

電気車と電力設備の協調に関する関連規格と要件

仲村 孝行* 赤木 雅陽** 廿日出 悟*

Relevant Standards and Requirements of Coordination between Electric Railcars and Power Supply Systems

Takayuki NAKAMURA Masataka AKAGI Satoru HATSUKADE

Coordination between electric railcars and power supply systems is essential to introduce new technical elements in onboard power conversion systems. The standard on the coordination is established in Europe, whereas there are no documents to rely upon in Japan. The European standard, which operates as a mandatory standard concretely designates technical specific values. Therefore, understanding the standard is essential of performing business abroad. The standard is also useful for performing business in Japan, in situations such as determination and assessment for new technical elements. Considering these circumstances, this paper explains the requirements regarding the coordination to be also useful for business in Japan.

キーワード：車両設計，電気車，き電システム，規格，標準電圧

1. はじめに

新形式車両の製作や車載電機品（主回路制御装置，補助電源装置）の更新など，これらの電機品に新規要素を導入する場合，既存の信号システムやき電システムに対する適合性評価が必要となる。このためには，人的，時間的，金銭的なコストを必要とする現車での確認を要する項目もあり，鉄道事業者や電機品製造事業者の負担となる。

日本国内においてこの評価時に拠るべき基準は「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」（以下，「技術基準省令」と表記）であり，鉄道事業者として遵守すべき強制力を有する。車載電機品のうち，走行用機器に相当する動力発生装置については，技術基準省令第68条第2項第2号において，「誘導作用による障害を鉄道事業の用に供する他の電気回路の電気設備に及ぼすおそれのないものであること」と定められている。第68条の解釈基準の解説（解説は強制力を有さない）では信号システムに対して考慮すべき周波数が例示されている¹⁾。一方，き電システムに対して考慮すべき要件は文献1では定量的に定められていない。電力設備側の観点で，技術基準省令第41条第5項の解説で適正な運行を確保するための電圧範囲が例示されているのみである²⁾。車載電機品に関する国家規格（JIS規格）の多くは，当該製品に関して発注者と製造事業者が協議すべき事柄を定めた製品規格であり，法的強制力のない任意規格に相当する。このためき電システムに対して考慮すべき要件について拠るべき具体的な仕様を定めた国内基準や規格はなく，

各鉄道事業者にて所要の要件を規定することが求められる状況にある。

一方欧州では，欧州域内での相互直通運用を実現するための強制力を持つ技術仕様としてTSI（Technical Specifications for Interoperability：相互直通運用のための技術仕様）が定められており³⁾，電気車と電力設備の協調に関する詳細仕様は欧州の地域規格であるEN 50388を参照している。EN規格は強制力を有さない任意規格であるが，強制力を有するTSIから参照されたEN 50388の条項は強制力を有する。そのため，欧州に車載電機品を納入する製造事業者にとって，EN規格に定められた電気車と電力設備の協調の要件の理解は必須となる。また，EN規格に定められた要件を理解することで，間接的に国内業務における車両設計や適合性評価の業務効率化の一助となることが期待されるが，対応するJIS規格や解説となる文献は現在存在しない⁴⁾。サプライチェーンの国際化の観点及び，WTO政府調達協定における安全注釈の撤廃（2020年2月発効）を踏まえ，日本国内においても車載電機品と電力設備の協調に関する仕様の明示化が今後は求められるであろう⁵⁾。そこで，日本国内における車載電機品への新規要素導入時における業務効率化に資するよう電気車と電力設備の協調に関する規格および求められる要件を概説する。

2. 関連規格および標準電圧値

電気車と電力設備の協調に関する具体的要件に先立ち，関連規格および標準となる電圧値について整理する。

2.1 国際規格，国家規格および地域規格

本解説で扱う規格類はIEC規格，EN規格，JIS規格

* 車両技術研究部 駆動システム研究室

** 電力技術研究部 き電研究室

であり、基本的には法的強制力を有さない任意規格である。IEC規格は国際規格、EN規格は欧州の地域規格、およびJIS規格は日本の国家規格である。EN規格は任意規格であるが、TSIから参照されたEN規格は強制力を有する。これは日本において技術基準省令がJIS規格を参照することで、JIS規格において規定された事柄が強制力を有することに相当する。日本では国家規格であるJIS規格が、国際規格であるIEC規格から逸脱する事態にならないよう、IEC規格に整合させる動きが進んでいる。

2.2 車載電機品に共通する規格と動向

車載電機品に共通する国際規格（IEC規格）と地域規格（EN規格）、国家規格（JIS規格）の対応を表1に示す^{6)~14)}。本報告の中心となる規格である電気車と電力設備の協調に関する規格の概要などは次章で詳述するため、本項ではIEC規格とEN規格の対応にとどめる。以下、各節で関連規格の概要と動向などを概説する。

2.2.1 標準電圧

標準電圧および電圧の範囲はIEC 60850に定められている。本規格で定義された電圧は電気車と電力設備の協調に関する規格でも使用されている。本規格に対応するJIS規格は存在しないが、JIS E 5004-1ではIEC 60850を参照している。また、技術基準省令第41条第5項の解釈基準および解説に、電車線の標準電圧と最高電圧・最低電圧が例示されている²⁾。具体的数値は2.3節で挙げる。

2.2.2 絶縁協調

車載電機品が具備すべき絶縁耐圧や試験電圧について定めた規格として、絶縁協調に関する規格が存在する。過電圧カテゴリーや汚損度に応じて最小空間距離および最小沿面距離の決定法が定められており、文献15で詳細な解説が示されている。絶縁協調に関する要件は1999年に制定されたIEC 60077-1において定められて

表1 国際規格と、地域規格および国家規格の対応

	国際規格 (IEC)	地域規格 (EN)	国家規格 (JIS)
標準電圧	IEC 60850 (2014)	EN 50163 (2004)	-
絶縁協調	IEC 62497-1 (2010)	EN 50124-1 (2017)	-
車載電機品 の一般規則	IEC 60077-1 (2017)	EN 60077-1 (2017)	JIS E 5004-1 (2022)
電気車と 電力設備の協調	IEC 62313 (2009)	EN 50388-1 (2022)	-

※ 括弧は最新版の発行年

いた。その後、2001年に絶縁協調に関する要件を独立させた欧州規格としてEN 50124-1が発行され、2010年に当該規格を基礎とするIEC 62497-1が発行された。IEC化に際して議論となった事柄などは文献16に示されている。EN 50124-1は2017年に改訂され、現時点において追補の作業が2023年終了を目途に行われている。この後にIEC 62497-1の改訂が提案される可能性があるため、今後の動向を注視する必要がある。

2.2.3 車載電機品の一般使用条件および一般規則

一般的に車載電機品の仕様として定めるべき用語、使用条件、試験等をまとめた規格がIEC 60077-1である。最新版のIEC 60077-1は2017年版であり、IEC 62497-1に整合させるように改訂された。IEC 60077-1に対応するJIS規格がJIS E 5004-1である。JIS E 5004-1はIEC 60077-1と同様にIEC 62497-1にも整合させるように2022年に改訂された。

2.3 国際規格で定められた標準電圧値

IEC 60850に定められている電圧値の具体的な数値および定義を本節で示す。IEC 60850で定められた定義や数値は電気車と電力設備の協調の規格を含む他の規格でも使用される。

電圧値 U の定義は表2の通りであり、以下のような要求事項がある。

- ・電圧値 U が U_{min2} と U_{min1} の間の状態が2分を超えてはならない。
- ・電圧値 U が U_{max1} と U_{max2} の間の状態が5分を超えてはならない。
- ・変電所での電圧は無負荷状態で U_{max1} 以下でなくてはならない（直流き電は U_{max2} まで許容可能）。
- ・通常時の電圧は $U_{min1} \leq U \leq U_{max2}$ とする。
- ・異常時においても電圧が $U_{min2} \leq U \leq U_{min1}$ の範囲では損傷や機能不全などの影響を及ぼしてはならない。
- ・ $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ に達したら、 U_{max1} 以下になるようにしなければならない。 $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ は一時的な現象（例：回生制動時、タップ切換による電圧補償）に限り許容される。
- ・ U_{min2} でも車両は動作可能であること。（車両の低電圧検知に関する保護整定値は U_{min2} の85%~95%に設定すべきである。）

表2で示された各電圧種別に対する具体的な数値の一例を表3に示す。国際標準となる数値はIEC 60850の4章で定められており、各国固有の数値は附属書Bに定められている。日本固有の数値も附属書Bに定められている。そのため、IEC 60850の改訂時には本文のみならず、附属書Bの扱いについても留意する必要がある。なお、この附属書BはNormative（規定）の扱いである。

表2 国際規格における電圧の名称

	名称 (英)	名称 (日)
U_n	Nominal voltage	公称電圧
U_{max1}	Highest permanent voltage	連続最高電圧
U_{max2}	Highest non-permanent voltage	短時間最高電圧
U_{min1}	Lowest permanent voltage	連続最低電圧
U_{min2}	Lowest non-permanent voltage	短時間最低電圧

3. 電気車と電力設備の協調に関する規格

3.1 電気車と電力設備の協調に関する規格の概要と動向

電気車と電力設備の協調に関する要件を定めた国際規格は表1に示した通り IEC 62313 であり、対応する JIS 規格などの国内規格は存在しない。IEC 62313 の原案となった EN 50388 は 2005 年に初版が発行され、2009 年に IEC 化された。IEC 化の際には切替セクション方式に代表される日本の実情などに関する修正提案の審議結果を反映した。その後、EN 50388 は 2012 年に改訂版が発行された (TSI は 2012 年版 EN 50388 を参照)。その後も改訂作業が継続していたが、2012 年版から技術要件を大幅に見直し数値規定が増加した 2022 年版が発行された。なお今回 EN 50388-1 とパート番号が付与されたのは、EN 50388:2012 の 10 章に定められた高調波及び動的影響に関する条項を EN 50388-2 として分離させることを見越した対応であると予想される。EN 50388-1 の発行により、2009 年以来改訂されていない IEC 62313 の改訂を提案される可能性がある。IEC 改訂時に日本の実情を国際規格に反映できるよう、内容の理解や準備を進める必要がある。その準備の一例として、例えば鉄道事業者において次節で定められた要件について、具体的数値を含めて精査したり、仕様書指定の準備をしたりすることは、車載電機品調達の観点と国際規格審議の両者の観点から有用であろう。

表3 IEC 60850 に定められた標準電圧

U_{min2}	U_{min1}	U_n	U_{max1}	U_{max2}
(DC 360V)	(DC 360V)	(DC 600V)	(DC 720V)	(DC 800V)
DC 500V (DC 450V)	DC 500V (DC 450V)	DC 750V	DC 900V	DC 1000V
DC 1000V (DC 900V)	DC 1000V (DC 900V)	DC 1500V	DC 1800V	DC 1950V
(AC 16kV)	(AC 16kV)	(AC 20kV)	(AC 22kV)	(AC 24kV)
AC 17.5kV (AC 20kV)	AC 19kV (AC 22.5kV)	AC 25kV	AC 27.5kV (AC 30kV)	AC 29kV (AC 32kV)

※ 括弧は附属書 B に記載された日本における数値

3.2 電気車と電力設備の協調に関する規格で定められた要件

本節では、現在も欧州域内で強制力を有している 2012 年版の EN 50388 に定められた事柄を中心に記載する¹⁷⁾。IEC 62313 および 2022 年版 EN 50388-1 で変更になった事柄は適宜付記する。特に、車両の TSI において電気車に対して強制力を有する要件として参照されている条項は表4の通りである。

3.2.1 力率 (交流電気車)

EN 50388 で定められた力率は誘導性力率と容量性力率に条項が分離されている。誘導性力率では有効電力量および無効電力量で定義された力率が必要となり、この値が 0.95 以上であることを定めている。なお、工場や留置時など補機類のみの動作で 200kW を超えて集電する場合の力率は 0.8 以上であることが定められている。容量性力率に対しては、フェランチ効果防止の観点で $U_{max1} \leq U \leq U_{max2}$ においてコンデンサの働きをしてはならない旨定められている。

2022 年版の EN 50388-1 では構成が大幅に変更されている。変位力率が 0.95 以上であること、公称電圧における最大出力の 3% の無効電力が許容されることが定められている。さらに無効電力量の具体的数値が導入され、「25kV 50Hz き電システムにおいて架線電圧が U_{max1} を超える場合に無効電力量 190kvar を超えてはならない」旨定められている。190kvar については、駆動ユニット (traction unit: パンタグラフから主電動機までの駆動用機器一式。日本における MM² ユニットとほぼ同義) の値であり、列車の状態などについては特に指定されていない。数値規定の目的としては、前述のフェランチ効果防止の観点で設けられたものと想定される。IEC 化に際しては具体的数値の扱いが論点となるであろう。その他、駆動時 (0.95 以上)、静止時 (0.8 まで低下してよい) など個々の状況に応じた数値が定められた。

日本で現在製造される交流電気車は PWM 整流器により力率 1 制御が行われているため、問題ないものと考えられる。ただし、パンタ点での力率 1 制御を求められる場合は、扱いに注意を要する。日本では計器用変圧器を搭載していない車両も存在するためである。計器用変

表4 EN 50388 (2012 年版) に定められた要件と条項

強制力を有する要件	要件の条項	適合性評価の条項
力率 (交流電気車)	6 (6)	15.2 (14.2)
力行絞り込み制御	7.2 (7.2)	15.3 (14.3)
高調波及び動的影響	10 (10)	15.5 (14.5)
保護協調	11 (11)	15.6 (14.6)
回生制動	12 (12)	15.7 (14.7)

※ 括弧は IEC 62313 における条項

圧器を搭載しない交流電気車は、主変圧器の3次巻線における電圧値を用いてPWM整流器の制御をおこなっているため、パンタ点における厳密な力率管理が難しくなるものと想定される。欧州では車両のTSI条項4.2.8.2.2で実測の架線電圧が確認可能なように定められているため³⁾、計器用変圧器を前提とした議論となる可能性がある。

3.2.2 力行絞り込み制御

EN 50388 の7章では主回路電流の制限について定められており、低電圧時に集電電流を絞り込み制御するよう定められている。絞り込み特性はき電システムに対して一意であり、絞り込み開始電圧は U_n の0.9倍 (DC 750V き電システムのみ U_n の0.8倍)、絞り込み停止電圧は U_{min2} 、低電圧検知時の保護整定値は U_{min2} の85%~95%とするよう定められている (図1)。IEC 62313 では絞り込み開始電圧を Informative にする対応がとられている。日本では採用事例として、例えば文献18の事例があるが、その特性はEN 50388の特性とは異なる他、電流での規定とモータートルクでの規定の両方の例が挙げられている。また、架線電圧低下時における運行ダイヤへの影響の懸念から力行絞り込み制御自体を採用しない鉄道事業者もあるものと想定される。

2022年版のEN 50388-1では、集電電流の絞り込み特性だけでなく、集電電力の絞り込み特性も加筆された形で、附属書Fに Normative (規定) の扱いとして定められている。そのため、今後のIEC化に際して附属書Fを Informative (参考) の扱いにするなどの対応が必要であろう。

3.2.3 高調波及び動的影響

EN 50388 では高調波や過渡的な動的影響など、電気車や電力設備の回路定数に起因する意図しない共振などについて、技術の概説がされている。主な現象として、システムの不安定に起因する低周波振動や高調波に起因する過電圧が挙げられる (図2)。具体的な波形はEN 50388の附属書Cに例示されている。この附属書Cは Informative (参考) の扱いである。また、附属書Dで

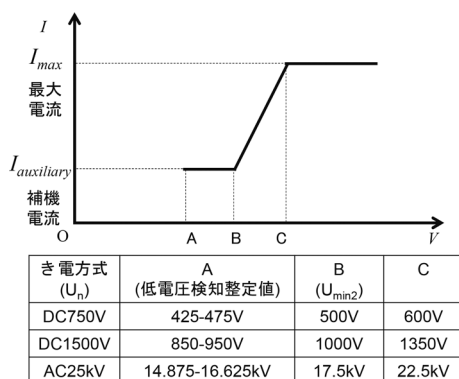


図1 EN 50388 に定められた力行絞り込み特性

は Informative (参考) の扱いであるものの、電力設備や電気車の回路定数が例示されている。本文の10章では技術的な概説だけでなく、新機軸導入時の手続きフローや責任体制についても定められている。また、いかなる状況においても到達してはならないピーク電圧が定められており、その値はDC 750V き電システムで1300V、DC 1500V き電システムで2600V、AC 25kV き電システムで50kVである。この数値は過電圧に関するEN規格であるEN 50124-2で示された数値を切り上げた値である¹⁹⁾。

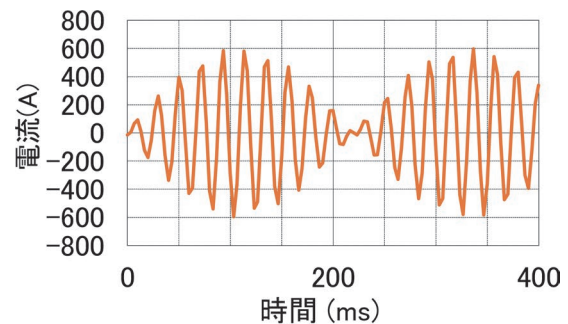
高調波及び動的影響の要件はEN 50388-2として改訂される予定である。

3.2.4 保護協調

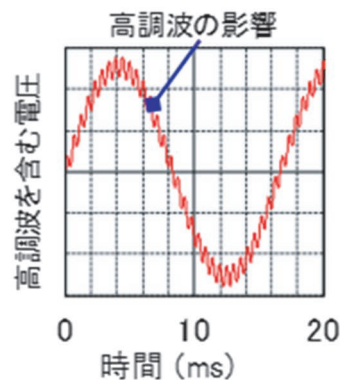
EN 50388 では変電所の遮断条件、電気車の観点から停電時および再加圧検知時における車両側のシーケンス (電力設備の観点から再閉路運動)、突入電流勾配を定めている。

(1) 変電所の遮断条件

EN 50388 では本文で変電所の遮断条件がそれぞれのき電システムに対して具体的に定められている。この表はIEC 62313では附属書Gに Informative (参考) の扱いで定められている。2022年版のEN 50388-1では本文で定められているため、今後のIEC化では現行のIEC 62313と同様に本文の扱いを Informative (参考)



(a) システムの不安定に起因する低周波振動



(b) 高調波に起因する過電圧

図2 高調波および動的影響の具体例

である附属書の扱いにするなどの対応が必要であろう。

- (2) 電気車の観点から停電時および再加圧検知時における車両側のシーケンス（電力設備の観点から再閉路連動）

EN 50388 に定められたシーケンスは以下のようになっている。

- ・変電所の遮断器の自動再閉路は、き電区間内の全列車の車載遮断器が開放された後に行う。
- ・車載遮断器は、架線の停電を検知してから3秒以内に開放する。したがって、変電所の自動再閉路は3秒以上経過後に行われる。
- ・変電所の再閉路後、き電システムに故障が無いか確認するため、車載遮断器は架線の再加圧後3秒以内に投入してはならない。

日本では電気車のシーケンスとして、停電検知時に遮断器動作とせず接触器動作や主回路制御装置のゲート停止とする運用もある。IEC 62313 では遮断器動作有無の観点で場合分けする形をとることで、日本の実態を反映している。2022年版のEN 50388-1では電気車のシーケンスとして遮断器動作のみを想定しているため、IEC化に際しては現行のIEC 62313と同様に遮断器動作有無の観点で場合分けした形の記載形式にするなどの対応が必要になるであろう。

- (3) 突入電流勾配

直流き電システムにおける故障電流の時間勾配について、60A/msに到達したら20ms以内に20A/ms以内に抑制するよう具体的数値で定めている。欧州における直流き電システムの変電所保護装置が電流変化率 (di/dt) で整定するのに対し、国内では電流変化量 (ΔI) で整定する。そのため当時のIEC化においては、変電所保護装置を不要動作させないように突入電流の変化率「またはピーク値」を制限することとした。電流変化率 (di/dt) に関する要件はIEC 62313では附属書HにInformative (参考) の扱いで定められている。2022年版のEN 50388-1では本文で定められているため、今後のIEC化では現行のIEC 62313と同様に本文の扱いをInformative (参考) である附属書の扱いにするなどの対応が必要であろう。

さらに、2022年版のEN 50388-1では交流き電システムにおける保護協調に関する数値規定が加わり、突入電流対策として、車載遮断器再閉路後20ms後から40ms後まで(2周期目に相当)の実効値はAC25kV50Hzき電システムにおいて800A未満である旨が定められた。IEC化に際しては具体的数値自体の扱いが論点となるであろう。本条項では駆動ユニットの値として定められている。規格の性質上、具体的数値について、列車レベルの数値か駆動ユニットレベルの数値かは一つの論点となる。また、交流電気車の突入電流に具体的数値を定め

られることは主変圧器の仕様にも影響することになるため、主変圧器の観点でも具体的数値の精査が必要になる。

3.2.5 回生制動

き電システムで短絡または地絡故障が生じた場合、架線電圧が U_{max2} を超えたとき、または架線での回生エネルギー吸収不可の場合（直流き電システムで回生電力を吸収する他の列車負荷や蓄電装置等が無い状況と想定される）に電力回生を停止するようEN 50388の12章で定められている。日本で実装される回生絞り込み制御に関する要件はない。類似する概念は欧州域内の任意規格であるEN 50641に存在するものの²⁰⁾、「回生絞り込み制御」に相当する用語が国際的には周知されていない可能性がある。日本国内における回生絞り込み制御のパターンは3.2.2項で記載した力行絞り込み制御同様に、鉄道事業者や路線により異なるものと想定される。そのため、回生絞り込み制御の扱いは難しく、長期的な議論が必要になる可能性がある。

2022年版のEN 50388-1では、低電圧時における回生停止条件（架線電圧 U_{min2} 未満、DC 1500Vき電システムは1200V未満）も加筆された。この要件が加筆された経緯、および日本国内において低電圧時に回生停止を行うか否かはIEC化における論点の一つとなるであろう。

4. おわりに

日本国内では国内基準等で具体的な技術仕様が明文化されていない電気車と電力設備の協調に関する要件について、欧州で既に一部が強制力を有する運用が行われているEN 50388を中心に概説した。EN 50388に代表される電気車と電力設備の協調に関する規格の理解は海外向けの業務だけではなく、国内における要求仕様の明示を通じた車載電機品の新規要素導入時の業務効率化にもつながることが期待される。本解説が電気車と電力設備の協調に関する規格の理解、および日本国内における具体的仕様・数値の精査への一助となれば、幸いである。

文献

- 1) 国土交通省鉄道局：解説 鉄道に関する技術基準（車両編）第四版，2022
- 2) 国土交通省鉄道局：解説 鉄道に関する技術基準（電気編）第五版，2022
- 3) European Railway Agency (ERA), "Technical Specification for Interoperability relating to the 'rolling stock - locomotives and passenger rolling stock (TSI ROC&PAS)," 2014.
- 4) 国土交通省 技術基準・規格体系表 <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001493017.xlsx> (参照日：2022年12月26日)
- 5) 石原嘉一：日EU経済連携協定に基づく安全注釈撤廃を機

- に調達業務の改革を, JR Gazette, Vol.78, No.2, pp.59-61,2020
- 6) IEC 60850 Ed. 4.0: "Railway applications - Supply voltages of traction systems," 2014.
 - 7) EN 50163: "Railway applications Supply voltages of traction systems," 2004.
 - 8) IEC 62497 - 1 Ed. 1 . 0 : "Railway applications - Insulation coordination - Part 1: Basic requirements - Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment," 2010.
 - 9) EN 50124-1: "Railway applications -Insulation coordination Part1: Basic requirements -Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment," 2017.
 - 10) IEC 60077-1 Ed. 2.0: "Railway applications Electric equipment for rolling stock Part 1: General service conditions and general rules," 2017.
 - 11) EN 60077-1: "Railway applications - Electric equipment for rolling stock - Part 1: General service conditions and general rules," 2017.
 - 12) JIS E 5004-1 : 鉄道車両—電気品—第 1 部 : 一般使用条件及び一般規則, 2022
 - 13) IEC 62313 Ed. 1 . 0 : "Railway applications - Power supply and rolling stock - Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock," 2009.
 - 14) EN 50388-1: "Railway Applications - Fixed installations and rolling stock - Technical criteria for the coordination between electric traction power supply systems and rolling stock to achieve interoperability - Part 1: General," 2022.
 - 15) 渡邊朝紀 : 国際規格 鉄道の絶縁協調の国際規格 高電圧機器からプリント基板まで絶縁性能を規定する, JREA, Vol.51, No.4, pp.54-56, 2008
 - 16) 松村泰幸 : 国際規格 鉄道の絶縁協調に関する国際規格の制定, JREA, Vol.56, No.7, pp.58-60, 2013
 - 17) 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.
 - 18) 岡健一郎・児玉大輔・深野友紀・小口紀男 : 首都圏直流電化区間の変電所異常時の運転再開方法の見直し, 鉄道と電気技術, Vol.30, No.4, pp.35-41, 2019
 - 19) EN 50124-2: "Railway applications -Insulation coordination Part2: Overvoltages and related protection," 2017.
 - 20) EN 50641 : "Railway applications - Fixed installations - Requirements for the validation of simulation tools used for the design of electric traction power supply systems," 2020.