

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

き電設備の変遷と動向

電気鉄道には直流き電方式と交流き電方式があり、日本の電気鉄道は直流き電方式からスタートしました。その後、鉄道輸送量の増加にともなって大電力のき電に適した交流き電方式の開発が行われ、新幹線の開業へとつながりました。ここでは、国内における直流・交流各方式のき電設備について技術の変遷をまとめるとともに、最近の動向として省エネルギー化に関する取り組みを紹介します。



重枝 秀紀
Hidenori Shigeeda
電力技術研究部
き電研究室
室長
【専門分野】き電回路一般

き電設備について

電力会社などの送電線から、電車や電気機関車といった電気車にき電するためには、次の設備が必要です。

- ・送電線の電力を電気車に適した電力に変換する「変電設備」(き電用変電所など)
- ・変電設備から電気車に電力を送る「電車線設備」(トロリー線など)
- ・電気車から変電設備に電力を戻す「帰線設備」(レールなど)

ここでは、これらの設備を電気回路として見た場合の総称を「き電設備」とし、その変遷と動向を紹介します。

なお、電車線設備については別記事にも紹介がありますので、あわせてご覧ください。

直流き電設備の変遷

電気鉄道の黎明期において、欧米では大別して次の三つのき電方式に関する研究開発が行われていました。

- ①交流電力をき電して、電気車の交流モーターを駆動する方式
- ②交流電力をき電して、電気車で直流電力に変換して直流モーターを駆動する方式

③直流電力をき電して、電気車の直流モーターを駆動する方式

当時の技術では、交流モーターを駆動して電気車を運転すること、また、電気車において交流電力を直流電力に変換することが困難である一方、直流モーターが電気車の運転に適していたことから、日本の電気鉄道は1895(明治28)年に③の直流き電方式からスタートしました。

直流き電方式では、変電設備において交流電力を直流電力に変換する必要があります。その方法としては、交流モーターで直流発電機を運転する方法、整流作用(☞参照)をもつ素子(整流素子)を用いる方法などがあり、当初は前者の方式が採用されていました。特に、交流モーターと直流発電機の一部を共有することで両者を一体化させた回転変流器(☒1)は、コンパクトで高

☞ 整流作用

周期的に極性が反転する交流に対し、一方の極性だけを導通させて、逆の極性は阻止するような作用。整流された交流波形を、コンデンサーなどを用いて平たんにならすことで、直流の出力が得られる。

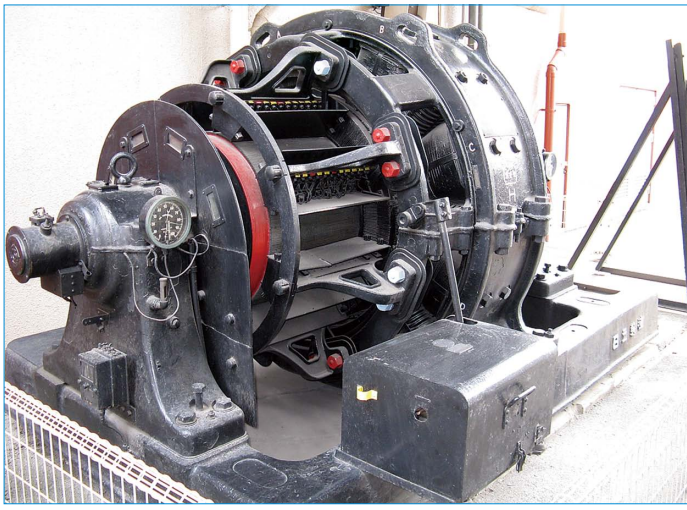


図1 回轉變流器

出典：By I.KENPEI, CC-BY-SA-3.0, via Wikimedia Commons

効率であったことから主流の変換装置となりました。

1900年代に入り、水銀整流管を整流素子とする水銀整流器が実用化され、国内でも1925年頃から導入されました。特に、高い直流電圧を出力することが回轉變流器よりも容易であったことから、き電電圧が1500Vの路線で標準的に用いられました。

その後、1950年代に半導体素子の一種であるシリコンダイオードを整流素子とするシリコン整流器が実用化され、国内では1960(昭和35)年に導入されたのを皮切りに、現在ではほとんどの直流き電設備でシリコン整流器が用いられています。シリコン整流器は、他の方式と比較して信頼性、保守性に優れており、直流き電設備の信頼性向上や保守の省力化に大きく寄与しています。

直流保護設備の変遷

回轉變流器や水銀整流器では装置内部の故障が多く、その際に他の変電設備から大きな故障電流が流入することが課題でした。このため、故障時に電流を遮断して設備を保護するための直流高速度遮断器(図2)が開発され、国内では1924(大正13)年に導入されました。当初は変電設備の保護が目的でしたが、次第に電気車や電車線設備などで故障が起きた際の保護にも用いら

れるようになり、今では直流き電設備における保護の要となっています。

図2のように、電流遮断時に大きな音とともに火花(アーク)を放出する気中遮断器が主流ですが、近年はその点を改善した真空遮断器なども実用化されています。

一方、1951(昭和26)年に発生した桜木町事故では、断線した電車線が車体に接触した状態でき電を継続していたことが被害拡大の一因となったことから、新たな保護設備の開発が進められ、き電線故障選択継電器や連絡遮断が実用化されました。き電線故障選択継電器は、電車線などで故障が起きた際の故障電流と、通常の電気車運転時の電流を判別し、故障の場合は直流遮断器を開放するもので、1955(昭和30)年の実用化以降、改良を重ねながら導入が進められました。連絡遮断は、ある変電設備で故障を検出して遮断器を開放した場合に、隣接する変電設備の遮断器を同時に開放させて、故障が起きた区間へのき電を確実に停止するもので、1959(昭和34)年に導入されました。現在、これらの保護設備は広く普及しており、直流き電設備の保安度向上に寄与しています。

このほか、変電設備の操作、監視などは基本的に有人で行われていましたが、戦後、変電設備の信頼性向上や通

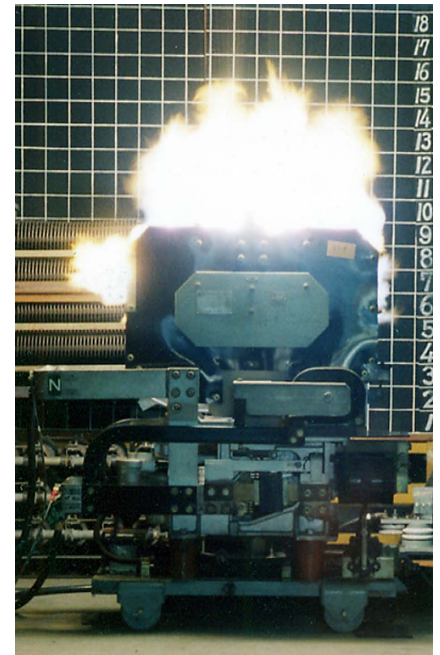


図2 直流高速度遮断器

信技術の進歩にともなって1箇所の指令所で多数の変電設備を集中管理する遠方監視制御装置が実用化・普及し、変電設備の無人化による省力化が図られています。

交流き電設備の変遷

戦後の復興から高度経済成長の時代に移り、鉄道の輸送量が急速に増加するにつれて、低電圧・大電流の直流き電方式ではき電設備の増強に限界があると想定され、高電圧・小電流の交流き電方式に着目されるようになりました。1950年代前半において、「直流き電設備の変遷」の冒頭に述べた三つのき電方式のうち、①は商用周波数(50Hzまたは60Hz)より低い16.7Hzや25Hzの交流でき電する方式が欧米で既に実用化されていた一方、②は商用周波数の交流をき電する方式がフランスで開発されたばかりという状況でした。その中で、日本は国鉄を中心として電力会社送電線の電力がそのまま利用できる商用周波数の交流き電方式を開発することとし、1954(昭和29)年に仙山線の一部区間に交流き電設備を設けて技術の検証や問題点の解決に取り組みました。

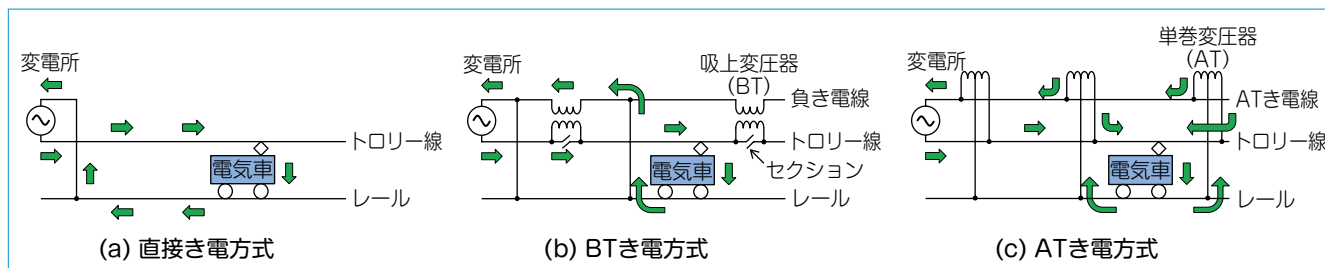


図3 交流き電方式

図3に示す各種交流き電方式において、(a)の直接き電方式は最もシンプルな構成ですが、沿線の通信線に与える雑音などの影響が大きいためという問題がありました。このため、交流電化の実用化にあたっては吸上変圧器(BT)と負き電線を用いたBTき電方式(図3(b))を採用することとし、1957(昭和32)年に仙山線と北陸線で完成したのを皮切りに、1964(昭和39)年に開業した東海道新幹線にも適用されました。

一方、BTき電方式ではBT毎にトロリー線に設けられるセクションを電車が通過する際にアークが発生し、トロリー線を損傷させることが保守上の課題となりました。このため、セクションが不要となる新たなき電方式の開発に取り組み、1970(昭和45)年に単巻変圧器(AT)を用いたATき電方式(図3(c))を実用化しました。以降の交流電化ではATき電方式が標準となり、東海道新幹線も1991(平成3)年までにATき電方式に変更されています。

三相交流の送電線から単相交流のき電用電力を受電する場合、三相のうち1相から直接受電すると不平衡が大きくなり、同じ送電線の他の設備に影響する可能性があります。このため、国内では一般に図4のような三相から2組の単相に変換する変圧器をき電用変圧器として用いています。交流電化の当初からスコット結線変圧器(図4(a))が用いられていますが、1972(昭和47)年の山陽新幹線開業の際して超高压(275kV)の送電線から

受電するにあたり、変圧器の送電線側(一次側)の中性点を接地する必要があったため、中性点の接地が容易な変圧器として変形ウッドブリッジ結線変圧器(図4(b))が採用されました。その際、構成がよりシンプルなルーフ・デルタ結線変圧器(図4(c))も検討されましたが、異常時の挙動など解明すべき点が残されていることから、採用には至りませんでした。その後、鉄道総研が中心となってルーフ・デルタ結線変圧器のさまざまな特性に関する研究・検証を行い、2010(平成22)年に東北新幹線(八戸・新青森間)において実用化されました。以降、超高压送電線から受電するき電用変圧器として用いられています。

送電線における不平衡や電圧変動を抑制するには、き電用変圧器の二次側において無効電力を補償したり、有効電力を融通したりすることも重要です。半導体技術を電力設備に応用するパワーエレクトロニクスの進歩にともない、連続的に無効電力を補償できる静止形無効電力補償装置(SVC)が1980年代後半より導入されるようになりました。その後、鉄道総研では有効電力の融通も可能なき電側電力融通方式電圧補償装置(RPC)の開発に取り組み、2002(平成14)年に東北新幹線(盛岡・八戸間)で実用化されました。

き電設備における省エネルギー

き電設備に関する最近の動向として、き電設備における省エネルギー化の取り組みを紹介します。

一般に、電気回路に電流が流れると抵抗で電力が消費されてエネルギー損失が発生します。損失は抵抗と電流の大きさに依存するため、それを低減するためには抵抗または電流を低減することが必要です。そのため、き電設備における損失(き電損失)は一般に交流き電方式よりも電流が大きい直流き電方式の方が問題となります。

き電設備の抵抗を低減する従来の方角として、複線区間において上下線のき電設備を一定の間隔で接続する上下一括き電方式があります。ただし、この方式では故障時に上下線の両方がき電できなくなる問題があります。これを解決する方法として、変電所の中間などで上下線を接続する上下タイき電方式があります。上下タイ設備には遮断器などを設置し、故障時には上下線を分離することによって、健全な方へき電することができます。

抵抗を低減する究極の技術が超電導です。鉄道総研では直流き電用の超電導き電ケーブル(図5)について、実用化に向けたさまざまな研究開発を行っています。図5では、往路用と帰路用の2層の超電導線材を同軸上に配置しており、各々電車線と帰線に接続することを基本としています。超電導き電ケーブルが実用化すれば、き電損失の低減が図られるとともに、電圧降下の抑制による変電設備の削減などの効果も期待されます。

一方、電流を低減するにはき電電圧の昇圧(例えば1,500V→3,000V)が有効ですが、既設路線の昇圧には相応の

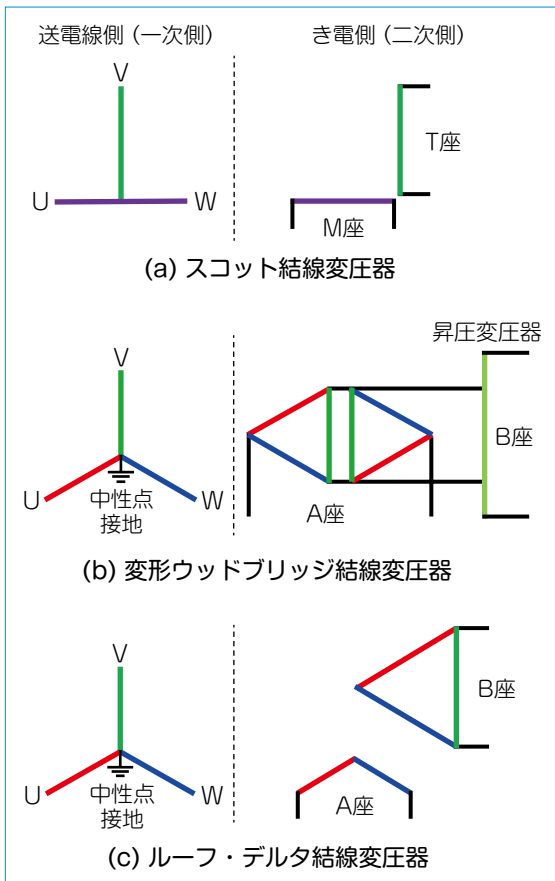


図4 き電用変圧器

コストと準備期間が必要です。そこで、鉄道総研では図6のように、電車線の電圧は変えずに、新たに架設する高電圧の送電線を用いてき電する高電圧直流き電方式の研究開発を行っています。この方式では、高電圧の送電線と電車線との間で電力を融通するためにチョッパ装置などの電力変換装置を変電所間に設置し、電気車に最も近い装置を介して高電圧送電線からき電することによって、電車線に流れる電流を低減し、き電損失の低減を図るものです。

き電損失の低減とは別に、き電設備で取り組むべき省エネルギー対策として、電気車が減速する際の回生電力を有効活用することが挙げられます。回生電力は、他の電気車で消費することが有効活用の基本であり、先に紹介した上下一括き電方式や上下タイき電方式は、他の電気車で消費する機会を増やす有効な手法でもあります。

回生電力が余った場合、交流き電方

式ではき電用変圧器を介して送電線に電力を戻すことが可能ですが、直流き電方式のシリコン整流器は直流の回生電力を交流に逆変換することができません。このため、1977(昭和52)年より直流電力を交流電力に変換する回生インバーターを変電所に設置する取り組みが行われています。2005(平成17)年には、整流器と回生インバーターの機能を兼ね備えるPWM整流器が一部路線に導入されました。最近では、駅の近くに小型の回生インバーターを設置して、駅で消費する電力に回生電力を活用する事例もあります。

余った回生電力の活用方法として近年注目されているのが電力貯蔵装置です。電力を貯蔵する方式としては、回転体の運動エネルギーに変換して貯蔵するフライホイール方式、リチウムイオン電池や電気二重層キャパシターなどの蓄電媒体に貯蔵する方式などがあり、前者は1988(昭和63)年に、後者

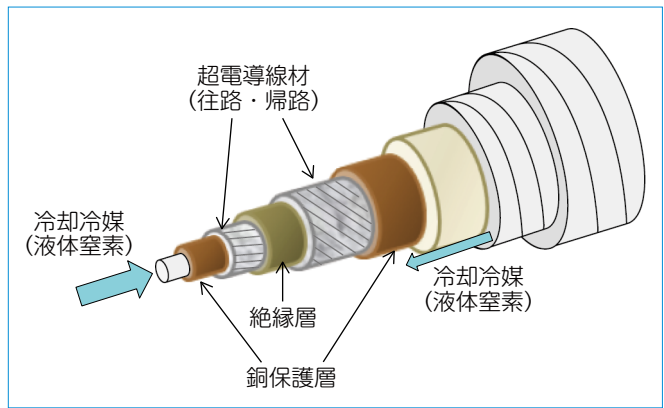


図5 超電導き電ケーブルの構成例

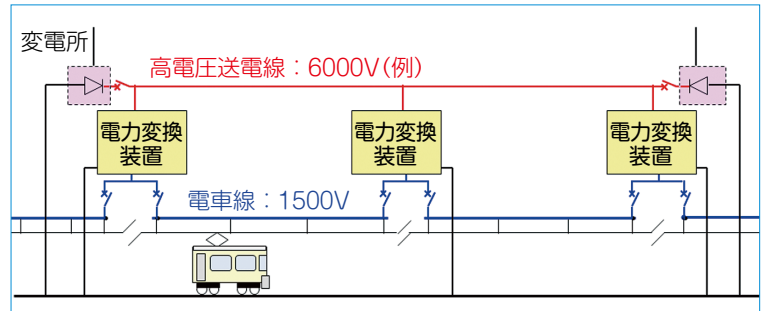


図6 高電圧直流き電方式

は2006(平成18)年に実用化されています。電力貯蔵装置は回生電力の有効活用のほか、電圧降下対策や停電時の非常用電源として用いることも考えられており、導入事例が今後増えるものと期待されます。

おわりに

技術の進歩によって、き電設備の信頼性や効率性はより高いものとなっています。鉄道総研では、超電導など新たな技術も応用しながら、これからもより良いき電設備の構築に向けた研究開発を進めていきます。

なお、ここで紹介した研究開発成果の一部は、国土交通省補助金を受けて実施したものです。[RRR]

文献

- 1) 日本鉄道電気技術協会：き電・変電技術変遷史，2012
- 2) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007