

一般論文

直流配電システムの開発

Development of DC (Direct Current) Distribution System

黒田 和宏 加茂 章太郎
K. Kuroda S. Kamo
牧 尚子 栗尾 信広
N. Maki N. Kurio
高野 知宏
T. Takano

概要

再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大や半導体・蓄電池技術の進歩を背景として、再エネと蓄電池を組み合わせた『直流配電システム』が経済的かつ環境指向の次世代電力供給システムとして注目されている。また近年、地球温暖化の影響も指摘されているが、台風や大雨などの自然災害による停電への対策として、直流技術を活用した電力レジリエンス強化、BCP（Business Continuity Plan:事業継続計画）対策への期待も大きい。

本稿では、直流技術の研究開発に着手した背景、ならびに日新アカデミー研修センター（当社研修施設）に構築した直流配電実証システムの構成および実証内容について紹介する。

Synopsis

With the expanding introduction of renewable energy sources and advances in semiconductor and energy storage technology, DC distribution systems that combine renewable energy sources and storage batteries have attracted attention. It is economically and environmentally effective as the next generation power supply system. We also expect to take measures for power resilience and Business Continuity Plan using DC technology.

This paper introduces the background of this study and details of the DC power distribution demonstration system built at the Nissin Academy Training Center.

■ 1. はじめに

現在、地球温暖化対策における温室効果ガス排出量削減への意識の高まりにより、再生可能エネルギーの主力電源化への取り組みが進んでいる⁽¹⁾。その中で、導入が加速している太陽光発電（以下、PV）や風力発電は、自然変動型電源として天候に大きく左右されるため、発電電力の有効活用には蓄電池による調整が欠かせない。

当社では、再エネと蓄電池を組み合わせ、「直流（DC）」の特性を最大限に活かし、再エネの自家消費

や電力レジリエンス強化に活用できる『直流配電システム』の開発に着手した。

本稿は、直流配電システムの特長と構成（主要コンポーネント）を紹介し、実用化に向けた当社の取り組みについて解説する。

■ 2. 次世代電力システムの展望

2011年の東日本大震災後、原子力発電の停止や、電力システム改革（電力の安定供給の確保／電気料金の最大限の抑制／需要家の選択枝の拡大）、FIT制度（固定

価格買取制度)など低炭素化社会の実現に向けた政策により、日本の電力システムは大きな転換点を迎えている。

また、需要家側の低炭素化への取り組みも推進され、RE100やEV100など環境に優しい再エネ/EV (Electric Vehicle: 電気自動車) の普及拡大が進んできた。同時にSDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標) を満足する製品開発が、社会的な企業価値の評価基準となり、経営戦略として環境配慮型製品・サービスの創出が必須となってきた。

2. 1 電力を取り巻く環境へのニーズと課題

電力システム改革により「電力小売全面自由化」制度⁽²⁾が導入され、消費者はライフスタイルに合わせて電気小売事業者を自由に選べるようになった。この制度により、事業者間の価格競争が生じ、電気料金の抑制・サービスの向上が期待されている。その一方で、離島地域では、離島ユニバーサルサービス調整制度により、火力燃料費にかかる変動を託送料金に反映して、全ての需要家(本土・離島)が負担している⁽³⁾。そのため、離島地域の燃料コストの負担低減のための新たな電力供給手段・運用方法が求められている。

また2019年以降、FIT買取期間が満了となる再エネ案件が順次現れることによる需要家の自家消費/地域グリッドでの地産地消に向けたシステム導入や、

「発送電分離」によるグリッド運用形態の多様化、さらにはグリッドにおける電力融通の整備・ルール化も進むと考えられる。

近年、再認識されている自然災害時の電力供給問題(停電)も見逃せない課題である。国内の台風・地震被害だけでなく、カリブ海島嶼国のハリケーン被害や、オーストラリア・米国の森林火災など世界中で相次ぐ災害に対して、電力ネットワークの強靭化が課題となっている。設備投資には目先の費用対効果(コスト採算性)だけでなく、災害時の電力レジリエンス強化に向けたBCP対策が重要となる。

2. 2 次世代電力システムにおける直流技術の活用

CO₂排出量を抑制した環境配慮型製品・サービスや、離島地域の燃料コスト低減対策/電力レジリエンス強化のためのBCP対策向けシステム開発において、「直流技術」が注目されている。

需要家(コミュニティ)間で、再エネの余剰電力を直流で効率的に融通したり、交流システムの事故時に自立運転することで、瞬低・停電の影響を受けずに電力の安定供給(BCP対策)を実現する直流配電は、近未来の配電事業イメージ(図1)における新たな電力供給形態となりえる。今後、直流配電システムは顧客ニーズに合わせて、既設の交流システムと共存する形で導入が進んでいくと期待される。

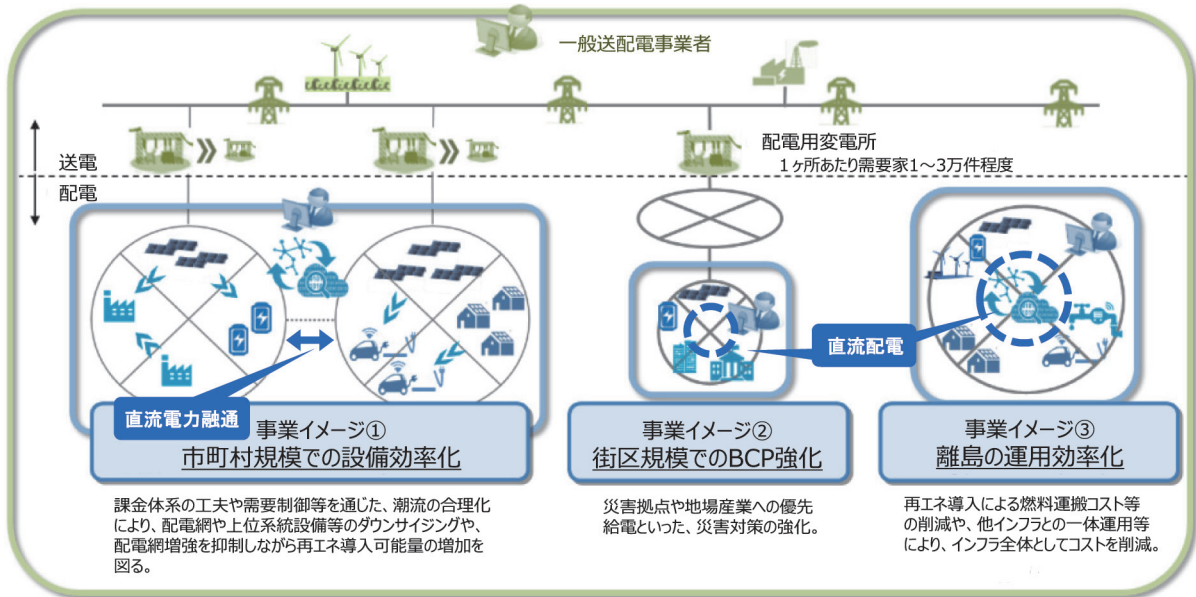


図1 配電事業イメージ⁽⁴⁾ 《参考文献(4)を元に一部編集して作成》

なお「直流技術」は、既下記に電力変換システムにおいて活用されている。

■ 高電圧直流送電 (HVDC : High Voltage Direct Current, DC125~500kV)

高電圧直流送電の主な役割は、大容量電力輸送の安定度向上、潮流制御、短絡容量抑制などである。国内では、基幹電力系統に連系した周波数変換設備 (佐久間/新信濃/東清水) や北海道・本州間電力連系設備、紀伊水道直流連系設備など地域間の電力融通に適用されている⁽⁵⁾。

■ 低電圧直流給電 (~DC400V)

電気通信やICT装置など情報通信サービス分野では、DC380Vクラスの直流給電システムの実用化が始まっている。電力消費量の多いデータセンターへの導入ケースでは、電力の変換回数の削減による省エネ効果だけでなく、電力変換装置の削減による故障リスクの低減により、信頼性の向上に繋がっている。さらに、従来よりも高い電圧で給電することによる給電ロスの低減効果や、設置機器の削減によるスペースのコンパクト化が見込まれ、適用が広がりつつある⁽⁶⁾。

今後は、需要家構内の配電系統におけるDC600~1500V (LVDC : Low Voltage Direct Current) クラスの直流ネットワークの導入拡大が見込まれ、海外でも研究開発が進んでいる⁽⁷⁾。

3. 直流配電の特徴と構成

3.1 交流と直流の違い

私達が日常で使用している電気には商用電源、つまりコンセントから供給される「交流 (AC)」と、太陽光発電 (PV) や蓄電池、あるいは家電機器・インバータ機器の内部で使われている「直流 (DC)」がある。図2に直流で動作する主な機器を示す。

「交流」は、電流ゼロ点が周期的に存在するため、短絡電流や負荷電流を遮断するのが容易であるが、電力制御は周波数と位相、振幅 (周波数同期、有効電力、無効電力) を調整する必要がある。一方、「直流」は電圧極性が不変で、周波数や位相の制御が不要であるために、交流に比べて電力制御は容易な反面、電流ゼロ点がないために電流遮断が難しいことが知られている。さらに、電圧の昇圧・降圧や絶縁 (isolation) が交流に比べて容易ではないと言われてきた。

近年の半導体デバイスの性能向上により、従来の直流のデメリットを克服する直流機器の開発が進み、直流電力を安全に供給・制御できるシステムの構築が可能となってきた。しかしながら、半導体電力変換デバイスのさらなる価格低減、高耐圧・大電流化が、直流ネットワーク実現の課題になっている。

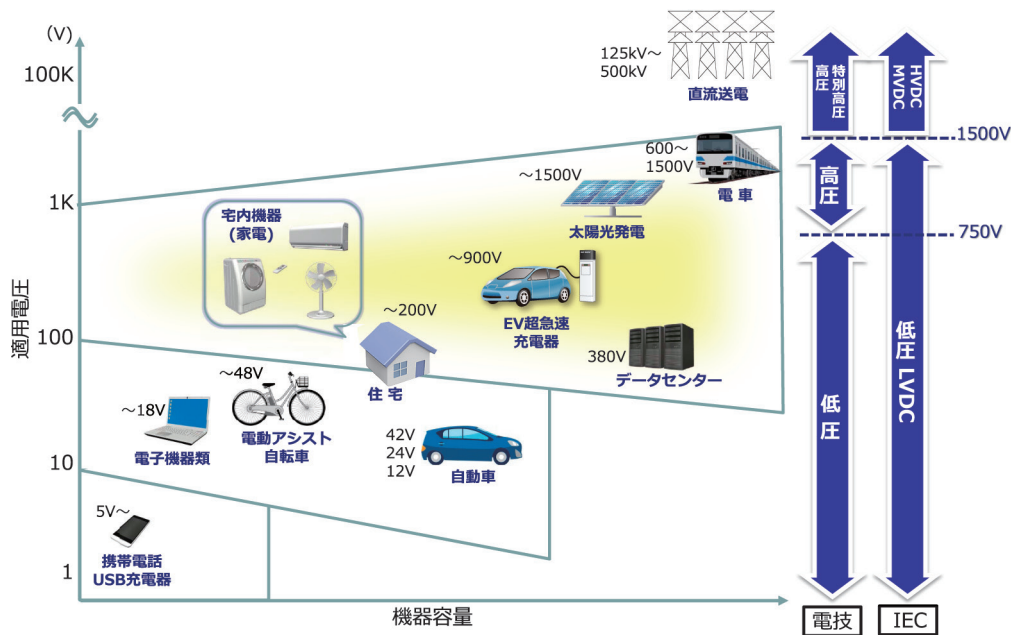


図2 直流で動作する機器 (電圧クラス別)

3. 2 直流配電システムの特長

既設の交流配電システムと比較して、直流配電システムには表1のような特長がある。

表1 直流配電システムの特長

省エネ	再エネと蓄電池を組み合わせることで、商用買電電力量を最小限に抑制し、電力料金の低減・省エネ(CO ₂ 削減)に貢献
親和性	再エネ、蓄電池、直流負荷を共通の直流配電線にてダイレクトに連系可能。周波数制御ではなく電圧制御のみで電力バランス制御を実現
ロバスト性	交流系統で発生する瞬低・停電などの外乱の影響を受けず、電力を安定供給することが可能。また、自立運転モードによるBCP対策/災害対応も容易に実現
コンパクトスリム化	「変圧と絶縁」をパワエレ技術(高周波インバータと高周波変圧器)で実現。機器の電力密度(=変換電力/質量)が大きく、小型・軽量化が可能
電力系統対策	ダックカーブ現象 ^(注1) の緩和やEV急速充電器等の大きな負荷変動の低減により電力変動ピークを抑制

3. 3 直流配電システムの基本構成

直流配電システムの基本構成は図3に示すように、直流遮断器、DC-DCコンバータ(直流変圧機能)、直流配電線(直流フィーダ)と、直流で動作する再エネや電力融通を調整する蓄電池などで構成される。

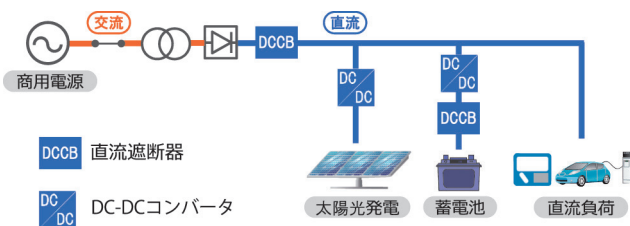


図3 直流配電システム基本構成

再エネ、蓄電池の直流電力は、EV急速充電器やLED照明・エアコンなどDC入力仕様の負荷に供給される。図2に示したとおり、ACからDCに変換されて周波数・回転数制御用途で使われる機器は多く、直流配電システムの普及にともないDC入力の「直流負荷」も充実していくと期待される。

3. 3. 1 直流遮断器

直流配電システムでは、電流ゼロ点のない事故電流を高速に遮断する直流遮断器が必要となる。

電鉄で利用されている「機械式遮断器」は、アークを引き延ばして電流遮断する方式のため、消弧室が大きくなり、広い設置スペースが必要となる。

当社では、事故電流を高速に検出し、アークレスで電流を遮断する「半導体直流遮断器(DCCB)」を新たに開発した。この高速遮断技術により直流配電システムの安全性・信頼性の向上と、設備のコンパクト化を図ることができる。

3. 3. 2 DC-DCコンバータ(直流変圧機能)

DC-DCコンバータは、直流電力を変圧(昇圧・降圧)および絶縁する役割を持つ。

当社は、高効率(>98%)・大容量(100kW以上)の絶縁型双方向DC-DCコンバータ(DAB方式: Dual Active Bridge)開発においてSiCデバイスを適用し、高周波化することにより小型・軽量化を実現した。

3. 3. 3 保護・制御装置

電気回路の安全性を確保しつつ直流電力を制御するためには、過電圧保護、過電流保護および地絡保護が重要となる。

さらに、交流系統での瞬低・停電時における自立運転への移行や、ピークカットなどのシステム運用制御を実現するために、システム内の再エネ、蓄電池、直流負荷を適切に連携させた統合制御が重要となる。

4. 直流配電実証システム(研修センター)

当社では、直流配電システムの実用化を目指し、技術・安全面での課題解決ならびに機能検証を目的とした直流配電実証システムを、研修センターの配電系統の一部に構築した。2019年7月より実証試験を開始している。

4. 1 実証システム構成と特徴

直流配電実証システムは、下記の直流機器と、システム状態の監視ならびに運転・停止を担う統合制御装置で構成している(図4)。

【構成機器】

- 半導体直流遮断器「DCCB」
- 絶縁型双方向DC-DCコンバータ(DAB)「DC-DC」
- 太陽光発電「PV」
- 電力調整用Li-ion電池「蓄電池」
- EV急速充電器(DC入力仕様)

(注1) ダックカーブ現象: 太陽光発電の大量普及等に伴い、電力システム内の電力需要が朝方から日中にかけて落ち込み、その後、夕方から日没にかけて急増する現象

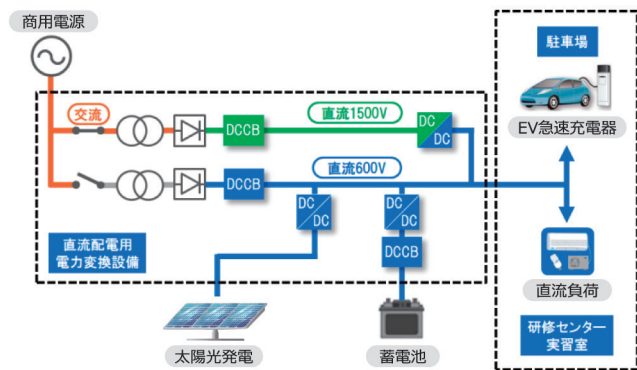


図4 直流配電実証システム構成 (研修センター)

実証システムでは、顧客ニーズに合致する様々な電圧クラスのソリューションを提供するため、国際規格IECの直流低圧（LVDC）区分の最大値「DC1500V」と国内基準（電気設備技術基準）の直流低圧区分に準拠した「DC600V」の2クラスを採用した。

なお、PV電力を自家消費する需要家を想定して、商用系統との接続には「ダイオード整流器」を適用したシンプルな構成とし、双方向インバータ連系と比べて制御の簡素化と設備コストの低減を図った。本構成では、電力の逆潮流がないことから、FRT（Fault Ride Through）要件による制約はなく、系統連系申請が不要となり、設備導入の自由度が高い。

また、当社で新たに開発した蓄電池の劣化診断ツール「蓄電池健全性モニター」を設置した。蓄電池の運転を停止させることなくオンタイム&リアルタイムで診断し、高効率/長寿命な運用を支援するための実証試験を並行して進めている。

4. 2 実証システム運用制御

4. 2. 1 基本コンセプト

実証システムの運用制御では、システムの統合制御のもとで、蓄電池用/PV用の各DC-DCコンバータが、直流フィーダのDC電圧の状態を常時ウォッチして、自律的に動作を決定する方式を採用した。

■蓄電池用DC-DCコンバータ

商用電源側のAC電圧や直流フィーダのDC電圧、蓄電池のSOC（充電状態/充電率）によりシステムの運転モード（夜間電力利用などの計画運転や自立運転）を判定して自律的に動作する。

■PV用DC-DCコンバータ

直流フィーダのDC電圧を検出してPVの動作モードを判定し、自律的に制御する。

具体的な運用では、直流フィーダの基準電圧に不感帯を設定して蓄電池の充放電サイクル数を低減する。またPV電力余剰時には、蓄電池用DC-DCコン

バータが直流フィーダのDC電圧の上昇を検出し、蓄電池に充電する。さらに蓄電池が満充電になった場合は、PV用DC-DCコンバータが直流フィーダのDC電圧上昇を所定の範囲内に制御するように出力抑制を行う。

4. 2. 2 実証試験

実証システムでは、基本コンセプトのもとでシステムの運用制御が行われる。下記に実証試験で実施する検証項目を示す。

表2 実証検証項目

再エネ有効活用	PVの余剰電力を蓄電池に充電して利用することで、商用電源からの買電量を最小限に抑えた再エネの有効活用
BCP対策	商用電源側降圧・停電時の自立運転による安定運用（BCP対策）と、商用電源電圧回復後の速やかな復帰
ピークカット	EV急速充電器のような突発性の負荷ピークに対して、蓄電池によるピークカットを適用した契約電力の抑制効果
安全性	直流回路側短絡故障時の半導体直流遮断器による高速遮断（波及事故防止）
電力融通	DC1500VとDC600Vから成る複数フィーダの直流配電システムにおける相互の電力融通

表2の実証試験項目について、下記に詳細を説明する。

■再エネの有効活用

接続点にダイオード整流器を適用することで、PVの発電電力を商用系統へ逆潮流させることなく直流負荷へ供給する。なお、PV電力余剰時には直流フィーダのDC電圧が上昇し、蓄電池用DC-DCコンバータが、この電圧上昇を検出して商用電源からの電力融通を停止させるとともに、充電モードへ移行してPV余剰電力を蓄電する（図5）。

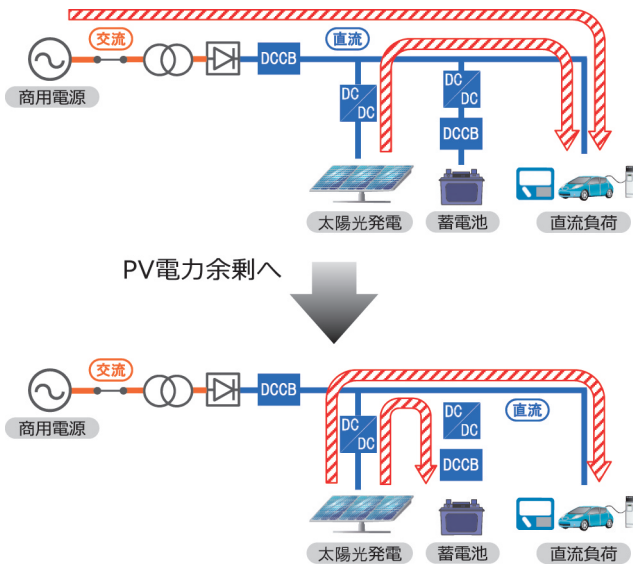
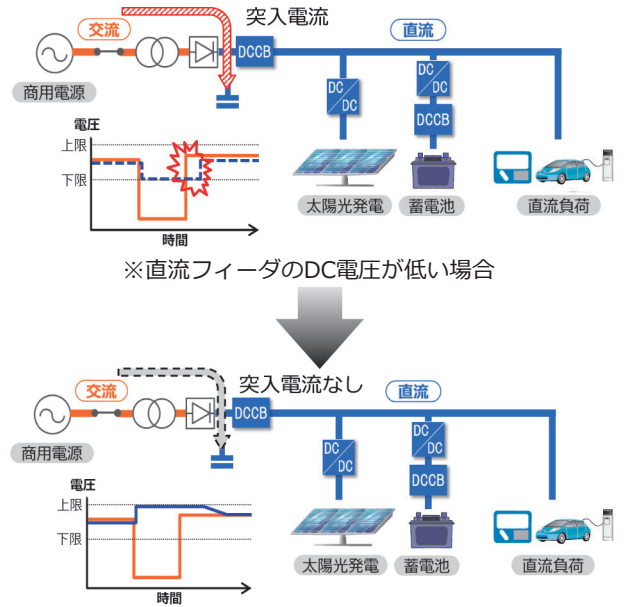


図5 PV電力余剰時の蓄電池充電モード



※直流フィーダのDC電圧を高め維持した場合

図7 自立運転→商用電源復電時の安定運用

■ BCP対策

商用電源側にて異常が生じた場合、異常を迅速に検出して自立運転モードへ切り替え制御を行い、PVや蓄電池など複数の直流電源から直流負荷へ継続的に電力供給する（図6）。

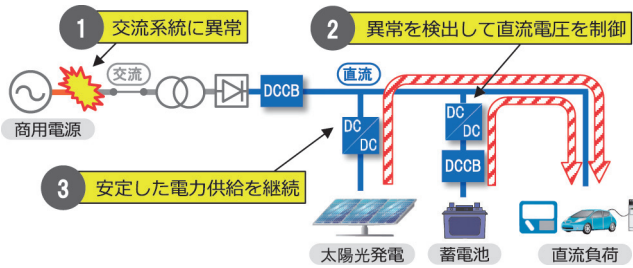


図6 瞬低・停電時の自立運転モード

実証システムはダイオード整流器を採用しているため、商用系統側の瞬低・停電からの復電時に、商用電源から直流回路側へ突入電流が流れる場合がある。そのため、蓄電池用DC-DCコンバータは商用電源側の瞬低・停電を検出すると、直流フィーダのDC電圧を高め制御することで突入電流を抑制する（図7）。

■ ピークカット

EV急速充電ステーションのような大容量直流負荷による商用系統の重潮流化が懸念されている。実証システムでは、蓄電池用DC-DCコンバータが接続点の潮流を監視して、蓄電池を放電させることにより契約電力の上限値を超過しないように制御する（図8）。

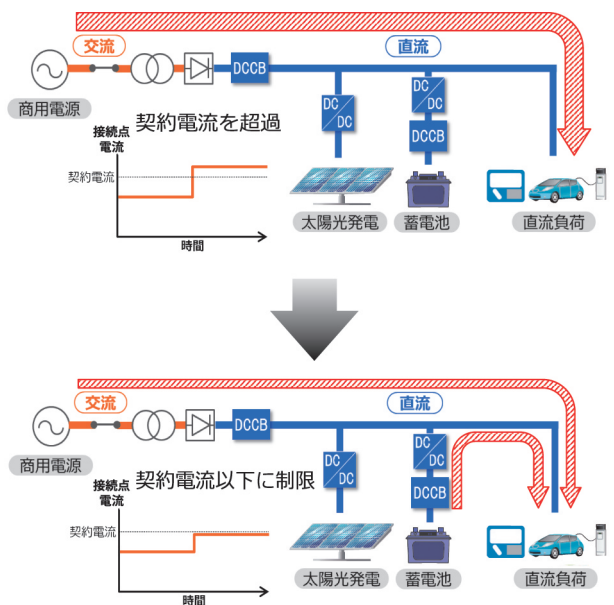


図8 蓄電池によるEV急速充電のピークカット

■ 安全性

蓄電池などの電圧源を有する直流回路の短絡故障電流は、立ち上がり急峻な大電流となる。そのため、半導体直流遮断器により、短絡故障を高速に検出して事故電流が大きくなる前に遮断する。また、絶縁型双方向DC-DCコンバータのゲートブロックにより事故の波及を防ぎ、健全回路に影響を及ぼさないシステム構成としている（図9）。

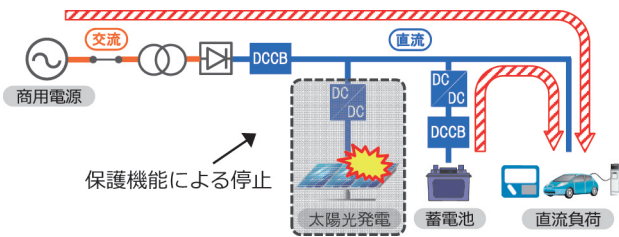


図9 PV用DC-DCコンバータによるPV短絡故障の波及防止

4. 3 実証試験での運転事例

本節では、実証システムでの試験結果の一つを紹介する。

図10は、EV急速充電時のピークカット運転から商用電源停電による自立運転へ移行させた時の実測波形とシミュレーション波形を示す。

試験開始時は、商用電源から直流回路へ電力を供給している。続いて、T=10秒時点にてEV急速充電を開始した。

実測波形から、EV急速充電による電流増加に対して、蓄電池用DC-DCコンバータは接続点にて電流の変動を検知し、蓄電池が放電を開始して商用電源からの電力を一定値に抑制している。これによりEV急速充電時、蓄電池による商用電力ピークカット運転が良好に動作することを確認できた。

さらに、T=38秒時点にて商用電源との接続点において、交流遮断器開放による模擬停電を発生させた。

停電発生時、実測波形から蓄電池用DC-DCコンバータが直流フィードのDC電圧の低下を検知し、自立運転モードへスムーズに移行している。直流負荷（EV急速充電器）への電力供給が途切れることなく継続運転することを確認できた。

なお、商用電源側で瞬低が発生しても、直流側から商用系統側への逆潮流はなく、なめらかに自立運転に移行できることも本システムの特徴となる。

これら一連の実測波形は、シミュレーション波形とも良く一致していることが分かる。

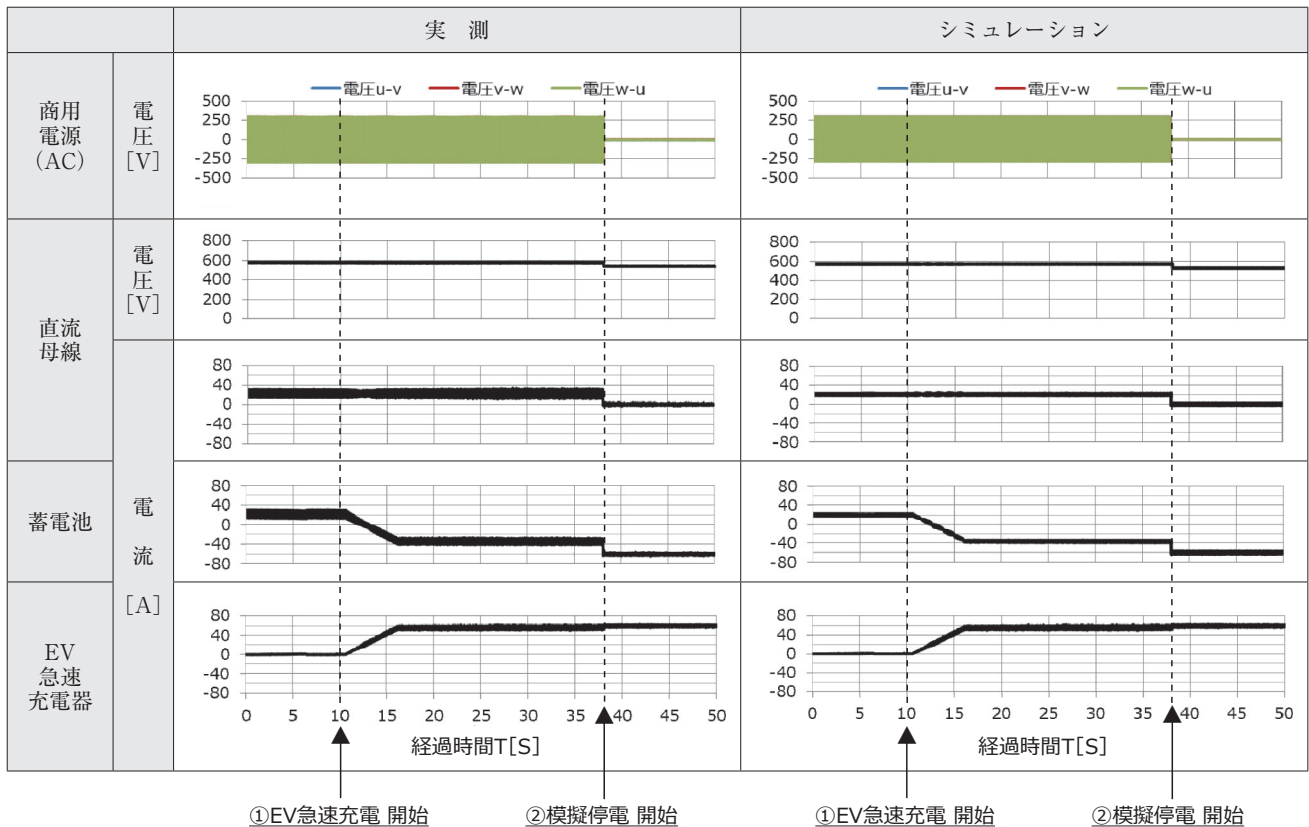


図10 EV急速充電時のピークカット運転→商用電源停電による自立運転の実測/シミュレーション結果

5. 実証試験に続く展開

5.1 離島・無電化地域

大規模な商用電源からの電力供給が難しい離島や無電化地域では、発電機の燃料輸送に多くのコストを要するため、再エネを効率的に活用できるシステム導入はコストメリットが見込まれる。さらに、環境配慮型システムとして内燃力発電機（ディーゼル発電機）の停止によるCO₂削減にも貢献できる。

再エネを地産地消するマイクログリッドは、過疎地域の電力レジリエンス強化の対策システムとしても期待が大きい（図11）。

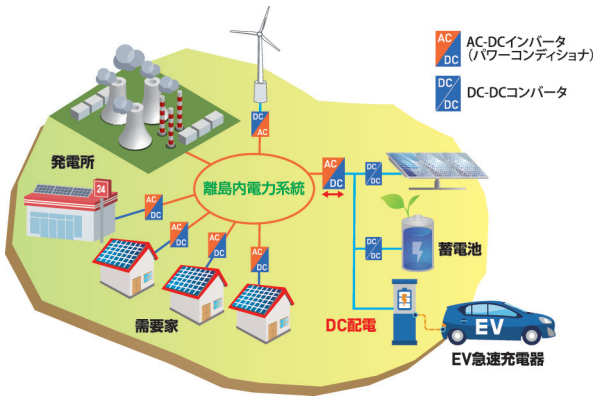


図11 離島内 交流&直流マイクログリッド

5.2 BCPサービス

直流配電システムを既設の商用系統のバックアップ機能として共存させることにより、災害時のBCPサービスを提供することができる。また、点在する複数の地域コミュニティを直流で連系することで、

広域でのBCP対策も実現可能となる。

図12は、災害による交通網の寸断で孤立したコミュニティに対しても、再エネ・自家発電機を活用した電力融通で、早期のインフラ回復（電力レジリエンス強化）に貢献する電力供給システムである（図12）。

5.3 EV急速充電ステーション

EVの導入拡大にともない、サービスエリアやショッピングモールへ複数台のEV急速充電器を設置するニーズも顕在化しつつある。

EV急速充電器による大容量の電力消費ピークをPVや蓄電池からなる直流ネットワークで抑制して、全体の設備容量を最適化しつつ、CO₂排出量も抑制できる（図13）。

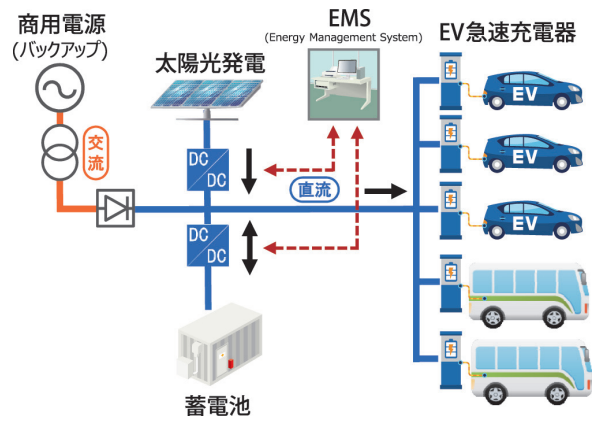


図13 EV急速充電ステーション

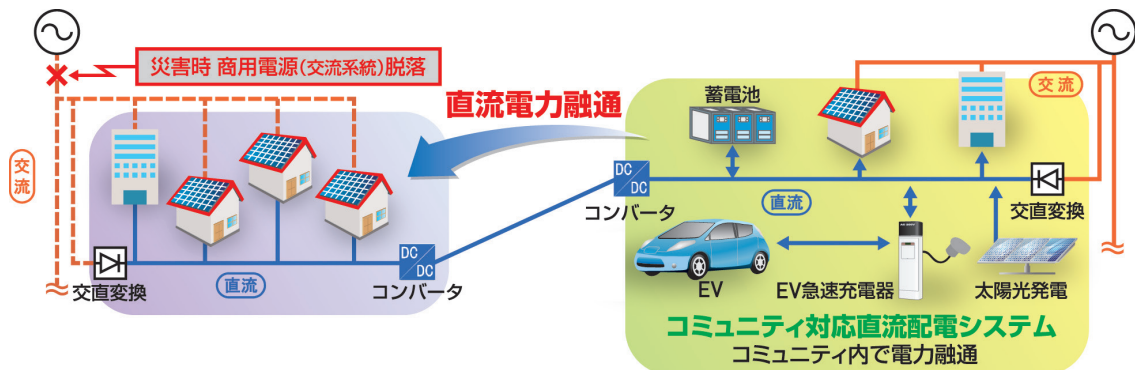


図12 コミュニティ間の直流電力融通システム

6. まとめ

本稿で紹介したDC600V、DC1500Vクラスの直流配電システムの実証試験は、次世代電力供給システムの先駆けとなる取り組みになると期待している。世界的にもDC400Vを超える直流配電システムの実証事例は数少ない。海外展開も見据えて、今後も引き続き国際規格(IEC/IEEE)の標準化動向をウォッチしながらシステム構築を進め、顧客ニーズに合致した最適ソリューションの提供へ挑戦していく所存である。

参考文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁: H30年度エネルギーに関する年次報告「エネルギー白書2019」, pp. 28-29, pp. 278-279 (2019年6月)
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁: H25年4月2日閣議決定「電力システムに関する改革方針」(2013年4月)
- (3) 九州電力株式会社HP: 送配電 電力託送供給等のご案内 約款、要綱等「離島ユニバーサルサービス調整単価」(2020年3月)
http://www.kyuden.co.jp/wheeling_stipulation_universal.html(参照:2020/3/18)
- (4) 経済産業省 資源エネルギー庁: 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会 中間取りまとめ(案), pp. 14-16 (2019年12月)
- (5) 町田武彦: 「直流送電工学」, 東京電機大学出版局 (1999年1月)
- (6) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構HP, NEDO 実用化ドキュメント「直流には直流」で、省エネを実現 電力の安定供給もおまかせ! (2012年11月)
https://www.nedo.go.jp/hyoukabu/articles/201208ntt_f/index.html(参照:2020/3/18)
- (7) Tero Kaipia, Pierre Sebellin, Vimal Mahendru, Keiichi Hirose, Wim de Kesel, Georg Lubber, Reinhard Pelta, Debdas Goswami: 「Survey of market prospects and standardization development needs of LVDC technology」, CIRED 24th International Conference on Electricity Distribution, Paper1215 (2017.6)

執筆者紹介



黒田 和宏 Kazuhiro Kuroda
研究開発本部
電力技術開発研究所
主幹



加茂 章太郎 Shotaro Kamo
研究開発本部
電力技術開発研究所



牧 尚子 Naoko Maki
研究開発本部
電力技術開発研究所



栗尾 信広 Nobuhiro Kurio
研究開発本部
電力技術開発研究所
主幹



高野 知宏 Tomohiro Takano
研究開発本部
技術開発推進センター
主幹