

第18回

電気運転方式

電気運転とは

電気運転とは、車両の動力源として外部から電力を供給して運転する方式のことです。蒸気機関やディーゼル機関と異なり、燃料や水を抱え込む必要が無く、煤煙や排気ガスも出さない利点があります。

電気運転方式の主な構成要素としては、電動機とその制御、集電システム、電力供給方式などがあります。ここでは地上の変電所から車両への電力供給方式を中心に、歴史を紐解いていきます。

さまざまな電力供給方式

1881年に世界で初めてベルリン (Berlin) 市で営業を開始したジーメンス・ハルスケ社 (Siemens Halske Co.) の電車¹⁾は、変電所から左右レール間に直流180Vを印加して電力供給しました(図1)。しかし左右のレールを人馬がまたぐ事故が絶えなかったため、1890年には架空線方式に変更されました。

1888年にアメリカのリッチモンド (Richmond) 市におい

て、一本の直流架空電車線からトロリーポールで集電し、鋼鉄製のレールを車両から変電所までの電気の帰り道、すなわち帰線として用いる電力供給方式が採用されました²⁾。開発者はスプレイグ (Frank J. Sprague) です。比較的簡単で安全性が高いこの電力供給方式は、現在も電気運転の基本となっています。

これより20世紀初頭にかけて、欧州とアメリカでさまざまな電力供給方式が登場し、そして淘汰されました。当時から現在に至るさまざまな電力供給方式から、代表的なものを以下に示します。

- ①直流架空単線+帰線レール
- ②直流第三軌条+帰線レール
- ③直流架空複線
- ④直流第三軌条+第四軌条
- ⑤低周波交流架空単線+帰線レール
- ⑥商用周波交流架空単線+帰線レール
- ⑦商用周波交流架空三線
- ⑧商用周波交流架空複線+帰線レール

このうち①~④は直流き電方式、⑤~⑧は交流き電方式です。なお商用周波とは一般電力会社と同じ50Hzまたは

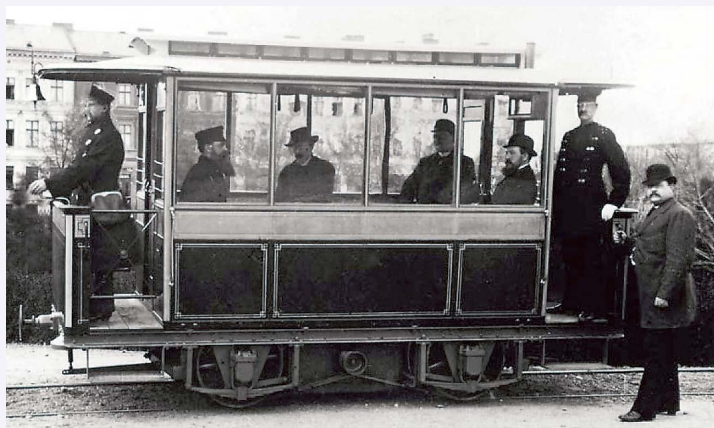


図1 ゴーメンス電車

出典：Public domain, via Wikimedia Commons

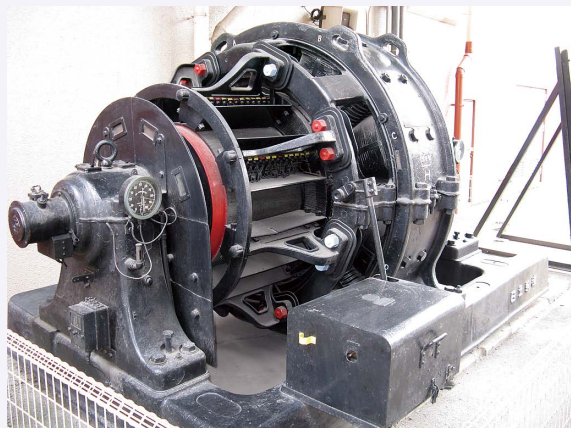


図2 回転変流器

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



図3 シリコン整流器

60Hzの周波数を指し、低周波交流とは鉄道専用に供給される10～25Hz程度の商用周波よりも低い周波数の交流を指します。

直流き電方式

速度制御の容易な直流電動機を使用するのに、直流き電方式は適しています。統計³⁾によれば、現在の鉄道において架空単線と帰線レールを用いた直流き電方式(上記①)、および第三軌条と帰線レールを用いた直流き電方式(同②、例えば東京地下鉄銀座線)は、都市鉄道を除く世界の鉄道電化区間において路線長で36%を占めています。

架空複線式の直流き電方式(同③)はレールがないトロリーバスの標準方式で、かつては電食を防止する目的で都市内の路面電車にも用いられていました。第三軌条で電力供給し、第四軌条を帰線として用いる直流き電方式(同④)はロンドン地下鉄で使われています。

しかし、19世紀末から20世紀中盤において、変電所で交流を直流に変換して車両へ送り出すことは、それ自体、決して簡単な技術ではありませんでした。

かつて使用された回転変流器(図2)は、回転しながら三相交流電力を直流電力に変換します。回転機のためメンテナンスが欠かせないことや、交流側と直流側が完全に絶縁されていないなどの弱点はありますが、交流電動機と直流発電機を直列同軸に結合した電動発電機よりもコンパクトで効率も良かったため、広く使われました。

1902年にアメリカのクーパー・ヒューイット(P. Cooper-Hewitt)が発明した水銀整流器⁴⁾は、ガラスまたは鉄製の密封容器内で水銀と炭素電極間で整流します。1930年代からは、標準電圧1500V以上の直流き電方式で標準的に使われました。水銀を加温して用いることから、安定稼働にはメンテナンスが欠かせなかったとのこと。

1950年代後半には半導体技術の発展に伴い、シリコンダイオードを用いた整流器(シリコン整流器と略称、図3)が実用化されました。その後、改良を重ね、現在では日本中のほとんどの直流き電変電所で使用されています。また、シリコン整流器は車両への積載が容易となったため、後述する商用周波交流き電方式の普及に貢献しました。

高電圧化

直流き電方式の標準電圧としては600V、750V、1500Vおよび3000Vが多く使われています。

電車の電動機には数十kW～数百kWの容量を持ち、比較的簡単に絶縁できる直流直巻電動機(モーター)が適しており、その入力端子電圧は300Vぐらいでした。

300V用のモーターを使うならば、変電所から300Vを送れば良いのですが、変電所と車両の間の電車線にも電気抵抗があるため、車両に届く電圧は300Vを下回ります。これを電圧降下と呼びます。電圧降下は通過する電流に比例するため、同じ電力を二倍の電圧で送れば電流が半分、すなわち電圧降下も半減します。そこで端子電圧300Vのモーターを2個直列にして使うことにすれば、変電所から600V供給が可能となります。同様にモーター4個直列で1200V、さらに電圧降下分を見込んで25%の余裕を持たせれば1500Vとなります。

このように鉄道の電力供給では電圧降下があるため、実際に車両が集電する電圧は直流1500V系で1000～1800Vと大きく変化します(上下限電圧は線区によって異なります)。そこで、中心となる1500Vを「標準電圧」と規定しています。日本の標準電圧は1500Vが最高ですが、欧州では標準電圧3000Vまで使われており、6000Vの試験例もあります。

三相交流き電方式

電力会社では同じ断面積の電線を用いて最も効率良く電力を送るために、三条の電線でそれぞれ電圧位相が異なる商用周波三相交流を用いています。また、三相交流方式は簡単な構造かつ強力な誘導電動機が使用できるため、軽量・

大出力の車両を実現できます。

そこで山岳地帯の急勾配に対応し、1896年のスイスで架空線二条と帰線レールを組み合わせた三相交流き電方式が実用化されました²⁾。またトンネル区間では無煙の機関車が求められたため、1906年開業のスイスのシンプロン(Simplon)トンネルに電圧3000V・周波数16Hzの三相交流き電方式が採用されました²⁾。同様に、アメリカのグレートノーザン(Great Northern)鉄道でも急勾配のカスケード(Cascade)トンネル区間において、1909年から6600V・25Hzで使われました(シンプロンは1930年に、カスケードは1927年にそれぞれ低周波単相交流方式に変更²⁾)。

一方、1899年にはドイツにおいて都市間の高速度電気運転の可能性が検討されました²⁾。ベルリン近郊の軍用専用線において線路脇に三条の架空線を縦に並べ、10000V・50Hzの高圧三相交流方式で車両に大電力を供給する走行試験が行われました。図4に示すAEG社製車両の屋根には三つのパンタグラフが2組装備されており、1903年には当時の世界最高速度記録210.2km/hを達成しました。この快挙に、当時のドイツ皇帝からも祝辞を頂戴したとのこと²⁾です。

これらの三相交流方式は効率が良いとは言え、二条または三条の電車線構造が複雑となることから、広く普及しなかったことは不思議ではありません。紹介したほかにも数区間存在した架空線二条の三相交流き電方式は1970年代までに姿を消し、現在ではスイスの登山鉄道などで細々と使われています。また、「ゆりかもめ」のような日本国内の新交通では、側面の低い位置に三本の集電軌条を縦に並べ、三相交流電力を集電しています(図5)。

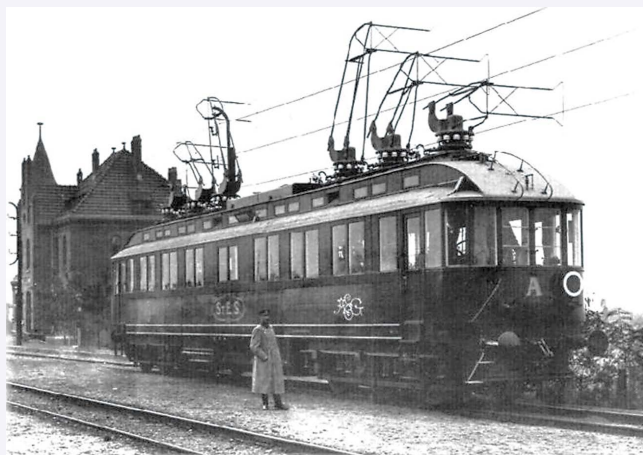


図4 三相架空線

出典：Public domain, via Wikimedia Commons

単相交流き電方式

単相交流き電方式は車両に積んだ変圧器で容易に電圧変換できるため、変電所から高い標準電圧を送り出すことで電圧降下と送電損失を軽減し、車両内で電圧を下げて使います。交流を受けて交流を送り出すため、変電所の構造は比較的単純で、単線の架線構造も簡単です。

車両内で電圧を下げた交流をそのまま交流整流子電動機に流して使う単相低周波交流き電方式は、高い電圧と簡単な車両構造を両立していました。1905年からドイツ、スイスなどで²⁾、1907年からアメリカ東海岸のNY/NH(New York, New Haven & Hartford)鉄道²⁾で使われています。交流整流子電動機は周波数が低いほど動作が安定するため、ドイツ、スイスなどでは標準電圧15000V・商用周波数50Hzの1/3の周波数16.7Hzを採用し、アメリカ東海岸では標準電圧11000V・周波数25Hzです。

現在の都市鉄道を除く世界の鉄道電化区間において、単相低周波交流き電方式の路線長割合は13%を占めています³⁾。しかし、鉄道専用の低周波単相送電網を構築する必要があることから、新しく採用する国はありません。

一方、最も入手しやすい電力会社の50Hzまたは60Hzの三相商用周波交流電力を、三相から単相に変換して車両に送っているのが商用周波単相交流き電方式です。

商用周波交流での交流整流子電動機は各国で開発されましたが、トラブルが多く普及に至りませんでした。そして車両に積んだ回転機で交流を直流に変換する機関車が1904年に一年間だけ²⁾スイスのチューリッヒ(Zurich)近郊で試用され、1930年代にはハンガリー国鉄(Budapest



図5 三相集電車両

提供：株式会社ゆりかもめ

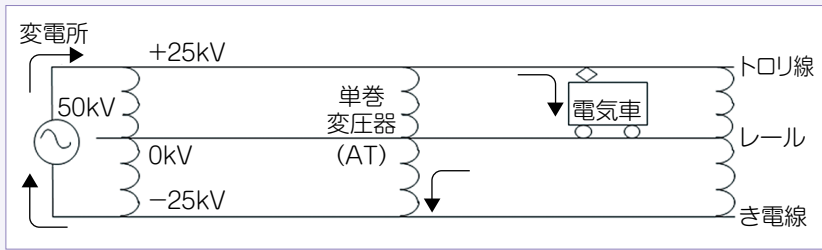


図6 ATき電方式



図7 Charles F.Scott

Photo courtesy of the IEEE Global History Network www.ieeeeghn.org

Nyugati - Hegyeshalom間)において、車上の回転機で単相交流を三相交流に変換するカンドー (Kandó) 式機関車が実用化されました²⁾。

次いで、車両に積んだ水銀整流器で変換した直流で直流電動機を駆動する整流器方式が1930年代にドイツのヘーレンタル (Höllental) 線で試験され²⁾、1950年代にフランスがアヌシー (d'Annecy) 線で本格的に実用化²⁾してからは世界の主流となりました。1950年代後半からは、シリコン整流器の車両搭載で信頼性が向上しています。

現在の標準電圧25000V(および日本の在来線20000V)・周波数50Hzまたは60Hzの商用周波単相交流き電方式は、都市鉄道を除く世界の鉄道電化区間において路線長割合の50%を占めています³⁾。

日本では、並行通信線の通信誘導妨害問題対策を講じたBT(吸上変圧器)き電方式が1957年から実用化されました。次いで当時の国鉄技術研究所が中心となって1970年に実用化した交流商用周波AT(単巻変圧器)き電方式(図6)は、変電所送り出し電圧をさらに高くして大電力供給を可能とするとともに、通信誘導妨害問題にも対処しており、新幹線の標準電力供給方式となっています。

このATき電方式の原型は1914年に前述のアメリカ東海岸NY/NH鉄道で実用化し、開発にはエール大学スコット(Charles F. Scott, 図7)教授が関わっています⁵⁾。スコット教授は三相交流を鉄道に適した単相に変換するスコット結線変圧器の発明者(1894年)であり、電気鉄道の歴史に貢献した一人です。

なお、現在では低周波および商用周波の単相交流き電方式共に、交流から変換した直流をもう一度交流に変換して交流電動機を回すインバーター方式の車両が主流となっています。

【 今後の展望 】

電気運転に関して車両と地上は密接に関連しており、両者を切り離して考えることはできません。

電動機が直接使いやすい電力を車両に届けることが電力供給方式の出発点であり、直流き電方式がその代表例です。次に、送りやすさを優先し、車両上で変換して使う方式として交流き電方式が開発されました。そして1980年代以降は電力変換技術が進歩したため、直流き電方式・交流き電方式とも送った電力を車上で変換して電動機を駆動するようになりました。

一方、架空線・第三軌条とも車上と地上の機械的な接触集電の一種であり、何らかの摩擦が生じます。そこで高周波電源を用いた地上と車上間での非接触状態の集電方式の実用化へ向けて、鉄道総研をはじめとして各国で開発が進められています。

(兎東哲夫/電力技術研究部)

文献

- 1) Dittler : Inauguration of the first electric streetcar in the world, Siemens History, 2013
- 2) Duffy : Electric Railways 1880-1990, The Institution of Electrical Engineers, 2003
- 3) 柴川 : 海外鉄道の電気方式, 鉄道と電気技術, Vol.23, No.4, pp.58-61, 2012
- 4) Orchard : Mercury arc rectifier practice, Pittsburgh instruments publishing company, 1936
- 5) Minimizing Induction from Single-Phase Railway, Electrical World, Vol.63.No.18, pp.984-986, 1914