

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車両への電気の流れをみる

電力会社などの発電所で発電された電気が電鉄用変電所で受電してから車両に届けられるまでの間には、多くの特徴的な設備が介在しています。ここでは、電気鉄道の運行に必要な電気が、電鉄用変電所から電車線設備などを經由して車両に至り、再び電鉄用変電所に戻るまでの流れとそれら設備の特徴について、歴史的経緯を踏まえながら紹介します。



佐藤 大記
Daiki Satou
電力技術研究部
き電研究室
研究員
[専門分野] き電回路

はじめに

電気鉄道の歴史は古く、1881年のドイツでの直流電車による営業運転が始まりといわれています。車両を動かす電気には直流と交流という性質の異なる2種類の電気が使われていることは一般に知られていますが、これらはさまざまな歴史的経緯を基に今日へ至っています。ここでは、電気鉄道における車両への電気の流れについて、各種方式の特徴と最近の技術的動向を、歴史的経緯を踏まえながら概説します。

実用化されているき電方式

電気鉄道で車両を動かすためには、車両へ適切な電力を供給する必要があります。車両に電力を供給することをき電と呼び、その方式をき電方式とい

います。現在、車両に搭載された電力変換装置やモーターの能力、架線性能のほか、導入コストなどを勘案してさまざまなき電方式が用いられています。表1に日本と海外で導入されている主なき電方式の一覧を示します。日本では諸外国と比べて直流1500V区間と単相交流20kV区間の割合が多いことがわかります¹⁾。

直流き電と交流き電

電気鉄道のき電方式は大きく直流き電方式と交流き電方式に分けられます。以下、それぞれの特徴について説明します。

(1) 直流き電方式

ドイツでの実用化以来、とくに都市鉄道や地下鉄で広く普及している方式

表1 日本と海外で導入されている主なき電方式¹⁾

き電方式	電圧	区間延長比率	
		海外	日本
直流き電方式 (海外は都市交通を含まず)	600V	1.4%	2.8%
	750V	(1500V未満の合算)	1.7%
	1500V	4.1%	60.0%
	3000V	25.8%	0.0%
単相交流 (商用周波数方式)	20kV	0.0%	21.0%
	25kV	55.5%	14.3%
単相交流(低周波方式)	15kV	13.2%	0.0%
三相交流き電方式	600V	0.0%	0.3%

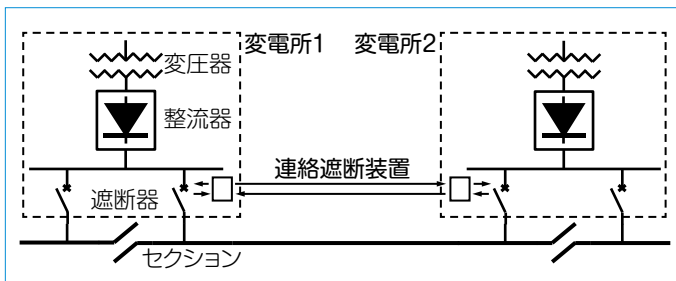


図1 直流き電方式の一例(単線区間)

です²⁾。日本においては、1895年に京都電気鉄道の採用が始まりといわれています。始動時のトルクが大きく制御が比較的容易な直流直巻モーターを直接駆動できるという特徴があります。また、一般に交流き電方式よりも使用電圧が低いことから、トンネルなどの構造物に対する離隔を小さくできる、線路近傍の通信線に対する影響が少ないなどのメリットがあります。

その一方で、直流は交流よりも電流の遮断が容易でないことから遮断器の構造が複雑になる上、交流き電方式と比べると電圧を高くすることが難しいことから電流を多く流す必要があるため、短い間隔で多数の変電所を設置する必要があります。さらに、電食を発生させやすいなどのデメリットもあります。また、平常時の負荷電流が大きいため、故障電流との区別が容易でないという問題もあります。

(2) 単相交流き電方式(商用周波数)

ここではとくに、商用周波数を用いた単相交流き電方式について説明します。単相交流き電方式は、車両用電力変換装置の性能向上により、1950年代以降に普及した方式です。日本では、1957年に仙山線と北陸本線で実用化されました。電力会社の送電線に遮断器と変圧器を接続するだけで車両に電力を供給できるため、変電所の設備が簡素化できます。そのほかにも、直流き電方式と比較して電圧を高くすることが可能なため、大電力送電が可能、変電所の間隔を長くできる、電圧降下の影響が小さいなどのメリットがあります。

一方で、車両に変圧器や整流器などを搭載する必要があるために車両の構造が複雑で重量が増加すること、車両の単相負荷による電力会社の系統への悪影響を防止するためにスコット結線変圧器や変形ウッドブリッジ結線変圧器、ルーフデルタ結線変圧器に代表される特別な変圧器を必要とすること、誘導障害への対策が必要であることなどのデメリットがあります。

(3) その他のき電方式

先に紹介した2つのき電方式のほかにもいくつかのき電方式が実用化されています。

一つは、構造が簡素で堅牢な三相交流誘導モーターを電車線から供給される三相交流で直接駆動する、三相交流き電方式です。1890年代に登場した歴史ある技術ですが、電車線の構造が複雑な上、速度制御が困難であるため、海外の一部の山岳鉄道でのみ採用されています。一方、電車線から集電した三相交流を、電力変換装置を用いて変換し直流モーターもしくは交流モーターを駆動する方式としては、日本でも新交通システムなどで採用例があります。

また、商用周波数よりも低い16.7Hzという特別な周波数を用いた交流き電方式もあります。ドイツやスイスなどの欧州で1910年代以降に普及が始まった方式で、単相交流整流子モーターの制御に適していますが、本き電方式専用の発電所や周波数変換装置が必要となります。現在、日本での

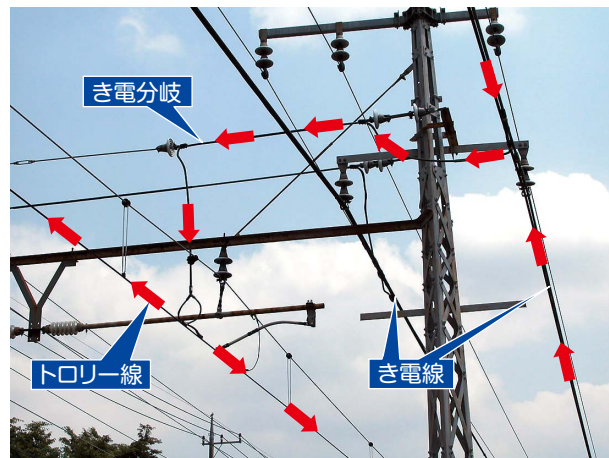


図2 トロリー線とき電線

採用例はありません。

それでは、具体的に変電所から車両に電気が届くまでの道のりについて説明します。変電所から車両への電気の道のりは、直流と交流で少し仕組みが異なります。

直流き電方式の電気の流れ

(1) 特徴

直流き電方式では通常、並列き電と呼ばれる構成をとっており、車両の走行に必要な電気は複数の変電所から供給されます。図1に代表的な直流き電方式の構成例を示します。変電所1, 2ではそれぞれ変圧器により降圧した三相交流を、整流器を用いて直流に変換しています。また、一般に車両への電力供給は図2に示す、トロリー線と呼ばれる電線と車両のパンタグラフとのしゅう動により行われます。しかしながら、直流き電方式は負荷電流が大きく、トロリー線だけでは電圧降下などの影響が大きいことから、き電線と呼ばれる別の太い電線を設けたうえで、250mごとにき電分岐と呼ばれる金具でき電線とトロリー線を接続しています。

ところで、本方式では平常時に2つの変電所からき電することで電圧降下による影響を抑制しています。しかしながら、万一事故が起きた場合には、どちらか一方の変電所の電力供給を止めただけでは事故が継続してしまいます。そこで連絡遮断装置と呼ばれる装

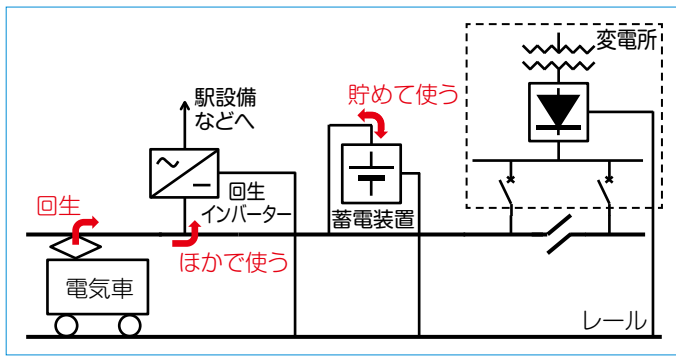


図3 直流き電方式における回生失効対策例

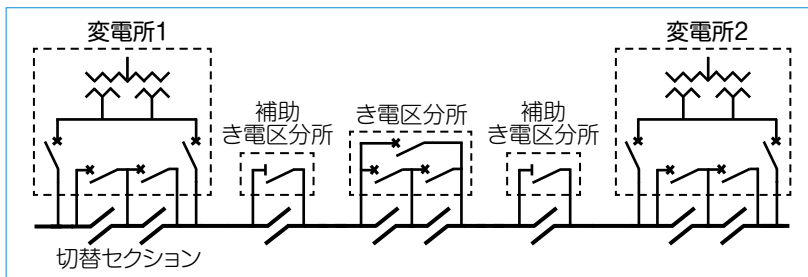


図4 単相交流き電方式の一例

置を用いて、両変電所の遮断器を同時に開放できるように構成しています。

(2) 最近の技術的動向

近年、半導体電力変換技術の発展にともない、ブレーキ時に運動エネルギーを電気エネルギーとしてトロリー線に戻すことのできる車両(回生車)が増えています。そのため、回生した電気エネルギーを有効活用する機運が高まっています。一般に、回生車がブレーキを掛けた際に生じる回生電力は、近くを走行する車両(力行車)で消費されます。しかしながら、近くに力行車がない、いても消費電力が小さいなどの場合には回生ができず、通常の機械ブレーキを使用することになります(回生失効(☞参照))。

☞ 回生失効

直流き電方式では一般に、ダイオード整流器を用いて直流を生成しています。そのため、直流側で余剰となった電力は交流系統側に逆潮流させることができません。近くに力行する車両がない場合は回生ブレーキを使用することができません。これを回生失効といえます。

これを防ぐために、図3に示す回生インバーターのような「ほかで使う」ものや蓄電装置のような「貯めて使う」ものが用いられています³⁾⁴⁾。回生インバーターは、直流側で余剰となった電力を交流に変換し、駅や鉄道沿線設備の電力として利用できるようにしたものです。また、蓄電装置は余剰となった電力を、一時的に蓄電池やフライホイールなどに貯蔵し、近くに力行車が現れたときに再び利用できるようなしたものです。

このほか、最近では超電導技術を応用した超電導き電ケーブルも研究されています⁵⁾。超電導き電ケーブルを用いることで、前述のき電線の抵抗をゼロにできるため、より遠くの車両にまで回生電力を届けることが可能となり、回生電力の有効利用が期待されます。

交流き電方式の電気の流れ

(1) 特徴

ここでは、とくに単相交流き電方式について説明します。

単相交流き電方式では通常、片送りき電と呼ばれる構成をとっており、車両

の走行に必要な電気は常時1つの変電所のみから供給されます。これは、並列き電を行うと変電所間の電圧差や位相差によっては列車がいなくても電流が流れてしまう場合がある(横流)ため、日本では東海道新幹線の一部区間を除いて単相交流き電方式での並列き電は行っていません。図4に代表的な単相交流き電方式回路の構成例を示します。

また、通常電力会社から受電した三相交流は変電所にて、車両が集電しやすい単相交流に変換されます。このとき、一次巻線の中性点を接地する必要のない154kV以下(特別高圧)で受電する場合はスコット結線変圧器を、一次巻線の中性点を直接接地する必要がある187kV以上(超高圧)で受電する場合はルーフデルタ結線変圧器や変形ウッドブリッジ結線変圧器と呼ばれる特殊な変圧器を用いて位相が90°異なる2つの単相交流に変換しています(三相二相変換)。これらの変圧器は、2つの単相交流それぞれが負荷対して同じ電力を供給した場合に一次側の三相電流が平衡するように設計されています。しかしながら、この三相二相変換により生成した単相交流同士も位相が異なるため、並列接続することはできません。そこで、新幹線では車両の通過に連動して供給する電気を切り替える切替セクション、在来線ではデッドセクションと呼ばれるセクションを用いて電氣的な絶縁をとっています。

(2) 最近の技術的動向

単相交流き電方式では、車両の走行に必要な単相電力を変電所の変圧器により生成しています。そのため、き電側で余剰となった回生電力は容易に系統側へと逆潮流可能であり、回生失効が問題となることは通常ありません。しかしながら、変電所で行っている三相二相変換はき電側の2つ単相交流電力が等しいときに系統側の三相電流が

平衡するように作られているため、車両の走行にともなう負荷変動によってき電側の電力が不平衡となると、系統側の三相交流にも不平衡が生じてしまいます。この現象はとくに系統電力の弱い地域で顕著となるため、そのような箇所では対策が必要になります。

今回はいくつかある対策の中から、比較的新しい技術として図5に示す電圧変動補償装置 (RPC: Railway Static Power Conditioner)³⁾⁶⁾⁷⁾を紹介します。RPCでは、変電所やき電区分所においてき電側の2つの単相交流同士を、電力変換装置を介して接続することにより、位相の異なる単相交流間での電力融通を可能にしています。RPCでは、2つの単相交流間において有効電力の融通を行うことで三相交流電力を平衡させるとともに、それぞれに適切な無効電力を補償することで電圧変動を抑制します(☞参照)。これにより、系統電力の弱い地域においても新幹線用変電所を設備することが可能になります。

また、最近では在来線においてもRPCを利用してき電側で電力融通する取り組みが行われています³⁾。これは、変電所を挟んだ他方面との電力融通を行うことにより、より広い範囲で回生電力を活用しようという取り組みです。一般に、単相交流き電方式が採用されている線区の列車密度はそれほど高くないため、RPCを利用することでき電側での回生電力の有効活用が期待できます。

☞ 有効電力と無効電力

有効電力や無効電力は交流特有の概念です。簡単に説明すると、負荷(車両など)で利用されるものが有効電力、負荷では利用されず、電源と負荷の間を行ったり来たりしているだけのものが無効電力です。

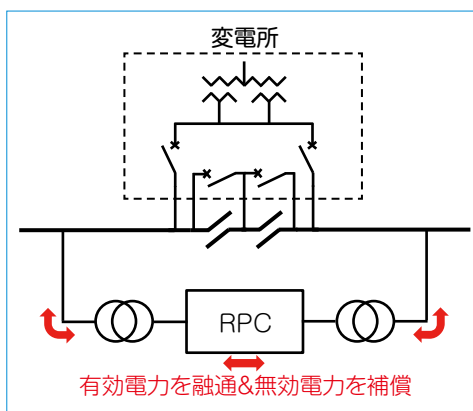


図5 RPCの設置例

電気の“戻り道”

これまで車両への電気の流れということで、変電所から車両へ至る電気の通り道について説明してきました。では、車両から変電所へと戻る電気はどのように流れるのでしょうか。

車両から変電所への電気の戻り道は、一般に帰線と呼ばれています。直流き電方式、単相交流き電方式のどちらにおいても、帰線の基本はレールです。したがって、帰線には車両がどこにいても変電所まで電気を確実に戻せる、連続した導電性が要求されます。しかしながら、一般にレールは25m程度の長さのものをつなぎ合わせて作られています。そこで、レールの継目箇所においては継目を溶接するか、図6に示すようなレールボンドを用いてレール同士を電気的に接続することが必要になります。その一方で、レールは信号機を制御するために車両の有無を検知する軌道回路としても用いられており、車両を検知する区間を限定するためにレールの途中に電気的な絶縁部を設ける場合があります。そのような場合には、軌道回路用の電気信号は通さず、かつ帰線の電流は確実に流すための設備として図7に示すインピーダンスボンドが用いられます。

おわりに

簡単ではありますが、車両への電気の流れについて紹介しました。最近で



図6 レールボンド



図7 インピーダンスボンド

はバッテリーや発電機などを搭載することで、必ずしもき電回路を必要としない電気鉄道用車両も登場しています。しかしながら、き電回路による電力供給はバッテリーなどを用いるよりも電力効率が良いことから、今後も広く使われていくものと思われます。[RRR]

文献

- 1) 柴川久光：電気運転統計 海外鉄道の電気方式，鉄道と電気技術，Vol.27, No.7, pp.45-47, 2016
- 2) 柴川久光：海外鉄道の電気方式，鉄道と電気技術，Vol.19, No.1, pp.48-54, 2008
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社：鉄道電力システムへの『スマートグリッド技術』の適用について，プレスリリース，2012
- 4) 西日本旅客鉄道株式会社：省エネルギーな鉄道き電システムに向けた取り組み，技術の泉，Vol.29, 2013
- 5) 富田優，福本祐介，鈴木賢次，石原篤，ミリアラ ムラリダ：鉄道用超電導き電ケーブル，RRR，Vol.69, No.5, 2012
- 6) 兎束哲夫，池戸昭治，上田啓二，持永芳文，船橋眞男，井手浩一：新幹線用電圧変動補償装置の開発と実用化，電気学会論文誌D，Vol.125, No.9, 2005
- 7) 東海旅客鉄道株式会社：東海道新幹線の省電力化及び輸送の安定性向上について，プレスリリース，2013