商用周波軌道回路の短絡感度計算モデルに関する考察

正 員 田 口 明 夫 (東海旅客鉄道)

Considerations on the Model for Train Detection Sensitivity Calculation of the 60Hz Track Circuit
Akio Taguchi, Member (Central Japan Railway Co.)

60Hz track circuits have been used for DC electrified conventional lines of Japan Railway. The train detection sensitivity of the track circuit is decided by its impedance and distribution. The model to calculate the train detection sensitivity is designed about 60 years ago and being applied still now. Nevertheless there are several occasion, where the model cannot be applied. For example, a short distance track circuit sometimes cannot be applied. To solve this problem, the author propose a new model and constants of the track circuit. The new type model and constant can be applied not only to the short distance track circuit, but also to a long distance track circuit including a turnout. With the help of a field measurement, the new model is proved that it can be applied all the kinds of 60Hz track circuits without any problems.

キーワード：インピーダンス配分、インピーダンスボンド、安全側動作、フェールセーフ性

1. まえがき

軌道回路とは、ある区間のレールを電気回路の一部に用い、その区間内にある列車や車両の車軸でレール間を短絡することにより、それらの存在を検知する回路、またはその区間にある列車に対してレール電流により情報を伝送する回路をいう。現在、ごく一部の区間を除いて軌道回路を利用して列車検知を行っている。軌道回路以外の方式による列車検知方式もいろいろ検討されているが、安全性、信頼性、経済性、フェールセーフ性の観点から本格的に使用されていない⁽¹⁾。

西日本地区の在来線直流電化区間には、60Hz軌道回路が多数設備されている。(東日本地区は50Hz)この通称、商用周波軌道回路は、主として列車在線情報を得るために用いられている。この列車在線情報は鉄道信号情報の中で、もっとも重要である。これは信号装置の基本論理が、列車の在線箇所に、他列車を導かないという論理で構築されているからである。このため、列車在線情報と分岐器開通方向の情報については間違いがあってはならない。特に駅構内で分岐器を包含する短小軌道回路はその軌道回路内に列車が存在しないという条件によりポイントが動作する条件が構成されてしまうことから重要性が高い。仮に誤動作が発生しても、列車在線、すなわちポイント動作不可能といった安全側動作しか許されない。そのため、軌道回路にはフェールセーフ性が要求される。

しかしながら、その列車検知性能(短絡感度)は回路全

体のインピーダンスおよびその配分によって決定される。これまで、軌道回路の短絡感度の理論計算は一般的な計算式と等価回路が用いられていたが⁽²⁾、最近、商用周波短小軌道回路において短絡感度の理論値が実測値と大きく違う事例が発見された⁽³⁾。そのため、軌道回路の短絡感度を正確に算出する新たな等価回路を提案する。これにより、これまで正しいとされていた軌道回路の等価回路の問題点を解消できた。

さらに、現在用いられている軌道回路のインピーダンスおよびその配分は、蒸気機関車の時代に決定したもので、現在の軽量短編成電車の列車短絡抵抗の実態とあっていない部分がある⁽¹⁾。そのため、実際に軌道回路を改造、十分な短絡感度を確保した。これにも、当該の新等価回路を適用できることを確認した。また、短小軌道回路以外に非短小軌道回路および単軌条軌道回路にも適用できることも検証した。本論文では以上について述べる。

2. 短絡感度

<2・1> 短絡感度と列車短絡抵抗 軌道回路は伝送路としての機能以外に列車短絡検知器の機能もある。ここで、列車短絡した場合の短絡感度と列車短絡抵抗について考えてみる。

短絡感度とは、「軌条間を無誘導性の抵抗で短絡し、軌道リレーが落下するときの抵抗値」(つまり列車在線を検知する抵抗値)を求めたものである。実際には、軌道回路の任意の箇所で短絡を行い、もっとも大きい値を短絡感度という。商用周波軌道回路では 0.06Ω 以上必要である⁽⁴⁾。

実際には、 0.1Ω 以上確保されている箇所がほとんどである。（例えばJR東海大垣信号通信区管内では232軌道回路があるが7軌道回路を除き 0.1Ω 以上確保されている）これは、蒸気機関車の時代に決定したもので、当時は相当マージンがあったが、現在はそのマージンで軽量の短編成電車に対応しているのが実状である⁽¹⁾。

列車短絡抵抗は実際の列車がレール間を短絡したときの受信電圧と同じ値になるように無誘導抵抗でその点を短絡したときの抵抗値をいう。厳密には、列車短絡抵抗ではなく等価短絡抵抗である。列車長が長い場合は同一点で短絡できないため、受電端（電化区間ではインピーダンスボンダ（軌道回路境界において信号電流と電車電流を分離する変圧器）のレール側）を短絡して等価短絡抵抗を求める。この場合、受電端等価短絡抵抗という。短絡不良が発生するのは、

$$(\text{短絡感度}) < (\text{列車短絡抵抗})$$

となるためである。まれに、このような事象が発生し、実際には列車が在線するにもかかわらず「列車無し」の条件が構成されたという事例が報告されている^{(1)~(3)}。国鉄時代、計算を十分に行ったうえで標準仕様を決定しているにも関わらず、まれにそのような事象が発生してきたが極めて珍しいため問題がないとされてきた。

<2.2> 短絡感度理論計算 軌道回路の短絡感度は機器構成、周波数、軌道回路長、いかえれば回路のインピーダンスとその配分によって決定される。

軌道回路の図1に示すように、平常時の受信電圧が V_{TR} でX点を短絡抵抗 R_s で短絡した場合の落下電圧（リレー落下電圧）を V_{TRS} 、X点から見た送受信端のインピーダンスをそれぞれ Z_{XS} 、 Z_{XR} とすると、

$$V_{TRS} = V_{TR} / (Z_X / R_s + 1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Z_X はX点から見た送受信端のインピーダンスであるから、

$$Z_X = Z_{XS} \cdot Z_{XR} / (Z_{XS} + Z_{XR}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。

列車検知受信電圧となる短絡抵抗 R_M は、

$$R_M = Z_X / (V_{TR} / V_{TRS} - 1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で求めることができ、これが短絡感度である。1000Hz付近もしくはそれ以上高い周波数帯を用いている軌道回路については減衰量のみを考慮すればいい。しかし、この商用周波軌道回路については位相の変化も考慮する必要がある。これは、商用周波軌道回路の軌道リレーは軌道回路から印加される電圧（以下T相）と電源から直接印加される電圧（以下L相）が 80° の位相差（定格値）で印加されると動作する交流2元形のリレーであるためである。商用周波軌道回路は非線形素子を含まないためレール間を短絡すると位相は遅れる。これは軌道回路が誘導性の高い回路だからである。そこで、軌道リレーの位相まで考慮したリレー落下条件（列車検知条件）を表す式を以下に示す。

$$\sqrt{\alpha} (kV_{TR} \cos(\phi - \phi_m) - kV_{TRS} \cos(\phi - \phi_m - \phi_s)) / Z_X \leq \sqrt{\alpha} (kV_{TR} \cos(\phi - \phi_m - \phi_s)) / R_s$$

ここに、 ϕ ：軌道回路動作時のT相し相の位相差、 ϕ_m ：軌道回路リレーの最大力率発生となるT相し相の位相差、 ϕ_s ：軌道回路短絡時に発生する位相遅れ、 $kV_{TR} \cos(\phi - \phi_m)$ ：リレー動作時（軌道回路扛上時／列車非在線時）に発生するトルク（ k は比例定数）、 $kV_{TRS} \cos(\phi - \phi_m - \phi_s)$ ：リレー落下時（軌道回路落下時／列車在線時）に発生するトルク、 α ：リレー部と軌道部のインピーダンス比

これを変形することにより、短絡感度 R_M を表す式は(3)式と同様のものとなり、

$$R_M = \frac{Z_X}{V_{TR} \cos(\phi - \phi_m) / V_{TRS} \cos(\phi - \phi_m - \phi_s) - 1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。これまで、商用周波軌道回路の理論計算は、図1に示しているような形でインピーダンスを見込んでいた。

図1 これまでの短絡感度理論計算モデル

Fig.1. Old type theoretical model of track circuit for train detection sensitivity calculation

[リレー動作時と落下時のT相の遅れ]

図2 60Hz軌道回路のリレー動作角度と落下時のT相の遅れ

Fig.2 Relay driving angle - track phase delay when track circuit is shunted

なお、 ϕ_s については、位相は通常遅れるため、一符号を付けてある。この位相遅れについては軌道回路の種類

(周波数・軌道回路長・構成素子・軌道環境)によって異なることが知られている。しかしながら、60Hzの軌道回路については、ほぼ25°で近似しても理論計算上まったく問題がない。その根拠としては、図2に示すとおり軌道回路構成素子・軌道回路長の異なるものの位相遅れについてはほぼ25°であることを実際に確認してある。これは現用の軌道回路素子を採用した場合である。この実測により上記の式を簡略化した。

＜2・3＞ 短絡感度理論計算の問題点 これまで行われてきた理論計算とそのモデルは前章において述べた通りである。実際にこのモデルを当てはめて理論計算を行った結果を図3に結果を示す。ここで、大きく2つに分かれる。○の軌道回路長 800m以上のものと、●の軌道回路長200m以下で分岐器を包含しているものである。

図3 60Hz軌道回路の短絡感度の実測値と理論値
Fig.3 Train detection sensitivity of 60Hz track circuit (real value and theoretical value)

図を見て解る通り軌道回路長800m以上のものについては、ほぼ理論値通りであるが200m以下のものについては理論値と大きく離れている。この理由について種々の検討を行った結果、理論式の構成上の Z_x 、つまり短絡点から送受電端を見たインピーダンスが実際よりも高く見込まれていたため実際以上の短絡感度が計算されていた可能性があるという結論に達した。これがこれまで問題にならなかったのは、車軸短絡抵抗が相当に小さく、ぎりぎりの列車検知があまり行われていなかったためである。しかし、最近の鉄道車両の軽量化、あるいは車両制動用制輪子の化学材料化により車軸短絡抵抗が大きくなり軌道回路環境が悪化している。このため、これまでほとんど発生していなかった軌道回路不正動作が発生しやすくなっている。現実には岐阜駅高架区間上において、不正動作が発見された。しかも特定の軌道回路ではなく複数の軌道回路において発見された。そのため、異常な機器使用等の特異な現象ではなく、軌道回路の構成上の問題と考えられた。なお、この現象は列車

が在線、短絡されている軌道回路が瞬間的に動作する現象である。図4にこの軌道回路のリレーのT相入力端における軌道回路短絡時の残留電圧を示す。経験的には残留電圧が100mVを超えると軌道回路不正動作が発生することがあり、短絡状態によっては危ない水準にあることがわかる。

上述のように短小軌道回路のインピーダンスを見込み、軌道回路の状態を良好とするのは若干問題がある。このため、別途新しいモデルが必要であると考えた。

図4 軌道回路リレー入力残留電圧
Fig.4 Track circuit residual voltage

＜2・4＞ 新たに提唱する短絡感度理論計算用モデル 過去のモデルの代わりに、新たな軌道とインピーダンスボンドのモデルとして図5のものを提案する。このモデルには3つの特徴がある。最大の特徴は、分岐器部について軌道回路定数を非分岐器部と別途に見込んだことである。2つ目の特徴として、インピーダンスボンドの励磁アドミタンスについては、実測値によって見込んだことである。

(過去のものは、設計時の規格値で見込んでいた) 3つ目に、リレーの材料の一つである電磁鋼板のヒステリシス性の向上により、リレーの落下電圧が規格値より高くなっているため、やはり、実測値によって見込むこととした。これらの定数のモデルへの取り込みにより、実際のインピーダンスに近似したモデル回路になった。

このモデルについて補足すると、非分岐器部のレールについては、各種定数が提案されているが、わが国の重要線区において使用しているレールは50kgあるいは60kgでほぼ統一されているため0.66Ω/km、位相角72°で統一して考えた⁽²⁾。分岐器部については今回、問題を発生させた軌道回路はすべて分岐器を包含しているという特徴があったため、その部分について着目した。分岐器部を電氣的に切り離し、短絡開放法によりインピーダンスを測定し、2次定数(特性インピーダンス・伝播定数)、1次定数(レールインピーダンス・漏れアドミタンス)の順に計算し、分岐器部の軌道回路定数を求めた。実際には、いくつかの分岐器を問題の発生させる方向に開通させておき、直流と60Hz電流を流すことにより、短絡インピーダンス Z_s 、および開放インピーダンス Z_o の実数部および虚数部を測定し、さらに測定区間長 l 、周波数 f により、特性インピーダンス Z_K 、伝搬係数 γ を、次の公式によって求めた。

$$Z_K = \sqrt{(Z_s \cdot Z_o)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma = \tanh^{-1} \sqrt{(Z_s / Z_o)} / l \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\tanh^{-1}$ は逆双曲線関数であるため、

$$\begin{aligned} \tanh^{-1} Q \angle \phi_a &= \frac{1}{2} \tanh^{-1} \frac{2 Q \cos \phi_a}{1 + Q^2} \\ &+ j \tanh^{-1} \frac{2 Q \sin \phi_a}{1 - Q^2} \dots\dots\dots (7) \\ \tanh^{-1} x r &= \frac{1}{2} \log \frac{1+x}{1-x} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここでは、 $Q \angle \phi_a$ は $\sqrt{(Z_s/Z_o)}$ に該当する。 $Q < 0.3$ の場合、 $\tanh^{-1} Q \angle \phi_a = Q \angle \phi_a$ としても、誤差は5%以内であるため、この前提によって計算しても問題は発生しない。つまり、 $Z_s/Z_o \leq 0.1$ であれば、誤差は生じないとし、

$$r = \sqrt{(Z_s/Z_o)} \dots\dots\dots (9)$$

とした。このため、

$$\begin{aligned} Z &= r Z_k \\ &= (\sqrt{(Z_s/Z_o)} / 1) (\sqrt{(Z_s \cdot Z_o)}) \\ &= Z_s / 1 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= r / Z_k \\ &= (\sqrt{(Z_s/Z_o)} / 1) / (\sqrt{(Z_s \cdot Z_o)}) \\ &= 1 / Z_o \cdot 1 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

として、算出した。

インピーダンスポンド 励磁アドミタンス 0.273-j0.033	分岐器部 Z=0.004+j0.012 Y=0.700-j2.001	直線部1kmあたり Z=0.204+j0.031	インピーダンスポンド 励磁アドミタンス 0.273-j0.033
他の構成要素は同じ(但し軌道リレー落下値は実測値とする)			

図5 新たな軌道回路インピーダンス算出モデル
Fig.5 New model for theoretical impedance calculation of track circuit

この結果、分岐器のレールインピーダンスは小さく、また、漏れアドミッタンスが大きいことが判明した。実際には在来線用16番分岐器(分岐器は大きさを番数で表現し、番数が多いほど大型となる)1台当たり(分岐器長は50m)レールインピーダンスは、 $Z=0.004+j0.012$ となり、また、漏れアドミッタンスは、 $Y=0.700-j2.001$ となる。通常のレールインピーダンスは50m当たり0.010+j0.002程度で見込まれているため、相当、回路全体のインピーダンスを見込むに当たり過去の理論計算では高く見積もっていたことが判明した。レールインピーダンスについては、分岐器はレールが複数並列して存在するため、レールの等価半径が大きくなっているためこの様な値になったと推定される。なお、これは分岐器の番数にはまったく関係なかった。また、漏れアドミッタンスについては、分岐器の構造上軌道回路電流の極性が逆の部分のレールが接近した構造とならざるをえないことが大きく影響している。この測定は、東

京方、神戸方、双方から同様に測定した定数の幾何学平均($\sqrt{a_1 a_2}$)を採用したが、実際には変化はなかったため、分岐器部は可逆回路であり、軌道回路電流方向により別々のモデル化は必要ないことが判った。図6に分岐器の番数と漏れアドミッタンスの実測値を示す。

図6 分岐器の番数と漏れアドミッタンス
Fig.6 The turnout number and its leakage admittance

分岐器で他に発生する問題としては電車線電流の帰線電流および軌道回路電流の不均衡電流があるが、分岐器の開通方向によって発生する右側レールと左側レールのレールインピーダンスの差異は実測上ほとんどないため無視する。また、レールボンド(レール継ぎ目を接続している導線)等についても無視した。これは、レール自体の定数に極めて近似していることによる。また、インピーダンスボンドの不均衡も存在しないわけではないが、実測値1%以下なのでやはり無視することとした。インピーダンスボンドの定数については、短絡・解放によって、励磁アドミッタンスを算出した。この短絡解放試験は通常時の軌道回路電流・周波数によった。また、巻き線の1次側、2次側の抵抗値及びインダクタンス値については変圧器としてのインピーダンスボンドは、その分離が難しいため、1次側=2次側とした。通常、変圧器の試験はこのような仮定で行っているため、インピーダンスボンドについても同様に行って問題がなかった。3台で測定し、平均は0.273-j0.033であった。さらに、軌道回路を構成する抵抗は完全な非誘導性

図7 新しいモデルによって算出した
短小軌道回路短絡感度と実測値の比較
Fig.7 Theoretical train detection sensitivity by calculated from new track circuit model and its real train detection sensitivity

素子とであると。リレーの条件としては、前述のようにリレーのインピーダンス特性および落下電圧を実際に測定し、そのまま採用した。これは、リレーの持っている電気的特性のうち、落下電圧が過去は0.28Vで計算していたが、実測は0.37V（位相角80°）であり、実測値を採用した。以上の様な前提条件により短小軌道回路の短絡感度理論計算を行った。この結果、図7に示すような結果となった。

<2.5> 短小軌道回路以外への本論文の提唱する短絡感度理論計算の適用 本論文で提唱する短絡感度理論計算は、60Hzの他の種類の軌道回路に適用できるか否か実際の軌道回路で検証してみた。分岐器を包含する非短小軌道回路（通常の軌道回路500m以上）この軌道回路について、東海道本線木曽川～米原間に存在する軌道回路について調査、計算、実証してみた。この結果、実測値と理論値にはほとんど差がない。非短小軌道回路については、過去のモデルでも問題はない。これは、レールインピーダンスが支配的な回路構成になっているため、他の構成要素はほとんど問題となっていないためと考えられる。その結果を図8に示す。

図8 非短小軌道回路の実測短絡感度と
今回提唱する短絡感度理論計算値
Fig.8 Real train detection sensitivity and
theoretical train detection sensitivity
calculated by new model of non-short distance
track circuit

次にインピーダンスボンドを使用しない回路構成の単軌条軌道回路についても、東海道本線穂積駅および大垣駅構内の軌道回路において調査した結果を図9に示す。この結果、非短小軌道回路あるいは、単軌条軌道回路についてもこのモデルが適用可能であることが証明された。

図9 単軌条軌道回路の実測短絡感度と
今回提唱する短絡感度理論計算値
Fig.9 Real train detection sensitivity and
theoretical train detection sensitivity
calculated by new model of single rail track
circuit

3. 新理論に基づく軌道回路改修

<3.1> 短小軌道回路への本論文の提唱する短絡感度理論計算の適用 この新理論によって事前に計算を行い、軌道回路のインピーダンスを確保し、短絡感度の高い軌道回路に改修した。東海道本線岐阜駅高架上には、現在7つの分岐器を包含する短小軌道回路があり、そのすべてに改修を加えた。改修後の軌道回路構成を図10に示す。改修の中で、共振コンデンサを撤去したのはサセプタンス分を撤去することにより短絡点から送受電側を見たインピーダンスを高くするためである。送信電圧を高くしたのは系全体のインピーダンスが高くなったためリレーを駆動させるのに必要な電圧を確保するためである。280Ωを挿入した理由はインピーダンスを高くするためであり、位相調整用コイルは280Ωの挿入により位相角が進み、リレーにおいてT相L相の適正な位相差を確保する必要があるためである。また、図11に改修後の軌道回路残留電圧を示す。残留電圧レベルが12dB低下、かつ過去不正動作を発生させたことのない50mV以下になった。

図10 改造後の軌道回路構成
Fig.10 Track circuit configuration after remodelling

図11 改造後の軌道回路残留電圧
Fig.11 Track circuit residual voltage
after remodelling

以上の様に改造を加えた結果、問題の不正動作は完全に撲滅された。そこで、実際の短絡感度と理論値がどのようになったかを図12に示す。この結果、新理論に基づいた軌道回路稼働方法は、まったく問題がない。

図12 改造後の軌道回路短絡感度新理論値と実測値
Fig.12 Theoretical train detection sensitivity by
calculated from new model track circuit and
its real train detection sensitivity

<3・2> 単軌条軌道回路への本論文の提唱する短絡感度理論計算の適用 同様に、単軌条軌道回路についても、イ

図13 単軌条軌道回路の短絡感度新理論値と実測値
Fig.13 Theoretical train detection sensitivity by
calculated from new model track circuit and
its real train detection sensitivity of
single rail track circuit

ンピーダンスを上げ下げする改造を試みたが、理論値との差はなかった。その結果を図13に示す。

4. あとがき

今回、著者は勘と経験に頼ることの多かった軌道回路調整を少しでも定量化し、かつ合理的、能率的に行うことができるように、新しい計算モデルを提唱した。これは、インピーダンスボンドの励磁アドミタンスの再測定、また、分岐器部の軌道回路定数の折り込み、リレーの特性の測定、といった手段をとった。その結果、過去のモデルではインピーダンスを高く見積もってしまうため、計算値以上に短絡感度が悪くなったが、新等価回路の採用・検討により、インピーダンスを十分に高くとることに、軌道回路の不安全側動作を防止することができた。今後JR東海においては、商用周波短軌道回路についてはインピーダンスを十分に高くとり、稼働させることとした。

今回、このモデルは商用周波軌道回路にのみ適用できることを検証した。しかし、軌道回路には分倍周軌道回路、長大軌道回路、100Hz軌道回路あるいはAF軌道回路等があり、分倍周軌道回路や長大軌道回路のように非線形素子を使用している場合は不可能であるが、それ以外の場合は適用可能なことを今後検証していきたい。最後に本研究を遂行するに当たって指導していただいた東京工業大学中野教授、鉄道総合技術研究所高重信号通信研究室長、渡辺主任研究員、大垣信号通信区各社員の外、太郎丸真氏に深く感謝します。

(平成6年5月6日受付、平成7年2月16日再受付)

参考文献

- (1) 高重：「軌道回路のはなし」、信号保安 Vol.38 No.11 ~ Vol.40 No.5
- (2) 板倉：「軌道回路」、信号保安協会 昭和50年10月
- (3) 田口：「商用周波短軌道回路の短絡感度向上対策について」電気学会 交通・電気鉄道研究会 平成5年12月
- (4) 東海旅客鉄道：「信号設備設計施工指針」昭和62年4月

田口 明夫 (正員) 1962年11月7日生まれ。86年3月東京工業大学経営工学科卒業。88年4月東海旅客鉄道入社。主として、軌道回路、電動油圧式直接鎖錠転てつ装置の研究、開発、操業に従事。現在、技術本部主席。