

長距離き電に適応したき電回路用保護継電器の開発

久水 泰司* 兎束 哲夫* 森本 大観*
金子 利美** 出口 寛**

Development of New Protective Relay for Long Feeding Circuit

Yasuji HISAMIZU Tetsuo UZUKA Hiroaki MORIMOTO
Toshimi KANEKO Hiroshi IDEGUCHI

All Shinkansen power feeding systems are provided with protective relays which immediately detect the faults in power feeding circuits. The protective relay is built by considering power feeding distance as 30 km or less. However, in case of the Shinkansen lines built from now on, the power feeding distance may occasionally become longer than 30 km, because the substation or sectioning post may be constructed in mountainous district. In that case, the current protective relay may be unable to be used. Therefore, the authors have developed a new protective relay based on a principle different from the past. The developed protective relay can be adjusted to feeding distance of more than 30 km. This paper describes the principle and verification test results concerning the newly developed protective device.

キーワード：整備新幹線，保護継電器，距離継電器，交流ΔI形故障選択継電器，差電圧保護方式

1. はじめに

従来の新幹線き電回路保護システムは、き電距離が20～30km程度であることを前提として構築されている。一方、今後建設が計画されている整備新幹線においては、山間部等に変電所やき電区分所が建設されることから変電所やき電区分所がほぼ一定の間隔で建設できず、結果的にき電距離が長くなる可能性がある。その際、変電所から離れた箇所における地絡・短絡故障といったき電回路の故障に対しては回路のインピーダンスが増加することにより従来の保護継電器では原理的に検出できない可能性がある。そこで、30km以上のき電距離に適応したき電用保護継電器（以下「長距離き電用保護断電器」と呼ぶ）の開発を行ったので以下に報告する。

2. 新幹線のき電回路と従来の保護方式

新幹線のき電回路には、単巻変圧器（AT：Auto-Transformer）を用いたATき電回路と呼ばれるき電回路が採用されている。図1に示すように電力会社から受電した三相交流は変電所（SS）のき電用変圧器（スコット結線変圧器，あるいは変形ウッドブリッジ結線変圧器）

で2つの単相交流に変換される。ATき電回路は、トロリ線とき電線でき電区分所（SP）まで電力を送電するもので、電気車に対しては変電所および一定距離（通常は10km）ごとに設置されたATにより電力が供給される。ATき電回路では電気車電圧の2倍の電圧で電力を送電できることに加え、レールに流れる電流の範囲を限定することで大地帰路の電流が低減でき通信誘導障害を抑制することができるという利点がある。

き電回路における故障検出は、従来、距離継電器（以下44F）と交流ΔI形故障選択継電器（以下50F）を組み合わせで行ってきた。図2は故障時のき電回路を簡略化して表したもので、電源とき電用変圧器のリアクタンス X_0 、き電回路の故障点までのインピーダンス $Z=R+jX$ 、故障点抵抗 R_g の直列回路で表わされている。

変電所で検出されるき電電圧 V_s とき電電流 I およびその間の位相差から、変電所から見たき電回路全体のイン

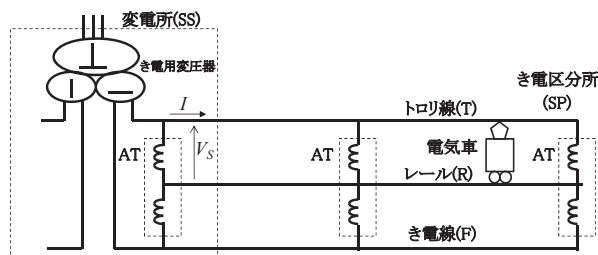


図1 ATき電回路（上り線のみ）

* 電力技術研究部（き電）

**（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構

特集：電力技術

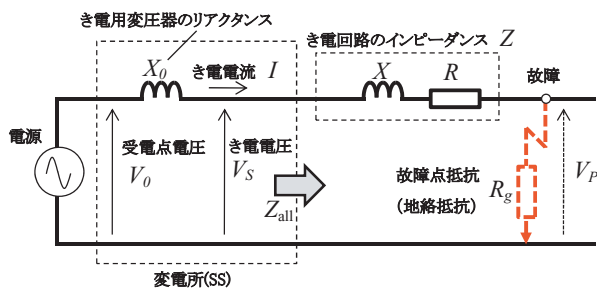


図2 故障時のき電回路のモデル

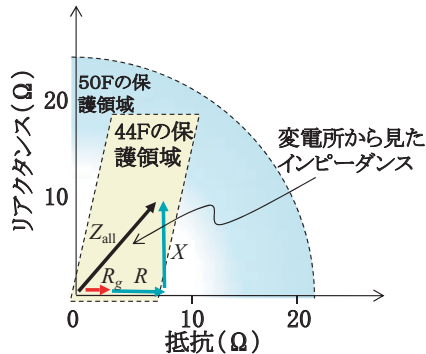


図3 インピーダンス平面上の保護領域

ピーダンス Z_{all} を検出することが可能であるが、44Fはこの Z_{all} を構成する抵抗成分とリアクタンス成分がある範囲になった段階で故障と判断する。図3に44Fの動作状態を示すために横軸を抵抗成分、縦軸をリアクタンス成分とするインピーダンス平面を示す。44Fは、検出値が図3に示すインピーダンス平面上の「44Fの保護領域」の内側に存在した場合に故障と判断し、外側に存在する場合は、無負荷状態あるいは電気車等の負荷が存在するものと判断する。44Fは、故障点抵抗 R_g が 10Ω まで検出できることを目標としているが、これは、地絡故障等の検出を目的に電気設備が電気設備技術基準で定められたA種接地(10Ω 以下)で接地されていることを前提としている。また、電気車が切替セクション等を通過する際に車両の変圧器の励磁突入電流等により44Fが不要動作するのを防止する目的で、基本波周波数の2倍の周波数の電流が一定割合以上検出された場合にはロックをかける対策(第2高調波ロック)がとられている。自励式整流器を搭載した電気車(PWM制御車)負荷に対しては、力行中ではリアクタンス成分が非常に小さく見えるため、ほぼ横軸(抵抗軸)に沿った抵抗成分として検出される。

一方、50Fは、一定時間内のき電電流の変化量が閾値(整定値)以上になった場合に故障と判断するもので、電気車電流では一定時間あたりの電流変化量は小さく、故障電流では変化量が大いことを利用している。50Fが故障と判断する閾値を $1200A$ 程度とした場合、これをインピーダンス平面上で表すと図3に示す「50Fの保護領域」となる。所定のき電電圧のもとで、故障回路のイン

ピーダンスが「50Fの保護領域」以下であれば整定値以上の電流変化量が検出され、50Fは故障と判断する。しかしながら、整定値を超過しても電気車電流のように緩慢な電流変化である場合には故障とは判断しない。

以上、き電回路の保護はこれまで検出方式の異なる44Fと50Fにより行われてきたが、図3からも推測可能なように、き電距離が長くなるにつれてき電回路の R と X が大きくなり、故障時の Z_{all} は44Fおよび50Fの保護領域の外側になる。一般に44Fと50Fにより保護可能なき電距離は約 $30km$ とされており、これを超える場合には保護が行えないことがある。

3. 長距離き電用保護継電器

長距離き電回路において従来の保護継電器を使用する場合には、44Fや50Fの保護領域を広げる必要があるが、電気車に搭載された変圧器の励磁突入電流等で44Fが不要動作したり、電気車負荷と故障電流の電流変化量の差が小さくなることにより50Fが整定できなくなるといった不都合が生じる。これは、変電所で検出される電圧や電流を用いての保護の限界を示すもので、長距離き電に対しては、別の原理に基づく保護方式が必要となる。

3.1 故障検出原理

電気車負荷が存在する場合と故障が存在する場合についてそれぞれSSとSPで検出される電圧(トロリ線とレール間電圧)の概念図を図4に示す。電気車負荷存在下において変電所で検出される電圧を $|V_{S-T}|$ 、SPで検出される電圧を $|V_{P-T}|$ とし、故障下において変電所で検出される電圧を $|V_{S-g}|$ 、SPで検出される電圧を $|V_{P-g}|$ とする。

電気車はパンタ点電圧が $20kV$ 以下になると集電電流を絞る制御を設けているため、複数の電気車が同一き電回路に存在しても、電気車負荷存在下ではSPで検出される電圧 $|V_{P-T}|$ は $20kV$ 以下になることはない。故障下では、故障回路を流れる電流と故障点抵抗による電圧が検出されるが、電気車負荷に比べてSPで検出される電圧 $|V_{S-g}|$ は低くなる($|V_{S-T}| > |V_{S-g}|$)。

電気車負荷が存在する場合と故障が存在する場合のSP

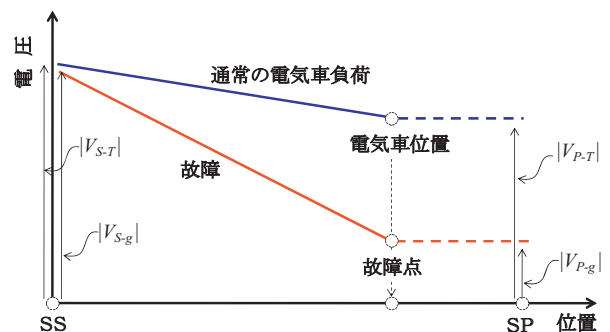
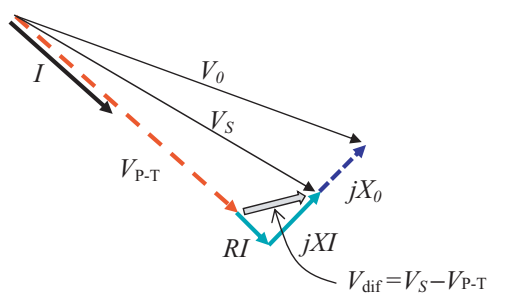


図4 変電所とき電区分所で検出される電圧

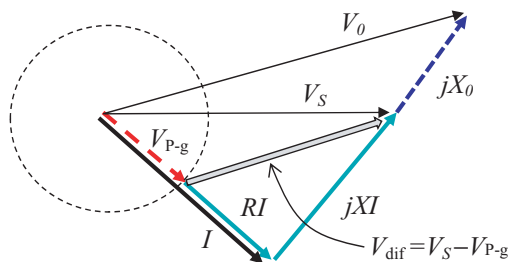
でのそれぞれの電圧差は変電所から遠方になるほど大きくなる傾向がある。長距離き電回路においては、これを利用して故障検出が可能である。原理的にはSPで検出される電圧が20kV以下になった段階で故障と判断し、変電所に連絡遮断信号を送信して保護することが可能である。しかしながら、変電所がき電停止している場合や、変電所のき電電圧が急激に変動した場合においてもSPの電圧は20kVを下回る可能性があることに加え、SPからSSに対して連絡遮断信号を送信した後、SSのき電用遮断器が開放されるまでに時間を要するため、信頼性という点で課題が残る。

そこで、SSとSPで検出される電圧ベクトルの差（以下「差電圧ベクトル」、大きさを「差電圧」と呼ぶ）を利用した故障検出手法を提案する。

先に図2に示した回路において故障点に電気車負荷が存在する場合と故障が存在する場合のそれぞれについて電圧・電流ベクトルの関係を図5に示す。図5(a)は1編成の電気車負荷存在下における電圧・電流ベクトルの関係を、図5(b)は故障下における電圧・電流ベクトルの関係を示す。 V_{P-T} 、 V_{P-g} は図4に示したSPで検出される電圧に対応する電圧ベクトルで、PWM制御車両では力率が1.0であるため V_{P-T} は電流ベクトルと同方向となる。また V_{P-g} はSPで検出される故障点電圧に対応しており、これは故障点抵抗 R_g の端子間電圧に等しい。図5からわかるとおり、SSとSPにおける差電圧ベクトル V_{dif} は、き電電圧 V_S と V_{P-T} または V_{P-g} の差と考えることができる。この検出方法によると差電圧ベクトルの大きさが一定値以上になった段階で故障と判断することになるが、SSの停電や電圧変動に対しても不要動作がなく、さ



(a) 電気車負荷存在下の差電圧ベクトル



(b) 故障下の差電圧ベクトル

図5 差電圧ベクトルを利用した故障検出原理

らに遠方での故障ほど検出感度が向上する可能性がある。

当然のことながら、この保護方式ではSPで検出された電圧ベクトルをSSに送信する必要があり、このために高速な光通信手段を必要とする。さらに原理的にSS近傍の故障に対しては感度が低下するため、従来の保護継電器と併用する必要がある。

実際のき電回路は図2に示した単純な回路ではなく図6に示すとおり、トロリ線(T)とレール(R)とき電線(F)で構成されている。このため、故障種別としてはT相故障(T-R間またはT-E(大地)間)、T-F間故障、F相故障(F-R間またはF-E間)が存在する。こうした複数の故障に対してT-R間の差電圧ベクトルの検出だけでは、F-R間故障やF-T間故障が検出できない可能性があるため、電圧の検出は図6に示すようにT-F間電圧(V_1 、 V_2)で行うのが実用的である。例えば、ATの中間でT-RとF-Rの故障が発生した場合、電圧ベクトルの大きさは中性点電位が異なるため、F-R間の方が大きい値になる。つまり、整定値はF-R故障で高い方に合わせることになるため、結果的に検出感度が低下することになる。

実際の故障検出に用いる差電圧ベクトルは図6に示すとおりT-F間の電圧を用いるが、SSやSPで電圧を検出する計器用変圧器はT-R間にしかない。そこで、ATの漏れインピーダンス Z_{AT} による誤差を補正する目的でSSおよびSPそれぞれのATの吸上電流(I_{AT-S} 、 I_{AT-P})を検出し、(1)式を用いてT-F間の電圧ベクトル(V_1 、 V_2)を算定する。

$$\begin{cases} V_1 = 2(V_S + I_{AT-S} \cdot Z_{AT}) \\ V_2 = 2(V_P + I_{AT-P} \cdot Z_{AT}) \end{cases} \quad (1)$$

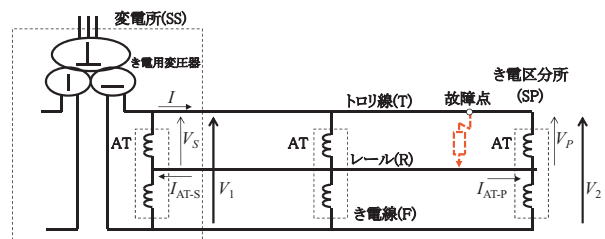


図6 差電圧ベクトルの検出

3.2 故障種別の判定

従来の保護継電器では、故障種別(T相、F相、T-F間故障)の判定は原理的に行えなかった。しかしながら、電圧ベクトルを光通信回線で送信する際に、各ATポスト(ATP)等で検出される電流の情報も併せてSSに送信することで、故障種別の判定を行うことができる。

図7に、ATPの中間で発生した故障電流の分布を示す。左側のATPで検出される電流ベクトル I_{t1} 、 I_{r1} と右側のATPで検出される電流ベクトル I_{t2} 、 I_{r2} を変電所に伝送することで表1に示す電流検出の有無による判別条件から

特集：電力技術

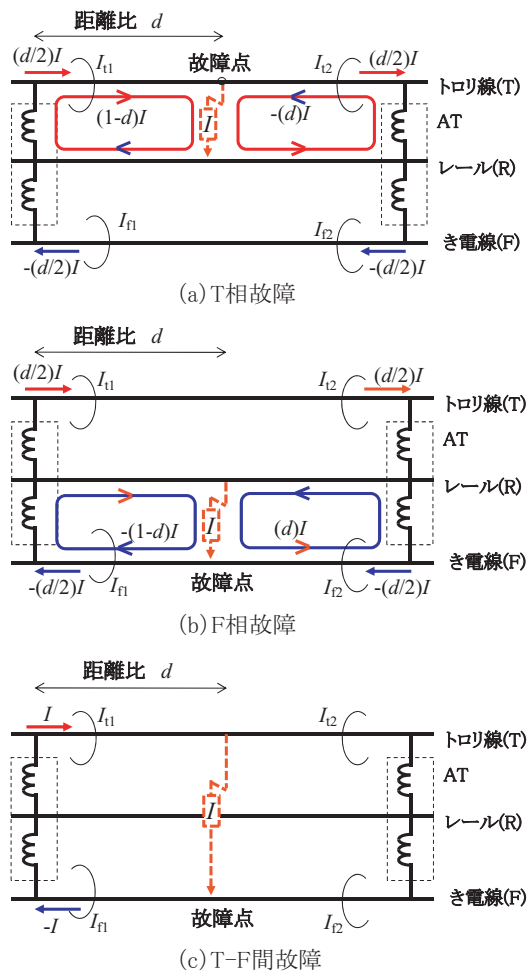


図7 故障下のき電回路の電流分布

表1 故障種別の判定

故障種別	判別条件	
	$I_{11} - I_{12}$	$I_{21} - I_{22}$
T相故障	有	無
F相故障	無	有
T-F間故障	有	有

※電流が検出される場合を「有」、検出されない場合を「無」とする

故障種別を判定することができる。なお、図7では左から右に向かって流れる電流の向きを正とし、ATPの距離は距離比 d ($=0 \sim 1.0$) で表す。

図7 (a) のT相故障の例では、 $I_{11} - I_{12} = (1-d/2)I + (d/2)I$ 、 $I_{21} - I_{22} = -(d/2)I + (d/2)I$ となるため、 $I_{11} - I_{12}$ は「有」、 $I_{21} - I_{22}$ は「無」となる。同様に図7 (b) のF相故障の例では、 $I_{11} - I_{12} = (d/2)I - (d/2)I$ 、 $I_{21} - I_{22} = -(1-d/2)I - (d/2)I$ となるため、 $I_{11} - I_{12}$ は「無」、 $I_{21} - I_{22}$ は「有」となる。さらに図7 (c) のT-F間故障の例では、 $I_{11} - I_{12} = I$ 、 $I_{21} - I_{22} = -I$ となるため、 $I_{11} - I_{12}$ は「有」、 $I_{21} - I_{22}$ も「有」となる。

なお、上下線の故障判定については、き電電流の比較により行っている。

実際にはSPの計器用変流器の位置はATの外線側にあり、SSはATの電源側にあるため換算が必要である。また、 $I_{11} - I_{12}$ と $I_{21} - I_{22}$ の電流差をとることから、これを「差電流」と呼ぶ。

さらに、差電流は変圧器の励磁突入電流による保護継電器の不要動作を防止する第2高調波ロックおよび保護継電器を一定電流以下では動作させないための最小動作電流 (LOC) にも使用されている。

3.3 光ファイバによる伝送

本方式では距離が離れた箇所でも同時に電圧および電流を伝送する必要があるため、光ファイバの通信伝送が必要である。

SSおよびSP間は光ファイバを用いた光PCM通信を使用し、2点間の同期を取ることににより、両者間の現象を同時に検出可能とした。

伝送する瞬時値要素を以下に示す。

- (a) トロリ線電流
- (b) き電線電流
- (c) トロリ線とき電線間電圧

なお、瞬時値の伝送を必要としない、電気車負荷データ (最大差電圧、最大差電流等)、保護動作時の故障波形、差電圧・差電流値、保護装置の稼動状態監視信号等はHUBによる光Web通信を用いることが可能である。

3.4 長距離き電用保護継電器

以上述べた検出原理に基づき試作した長距離き電用保護継電器の外観を図8に示す。電圧・電流入力は配電盤に設けられた補助VTおよび補助CTの二次側回路を用いる。また、SS、SPに設置した保護継電器 (図8) は双方が光ファイバで接続される。

動作ブロックを図9に示す。差電圧および差電流は、1サイクルを12分割した30度サンプリングを行い基本波



図8 長距離き電保護継電器の外観

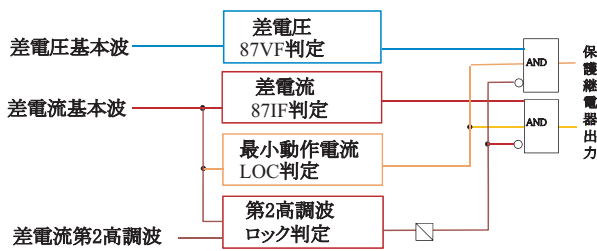


図9 長距離き電用保護継電器の動作ブロック図

1 周期間の時間で保護を行っている。なお、差電圧要素を 87VF、差電流要素を 87IF と仮称する。

4. フィールド試験結果

SS と SP 間のき電距離が 25km のき電回路で、試作した長距離き電用保護継電器を仮設し、列車走行による測定を行った。また、低圧電源を用いた低圧人工故障試験を実施した。

4.1 電気車負荷による検出特性

電気車負荷が存在する条件で測定した SS と SP 間の差電圧ベクトルの大きさ (差電圧) とそのときのき電回路電流 (初き電時を除き電気車電流と等価) の最大値をプロットした結果を図 10 に示す。

初き電時を除き、き電回路電流が最大 600A の時に差電圧の最大値は 1,800V であった。また、初き電時にはき電回路に AT の励磁突入電流が発生しているが差電流に含まれる第 2 高調波ロックの機能により不要動作はなかった。

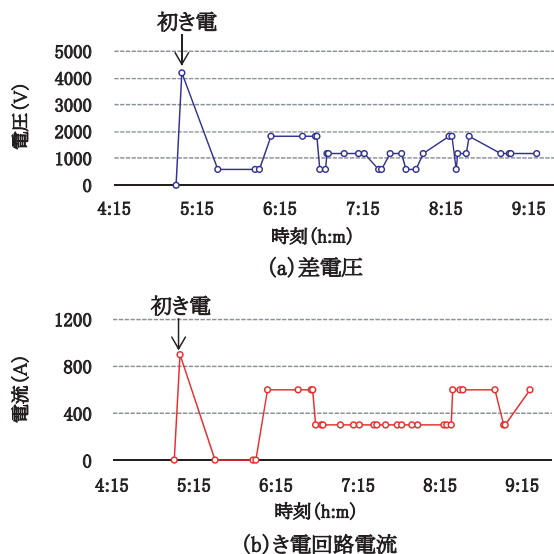


図 10 電気車負荷における差電圧とき電回路電流

4.2 低圧人工故障試験

SS から 20A 程度の故障電流が流れる電圧源を用いて短絡故障 (地絡 (0 Ω) 故障と等価) を模擬した低圧人

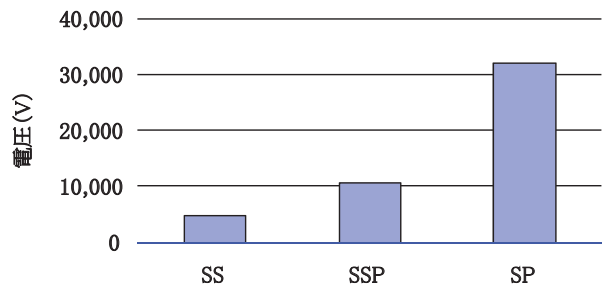


図 11 低圧人工故障試験における差電圧 (換算値)

工故障試験を行った。なお、SS と補助き電区分所 (SSP)、SP の全 3 箇所にて全て AT がある場合と SSP の AT が無い場合について試験を実施した。短絡箇所は、SS、SSP、SP の 3 箇所とした。

保護継電器の整定値は、30kV 系換算で差電圧 3,000V、差電流 600A、故障線種判定 600A、LOC (最小動作電流) 600A、第 2 高調波抑止 12% とした。

試験の結果、保護継電器の動作時間は目標の 100ms に対して 54ms ~ 61ms であった。

また、AT 間隔が長いき電回路の故障を模擬する目的で、き電回路の中間に位置する SSP の AT を切り離し、SS と SP 間の T-R 短絡故障 (T-地絡 (0 Ω) と等価) 点の位置を変化させて差電圧を測定した。結果を図 11 に示す。なお、図 11 に示す電圧値は、実際のき電回路の電圧値に換算されている (30kV 系)。短絡箇所が変電所より遠方になるほど、差電圧が大きくなることを確認できる。これは、差電圧ベクトルを用いた保護継電器が、遠方で発生する故障に対して有効であることを表すものである。

5. 整定値の考え方

長距離き電用保護継電器の整定値は、不要動作を避けるため、列車負荷の差電圧値より大きく、故障時の差電圧値より小さい値に整定する必要があるが、適切な整定値については不明な部分が多い。そこで、シミュレーションにより整定値について検討を行った。

5.1 計算条件

検討の対象としたき電回路は、AT 間隔が 10km で、き電距離が 30km、40km、50km、60km、70km の 5 種類とし、き電方式は末端の SP で上下線を接続する上下タイ方式とした。なお、回路定数は、全線が明かり区間であることを前提に定めた。

故障点は末端の AT と保護線接続箇所 (CPW) との中間点とし (インピーダンスが最大になる)、故障種別は T-R 短絡故障 (T-地絡 (0 Ω))、T-F 短絡故障 (T-F 短絡)、T 相の 5 Ω 地絡故障 (T-地絡 (5 Ω)) および 10 Ω 地絡

特集：電力技術

故障（T-地絡（10Ω））とした。

電気車走行時については、集電電流 500A（力率 1.0）の電気車が3編成存在するものとし、それぞれの位置は、上り線の末端AT、下り線のCPWの中間点とそれからSS側に 10km 離れた地点とした。

5.2 計算結果

故障時の計算結果を図12に、電気車走行時の計算結果を図13に示す。今回の計算条件のもとにおいては、故障時、電気車走行時ともにき電距離が長くなるほど差電圧が大きくなることが確認できる。特に差電圧が最も大きくなるのはT-F短絡で、逆に最も低くなるのはT-地絡（10Ω）である。なお、図13で電気車のパンタ点電圧が20kVを下回っているがこれは、計算の都合上、20kVを下回っても電気車は集電電流を絞りに込まないためである。

以上の計算結果に基づき整定値を、電気車走行時の差電圧より大きく、故障時の差電圧より小さくなるように決めると、図14の結果が得られる。例えばき電距離が50kmの場合、T-地絡（10Ω）故障の差電圧が10.6kV、列車による差電圧が7.1kVであったことから、整定値は10kV程度が適切と判断される。

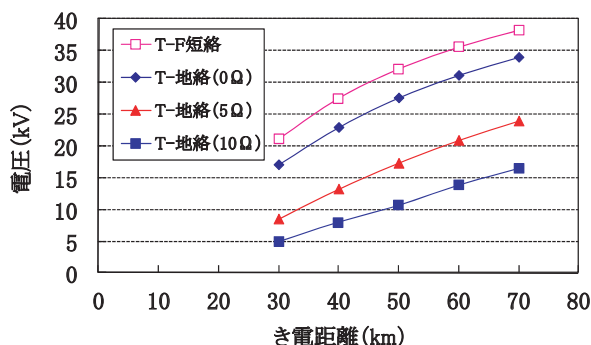


図12 故障時の差電圧

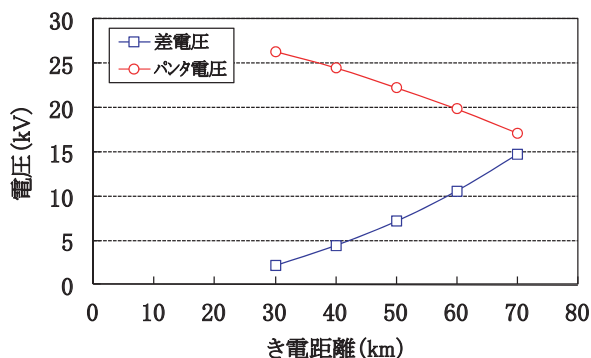


図13 電気車走行時の差電圧

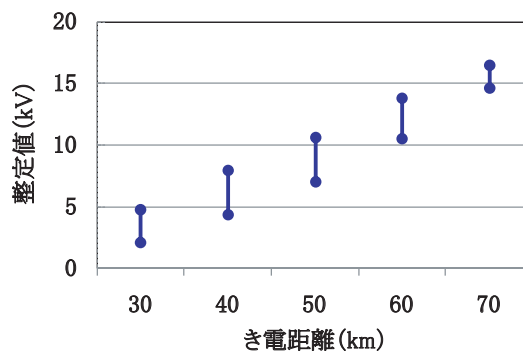


図14 保護継電器の整定範囲

6. まとめ

長距離き電に対応した新しい保護継電器の原理および検証試験結果について報告した。

この保護継電器の検出特性について、現状の回路定数においては、き電距離が長くなるほど検出性能が上がることを計算等により確認した。また、試作した長距離き電用保護継電器を光ファイバで結びリアルタイムにデータ伝送を行いながら、電気車負荷および低圧人工故障により動作確認を行うことで保護継電器としての性能を確認した。

謝辞

フィールド試験に多大なご協力を頂いた九州旅客株式会社殿に感謝の意を表します。

文献

- 金子, 秋田, 兎東, 久水, 持永, 上村, 増山, 福田「長距離き電に対応した保護方式」平成20年度電気学会全国大会, No.5-070, 2008
- 電気鉄道ハンドブック コロナ社 2007年2月28日
- 久水, 持永, 戸田, 井桁, 藤田, 上村「高力率電気車に対応した交流き電用保護継電器の開発」平成12年鉄道技術シンポジウム J-RAIL
- 持永, 久水, 大久保, 尾田, 久場「交流電気鉄道用保護領域変更形距離継電器の開発」平成4年電気学会論文誌B部門
- 久水, 兎東, 森本, 金子, 出口, 上村, 福田(恭), 福田(和), 松井, 増山「長距離き電に適したき電用保護継電器の開発」平成21年鉄道技術シンポジウム J-RAIL