

鉄道車両用パワーエレクトロニクス変圧器の技術動向

仲村 孝行*

The Trend of the Power Electronic Transformer for the Railway Vehicle

Takayuki NAKAMURA

A transformer is essential for AC voltage conversion, but there is room for improvement for mass and volume reduction. Especially, the size of low-frequency transformer is large, because of its principle. Nowadays, the technological progress of the semiconductor enables the transformers to be operated at an arbitrary frequency and to be small and light. The power electronic transformer, which utilizes this technology, are employed for isolated an DC-DC converter for auxiliary power unit around 1990s, and traction circuits in Europe after 2000. This paper introduces examples of the power electronic transformer, so that this introduction trigger further development.

キーワード：変圧器，パワーエレクトロニクス，絶縁形 DC-DC コンバータ，共振，パルス幅

1. はじめに

電気機器の一種である変圧器は交流電圧の変換や絶縁の役割を果たしており、現在でも電気車に必要な機器である。主回路制御装置の中心となるスイッチング素子については小型軽量化が進む一方、変圧器の小型軽量化は進んでいない状況にある。この一因として、変圧器の質量および体積は、原理上周波数が低いほど大型化するため、既存の商用周波数での小型軽量化には限界があることが挙げられる。

近年、半導体技術の進歩により、商用周波数より高い任意の周波数の交流を生成することが容易となってきた。この技術を用いて電圧変換および絶縁を行うことで、変圧器の小型軽量化が期待される。この原理に基づく鉄道車両用パワーエレクトロニクス変圧器は日本国内においては補助回路用として 1990 年代頃に絶縁形 DC-DC コンバータと称される補助電源装置に採用された。欧州では主回路用として主要電機製造事業者が実車への適用も含めた検討を行っている。この事例は HFT (High Frequency Transformer：高周波変圧器)、MFT (Medium Frequency Transformer：中周波変圧器)あるいは PETT (Power Electronic Traction Transformer：電子主変圧器)などと称される。以上の具体例を含めて、周波数の向上により変圧器を小型軽量化する試みについて、鉄道分野に特化して体系的に網羅した文献は少ないように見受け

られる。そのため、鉄道用に特化した変圧器の高周波化の試みを整理することは、今後の車載機器の小型軽量化および高効率化に向けて有用と考えられる。

そこで、本報告は商用周波数より高い周波数で運用する変圧器とこれを用いたシステムに焦点を当てることとする。前述のようにこの変圧器は開発者により様々な名称がつけられているが、本報告では商用周波数より高い周波数で半導体電力変換技術により運用する変圧器を対象とし、名称をパワーエレクトロニクス変圧器 (PET) と統一して扱う。2 章で現在使用されているパワーエレクトロニクス変圧器の分類を示し、3 章では補助電源装置用の絶縁形 DC-DC コンバータの事例を、4 章では欧州における主回路用途向けの開発事例を記述する。いずれの事例も今後の車載機器の改良のために採用理由も調査し、可能な範囲で記載することとした。なお、本報告で記載する事例は鉄道事業者や製造事業者における実機レベルの装置を対象とした。

2. パワーエレクトロニクス変圧器を用いた回路構成と分類

パワーエレクトロニクス変圧器を用いた変換システムによる主回路の構成事例を図 1 に示す。き電電圧および半導体素子の耐圧による制約からこの変換システムの入力側は数モジュールを直列接続、出力側は並列接続として、駆動用インバータ入力に供給される。

パワーエレクトロニクス変圧器を主回路に適用する場

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

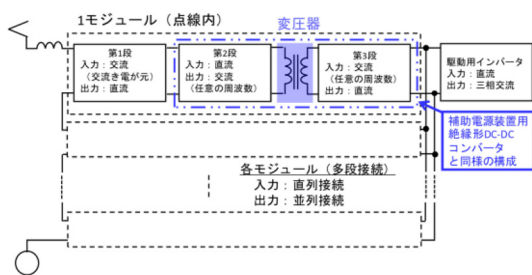


図1 パワーエレクトロニクス変圧器を用いた主回路構成

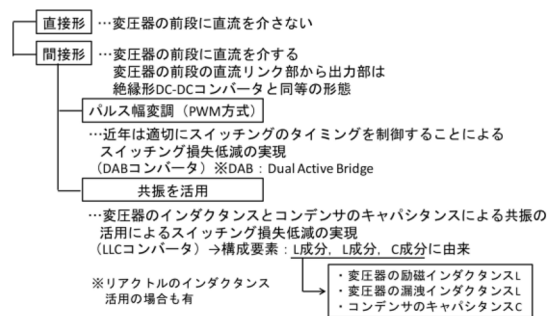


図2 パワーエレクトロニクス変圧器を用いた回路構成の分類

合、各モジュールにおける回路構成は3段階に分けられ、以下の通りとなる。

- ・第1段：交流き電から直流への変換
- ・第2段：直流から任意の交流への変換
- ・第3段：任意の交流から直流への変換

図2にパワーエレクトロニクス変圧器を用いた回路構成による分類を示す。入力された交流を一旦直流に変成するか否かにより大別できる。直流を介さない直接型の場合、図1の第1段出力部と第2段入力部の中間に存在する直流部分が省略された形となり、き電周波数から変圧器の周波数に直接変換する。

交流き電に対してパワーエレクトロニクス変圧器を用いる事例の多くは直流を介する方式が採用されている。このとき、第2段から第3段へのシステムは絶縁型直流-直流変換システムとなっており、直流電車の補助回路電源装置用絶縁形DC-DCコンバータと同様の形態である。第2段において駆動用インバータと同様に直流からパルス幅変調（PWM）方式により任意の交流を生成し、第3段において絶縁および変圧された交流をダイオードで整流する等により直流を生成する方式が絶縁形DC-DCコンバータシステムの基本である。直流を介する方式はパルス幅変調と共振を用いた周波数制御に大別でき、1990年頃における補助電源装置用の絶縁形DC-DCコンバータは前者である。後者については変圧器またはリアクトルのインダクタンスとコンデンサのキャパシタンスによる共振を利用しており、2000年頃よりLLCコンバータとして産業用として実用化された。鉄道用途としては欧州において主回路用に実車レベルの試作が行われている。パルス幅変調方式についても、適切に制御することで半導体損失を低減したDAB（Dual Active Bridge）コンバータが実用化されている。詳細については、文献1および文献1の著者が開設するWebサイトに詳述されている。また、共振方式とパルス幅変調方式の比較については1996年にGE社のKheraluwala氏らにより比較されている²⁾。

3. 補助電源装置用絶縁形DC-DCコンバータ

補助回路には主回路の高圧から補機を絶縁すること、補機内での不具合が主回路機器に影響を及ぼさないことが求められており、入出力間の絶縁が必須要件である。直流生成と高圧絶縁を両立すべく、1990年頃に絶縁方式のDC-DCコンバータが採用された。なお、1990年頃は補助電源装置がMG（電動発電機）からSIV（静止インバータ）へと移行する過渡期である。

3.1 1990年頃の採用事例

表1にDC1500V電車で採用事例を示す。表1のように民鉄の特急車両の補助電源装置には絶縁形DC-DCコンバータ方式が多く採用されている。この理由として、きめ細かな制御が可能なインバータ式空調装置の採用が挙げられる。1980年代より家庭用空調装置にインバータを用いる開発が進められ、汎用化された。これを鉄道用に用いる場合、入力に直流が必要となるため、絶縁・変圧をしつつ直流の生成が容易なDC-DCコンバータ方式が採用されたものと推察される。運用周波数は文献13にて180Hz、300Hz程度または600Hzと示されている。以下、特筆すべき事柄を事業者ごとに記載する。

(1) 民鉄

最初に絶縁形DC-DCコンバータを搭載した近鉄21000系では、インバータ空調装置を採用するために絶縁形DC-DCコンバータを採用した旨が記されている。

文献3によると本システムの特徴は以下の通りである。

- 「・GTOサイリスタを使用した単相高周波インバータにより、DC1500VとDC330V回路を完全に絶縁し、高圧側の故障時に低圧側に過電圧が加わることがない。
- ・4500V-800AのGTOサイリスタを採用し素子数を少なくし、小型軽量化を図っている。
- ・DC330Vラインを通して、複数の補助電源装置が並列運転されるため、1台の電源装置の瞬停に対して停電することがない。また1台の装置が故障した場合でも他からバックアップを受けることが可能で

表1 絶縁形 DC-DC コンバータ方式の採用事例

事業者	形式	用途	出力	容量	登場年
近鉄	21000 ³⁾	特急	330V	70kW	1988
名鉄	1030 ⁴⁾	〃	330V	80kW	1992
営団	03 ⁵⁾	通勤	600V	130kW	1988
〃	06/07 ⁶⁾	〃	600V	170kW	1993
JR 東海	211 ⁷⁾	〃	600V	110kW	1988
東京都	5300 ⁸⁾	〃	600V	130kW	1991
東武	100 ⁹⁾	特急	330V	140kW	1990
京成	AE100 ¹⁰⁾	〃	600V	150kW	1990
〃	3700 ¹¹⁾	通勤	600V	150kW	1991
南海	11000 ¹²⁾	特急	330V	75kW	1992

あり、システム全体の信頼性の向上が図れる。」

この絶縁形 DC-DC コンバータの回路構成は、1 次側がハーフブリッジ方式であり、2 次側は全波整流である(図 3)³⁾。同様の構成は 1990 年代前半に近鉄で登場した特急車両(22000 系, 26000 系など)でも採用されたが、近鉄の一般車両の補助電源装置には絶縁形 DC-DC コンバータが採用されず、MG または SIV が搭載されている。この傾向は名鉄や東武でもみられる。特に名鉄は一般車両と特別車両を編成内に混成する場合、特別車両用と一般車両用で補助電源装置を使い分けており、絶縁形 DC-DC コンバータは特別車両に搭載され、一般車両は MG の場合もある⁴⁾。

京成 3700 形は通勤車両において絶縁形 DC-DC コンバータを用いている数少ない例である。これは同時期に設計された特急車両 AE100 形の機器と共用できる利点があるためと推察される。

(2) 営団地下鉄(現:東京地下鉄)

営団地下鉄も絶縁形 DC-DC コンバータを積極的に採用した鉄道事業者の 1 つである。最初に採用した 03 系は 1500V から 600V の変換を非絶縁方式のチョップで行い、絶縁形 DC-DC コンバータを用いている変換は 600V から 100V および 24V への変換のみであり、周波数は 600Hz である⁵⁾。1500V から 600V への変換で絶縁を行うようになったのは 06・07 系および同時期の 03・05 系増備車からである。4 モジュールから構成されており、入力が直列接続、出力が並列接続であることは図 1 と同様である⁶⁾。

(3) JR 東海

JR 東海もインバータ空調と電動空気圧縮機のインバータ化に伴い絶縁形 DC-DC コンバータを採用した。補助電源装置のみで従来の 211 系(BLMG を使用)から約 2.0 t の軽量化を実現できた。211 系は界磁添加励磁制御であり、添加励磁のための電源用として矩形波 180Hz (600V) を生成する⁷⁾。この方式は同時期に製造

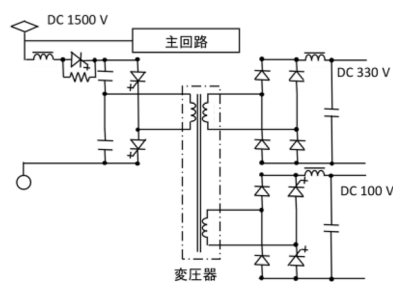


図3 近鉄 21000 系用補助電源装置 (絶縁形 DC-DC コンバータ 80kW)

された 213 系や 311 系も同様である。

3.2 近年の動向

現在では補助電源装置用に絶縁形 DC-DC コンバータ方式が採用されることはなく、SIV が採用されており、回路構成は主回路用の VVVF インバータと同一である。

補助電源装置としてインバータが主流となった現在でも、絶縁形 DC-DC コンバータ方式は選択肢として残っており、2000 年以降も開発事例がある。2001 年に Bombardier 社が欧州における複数のき電システムに対応する補助電源装置用として、インバータの前段に絶縁形 DC-DC コンバータを配置した事例がある¹⁴⁾。2014 年以降に東芝が、高速点弧が可能なスイッチング素子である SiC-MOSFET を用いた絶縁形 DC-DC コンバータを開発し、小型軽量化と低損失化を実現した。特に変圧器を 16kHz で動作させることで、体積比で 90% 以上削減している¹⁵⁾。また、海外でも開発事例はあり、Siemens 社が SiC-MOSFET を用いた補助電源装置用の絶縁形 DC-DC コンバータの開発を行っており、小型軽量化の検討が進められている¹⁶⁾。

4. 欧州における主回路用パワーエレクトロニクス変圧器導入の試み

日本国内においては、主回路用パワーエレクトロニクス変圧器導入はなされていない。この理由として、以下の状況が挙げられよう。

- ・ 直流電気車では効率低下を犠牲にしてまで絶縁と直流電圧変換を行う必要性和利点がない。
- ・ 交流電気車では絶縁と変圧の役割を主変圧器が果たしており、半導体耐圧の観点から図 1 のように複数モジュールを多段接続してまでパワーエレクトロニクス変圧器導入する意義が見いだせない。

一方、欧州では交流き電システムに AC 15kV 16.7Hz の低周波交流が採用されている国があり、変圧器の小型軽量化が日本以上に重要となる。そのため、変圧器をき電・商用周波数より高い周波数で動作させる取り組みが行わ

れており、その変遷について DLR（ドイツ航空宇宙センター）¹⁷⁾ や CRRC（中国中車）¹⁸⁾ が纏めている。これらの文献を元に表 2 に各電機製造事業者における取り組み事例を示す。文献等で不明であった箇所は「—」印で示す。表 2 に示した通り、多くの製造事業者が本方式に取り組んでいるが、現時点の進捗状況には差がある。例えば、Siemens 社や Bombardier 社はいずれも 2005 年前後に開発事例を公表しているが、その後実車搭載や進捗状況の公開文献は見受けられない。一方、ABB 社や Alstom 社は既に本方式を採用した実車が登場している。以下、特筆すべき事柄について製造事業者を中心に記載する。

(1) ABB 社

本方式について最も早くから取り組んでおり、進んでいる製造事業者が ABB 社と言えよう。実車への搭載事例もあるので、以下に具体例を示す。

(a) Flirt (Fast Light Intercity and Regional Train)

2007 年に登場した SBB（スイス連邦鉄道）の RABe524 形電車はパワーエレクトロニクス変圧器を採用した一例と言えよう。Stadler 社が製作した本形式は既に欧州で量産された Flirt の一種であり、電機品は ABB 社が製造している。き電電圧にかかわらずインバータ入力電圧を DC 750V とする構成をとり、異なるき電システムに対する設計の自由度を有している。RABe524 形はスイス—イタリア間の相互直通を目的として開発された。本形式の主回路図を図 4 に示す²¹⁾。き電システムはスイスとイタリアでは異なり、スイスが AC 15kV 16.7Hz、イタリアが DC 3kV である。本車両はスイス国

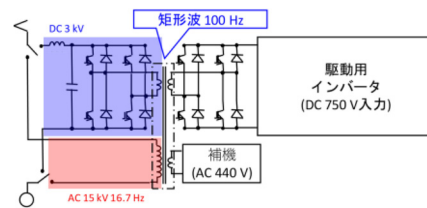


図 4 Flirt (SBB RABe524) 形電車主回路図

内の交流区間では一般的な交流電気車と同様に集電後、主変圧器を介して降圧後、PWM 整流器で DC 750V を生成し、3 相 PWM インバータで誘導電動機を駆動する。直流区間では集電し、単相 PWM インバータにより矩形波 100Hz を生成後、主変圧器を介して PWM 整流器で DC 750V を生成する。本変換システムは DC 3kV から DC 750V の絶縁式直流—直流システムと見ることができ、パワーエレクトロニクス変圧器を採用した数少ない営業事例である。同形式は Trenitalia（イタリア鉄道）にて ETR524 として同一仕様で製作されている。

この他 Stadler 社は RABe524 形電車と同様の Flirt を各国に展開している。異電源直通車両として、ドイツの AC 15kV 16.7Hz、オランダの DC 1.5kV の間を相互直通する車両に Stadler 社の Flirt である ET2429 形が使用されている。本システムと同様に、直流区間では DC 1.5kV を集電後、単相 PWM インバータにより矩形波 100Hz を生成後、主変圧器を介して PWM 整流器で DC 750V を生成する。さらに、オランダの一部区間にある AC 25kV 50Hz にも対応している²³⁾。

表 2 欧州製造事業者による主回路用パワーエレクトロニクス変圧器の採用事例

電機製造事業者	製作年	入力電圧	出力電圧	変圧器周波数	変圧器巻数比	容量	方式	実車搭載事例
ABB ¹⁹⁾	2002	—	—	10kHz	1:1	4.2MVA (350kVA×12)	共振	—
ABB ²⁰⁾	2007	/	1800V	400Hz	1:1	1.2MVA (75kVA×16)	直接	—
ABB ²¹⁾	2008	3000V	750V	100Hz	—	1MW	パルス幅	RABe 524 (瑞) ETR524 (伊)
ABB ²²⁾	2011	3600V	1500V	1.75kHz	—	4.2MVA (525kVA×8)	共振	Ee 933 (瑞)
ABB ²³⁾	2017	1500V	750V	100Hz	—	1MW	パルス幅	ET2429 (独)
SIEMENS ²⁴⁾	2004	/	850V	2.5kHz	—	2MW	直接	—
BOMBARDIER ²⁵⁾	2007	2800V	2800V	8kHz	1:1	5MW	共振	—
BOMBARDIER ²⁶⁾	2010	750V	630V	25kHz	7:5	400kW	共振	—
ALSTOM ²⁷⁾	2003	3600V	1650V	5kHz	—	1.5MVA	共振	VT 618 (独)
CAF ²⁸⁾	2012	3000V	750V	1kHz	4:1	400kW	パルス幅	—
CAF ²⁸⁾	2012	3000V	750V	5kHz	4:1	400kW	共振	—

(b) Ee933 形

一般的に言われる「パワーエレクトロニクス変圧器を搭載した車両」として広く認知されている車両が本車両である。2011年に既存のEe934形の改造によりEe933形となり登場し、Geneva-Cornavin駅で入換用として稼働しているとのことであるが、現在も稼働中かは不明である。図5に主回路図を示す。

文献22では本システムの採用にあたり、留意した事柄などが詳述されている。共振を活用したLLCコンバータの利点を以下の通り挙げている。

「・広範囲の出力均等性

- ・全負荷領域でのゼロ電圧スイッチング (ZVS) により、変圧器1次側のスイッチング損失低減
- ・ターンオフ電流の最小化
- ・変圧器2次側ダイオード整流器への電圧ストレス低減とゼロ電流スイッチング (ZCS)
- ・共振周波数での負荷に依存しない制御

なお、本システムの共振周波数は2.2kHzであり、スイッチング周波数を変化させることで出力電圧制御が可能であるが、2012年時点では1.75kHzで固定している²²⁾。この車両は本技術の実用性の検証用であり、当時の制御目標は以下の通りであった。

「・入力電流を正弦波に維持

- ・力率1
- ・直流中間電圧 (DC 3.6kV) を一定に維持
- ・架線系への高調波流出防止

今後の課題として、効率向上、EMCと高調波低減、低騒音を挙げている。出力密度は現状の変圧器の0.2～0.3kVA/kgから0.5～0.75kVA/kgに向上できる旨記載されている。

(2) Alstom 社

2000年にAlstom社とDB(ドイツ鉄道)が共同で開発したCoradia LIREX(6両編成1編成)が登場した。この車両はDBではVT618形(またはBR618形)と称され、電気式ディーゼル車両である。2003年にディーゼルとの架線のハイブリッドを実現すべく、5kHzで変圧器を動作させる変換システムを採用した。装置レベルの試験状況等は文献27に記載されている。走行試験結果

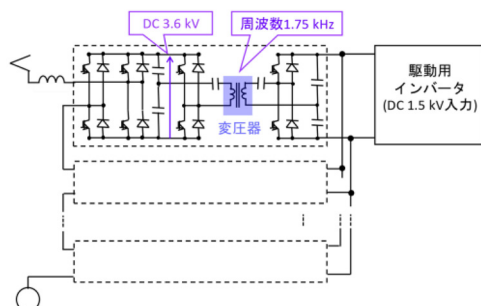


図5 Ee933形入換機関車主回路構成図

などの文献は見受けられず、車両自体のその後の動向も不明である。

(3) その他製造事業者、鉄道事業者

Caf社が文献28において、同一容量、同一電圧変換比でパルス幅変調方式と共振形の比較を行っている。それぞれに対応した変圧器を設計し、パルス幅変調方式と共振活用方式で動作確認をしている。なお、周波数はパルス幅変調方式が1kHz未満、共振活用方式が5kHzを超える周波数としている。

SNCF(フランス国鉄)は現状から400kg軽量化したパワーエレクトロニクス変圧器を試作し、パリ近郊で運用中のZ20500形電車に搭載し試験する予定である²⁹⁾。

5. まとめ

商用周波数より高い周波数で半導体電力変換技術により運用するパワーエレクトロニクス変圧器の技術について、日本国内で鉄道用途に特化した調査報告は少ない。そのため本報告では採用事例と採用に至る経緯を調査した。得られた知見は以下の通りである。

- ・日本国内でのパワーエレクトロニクス変圧器の採用事例として、1990年頃補助電源装置用途の絶縁形DC-DCコンバータが挙げられる。採用の背景として、空調のインバータ化に伴い低圧直流電源が必要となり、低圧直流生成と補助電源装置に必要な絶縁を容易に両立できたことが挙げられる。
- ・欧州では主回路用として、パワーエレクトロニクス変圧器の採用検討が行われている。この理由として、欧州の交流電システムにAC 15kV 16.7Hzを採用した地域があり、変圧器の小型軽量化が日本以上に重要であったためである。
- ・現時点でパワーエレクトロニクス変圧器を主回路に有する営業車両はSTADLERのFlirtのみである。該当車両は異なる電システムを相互直通運用可能とするため開発された車両であり、変圧器の運用周波数は100Hzである。
- ・欧州の電機製造事業者で採用されている方式は変圧器のインダクタンスとコンデンサのキャパシタンスの共振を利用したLLCコンバータが主であり、運用周波数は数kHzから数十kHz領域である。

本報告が今後の変圧器の小型軽量化に向けた検討の深度化に対する一助となれば幸いである。

文献

- 1) 平地克也：DC-DCコンバータの基礎から応用まで，電気学会，2018
- 2) R.L. Steigerwald, R.W. De Doncker, H. Kheraluwala, “A

- comparison of high-power DC-DC soft-switched converter topologies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.32, No.5, pp. 1139-1145, 1996.
- 3) 飯田利武, 水谷典夫, 中村茂一, 大西利之, 守屋文康, 吉良浩忠: 近畿日本鉄道 21000 系新特急車用補助電源システム, 昭和 63 年電気学会全国大会講演論文集, No.856, pp.1061-1062, 1988
 - 4) 永津守敏, 神谷昭雄, 上田規雄, 佐竹明宏: 名古屋鉄道 1030—1230 系特急電車, 車両技術 No.199, pp.33-43, 1993
 - 5) 黒川悦伸, 金子八百蔵, 米倉讓, 松浦敏明: 車両新空調補助電源システム用一体形 DC/DC コンバータ装置, 第 25 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 1988
 - 6) 東濱忠良, 久保沢勝, 松浦敏明, 笠原清, 太田泰正, 糴芳信: 車両補助電源用高周波リンク方式 DC/DC コンバータ装置, 平成 5 年電気学会全国大会講演論文集, No.579, pp.148-149, 1993
 - 7) 石津一正, 藤田信一郎, 田中守, 住山茂: DC600V を主たる補助電源とする電車の新しい電気システム, 第 25 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 1988
 - 8) 岸野勇, 加藤憲司: 東京都交通局浅草線用 5300 形電車, 車両技術 No.194, pp.120-131, 1991
 - 9) 木村耕: 東武鉄道 100 系特急電車 (スパーシア), 車両技術 No.192, pp.49-63, 1990
 - 10) 望月和正, 大崎隆, 峰岸俊彦: 京成電鉄 AE100 形ニュースカイライナー, 車両技術 No.192, pp.64-79, 1990
 - 11) 望月一正, 大崎隆, 茂木一男: 京成電鉄 3700 形新通勤車両, 車両技術 No.194, pp.72-87, 1991
 - 12) 大門庸郎, 池本修: 南海電鉄 11000 系特急電車「りんかん」車両技術 No.199, pp.44-57, 1993
 - 13) 金田順一郎, 松浦敏明: 車両用補助電源装置の技術動向 (上), 電気車の科学 No. 498, pp.28-33, 1989
 - 14) H. Reinold, H. Flerlage, G. Hartung, O. Magin, “Medium Frequency Technology in Auxiliary Power Converter for Traction Application,” presented at the 5th World Congress on Railway Research, Cologne, Germany, November 25-29, 2001.
 - 15) 竹内章, 富川英朝, 河村恒毅, 藤戸春彦: SiC 素子を適用した高周波絶縁 SIV の開発, 第 54 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 2017
 - 16) M. Helsper, M. Ocklenburg, “SiC MOSFET Based Auxiliary Power Supply for Rail Vehicles,” presented at the 20th European Conference on Power Electronics and Applications, Riga, Latvia, September 17-21, 2018.
 - 17) D. Ronanki, S. S. Williamson, “Evolution of Power Converter Topologies and Technical Considerations of Power Electronic Transformer-Based Rolling Stock Architectures,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol.4, No.1, pp.211-219, 2018.
 - 18) J. Feng, W. Q. Chu, Z. Zhang, Z. Q. Zhu, “Power Electronic Transformer-Based Railway Traction Systems: Challenges and Opportunities,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.5, No.3, pp.1237-1253, 2017.
 - 19) L. Heinemann, “An Actively Cooled High Power, High Frequency Transformer with High Insulation Capability,” *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference*, pp.352-357, 2002.
 - 20) N. Hugo, P. Stefanutti, M. Pellerin, A. Akdag, “Power Electronics Traction Transformer,” presented at 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, September 2-5, 2007.
 - 21) M. Wiegleb, K. Schmid, E. Keller, P. Daehler, “Stadlers MehrsystemTriebzug Flirt für die TILO,” *Eisenbahn-Revue*, pp. 490-497, 2006.
 - 22) M. Claessens, D. Dujic, F. Canales, J. K. Steinke, P. Stefanutti, C. Vetterli, “Traction Transformation: A Power-electronic Traction Transformer (PETT),” *ABB Review* 2012.1, pp.11-17, 2012.
 - 23) J. Triegel, C. Mängel, K. Hempelmann, “FLIRT NRH Mehrsystemfahrzeug für den Regionalverkehr” *Elektrische Bahnen* Vol.115, pp.560-565, 2017.
 - 24) M. Glinka, “Prototype of Multiphase Modular-multilevel Converter with 2 MW Power Rating and 17-level-output-voltage,” *Proceedings of the IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp.2572-2576, 2004.
 - 25) M. Steiner, H. Reinold, “Medium Frequency Topology in Railway Applications,” presented at 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, September 2-5, 2007.
 - 26) M. Youssef, J. A. A. Qahouq, M. Orabi, “Analysis and Design of LCC Resonant Inverter for the Transportation Systems Applications,” *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference*, pp.1778-1784, 2010.
 - 27) B. Engel, M. Victor, G. Bachmann, and A. Falk, “15 kV/16.7 Hz Energy Supply System with Medium Frequency Transformer and 6.5 kV IGBTs in Resonant Operation,” presented at 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, September 2-4, 2003.
 - 28) I. Villar, L. Mir, I. Etxeberria-Otadui, J. Colmenero, X. Agirre, T. Nieva, “Optimal Design and Experimental Validation of a Medium-Frequency 400kVA Power Transformer for Railway Traction Applications” *Proceedings of the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.684-690, 2012.
 - 29) A. Chamaret, “Le transformateur, source de tension mais surtout d’innovations,” *Revue Generale des Chemins de Fer* No.279, pp.79-81, 2018.