

S 状ホーン補助ギャップによる 電車線路地絡保護の信頼性向上

安喰 浩司* 森本 大観*

Reliability Improvement of Ground Fault Protection System in AC Feeding System Using an S-Type Horn Attachment Gap

Kohji AJIKI Hiroaki MORIMOTO

Insulation of an insulator used in electric railroad sometimes breaks down by surface dirt of an insulator or contact with a bird. The insulator breakdown derives a ground fault in feeding system. In order to prevent the damage by ground fault, insulators of negative feeder and protective wire have been equipped with an S-type horn up to the present. However, a concrete pole breaks down at the time of the ground fault because a spark-over voltage of the S-type horn is higher than a breakdown voltage of a concrete pole. Further, the S-type horn installed in the steel tube pole does not discharge, because the earth resistance of a steel tube pole is very small. We judged that we could solve these troubles by decreasing the power frequency spark-over voltage of the S-type horn from 12kV to 3kV. Accordingly, we have developed an attachment gap that should be used to decrease the power frequency spark-over voltage of the S-type horn from 12kV to 3kV.

キーワード：電気鉄道，交流き電回路，地絡，S 状ホーン

1. はじめに

交流き電方式電車線路の絶縁は、がいしによって構成されているが、台風による急速汚損やカラス等の鳥の接触あるいは飛来物により、がいしせん絡となり地絡事故が発生する場合がある。当初採用されたせん絡導線方式と呼ばれる地絡保護方式では、がいしは特別高圧部と高圧部に分かれ、その境界部と負き電線 (NF) をせん絡導線で接続していた。しかし、せん絡導線の配線作業が煩雑になること、電車走行に伴う振動によるせん絡導線の素線切れが発生すること、および取り付け工事費が高いという欠点があった¹⁾。そのため在来線の駅構内および車両基地において商用周波放電開始電圧が $2.5\text{kV}_{\text{rms}}$ の電力用保安器を用いた保護地線方式 (FW 方式) が採用され、駅と駅の間点においては在来線および新幹線とも S 状ホーンと呼ばれるアークホーンを用いた放電間隙方式 (以下、S 状ホーン方式と略す) が採用されるようになってきた。しかし S 状ホーン方式はコンクリート柱の絶縁強度とホーン放電開始電圧との協調が十分でないこと、あるいは近年使用されるようになってきた鋼管柱の接地抵抗と S 状ホーン放電開始電圧との協調が十分でないことから、地絡故障時のコンクリート柱の損傷や地絡点付近の弱電機器への影響が懸念された。これらに対し

著者らは、コンクリート柱の絶縁特性および鋼管柱の接地抵抗等を調査することにより、S 状ホーンの適正な放電開始電圧は約 3kV_{rms} であることを求め、さらに S 状ホーンの放電開始電圧を従来の 10kV_{rms} 以上から 3kV_{rms} に低下させる、放電管とバリスタを直列に接続した S 状ホーン補助ギャップ (以下、補助ギャップと略す) を開発した。

2. 地絡保護方式

2.1 地絡保護の基本的考え方

図1に地絡故障時の電流経路を示す。交流き電回路は、トロリ線とレール間に負荷である電車が接続される非接地の単相交流回路である。しかし、レールと大地間の抵抗 (レール漏れ抵抗) は 1km あたり晴天時で $50\Omega \sim 100\Omega$ 、雨天時で $5\Omega \sim 10\Omega$ (新幹線) であるため²⁾、不安定な抵抗接地系とみなすことができる。したがって交流き電回路で地絡故障が発生すると、電流は故障点の接地抵抗を介して大地に流れ出し、大地に流れ出した電流はレール漏れ抵抗を介してレールに戻ってくる。このため故障点の対地電圧上昇、あるいはレールの対地電圧上昇が生じるので、人体の感電や低圧・弱電機器の損壊の危険が発生する。これらを防止するには地絡故障時にできるだけ電流が大地に流れ出さないようにすることが有効である。そのため交流き電回路における地絡保護方式は、地絡故障を短絡故障に移行させる方式を基本としている。

* 電力技術研究部 (き電)

特集：電力技術

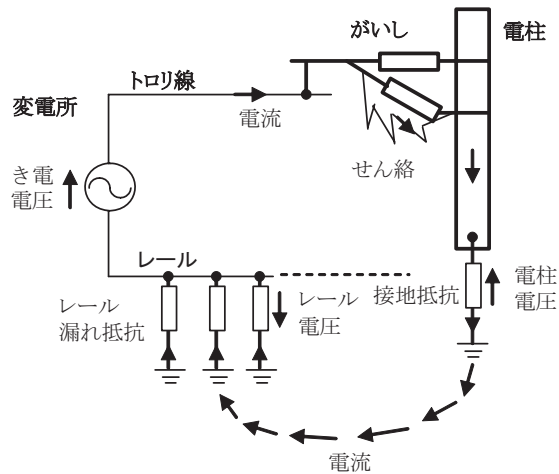


図1 地絡故障時の電流経路

2.2 せん絡導線方式

がいしは特別高圧部と高圧部に別れ、その境界部と負き電線 (NF) をせん絡導線で接続する。この方式においてがいしせん絡が発生すると、故障電流はせん絡導線を通してNFに流れ変電所に戻る。したがって故障電流が大地に流れることはなく、故障箇所の対地電圧上昇を防止できるが、がいし以外の箇所での地絡故障に対しては有効に機能しない¹⁾。なお、以上はBTき電方式におけるせん絡導線方式であるが、ATき電方式の場合は、せん絡導線を保護線 (PW) に接続する。

2.3 S状ホーン方式

図2にS状ホーン方式を示す。NFまたはPWを懸架するがいしに放電間隙が5mm程度のS状ホーンと称するアークホーンが設けられている。S状ホーン的一端は電柱に、もう一端はNFまたはPWに接続する。がいしせん絡時は電柱等の支持物の対地電圧上昇により瞬時にS状ホーンが放電し、故障電流の大半はNFまたはPWに

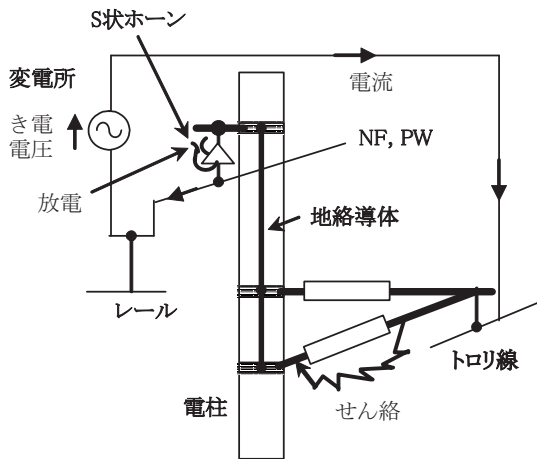
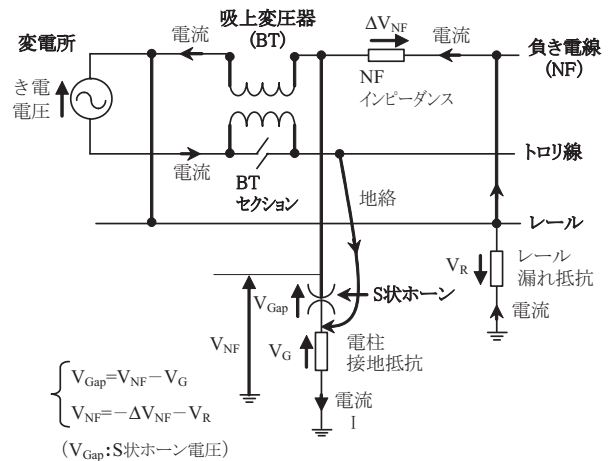
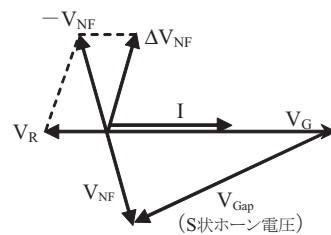


図2 S状ホーン方式

流れるので大地への地絡電流による電圧上昇は大きく抑制される。S状ホーン方式はがいしせん絡以外の地絡故障に対しても有効であるが、電車線電圧が瞬時、直接電柱等の支持物に印加されることになる³⁾。図3はBTき電回路において地絡故障が発生した場合の、S状ホーン電圧 (V_{Gap}) の発生原理を示したものである。故障電流は故障点から大地に流れ出し大地からレールに戻るの、故障点の電柱に発生する電圧 (V_G) の極性を正とすると、レールには負極性の電圧上昇 (V_R) が発生する (図3 (a))。S状ホーン電圧は電柱電圧とNF対地電圧の差となり、NF対地電圧は吸上げ線箇所のレール電位にNFの電圧降下が加算された値となるので、S状ホーン電圧は図3 (b) のようなベクトル図で表される。なおATき電回路の場合のS状ホーン電圧は電柱電圧とPW対地電圧の差となり、PW対地電圧は吸上げ線箇所のレール電位にPWの電圧降下が加算された値となるので、そのベクトル図は図3 (b) と同じような形となる。S状ホーンによる地絡保護効果の例を図4に示す。これは新幹線電車線路において構成した地絡故障回路に交流400V電源を用いて電流を流し、レール電位等を測定した結果を実際のき電電圧系に換算した結果である。故障点の電柱は接地抵抗が2Ωの鋼管柱であるが、保護装置がない場合に比べ地絡電流およびレール電位は約20%以下に抑制される。



(a) 地絡故障時のS状ホーン電圧



(b) 地絡故障時S状ホーン電圧のベクトル図

図3 地絡故障時のS状ホーン電圧の発生原理

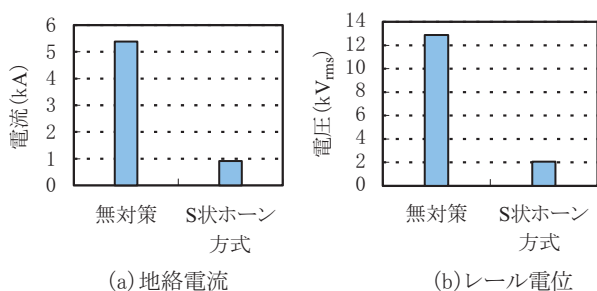


図4 S状ホーン保護効果の例

3. S状ホーンの放電開始電圧

S状ホーンの外観を図5に示す。懸垂180mmがいしのクレビス部に下部ホーンを取り付け、キャップ部に上部ホーンを取り付ける構造になっている。ホーン間隙長の調整はキャップ部に取り付けた上部ホーンを水平に回し、所定の間隙長に合わせてナットを締める方法により行う。S状ホーンの間隙長と商用周波放電開始電圧の関係を実測により求めた。試験は懸垂がいしのキャップ部を接地し、クレビス部分に商用周波電圧を印加することにより行った。電圧印加は、電圧を0Vから一定の速度で放電するまで上昇させる電圧上昇法⁴⁾により行った。また試験回数は同一間隙長で10回行い、5%値、50%値、95%値を求めた。求めた商用周波放電開始電圧を表1に示す⁵⁾。示した値は測定値を標準大気状態(20°C, 1013hPa)での値に換算した値である。現在、S状ホーンの間隙長は標準的に在来線で4mm、新幹線で4.5mmである。したがって以上の結果からS状ホーンの商用周波放電開始電圧(50%値)は在来線で10.4kV_{rms}、新幹線で11.5kV_{rms}となる。

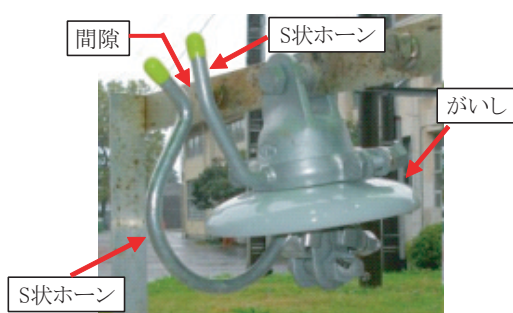


図5 S状ホーンの外観

表1 S状ホーンの商用周波放電開始電圧

ホーン間隙 (mm)	50% (kV)	5% (kV)	95% (kV)	標準偏差 (kV)
0.5	1.99	1.92	2.06	0.03
1	3.31	3.19	3.43	0.06
2	5.72	5.57	5.88	0.08
3	8.15	7.87	8.42	0.14
4	10.37	10.19	10.56	0.09
5	12.72	12.38	13.07	0.17

4. S状ホーン放電開始電圧の適正值

4.1 コンクリート柱の場合

電車線路のコンクリート柱でがいしせん絡が発生すると、S状ホーン方式では電車線電圧が突然印加的(突印的)にコンクリート柱に印加されるため、コンクリート柱は絶縁破壊する可能性がある。したがってコンクリート柱におけるS状ホーン放電開始電圧の適正值は、コンクリート柱が絶縁破壊しない範囲であることが必要である。そこで所定の電圧を突然印加する突然印加法(突印法)⁴⁾によりコンクリート柱の絶縁破壊試験を実施し、絶縁破壊電圧を求めた。供試器はJR電車線路用ノーテーパー口径350mmを用い電柱バンドを取り付け、試験電圧を電柱バンドと供試器の鉄筋間に印加した。試験は電源電圧3kV_{rms}~6.6kV_{rms}、通電電流320A~950Aの回路条件で行った。試験結果を図6に示す。印加電圧が高くなるにつれ絶縁破壊までの時間が短くなる傾向にあり、印加電圧が約5kV_{rms}を超えると瞬時に絶縁破壊することがあった。現在のS状ホーンの放電開始電圧は、在来線および新幹線とも10kV_{rms}以上であるから、地絡時には、S状ホーンが放電する前にコンクリート柱の絶縁破壊が発生する可能性が高い。逆に印加電圧が4kV_{rms}以下では瞬時に絶縁破壊が生じなかったため、S状ホーンの放電開始電圧を4kV_{rms}以下とすればコンクリート柱が絶縁破壊により破損する危険性は著しく低下すると考えられる。よってコンクリート柱におけるS状ホーン放電開始電圧の適正值は、余裕をみて約3kV_{rms}と考える。なお、放電開始電圧を低くした場合、NFやPWに発生しているサージ電圧の影響を受ける可能性があるが、これについては5章で述べる。

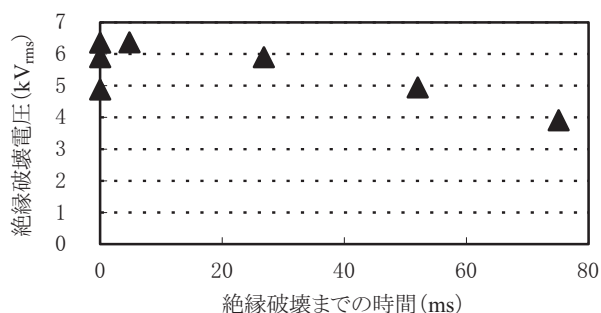


図6 コンクリート柱の商用周波絶縁破壊電圧

4.2 鋼管柱の場合

近年、電車線路支持柱は地震対策等の理由により、従来のコンクリート柱から鋼管柱に替わりつつある。鋼管柱の接地抵抗を実測した結果、接地工事を施工していない場合で4~100Ω程度、接地工事を施工してある場合で30Ω以下、高架区間で構造物の鉄筋を接地電極として使用している場合は1Ω以下となっている箇所もあった。鋼管柱に対する地絡保護方式としてもS状ホーン方式が

特集：電力技術

多く適用されているが、接地抵抗が低い場合には地絡故障が発生しても電柱電位上昇 V_G が小さいため、S状ホーン電圧 V_{Gap} が十分に上昇せず、S状ホーンが放電しないことが懸念された。そこで低圧電源を用いた地絡故障模擬試験を実施し、地絡故障点の接地抵抗とS状ホーン電極間電圧（S状ホーン電圧）の関係を求めた⁶⁾。試験結果を図7に示す。図7は低圧電源で行った試験結果を、新幹線のき電電圧系（30kV系）に換算して表している。図7を見ると故障点の接地抵抗が約1Ω以上ではS状ホーン電圧は放電開始電圧である10kV_{rms}以上となっているが、約1Ω以下では放電開始電圧以下であることからS状ホーンは放電しないことが分かる。しかし接地抵抗が0.1Ω程度でも5kV_{rms}以上の電圧が発生している。したがってS状ホーンの放電開始電圧を5kV_{rms}以下とすれば、接地抵抗が低い鋼管柱で地絡故障が発生した場合でもS状ホーンは放電すると考えられる。よって鋼管柱におけるS状ホーン放電開始電圧は、コンクリート柱における適正值と同等の3kV_{rms}とすれば十分であると考ええる。

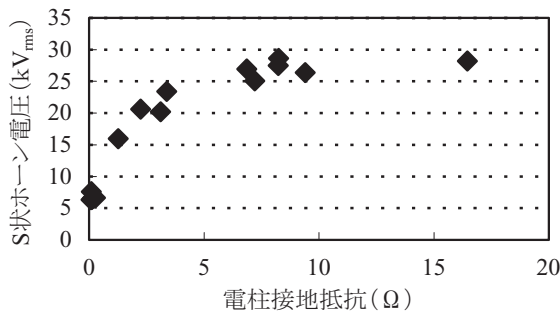


図7 地絡時のS状ホーン電圧

5. 補助ギャップによる放電開始電圧の適正化

以上の検討結果から、S状ホーンの適正な商用周波放電開始電圧は約3kV_{rms}であるという結論を得た。ただし現在のS状ホーンは気中の間隙長によって放電開始電圧を調節しているため、商用周波放電開始電圧を3kV_{rms}にするためには間隙長を1mm程度とする必要がある。しかし現在のS状ホーンの間隙長の調整は、3章で述べたように上部ホーンを懸垂がいしキャップ部にボルト締めすることにより行うので、1mm程度の間隙長を正確に調整することは困難であり現実的でない。そこで筆者らは放電管と酸化亜鉛素子（バリスタ）を直列に接続した構成の補助ギャップの適用を考えた。

5.1 S状ホーン使用箇所の電気的環境

S状ホーンは2.3節で述べたように、BTき電方式ではNFと電柱間に、ATき電方式ではPWと電柱間に接続される。NFには全負荷電流が、PWには負荷電流の一部が流れるため、NFおよびPWには電車走行毎に対地交流電圧が発生

する。また在来線ではデッドセクション等の通過時にNFに、新幹線においては変電所等の切替開閉器動作時にPWにサージ電圧が発生する。NFまたはPWの対地交流電圧が最も高いのは在来線BTき電方式で、波高値が1400V程度になることもある。サージ電圧が最も高いのはATき電方式である新幹線で、変電所等の切替開閉器動作時にPWに最大7kV程度発生するが(図8)、大半は5kV以下である。

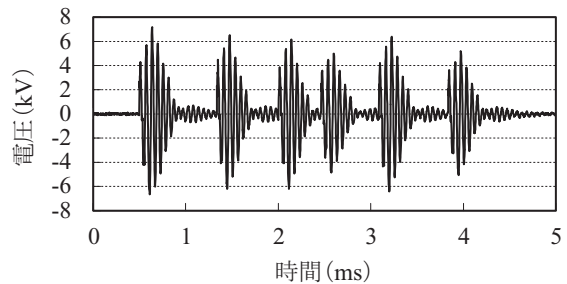
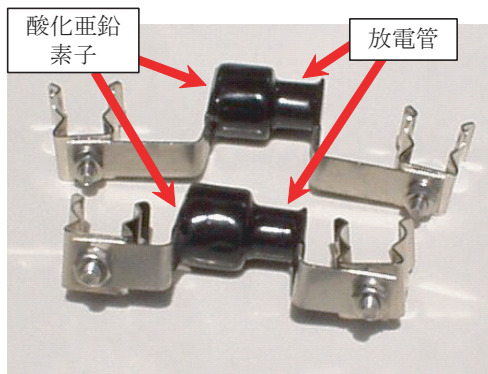


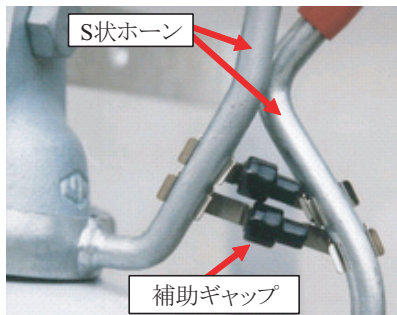
図8 PWサージ電圧波形例（新幹線）

5.2 補助ギャップの構成

一般的に放電器においては、その端子間に交流電圧が印加された状態で、雷インパルス放電開始電圧以上のサージ電圧が印加され放電すると、そのサージ電圧による放電が引き金となり、商用周波電流の放電（続流）が発生することがある⁷⁾。続流による障害は、在来線BTき電区間の駅構内等の地絡保護用放電装置として使用されている電力用保安器においても発生しており、その対策品として開発された続流抑止形保安器が使用されるようになってきた。したがってS状ホーンに適用する補助ギャップについても続流抑止機能が必要と考えた。その構成は既の実績のある続流抑止形保安器と同じく、放電管とバリスタを直列に接続する方式とした。放電管はセラミック管内部に電極を有する密封形で、その放電特性は商用周波放電開始電圧が3kV_{rms}、雷インパルス放電開始電圧が5kV以上である。前節で述べたようにサージ電圧の大半が5kV以下であることから、この放電管ではサージの多頻度放電による劣化は生じないと考える。またバリスタには続流抑止形保安器で実績のある動作開始電圧が1800Vのものを用いた⁸⁾。補助ギャップの外観を図9に示す。なお補助ギャップは地絡故障時の大電流により破損するが、一つのS状ホーンに2個取り付けることにより、地絡故障時のき電用遮断器の自動再閉路による再加圧時の地絡保護も可能としている。なお、在来線交流電化区間の駅構内における地絡保護装置として使用されている電力用保安器と、補助ギャップの交流放電開始電圧は同等であることから、基本的に地絡故障に対する保護能力は同等である。ただし保安器は保護地線と呼ばれる連系線を保護対象の電柱等に接続し、1本の保護地線につき1組の保安器で保護することから、駅構内のような保護範囲の広い箇所に適している。それに対し駅と駅の



(a) 補助ギャップ



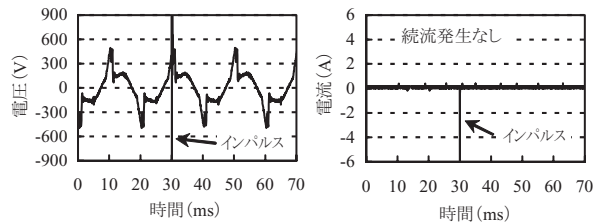
(b) S状ホーンに取り付けた様子

図9 S状ホーン補助ギャップの外観

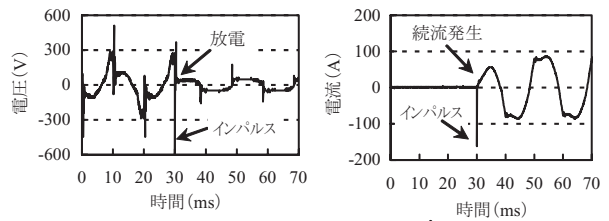
中間の電車線路では、全線に保護地線を架設するよりも、NFまたはPWの懸架に用いられている懸垂がいしに取り付けるS状ホーンが適しており、補助ギャップはS状ホーンの保護能力を保安器と同等にするという特長を持つ。

5.3 続流抑止機能の確認

補助ギャップの放電管の雷インパルス放電開始電圧は5kV以上なので、稀に発生する5kV以上のサージが印加されると放電する可能性がある。放電した場合、バリスタの動作開始電圧は1.8kVであるからサージに対しては導通状態となるが、1.2kV_{rms}以下の交流電圧に対してバリスタは絶縁状態となるので、サージ電圧による放電が終了すると同時に絶縁状態となり続流を遮断する。続流抑止機能確認として、S状ホーンに補助ギャップを取り付けた供試器をNFとA種接地電極間に接続し、NFの対地交流電圧が上昇している時に、サージ電圧の模擬として約6kVの雷インパルス電圧を供試器に印加して放電させ、続流発生の有無を確認した。代表的波形を図10に示す。図10(a)は放電管にバリスタを接続した実用化タイプの試験結果で、図10(b)は放電管単体タイプの試験結果である。実用化タイプでは交流電圧波高値付近に雷インパルス電圧が重畳しているが続流は発生していない。これに対し放電管単体タイプでは同様の条件で130A程度の続流が発生し焼損した。この結果から続流抑止機能が実線路において有効であることが確認できた。



(a) 実用化タイプ(放電管+バリスタ)



(b) 放電管単体タイプ

図10 現地における続流試験波形

5.4 地絡故障時の機能確認

S状ホーンに取り付けた補助ギャップが地絡保護装置として機能するためには、地絡時に安定した故障電流が流れ変電所の保護継電器を確実に動作させること、および地絡時に補助ギャップから発生するアークが速やかにS状ホーンに移行し、アークががいしと反対側の安全な方向に伸長することが必要である。これらの機能の確認として、在来線BT区間において人工地絡故障試験を実施した。き電区分所(SP)に仮設したコンクリート柱に対し地絡故障回路を構成し、変電所の遮断器を投入して20kV電源による地絡故障を発生させた。試験は2箇所のSPで合計8回行い、すべての試番において補助ギャップは正常に放電し、コンクリート柱は絶縁破壊しなかった。図11は代表的波形であるが、地絡電流(電柱電流)は1A以下で補助ギャップ電流が約1000Aとなっており地絡直後に地絡故障が短絡故障に移行し、安定した電流が流れていることが分かる。またこのとき変電所の保護継電器は故障を検知し、約150msで電流を遮断している。図12は放電時のアークの様子であるが、アークは正常にS状ホーンに移行し、アークの伸長方向はがいしと逆方向であり、電柱やがいしの損傷は無かった。また補助ギャップは2個取り付けたが、2個の補助ギャップが同時に放電することはなかったことから、再開路に対しても対応可能であることが確認できた。

5.5 連続使用試験

補助ギャップを新幹線電車線路のS状ホーンに取り付け、約1年間使用した後に取り外し、商用周波放電開始電圧を測定し初期値と比較した⁹⁾。取り付けた箇所は変電所に近い箇所に8個、SPに近い箇所に4個、変電所とSPの中間点付近に4個で合計16個である。商用周波放電開始電圧の測定結果を図13に示す。1年間使用後の商

特集：電力技術

用周波放電開始電圧の変化率は平均1.7%で最大で5.6%であり、初期値と比べて大きな変化は認められなかった。切替セクションの電源切替用の切替開閉器の動作に伴うサージが頻繁に発生する変電所付近、およびSP付近のS状ホーンに取り付けた補助ギャップの放電特性に劣化の兆候が認められなかったことから、サージによる放電が補助ギャップの放電特性に与える影響は小さいと考えられる。

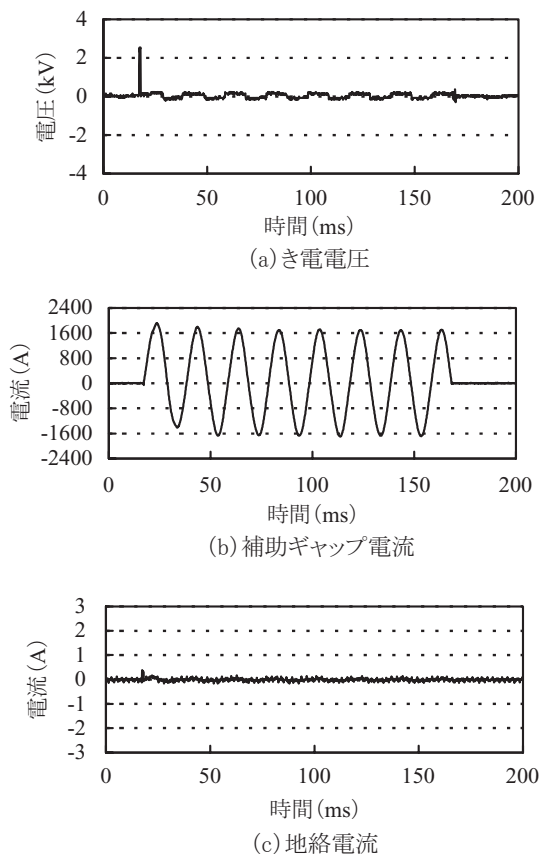


図 11 人工地絡故障試験の波形例（故障点）

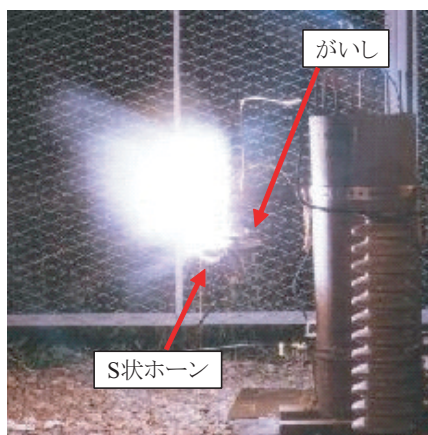


図 12 人工地絡試験時のアーク

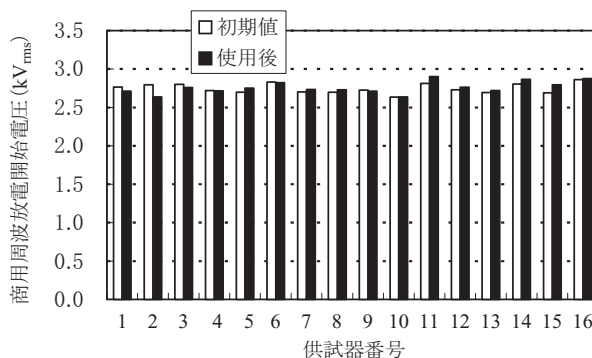


図 13 1年間使用後の商用周波放電開始電圧（新幹線）

6. あとがき

今回開発した、放電管とバリスタを直列に接続したS状ホーン補助ギャップは、既設のS状ホーンに取り付けることにより、S状ホーンの商用周波放電開始電圧を従来の10kV_{rms}以上から3kV_{rms}に低下させるものである。これにより地絡故障時のコンクリート柱の絶縁破壊を防止し、また接地抵抗の低い鋼管柱におけるS状ホーン動作の確実性が増すことから、交流電車線路の地絡保護の信頼性は大きく向上するものとする。

文 献

- 1) 安喰浩司, 森本大観, 久水泰司, 木下信夫, 高井渉, 佐藤了吾: 交流き電回路における続流抑止型電力用保安器の開発, 電気学会論文誌D, Vol.126, No.11, pp.1493-1499, 2006
- 2) 電気鉄道ハンドブック, コロナ社, p.558, 2007
- 3) 安喰浩司, 後藤昭夫, 高井渉, 井上隆, 佐藤了吾, 内沼夏織: 在来線交流き電回路地絡保護用低電圧放電装置の保護効果試験, 平成18年電気学会全国大会, No.5-183, 2006
- 4) 高電圧試験ハンドブック, 電気学会, P.269, 1988
- 5) 安喰浩司, 川原敬治, 阿部芳久, 嶋田隆三, 内沼夏織: S状ホーン放電開始電圧の低電圧化の検討, 平成15年電気学会全国大会, No.5-230, 2003
- 6) 安喰浩司, 川原敬治, 中道好信, 阿部芳久, 嶋田隆三: 新幹線き電回路における地絡保護方式信頼性向上の検討, 平成15年電気学会全国大会, No.5-232, 2003
- 7) 電気工学ハンドブック, 電気学会, P.826, 1988
- 8) 安喰浩司, 森本大観, 酒井信也, 後藤昭夫, 熊野大司朗, 佐藤了吾: 交流き電回路地絡保護用低電圧放電装置(S状ホーン補助ギャップ)の開発, 平成19年電気学会全国大会, No.5-168, 2007
- 9) 安喰浩司, 森本大観, 下川文幸, 酒井信也, 佐々木一臣, 佐藤了吾: S状ホーン補助ギャップによる交流電車線路地絡保護の信頼性向上, 電気学会論文誌D, Vol.129, No.10, pp.949-956, 2009