

# 変電所から車両までの電気の流れ

赤木 雅陽  
電力技術研究部(き電) 副主任研究員



あかぎ まさたか

## はじめに

日常利用している通勤列車（電気車）はどの程度の電力を消費しているかご存知でしょうか。電気車が走行するには、家庭用エアコン（通常1kW程度）の1000倍以上の電力を必要とします。また、エアコンとコンセントの距離は固定されているのに対し、変電所と電気車までの距離は常に変化しています。このため、走行している電気車に対して効率的にかつ安全に電力を送電する回路（き電回路）が必要となります。

本項では、主に日本の電気鉄道で一般的に利用されている交流電気鉄道と直流電気鉄道の電力供給システムおよび変電所から電気車までの電気の流れについて概説するとともに、それぞれのき電回路の種類、特徴、効果について触れます。

## 日本と世界の電化方式

電気車を走行させるには電動機に適切な電圧と周波数の電気を供給する必要があり、電気車用の電動機としては一般に直流直巻電動機、直流複巻電動機、直流分巻電動機、単相交流整流子電動機、三相交流誘導機、三相交流同期機が用いられています。

今日では半導体を用いた変換装置を用いることで、供給される電気の種類によらずどの電動機でも比較的簡単に制御が可能となっていますが、かつては変換装置や電動機の

能力、架線の性能等に制約が有り、その当時の技術動向に応じさまざまな電圧と周波数の電化方式が導入されました。表1に日本と海外で導入されている主な電化方式の一覧を示しますが、日本では諸外国に比べ電圧の低い区間の割合がやや多いことが分かります<sup>1),2)</sup>。

## 直流き電と交流き電の特徴

ここで、各電化方式の主な特徴を説明します。

### (1) 直流き電方式

1879年のベルリン工業博覧会での実用化を皮切りに、特に地下鉄や都市交通で広く普及している方式です<sup>3),4)</sup>。始動時のトルクが大きく制御が容易な直流直巻電動機を電気車に採用する場合、駆動に必要な電気を電車線から直接電動機に印加できるという特徴があります。また、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こと、線路近傍の通信線に対する影響が少ないことなどのメリットがあります。

その一方、電動機の絶縁性能の都合上き電電圧をあまり高くすることができず、変電所を多数配置する必要があること、負荷電流が大きく故障電流との区別が容易でないこと、交流の電流に比べ直流の電流を遮断するのは容易でなく遮断器の構造が複雑であること、詳細は「車両から変電所までの電気の流れ」で紹介しますが電食の影響を受け易いことなどのデメリットがあります。

なお、近年ではメンテナンス性等の問題から直流電動機を搭載した電気車は減少傾向にあるほか、き電電圧の高低に付随する問題はインバータの搭載によりある程度回避できるため、上述した特徴は必ずしも当てはまらなくなりつつあります。

### (2) 単相交流き電方式（商用周波数方式）

車載用変換装置の能力向上により1950年代以後普及し始めた方式です。電力会社の送電線に遮断器と変圧器を接続するだけで電気車に必要な電気を供給できることから、

表1 日本と海外で導入されている主な電化方式

き電方式	電圧	電化率	
		海外	日本
直流き電方式 (海外は都市交通を含まず)	600V	2% (1500V未済の合算)	2.9%
	750V		1.7%
	1500V	9%	60.8%
	3000V	29%	0%
単相交流 (商用周波数方式)	20kV	0%	21.1%
	25kV	44%	13.2%
単相交流(低周波方式)	15kV	14%	0%
三相交流き電方式	600V	0%	0.3%

変電所の設備が簡素化できるほか、大電力輸送に適した特別高圧の交流を利用できること、変電所の間隔を長くできること、電圧降下が小さいことがメリットです。一方、車両に変圧器と整流器等の変換装置を搭載する必要があり車両の構造が複雑で重量が重くなること、電気車の単相負荷が電力会社の系統に悪影響を与えぬよう、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、線路近傍の通信線に対する影響を低減する必要があること等のデメリットがあります。

### (3) 単相交流き電方式 (低周波方式)

1910年代以後普及し始めた方式です。単相交流整流子電動機の制御に適した、商用周波数 (50Hz, 60Hz) より低い16.7Hzという特別な周波数を用いているという特徴があります。ドイツやスイス等欧州で普及している方式で前項と同様のメリットがありますが、本き電方式専用の発電所や周波数変換装置を必要とするというデメリットがあります。なお、日本では本方式の採用例はありません。

### (4) 三相交流き電方式

構造が簡単で堅牢な三相交流誘導機の駆動に必要な三相交流を電車線から直接電気車に供給する方式として開発されました。1890年代に登場した歴史のある技術ですが電車線の構造が複雑であるというデメリットがあるため、海外の一部の山岳鉄道のみが採用しています。一方、三相交流を電車線から集電し、変換装置を用いて直流電動機を駆動するき電方式としては日本でも埼玉新都市交通等が採用しています。

## 変電所から電気車に電気を届ける方法 (き電回路)

それでは具体的に変電所から電気車に電気を届ける回路について述べます。

### (1) 直流き電回路

直流き電回路では、通常並列き電と呼ばれる構成をとっており、電気車の走行に必要な電気は変電所1と2から供給されます。図1に代表的な直流き電回路の構成例を示します。変電所では変圧器により降圧した1200Vの三相交流を図2に示すような整流器を用いて1500Vの直流に変換しています。また、トロリ線だけでは大電流を供給することができないため、図3に示すようにき電線と呼ばれる断面積の大きい線を別に設けた上で250mおきにき電分岐と呼ばれる線でき電線とトロリ線と接続しています。複線区間では通常上下線のき電線は接続しないことが多いです

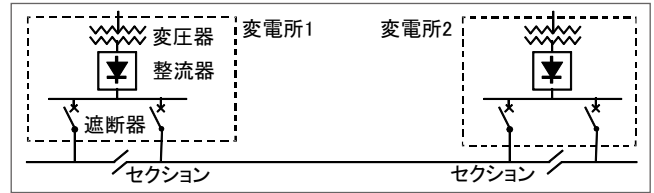


図1 直流き電回路の構成例 (単線区間)

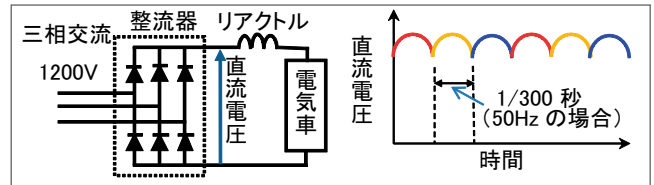


図2 整流器による直流電圧の生成

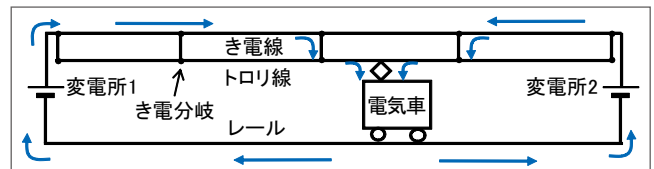


図3 直流き電回路の構成 (レールを含む回路図)

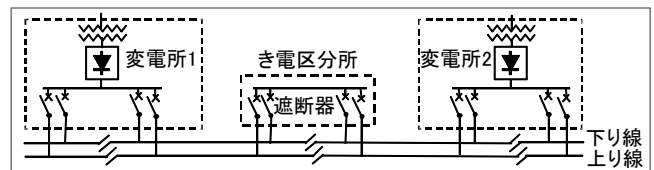


図4 直流き電回路の構成例 (複線、き電区分所あり)

が、図4に示すように電圧降下を抑制するために変電所間にき電区分所を設けて上下線を接続する場合があります。

一方、電気車で消費した後の電気はレールを介してそのまま変電所に戻りますが、レールと大地は完全には絶縁されていないため、一部は大地を経由して変電所に戻ります。なお、明治時代の電化黎明期にあつては大地に漏洩する電流による水道管等への電食や通信への支障が懸念されたことから、レールを電流の経路とせず2本のトロリ線を用いた架空複線式を用いていましたが、明治44年の電気事業法施行時に、砂利・枕木により絶縁された専用軌道による電気鉄道ではレールを帰線とする架空単線式の採用が認められたことから、今日では複線式のき電回路を採用した電気鉄道はモノレール等一部に限られています。

ところで、本方式では1変電所あたりの電力分担を抑制することができますが、万一事故が起きた際には片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置で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。

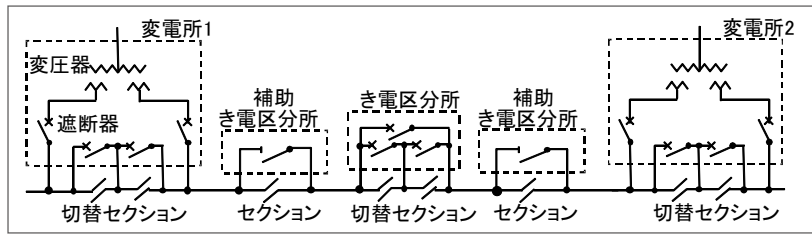


図5 交流き電回路の構成例

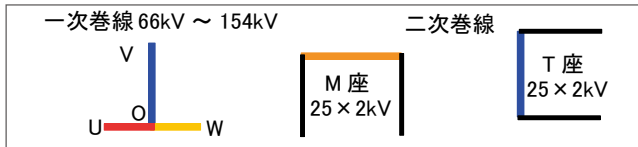


図6 三相二相変換の例(スコット結線変圧器)

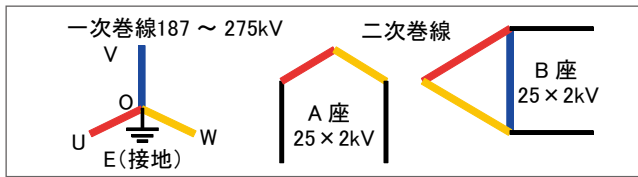


図7 三相二相変換の例(ルーフデルタ結線変圧器)

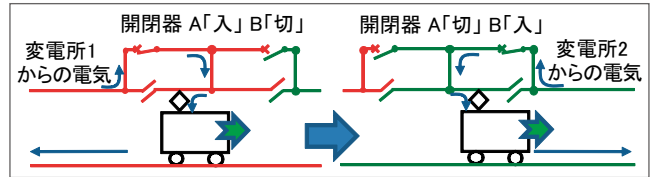


図8 切替セクション通過時の電流の経路

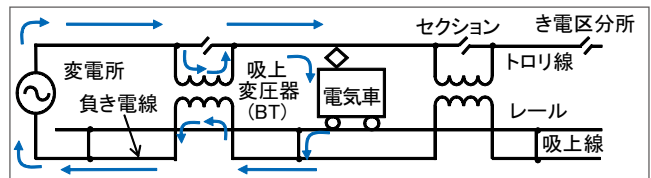


図9 交流き電回路(BTき電方式)の構成

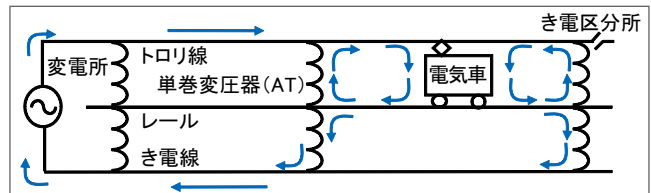


図10 交流き電回路(ATき電方式)の構成

## (2) 交流き電回路

交流き電回路では、通常片送りき電と呼ばれる構成をとっており、電気車の走行に必要な電流は変電所1ないし2のみから供給されます。図5に代表的な交流き電回路の構成例を示します。これは、不用意に並列き電を行うと変電所間の電圧差、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(横流)場合があるため、日本では東海道新幹線の一部区間を除き並列き電は行っていません。

また、通常は電力会社から受電した三相交流は、先程紹介したスコット結線変圧器等の変圧器を用いて位相が90°異なる2つの座の単相交流に変換しています(三相二相変換)。一次巻線の中性点を接地する必要のない154kV以下で受電する場合はスコット結線変圧器が、一次巻線の中性点を直接接地する必要がある187kV以上で受電する場合は変形ウッドブリッジ結線変圧器やルーフデルタ結線変圧器が用いられます。これらの変圧器は2つの座で負荷に同じ電力を供給した場合に一次側の三相電流が等しくなるように設計されています。図6、7に三相二相変換の例を示します。

先に述べたように、この単相交流同士も電圧の位相が異なるため接続することができません。そこで、新幹線では切替セクション、在来線ではデッドセクションと呼ばれるセクションで電氣的な絶縁をとっています。図8に切替セクション通過時の電流の経路を示しますが、切替セクションでは、列車の通過に連動して開閉器が開閉することで電

気を供給する変電所が切り替わるため、電気車は力行したままセクションを通過することができます。一方、デッドセクションでは列車の通過に連動した開閉器は設けられていないため、電気車はセクション通過時に惰行する必要があります。

一方、詳細は「車両から変電所までの電気の流れ」で紹介しますが、交流き電回路において電気車で消費した後の電気をレールのみを用いて変電所に戻した場合、電気の一部が大地に漏洩し線路に平行して敷設された通信線に電磁誘導障害を与えてしまいます。そこで、誘導の原因となる電流が大地に漏洩しないよう、またレールを経由する区間が限られるよう、吸上変圧器(BT)や単巻変圧器(AT)を用いてき電線に吸い上げる工夫がなされています。図9、10にBTき電方式、ATき電方式の構成を示します。ATき電方式では、変電所から送り出す電圧をBT方式の2倍としており大電力を供給するのに適しているほか、複雑なBT設置部のセクションが不要であるというメリットがあります。

表2 日本における変電所の間隔と変電所容量

電化区間	電圧	1列車あたりの電流値	変電所の間隔	変電所の容量
直流	1.5kV	2000A～3000A	5km～10km	2MW～12MW
交流 (在来線BT区間)	20kV	50A～200A	20km～50km	10MVA～20MVA
交流 (在来線AT区間)	20kV	50A～200A	50km～100km	10MVA～20MVA
交流 (新幹線)	25kV	300A～1000A	20km～60km	30MVA～200MVA

### 変電所の間隔と電圧

一般的に電気車は速度が上がる程、また加速度が上がる程大きなエネルギーを必要とします。時速50km/hで走行する10両編成、500tの通勤電車や新幹線を2km/h/sの加速度で加速させるには、走行抵抗なし、電動機等の効率を100%という理想的な条件で約4000kW(4MW)の電力を要します。一方、時速150km/hで走行する10両編成、500tの新幹線を2km/h/sの加速度で加速させるには、先程と同じ条件の場合でも約12000kWもの電力が必要で、走行抵抗の影響を含めると所要電力はさらに大きくなります。しかし、通常電線に連続で通電できる電流には限度があるため、大電力の負荷に対応するには(a)電圧を上げる(b)電線を太くするか本数を増やす(c)変電所の間隔を縮小する必要があります。

日本の電気鉄道で用いられることの多い断面積325mm<sup>2</sup>の硬銅より線を例にとると、連続して通電可能な電流は1本当たり約900Aとなっています。12000kWの電力を電圧1.5kVの単相回路で連続して供給する場合約8000Aの電流が流れるため電線を片道あたり9本用意しなくてはなりません。実際には大電流を流すと電線の電気抵抗により電圧降下するためより多くの電流を必要とします。ところが、電圧を25kVにすると電流は約500Aとなるため1本の電線で十分間に合うことになり、き電回路に必要な電線の本数を削減することができます。

表2に日本における変電所の間隔(変電所一か所当たりの電力供給の分担範囲)と大まかな変電所容量を示しますが、新幹線用の変電所は大容量となっていること、在来線の直流変電所は容量が新幹線に比べ小さくかつ間隔も比較的短いことが分かります。

### 古くて新しい技術：電力貯蔵

強力な変電所を短い間隔で設置できれば電気車は常に安定して走行することができます。しかし実際には電力会社の送電系統が近くにない、変電所用の用地が確保できない等の理由から変電所の間隔が長くなり、電圧降下や回生ブ



図11 架線・バッテリーハイブリッドLRVの構成例

レーキの失効といった問題が生じることがあります。これらの対策として、電気二重層キャパシタやリチウムイオン電池等を用いた電力貯蔵装置が近年注目を集めています。

ところで、この電力を貯蔵して使うという考え方は意外と歴史が古く、日本では明治末期の信越線電化(丸山変電所、矢ヶ崎変電所)、大正初期の京浜線電化(川崎変電所等)にて蓄電池を用いたシステムとして実用化されています<sup>5)</sup>。これは、当時は今日のように電力会社の電源系統が豊富に存在せず、変電所の機器の信頼度もあまり高くなかったことによります。その後電源系統が強化されたことやバッテリーの維持管理に課題があったことから昭和初期には電力貯蔵装置は廃止され、日本では長らく下火となっていました。

今日でも電力貯蔵装置は安価ではないため地上・車上を問わず広く普及しているとは言い難い状況にありますが、今後電力貯蔵媒体の低価格化が進めば架線・バッテリーハイブリッドLRV Hi-tram(ハイトラム)のように駅で架線から充電し、駅以外ではき電回路を用いずに走行する、というこれまでとは異なる形体が普及する可能性があります<sup>6)</sup>。図11に架線・バッテリーハイブリッドLRVの構成例を示します。

### おわりに

駆け足ではありますが、電気車に電気を送り届けるき電回路の技術について紹介をいたしました。

鉄道総合技術研究所では、電力貯蔵媒体等の新技術の技術動向をにらみながら今後もき電回路のブラッシュアップに取り組んでいきたいと思えます。RRR

### 文献

- 1) 柴川久光：「電気運転統計」, 鉄道と電気技術, Vol20, No1, 2009
- 2) 柴川久光：「海外鉄道の電気方式」, 鉄道と電気技術, Vol19, No1, 2008
- 3) 電気鉄道技術発達史, (社)鉄道電化協会, 1983
- 4) 国鉄電化のあゆみ, (社)鉄道電化協会, 1964
- 5) 小林輝雄：電気鉄道の技術・研究開発の歩み, (株)鉄道現業社, 1996
- 6) 小笠他：架線レスLRVの停車中急速充電システムの開発, 鉄道総研報告, Vol22, No9, 2008