

交流き電回路シミュレータの開発

電力技術研究部 き電
主任研究員 兎束 哲夫

1. はじめに

変電設備設計に際しては、列車の運転電力量や架線電圧降下等を推定する必要がある。従来この目的には、運転曲線作成システム(SPEEDY)を用いて列車位置と電流を計算し、その結果に基づいて多線条回路網解析計算によって運転電力を計算してきた。しかし、近年の新幹線ではデジタル ATC による一段ブレーキ制御、車両力率が高いため並列コンデンサを設置しない変電設備、勾配やトンネル区間が多い等、既存の新幹線とは異なる特徴を有している。一方、SPEEDY は信号システムの詳細な記述が必要であり、変電設備設計用としては扱いにくい。また、多線条回路網解析プログラムは電気計算精度が高いものの、開発が古いためデータ入力等の操作性が悪い。

そこで、変電設備設計計算に必要な十分な精度を持つ運転電力計算アルゴリズムを新規開発するとともに、多線条回路網解析の条件入力を容易にした。そして、図 1 に示すすべてを統合的に運用できる新しい交流き電回路シミュレータソフトとしてとりまとめた。

2. 車両運転電力計算アルゴリズム

2.1 車両運転電力計算の概念

車両運転電力計算アルゴリズムは、運行ダイヤ情報と勾配・曲線および速度制限区間等の線路諸元および車両性能データ等の入力条件から、一列車毎に始発駅から終着駅までの車両の位置、速度、電流、力率を一秒間隔で計算する。列車走行時の有効電力は、速度-引張力特性から求まる引張力(機械的エネルギー)を電氣的エネルギーに変換して算出する。車両走行抵抗は空気抵抗の影響を考慮して、トンネル区間と明かり区間を区別した、速度の二次式として計算している。例として、E4 系新幹線 16 両編成の走行抵抗 $R_r(N)$ を式(1)に示す¹⁾。ただし v は車両速度(km/h)、 W は車両重量(t)である。

$$\left. \begin{array}{l} \text{明かり: } R_r(N) = (10.5 + 0.00410v)W + (0.102 + 0.00250 \times 400)v^2 \\ \text{トンネル: } R_r(N) = (10.5 + 0.0579v)W + (0.446 + 0.00312 \times 400)v^2 \end{array} \right\} \text{----- (1)}$$

2.2 新幹線走行の模擬

最近の新幹線は、ノッチ位置を自動調整して目標速度を保つ定速走行機能と、駅停車時のデジタル ATC による一段ブレーキ機能を有している。そこで、勾配・走行抵抗から簡易な計算により加速度を 0 とする定速走行模擬機能と、減速目標地点に向けて常時ブレーキ距離を計算してブレーキをかける一段ブレーキ模擬機能を実現した。

2.3 在来線曲線の模擬

新幹線では曲線による速度制限箇所は限定されるため、必要な地点にその都度制限速度を入力することとした。在来線では、曲線半径と車種毎の制限速度の対応表を内部に持ち、車両位置・曲線位置と車種から自動的に速度制限をかける機能を追加した。

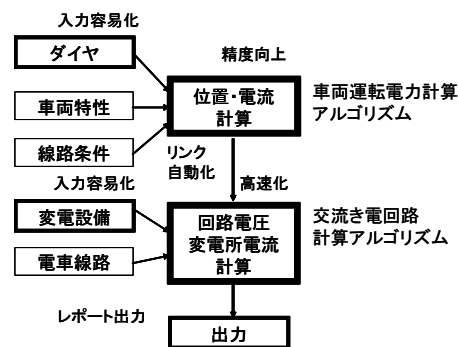


図 1 シミュレーションソフト構造

3 交流き電回路計算アルゴリズム:

与えられた車両位置，電流，力率およびき電回路条件，変電所容量等のデータから，多線条回路網解析を行う電力計算を解説する。

3.1 多線条回路網解析の概念

多線条回路網解析では，き電回路は上下線のトロリ線(T)，き電線(F)，レール(R)および保護線(PW)，BTき電方式の負き電線(NF)および大地導体等の自己誘導及び相互誘導を伴う並行導体として表現する。計算区間のき電回路を，変電ポストや回路構成・車両の存在等条件が異なる境界点(ノード)毎に分割し，各ノードは複数の並行導体の断面としてノード間にブランチを仮定する。これら要素間の関係を行列式として表現し，キルヒホッフの法則に基づいてインピーダンス行列の逆行列を計算し，各ノードの電圧・電流を求める。

まず変電所から末端までの計算区間き電回路を，条件が異なる境界点毎に n 個に分割する。この境界点をノード k (Node, $k= 1\sim n$)と呼ぶ。ここでいう条件とは，電源や AT 等の接続，トンネル前後等，導体幾何学的位置の変化，電線種の変化，大地導電率の変化，車両の存在等である。各ノードは m 本の並行導体の断面からなっており，各導体は対地電位 $V_k(V)$ と入力電流 $G_k(A)$ ，アドミッタンス $Y_k(S)$ を持つ。

ノード $k-1$ とノード k を結ぶ区間をブランチ k (Branch, $k=2\sim n$)と呼ぶ。各ブランチも m 本の並行導体を持っており，各導体は通過電流 $I_k (A)$ ，インピーダンス $Z_k (\Omega)$ を持つ。ただし， V, I, G は m 要素の縦行列， Y, Z は $m \times m$ の正方行列である。これらノードとブランチの概念を図 2 に示す。

このとき，キルヒホッフの法則からノード k に対して以下の式(2)が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} V_k - V_{k-1} + Z_k \cdot I_k &= 0 \\ I_2 + Y_1 \cdot V_1 &= G_1 \\ I_{k+1} \cdot I_k + Y_k \cdot V_k &= G_k \\ -I_n + Y_n \cdot V_n &= G_n \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

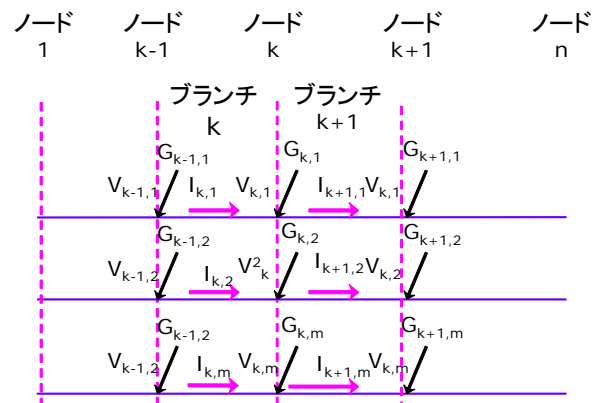


図 2 ノードとブランチ

ただし， Z 行列は各導体の自己インピーダンスおよび各導体間の相互インピーダンスであり，導体の幾何学的配置と導体半径，直流抵抗値，電源周波数および大地導電率から Carson-Pollaczek の式に基づいて計算する。また，車両は定電流源としてき電回路上の指定位置ノードに配置する。

ここで，式(2)を解くことによって各ノードの電圧と電流が決定する。

3.2 車両の模擬

車両は，指定位置に存在する抵抗及びリアクタンスとして表現する。具体的には，運転電力計算によって定められた車両位置・電流・力率から，架線電圧との関係を満足する抵抗値とリアクタンス値を決定する。列車が複数あった場合の，抵抗及びリアクタンスの調整は自動的に行われる。

実際には，自励式変換(PWM コンバータ)車両は，架線電圧が一定値(例えば新幹線では 25kV)以上では定電力運転を行い，一定値未満では定電流運転を行っている。回路計算では一般に最低パンタ点電圧を問題にすることが多いため，多線条回路網解析アルゴリズムでは架線電圧にかかわらず車両が定電流運転を行うと仮定して，車両運転方式の切替を省略した。これにより，計算を簡略化しながら必要な計算精度を得ている。

3.3 BTき電回路の模擬

負荷電流では吸上変圧器(BT)はほとんど飽和しないため、BTは吸上率を99%と固定して、トロリ線と負き電線NFとの強い相互インピーダンスとして表現した。具体的には、き電回路中長さ1mのブランチを特定してBTを配置し、そこではT・NF間の大きな相互インダクタンスとして表現する(図3)。この区間では電線の幾何学的位置(装柱)はすべて遠方に置き、位置による相互インダクタンスの影響を排除している。

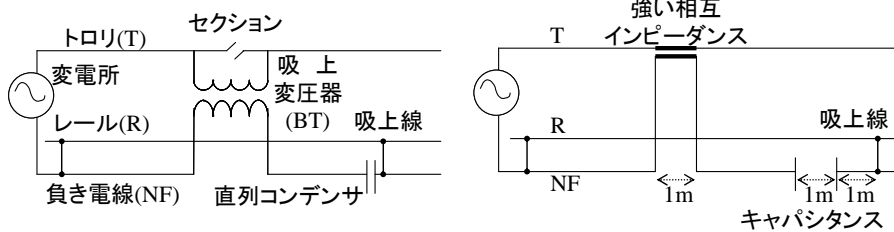


図3 BTの実現方法(左:実回路,右:計算上の表現)

4. 統合環境の開発

車両運転電力計算アルゴリズムと、交流き電回路計算アルゴリズムを組み合わせ、統合的に運用できるシミュレーション環境を開発した。

4.1 ソフトウェア構成

統合環境の画面例を図4,図5に示す。統合環境として、列車ダイヤ、車両性能、線路諸元、き電回路情報等の入力条件はすべて画面上で入力できる。一回の計算対象変電所は一箇所、指定時間帯の変電所両側き電回路と受電側の電圧、電流および電力、区間通過列車パンタ点電圧等を計算し、電力積算値および各電力最大値と最小値、区間通過列車の積算電力量等統計データも出力する。

入出力ファイルは、編集を容易にするためCSV形式とした。出力ファイルは汎用表計算ソフト等で解析を行う前提としており、本ソフトウェアとして画面上にグラフ出力等を行う機能は持たない。

4.2 計算例

(1) 車両パンタ点電圧計算

送り出し電圧を一定として一列車走行時のパンタ点電圧計算を行った結果を図6に示す。き電回路中間を走行中の7:15前後において、電圧降下が大きくなるのがわかる。

(2) 受電電力計算結果

変電所に受電電圧変動補償装置(RPC)を設置した場合の、電圧変動率補償効果を図7に示す。この例では、定められたダイヤに従って上下線列車が走行している。RPCの補償効果によって、各時間帯の電圧変動率が半減する計算結果となった。

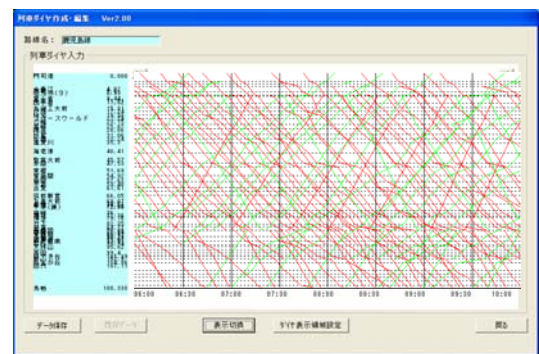


図4 ダイヤ入力画面

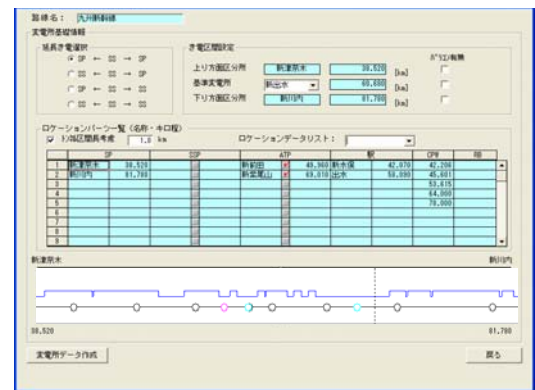


図5 き電回路ロケーション設定画面

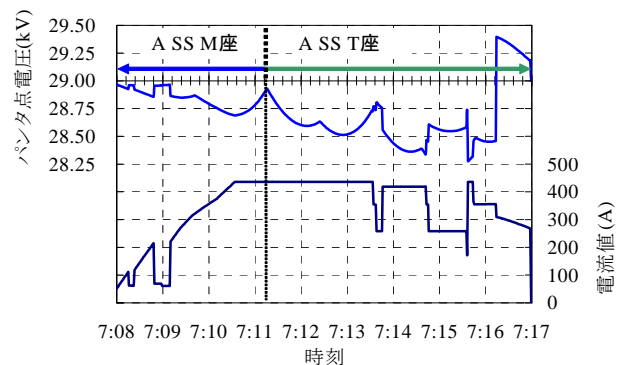


図6 パンタ点電圧計算結果

5. 計算精度

5.1. 新幹線

新幹線変電所で負荷測定を行った結果と計算結果を比較して精度を検証した。車両走行時の変電所における有効電力の測定結果と計算値を図8に示す。また、電力量測定結果と計算結果を図9に示す。新幹線の1列車走行では、測定値と計算結果はよく一致している。なお電力量については、折り返し駅での滞留列車の補機電力について考慮が必要であることがわかった。

5.2. 在来線

在来線 BT き電区間のラッシュ時間帯における変電所でのき電電流測定結果と、計算結果を比較したものを図10に示す。

- (1) ピーク電流はダイヤの乱れに左右されるため、測定結果は日毎に大きく異なり、計算とは一致しなかった。電圧降下最大値も同様である。
- (2) ラッシュ時に日中並みの最高速度で走行すると、計算電力量は実際の15%増となった。最高速度を制限して計算したところ、測定結果と同様な値となった。
- (3) 日中の電力量測定結果と計算結果の誤差は3%以下と、実用的な精度であった。

6. まとめ

車両運転電力計算と交流き電回路計算で構成される交流き電電力計算シミュレータを開発し、計算精度を検証した。

新幹線における有効電力の計算精度は十分であった。在来線では日中とラッシュ時の速度の違いを配慮することで、必要な精度を得られると考える。

一方、瞬時電流ピーク値および瞬時電圧降下の計算はダイヤ走行模擬からは難しいことがわかった。本シミュレータの場合には最悪値計算機能を活用する必要がある。

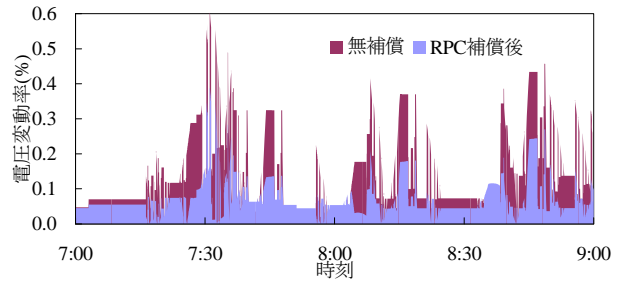


図7 受電電圧変動率補償結果

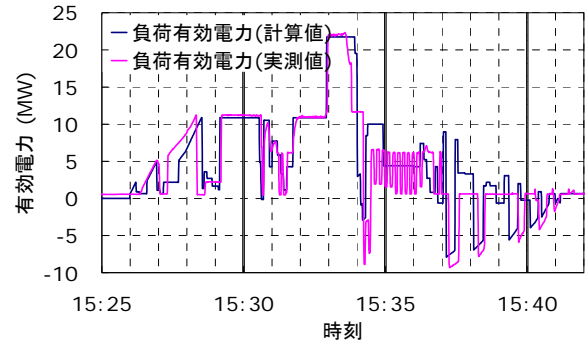


図8 新幹線電力測定結果と計算値

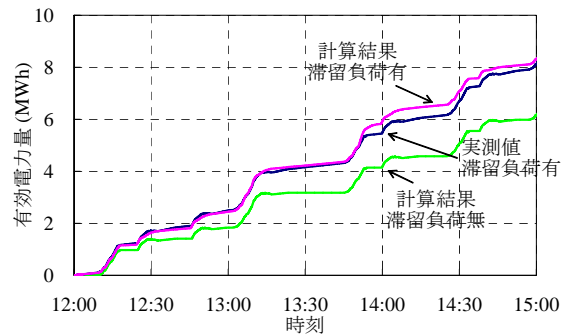


図9 新幹線有効電力測定結果と計算値

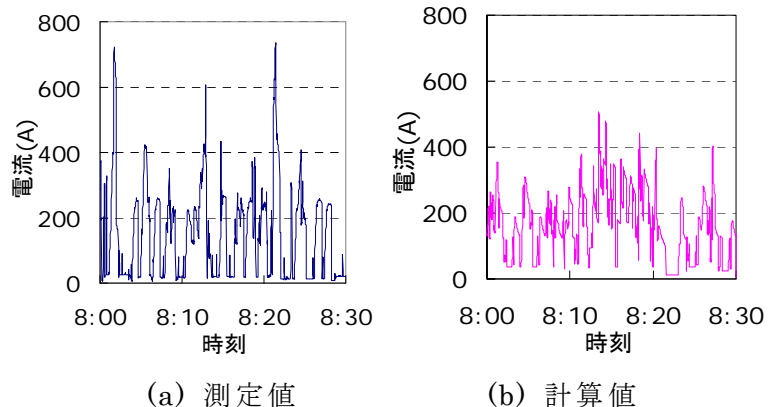


図10 在来線き電電流の測定値と計算値の比較

参考文献

- 1) 廿日出, 渡邊, 「最近の新幹線電車の走行抵抗(編成長との関係について)」, J-Rail'98