

き電電流の探り方

兎束 哲夫

電力技術研究部(き電 主任研究員)



うづか てつお

電気はどこから来てどこへ消える

電車が日本で走り出してから100年以上、その間、電力を供給する方法は変わっていません。線路脇にある変電所から、線路上の空中に張られた電車線(架線)に供給され、電車まで送られます。電車はパンタグラフを用いて電気を受け取り、モータを回して走ります。地下鉄やモノレール等では、架線の代わりに第三軌条と呼ぶレールの一種から電気を受け取っています。

さて、電車が受け取った電気はモータを回した後はどこへ消えるのでしょうか？ 実はレールを通して変電所に戻っていくのです。レールは車両を支えているだけでなく、電流の経路として使われているのです。

ここでは、変電所から始まった電気の流れ(電流)の経路について考えていきます。

直流き電方式の電流経路

首都圏や関西圏等で通勤電車に使われているのは、直流を供給する直流き電方式です。図1のように、発電所で作られた電気は送電線で送られ、変電所から架線に供給されます。電車は使った電気をレールに返し、それが変電所を経由して、最後は発電所まで帰っていくループを構成しています。

変電所では、架線に送り出す電圧と電流を、変流器・計器用変圧器等のセンサで測定しています。しかし、変電所から電車までの往復経路にセンサ類は無く、どこを

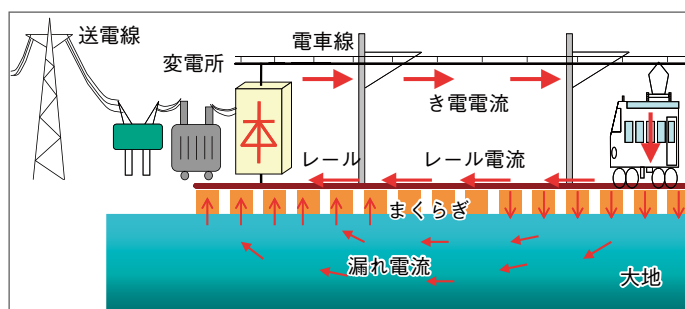


図1 電気の流れ(直流)

いるかは推測するしかありません。

そもそも電気は、通りやすいところ、すなわち電気抵抗が小さいところを選んで、勝手に流れていく性質があります。

レールは鋼鉄製で、大地の上にくら木やバラスト等で支えられています。鋼鉄の導電性は銅やアルミニウムに及びませんが、レールは断面積が大きいので、直流に対して良い電気導体です。一方、大地を形成する土壌自体の導電性は悪いのですが、なんとと言っても体積がほぼ無限大と大きいので、極めて小さい抵抗となります。

レールとくら木の間は、乾燥状態では極めて大きな電気抵抗を示します。しかし線路には雨や雪が降ること、トンネル内では湿度が高いこと、そしてくら木の数が極めて多いことのために、レールを流れる電流は少しずつ(電気が通りやすい)大地に向かって漏れだしていきます。これを漏れ電流と呼びます。

大地に伝わった漏れ電流はどこへ？ 大地の中の抵抗が小さい場所を勝手に選んで通り、変電所周辺に戻ってきます。そして、最後に変電所近傍の地面から一気にレールに吸い上がってくるのです。この大地を通る直流の漏れ電流は、電食という厄介な問題を引き起こします。

電食とその対策

電気はプラスからマイナスへと流れます。金属の中を流

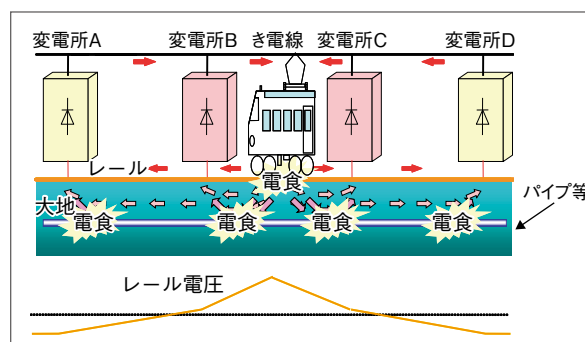


図2 電食

名称	電食防止対策	
陽極法 流電		自然腐食防止を主目的に、埋設管より電位の低い金属を埋設、両金属の電位差を利用し防食電流供給。流電陽極（マグネシウム）が埋設管の代わりに消耗。
電源法 外部		直流電源（60V以下）で地中の接地電極を陽極（ケイ素鋳鉄、磁性酸化鉄、黒鉛）として通電。周囲はバックフィル（黒鉛、コークス等）で充填。
排流法		一般的に使用 強制排流器 AC電源

図3 さまざまな電食対策

れていた電気が外へ出るとき、金属の一部がイオン化して溶けてしまうことを電食と呼びます(図2)。

日本の直流き電方式では、すべて架線側がプラスの極性を持っており、レール側がマイナスとなるよう定められています。その結果、沿線ではレールから少しずつ電気が大地に漏れ、そして変電所付近で漏れ電流が一気に吸い上がってきます。

この場合、沿線のレールは電食で少しずつ溶けることとなりますが、溶けたレールは、鉄道側の自己責任で交換することが出来ます。一方、変電所付近で漏れ電流がレールに集まる際には、周辺の金属が電食します。これがガス管・水道管・建物の鉄筋だった場合には、深刻な影響が出てしまいます。しかし電食する場所が変電所周辺に限られているために、近傍のガス管等に図3のような電食対策を集中的に施すことで、安全が保たれています。

直流き電シミュレーション

一方、直流き電回路では電流が大きいため、架線の電気抵抗分によって電車が受け取る電圧が下がって走れなくなってしまう電圧降下の問題がありました。これに対しては、き電回路を計算機上に模擬して列車が走った際の電圧降下を計算する、シミュレーション手法による検討が古くから行われています。

このシミュレーション用の電気回路に大地のモデルを追加することによって、前述の漏れ電流量を予測することが可能となります。

このようなシミュレーションの活用例として、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構によって建設され、2005年に開業したつくばエクスプレス(首都圏新都市鉄道(株))があります。ここでは、茨城県石岡市柿岡に存在する気象庁地磁気観測所への影響を避けるために、直流き電方式の漏れ電流を最小限に抑制する必要がありました。そのため、様々な条件で計算が繰り返された結果、き電電圧を一定に

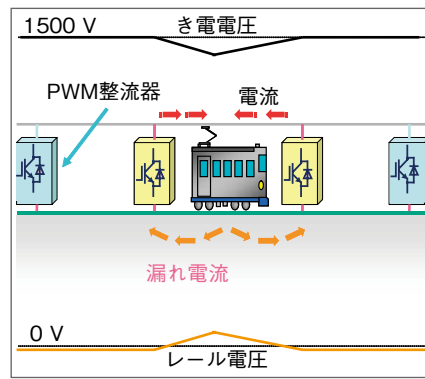


図4 PWM整流器による漏れ電流抑制

地試験の結果、き電電圧が一定に制御されていることが確認されています。

制御できれば漏れ電流も局限できることを明らかにしました。そこで、制御性に優れたPWM整流器が開発され、実用化されました(図4)。現

交流き電方式の電流経路

交流き電方式は長距離大容量の電力供給に適しており、かつ地上設備が低コストなので新幹線全線の他、北海道・東北・北陸・九州等の在来線で用いられています。

交流き電方式でも、変電所から架線を通して出て行った電流が車両で使われ、レールを通して変電所に帰る構造は直流き電方式と同じです。

直流では電気の良導体であったレールですが、交流では様子が異なります。鉄はそこを流れる電流によって磁石になりやすい性質を持っています(軟磁性と呼びます)。交流では電圧の向きが変わるたびに、磁石の向きを変えるエネルギーが必要となるため、電流が流れにくくなります。さらに、交流は導体の表面を流れる性質(表皮効果)があるために、断面積が大きくても表面積が小さいレールはますます導電性が落ちてしまいます。その結果、交流では直流以上に大地への漏れ電流の比率が増加する傾向にあります。計算と実測によって、まったく無対策の状態ではレール電流の半分程度が大地に漏れてしまうことが分かっています。ただし、き電電圧が高いために電車に供給する電流は小さく、したがって交流き電方式での漏れ電流の絶対量は直流ほど大きくありません。

一方、交流き電方式では直流き電方式よりも大地への漏れ電流が増えやすいにもかかわらず、電食を問題にすることはあまりありません。それはなぜでしょうか。商用周波数(東日本では50Hz、西日本では60Hz)の交流では、電流の向きが一秒間に50回または60回変わります。電食のような電気化学反応は、一定の反応時間が必要なので、交流では変化が早すぎて電食する暇がないのです。

誘導とは

交流き電方式では、電食問題の代わりに鉄道周辺の物体が電氣的影響を受ける、誘導問題への対策が必要です。

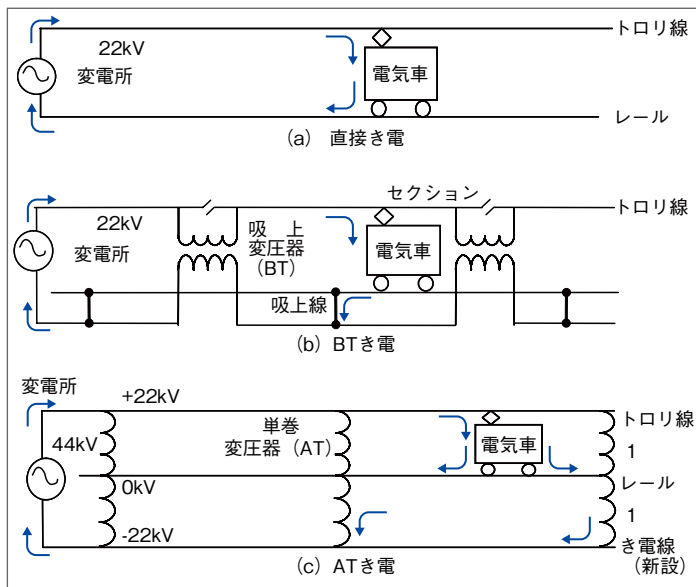


図5 各種交流き電回路(電圧は在来線仕様)

誘導は、交流電気鉄道周辺にあつて直接接触していない電線あるいは金属物等が電圧を持つこと(静電誘導電圧及び電磁誘導電圧)、また鉄道周辺の通信線に雑音が混じってしまうこと(通信誘導雑音)に分けられます。

静電誘導電圧は、交流電圧を持った電線(すなわち、架線・負き電線・き電線等)に近接した物体に高い電圧が発生するものです。静電誘導電圧は、元の電圧に比例する、電流・周波数・電線の並行長に関係ない、距離に反比例して急激に減衰する等の特徴があります。対策として、抑制したい物体を接地(大地に接続、またはレールに接続)することでほぼ静電誘導電圧を抑制することが出来るため、鉄道周辺の金属物は、適宜接地工事が行われています。

一方、電磁誘導電圧は、交流電流が流れている電線に並行して走る電線等に電圧が発生するものです。電磁誘導電圧は、元の電流の大きさに比例する、電線の並行長に比例する、元の電流の周波数に比例する、周辺の大地導電率が小さいと誘導電圧は大きくなる等の特徴があります。この対策には様々な方法がありますが、その基本は架線と反対方向に流れる電流、すなわち帰線電流を架線の近くに配置して、電磁誘導を打ち消し合う原理に基づいています。そのため、き電回路側では以下に述べる工夫が為されています。

BTき電方式

もっとも簡単な交流き電回路は架線とレールだけで構成されており、直接き電方式と呼んでいます(図5(a))。直接き電方式では、前述のように帰線電流の多くが大地への漏れ電流となってしまうため、架線電流の誘導を打ち消すことが困難であり、周辺に大きな誘導電圧が生じます。

そこで架線にセクション(切れ目)を切り込み、吸上変圧器(Booster Transformer: BT)を設けて負き電線

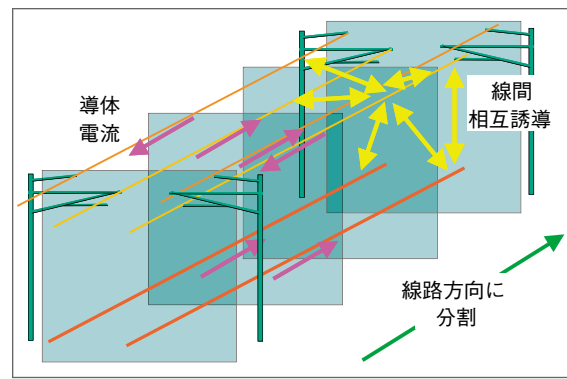


図6 交流き電回路計算の考え方

(Negative Feeder: NF)と電磁的に結合させたのが、BTき電方式です(図5(b))。吸上変圧器を架線電流が通過する際に、変圧器の作用によって強制的に負き電線にも逆方向で同量の電流が流れるため、大地に漏れだした電流がレールに吸い上がり、そこから負き電線に集まってきます。これによって、漏れ電流が大幅に減少します。さらに、負き電線には架線と反対方向の電流がほぼ同量流れるために、負き電線を架線に近い位置に配置することによって、架線の電磁誘導効果と反対方向の負き電線の電磁誘導効果が相互に打ち消しあい、周辺の電磁誘導電圧を大幅に軽減することができるのです。

このBTき電方式は、約100年前の1906年に北欧のスウェーデンで実用化されました。スウェーデンは人口密度が低いので、日本から見ると周辺への対策が必要ないようなにも思えます。しかしスウェーデンは地質が古く、岩盤となった大地の導電率が極めて低いために、誘導の影響範囲が広がってしまいました。そこで、レールの電流を簡単な構成の吸上変圧器で吸い上げることによって、影響を軽減することに成功したのです。

日本は人口密度が高く、鉄道周辺の人家や通信線が多いため、交流き電方式の開発当初から誘導問題が真剣に検討されました。そして、理論計算や仙山線での実地試験の結果、電磁誘導軽減効果の大きなBTき電方式を交流き電の標準方式に定めたのです。日本は地質的に新しいために大地の導電率が比較的高く、電磁誘導電圧が低くなることが分かったのは幸いでした。BTき電方式は1970年ぐらいまで標準的に使われ、開業当時の東海道新幹線もBTき電方式です。

ATき電方式

一方、BTき電方式で吸上変圧器を設置するために設けた架線のセクションは、新幹線のように列車の速度が上がると、パンタグラフが通過する際にアークを生じ、架線やパンタグラフが損傷します。1972年開業の山陽新幹線では東海道新幹線以上の高速化が図られたこともあり、アークを防ぐと共に20km間隔だった変電所

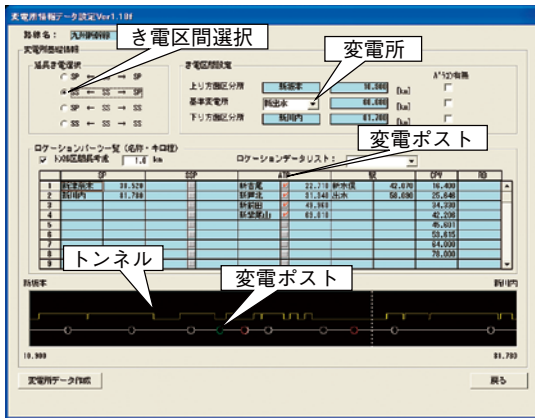


図7 計算範囲の指定

間隔をもっと広げたい要求もありました。

これに対応したのが単巻変圧器 (Auto Transformer : AT) を用いたATき電方式です (図5 (c))。ATき電方式では架線と同じ電圧で極性が逆となっているき電線を線路に沿って張り巡らせ、一定の間隔で配置した単巻変圧器によってレール電流を両側から吸い上げて、き電線を通して変電所に返しています。その結果、架線を通る電流とき電線を通る電流の向きが逆になるため、電磁誘導を相互に打ち消すことができるのです。さらに、変電所から送り出す電圧がき電電圧の2倍となったため、き電回路全体の交流抵抗 (インピーダンス) が1/4に激減し、大電力を安定供給しながら変電所間隔を広げることができました。また、架線からセクションが無くなったため、アークも発生しません。

このATき電方式も歴史は古く、1911年からアメリカ東海岸で実用化されていました。しかし、アメリカとは電源周波数やき電電圧、架線配置等使用条件がまったく異なっていたために、そのまま日本の環境に持ち込むことはできず、独自の解析と開発が必要でした。そこで架線・レール・き電線に複雑に分布する電流と、それらが引き起こす電磁誘導について詳細な検討が行われました。その結果、単巻変圧器の性能を規定した上で設置間隔を10kmとすることで、総合的に見てBTき電方式と同程度の電磁誘導に抑制できることが分かり、1970年以降、これを標準としたのです。

日本に始まった商用周波数のATき電方式は、その後、世界中で標準方式として広まっています。

交流き電シミュレーション

これまで述べてきたように、交流き電方式では誘導問題のために、複雑なき電回路の計算が必要でした。ATき電方式は東海道新幹線での実用化を目指していましたが、解析技術が間に合わず、実用化に至りませんでした。その後、当時の鉄道技術研究所によるコンピュータを用いた数値解析と、各所での現地試験で特性がはっきりしたことによって、安心して実用化に踏み切ったのです。

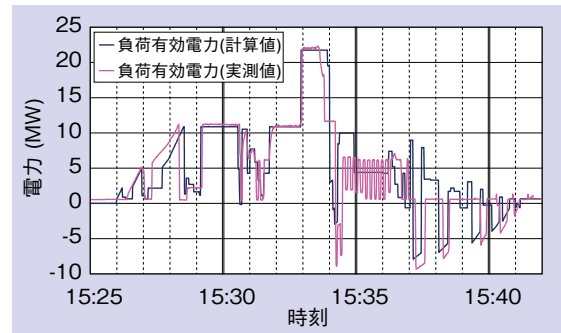


図8 負荷電力計算結果

このような回路計算では、図6に示すようにき電回路をレール方向で分割し、それぞれの分割回路における多数の電線間の相互誘導を考慮して、結果を積み重ねていく手法がとられています。国鉄時代から開発が継続している多線条回路網解析プログラムでは、架線や周辺電線の材質や配置を入力し、大地導電率、車両位置等の諸条件を指定することによって、交流き電回路各所の電圧・電流分布を正確に計算することが出来ます。数十kmにおよぶき電回路のインピーダンス (交流抵抗) を計算した例では、実測値と比較して誤差数%程度と十分に実用的な精度を得ています。

この多線条回路網計算プログラムは複雑な誘導問題だけでなく、き電回路に大出力の車両が入った場合の電圧降下や、レール電位計算等の比較的単純な問題に対しても用いられています。

ただし本プログラムでは、開発当時のコンピュータ能力が限られていたことから、き電回路網データの入出力方法が複雑で扱いにくく、単純な計算にはかえって不向きな面がありました。また、車両による電圧降下計算を行う場合には、車両特性や勾配や駅等の線路条件、そしてダイヤグラムから車両のランカーブを求め、車両がいつ、どの位置でどのような電流を取るのか計算する必要がありました。

そこで、車両ランカーブ計算機能を新たに作成し、一方でき電回路網の入力を簡単に行える交流き電シミュレーションプログラムを開発しました。

このプログラムはパーソナルコンピュータ上で動作し、図7に計算範囲の指定画面を示すように、簡単な操作でき電回路と車両の動きを入力し、それに基づいた計算を行います。

図8に示す勾配線区での車両負荷電力計算結果は実測値とほぼ一致しています。このように、比較的簡単な操作で、き電回路の電圧・電流分布が計算できるようになりました。

おわりに

電食・誘導とも古くて新しい問題といわれています。目に見えない電気、しかし流れていく途中で様々な問題を引き起こすために、流れ方を計算する方法が発達し、対策が練られているのです。RRR