

高速走行に適応した電力供給技術

赤木 雅陽
電力技術研究部
(き電 副主任研究員)

清水 政利
同
(電車線構造 研究室長)

菅原 淳
同
(集電管理 研究室長)

池田 充
鉄道力学研究部
(集電力学 研究室長)



あかぎ まさたか



すがはら あつし



しみず まさとし



いけだ みつる

はじめに

新幹線においては、トロリ線から大電力を安定して新幹線車両に供給するために、特有の技術が必要となります。

ここでは、新幹線車両が消費するエネルギー、およびその最高速度に大きな影響を及ぼすパンタグラフの構造と架線の波動伝播速度について概説するとともに、近年導入された新幹線走行に対応したトロリ線材料技術、並びに変電所の高速化対応に関し、その特徴、効果について触れます。

電気車とエネルギー

一般的に電気車は速度が上がるほどエネルギーを必要とし、かつトンネルがある区間では速度の2乗に比例して走行抵抗が増大するため、走行抵抗に打ち勝って加速するためにはなおのこと大きなエネルギーを必要とします。図1に新幹線車両の引張力特性の模式図を示します。引張力とは新幹線車両のモーターが発生するトルクが車輪に伝達さ

れて車輪踏面に表れる力です。引張力から走行抵抗を差し引いた値が実際に加速に寄与する力となり、引張力と走行抵抗が同じ値になるとこれ以上加速できなくなります。例えば図1の例でいえば、時速200km/hから引張力が低下していき、時速310km/hの時にトンネル区間での走行抵抗と釣り合うような特性となっています。

一方、新幹線車両の消費する電力は引張力が一定の時は速度に比例して上昇します。ただし制御装置が扱える電力にはある程度制約があるため、通常は途中で最大電力を頭打ちにする「定出力制御」と称するモードに移行します。図2に電流・電力特性の模式図を示しますが、時速200km/h以降は加速中に長時間大電流が継続することになります。では実際にどの程度のエネルギーを必要とするかですが、例えば時速150km/hで走行する10両編成、500tの新幹線を2km/h/sの加速度で加速させるには、走行抵抗が0の場合でも約12000kW（約12MW）もの電力が必要です。近年開業する新幹線はトンネルや勾配が多いため、それに対応して以前よりも出力を大きめに設定している場合が多いようです。

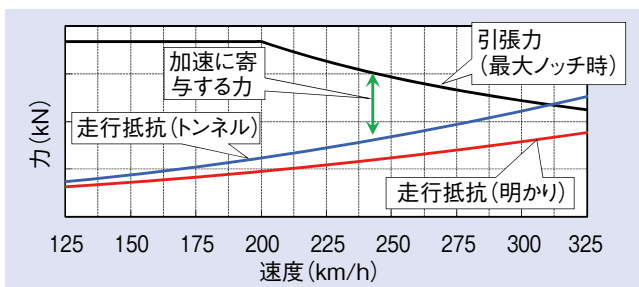


図1 新幹線車両の引張力特性の模式図

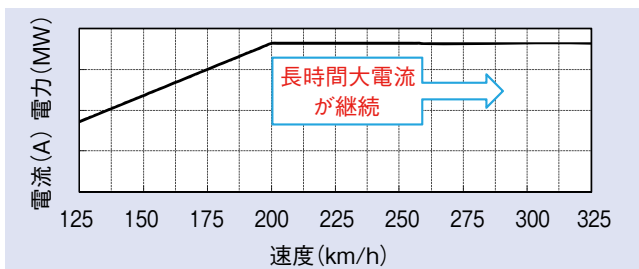


図2 新幹線車両の電流・電力特性の模式図

電車線の構造

新幹線車両に安定した電力を供給するためには、トロリ線とパンタグラフ間の接触性能を良好に保つことが重要です。パンタグラフは、トロリ線に対しばねの力で静的に54N程度で押し上げられていますが、走行時に受ける風により揚力が発生し、300km/hでは平均的に数十～100N程度の力でトロリ線と接触しています。この接触力が何らかの理由で変動し、過小となると離線が発生して電力供給の妨げとなり、過大となると電車線に機械的なダメージを与えます。

接触力の主要な変動要因として、①径間周期での振動、②ハンガ間での振動、が挙げられます。①は、電車線は支持点付近よりも径間中央付近が押し上げられ易く、パンタ

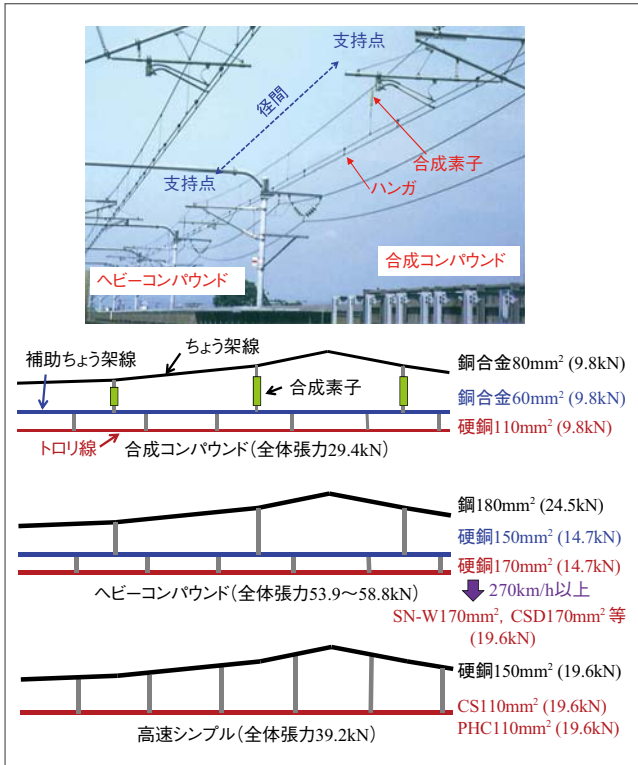


図3 新幹線用電車線の変遷
(トロリ線については表1参照)

グラフが上下に振動してしまうことに起因します。これを抑えるためには、電車線全体の張力を大きくして押し上げ量を小さくすることや、径間内での押し上げ難さ（等価的なばね定数）をなるべく均一にすることが有効です。②は、パンタグラフの接触により励起されたトロリ線の波動がハンガ点で反射してパンタグラフに入射することなどに起因し、走行速度をトロリ線の波動伝播速度（波動の伝わる速度）の70%程度までに抑えることが有効であることが示されています。張力 T (N)、線密度 ρ (kg/m) の弦の波動伝播速度は c (m/s) は、次式で表されます。

$$c = \sqrt{T/\rho}$$

この式から、高張力化と軽量化が波動伝播速度の向上に有効であることがわかります。

図3に新幹線用電車線の変遷を示します。東海道新幹線開業当初は、在来線で一般的なシンプル方式に比べて径間内のばね定数が均一なコンパウンド方式とし、更に均一性を高めるために合成素子（ばねとダンパで構成）を導入した合成コンパウンド架線が採用されました。その後、更に安定した集電の実現や電流容量の確保のため、全体の張力を29.4kNから53.9kNまで向上させたヘビーコンパウンド架線が標準方式となりました。断面積170mm²のトロリ線波動伝播速度は、張力が14.7kNの場合355km/hで、その70%は249km/hです。このため、新幹線の270km/hへの速度向上を契機に、高速区間ではトロリ線張力を19.6kNとすることが標準的となりました。

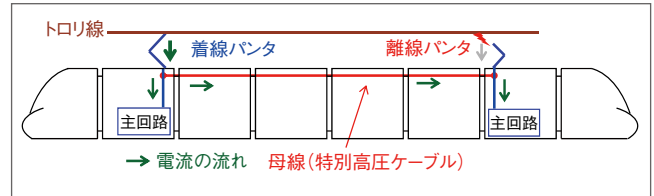


図4 パンタグラフ間母線の機能

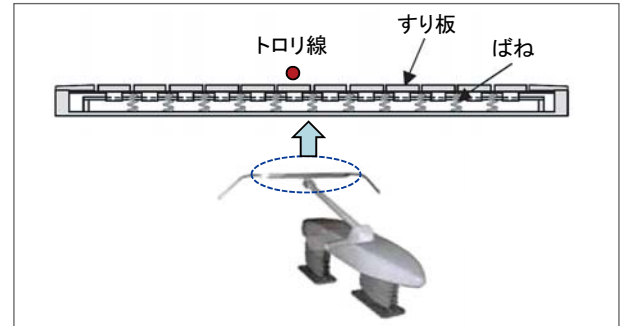


図5 すり板を弾性支持したパンタグラフ

整備新幹線では、トロリ線張力は同じですが線密度を小さくしてトロリ線の波動伝播速度を更に高めることにより、経済性と集電性能を両立した高速シンプル架線が採用されています。

新幹線用パンタグラフ

前章ではトロリ線とパンタグラフとの間の接触性能を向上するための電車線側の対策について述べましたが、パンタグラフ側の対策も重要です。

パンタグラフとして接触性能向上に本質的に重要なことは軽量化です。そこで新幹線では、パンタグラフの小型・軽量化を図るために、レール面からトロリ線までの高さの許容範囲が在来線より狭く設定されています。ただし、小型化には自ずと限界があるため、電車線の構造の特徴（前章の①、②など）に起因して生じる接触変動の卓越周波数において高い接触性能を発揮するようにパンタグラフのばね系を設計することが有効です。また、新幹線では複数のパンタグラフを屋根上に設けた高圧母線で電氣的に接続し、相互のパンタグラフで接触を補完しあうことにより、安定した電力供給を確保する工夫がなされています（図4）。

ただし、後述する空力音低減を理由に、パンタグラフを1個しか使用しないものもあります。この場合にはパンタグラフに対してより高い接触性能が要求されますので、トロリ線と直接摺動する部材であるすり板を図5のように弾性支持することにより、接触性能の向上を図っているものもあります。

新幹線用パンタグラフでは流体力学的な作用に関わる問題を解決することも重要です。パンタグラフのようなサイズをもつ物体が300km/hで走行すれば、100N程度の鉛

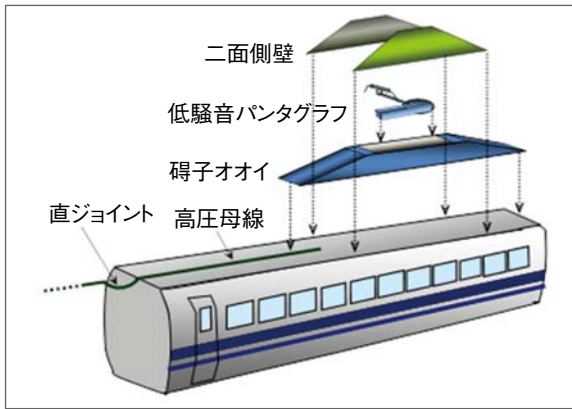


図6 新幹線用パンタグラフの機器構成例

直方向空気が容易に発生します。先述のとおり、新幹線用パンタグラフの静押上力は54Nですから、高速走行時の平均押上力に対して空気が非常に大きな影響を与えることが理解できると思います。パンタグラフの流体力学的特性はひとえにパンタグラフの形状によって決定づけられますので、適正な空気力特性となるような形状を与えることが、新幹線用パンタグラフを設計するうえで極めて重要なポイントとなります。

ただし、新幹線用パンタグラフに影響を与える流体力学的作用として、空気力とは別にもうひとつ重要なものがあります。それは空気の渦運動により発生する空力音です。空力音のエネルギーは走行速度の6～8乗に比例して増大するという性質があるため、高速走行時には空力音が他の騒音源に対して卓越します。レールから5m上方に位置するパンタグラフが発生する空力音は、線路に沿って設けられた防音壁による遮音効果がほとんど期待できませんので、パンタグラフ自身の空力音低減が重要となります。空力音の性状も物体形状に依存しますが、パンタグラフの場合には空力音を抑えつつ、適切な空気力特性を持つような形状を見出すことは容易ではありません。そのため、新幹線用パンタグラフの開発では風洞試験が大きな役割を果たしています。新幹線用パンタグラフの一例を図6に示します。碍

子オオイや二面側壁といった在来線にはない部材が設けられていますが、これはいずれもパンタグラフから発生する空力音を低減するためのものです。

トロリ線の材料

先に述べたように、新幹線を速度向上したときの集電性能の確保、つまりトロリ線とパンタグラフが接触を保って確実に電力の授受を行うには、トロリ線の波動伝播速度を向上する必要があります。そのためには、波動伝播速度の式からわかるように質量の割に引張強度が高いトロリ線材料が要求されます。

そこでまず開発されたのが、銅の中に鋼心を入れることで強度の向上を図ったトロリ線です。Copper-Steelの頭文字を採ってCSトロリ線と呼ばれ、北陸新幹線高崎～長野間、東北新幹線盛岡～八戸間、九州新幹線新八代～鹿児島中央間などで使われています。その横断面を図7に示します。また、より大きな電流容量に対応できるように、銅の断面積比率を大きくしたCSDトロリ線が東海道新幹線などで使用されています。

しかしこれらのトロリ線は鋼心を有するために硬銅などに比べ導電性にやや劣り、また、異なる材料を組み合わせた複合材料であるため、リサイクルの面でも難があります。そこで、高強度と高導電性をあわせ持つ銅合金を適用して開発されたトロリ線があります。特にPHCトロリ線は、銅にクロムとジルコニウムを添加した合金の析出硬化作用を用いて強度と導電性を高い次元で両立しています。PHCとはPrecipitation Hardening Copper Alloy (析出硬化銅合金)の略です。PHCトロリ線は東北新幹線八戸～新青森間および九州新幹線博多～新八代間で本格的実用化を迎えました。

各種トロリ線の特性を表1に示します。「比強度」とは引張強度を線密度(1mあたりの質量)で割った値で、この値

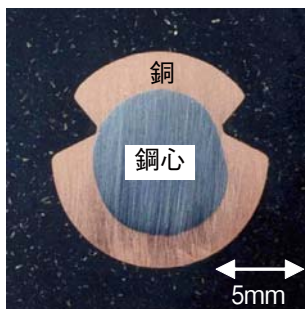


図7 CSトロリ線 (公称断面積110mm²)

表1 各種トロリ線の特性

種類	公称断面積	断面積 (mm ²)	線密度 (g/m)	引張強度 (kN)	比強度 (kN・m/kg)	導電率 (%IACS)	用途
硬銅	110mm ²	111.1	988	≧38.2	38.7	≧97.5	一般用
	170mm ²	170.0	1511	≧57.8	38.3	≧97.5	
SN (すず入り銅)	110mm ²	110.5	982	≧40.2	40.9	≧70	
	170mm ²	169.4	1506	≧58.8	39.0	≧70	
CS	110mm ²	銅 約61 鋼 約50	935	≧65.1	69.6	≧60	新幹線用
CSD	170mm ²	銅 約133 鋼 約37	1473	≧67.7	46.0	≧80	
SN-W (高強度すず入り銅)	170mm ²	169.7	1509	≧74.5	49.4	≧70	
PHC	110mm ²	111.1	991	≧59.0	59.5	≧76	

導電率は、体積抵抗率0.017241Ωmm²/mを100%として示した相対値

表2 三相二相変換変圧器の比較

項目	ルーフ・デルタ結線	変形ウッドブリッジ結線
据付面積	70%	100%
総重量	97%	100%
容量比	93%	100%
ラジエータ台数 (発生損失と相関)	70%	100%

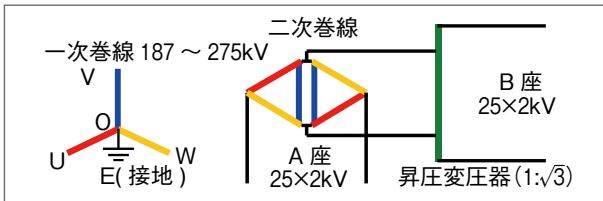


図8 三相二相変換(変形ウッドブリッジ結線変圧器)

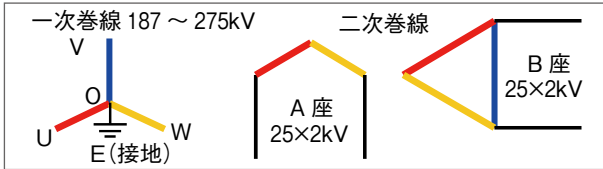


図9 三相二相変換(ルーフ・デルタ結線変圧器)

が大きいくほど波動伝播速度向上のねらいに適することになりますが、列車速度、線区の容量(列車の本数、編成の長さなど)、架線構造、コストなどを勘案して使用するトオリ線を選定することになります。

変電所の高速化対応

新幹線の高速走行を実現する変電技術は、ATき電方式の採用、切替セクションの導入、RPCの導入などいくつかありますが、ここではルーフ・デルタ結線変圧器と早期地震警報システムについて概説いたします。

(1) ルーフ・デルタ結線変圧器

交流き電回路では、通常片送りき電と呼ばれる構成をとっており、新幹線の走行に必要な電流は1箇所の変電所のみから供給されます。電力会社から受電した三相交流は、変圧器を用いて位相が90°異なる2つの単相交流に変換しています(三相二相変換)。この変圧器は二次側(それぞれをA座・B座と呼びます)から電気車に同じ電力を供給した場合に一次側の三相電流が等しくなるように設計されています。ところで、一次巻線の中性点を直接接地する必要がある187kV以上で受電する場合は、これまで変形ウッドブリッジ結線変圧器が用いられていました。図8にその構造を示します。しかし、この変圧器は構造が簡単で設計が容易である反面、昇圧変圧器と呼ばれる変圧器を別に用意する必要があるため、設置スペースや省エネルギー性の面で改善が求められていました。

そこで近年、設計面ではやや複雑なものの設置スペースや省エネルギー性の面で優れた特性を持つ、ルーフ・デルタ結線と称する三相二相変換変圧器が開発されました。図9に構造を、表2に三相二相変換変圧器の特徴を比較した例を示します。各項目ともルーフ・デルタ結線変圧器が優れていることが分かります。特に、長時間大電流が継続する新幹線用変電所においては、変圧器冷却に必要なラジ

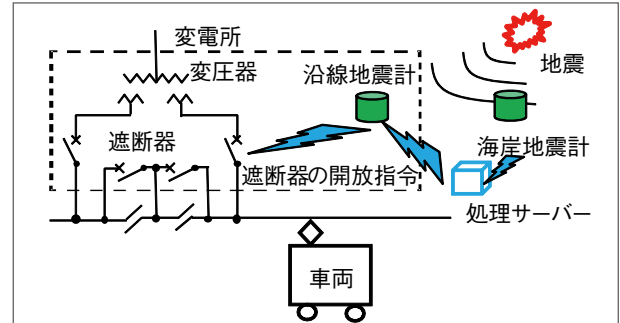


図10 地震発生時における早期地震警報システムの動作

エータは変圧器本体と同等以上のスペースを要することが多いことから、ラジエータの削減は大きなメリットといえます。ルーフ・デルタ結線変圧器は、このたび開業した東北新幹線(八戸-新青森間)および九州新幹線(博多-新八代間)の変電所に早速導入され、変電所用地の縮小や省エネルギー性の向上に貢献しています。

(2) 早期地震警報システム

速度300km/hの電気車は毎秒約80m移動し、仮に4km/h/sの減速度で非常ブレーキをかけた場合でも、停止するまでに75秒程要し約3200mもの距離を移動します。このため、大地震が発生した場合には可能な限り早く列車を減速させる必要があります。

現在、新幹線では地震計(変電所に設置された沿線地震計、または新幹線沿線から離れた海岸沿いに設置された海岸地震計)で運転規制を必要とする強さの地震を検知した場合に、変電所の遮断器を開放することで新幹線を停止させる、早期地震警報システムと称するシステムが使われています。図10に地震発生時の早期地震警報システムの動作模式図を示します。遮断器を開放後、電気車は通常200ms以内に制御装置を停止させるため、まず架線の電圧がなくなりこれ以上加速することができなくなります。次に架線の電圧を参照しているATC装置が緊急停止信号を列車に送信し、非常ブレーキがかかります。これらの仕組みは高速で走行する新幹線ならではのシステムです。

おわりに

駆け足ではありますが、新幹線車両に電気を送り届ける各種技術について紹介をいたしました。

鉄道総研では、今後も電力供給技術のブラッシュアップに取り組んでいきたいと思ひます。RRR