

# 車載リアクトルの用途と要件

仲村 孝行\*

## Requirements and Transition of Onboard Reactor

Takayuki NAKAMURA

The technology of active components such as semiconductors advances. This progress enables traction inverters for railway vehicles to be small and light. On the other hand, problems remain with passive components such as reactors. As for onboard reactors, requirements should be considered not only as reactors unit but also as a whole trainset. Therefore, sorting requirements for reactors into ones, which are essential for reactors to be small and light in the trainset. This paper focuses on the problems such as the flux leakage and the resonance, which are unintentionally caused by the onboard reactors, and introduces the transition of the inductance value of the reactor, so that this investigation will benefit further development.

キーワード：車載リアクトル，漏洩磁束，共振，保護協調，フィルタリアクトル，インダクタンス値

### 1. はじめに

近年，高周波・高耐圧に対応したスイッチング素子を用いた変換器を搭載した車両が登場し，車載機器の高効率化および小型軽量化が進められている。能動素子と称されるスイッチング素子の小型軽量化が進む一方，リアクトル，コンデンサ，遮断器など受動素子とされる機器については改善の余地がある。産業界においては近年リアクトル（インダクタ）の特性改善も注目を浴びつつあり，材料，形状，評価など様々な試みがなされている<sup>1)</sup>。鉄道用の車載リアクトルについても同様に，小型軽量化が求められているが，定数選定に地上設備との協調を考慮する必要があるため，リアクトル単体での小型軽量化の検討には限界があり，列車として考慮すべき要件が存在する。それにも関わらず，車載リアクトル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。国鉄時代には文献2のようなリアクトルや変圧器に特化して体系化した資料も存在するが，纏められた当時は主回路にパワー半導体を適用し始めた時期であることに留意する必要がある。

以上の背景から，フィルタリアクトルなど現在使用されている車載リアクトルの用途や求められる要件と定数決定の経緯を整理することは，今後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，本報告は現在使用されている車載リアクトルに焦点を当てることとし，2章で現在使用されている車載リアクトルの分類を実施し，3章と4章では車載リアクトルとして考慮すべき要件を記述する。具体的には3

章では漏洩磁束と共振について記述する。どちらの事象も設計時に意図しない車載リアクトルの影響が他装置に及びうる問題である。4章では現在の主回路にパワー半導体を有する直流電気車には必ず搭載されているフィルタリアクトルが考慮すべき保護協調について記述する。今後の車載リアクトルの改善のために各章ではそれぞれの事象だけでなく，過去に講じてきた対策や定数の変遷を可能な範囲で記載することとした。

### 2. 車載リアクトルの分類

車載リアクトルに求められる要件を整理するため，リアクトルの種類を分類する。リアクトルは次の重要な働きをする。

- ・平滑・・・電流の急峻な変化を抑制。（高周波の阻止）
- ・持流・・・電流の断続を防止。

#### 2.1 構造による分類

リアクトルを構造により分類すると，鉄芯を用いた鉄芯形と鉄芯を全く用いない空芯形に大別される。鉄芯形には鉄芯の形状により，鉄芯がコイルを取り巻くように形成された外鉄形とコイルが鉄芯を取り巻くように形成された内鉄形に分類される。この分類は変圧器と同様である。また，鉄芯の形態により，磁路が閉じている閉路鉄芯形，閉じた磁路の一部に空隙を設けた空隙形，磁路に空間を利用したオープンコア型に分類できる。

また，冷却方式による分類も可能であり，乾式（冷媒は空気），油入式（冷媒は油）に大別される。前者については自然風冷である自冷式と強制風冷である風冷式に分けられる。後者については油を循環させるか否かによ

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

り、自冷式、油循環式、強制風冷を合わせた油循環風冷式がある。この分類は変圧器と同様である。

## 2.2 車載リアクトルの用途による分類と役割

現在主に使用されているリアクトルの役割を本節で示す。現在の車載リアクトルの用途は以下の通りである。

- (1) 直流電気車用のフィルタリアクトル
- (2) 交流電気車のリアクトル
- (3) 補助電源装置の交流リアクトル
- (4) 直流一直流変換システムの平滑リアクトル

各項でそれぞれの車載リアクトルの役割を示す。

### 2.2.1 直流電気車用のフィルタリアクトル

もともとフィルタリアクトルは、交流電気車のサイリスタ位相制御車の点弧の際に、き電線近傍に発生する高調波を含む磁界で通信線に電圧が誘起されることで起こる誘導障害を抑制するために搭載されるリアクトルを示していた。当初はC-Rフィルタを用いており、フィルタ能力強化のためにコンデンサの大容量化が検討されていたが、大型重量化する割には所望の効果が得られないことからリアクトルを搭載することとなった<sup>2)</sup>。そのため、当時のフィルタリアクトルの役割は現在のフィルタリアクトルとは異なっていた。現在のフィルタリアクトルの搭載はチョッパ制御車の登場から始まる。

現在の主回路にパワー半導体を有する直流電気車に必ず搭載されるリアクトルはフィルタリアクトルである。一般的にはフィルタリアクトルは主回路用と補助回路用それぞれに存在し、前者は空芯リアクトル、後者は鉄芯リアクトルが用いられる。補助回路用は100A程度の電流値で済む一方、直流主回路用は最大で1000A以上の電流となるのに加えて、事故時の大電流に対しても大きなインダクタンスを保持しなければならないためである。フィルタリアクトルの主な役割は以下の通りである<sup>3)</sup>。

- ・架線から車両、車両から架線に流れる高調波電流抑制。
- ・離線等電源電圧が急変した時の外乱抑制。
  - (a) 集電装置の再着線時に車載のフィルタコンデンサに大きな充電電流が流入することを防ぎ、瞬時の過電流継電器の誤動作を防ぐ。
  - (b) 電圧急変時のパルスノイズにより生ずる静電誘導による電波障害を避ける。
- ・車両起動時の架線側に対する突流抑制。
- ・変電所との保護協調。

変電所との保護協調については4章で後述する。

### 2.2.2 交流電気車のリアクトル

ダイオード整流が交流一直流変換の主流であった頃の脈流対策は、変圧器で降圧して整流した後に、リアクトルにより平滑化されていた。整流方式がPWMコンバータとなってからは、変圧器の2次側と主整流器間にリア

クトルを介するようになった。位置だけではなく、役割も異なり、前者は高い周波数の通過を阻止することにより整流の役割を果たすのに対し、後者は昇圧の役割を果たしており、昇圧チョッパの持流リアクトルと同じ働きをする。近年、この昇圧の働きをするリアクトルは主変圧器の漏れインダクタンスで代用されるため、機器小型化および軽量化の目的で省略されることが多い。

### 2.2.3 補助電源装置の交流リアクトル

鉄道車両の空調、照明など補器類の電源を賄う装置である補助電源装置として、静止インバータ(SIV)が車載されている。直流電気車では入力電圧の直流1500Vから三相交流440V(50Hzまたは60Hz)を生成した後、電動空気圧縮機(制動用、空気バネ用、旅客扉用)、空調装置・暖房装置、照明、制御電源などを賄っている。三相交流を生成後に、トランスによる降圧および絶縁を確保した後、さらに脈流率を下げるために平滑用の交流リアクトルが設置されている。実際の車両ではこの平滑用交流リアクトルと補助回路用フィルタリアクトルが一体化して艤装されている。SIV用トランスも一体となって艤装されている車両もある。

### 2.2.4 直流一直流変換システムの平滑リアクトル

原理上変圧器は直流の変圧が不可能であり、鉄道車両の用途では半導体素子によるスイッチングと磁気素子による平滑化により変圧が実施される。

1970年以降の電機子チョッパ制御では主電動機の電圧を制御するために直流一直流変換システム(チョッパ)が採用され、電流平滑化のための平滑リアクトルが搭載された。電機子チョッパが採用された頃は半導体価格が高価であったため、使用素子数を最小限とするために電流は一方向のみとなる回路構成であった。半導体素子も自己消弧型ではなく、転流を回路全体で行わざるを得なかった。また、力行/回生の切換えは機械的な接触器で行うPB転換構成であった。1991年にはパワー半導体素子の耐圧等の制限に対応するため、降圧用に直流一直流変換システムが採用された事例がある。この直流一直流変換システムは双方向に対応しており、自己消弧可能な半導体素子による上下アームで構成された基本的なレグ構成の回路に相当する<sup>4)</sup>。2010年代には蓄電媒体の発達による車載蓄電のための電圧変換および電流調整のために直流一直流変換システムが搭載され、平滑リアクトルが必須となった。車載蓄電のための直流一直流変換システムに用いられているパワー素子は高速点弧が可能な自己消弧型素子であることから、容易に電流可逆が可能な基本的なレグ構成の回路となり、駆動用インバータと同一の構成とすることが可能となった。

直流一直流変換システムの平滑リアクトルに求められる要件も1970～1980年代と現在(2010年代)では異なる。その用途の違いに基づく差異を表1に示す。1970

～1980年代は、回路構成上軽負荷時の電流断続モードを避けて設計する必要があり、平滑リアクトルのインダクタンスの大きさは、事故電流の保護協調のために求められるインダクタンス値よりも軽負荷時における電流断続モードを避けるためのインダクタンス値の方が大きい場合もあった。そのため、通常直流電気の主回路のリアクトルには負荷電流の大きさおよび事故電流の大きさから空芯リアクトルを採用するケースが多いが、電機子チョップ用平滑リアクトルは鉄芯リアクトルを採用して小型軽量化を図った例もあった<sup>3)</sup>。これに対し、車載蓄電のための直流一直流変換は電流可逆とすることで、力行と回生のための切り替え回路を不要とし、スイッチング素子の各上下アームを相補動作させることにより、軽負荷時でも電流は連続となり、断続モードを考慮する必要がなくなった。そのため、空芯リアクトルの場合でもインダクタンスは事故時のみに対応する値でよくなった。

以上、現在使用されている車載リアクトルについて役割を整理した。上記車載リアクトルのうち大容量で、他の車載機器類やき電システムとのインターフェースに関わり、現在でも課題が存在するリアクトルは、主回路用として使用される2.2.1項の直流電気車用フィルタリアクトル及び2.2.4項の直流一直流変換システムの平滑リアクトルである。特徴の比較を表2に示す。

### 3. 車載リアクトルに起因する問題と求められる要件

本章では主回路用車載リアクトルに必要な要件を整理する。車載リアクトルに起因し、設計時に意図せず他装置に影響を及ぼしうる問題として、漏洩磁束、共振が挙げられる。それぞれの課題と車両側で行った対策の経緯について記載する。

#### 3.1 漏洩磁束

4章で詳述する地上設備との保護協調の観点や、主回路の負荷電流の大きさから、一般的に主回路用リアクトルは空芯リアクトルが標準的に使用されている。一部でオープンコア型が使用されている例もあるが、磁路に空間を使用していることは主回路用の車載リアクトル固有の状況といえる。そのため、車載リアクトルから生じる磁界が他の車載機器や地上設備などに悪影響を及ぼさないことが求められている。また、車内に鎖交する磁界についても配慮しなくてはならない。

##### 3.1.1 レール磁化とリアクトルの向き

2.2.2項で示した通り、過去の交流電気車は、整流器の後段に平滑リアクトルを搭載していた。このリアクトルはオープンコア型が主流であり、磁路に空間を用いる。

表1 直流一直流変換システムにおける用途の違い

	(1) 1970年代～1980年代	(2) 現在
用途	直流電動機制御	直流電圧変換
半導体構成	半導体単体による最小限が基本*	上下アームセットが基本
転流	回路全体で実施	半導体による自己消弧
力行・回生の回路切換	接触器 (PB 転換)	半導体による電流可逆
電圧変換比	不定 (0付近から1付近まで)	固定が基本
設計上の留意点	軽負荷時の電流不連続モード (DCM) を避ける	地上設備との保護協調

\*スイッチング素子は回路の負側に配置

表2 フィルタリアクトルと平滑リアクトルの特徴

種類	フィルタリアクトル	平滑リアクトル
搭載車両	パワー半導体で駆動する車両	蓄電媒体を搭載した車両
用途	高調波阻止・保護協調	直流電圧変換
周波数	幅広い帯域	特定 (チョップ周波数)

かつてはこれによる問題事例があった。平滑リアクトルにより発生する磁界のため、レールが磁化する事象が生じ<sup>5)</sup>、交流電気機関車 ED75 の走行する路線では本事象が顕著であった。当時の調査によると、該当機関車が多数回通過することによるレール磁化のため、制輪子などの飛散鉄片を吸着して軌道回路の絶縁継目を短絡するに至り、信号が赤のまま変わらない事象が生じた。なお、ED75の主平滑リアクトルは型式:IC23, 10mH (540A) のオープンコア型であった<sup>2)</sup>。この対策として、同形式の半数の車両について、リアクトルの極性を反転させる対策がなされた<sup>6)</sup>。

また、インバータ制御が採用され始めた頃は、フィルタリアクトルの磁路の方向が車両により、垂直方向、レール方向、枕木方向と様々であった。3.1.2項に示す車内磁界の問題もあり、現在ではレール方向または枕木方向に配置することが一般的である。

##### 3.1.2 車内への漏洩磁束の対策

漏洩磁束による、車内磁界への影響も考慮すべき要件である。インバータ制御が普及した1990年代に研究がなされており、実際に測定されている<sup>7)</sup>。

漏洩磁束が包含される車内磁界の国際規格として、ICNIRP (国際非電離放射線防護委員会: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) による「時間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドライン (1Hz から 100kHz まで)」が存在し、

2010年に改訂されている。日本国内では電磁波の人体に対する影響を確保すべく定められた指針として「電波防護指針」が存在する。本指針は1985年頃から旧郵政省（現総務省）で高周波電磁界（電波）に対する防護指針として検討が開始され、1990年に制定された。「電波防護指針」は2010年に改訂されたICNIRPのガイドラインと整合するよう電波法施行規則の改定も含めて手続きが進められ、2017年9月25日より施行となった<sup>8)</sup>。この手続きによりICNIRPのガイドラインが遵守すべき強制規格となった。本ガイドラインと比較すると車内への漏洩磁束は十分低い値となっているが、心臓ペースメーカーへの影響も考慮しなくてはならない。心臓ペースメーカーは直流1mT以下で誤動作しないよう定められているため、国内では床面での漏洩磁束を1mT以下とすることが目安となる<sup>9)</sup>。

日本国内における車内磁界対策として、車内に磁束が透過しないようフィルタリアクトル直上にシールド板を設置している。1991年頃に製造されたインバータ車両から対策がなされており、9～25mmのシールド用鉄板を取り付けている<sup>10) 11)</sup>。シールド板の搭載は冷却方式の変遷に伴って必要になったともいうことができる。インバータ車が登場した頃のフィルタリアクトルの冷却方式はブロワーを用いた強制風冷が主流であった。ブロワー外板がシールドの役割を兼ねていたため、当初はシールド板を必要としていなかった。その後、自然風冷方式が主流となり、ブロワーが省略されてシールド板が必要となった。したがって、この変遷は強制風冷から自然風冷へと移行した1990年前半と重なる。現在では、フィルタリアクトルとシールド板がセットで搭載されることが標準となり、シールド板が小型軽量化を阻害する要因の一つとなっている。

### 3.2 共振への対策と具体的数値

鉄道車両はき電システムや信号設備に対する適合性が求められる。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の影響も考慮する必要がある。

電機子チョップ制御車の試験が実施された1967年に、国鉄技研がき電システムへの影響を調査するため、車両のフィルタ定数を変えた試験を実施した<sup>12)</sup>。この際に低周波共振（10～30Hz）が観測されている。低周波共振については、帝都高速度交通営団（現：東京地下鉄）のチョップ制御車が国鉄線に乗り入れる際にも試験が実施されている<sup>13)</sup>。これらの検討を元にフィルタリアクトルのインダクタンス値やフィルタコンデンサのキャパシタンス値が決定された。具体的数値は4.2.2項に示す。欧州では車両とき電システムの協調を定めたEN規格であるEN 50388において、共振周波数を以下の通り指定し

ており、この値から外れる場合は地上設備管理者に相談する旨定めている<sup>14)</sup>。本規格は欧州域内の相互直通のための技術仕様である車両のTSIから参照されているため、実質的な強制規格である。

- ・チョップ制御車 : 20～40Hz
- ・チョップインバータ車 : 20～30Hz
- ・インバータ車 : 10～30Hz

共振周波数の具体的数値として、国鉄207系900番代電車の例を挙げる。国鉄207系900番代電車のフィルタリアクトルのインダクタンスは10mH、フィルタコンデンサのキャパシタンスは7600μFである<sup>15)</sup>。したがって、共振周波数は18.25Hzである。これは前述のEN 50388に定められた範囲内である。

## 4. フィルタリアクトルと保護協調の関係

フィルタリアクトルとして求められる役割の一つが、地上設備との保護協調である。本章ではフィルタリアクトルと保護協調の関係について記載する。

### 4.1 保護協調について

電力系統において保護協調を確立するために以下の要件を満たすように考慮されている。

- ・電力系統のどこで故障が発生しても確実に保護するため、要所に保護継電器を設ける。
- ・保護区間をラップさせ無保護区間をつくらないようにする。
- ・故障区間を限定して遮断し、停電区間を最小にするため、継電器を動作時限させること、あるいは別地点の継電器を動作させないようにする。

鉄道のき電システムにおける車両の位置づけは、最下位（負荷側）にある。つまり、車両で短絡等が発生した場合には最も早く車両側で保護が動作しなければならない。すなわち、以下の要件が求められる。

- (1) き電システムを段階的な保護範囲に区分し、下位系統ほど早く保護できるよう連携する。
- (2) 車両で短絡等の故障が発生した場合は、まず車両で保護を試み、不可能な場合にはき電システムで確実に保護する。
- (3) 車両とき電システムで保護区間をラップさせ無保護区間を作らないようにする。
- (4) 停電区間を最小にするため、地上や他車など故障区間外の保護動作させないようにする。

この具体例を示したものが図1であり、車両で短絡などの故障があった場合、保護動作はなるべく自車内で完結することが求められる。車両設計の際は本要件を満たすよう、車載遮断器の仕様およびフィルタリアクトルの定数が決定される。保護協調の実態については、

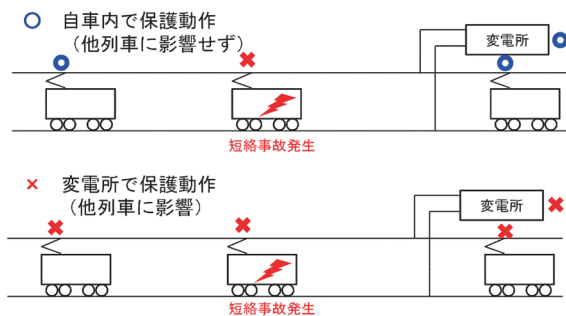


図1 車両と変電所の保護協調

車両の制御方式が多岐に渡った 1990 年代に調査されている<sup>16)</sup>。

## 4.2 保護協調に関する過去の経緯とフィルタリアクトル

### 4.2.1 保護協調と遮断器

保護協調を考えるにあたり、地上・車上を問わず、遮断器の性能の検討が不可欠である。抵抗制御車が中心であった 1970 年までは、保護協調を考える際は遮断器の性能が論点であり、地上、車上を問わず遮断器の性能向上のための検討がなされていた。車載遮断器についても当時の新製車両である 101 系や ED60 用の遮断器 (CB14) の開発時に性能向上が図られた<sup>17)</sup>。車載遮断器として、半導体遮断器や真空遮断器が開発されている。現在では遮断器本体内でアーク処理が可能で保守性に優れたデアイオングリッド遮断器が多く利用されている<sup>18)</sup>。

### 4.2.2 保護協調を確立するためのフィルタリアクトル

保護協調を確立するため、電流の急峻な増加を抑制するリアクトルは不可欠である。地上側にもリアクトルが設けられ、そのインダクタンス値は国内では 1.1mH<sup>19)</sup>、欧州では 2mH である<sup>14)</sup>。EN 50388 にはこの数値と合わせて変電所の遮断条件も明示されている。

車両側のフィルタ定数も欧州では EN 50388 にインピーダンス値として、50Hz において 0.3Ω を超えることが定められる。日本では具体的数値は強制されていない。電機子チョップ制御車の開発にあたって国鉄技研や帝都高速度交通営団 (現：東京地下鉄) がフィルタ定数について、使用する素子も含めて検討した<sup>12) 20)</sup>。その結果、営団地下鉄 6000 系は以下の理由によりフィルタリアクトルのインダクタンス値は 8mH、フィルタコンデンサのキャパシタンスは 3200μF となった<sup>21)</sup>。

- ・主電動機の内部インダクタンスである 4mH より大きいこと。
- ・共振周波数が 50Hz 以下であること。
- ・負荷遮断時に発生する過電圧がサイリスタの耐圧 (1300V × 4/1.1 = 4730V) 以下となること。

営業用に投入された電機子チョップ制御車の回路定数値の一例を表 3 に示す<sup>3)</sup>。

インバータ車が実用化されてからのフィルタリアクトルのインダクタンス値の変遷について示す。インバータ車の実用化の際には 12mH で検討されていたが<sup>22)</sup>、現在は 8mH 前後が標準である。地方用の車両では 20mH 前後が主である。この値については地上設備との関係によるものと推察できる。近年新製された車両におけるフィルタリアクトルのインダクタンス値の例を表 4 に示す。リアクトルの巻線に使用される材質は銅またはアルミニウムが一般的である。軽量化のためにはアルミニウムが採用され<sup>23) 26) 28)</sup>、高効率化のためには銅が採用される<sup>29)</sup>。両者の材質による比較事例もある<sup>23)</sup>。

表3 電機子チョップ制御車の回路定数値

会社・形式	リアクトル		フィルタ コンデンサ	登場 年
	フィルタ	平滑		
営団 6000	8mH	5.5 / 8mH <sup>※1)</sup>	3200μF	1968
国鉄 201	5mH	5mH	3200μF	1982
東京都 10-000	8mH	8mH	3200μF	1971
神戸市 1000	8mH	8mH <sup>※2)</sup>	3200μF	1976
名古屋市 3000	5mH	8.8mH <sup>※2)</sup>	3200μF	1977

※1 メーカーによる。結合有：5.5mH、結合無：8mH。 ※2 結合有。

表4 フィルタリアクトルのインダクタンス値

会社	形式	インダクタンス	走行線区	登場年
京成	3000 <sup>23)</sup>	8mH	都市	2002
JR 西日本	125 <sup>24)</sup>	23mH	地方	2002
JR 東日本	E129 <sup>25)</sup>	24mH	地方	2014
JR 東日本	E235 <sup>26)</sup>	8mH	都市	2015
JR 四国	8600 <sup>27)</sup>	23mH	地方	2014
相鉄	20000 <sup>28)</sup>	8mH	都市	2017
京王	5000 <sup>29)</sup>	8mH	都市	2017

## 5. まとめ

車載リアクトルは、リアクトル単体だけでなく、列車として考慮すべき要件も考慮すべき事柄が存在する。そのため本報告では車載リアクトルの用途や求められる要件と定数決定の経緯を調査した。調査および整理により得られた概要は以下の通りである。

- ・現在使用されている車載リアクトルの用途を整理した。大容量で他システムへの影響を考慮すべきリアクトルとして主回路用に使用されるフィルタリアクトルと車載蓄電などに必要な直流電圧変換のための平滑リアクトルが存在する。

- ・設計時に意図せず車載リアクトルから他装置に影響を及ぼしうる問題は漏洩磁束、共振である。
- ・主回路にパワー半導体を有する直流電気車に必ず搭載されているフィルタリアクトルにはき電システムとの保護協調が求められる。
- ・直流電気車におけるフィルタリアクトルのインダクタンス値などの変遷を整理した。チョップ制御車では5～8mHが標準であった。近年登場した都市圏用車両は8mHが標準、地方用車両は20mH前後が標準である。

本報告が今後の車載リアクトル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) 今岡淳, 今井慎, 松盛裕明, 笹谷卓也, 関屋大雄, 佐藤祐樹, 岩城聡明, 長井真一郎, 清水敏久: パワーコンバータに用いられるインダクタ最新技術動向, 2019年電気学会 産業応用部門大会講演論文集, No1-S1-2, pp.529-530, 2019
- 2) 日本国有鉄道車両設計事務所: 車両用静止誘導機器, 1970
- 3) 電気学会: チョップ制御ハンドブック, 1976
- 4) 香本芳正・増田富士雄・小川彰夫: JR 西日本 207 系通勤形直流電車 (片福連絡線用), 車両技術 No.194, pp.32-46, 1991
- 5) 板倉栄治・宮入宮人・森田豊治: レール磁化障害に対する検討, 鉄道技術研究資料 Vol.25, No.8, pp.22-23, 1968
- 6) 川添雄司: 日本海縦貫線用 ED757 形式交流電気機関車, 車両技術 No.119, pp.3-14, 1972
- 7) 水間毅・天野武一・戸田幸生・河本博: 直流電気鉄道車両における漏洩磁界とその遮蔽対策, 電気学会論文誌 D, Vol.116, No.9, pp.970-977, 1996
- 8) 総務省: 電波法施行規則の一部を改正する省令 (平成 29 年総務省令第 65 号), 2017
- 9) 電気学会・電気鉄道の電磁環境に関する共同研究委員会: 鉄道と EMC, 2008
- 10) 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
- 11) 黒川悦伸: 営団地下鉄 7 号線用 9000 系車両, 車両技術 No.194, pp.100-119, 1991
- 12) 藤村敏郎・諏訪部国平・古沢二郎・島田一郎: サイリスタチョップ制御直流電車試験一直流き電回路保護装置に及ぼす影響一, 鉄道技術研究所速報, Vol.67, No.149, 1967
- 13) 藤村敏郎・本多精一: サイリスタチョップ制御車の電力設備への影響一営団地下鉄相互乗入れに伴うもの一, 鉄道技術研究所速報, Vol.72, No.79, 1972
- 14) EN 50388: "Railway applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply(substation)and rolling stock to achieve interoperability," 2012.
- 15) 前川義雄・江本隆・山本城二・山口芳廣・長谷部寿郎: VVVF インバータ制御 207 系通勤形直流電車, 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 23, 1986
- 16) 電気学会直流電気鉄道における保護技術調査専門委員会: 直流電気鉄道における保護および保護協調に関する調査, 電気学会技術報告 No.542, 1995
- 17) 島田一郎・広瀬健吾・府川有治: ED-60 型電気機関車用高速度遮断器遮断試験報告書, 鉄道技術研究所速報, Vol.59, No. 4, 1959
- 18) 電気学会交通・電気鉄道技術委員会: 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 No.1227, 2011
- 19) 日本国有鉄道: JRS 31735-2E-14AR1A 電力ロ波器 (直流 1500V 用), 1971
- 20) 刈田威彦・櫛引敬寿: 再生ブレーキ付き直流チョップ制御電車の開発経緯と使用実績, 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 9, 1972
- 21) 刈田威彦: 営団 (現・東京メトロ) におけるチョップ制御電車開発の想いで (2), 鉄道車両と技術 No.247, pp.39-44, 2017
- 22) 太田幹雄・加賀敦・小尾秀夫: 三菱電機における車両用 VVVF インバータ開発の道のり, 鉄道車両と技術 No.127, pp.20-30, 2006
- 23) 藤本和樹: 京成電鉄株式会社 3000 形電車への高効率プロパルジョンシステムの適用, 東洋電機技報 No.139, pp.20-24, 2019
- 24) 星吉輝・松本哲也・平井宏: 西日本旅客鉄道 (株) 125 系車両制御装置, 東洋電機技報 No.109, pp.29-36, 2003
- 25) 東洋電機製造株式会社: 東日本旅客鉄道株式会社 E129 系一般形直流電車用電機品, 東洋電機技報 No.131, pp.27-31, 2015
- 26) 西宮幸希夫・白沢佑樹・前田芳宏・小泉聡志・渡邊浩司・加藤洋子: JR 東日本 E235 系量産先行車用電機品の概要一最新技術を適用した主回路装置と補助電源装置一, 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 53, 2016
- 27) 東洋電機製造株式会社: 四国旅客鉄道株式会社 8600 系特急形直流電車用電機品, 東洋電機技報 No.130, pp.22-25, 2014
- 28) 関根雅人・蜂谷良一・伴拓馬・植木直治・鈴木啓史: 相模鉄道 20000 系直流電車, 車両技術 No.255, pp.84-118, 2018
- 29) 八木秀憲・小川和俊: 日立製作所 京王 5000 系の電機品をめぐって, 鉄道車両と技術 No.256, pp.7-10, 2018