



再エネ導入促進、電力レジリエンス強化を実現する直流配電システム

DC Distribution System for Improved Power System Resilience with Renewable Energy

黒田 和宏*
Kazuhiro Kuroda

小倉 正嗣
Masashi Ogura

前地 洋明
Hiroaki Maeji

麻植 実
Minoru Oe

豊田 玄紀
Genki Toyoda

栗尾 信広
Nobuhiro Kurio

再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入拡大や半導体・蓄電池性能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、地球温暖化の影響が指摘されている中で、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^{*1}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（日新電機株式の研修施設）に構築した直流配電実証システムの構成および実証試験について紹介する。

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 as economical and environment-friendly next-generation power supply systems. These systems are also expected to help improve power system resilience and business continuity plans (BCP). This paper introduces the background of our study and the details of the DC power distribution demonstration system built at the Nissin Academy Training Center.

キーワード：直流配電、半導体直流遮断器、絶縁型双方向DC-DCコンバータ、蓄電池、再生可能エネルギー

1. 緒言

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出力が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。

日新電機株式会社では、再エネと蓄電池を組み合わせ「直流(DC)^{*2}」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、実用化に向けた取り組みについて解説する。

2. 次世代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つつ、交流系統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を実

現（BCP対策）できる直流配電は、次世代電力供給システムとなりえる。

すでに、私達の日常にはPVや蓄電池、家電機器・インバータ機器など直流で動作する機器が溢れており、主な機器を図1に示す。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見込まれる。

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。一方で、半導体デバイスなど主要部品の大容量化、低価格化が直流配電システム普及への大きな課題となる。

3. 直流配電システムの特長

「直流」は「交流」に比べて、電流ゼロ点がないために電流遮断が難しい、変圧・絶縁が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、これら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・制御するシステム構築が可能となってきている。

ここで、既存の交流配電システムと比較した直流配電システムの主な特長を表1に示す。

4. 直流配電実証システム（研修センター）

直流配電システムの実用化を目指し、技術・安全面での

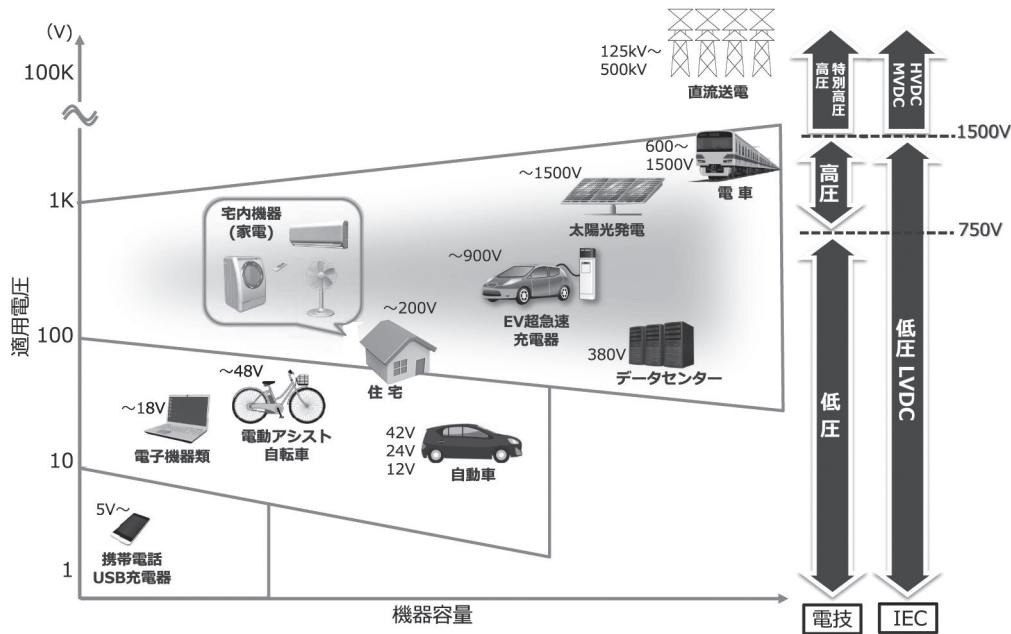


図1 直流で動作する機器（電圧クラス別）

表1 直流配電システムの特長

省エネ	再生エネルギー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	再生エネルギー、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」をパワーエレクトロニクス技術（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 ^{*3} 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

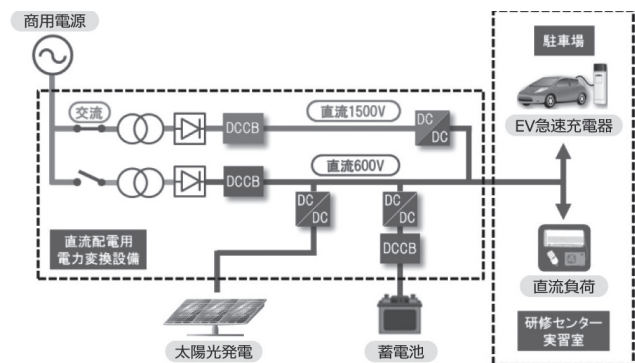


図2 直流配電実証システム（研修センター）

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（図2）。2019年7月より実証試験を開始している。

顧客ニーズに合わせて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クラスを採用している。

【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「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）

実証システムでは、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、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。このシステム構成は、電力の逆流がないためFRT（Fault Ride Through）要件^{*4}による制約はなく、系統連系申請が不要となるため設備導入の自由度が高い。

さらに、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」を設置して、蓄電池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。

以下に主要機器・制御機能について紹介する。

4-1 半導体直流遮断器「DCCB」⁽²⁾

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。直流を扱う際の

きな課題は、短絡・地絡事故発生時に動作する遮断器内電極の直流アークによる破損や劣化である。

本開発では、事故電流の立ち上がりで高速遮断できる半導体式の直流遮断器（以下、DCCB）を新たに開発した。電流遮断時に端子間に過電圧が発生するという課題をアクティブクランパ^{※5}で解決している。

(1) 仕様

「DC750V」ならびに「DC1500V」回路用DCCBの開発仕様を表2に示す。さらに、DCCB外観と内部回路構成を写真1、図3に示す。

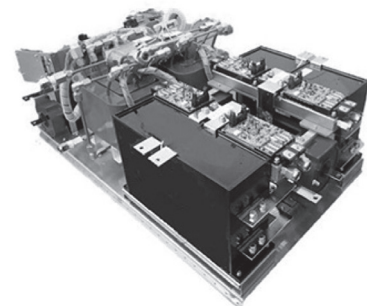
表2 DCCBの開発仕様

項目	仕様	
定格電圧	DC750V	DC1500V
定格電流	135A	
定格遮断容量	2kA	
遮断時間	2ms以内	
遮断方向	片方向（通電は双方向）	
極数	2	



W290×D200×H300 (mm)

写真1 DC750V回路用DCCB



W720×D420×H240 (mm)

写真2 DABコンバータ

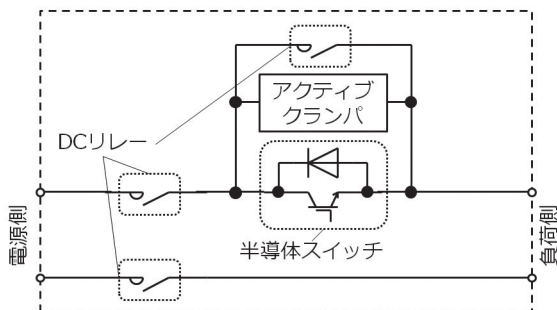


図3 DCCB回路構成

(2) 保護機能への取り組み

(a) マイコンによる遮断時間制御

DCCBでは、過渡電流による半導体デバイスの発熱を防止するために、通電、電流量に応じて遮断時間を柔軟に変化させる制御を行うことで、事故電流・過負荷保護の両立を実現した。

(b) アクティブクランパによるサージ吸収機能

事故時の短絡電流を高速に遮断した場合、配線のインダクタンス成分がもつ逆起電力によりサージ電圧が発生する。そのため、半導体スイッチの端子間に発生する過電圧が一定レベル以上に上昇しないよう抑制するアクティブクランパ回路を開発し、DCCBに適用した。

4-2 絶縁型双方向DC-DCコンバータ⁽³⁾

直流電圧を昇・降圧するDC-DCコンバータは、双方向電力変換機能とともに、地絡などの事故が配電システムとその周辺へ波及することを防止するための絶縁機能を備えることが求められる。

本開発では、高速スイッチングが可能なSiCデバイスと高周波変圧器によってコンパクト化を図ったDAB（Dual Active Bridge）方式の絶縁型双方向DC-DCコンバータ（以下、DABコンバータ）を新たに開発した。電力変換効率は、定格出力時に96.0%、最高効率98.8%を達成した。

(1) 仕様

表3に開発品DABコンバータの仕様を示す。負荷容量500kW/フィーダを3台（3並列）構成とする直流配電システムを想定し、一般産業用としては業界最大級となる「167kW」を開発仕様とした。

DABコンバータは、変圧器の左右双方にフルブリッジの半導体交流直流変換回路を配置した構成となり、変圧器で左右の回路間を絶縁している（図4）。

また、双方向の電力融通では、左右のブリッジ間の電圧位相調整によりスムーズな制御を実現した。さらに、高周波変圧器の採用により、DABコンバータ単位での直並列接続による大容量化が可能である。

表3 DABコンバータの開発仕様

項目	仕様	
定格容量	167kW	
定格電圧	高電圧側	DC1500V
	低電圧側	DC600V
定格電流	高電圧側	111A
	低電圧側	278A
回路構成	高周波絶縁方式 (DAB)	
半導体モジュール	高電圧側	フルSiC-MOSFET 1200V、400A (2直列構成)
	低電圧側	フルSiC-MOSFET 1200V、800A
スイッチング周波数	20kHz	
冷却方式	液冷	
体積	72ℓ	

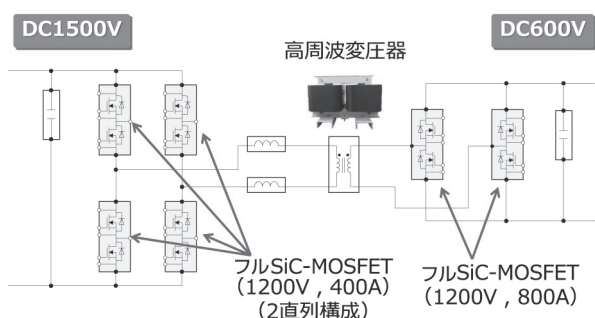


図4 DABコンバータ回路構成

(2) コンパクト化への取り組み

DAB方式による変換器のスイッチング周波数の高周波化により、DC-DCコンバータの変圧器やリアクトルなどの巻線機器をコンパクト化することができる。一方で、半導体デバイスや巻線機器の損失が増加する傾向にあるため、損失低減や冷却性能の向上が大きな課題となる。

- (a) SiCデバイスによる高周波化
- (b) 液冷方式の採用
- (c) 小型大容量高周波変圧器の開発

表4は、今回開発した大容量高周波変圧器の開発仕様である。スイッチングサージに対する絶縁と液冷の性能を実

表4 高周波変圧器の開発仕様

項目	仕様	
定格容量	167kW	
絶縁階級	F種	
変圧比	2.5 : 1	
定格電圧	高電圧側	DC1500V ± 10%
	低電圧側	DC600V ± 10%
周波数	20kHz	
電圧波形	矩形波	
冷却方式	液冷	

現するための専用設計を行い、電力密度12kW/ℓ以上の小型化を達成した。

4-3 保護・制御装置⁽⁴⁾

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。また、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を実現するために、再エネ・蓄電池・直流負荷を適切に連携させた統合制御が要求される。

実証システムでは、蓄電池用/PV用の各DABコンバータが直流フィーダの電圧状態を常時ウォッチし、自律的に動作を判定する制御方式を採用した。

5. 実証試験

実証試験の1例として、EV急速充電時のピークカット運転から商用電源停止（模擬停電）により自立運転へ移行させた検証ケースの結果を実測波形にて紹介する（図5）。

試験開始時、商用電源から直流回路へ電力を供給し、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急速充電により電流増加に対して、蓄電池用DABコンバータは接続点にて電流の変動を検知し、

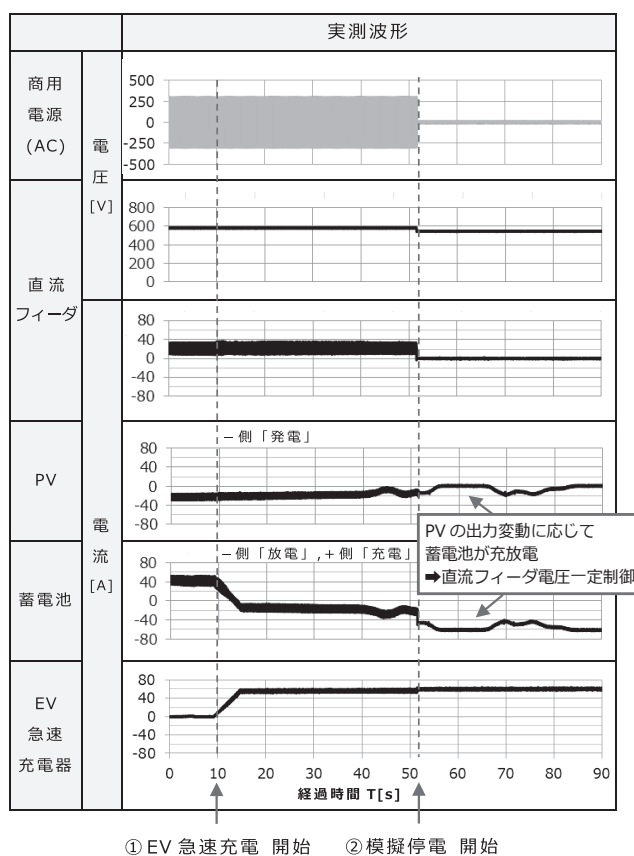


図5 「ピークカット運転」 → 「自立運転」の実測結果

蓄電池がPV出力に追従しながら放電を開始して商用電源からの電力供給を一定値に制御していることがわかる。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=52秒時点にて、商用電源との接続点で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、実測波形では蓄電池用DABコンバータが直流フィードの直流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。また、PVの出力変動を蓄電池の充放電にて制御し、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した。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長である。

6. 展 開

6-1 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、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6）。

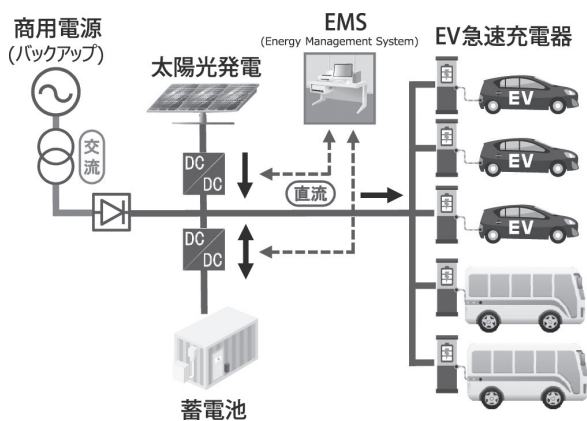


図6 EV急速充電ステーション

6-2 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7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、再エネ・自家発電機を活用した電力

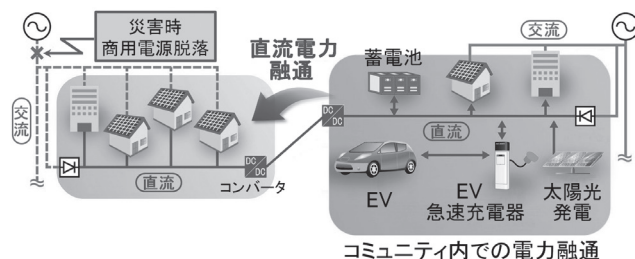


図7 コミュニティ間の直流電力融通システム

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。

7. 結 言

本稿で紹介したDC600V、DC1500Vクラスの直流配電システムは、世界的にも実証事例は数少ない。海外展開も見据えてシステム構築を進め、様々な顧客ニーズ対応した最適なソリューションの提供へ挑戦していく所存である。

用語集

※1 BCP

Business Continuity Plan：事業継続計画。

※2 DC

Direct Current：直流。

※3 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。

※4 FRT要件

電力品質を確保するために必要となる、系統擾乱時の分散電源の運転継続性能の要件。

※5 アクティブクランプ

サージ電圧が印可されたときに一定の振幅電圧以上にならないように自動的にエネルギーを吸収する機能を持つ回路。

・DCCBは日新電機㈱の登録商標です。

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) 麻植、豊田、蓑輪、高野、「半導体直流遮断器の開発」、日新電機技報 Vol.65、No.1 (2020年4月)
- (3) 小倉、前地、栗尾、西村、松原、「絶縁型双方向DC-DCコンバータの開発」、日新電機技報 Vol.65、No.1 (2020年4月)
- (4) 黒田、加茂、牧、栗尾、高野、「直流配電システムの開発」、日新電機技報 Vol.65、No.1 (2020年4月)

執 筆 者

黒田 和宏* : 日新電機(株) 主幹



小倉 正嗣 : 日新電機(株) 主任



前地 洋明 : 日新電機(株)



麻植 実 : 日新電機(株)



豊田 玄紀 : 日新電機(株)



栗尾 信広 : 日新電機(株) 主幹



*主執筆者