

帰線回路設計のためのレール電流分布の解析手法

信号・情報技術研究部 信号システム研究室

主任研究員 寺田 夏樹

1. はじめに

電化区間においては、信号電流と帰線電流を分離するために軌道回路境界においてインピーダンスボンドを設置しているが、直流電化区間では大電流が流れる。朝夕のラッシュ時などにおいて、インピーダンスボンドに帰線電流が集中して流れると、磁気飽和を起し、励磁インピーダンスの低下を通じて軌道回路の不正落下につながることもある。これに対してインピーダンスボンドの電流の定格を上げれば、磁気飽和は起きにくくなるが、定格の大きいインピーダンスボンドは重量や容積がかさみ、設置に手間や費用がかかることから、定格を適正に設定する必要がある。

帰線電流によるインピーダンスボンドの磁気飽和を減らす方法としては、クロスボンドやジャンパ線の配置による帰線電流の迂回という手法がある。クロスボンドは、変電所から見たレールのインピーダンスを低減させたり、駅構内における電流の経路を複数作ったりする目的で使用されるが、クロスボンドにより電流が小さくなれば、インピーダンスボンドの定格を上げずに済む。

このようにクロスボンドやジャンパ線の設置は障害の低減に重要な役割を果たしているが、その設置方法については、設計施工標準にはほとんど示されておらず、経験的に行われている。そこで、計算により帰線電流の分布を計算する手法を検討し、その妥当性を確認した。

2. 計算手法の検討

2.1 節点解析法

電子回路シミュレータとして、Spiceが有名である。Spiceでは過渡応答や交流信号に対応しており、半導体などの非線形素子を扱うことも可能である。しかし、電子回路シミュレータを用いるには、列車の位置に合わせて回路上の電源を動かす必要がある。一方、本課題で対象としているのは直流であるため、静的な解析が可能となれば十分である。そこで、電気回路網解析としては最も基本的なものである節点解析法を適用することとした。これは、キルヒホッフの電流則（任意の節点に流れ込む電流の総和は0）とオームの法則（節点間の電流と抵抗の積は節点間の電位差となる）から、連立方程式を導いて電位分布を求める方法である。

G をコンダクタンス行列、 V を電位ベクトル、 I を電流源ベクトルとすると、節点解析法による回路方程式は $GV=I$ で示される。 G の i 行 j 列の要素を g_{ij} とすると

$i=j$ のとき： 節点 i に接続されているコンダクタンス（抵抗の逆数）の和 ($G_{ij} = -g_{ij}$)

$i \neq j$ のとき： 節点 i と節点 j の間のコンダクタンスに-1をかけたもの

であり、これは設備により定まる。 I の i 行目の要素は i 番目の節点に流れ込む電流源の電流であり、これは車両や変電所の位置により定まる。 V の i 行目の要素は i 番目の節点の電位であり、これは未知の変数となる。

設備により定まる G と、車両の位置により定まる I が与えられた場合、 G の逆行列 G^{-1} を求めれば、 $V = G^{-1}I$ により V 、すなわち電位分布を求めることができる。電位分布が定めれば、節点 j から節点 i に流れる電流は $(v_j - v_i) g_{ij}$ であるから電流分布も求めることができる。

これらの行列計算は MATLAB（商用ソフト）、Scilab や Octave（フリーソフト）などの、汎用の計算ソフトを活用することで、容易に実行することができる。なお、実際には逆行列を直接求めることは行わず、線形方程式のソルバを使用する。

2.1 電流分布計算に必要な導体抵抗値

節点解析法により、電流分布を計算するには、節点間のコンダクタンスが必要である。つまり、帰線回路を構成する導体の抵抗値が必要となる。そこで、計算に必要な抵抗値を調査した。また、分岐器についても取扱の整理を行った。

① レールの電気抵抗

レール 1 本の抵抗値はおおよそ以下のとおりである。

30kg	49.9 $\mu\Omega$ /m	37kg	41.1 $\mu\Omega$ /m
40N	38.2 $\mu\Omega$ /m	50N	31.6 $\mu\Omega$ /m (25m で 790 $\mu\Omega$)
60kg	26.2 $\mu\Omega$ /m		

また、定尺レールを用いた区間ではレールボンドの分だけ抵抗値が増えるが、標準的な CV1-55-280 と CV1-55-500 との組み合わせで 65.6 $\mu\Omega$ 、CV2-110-280 で 52 $\mu\Omega$ であり、レール 1～2m 分に相当する。厳密に考慮する場合は、この増分を加えればよいが、おおよその計算をする場合にはそのまま、あるいはレール抵抗値を 5～10% 程度増やして計算すればよい。

② インピーダンスボンドの抵抗

1 次コイルの抵抗は旧国鉄規格である JRS によると、

商用	500A	0.75m Ω	1000A	0.5m Ω
分倍	500A	0.95m Ω	1000A	0.75m Ω

となっている。片腕あたりの抵抗値はその半分とすればよい。

③ インピーダンスボンド導線・ジャンパ線・クロスボンド

標準的な配線である 115mm²×2 本の導線抵抗は 73 $\mu\Omega$ /m である。

2.2 車両および変電所のモデル化

節点解析法では、電源は全て電流源とする必要がある。そのため、車両および変電所をまとめて電流源として扱うこととした。なお、必要があれば、電流源を電圧源に変換することは可能である。この解析は線形解析であるため、車両の電流が増加した場合には、それに比例して各部電流が増加する。従って、車両からの電流が不明の場合はとりあえず 1000A として計算しておき、実際の車両の電流に合わせて換算することにより、任意の場所に流れる最大電流を把握する事が可能である。なお、一般的に車両からの電流は最大で 1M あたり 600A 程度である。

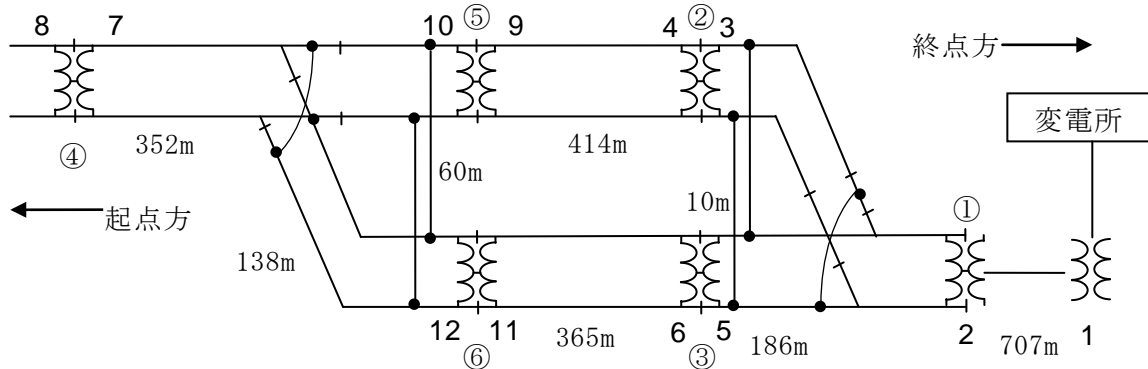
変電所が 2 つある場合については、電気回路の重ね合わせの理を用いればよい。すなわち、複数の電源を含む電気回路の電流・電位分布は電源が独立して存在するときの電流・電圧を重ね合わせたものに等しいことを利用する。ここで個々の電源による電流・電位分布を求める場合には、他の電流源は開放として求める。つまり、変電所が 2 つある場合には、それぞれの変電所から列車に供給される電流による電流分布を求めて、結果を足し合わせることで、2 つの変電所による電流・電位分布が得られる。

ここで2つの変電所のき電電圧が等しいとした場合に、それぞれから供給される電流の比については、厳密にはトロリ・き電線の抵抗・レールの抵抗・変電所の内部抵抗を考慮する必要があるが、電流分布の把握の上では、変電所と列車の間の距離の逆比で按分されると考えるのが最も簡易な考え方であり、これにより、レール側の配線による検討が可能となる。

3. 実測との比較による妥当性検証

節点解析法による電流計算について、複数の駅を対象としてケーススタディを行い、適用が可能であることを確認した。次に、計算結果の妥当性の検証のために、実測データとの比較を行った。測定は列車位置の推定が容易な、単線の交換駅を対象として実施した。駅構内のモデルは図1に示すとおりである。

計算結果を図2、それに対応する実測結果を図3に示す。ここでは列車は①→③→⑥→④と移動するが、図1に合わせて、起点方からの相対距離を横軸とした。また、電流は①から変電所に吸い上がる電流を1000Aに正規化し、電流の向きは終点方へ流れる向きを正とした。また、この測定においては回生電流は発生していない。



※ZB 導線は 5m とした

図1 駅構内計算モデル

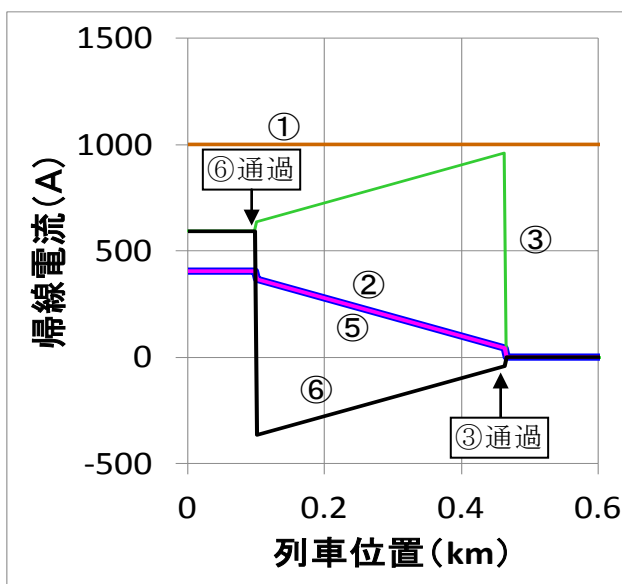


図2 帰線電流計算結果

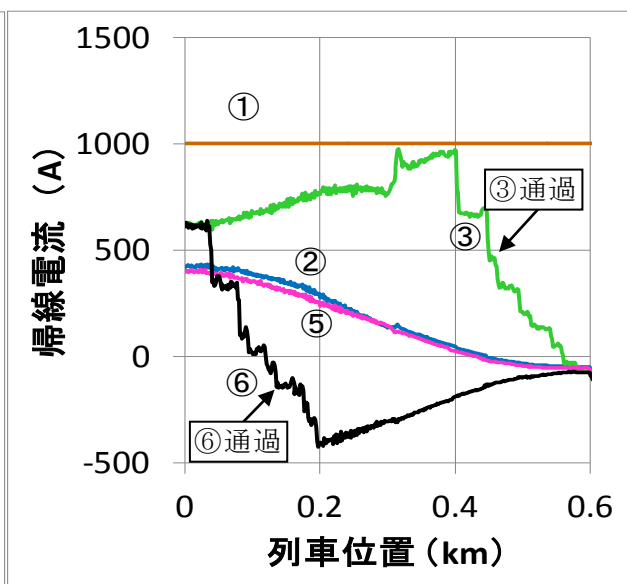


図3 帰線電流測定結果

計算では列車位置を1点と仮定しているため、インピーダンスボンド通過時に急激に変化しているが、実際には車両毎に負荷が分散しているため、列車長に相当する分だけ、緩やかに変化している。その点を除けば、おおむね傾向は実測に合致している。

また、列車が起点方に在線している時の下りホームトラックと上りホームトラックの電流（全電流1000A換算）は402A:598Aであった。これに対する計算値は404A:596Aであり、計算と実測がほぼ一致することも確認できた。

なお、不平衡電流についても調査を行った。下り線では0.89%（外軌レールの方が大きい）であったが、計算では0.85%（内軌レールの方が大きい）であった。また、上り線では1.82%（外軌レールの方が大きい）に対し、計算では1.56%（外軌レールの方が大きい）という結果であった。不平衡率がもともと小さいため、評価は難しいが、今回の計算では全体の電流に対して1~2%程度の誤差であった。

以上により、力行の車両だけを考慮する場合は、およその電流分布は計算と実測で一致することが確認できた。なお、回生車両が存在する場合、その回生電流をモデル化する必要があるので、電流分布と計算で合わせることはできなかった。しかし、基本的に回生車両が存在する場合には、電源が複数に分散するため、最大の帰線電流値に関しては力行車両だけの場合と比べて小さくなる方向に働く。そのため、設計上の計算においては力行の車両のみを考慮しても十分であり、本研究の目的であるインピーダンスボンドの定格電流の見積もりには十分な精度を有していることを確認した。

4. スクリプトの作成

汎用の計算ソフトではスクリプト（マクロ）を記述することが可能であるため、標準的なスクリプトを作成すれば、それを編集することで多様な計算に対応可能であり、出力を好みに合わせて変えることもできる。特に、コンダクタンス行列は基本的に疎行列（0でない要素が少ない行列）となるが、これらの計算ソフトは疎行列を扱うことが可能であり、行列の非零の要素だけを指定することでコンダクタンス行列を構成できる。

そこで、計算を行うためのサンプルとなるスクリプトを作成した。このスクリプトは、抵抗値の定数の定義、設備についての接続関係およびコンダクタンスの設定、コンダクタンス行列の構成、行列計算、出力部分に分けられるが、このうち、設備に対応する接続関係の設定部分と、出力部分を編集する事により、計算を行いたい事例に対応することが可能である。

5. まとめ

直流電化区間における駅構内における帰線電流分布の計算手法について、節点解析法の適用を行い、計算が可能であること、また実測を通じて計算が妥当性を持つことの確認を実施した。また、Scilabなどの計算ソフトを用いて計算を行うためのサンプルを作成し、これを実際の帰線回路に合わせて書き直すことで計算ができるようにした。この手法を用いることにより、駅構内における電流分布や電位分布の計算を行うことが可能であり、クロスボンドやジャンパ線の設計が妥当であるか検討を行うことが可能になる。