッドコード改訂に伴うスマートインバータと系統連系試験の動向について記述した。欧米では先行してスマートインバータと総称される電力系統安定化に貢献する系統サポート機能を具備したインバータの導入義務化が進んでいる。産総研では、それらの動向に対応し、国際的なネットワークである IEA ISGAN SIRFN と連携して研究開発・試験設備等が可能なプラットフォーム整備してきた。プラットフォームは、試験環境・ツール等を総合して活用できる環境を目指しており、3メガワット級のインバータまで対応した主に欧米の認証試験を含む系統連系試験が可能である。将来スマートインバータを国内へ導入するために必要となる系統解析が可能なソフトウェア (SoRA-Grid) や HIL 技術等を活用した次世代系統連系試験技術についても合わせて紹介した。メーカーと連携し、技術・情報提供や HIL 技術の適用による試験評価や認証等、将来のグリッドコード改訂に向けた連携や設備アップデートに引き続き尽力していく。さらに各国動向を踏まえて、インバータ単体だけでなく通信やシステム全体を評価可能な統合システムの評価環境を構築していきたい。これにより系統連系試験だけでなく、スマートグリッドの構築に必要なとされる機器やソフトウェアの組み合わせ等の柔軟、低コストかつ効率的な開発および評価環境の提供を目指していく。

5. 謝辞

本稿で述べた研究開発の一部は、経済産業省 革新的エネルギー技術国際共同研究開発事業「系統協

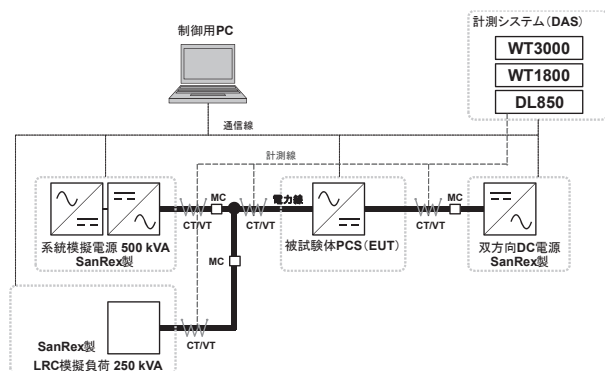


図 5 試験環境構成図 (ハードウェア)

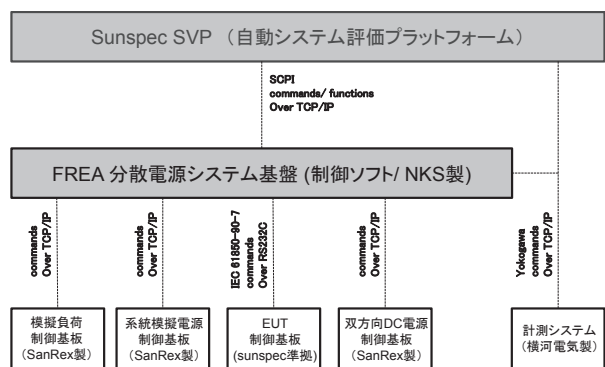


図 6 試験環境構成図 (ソフト/通信)

調型の分散電源大量導入技術の開発」の一貫として実施した。

6. 参考文献

- 1) COMMISSION REGULATION (EU) 2016/631 of 14 April 2016 : establishing a network code on requirements for grid connection of generator
- 2) R. Brundlinger, Grid Codes in Europe - Overview on current requirements in European codes and national interconnections standards, NEDO/IEA PVPS Task 14 Workshop (Nov. 2019)
- 3) 欧州各国の RfG への対応状況「Connection Network Codes」(accessed Nov. 27th 2019), <https://docs.entsoe.eu/cnc-al/>
- 4) EN50549-1 EN50549-2 Intent & Scope (accessed Nov. 27th 2019), 9th ACER Grid Connection ESC CENELEC TC8X AHG https://docstore.entsoe.eu/Documents/Network%20codes%20documents/Implementation/stakeholder_committees/GSC/2018_03_08/5.%20CENELEC%20additional%20EN50549_Scope-Intent_180307_1530.pdf
- 5) T. Basso, IEEE 1547 and 2030 Standards for Distribution Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid, Technical Report, NREL/TP-5D00-63157 (2014)
- 6) Electric Rule No. 21, "Generating Facility

Interconnections, " Pacific Gas and Electric Co. (2015)

- 7) UL1741 Ed.2, Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for use with Distributed Energy Resources, Underwriters Laboratories (2016)

著者略歴



橋本潤 (ハシモト ジュン)

現在、主としてスマートグリッド関連の研究に従事。太陽光発電や蓄電池向けのスマートインバータやグリッドフォーミングインバータ試験法の開発や国際標準化活動を行っている。スマートグリッド関連設備国際ネットワーク (SIRFN) では、系統連系試験の自動化、次世代ラボ試験、マイクログリッドに係わる国際的な研究開発事業を進めている。工学博士。



大谷謙仁 (オオタニ ケンジ)

現在、エネルギーネットワークチームのチーム長。スマートインバータ等のスマートグリッドやパワーコンディショナ、エネルギー貯蔵・蓄電技術による分散電源統合技術の開発している。世界最大級の大型パワーコンディショナ研究開発・認証試験設備であるスマートシステム研究棟の立上げを主導し、関連するスマートグリッド等の国際標準化の研究開発を進めている。