

第2部 系統変電システム

カーボンニュートラルの実現に貢献する次世代送変電機器の技術展望

Technical Trend of Transmission and Distribution Equipment Contributing to Realization of Carbon Neutrality



入野邦英*
Kunihide Irino

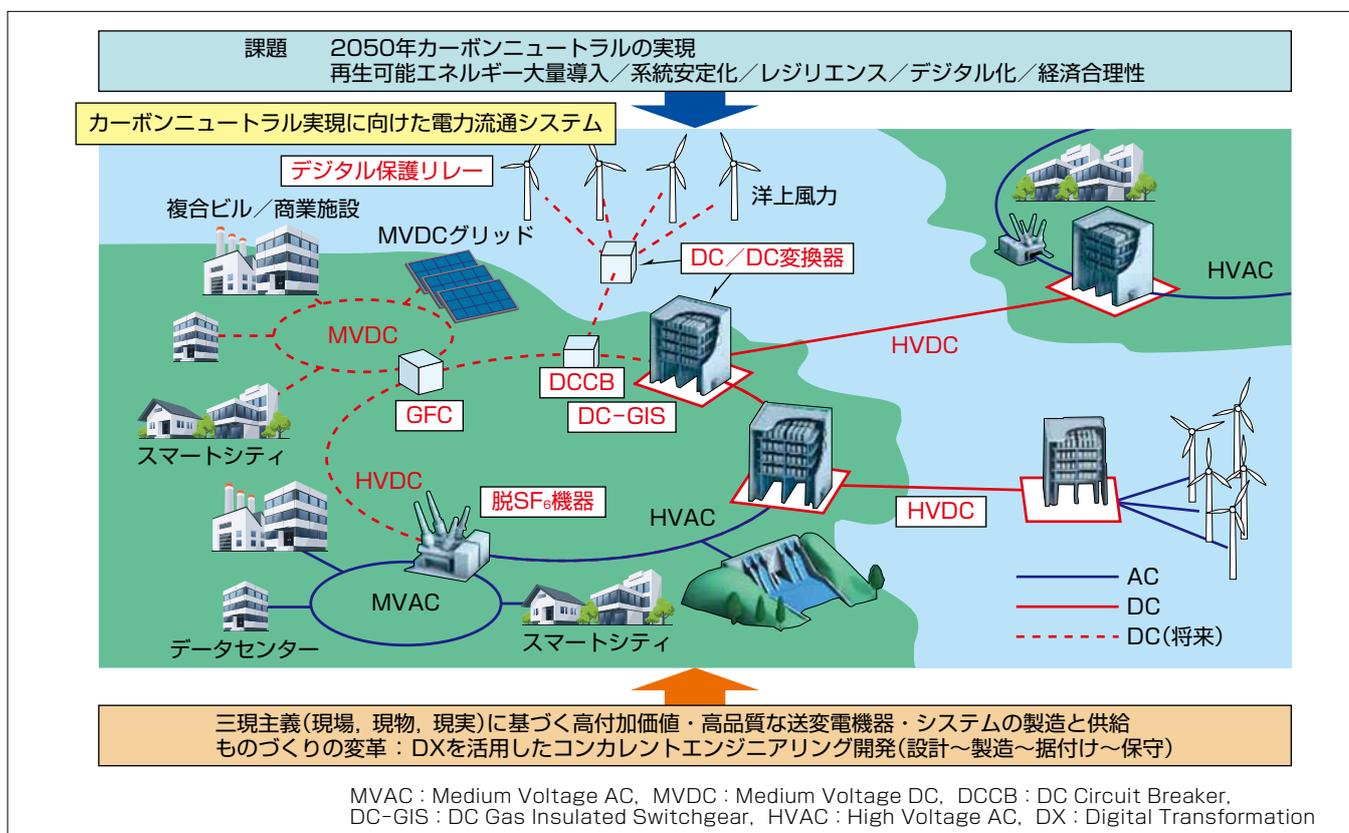
要旨

地球温暖化の原因になるCO₂の排出削減のため、世界各国で、再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる。日本でも2050年にCO₂排出量が実質ゼロになるカーボンニュートラルを実現すると政府目標が示された。再生可能エネルギーの主力電源化に向けた戦略的議論が活発に行われており、既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大とともに、洋上風力発電の導入拡大が課題になっている。

一方、太陽光・風力発電などは、天候によって出力が大きく変化するため、再生可能エネルギー電源が大きく増加する中でも、安定して電力供給を継続できる電力流通システムの構築が不可欠であり、その実現のために必要になる技術開発も、喫緊の課題として顕在化している。

三菱電機では、これらの課題の解決に貢献するため、洋上風力発電、グリッドフォーミング、マイクログリッド等による効率的な電力送電の開発に取り組むとともに、電力流通システムのレジリエンス強化のために求められる次世代の送変電機器の開発を推進している。

次世代の送変電機器として、環境負荷低減開閉機器、電力変換システム(HVDC(High Voltage DC), FACTS(Flexible AC Transmission System), GFC(Grid Forming Control)), デジタル保護リレー等が挙げられる。また、信頼性の高い次世代送変電機器を安定的に供給していくためのものづくりの変革も必要である。



カーボンニュートラル実現に向けたレジリエントな電力流通システム

カーボンニュートラルの実現に向けて、洋上風力発電、太陽光発電など、再生可能エネルギー電源の大量導入が進んだ将来の電力流通システムを示している。従来の高圧及び中圧の交流系統(HVAC, MVAC)に、高圧及び中圧の直流系統(HVDC, MVDC)が接続・連系しており、電力変換システム、脱SF₆(脱六フッ化硫黄)機器、デジタル保護リレー等の次世代送変電機器を適用することによって、レジリエントな電力流通システムの構築が実現される。

1. ま え が き

日本を始めとする多くの国・地域で、電力流通システムは、火力、水力、原子力を中心とする大規模発電で発電された電力を、交流で需要地まで送配電する構成で発展を遂げてきた。しかしながら、世界的にカーボンニュートラルの実現が強く求められる中、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が急速に拡大しており、その影響による系統不安定化などの課題に対応するため、直流送電及び関連する新技術を適用して、レジリエントな電力流通システムの構築が必要になっている。

これらの課題に対応するため、当社ではこれまでに蓄積した従来の送電機器に関する技術を基盤にして、環境負荷低減開閉機器、電力変換システム、デジタル保護リレーなど、電力流通システムのレジリエンス強化に必要とされる次世代の送電機器の開発に取り組んでいる。

本稿では、カーボンニュートラルの実現に向けて変化する電力流通システムと、その中で求められる次世代の送電機器の技術展望について述べる。

2. 新たな電力流通システムと直流送電技術

日本政府が目標とする2050年にCO₂排出量を実質ゼロにする“2050年カーボンニュートラル”の実現に向けて、再生可能エネルギーへの移行を加速するには、既に導入が進む太陽光発電の一層の拡大とともに、風力発電の大規模導入が必要になる。

電力システムの安定化と設備効率化の視点では、電力消費地と発電所は近接している方が有効であるが、風力発電所や太陽光発電所の適地と電力消費地は離れていることが多いため、電力流通システムとしての効率的運営のため、従来にない概念のシステム構成や技術が提案されている。

例えば都市部では再開発による大規模な電力消費地としてスマートシティの構築が進む一方、地方では面的に分散されていたサービスや生活基盤が集約されたマイクログリッド化が進展しつつある。加えて地方では、デジタル化の進展に伴って大量の電力を消費する大規模データセンターの設置が進むことと並行して、これらの電力消費とのカーボンオフセット実現のため、洋上風力発電所や太陽光発電所の建設が推進されていくものと考えられる。

大量導入された再生可能エネルギーを安定かつ効率的に電力消費地に送電するためには、周波数や電圧の変換でのロスや送電ロスをできる限り低減することが求められるが、これらの問題を解決する有効な手段の一つとして、今日、直流による送配電技術の適用が注目されている。

通常、大容量の電力を長距離送電するには、高い電圧で送電し、需要地に合わせて適切に電圧を下げる必要がある。これまで日本を含む多くの国・地域では、電圧変換の容易さや安全性、それに起因する経済性の観点から、交流での送配電が普及しているが、近年の直流スイッチング・整流技術の革新によって、一定以上の長距離送電では直流の方が交流よりも経済面でも有利になりつつある。

このような情勢を踏まえて、カーボンニュートラル実現に向けた今後の直流技術の活用領域を図1に示し、それぞれについて次に述べる。

(1) 洋上風力発電

洋上風力発電では海底ケーブルによって送電を行うが、ケーブルはキャパシタンス成分が非常に大きいため、交流による長距離送電が困難になり、直流の選択が有効になる。

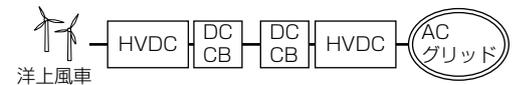
(2) グリッドフォーミング制御(GFC)

脱CO₂の観点から化石燃料を主とした火力発電設備は減少し、代わって太陽光発電等のインバータ電源が増加すると想定される。このような電力系統では、これまで火力発電所の同期発電機が担っていた慣性力による調整力が低下することになり、負荷変動や発電量の変動によって需給バランスが変動すると、系統周波数の安定化が困難になる。その代替手段として、変換器と蓄電池によって同期発電機と同様な慣性力を模擬するグリッドフォーミング制御が注目されている。蓄電池、変換器とも直流で動作するため、直流技術の適用によって、効率的なシステム構築が可能になる。

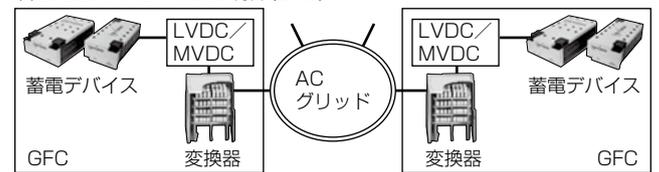
(3) グリーン水素

今日、燃料についても脱炭素化が着目されている。その中でも、燃焼時にCO₂を排出せず、さらには再生可能エネ

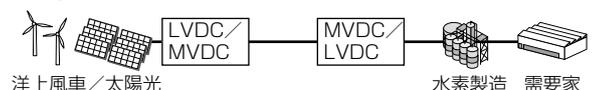
(1) 洋上風力の直流送電(HVDC)と将来のDC集電



(2) グリッドフォーミング制御(GFC)



(3) グリーン水素



(4) マイクロDCグリッド



LVDC : Low Voltage DC

図1. 直流技術の活用領域・システム概念図

ルギーを使用することで製造時にもCO₂を排出しない水素の水電解合成が注目されており、この電気分解に直流技術が適用される。

(4) マイクログリッド

CO₂排出量の削減にはエネルギー消費量そのものを低減することも有効であり、消費電力削減手段として家庭内電気機器やビル内設備の直流化とインバータ化が進展する。その結果として、直流/交流の変換ロス削減のため、低圧の配電網の直流化も進むものと想定する。また、ビル間やマイクログリッド内の太陽光発電設備、蓄電池等、インバータ電源の増加に伴って、マイクログリッド内の配電網の直流化が進展していくことが想定される。

さらには、マイクログリッド間を連系し、相互に電力融通する場合でも、再生可能エネルギーの導入拡大に合わせて、直流化が進んでいくことが想定される。

これらを踏まえて、直流送配電網の適用範囲を表1に示す。

CO₂排出削減に向けた取組みのうち、送配電システムの直流化によるメリットをまとめると、次に述べる2点が主要なポイントになる。

- (1) 送電時のエネルギーロス削減によるエネルギー利用率改善を通じたCO₂排出量の削減
- (2) 太陽光発電、蓄電池、グリーン水素製造など、CO₂を

排出しないエネルギーの送電時での変換ロスの低減によるエネルギー利用率の改善

発電した電力を需要地まで運ぶ送電システムの効率化は、カーボンニュートラルの実現を支えるインフラとして、これまで以上に重要な役割を果たすことになるため、直流送電を始めとする関連技術の更なる開発加速が求められている。

3. 新たな課題に応える次世代送変電機器開発

電力流通システムは、大規模電源開発と長距離送電及び電力系統の安定運用を通じて、重要な社会インフラとして発展してきた。日本では1950年代後半から275kV、1973年から500kV送電の運用を開始し、さらに1990年代には1,000kV送電のための実証試験が実施された。当社では、これまで電力流通システムの発展を実現するため、各種の送変電機器を世界に先駆けて開発してきた(表2)。

現在は、2章で述べた直流送電技術を含めて、カーボンニュートラル実現に向けた新たな電力流通システムに適用できる次世代送変電機器の開発を進めている。

3.1 環境負荷低減開閉機器とSF₆ガス代替技術の開発

気候変動防止が重要な社会課題になる中、開閉機器についても環境負荷低減に向けた開発に関心が集まっている。特に開閉機器の絶縁・消弧媒体として広く用いられているSF₆ガスは地球温暖化係数がCO₂の23,500倍(気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書の値)と高いため、欧米を中心に使用規制の検討が行われており、英国National Grid社では、2026年までにSF₆使用機器の購入終了、2050年までにSF₆使用機器の保有終了の方針を打ち

表1. 直流送配電網の適用範囲

HVDC(高压)	高電圧化、広域ネットワーク化
MVDC(中压)	洋上風力の集電直流化による効率改善
	HVDCとLVDCの普及に伴う直流連系
LVDC(低圧)	スマートシティ等での配電分野の直流化
	ビル間等の電力融通の直流化
	データセンター、EVチャージャ等の直流化
	ビル内設備、家庭内機器での直流化

EV : Electric Vehicle

表2. 日本での電力流通システムと当社送変電機器開発の変遷

	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
	高度成長期		安定成長期		低成長期		第4次産業革命			カーボンニュートラル
電力システム改革							☆広域的運営推進機関設立 ☆小売全面自由化 ☆発送電分離	☆450MVA STATCOM	大規模洋上風力発電 多端子直流送電系統 海底直流送電	
送電安定化				☆STATCOM	☆紀伊水道HVDC		☆HVDC検証棟		SiC適用HVDC GFC	マイクロDCグリッド
電力系統保護	アナログ静止形リレー 位相比較リレー 分散形事故波及防止			デジタルリレー FM/PCM電流差動リレー 中央集中形事故波及防止					IED フルデジタルリレー AI搭載リレー	
開閉機器遮断器GIS		☆550kVフルGIS 高電圧・大容量化		☆1,000kV実証器			☆420kVばね操作1点切 アセットマネジメントシステム		脱SF ₆ 開閉機器 デジタル変電所	
変圧器		高電圧化 ☆500kV器 大容量化		☆1,000kV実証器	☆分解放送器(CGPA) ☆77kVガス絶縁変圧器	☆三相器1,510MVA ☆275kVガス絶縁変圧器	☆植物油入変圧器 アセットマネジメントシステム			DC-DC変圧器

STATCOM : STAtic synchronous COMpensator, SiC : シリコンカーバイド, FM : Frequency Modulation, PCM : Pulse Code Modulation, IED : Intelligent Electronic Device, CGPA : Coil Group Packed Assembly, MVA : Mega Volt Ampere

出している。また米国カリフォルニア州では、SF₆ガス機器の段階的廃止が同州大気資源局(CARB: California Air Resources Board)から提示されている。

このような動きへの対応策になるSF₆ガス代替技術としては、CO₂ガスや人工のフッ素系ガス等の混合ガス又は乾燥空気を用いた絶縁・遮断技術、及び真空遮断技術などがある⁽¹⁾。これらの中でも、特に地球温暖化係数が0の真空遮断と乾燥空気絶縁を融合させた真空遮断器及び開閉機器は、最も有力な代替手段の一つと考えられている。

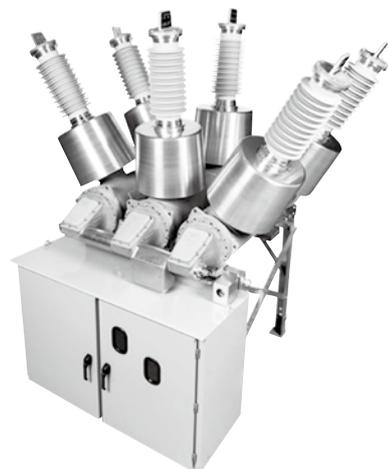
当社でも、真空遮断と乾燥空気絶縁の組合せを採用した国内電力システム向けの72kV/84kV真空遮断器を製品化済みであり、今後SF₆ガス規制が国内より先行している北米市場に向けて550kVまでの真空遮断器を順次投入していく計画である。まず2021年には乾燥空気絶縁技術の高度化によって、国内向けに製品化済みの84kV真空遮断器を小形化した72.5kV真空遮断器(図2)を市場投入予定であり⁽²⁾、また将来の550kV級までの開発に向けた第1ステップとして、Siemens Energy Global GmbH&Co. KG社と定格電圧245kVのタンク形遮断器の共同開発に向けて両社で検討を開始している⁽³⁾。今後、現有の550kVまでのSF₆ガス絶縁機器ラインアップを真空遮断及び乾燥空気絶縁機器へ段階的に転換していく計画である。

3.2 電力変換システム

新たな電力流通システムでは、大容量電力の長距離安定送電や、再生可能エネルギーの大量導入に起因する系統不安定化への対策が課題になる。これら課題への対策として、パワーエレクトロニクスを活用したHVDCやFACTS、GFC等の電力変換システムの適用が有効であり、近年世界的に注目が高まっている。

3.2.1 HVDC

HVDCシステムは、特に送電線コストが小さいなどの理由から長距離送電で優位であり、洋上風力発電用の長距離の海底ケーブル系では、ケーブルキャパシタンスの影響から更に直流が優位になることから、適用が活発化している。また国内ではHVDCを適用して50Hzと60Hzを連系



出典: <https://www.meppi.com/products/mv-vacuum-circuit-breakers>

図2. 北米向け72.5kV真空遮断器⁽²⁾

させる周波数変換所の設備強化が進められている。当社は、2000年に四国と本州の連系強化を目的に設置された紀伊水道直流連系設備で、他励式変換器を含む機器を納入し、さらに自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムの開発を行い、当社工場敷地内に、容量50MWの送電線を持たない直流送電システム(Back To Back: BTB)検証設備を建設し(図3)、2018年から各種の検証試験を完了し、実規模の直流送電システムの検証を完了した。

また現在は、交流系統同士を1対1で接続する2端子構成が世界でも大部分であるが、将来必要になる多端子HVDCシステムのための技術開発も進めている。多端子HVDCで新たに必要になる技術の一つに、直流遮断器(DCCB)がある。交流電流の遮断と異なって、直流電流の遮断では、自然電流零点が存在しないことから、電流零点を形成するための手段が必要になる。当社では外部共振回路によって強制的に電流零点を形成し、真空バルブを適用した遮断部で直流電流の遮断を行う方法を開発した。これまでに160/200kVクラスのプロトタイプの実験を、オランダの認定試験所KEMA Labsで実施し、16kAの直流電流を高速に遮断可能であることを実証した。さらに現在は、引き続いて525kVクラスまでのHVDC実系統に適用可能なDCCBの開発を進めている(図4)。

3.2.2 FACTS

FACTS機器であるSVC(Static Var Compensator)やSTATCOMは、半導体スイッチング素子を用いることで、連続的かつ高速な無効電力制御が可能である。このFACTS機器には、整流器、インバータ等の電力変換器の



(a) HVDCバルブホールの全景 (b) HVDCの検証状況

図3. HVDC検証設備

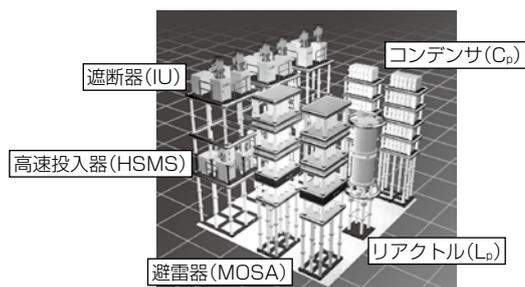


図4. 525kV DCCB概念図

増加に伴う低次高調波を削減するアクティブフィルタ機能、系統事故等によって固有の周期で発生する系統動揺を低減する系統動揺抑制制御、及び短絡容量が大きく変化してもFACTS機器の性能が悪化しないよう、制御パラメータを自動で変更する最適ゲイン制御等、系統に適した機能を付加している。当社は1991年に定態安定度向上を目的とした80MVA STATCOMを納入し、2012年には定態安定度向上及び過電圧抑制を目的とした世界最大級容量の450MVA STATCOMを納入した。さらに、自社製のIGBTを用いた設計自由度が高く低損失なMMC方式のSTATCOMを開発し、2017年から納入を開始した。

3.2.3 GFC

近年、再生可能エネルギー導入の拡大によって、インバータ電源の大量導入や同期発電機の減少が各地域で進んでいる。これに伴って系統の短絡容量や慣性力の増強など、新たな系統安定化対策の需要が生まれており、これら系統の慣性力を補完する変換器と蓄電デバイスの組合せで有効電力・無効電力を発生させるGFCシステムの開発を進めている(図5)。

3.3 デジタル保護リレー

系統保護リレーは、電力系統の安定運用に重要な役割を果たしているが、コンピュータや通信伝送系の性能向上を活用してデジタル保護リレーが開発され、アナログ静止形リレーから置き換わっていった。また近年では、災害に対するレジリエンス強化が求められるとともに、DXによる業務革新へのニーズの高まりを受けて、遠隔整定や障害の即時復旧などに対応可能な配電変電所向け保護リレーユニットが求められている。

この要求を満たすため、電力系統用保護リレー“MELPRO-CHARGE2シリーズ”の最終ラインアップとして、配電変電所向け保護リレーユニット“Type-S”を開発した(図6)。この系統保護リレーは、盤メーカーで製作する配電用保護リレー装置に実装されることも想定し、EMC(Electro-Magnetic Compatibility)性能を含んで、電力用規格(B-402)を保護リレーユニット単体で満足させている。



図6. MELPRO-CHARGE2 Type-S

今後は、保護リレーと通信技術やAI機能を組み合わせて、高性能エッジ端末による高速かつ最適制御を可能にするシステムの開発を進めていく計画である。

4. 次世代送変電機器の生産を支えるものづくり変革

再生可能エネルギーの導入が進む新たな電力流通システムでは、3章で述べたような次世代の送変電機器が必要とされる。これらの製品を高品質かつ合理的なコストで安定的、継続的に供給するため、当社ではものづくりの変革も継続的に推進している。三現主義(現場、現物、現実)を基本原則とし、これまで培った生産技術に一層磨きをかけるとともに、機器及びシステムのライフサイクルを通じたサプライチェーン全体(設計、製造、試験、輸送、据付け、保守)の最適化を目指して、コンカレントエンジニアリング開発や、DXを活用した業務革新に取り組んでいる。

これらの取組みを通じてものづくりの進化を続けることで、レジリエントなサプライチェーンと生産体制を構築し、将来にわたって信頼性の高い次世代送変電機器を安定的に供給していく。

5. むすび

脱炭素社会実現に向けて、再生可能エネルギーの大量導入に対応した電力の安定供給に加えて、電力ネットワーク全体でのエネルギー効率を最大化する新たな電力流通システムの重要性が高まっており、その構築のために、今後も様々な技術課題が生じると想定される。

当社は、これまでに培った基盤技術を更に発展させて、環境負荷低減開閉機器や電力変換システム、デジタル保護リレーなどの次世代送変電機器の開発を推進し、カーボンニュートラルの実現に貢献する次世代送変電機器を提供していく。

参考文献

- (1) M. Nakai, et al.: Low loss DC circuit breakers and DC GIS equipment, CIGRE 2021 Centennial Session, A3-105R (2021)
- (2) Mitsubishi Electric Power Products, Inc.: 72kV Vacuum circuit breaker
https://0aab1c21-cdn.agilitycms.cloud/AttachmentLists/File/SA0030109001_72V%20VCB%20Solutions%20Sales%20Aid.pdf
- (3) 三菱電機(株), Siemens Energy Global GmbH&Co.KG: 真空バルブによる電流遮断およびドライエアー絶縁方式を採用した245kVタンク型遮断器の共同開発に向けた実現性検討を開始
<https://www.MitsubishiElectric.co.jp/news/2021/0608.pdf>

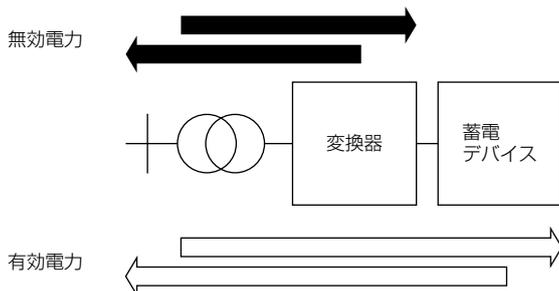


図5. GFCシステム