

第48回

車両用主変圧器

交流電化の歴史と主変圧器

電車や電気機関車は架線から電気を受け取って走ります。その電気を送る方法は、大きく分けて直流と交流の二種類があり、鉄道ではその両方が使われています。日本の在来線では主に直流1500Vが使われていますが、地方の在来線などでは交流20000Vも使われています。また、新幹線では大電力を送電するために交流25000Vを使用しています。

交流電化方式の特長として、電力会社から送電される交流電力をそのまま用いることができる点があります。また、車両に主変圧器を積むことで、高い電圧で送電することができるため、送電距離を延ばすことができます。これらの結果として、地上設備を簡略化して電化のコストを低減できる利点

があります。そのため、電気鉄道の初期の頃から、交流電化を目指したさまざまな取り組みが行われました。

電気鉄道のはじまりとしては1879年のベルリン博覧会でシーメンスが電気機関車で乗客を乗せて走らせたことが知られていますが、このときの送電方法は直流でした。交流で送電して鉄道車両を走らせるのはじめの試みとしては、19世紀末にスイスなどで、三相誘導電動機を三相交流で駆動することを前提に、三相二線の交流で電化された例があります。これらの方式では図1のように架線を二本必要とすることから、建設費と保守費がかさむ問題や、その他の技術上の問題があり、広く用いられる方法とはなりませんでした。

その後、20世紀初頭にスイスなどで単相交流電化の電気鉄道が建設され

ました。電圧こそ異なりますが、単相交流を用いて、鉄道車両を走らせるという点では、この方式は現在の新幹線などで用いられている方式と同じです。

ただし、初期の交流電化では、交流整流子電動機を主電動機として用いるために、商用周波数をより低い周波数に変換して送電する方式が主流でした。そして、商用周波数での交流電化が普及したのは第二次世界大戦後以降になりました。

変圧器は磁気を通る鉄心に電気が通る巻線を巻いただけの単純な電気機器ですが、これを用いることにより、交流電力の電圧を容易に変更することができます。そのため、主変圧器だけを高い電圧に耐えることができるものにして置き、そこで低い電圧にしてから電気を使うようにすれば、主電動機などのその他の電気機器は高い電圧に耐

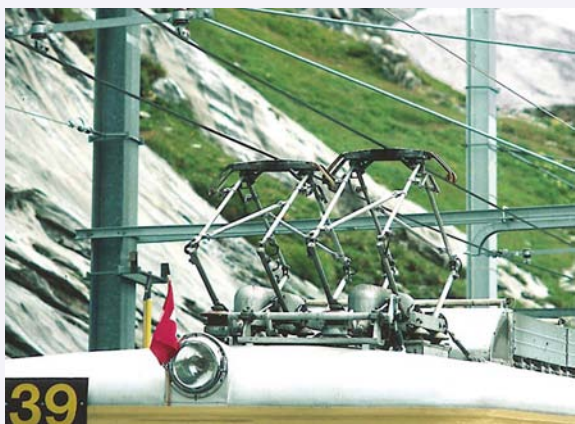


図1 スイスの山岳路線の三相二線式の架線とパンタグラフ

出典：Wikimedia Commons (Jungfraubahn close-up both pantographs.jpg)

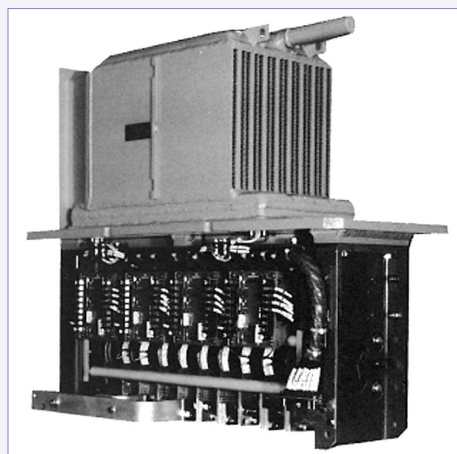


図2 200系電車の整流ユニット

出典：200系電車用RS202形主シリコン制御整流装置明細図, 日本国有鉄道, 1981

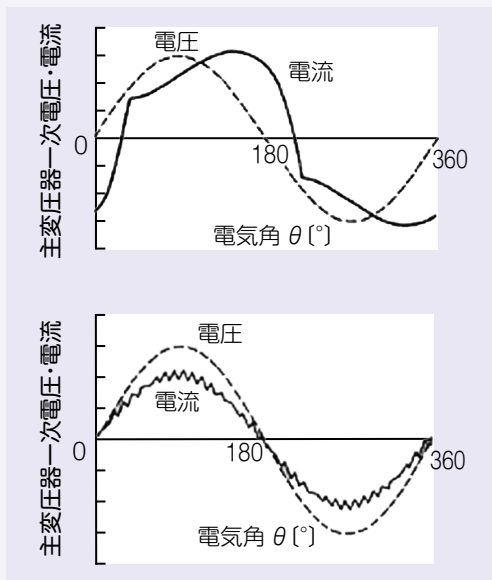


図3 整流器による主変圧器電流波形の違い
(上：サイリスタ整流器，下：PWM
コンバーター)

出典：電気学会電気鉄道における教育調査専門委員会 編、
最新 電気鉄道工学，コロナ社，2000

える必要がありません。そのため、交流で送電して鉄道車両を走らせる場合には、車両に主変圧器を積むことを前提として、高い電圧で送電する方式が広く用いられており、主変圧器は交流電化に欠かせない存在として用いられてきました。

新幹線における主変圧器の変遷

前述の通り、新幹線では交流送電が用いられているため、主変圧器が用いられています。そのため、新幹線用主変圧器の変遷を見ると、技術の進歩とともに主変圧器がどのように移り変わっていったかが分かります。

一般に、電車を走らせる主電動機を制御する際には、主電動機にかかる電圧を制御することで主電動機が出す力を制御します。前述のとおり、変圧器を用いると電圧を容易に変更することができるため、主変圧器で電圧を変化させることで主電動機を制御する方法（タップ制御）が、初めの新幹線車両

である0系で用いられていました。変圧器は巻線の巻回数によって出力される電圧が変化します。そのため、巻回数が多し巻線を用意しておくとともに、その巻線の途中から端子を引き出すことで、巻線の一部だけを使うことができるようにしておけば、端子を切り替えることで使用する巻線の巻回数を変化させて電圧を変化させることができます。この引き出した端子の部分がタップと呼ばれるため、このような制御方式はタップ制御と呼ばれていました。

その後、半導体を用いたスイッチであるサイリスタを用いることで、高速でスイッチの切り替えができるようになります。これを利用したサイリスタ整流器が登場し、主整流器で交流から直流の変換と同時に電圧の制御もできるようになりました。これを用いることで主変圧器のタップは不要になり、主変圧器はシンプルなものになります。100系と200系では、サイリスタ整流器による制御方式が用いられました(図2)。

そして、GTOやIGBTといった、より高性能な半導体のスイッチが登場すると、より高速でスイッチの切り替え

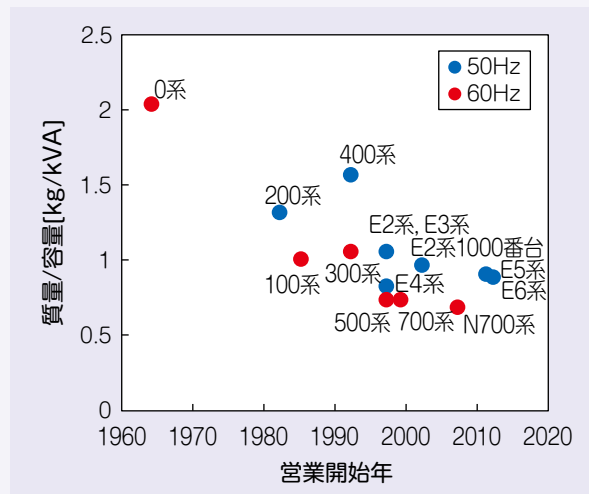


図4 新幹線用主変圧器の軽量化
(※文献2)を基に作成)

を行うことで、主変圧器に流れる電流を理想的な正弦波状(図3)になるように制御するPWMコンバーターと呼ばれる整流器が用いられるようになり、主変圧器はさらに小形軽量になっていきます。

新幹線用主変圧器の軽量化

高速走行をする新幹線電車では、騒音と振動の低減や省エネ化のために、軽量化が強く求められます。鉄に電線を巻いた重い電気機器である主変圧器も、軽量化が強く求められるので、新幹線の主変圧器はさまざまな技術開発により進化してきました。

その一つは、前述のPWMコンバーターの性能向上であり、これにより電流波形が理想的な正弦波に近付き、主変圧器で発生する電力損失が減少して冷却システムの負担が大幅に減りました。また、電線の導体に銅でなくアルミを使用し、絶縁物なども含め、比重の軽い材料を使用することで軽量化が図られていますし、それ以外にもさまざまな工夫により軽量化が図られています。

図4に、新幹線用主変圧器の容量当たり質量の変遷を示します。これによ

ると、新幹線用の主変圧器は当初の0系の1/3程度まで軽量化してきたことが分かります。図5は最近の新幹線用主変圧器の例です。

在来線用主変圧器の自冷化

新幹線用主変圧器は軽量化が強く求められるため、絶縁用の油を冷媒とし、その油をラジエーターで強制風冷する方式が用いられています。しかし、在来線では新幹線ほど軽量化が求められないため、主変圧器は異なった方向に進化してきました。

車両が走る際の空気の流れを利用して主変圧器を冷却することができれば、強制風冷のための電動送風機が不要になり、省保守化と低騒音化ができる利点があります。また、電動送風機を運転するための電力も不要になりま

す。そのため、在来線向けには走行風自冷式の主変圧器が開発されて使用されるようになりました。図6は走行風自冷式の主変圧器の外観です。手前の部分が走行風を受けて冷却を行う部分になっています。

機関車用主変圧器の大容量化

新幹線電車用の主変圧器は小型軽量化、在来線電車用主変圧器は省保守化などを旨として主変圧器が進化してきました。これに対し、機関車用主変圧器は機関車を大出力化するために主変圧器の大容量化が一つの進化の方向性になっています。表1は機関車用主変圧器の容量の例で、近年になり大容量の主変圧器が製造されていることが分かります。

新技術として注目されているのが超電導主変圧器です。

主変圧器では巻線に電気を流すときに電気抵抗により多くの電力損失が発生します。この巻線を超電導化することで電力損失を大幅に減らすことができ、より省エネな電車を実現することができ、更なる小形軽量化や大容量化の可能性もあります。そのため、液体窒素の沸点(77K)より高い温度で使うことができる高温超電導体が発見された頃から、超電導を用いた変圧器の開発が行われるようになりました。

鉄道総研では1990年頃から超電導主変圧器の検討を開始し、2004年度に超電導主変圧器を試作して基本的な試験を行い、車両用主変圧器に求められる仕様をおおむね満足することを確認しました(図7)。この主変圧器ではビスマス系超電導線材を用いた巻線を液体窒素で冷却する構造を採用しています。この超電導主変圧器の質量は1.7tであり従来の主変圧器に比べ大幅に軽量化していますが、巻線の電力損失を十分に低減できなかつたため、低温を保つための冷凍機などを含めると軽量化されないという課題があります。しかし、超電導線材の進歩により電力損失の低減が進めば、冷凍機の負担が減少して、課題が解決されていく可能性があるため、今後の研究開発により超電導機主変圧器が実現に近づいていくことが期待されます。



図5 新幹線電車用主変圧器
出典：N700系新幹線電車用主変圧器、三菱電機技報、Vol.81、No.1、p.66、2007

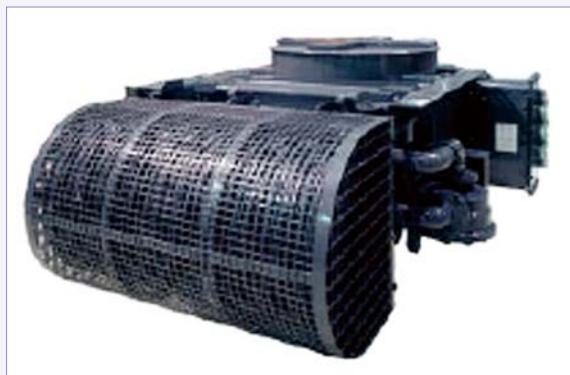


図6 在来線用走行風自冷式主変圧器
出典：中村賢一、木庭豊、児仁井克己、近藤博之：車両用変圧器の技術動向、三菱電機技報、Vol.79、No.12、p.12、2005

超電導主変圧器の開発

ここまで見てきたように、主変圧器は交流車両に欠かせないものであり、車両のニーズに合わせてさまざまな進化を遂げてきました。主変圧器は今後も更なる進化を遂げていくと思われませんが、今後の

表1 機関車用主変圧器の容量

| 機関車形式 | 製造初年 | 変圧器容量 |
|---------------|------|---------|
| 国鉄 EF81 形 | 1969 | 2430kVA |
| JR 貨物 EF500 形 | 1990 | 7660kVA |
| 中国鉄道部 HXD3 形 | 2004 | 9006kVA |

(※文献2)からの引用)



図7 超電導主変圧器

出典:上條弘貴, 秦広, 池田和也, 長嶋賢, 宮崎佳樹, 福本祐介: 超電導主変圧器の実用化に向けた交流損失低減と冷却特性向上, 鉄道総研報告, 第23巻, 11号, 2009

超電導主変圧器は海外でも注目されており、ドイツのシーメンス社により超電導主変圧器の開発が行われています。シーメンス社では1999年に100kVAの超電導主変圧器を試作し、その後、その結果を受けて大容量化した1MVAの超電導主変圧器について2003年に発表しています。1MVA主変圧器についてはPWMコンバーターと組み合わせた試験についても報告されており、問題なく動作することが確認されています。

半導体電力変換装置を用いた変圧器システムの開発

前述の通り、主変圧器を用いて電圧を下げることで、車両のその他の機器が高電圧に耐える必要が無くなる点が、主変圧器の主な役割です。しかし、近年の半導体電力変換装置の進歩により、従来のような主変圧器を用いない方式も検討されるようになりました。PET (Power Electronics Transformer) などと呼ばれるこの新しく検討されて

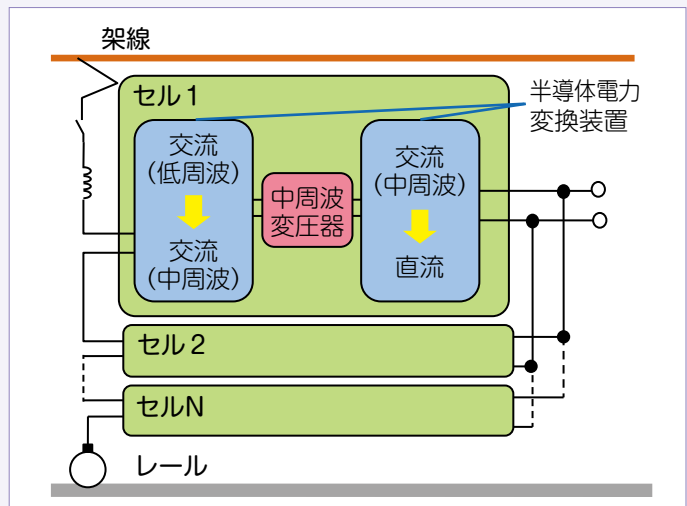


図8 半導体電力変換装置を用いた変圧器システムの構成例

いる方式では、架線から受けた電力を、まず、半導体電力変換装置で比較的高い周波数の交流電力に変換します。そして、その交流電力を中周波変圧器と呼ばれる小形の変圧器に入力し、その変圧器の出力を再び半導体電力変換装置で主電動機を駆動する電力などに変換する方式です(図8)。

変圧器は周波数を高くすることで小形化できる性質があるため、このような複雑な構成にして半導体電力変換装置の分だけ質量や体積が増加しても、変圧器を小形化することによる質量や体積の減少の方が大きくなり、トータルで小形軽量化されることが期待されています。

特に、ヨーロッパでは、前述のとおり交流電化を導入する初期に交流整流子電動機を用いるために低周波交流電化を行ったため、現在でも低周波で電化している路線が多く存在しています。低周波交流電化路線では周波数を高めることによる主変圧器の軽量化効果がより大きいため、ヨーロッパではこのような方式の研究開発が盛んに行われているようです。

おわりに

主変圧器は交流電化区間を走行する車両にのみ搭載されており、台数も少なく、簡素であるがゆえに目立たない存在ですが、交流電化に欠くことができない機器として活躍しています。また、基本的な原理は変わらないものの、その方式は周辺の機器やさまざまなニーズとともに変化し、進化を続けてきました。次世代の主変圧器として、超電導主変圧器や中周波変圧器も研究開発されており、主変圧器は今後も進化を続けていくものと思われます。

(近藤稔/車両制御技術研究部
動力システム研究室)

文献

- 1)川添雄司:交流電気車両要論,電気車研究会,1971
- 2)鉄道車両用主回路機器の高性能化技術調査専門委員会:鉄道車両用主回路機器の高性能化技術,電気学会技術報告1227号,2011
- 3)電気学会電気鉄道における教育調査専門委員会編:最新電気鉄道工学,コロナ社,2000
- 4)Dražen Dujic, Frederick Kieferndorf, and Francisco Canales: Power Electronic Transformer Technology for Traction Applications - An Overview, ELECTRONICS, Vol. 16, No. 1, pp.50-56, 2012