

次世代電力ネットワークの技術動向

Technology Trend for Next Generation Power Network

石井英雄*

1. はじめに

本特集の主題であるグリッドコードとは、国際エネルギー機関（IEA）の定義によれば、「電力システムや市場に接続された資産が遵守しなければならない幅広い一連のルールを網羅した包括的な条件であり、その制定目的は費用対効果と信頼性の高い電力システム運用を支援すること」と定義されている⁽¹⁾。日本においては、資源エネルギー庁や一般送配電事業者、日本電気協会が系統連系に関わる規程やガイドラインを整備してきた。一般的な電気設備が保有すべき機能や性能を定めるとともに、需要家が自家用発電機等の分散型電源を保有するため、これら需要家設備を電力系統（グリッド）に接続するための要件、手続きなどを定めてきた。

近年、地球温暖化対策を背景に、世界のエネルギー政策は再生可能エネルギーへのシフトを進めている。特に、その中心になるのは、風力や太陽光をエネルギーソースとする変動性再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy：VRE）である。さらにリチウムイオン蓄電池の性能向上・価格低下、自動車の電動化等は、従来の電力システムにパラダイムシフトを起こし、大規模かつ制御性の高い発電機で起こした電気を、グリッドを通じて需要家に一方方向に送る従来の姿は大きく様変わりする。風力・太陽光発電等の VRE が主力化し、太陽光パネルや蓄電池・電気自動車といった分散エネルギー資源（Distributed Energy Resources：DER）を持つ需要家は、電気を使うコンシューマーから自ら電気を創り出すプロシューマーへと変化する。デジタルや通信技術により、プロシューマーは DER を自らの利益・利便性を最大化するようにコントロールする。その結果として、電気の流れは変動の大きな双方向のものになる（図 1）。

IEC（国際電気標準会議）は、将来の電力システムの安定運用に関する白書で、こうした変化を牽引しているのは、“Decarbonization = 脱炭素化”，“Decentralization = 分散化”，“Deregulation = 自由化”，“Democratization = 民主化”，“Digitalization = デジタル化”の 5 つの D であると整理し、VRE や DER の拡大によって、電力システムの運用者は 4 つの困難：“Limited Visibility”（限定された可視性），“Limited Control”（限定された制御性），“Limited Predictability”（限定された予測性），“Limited Coordination”（限定された調和性）に直面することを述べた⁽²⁾。5D の中で、“民主化”については説明があるだろう。これは、自由化が進展した電力システムでは、様々な発電事業者や需要家が有する DER に対して、グリッドは中立・公平でなければならないことを意味する。

しかし、電力システムには安定・安全確保のため

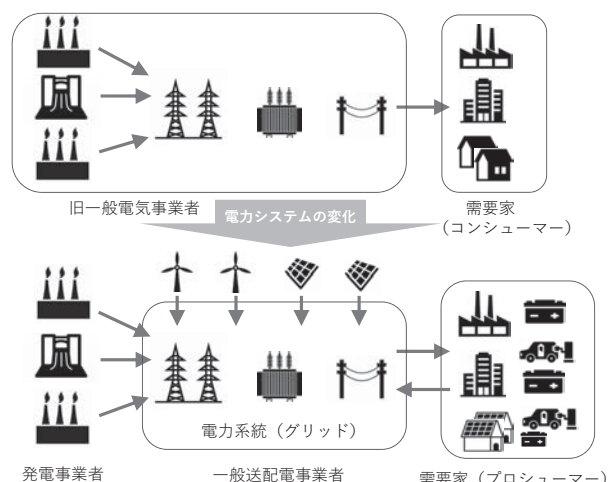


図1 電力システムの大転換

* 早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 研究院教授

の事項が多々あり、物理的にグリッドにつながるものが安定運用を阻害せず、他者に悪影響を及ぼさないために、守られるべきルールが必要となる。すなわち、グリッドコードの重要性が一層高まってきているのである。

本稿では、現在の国内外のグリッドコードに関する流れを概観したうえで、今後、再生可能エネルギーを主力電源に据えて行くために、将来期待される技術の現状や今後について、グリッドコードの観点を含めて述べる。

2. グリッドコードの現状と今後の方向性

上述のように、国内では系統連系に係るルールが整備されているが、近年では、VREの導入に伴い、単独運転防止（グリッドが停止時には解列すること）機能、事故時運転継続（Fault Ride Through：FRT）機能（瞬時電圧低下等の際に解列せず発電を継続すること）といった安全や系統安定性のための要件や、PVの力率一定運転（電圧上昇を抑えるため一定力率で無効電力を供給すること）など機能的な要請を追加的に定めてきた。

多数の国がグリッドで相互につながっている欧州では、ENTSO-E（欧州送電系統運用者ネットワーク）がエネルギー規制協力機構（ACER）の指導の下で、欧州全域の市場統合および自由な電力取引のために、グリッドコードの体系として「欧州共通ネットワークコード」を整備している。これは、送電事業に係る3分野“Grid Connection（系統連系）”、“System Operation（系統運用）”、“Market（電力市場）”の3つのカテゴリー、10のコードで構成されている⁽³⁾。VREを含むさまざまなタイプの発電機の系統接続に関するグリッドコードは、“Grid Connection”の“RfG（Requirement for Generators）”に規定されている。欧州各国は、ENTSO-Eが示す欧州全体の共

通の青写真をもとに、地域固有の追加要件を反映するなど最小限の変更を加えて、自国のグリッドコードとしている。

前述の通り、近年、VREは勿論、需要側に蓄電池をはじめとする様々なDERの普及が予測され、こうした資源もグリッドに接続され、電気をやりとりするようになる。さらに、DERをICTで統合し、あたかも大型の発電機のように協調的に動作させ、グリッドの運用に貢献させるバーチャルパワープラント（Virtual Power Plant：VPP）が期待されている⁽⁴⁾。電力システムは、主として需要側の革新を伴いながら大きく変化しており、これに伴いグリッドコードを拡充していく必要がある。これまで、VRE・DERといった新しいものをグリッドに接続したときに悪影響を及ぼさないようにすることに軸足があったが、今後は、VRE・DERの特徴や付与可能な性能などを見極め、これらが主役を演ずる将来に向けては最大限うまく活用する視点が重要である。この観点から、欧州のネットワークコードが、単純に系統接続だけではなく、系統運用、市場の観点からグリッドコードを整備しているのは大変理に揃っているといえる。

IEAは、VREの導入レベルについて、系統運用への影響度合いに応じて4つの段階（フェーズ）を定義し、それぞれの段階でどのような技術的要件が必要になるかを整理した（表1）⁽¹⁾。この段階区分において、太陽光発電導入が著しい九州は第三段階に位置付けられた（日本の他のエリアは第二段階）。最高ランクの第四段階には、アイルランドとデンマークの2か国のみが位置付けられている。

各段階について述べられている技術要件をみると、第二段階の日本では、FRT機能の義務化がなされ、系統運用者はそれぞれVREの予測ツールを導入しているし、第三段階にある九州では太陽光発

表1 VRE導入の各段階と特徴・必要な技術要件（文献（1）をもとに作成）

	全段階	第一段階	第二段階	第三段階	第四段階
特徴	—	系統に対して顕著な負荷無し	オペレーターが認識できる負荷が発生	需給の変動に対応できる調整力が必要となる	特定の時間に再エネの割合が大きくなり安定性が重要になる
技術要件	・保護システム ・電力品質 ・周波数および電圧の動作範囲 ・大型発電機の可視性と制御 ・大型発電機用通信システム	電圧上昇時の出力低減 ・電圧制御 ・大型ユニットのFRT能力	・小規模（分散）ユニットのFRT機能 ・通信システム ・VRE予測ツール	・周波数/有効電力制御 ・予備力供給のための低出力運転モード	・一般的な周波数および電圧制御方式の統合 ・疑似慣性 ・周波数および電圧の自律制御

電の有効電力制御が行われており、日本においても着実に対策がとられてきているといえよう。しかしながら、VRE・DERの導入拡大はまだまだこれからが本番であるはずで、現時点から第四段階を見据え、必要な研究開発には取り組むべきであろう。

VREや蓄電池等のDERの多くは、インバーターを介してグリッドに接続される。日本では、しばしば、パワーコンディショナー（Power Conditioning System：PCS）と呼ばれ、主要な機能は直流機器を交流のグリッドに接続するために交直変換を行うことであるが、出力の最適化や単独運転防止、FRTなどの機能を担っている。特に、交直変換器としては、制御により有効電力・無効電力の出力を容量の範囲内で自由にコントロールできるため、これを最大限活用すれば、システムの安定化ならびにVRE導入可能量増大に寄与することが期待される。表1の第四段階は、このような技術を要件化していくこと、つまりグリッドコードに組み込むことが必要になってくることを述べていると理解される。

次章以降で、インバーターの高性能化に関する動向とグリッドコードの将来展望について述べる。

3. アドバンストインバーター

本章では、アドバンストインバーター（スマートインバーターとも呼ばれる）について、その概念と技術動向、日本における取り組みについて紹介する。

3.1 アドバンストインバーターとは何か

アドバンストインバーター（Advanced Inverter：AdI）とは、電力システムの周波数や電圧をモニターしながら、その値によって有効電力や無効電力の入出力を自律的にコントロールする機能を有するインバーターで、太陽光発電、蓄電池のPCSへの適用をはじめ様々なVRE・DERに適用可能である。また、このような電力制御に加えて、前述の単独運転防止機能やFRT機能も有する。各機能の特性は、参照する周波数や電圧と制御量の2次元面上の曲線で表され、後述のように、屈曲点の座標（パラメーター）を与えることで定義される。さらに、AdIは通信機能を有し、外部からの通信によって特性を表すパラメーターを変更することが可能である。今後、VRE・DERが益々導入され、電力系統の状況は時間の経過とともに変化していくことは必至である。そこで、AdIを適用すれば、系統状況に応じたパラメーターの更新によってその特性を最適なものにしていくことが可能であり、フレキシブルな対応が可能になる。これによって、設備増強などを伴うこと

なくVRE・DERの導入可能量を飛躍的に向上できる可能性がある。

3.2 アドバンストインバーターの主な特性

AdIの特性については、IEC 61850-90-7ならびにIEEE1547に標準として定義されているが、これらの標準策定において中心的役割を果たしてきている米国EPRI（Electric Power Research Institute）が技術レポートを発行している⁽⁵⁾。表2に代表的なAdIの機能を系統全体の支援機能、配電系統の電圧制御支援機能、通信と相互運用性の3つに分類して示した。

系統全体に関する機能は、周波数および電圧に関するライドスルー（前出のFRTと同じ）の他は、基本的には需給調整や周波数制御に関わる。代表的な機能として、蓄電池に用いることを想定した周波数－電力制御機能（Frequency-Watt Function）の特性を図2に示す。この機能は、電力系統の周波数を参照信号として基準周波数を下回ったら放電によって電力を供給し、逆に基準周波数を上回る時には充電によって電力を吸い込み、周波数を基準周波数に戻すように動作するもので、図2の4点P1～P4の座標で定義される。太陽光発電にも適用できるが、充電側の特性は無く放電側のみになる。これは近年話題になっている太陽光発電の出力抑制を実行するものであり、表2に示すように単純に最大出力電力を設定するモードも別に存在する。

次に配電系統の支援機能であるが、配電系統との接続点の電圧を参照して、基準電圧との関係に対応

表2 アドバンストインバーターの主な機能

系統全体の支援機能	・電圧／周波数ライドスルー ・周波数－電力制御（Frequency-Watt 機能） ・有効電力制御（出力抑制）
配電系統支援機能（電圧制御）	・力率一定制御（Fixed Power Factor機能） ・電圧－無効電力制御（Volt-Var機能） ・電圧－電力制御（Volt-Watt機能） ・ランプ制御/ソフトスタート
通信と相互運用性	・分散型電源のモニタリング ・遠隔によるアップデート ・遠隔による連系/解列

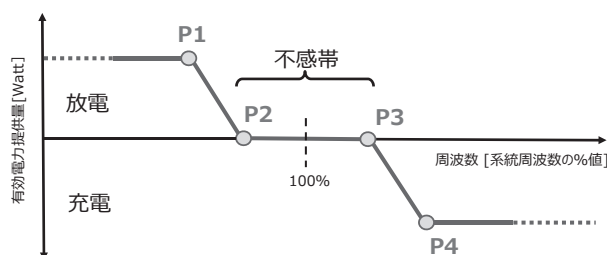


図2 周波数－電力（frequency-Watt）制御機能

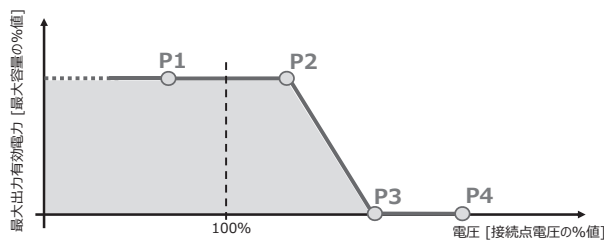


図3 電圧-電力 (Volt-Watt) 制御機能

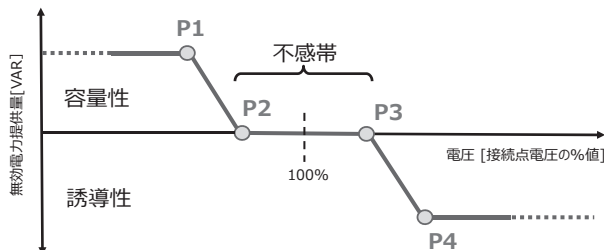


図4 電圧-無効電力 (Volt-Var) 制御機能

して有効電力や無効電力を制御する。これにより、配電システムの電圧を規定値内に維持する働きをする。図3に太陽光発電に適用することを想定した有効電力制御機能として電圧-電力制御機能 (Volt-Watt Function) の特性曲線を示す。参照電圧がP2より高くなると有効電力出力を絞り、P3でゼロにする。つまり、逆潮流量を下げることによって電圧上昇を抑える制御を行う。図4には電圧-無効電力制御機能 (Volt-Var Function) の特性曲線を示す。参照電圧がP2より小さければ容量性、つまり無効電力を配電システムに注入することで電圧を上昇させる。一方、参照電圧がP3より大きい場合は誘導性、従って無効電力を吸い込み電圧を下げに行く。P2からP1に向けて出力する無効電力は最大値まで増加、またP3からP4に向けては同様に吸い込む無効電力が最大値まで増加する特性を与えている。ここで、P1-P2間とP3-P4間のスロープは異なってもよいし、P2-P3間の無効電力を入出力しない不感帯をなくすることもできる。これらの2つの機能を組合せて同時に使うことが可能で、これを電圧-電力-無効電力制御 (Volt-Watt-Var Function) と称する。

3.3 通信に用いる回線と規格

AdIを有効に適用するためには、管理者とインバーターの間の通信回線と通信規格が必要になる。日本では、2012年にスタートした固定価格買取制度 (Feed-in-Tariff: FIT) を背景に、太陽光発電の導入が急速に進み、九州をはじめいくつかのエリアで導入認定量が連系可能量を上回ってしまった。この対応のため2015年にFIT法が改正され、太陽光発電PCSについては外部からの通信によって出力

抑制機能を有することが義務付けられた。これはAdIの実現に向けて大きな一歩であるといえる。AdIが具備する制御機能は、対応するソフトウェアを開発すればよく、大掛かりなハードウェアの新規開発などは必要ない。つまり、通信機能を設けることがAdI開発の大きなハードルといえるわけだが、日本ではFITという大きな枠組みの中で要件化された。これは日本の大きな特徴であり、強みであるといえる。

太陽光発電の出力制御は九州電力エリアで既に実運用されているが、66kV以上の規模の大きな設備には主にサイバーセキュリティの観点から専用線を、一方、66kV未満の設備には規模の小さな設備には主にコストの観点からインターネット回線を用いている⁽⁶⁾。この先行事例は国内での今後のベースになると考えられる。

通信規格については、前章で触れたVPP構築のための取組の一環で、資源エネルギー庁が所管する「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス (Energy Resource Aggregation Business: ERAB) 検討会」において、製造メーカによらず需要家のエネルギーマネジメントシステム (EMS) と様々なシステム・機器が相互に接続され、データ交換を可能とする (相互運用性) ためのガイドライン類の整備が進められている⁽⁷⁾。今後、太陽光発電も他の需要家側のリソースと組合せて使うこと、例えば、余剰電力を蓄電池や電気自動車に充電するなどが重要になっていくことが想定され、従って、太陽光発電設備に使う通信規格もVPPと極力整合させておくことが重要である。このような思想に沿い、需要家システムの色彩が強い66kV未満の太陽光発電設備については、VPPで整備されてきたOpenADRならびにECHONET Liteによって、出力制御を含めAdIの各機能に関するパラメーターを通信する準備が行われている。

3.4 アドバンストインバーターの動向

太陽光発電の導入が非常に顕著である米国カリフォルニア州とハワイ州では、AdIの導入が義務化されている。米国では、エネルギー政策をはじめ電力に関する規制やルールは、州毎に存在する規制当局 (Public Utility Commission: PUC) が所管しており、上記の2州ではそれぞれのグリッドコードに相当するRule21ならびにRule14Hにおいて、AdIにおける様々な機能を具備させることが要求されている。先行事例であったカリフォルニアでは、2017年9月から3段階でAdI機能を増やして計画を実

行中である。第一段階では、単独運転防止や周波数・電圧のライドスルー等の基本的機能の他、力率一定制御、Volt-Var 制御等の無効電力による電圧制御機能が義務化された。第二・三段階では、通信機能や AdI のマネジメントシステム（Distributed Energy Resource Management System：DERMS）の整備に加え、周波数・電圧－電力制御等、有効電力を制御する機能が要件化されている。このプロセスで、標準化については IEEE1547 の検討と整合させ、認証については UL1741A に反映することにより、実適用の礎としている。

日本では、2016 年度から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization：NEDO）の「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」において、AdI の基礎的研究評価が行われた。早稲田大学では、EMS 新宿実証センターに AdI テストベッドを構築し、対応ソフトウェア・通信機能を具備した PCS の試作品を導入して、各機能の有用性評価や実用化に向けた課題と対応の整理を行った。今後、日本の電力網にはどのような断面でどの AdI 機能が必要なのか、実際にどの程度の導入効果が得られるのか、大量に導入された場合技術的な課題はないのか等について、シミュレーションの高度化と実適用を想定したケーススタディを実施していくことが重要である⁽⁸⁾。また、こうした研究開発と並行して、カリフォルニア州が実施しているように、グリッドコードの整備と認証の仕組みを構築していくことが肝要である。

4. 疑似慣性

本章では、表 1 の第四段階の技術要件にある“疑似慣性”について述べる。

4.1 系統の慣性力低下の問題

これまでの電力システムでは、多数の発電機が一定周波数の交流電力を発電するように、お互いに同期して運転されていることが基本になっている。ここである発電機に故障が発生し、発電を停止してしまった場合を考える。その瞬間から、電力の供給と需要の関係が崩れ、グリッドの周波数が低下を始める。周波数低下が一定以上になってしまうとグリッドは安定を保つことが出来なくなり、最悪の場合、すべての発電機の電力供給がストップする全域停電に至ることになる。これを防止するために、周波数低下があるレベルに達した時に一部の電力供給を自動的にストップさせる（負荷遮断）ことによって、

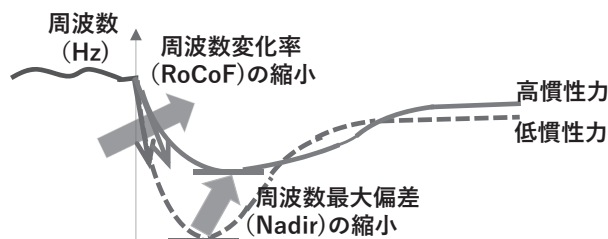


図5 発電機脱落時の周波数変化

需給バランスを保つ対応がとられている。通常、発電機一台の停止など単独の故障による供給力低下においては、周波数低下が負荷遮断まで至らず、10 秒程度で自動的に各発電機のガバナフリー（1 次調整力）が機能して発電出力を増すことにより、周波数低下を食い止め上昇に転じさせる全体設計と運用がなされている（図 5）。

このような仕組みが安定に機能するために重要になるのが、グリッドにどれくらいの慣性力があるかであり、これが故障発生直後の周波数低下スピード（Rate of Change of Frequency：RoCoF）を決める⁽⁹⁾。同期発電機は、系統の周波数が低下するとこれにあわせて回転子（ローター）の回転速度を落とすが、ローターの大きな慣性モーメントが回転速度の低下に対する抵抗を示すとともに、保有していた回転エネルギーを電氣的エネルギーとしてグリッドに供給してくれる。こうして慣性力の効果は、RoCoF を小さくし、かつ周波数の低下幅を抑える形で機能し、系統の安定性を支えている（図 5）。グリッド全体の慣性力は、概ね各同期発電機が有する慣性力の合計で決まる。

今後、インバーター接続の再生可能エネルギーが増え、その分同期発電機による火力発電が減っていくと、慣性力が低下し、故障等のトラブル時にグリッドの安定性を保つのが困難になる（図 5）。アイルランド、南オーストラリア、米テキサス州など、再生可能エネルギーの導入が顕著で、かつ周囲との系統連系が弱く比較的孤立性が高い地域では、非同期型の発電資源の増加に伴う慣性力低下の問題等が中心的課題として検討されている。

4.2 疑似慣性

再生可能エネルギーを中心とする電力システムに向かうためには、この問題を解決しなければならない。対策としては、同期調相等、慣性力を有する機器を導入することや、火力発電機の周波数変化に対する耐性向上、負荷遮断の周波数下限の引き下げ等が考えられるが、本稿の主役であるインバーターに

“疑似”慣性機能を持たせる研究開発が精力的に行われている。このようなインバーターは、周波数・電圧をモニターし、これらの大きな変化に対応して有効電力・無効電力を高速に出力させることによって、RoCoFを小さくするなど、電力システムの過渡的な安定性確保に寄与する。特に、同期発電機の機構をモデル化し、これに基づいて出力を決定する方式を疑似同期発電機（Virtual Synchronous Machine：VSM）という。

疑似慣性機能を有するインバーターも、基本的には制御ロジックとソフトウェアの開発が主題であるが、実際の電力系統に多数導入された際の効果の検証、課題抽出と対策がなされる必要がある。段階は国際的にも実証レベルであり、日本では、今年度よりNEDOのプロジェクト「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発」において検討が始まっている⁽¹⁰⁾。

5. まとめと今後の展望

本稿では、電力システムの変化に対応してグリッドコードの重要性が増すこと、また、VRE・DERが主力になる将来に向けた技術として、インバーターの高機能化について述べた。

このような新しい技術を適切かつ有効に活用するために、その特性と系統導入効果を詳細に検証しつつ、グリッドコードや認証の仕組みについて検討して行くことが重要である。

インバーターの高機能化は主に制御ロジックとソフトウェアの開発が中心テーマであり、仮に新たな機能を搭載したとしても、不要な段階では設定によって機能をoffにしておくことが可能である。どのような機能が必要かはVRE・DERがどれくらい導入されるかに依存し、また、実際の適用判断に向けては、解明・解決が必要な課題が多々あり、時間を要するであろう。しかし、インバーターはどんどん普及していくことは間違いなく、後から新たなものに入れ替えるのは現実的ではない。研究開発を進めるとともに、導入ステップやグリッドコードをはじめとするルール整備の検討も早期に着手することが重要である。

6. 参考文献

- 1) International Energy Agency, System Integration of Renewables (2018), 荻本らによる和訳がNEDOのホームページから入手可能 <https://www.nedo.go.jp/content/100879811.pdf>
- 2) IEC Market Strategy Board, Advanced Electric Grid Operations with Demand-Side Resources, (2018), available in web site : <https://basecamp.iec.ch/download/iec-white-paper-stable-grid-operations-in-a-future-of-distributed-electric-power-en/>
- 3) ENTSO-E, The code families, available in web page : https://electricity.network-codes.eu/network_codes/.
- 4) 石井英雄, バーチャルパワープラントへの期待, 太陽エネルギー, 44-5 (2018), 7
- 5) B. Seal, Common Functions for Smart Inverters, 4th Edition, EPRI, Knoxville, TN, December 2016. 3002008217
- 6) 九州電力株式会社, 九州電力における再エネ接続の現状と今後の対応, (2017) : <https://www.nedo.go.jp/content/100866078.pdf>
- 7) 石井英雄, 広橋亘, VPPを支える基盤システム, 電気学会誌, 139-3 (2019), 144
- 8) 石井英雄, 芳澤信哉, 林泰弘, 電気をよむ・あやつる - beyond 2030 : 再エネの弱点を補う - スマートに連系する, OHM, 106-7 (2019), 60
- 9) B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang, V. Gevorgian, P. Denholm, B. Hodge, and B. Hannegan, Achieving a 100% Renewable Grid, IEEE Power & Energy Magazine, 15-2 (2017), 61
- 10) NEDO ホームページ, 2019年度「再生可能エネルギーの耐量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発」に係る実施体制の決定について (2019), https://www.nedo.go.jp/koubo/AT523_100089.html

著者紹介

石井英雄 (イシイ ヒデオ)



1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了, 東京電力(株)入社。1989年～1991年マサチューセッツ工科大学客員研究員。2014年より早稲田大学研究院教授兼スマート社会技術融合研究機構事務局長(現職)。博士(工学)。主に、再生可能エネルギー導入、デマンドレスポンス、分散エネルギー資源統合に係るプロジェクト、国際標準化等に従事。日本物理学会、電気学会、IEEE会員。