

交流電車の車体に発生するサージ電圧の要因と低減手法の開発

廿日出 悟*

Development of Method on Reduction of Surge Voltage on AC Railcar's Body

Satoru HATSUKADE

Surge voltage is generated on an AC railcar's body while the train raises its pantograph or its main circuit breaker is switched. The surge voltage expands and vibrates at the end car according to reflection effect of distributed-parameter circuit theory. The extreme surge voltage causes damages and malfunctions of on-board equipment, especially electronic devices such as train signaling system and brake control system. This paper shows mechanism of phenomena of surge generation on an AC railcar's body, experiment results of improvements of ground systems of the AC railcar, and discussion of ideal ground systems for preventing extreme surge voltage.

キーワード：接地，SiC 抵抗器，サージ

1. はじめに

電気鉄道車両の車体には車上機器の帰線電流，遮へい電流，主回路電流などさまざまな電流が流れる。この車体にサージ電圧が発生するのが車体サージである。

車体サージによる被害は同電位であるべき車体と台車との間に数 kV の電位差が発生し，機器，特に車体～台車間を接続する機器が損傷を受けることである。また，サージが地上に流出して地上機器が破損した例¹⁾や隣接番線の車両に搭載されている機器が破損した例もある。

車体サージへの対策は多くの場合，被害機器への対策²⁾にとどまっているが，本論文では車体サージそのものを減らすことを主な目的として，車体サージの発生要因とその低減手法について述べる。

2. 車体サージの要因

車体サージの被害調査から以下のことが経験的にわかっている。

- 1) パンタグラフ上昇時に発生することが多い
(セクション通過時にも発生する)
- 2) 交流電車に多い (主に新幹線)
- 3) 先頭車の機器が被害を受けることが多い

1)の時に動作している機器は低圧補助回路機器やパンタグラフ操作にかかわる機器のみである。よって特別高圧回路のうちパンタグラフ～主変圧器までの回路を車体

サージの発生要因箇所として考慮すべきであるといえる。

さらに2)から要因として，交流電車の電車線電圧が高いこと，直流電車にはない特別高圧ケーブル (特高ケーブル) を使用していることが挙げられる。

3)についてはサージの反射現象が考えられ，これに関連する事項として車両の接地方式が要因として挙げられる。

以下，特別高圧回路と接地回路それぞれの車体サージの要因について述べる。

2.1 特別高圧回路における車体サージの発生要因

車体サージに関係する高圧回路はパンタグラフと主遮断器 (最近はほとんど真空遮断器: VCB)，主変圧器，そしてこれらを結ぶ特高ケーブルである (図1)。

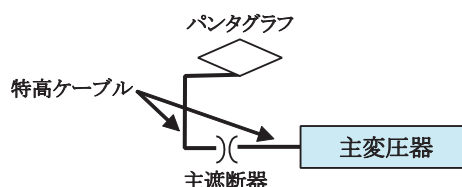


図1 特別高圧回路の構成要素

特高ケーブルには絶縁体への電界を緩和させるために絶縁体の外側に金属の遮へい層が設けられている。よって特高ケーブルの断面は同軸ケーブルのようになっており，この遮へい層は車体へ片端接続となっている。中心導体と遮へい層の間には電磁結合があり，中心導体の電圧が急変すると遮へい層に誘起された電圧が車体へ伝わることによって車体にサージ電圧が誘起される (図2)。

* 車両制御技術研究部 (駆動制御)

特集：車両技術

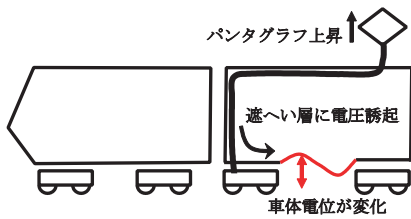


図2 車体サージの発生原理

車体サージが発生するタイミングは高圧回路の構成により異なる(図3)。(a)主遮断器が床下にある場合(主に新幹線)ではパンタグラフを上昇した瞬間にもっとも大きな車体サージが発生する。(b)主遮断器が屋根上にある場合(主に在来線)では主遮断器を投入した瞬間に車体サージ電圧の最大値を記録している。どちらも長い特高ケーブルへ接続した瞬間である。このことから特高ケーブルの遮へい層への誘導が車体サージの主要な要因を占めていることがわかる。

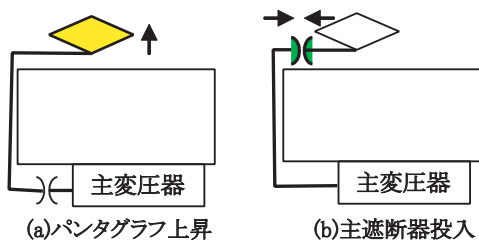


図3 回路構成によるサージ発生タイミングの違い

発生するサージ電圧の大きさは特高ケーブルの長さに左右されるが、離線による電波障害やパンタグラフの騒音を抑制するために近年の交流電車ではパンタグラフの数を減らし、パンタグラフ間を接続する高圧引通しが高速車両においては主流である。そのため従来の車両に比べて特高ケーブルの総延長が長くなっている(図4)。このように現在の交流電車では大きな車体サージ電圧が発生しやすい状況にあるといえる。

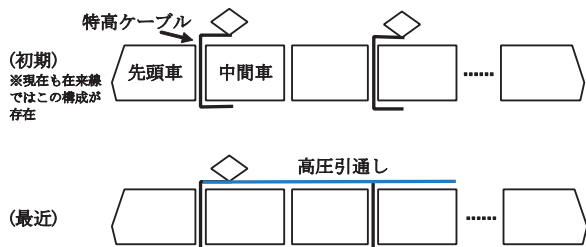


図4 高圧引通し

2.2 交流電車の接地回路における車体サージの要因

現在、ほとんどの車両では軸受損傷防止を目的として、車両の4軸へ均等に帰線電流を流すため、車体から車軸までの配線の長さを均等になるように施工し(図5)、さらに帰線電流を迷走させないために、台車-車体

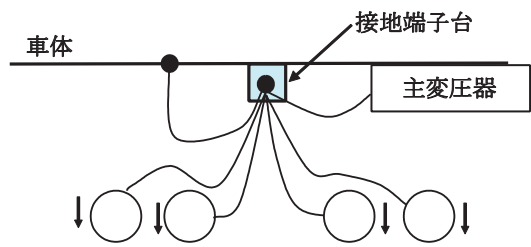


図5 接地電流の均等化

間絶縁している。そのほか誘導障害等を回避する目的で先頭車を付随車とし、かつ接地をとらない編成もある。

新幹線も同じような接地回路であったが帰線電流が編成端の接地装置に集中し、接地ブラシの異常摩耗が発生した。これは車体のインピーダンスがレールよりも低いために帰線電流の多くが車体を流れてしまう³⁾ことに起因する(図6)。この帰線電流の集中は軸受損傷の原因にもなる。そのため対策として車体-車軸間に接地抵抗器(0.5Ω)を設け、帰線電流が車体へ逆流することを防止している(図7)。

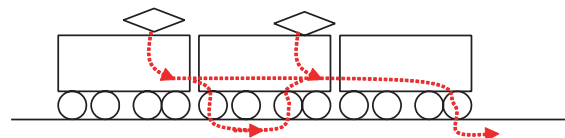


図6 帰線電流の集中

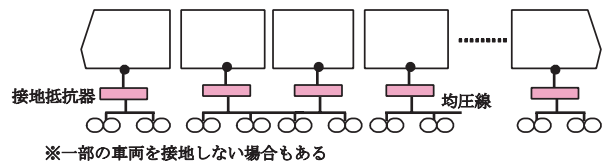


図7 接地抵抗器の追加

これらのことから車体-レール間の接地線は長く、場合によっては接地抵抗器が介在する。よって接地インピーダンスは大きい。サージのように高い周波数の電流に対しては阻止能力が大きくなるため、サージ電圧が低減されにくい。

2.3 先頭車によるサージ電圧拡大

図8に実際に観測された車体サージの波形例(車体-レール間電圧)を示す。図8ではサージ電圧について、架線電圧実効値を基準とするpu法⁴⁾で表記している。ここでは車体-レール間に架線電圧の10%以上のサージ電圧が発生している。また、この場合は先頭車両に大きなサージが観測されていることが分かる。

車体サージ電圧波は、車体を伝わって先頭車に達するが、先頭車では反射現象によって進行波と反射波の和になる。先頭車の接地が十分であればほとんどが透過波となり、反射波は小さく他の車両と同程度のサージ電圧と

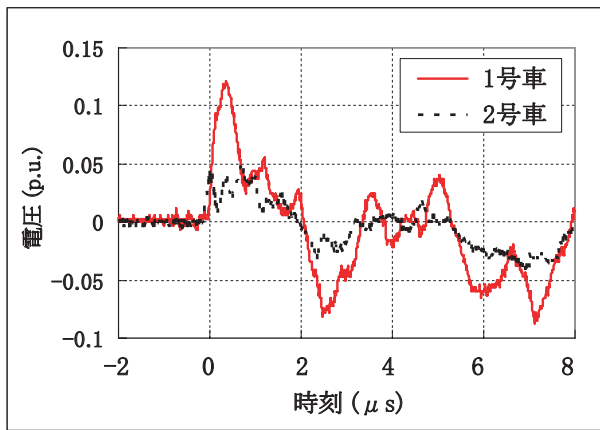


図8 車体-レール間電圧の測定結果例(1号車非接地)

なる。しかし先に述べたように車体の接地インピーダンスが高いために反射波が低減せず、結果として先頭車のサージ電圧が他の車両に比べて高くなるのである。したがって特に先頭車を接地しない場合はこの傾向が顕著になる。

また、車体にとって接地となるべきレールは鉄でできているため表皮効果が大きく高周波に対するインピーダンスが高くなる。図9に停車中においてサージ電圧が発生したときの車体電位、レール電位の関係を模式的に示した。図からわかるように1号車車体の電位は2号車車体よりも大きくなっている。また、図9の左側に変電所がある片き電となっているため、レールには3両分の長さ方向に0.04pu分の電位差が発生している。

なお、図9で台車とレールを接して描いているが、停車中は軸受が通電状態であることもあり台車-レール間の電位差は小さいことを意味している。

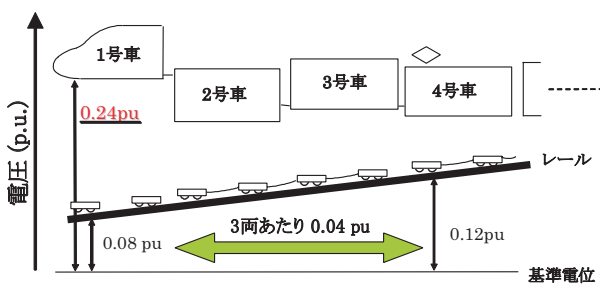


図9 サージ発生時の電位分布

3. 車体サージ低減手法の考え方と検証結果

車体サージ低減手法はサージの誘導を防ぐこと、誘導されたサージを速やかにレールに流すことの2つに分けられる。

3.1 施工する部位と低減手法の検討

車体サージに関する分布定数モデルは図10のようになる。車体のサージインピーダンスは車体の材質、構造

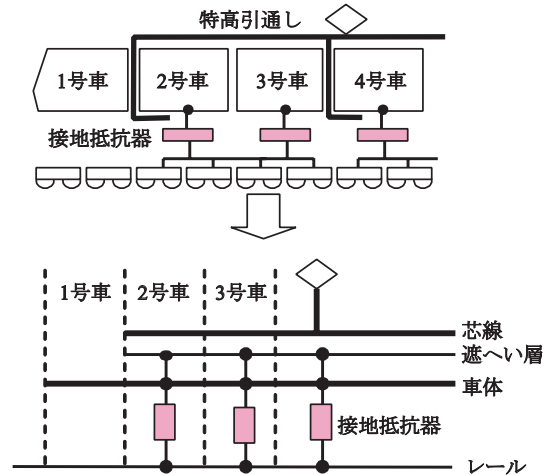


図10 車体サージに関する分布定数モデル

により、またレールのサージインピーダンスは対地コンダクタンスなどといった個別条件により大きく変化することから一意に決まらない。

車体サージを低減するためには、2章で示したような特別高圧回路、接地回路に対策することが必要になる。接地回路に発生するサージ電圧を下げるには特別高圧回路が負担する電圧を大きくする、接地回路のインピーダンスを下げる、の2つが考えられる。表1にこれまで鉄道総研にて検討・研究してきた車体サージ対策の一覧を示す。特別高圧回路への対策は絶縁耐力や常時電流の大きさなどから大がかりなものとなるため、現時点では有効な対策が見いだせていない。本論文では接地側の対策を中心に論を進めることにする。

表1 車体サージ低減手法の考え方と具体案

	特別高圧回路側	接地回路側
抑制原理	特別高圧回路が負担する電圧を大きくする	①接地インピーダンスを下げる ②編成端での反射を抑制する
方策	① 特高ケーブルのサージインピーダンスを大きくする ② パンタグラフに磁性体コアを取り付ける	先頭車を低インピーダンスで接地
可能性	絶縁耐力、常時電流の観点から困難	軸受損傷に注意すれば可能

3.2 コンデンサによる接地

先頭車を低インピーダンスで接地する手段としてサージ電流のみを流すコンデンサを使った手法である(図11)。

この手法の特徴は施工箇所として車体-車軸間と車体-台車枠間の2つの手法が選択可能なことである。車体-台車枠接続をすると車体サージは軸受を流れるが、車体エネルギーがきわめて小さいため軸受には影響を与えない。さらにサージの最大値を記録するパンタグラフ上

特集：車両技術

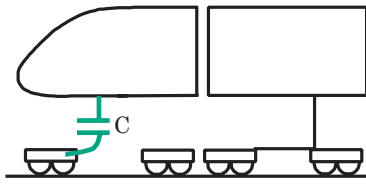
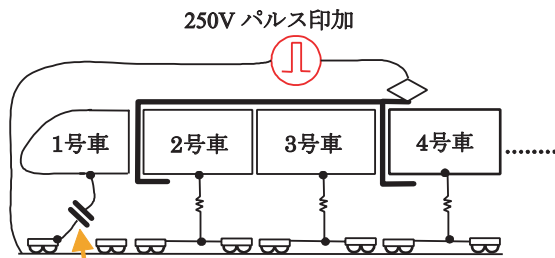


図11 車体一台車枠をコンデンサで接続する対策

昇や主遮断器の投入はほとんどが停車中の操作である。停車中は軸受が通電状態となりサージは軸受に影響を与えない。

したがってサージ電流のみ流すコンデンサを車体一台車枠に接続した手法では接地装置を必要としない。これは接地装置追設が困難な既存車両への対策も容易になることを意味する。

コンデンサを使用した接地の場合、コンデンサの静電容量が重要なパラメータになる。図12は低圧パルスにてコンデンサの容量選定を行った実験である。試験結果では1μFではサージが低減したが、0.1μFではサージが低減しなかった。



車体一台車枠間にコンデンサを接続

結果 { 0.1μF→変化なし
1μF→サージ低減効果あり

図12 低圧パルスによるコンデンサ容量選定

3.3 SiC（炭化珪素）を使った接地抵抗器による接地

SiC接地抵抗器による接地は車両の接地回路の低インピーダンス化を図る手法の一つである。従来の接地抵抗器は高周波に対するインピーダンスを考慮していないため、車体サージに対しては接地の役割を十分に果たしていない。高周波でのインピーダンスを下げるにはバルク状の抵抗体を使用した接地抵抗器が必要である。

鉄道総研では抵抗体の一つとしてSiC（炭化珪素）に着目して接地抵抗器を開発した（図13）。SiCは安定で熱に強く、大電力の抵抗器を製作することが可能である。

図14に製作したSiC接地抵抗器のインピーダンスを示す。耐電流仕様が異なるものの、バルク体であるSiC接地抵抗器は1MHzまで0.5Ωの平坦な周波数特性を示している。これに対して現用の接地抵抗器では100kHzで5Ω程度のインピーダンスとなる。接地抵抗器が負担す



図13 SiC接地抵抗器（200A）の抵抗体

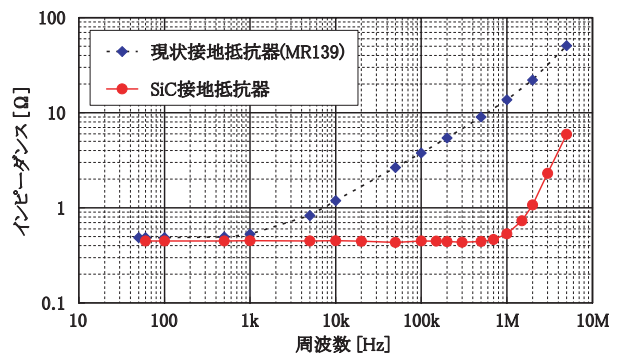


図14 SiC接地抵抗器の周波数特性

る電圧はインピーダンスに比例するため、抵抗器が負担する電圧が10分の1程度になることが期待される。

3.4 検証結果

3.2節の結果を基に実車・実電圧による車体サージ低減の検証を実施した。使用した車両は先頭車に接地のない車両である。

図15に試験結果を示す。先頭車の先頭台車の台車枠一車体間を1μFのコンデンサで接続したところ、発生する車体サージは無対策時に比べて50%減少した。さらに隣の車両の車体サージが25%減少した。

隣の車両の車体サージが減少する理由は以下のようになると思われる。先頭車を低インピーダンスで接地するとサージ電流のほとんどは先頭車に集中する。そのため図9にみるようなレールの電位勾配が減少する。さらに先頭車が低インピーダンスであるため先頭車の電圧が低下することから、先頭車と電氣的に接続されている隣接車両の車体電位も減少する。なお、2号車のみに対策を施工すると、1号車の車体サージは無対策時よりも大きくなるということが分かっているが、これも2号車から流出したサージ電流によって1号車-2号車間のレール電位勾配が対策時よりも大きくなったと考えることによって説明できる。なお、3.3節のSiC接地抵抗器についても図15と同様の試験結果が得られている。

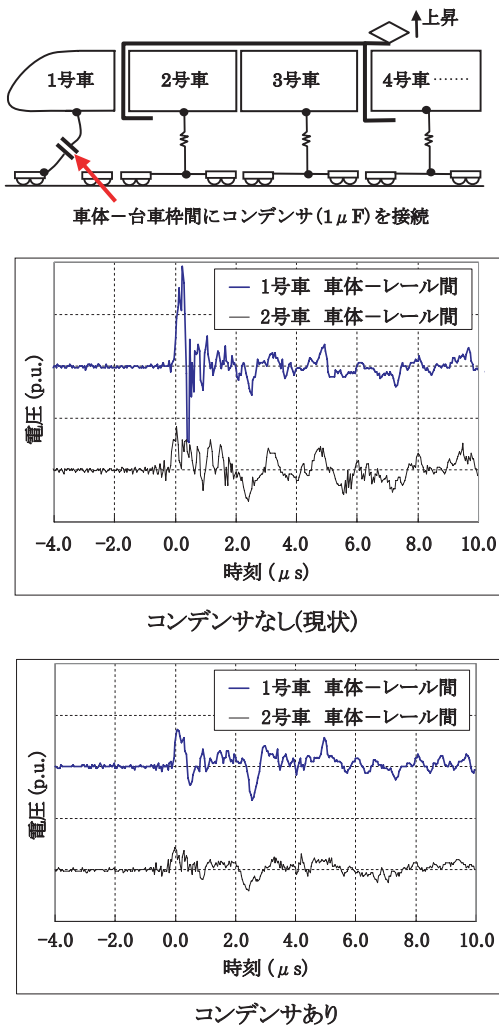


図 15 コンデンサ接続による効果

4. 車体サージ低減のために配慮すべき事項

これまで車体サージの発生要因には高圧引通しによる特高ケーブル静電容量の増大、軸受損傷防止対策による車体-台車間の絶縁向上を挙げ、対策として接地回路への対策が有効であることを述べた。この章ではこれまでの知見から車体サージへの配慮事項について車両側、機器側それぞれについて述べる。

4.1 車両側での配慮

車両側で車体サージ電圧を下げるための配慮としては以下の点が挙げられる。

- 1) 先頭車車体-台車間を接続 (先頭台車がよい)
- 2) 接続する線を短くする
- 3) 接続素子には高周波特性の良いものを使用する

このなかのどれか一つが欠けても車体サージが低減できない。これらは接地インピーダンスを下げるための必要条件である。例えば接地線であるが、模型実験⁵⁾において接地線の長さを模型車両の約 10 分の 1 とした場合

と、模型車両長と同等の長さとした場合では後者のサージ電圧が前者に比べて約 4.3 倍となった。

また、車体に流れうる電流に着目すると車体サージ電流のほか、主回路電流、補助回路電流、レールを流れる信号電流などがある。このうち補助回路電流は車両内で完結する電流であるため車外に流出することはほとんどない。それ以外の電流は車両を出入りする電流であり、レールより抵抗の小さい車体へ流れようとする。

表 2 に、これら電流の質と電流が車体を流れることによる車両への影響、これらの電流に対して車両はどうあるべきかをまとめた。各種電流の性質を理解し、上手に利用することで、この表 2 の望ましい選択をすべて満たすように配慮すべきである。

表 2 車体に流れる電流の種類と性質

		車体サージ	主回路電流	信号電流
電流	周波数	高 (100kHz ~)	低 (50/60Hz)	中 (~数十 kHz)
	大きさ	数百 A, 短時間(数 μs)	大(数千 A), 連続	小(数 A 以下), 連続
電流が流れることによる得失	長所	サージ抑制	なし	なし (誘導障害対策になった例もあり)
	短所 (可能性も含む)	なし	・ 接地プランが必要 ・ 軸受損傷の懸念	・ 誘導障害の懸念
望ましい選択		速やかに逃がす	車体への流入阻止	車体への流入阻止

例えば先頭車を接地する場合、車体を先頭車の先頭台車へ接地するのがもっとも効果が高い。図 16 (a) は台車枠にコンデンサを接続する方式であり、この方法はコンデンサがサージのみを流すため軸受損傷や誘導障害のおそれがないほか、接地線を最も短くすることができ、車体サージ電圧がもっとも小さくなる。

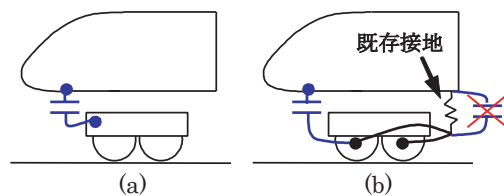


図 16 コンデンサの接続方法

先頭車が接地されているものの、軸受損傷対策のために接地線が長い場合は図 16 (b) の方法も可能である。図で描いたように接地線を短くすることが重要で、接地抵抗器に単純にコンデンサを並列接続するだけではサージ低減効果はかなり小さくなる。

接地抵抗器の場合も同じであり、接地線の長さを図 17 (a) のように短くしなくてはならない。

特集：車両技術

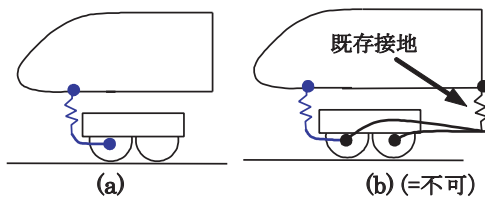


図17 接地抵抗器の接続方法

すでに車両へ接地抵抗器が接続されている場合は新たに接地抵抗器を接続すると図17 (b) のように車両の接地抵抗値が半分にになり帰線電流の吸い上げの可能性がある。特に電動車や主変圧器を搭載した車両である場合は帰線電流を各軸に均等に流す必要があるため抵抗値を調整するなどの工夫が必要になる。

表3にサージ対策手法の一覧について先頭車既存接地の有無を基準にまとめた。

表3 先頭車の車体サージ対策手法

車種	T車		M車
	有り	無し	有り
既存接地	有り	無し	有り
可能な対策	図16 (a) 図16 (b)	図16 (a) 図16 (b) 図17(a)	図16 (a) 図16 (b)
備考	※1	※2	※1

※1：在来線車両のように接地抵抗器のない接地回路に図17 (a) を施すことは可能

※2：単独留置の可能性がある場合は抵抗接地を推奨(車体帯電による感電防止のため)

4.2 機器側での配慮

機器側では台車と車体の電位が異なること、電位差が数kVあることをあらかじめ認識して設計する必要がある。

意図する・しないに関係なく、車体と台車を電気的に接続してしまうことは避ける必要がある。例えば、シールド線を両端で接地してしまうなどである。車体-台車間を電気的に接続すると、そこにサージ電流が集中する。さらに帰線電流を吸い上げて軸受損傷も発生させてしまう。

よって機器の基準電位は車体か台車のどちらかに統一して、もう一方とは数kVに充分耐えうる絶縁を施す必要がある。

機器の絶縁耐量を上げるために防護素子を使用する手法もあるが、最大車体サージに対する耐量と繰り返し回数が必要になる。耐量の大きなギャップ付きの防護素子は回数制限が3000回程度であるため、寿命は数ヶ月程度となることに注意する必要がある。

機器電源は車両からとり、その基準電位は車体になるのが普通である。したがって、図18のように基準電位を

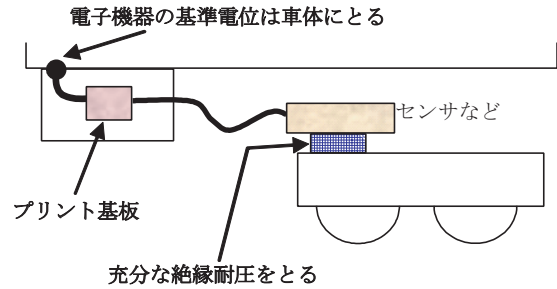


図18 台車に取り付ける電機品の施工例

車両側にとり、台車とは数kVの絶縁に耐えられるように施工するのがもっとも容易で確実な方法である。

5. まとめ

交流電車における車体サージの発生原理とその抑制策、施工上の注意事項を報告した。

交流電車では車体サージ問題が発生する要因として高圧引通しによる特高ケーブルの静電容量増大による誘導電圧の増大、接地回路のインピーダンスが高いことによるサージ電流の阻止能力が高いことが挙げられる。

車体サージ電圧を抑制する方策として接地回路の変更が有効であり、SiC接地抵抗器、コンデンサによる接地について現車を使った定置試験で効果を確認した。特に先頭車の先頭台車を低インピーダンスで設置することにより隣接車両のサージも減少することが確認された。

車体サージ被害を防ぐためには車両側でサージを抑制する接地回路上の配慮、機器側では数kVの電位差を考慮した基準電位のとり方、絶縁をすべきである。

今後も車両の機能向上に伴い台車に取り付けられる電機品が増えることは必然である。車体サージは被害を受けて初めて認識される問題であり、新規メーカ参入や新規設計の際にトラブルを起こす場合が多い。本論文が車体サージ被害を事前に防ぐための一助となれば幸いである。

文献

- 1) 谷口博, 森神秀男, 奥野正文, 松井英二, 河野浩明: ノイズを寄せないコンパクトな試験器, JR東海レポート (JRTR), 5, 5, pp.9-11, 1997.8
- 2) 工藤靖之, 徳井廣行, 守山陽一, 永田長, 佐々木満雄: GTOの短絡を防ぎ修繕費削減, JR東海レポート (JRTR), 7, 11, pp.13-15, 2000.2
- 3) 金田英章, 遠藤留吉: 新幹線電車1次接地電流の分布, 鉄道総合技術研究所速報, No.77-6, 1977.2
- 4) 雨谷昭弘: 「分布定数回路論」, p.169, コロナ社, 1990
- 5) S. Hatsukade and T. Maeda: Experiment and basic analysis of the surge on a Rolling Stock's Body, IEEJ Trans. PE, Vol.125, No.8, 2005.