

交流き電回路用続流抑止型保安器の開発

安喰 浩司* 森本 大観* 久水 泰司**

Development of New Type Gap Arrester for Earth Fault Protection in AC Feeding System

Kohji AJIKI Hiroaki MORIMOTO Yasuzi HISAMIZU

A gap arrester is being used for ground fault protection in AC Feeding System. However there are faults in which a conventional gap arrester burns down in a normal state of circuit. We investigated the cause of the fault in which a gap arrester burns. Then, it was found out that the cause of the fault was the discharge of AC current from the surge voltage. Therefore, we developed a new type gap arrester which does not burn down. The new type gap arrester is composed of a discharge tube and a zinc oxide element which are connected in series. Unnecessary AC current discharge is prevented by this structure. The new type gap arrester is actually used at the railroad track.
キーワード：電気鉄道，交流き電，地絡，保安器

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、せん絡導線方式では、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。そのため、駅構内および車両基地においては電力用保安器 (以下、保安器と略す) を用いた保護地線方式 (FW 方式) が採用され、現在も BT き電方式 (BT: 吸上変圧器) における駅構内等の地絡保護方式として用いられている。

FW 方式は、駅構内等の電柱等の保護対象構造物に保護地線 (FW) を接続し、FW と負き電線 (NF) に交流 2500V で放電する保安器を接続した回路となっている。FW 方式において地絡事故が発生すると、FW 電位が上昇し保安器が放電するので、構造物の対地電位上昇が抑制されるとともに、変電所における保護継電器動作の確実性が確保される。しかし近年、正常き電時に保安器が不要放電を起こし焼損するという現象が発生する箇所が多くなってきた。これに対し著者らは、保安器の焼損原因は NF に発生するサージ電圧が引き金となって生じる

交流電流の放電 (続流) のアーク熱に起因するということとを解明し、さらに焼損防止を目的とした続流が発生しない機能を有する続流抑止型保安器を開発した。続流抑止型保安器は良好な試験結果を得て、現在、鹿児島本線および函館本線等で実用化されている¹⁾。

2. せん絡導線方式

図 1 にせん絡導線方式の概略を示す。がいしは特別高圧部と高圧部に分かれ、その境界部と 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、事故電流はせん絡導線を通して NF に流れ変電所に戻っていく。したがって事故電流が大地に流れることはなく、故障箇所の対地電位上昇を防止できるが、がいし以外の箇所での地絡に対しては有効に機能しない。

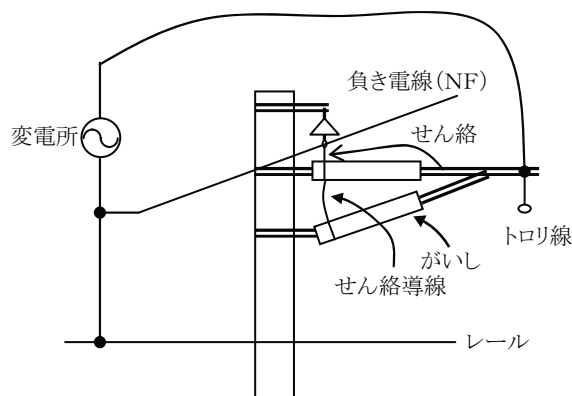


図 1 せん絡導線方式

* 電力技術研究部 (き電)

** 総務部 (環境管理)

特集：電力技術

3. 保安器によるBTき電回路の地絡保護方式

BTき電回路の駅構内等においてせん絡導線方式を用いると、せん絡導線の施工が複雑となるため、せん絡導線を省略できる保護地線方式(FW方式)がBTき電回路における駅構内等の電車線路地絡保護方式として採用されている。FW方式の概略を図2に示す。FW方式では、地絡が想定されるビーム、腕金等を一括してFWで結び、FWとNF間に、保安器と呼ばれる交流放電開始電圧が2500Vの放電装置が接続されている。また駅構内の設備であることから、地絡事故時の人体に対する安全を確保するために、FWにはA種接地工事(接地抵抗10Ω以下)が施されている。

FW方式において地絡事故が発生すると、事故電流はFWの接地電極から大地に流れ込み、レールに吸い上がって変電所へもどる回路となる。このときFWの対地電圧は事故電流値とFW接地抵抗の積で上昇するので、FWとNF間には電圧差が発生し放電開始電圧に達すると保安器は放電する。保安器が放電することにより、事故電流の多くはNFを介して変電所に戻ることにになり、大地に流れる電流は大きく減少するのでFWが接続されている構造物の対地電圧は抑制される。また保安器が放電することにより故障回路は、地絡回路から短絡回路となる

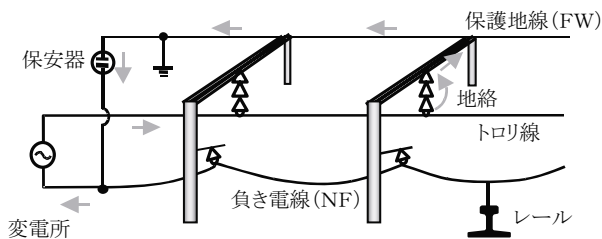


図2 保護地線方式

表1 従来保安器(電力2号)の主な仕様

交流放電開始電圧	放電耐量
2500V ± 15%	交流 2000A・0.4秒、2回 30秒間隔



図3 従来保安器(電力2号)外観

ため、変電所における保護継電器の動作は通常の短絡事故と同様となり、地絡事故を確実に検知し保護できる。

FW方式に用いられている従来の保安器(電力2号)の主な仕様を表1に、外観を図3に示す。電力2号は、磁器製の台座の上に円筒状のカーボン電極が2つ対向して取り付けられており、その円筒状の電極部をアクリル製のカバーで覆う構造となっている。電極の一方をFWに、もう一方をNFに接続する。

なお、ATき電回路(AT:単巻変圧器)においても駅構内の地絡保護方式として3極保安器を用いたFW方式が採用され、保安器は保護線(PW)、FW、およびレールに接続されているが、ATき電回路のPWの対地電圧はBTき電回路のNF対地電圧に比べて小さく、保安器が不要放電を起こして焼損するという事象は発生していない。

4. 保安器使用箇所の電氣的環境

4.1 NF対地交流電圧

交流き電回路は回路に接地工事を施しておらず、基本的には単相非接地回路であるが、実際にはレールの漏れ抵抗により1線が大地と結合している回路となっている。したがってレール、NFといった帰線回路の対地電位は、無負荷時には大地電位に近い電圧となっているが、負荷電流が流れるとインピーダンスによる電圧や大地への漏れ電流による電圧が発生する。これらの電圧は5章で述べるように保安器焼損原因要素の一つとなる。図4はNF対地電位の概念を示したものである。BTき電回路における帰線電流は、吸上変圧器(BT)の吸上効果により吸上線を介してNFに流れ変電所に戻る。このためNF対地電圧は吸上線地点のレール対地電圧にNFのインピーダンスにより発生した電圧が加算された値となる。図5にNF対地交流電圧の変化の実測による例を示す。保安器はNFとFW間に接続されており、FWにはA種接地工事が施工されているので、正常き電時には図4および図5に示したようなNF対地電圧が保安器端子間に印加されている。その値はNFに流れる負荷電流にほぼ比例し、実測では電車の走行毎に実効値で300~800Vであった。またその電圧波形は、NFのリアクタンスによる電圧降下が支配的であるため、通常区間では誘導性リアクタンスにより負荷電流の微分波形となり、NFに直列コンデンサが挿入されている区間では、容量性リアクタンスにより負荷電流の積分波形となる。なお直列コンデンサは、電圧降下抑制およびBTセクションアーク低減を目的としたものである。図6にNF対地交流電圧波形例を示す。図6(a)はサイリスタ位相制御車走行時の波形で、図6(b)はPWM制御車走行時の波形である。なお、測定を行った箇所の系統には直列コンデンサは接続されていなかった。

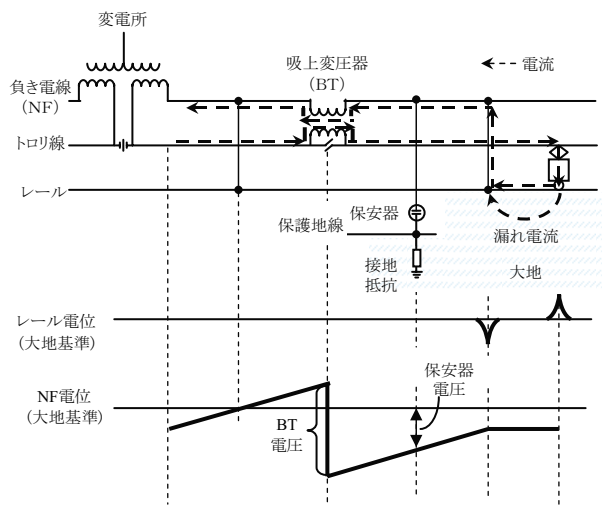


図4 正常き電時のNF対地電位の概念

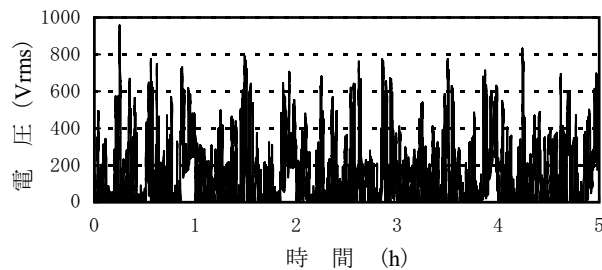
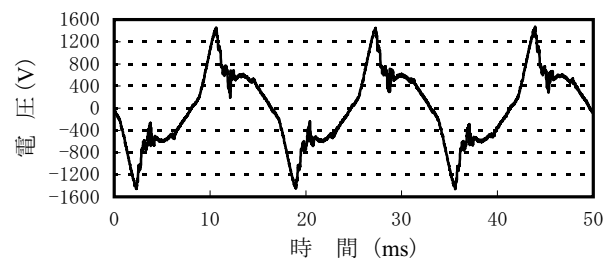


図5 NF対地交流電圧の変化例

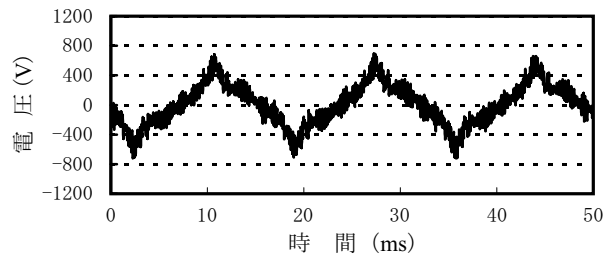
4.2 NF対地サージ電圧

一般的にき電回路に発生するサージ性過電圧(サージ電圧)は落雷に起因する雷サージ、遮断器・開閉器等の開閉時に過渡的に発生する開閉サージ等がある。またパンタグラフ離線時やデッドセクション、および同相セクション通過時にも電流の消弧・再発弧が生じるため、サージ電圧が発生する。これらのサージ電圧のうち、保安器に頻繁に印加されるサージ電圧はデッドセクションおよび同相セクション通過時のものである。サンプリング周波数を20MHzとして実測した波形例を図7に示す。定常値(交流電圧瞬時値)から波高値までの立ちあがり時間は1 μ s程度で、波高値の最大値は4000Vを超えていた。図7の波形はやや丸みを帯びているが、これはサージ電圧の発生点であるデッドセクションから、サージ電圧測定点である保安器までの距離が4.1kmあったことによる進行波の波形変化と、デッドセクションと当該保安器間のNFに直列コンデンサが挿入されていた影響によるものと考えられる。また従来保安器(電力2号)の雷インパルス放電開始電圧の5%値は約4000Vであることから、NF対地サージ電圧によって従来保安器が不要放電を起こす可能性は高い²⁾。表2に従来保安器の雷インパルス放電開始電圧実測値を示す。この値は、電圧印加を30回繰り返し、統計処理により放電開始電圧を求める昇降法³⁾で試験を行い求めたものである。保安器の電極

には、間隙長の調整を容易にする目的で片側の電極表面に帯状の突起が施されている。このため雷インパルス放電開始電圧に極性による差が生じている。またNFに進入したサージ電流は、吸上線箇所でレールに分流するため、吸上線付近のサージ電圧は低減する。したがって保安器の設置箇所としては、サージ電圧という観点から見ると吸上線に近い箇所が望ましいが、吸上線の間隔は約4kmであることから、吸上線の近くに設置できる保安器は限られている。保安器設置箇所が吸上線から離れている場合には、吸上線によるサージ電圧の低減効果は期待できない。



(a) サイリスタ位相制御車走行時



(b) PWM制御車走行時

図6 NF対地交流電圧波形例

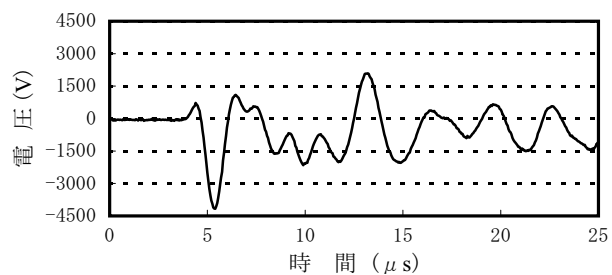


図7 NF対地サージ電圧波形例
(デッドセクション通過時)

表2 従来保安器(電力2号)雷インパルス放電開始電圧

電圧極性	放電開始電圧 (kV)		
	50%	5%	95%
正	4.95	4.43	5.47
負	5.34	3.70	6.98

標準大気状態 (20 $^{\circ}$ C, 1013hPa)

特集：電力技術

4.3 保安器不要放電時の続流値

一般的に放電器では、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⁴⁾。保安器において続流が発生した場合の電流値を把握するため、BTき電回路において電車走行時にNFとFW間（保安器端子間）を短絡し、短絡電流を測定した。この短絡電流は続流に相当する。図8はその実測結果であるが、続流相当電流と短絡直前の保安器端子間電圧は、ほぼ比例関係にあった。

ある回路網の任意の二点間において、その開放電圧は二点間からみた回路網の起電力であり、その開放電圧を短絡電流で除した値はその二点間からみた回路網のインピーダンスとなる。したがって保安器端子間電圧（保安器端子間からみた系統の起電力）を保安器短絡電流（続流相当電流）で除した値は、保安器端子間からみた系統のインピーダンスを示す。その値は今回測定した個所では、電車の位置や負荷電流の大きさに関わらず約 3Ω となった。このことから保安器端子間からみた系統のインピーダンスは、負荷状況に影響されずほぼ一定と考えられるので、保安器端子間電圧を測定し、系統インピーダンスで除することにより、続流の最大値を予測することができる。図5に示したように、この個所での保安器端子間電圧の最大値は960Vであることから、最大300A ($960V/3\Omega$) 程度の続流が発生する可能性があることが分かる⁵⁾。

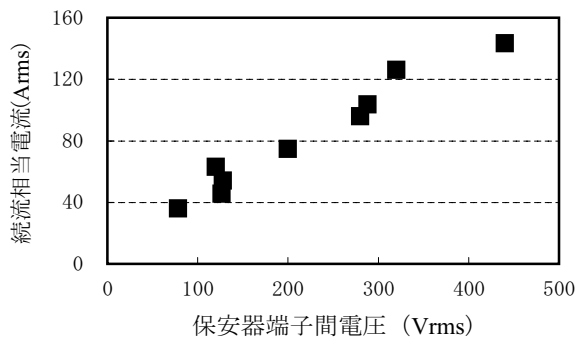


図8 続流相当電流と保安器端子間電圧の関係

5. 従来保安器の焼損原因

これまでの試験・検討の結果、保安器には電車走行毎に交流実効値で300V～800Vの電圧が印加され、さらに電車がデッドセクションおよび同相セクションを通過するときに発生する4000Vを超えるサージ電圧が印加されていることが分かった。このようなサージ電圧が保安器に印加された場合には、不要放電を起こす可能性があり、そのときに交流電圧が印加されていれば続流が発生して、そのアーク熱で従来保安器が焼損すると考えられ

た。この現象を確認するために、鉄道総研実験棟において従来保安器の焼損再現試験を実施した。その試験回路を図9に示す。試験は保安器端子間に交流220Vを印加している状態で、約5000Vの雷インパルス電圧を重畳させて行った。交流電源と保安器間には、電車線路のインピーダンス角度 ($70^\circ \sim 74^\circ$ 程度) に近い $6.33 \angle 83^\circ \Omega$ のインピーダンスを挿入し、続流が発生した際の続流電流値が約35Aとなるようにすると共に、インパルス電圧が交流電源側に進入するのを防ぐようにした。またインパルス発生器と保安器間には避雷器を挿入し、交流電流がインパルス発生器側に流れないようにした。その結果、雷インパルス電圧が、交流電圧波形の零点付近に重畳した場合には続流は発生しなかったが、雷インパルス電圧が、交流電圧波形の波高値付近に重畳した場合には続流が発生し、持続する確率が高かった。続流が発生すると、最初に続流アークによりカーボン電極が過熱し、その輻射熱でカーボン電極に近い箇所のアクリルカバーの部分が過熱して気泡が生じ、気泡が徐々に周囲に広がると共に溶解し、自重で崩れ落ち、アクリルが電極部に溶着し焼損した。アクリルカバーが溶解するまでの時間は、続流値32Aで約3分間であった。その状況を図10に示す。以上のことより、従来保安器の焼損原因は、保安器に交流200V程度以上の電圧が印加されている状態でサージ電圧による放電が発生すると、それが引き金となって流れる続流のアーク熱であるということが証明されたと考える。また近年の保安器焼損事故の増加は、負荷電流の増大により保安器に印加される交流電圧が上昇したことで、電車の運転頻度が高くなりサージ電圧の発生頻度が高くなったことに起因していると考えられる。

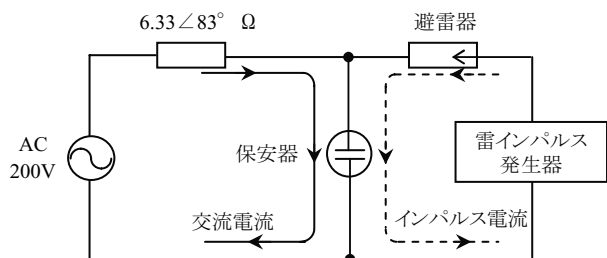


図9 保安器焼損再現試験回路

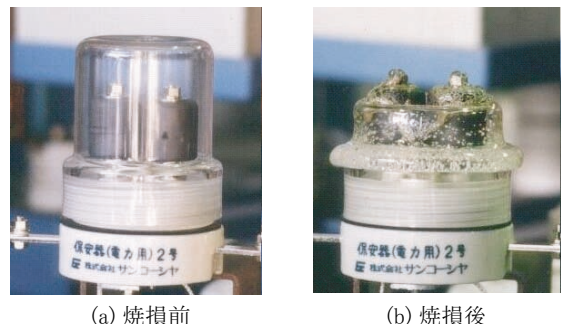


図10 焼損再現試験による保安器焼損状況

6. 続流抑止型保安器の開発

6.1 保安器焼損対策の基本的考え方

保安器の焼損は前述したように続流によるアーク熱に起因しているため、保安器の焼損対策としては以下のような方法が考えられた。

- ① 保安器をアーク熱に耐えられる構造とする。
- ② 続流を磁気力等により消弧させる機構とする。
- ③ 続流が発生しない機構とする。

続流は最大で300A程度流れる可能性があることから、①の機能を持たせるには大形の機器になり、②の機能を持たせるには大形かつ複雑な機構の機器となり実用的ではない。そこで③の方式について検討し、続流抑止型保安器を開発した。なお、商用周波放電開始電圧等の基本的性能は表1に示した従来保安器の性能と同様とした。

6.2 続流抑止型保安器の構成

構成を図11に示す。放電部はセラミック放電管（放電開始電圧 AC2500V）と酸化亜鉛素子（動作開始電圧 1800V）を直列接続した構成とし、この放電部を2個並列に金属電極にはめ込む構造とした。放電部は地絡事故時の大電流放電時には破損し、破損部からアークが発生する。その放電アークは金属電極に移行し放電は持続する。したがって、一つの放電部は1回の地絡時の放電にのみ有効である。しかし、き電回路故障時には再閉路により回路が再充電されるため、そのとき故障状態が継続していれば再び保安器放電による保護が必要となる。続流抑止型保安器では、放電部を2個並列に金属電極に取り付けることにより、再閉路時の正常動作を確保している⁶⁾。またアクリルカバー内面上部に厚さ約1mmのアルミ板を貼り付けた。このアルミ板は、地絡事故時の大電流放電アークによりアクリルカバーから発生する煤の量を軽減させるためのものである。なお外形寸法は、従来保安器とまったく同様とした。

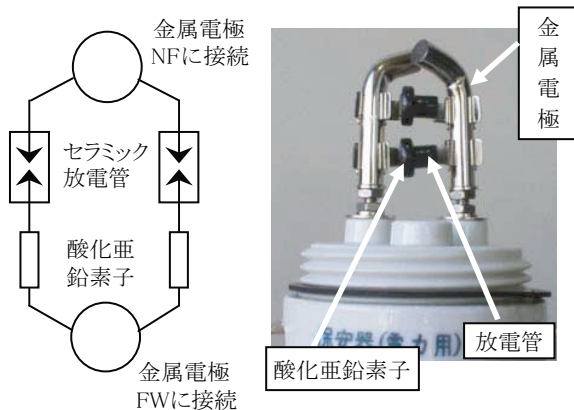


図11 続流抑止型保安器の構成

6.3 続流抑止機能

続流抑止型保安器に用いたセラミック放電管の雷インパルス放電開始電圧値は約3700Vであるので、3700V程度以上のサージ電圧が加わると放電し、導通状態となる。したがってセラミック放電管が放電すると、酸化亜鉛素子にサージ電圧と交流電圧が印加されることになる。しかし本器の酸化亜鉛素子の動作開始電圧は1800V_{0-P}なので、サージ電圧に対しては導通状態となるが、1200Vrms以下の交流電圧に対して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。図12は交流400Vの波高値に雷インパルス電圧を重畳させ保安器端子間に印加した波形である。保安器にはサージ電流が流れただけで、交流400V電源による続流（交流電流）は発生していないことがわかる。図13と図14は、実線路で過去に焼損事故が発生したことがある箇所へ続流抑止型保安器を仮設し、実際に発生しているサージ電圧で放電したときの波形である。なおこの実線路での試験では、サージ電圧で放電したときの現象を確認するため、セラミック放電管の交流放電開始電圧を1500Vrms（実用器は2500Vrms）、酸化亜鉛素子の動作開始電圧を800V_{0-P}（実用器は1800V_{0-P}）のものを使用し、放電現象が発生しやすいようにした。図13は比較的サージ電流が大きい波形例で波高値が30A以上あったが、サージ電流は半波で消弧して

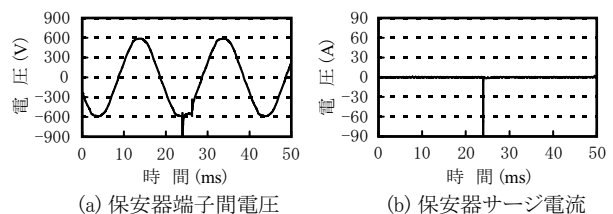


図12 続流抑止機能試験波形（所内）

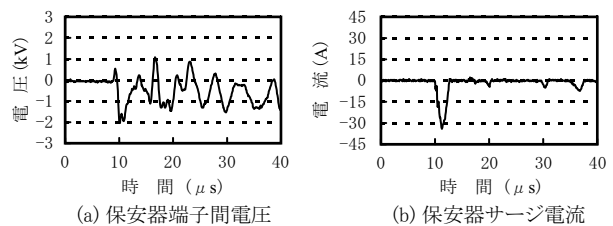


図13 続流抑止機能試験波形（函館本線）

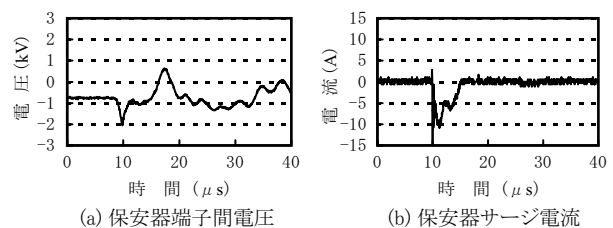


図14 続流抑止機能試験波形（鹿児島本線）

特集：電力技術

いる。図14は保安器端子間に交流580Vが印加されている状態で、その交流電圧の波高値にサージ電圧が重畳したときの現象である。波高値が16Aのサージ電流が流れたが約5 μ sで消弧しており、交流電流（続流）はまったく流れなかった。以上のことより、続流抑止型保安器では、サージ電圧による放電が生じて、サージ電流が引き金となって続流が発生することはなく、その続流抑止機能は有効であることが検証できた⁷⁾。

6.4 地絡事故時の放電動作機構

保安器は地絡事故時に交流2500V以上で放電し、安定した放電電流を流す必要がある。続流抑止型保安器では、地絡事故時の数千Aの交流電流が流れると、セラミック放電管および酸化亜鉛素子とも破損し、アークは金属電極間に移行するという動作機構である。しかし続流抑止型保安器では放電管と直列に酸化亜鉛素子が接続されているため、地絡事故時の放電電流が比較的小さいと予想される系統で放電した場合には、放電電流が安定しないことが懸念された。そのため前記の動作機構を確認する目的で、地絡模擬放電電流試験を実施した。試験電源には定格電圧6600V、定格容量15000kVAの同期発電機を用いて、その界磁電圧調整により電源電圧を2800V～6600Vの間で所定の電圧に調整して試験を行った。また試験回路には6 Ω のリアクトルを挿入し、放電電流は400A～1000Aとした。代表的波形を図15に示す。図15は電源電圧を放電管の交流放電開始電圧に近い2800Vで試験を行った波形である。これを見ると、放電中は端子間に500V程度のアーク電圧が発生しているが（時間軸約100ms～200msの範囲）、電流は安定して流れており自己消弧することはなかった。これにより、放電管と直列に抵抗体である酸化亜鉛素子が接続されていても地絡時には正常に放電電流が流れることが確認できた。また図15の保安器端子間電圧をみると、その放電開始電圧は放電管の交流放電開始電圧2500Vの波高値である3500V程度であった。その直後に約2000V程度の電圧が10msから20ms程度の間残っているが、これは酸化亜鉛素子の抵抗による電圧（制限電圧）であり、大電流により酸化亜鉛素子が破壊しアークが金属電極に移行すると消滅している。図16に放電中の様子を示す。



図16 地絡模擬放電電流試験の様子

7. あとがき

現地におけるNF対地電圧測定、続流試験、地絡模擬試験および鉄道総研所内での焼損再現試験等から保安器の焼損原因がサージ電圧による不要放電時に発生する続流に起因することを解明した。その結果を踏まえ、焼損の原因となっている続流が発生しない続流抑止型保安器を開発した。この続流抑止型保安器は各種機能確認試験において良好な結果を得て、現在、鹿児島本線および函館本線等において実用化されている。

文献

- 1) 安喰, 森本, 久水, 木下, 高井, 佐藤: 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, 2006
- 2) 安喰, 久水, 永吉: 交流BTき電回路における電力用保安器焼損原因の解明, 平成14年電気学会産業応用部門大会, No.237, 2002
- 3) 高電圧試験ハンドブック, 電気学会, p312, 1983
- 4) 電気工学ハンドブック, 電気学会, p826, 1988
- 5) 安喰, 久水, 森本, 日野, 木下, 内沼: 交流BTき電回路における電力用保安器の不要放電に伴う続流値の検証, 平成15年電気学会産業応用部門大会, No.3-88, 2003
- 6) 安喰, 久水, 森本, 木下, 高井, 佐藤: 続流抑止型電力用保安器の試作, 平成16年電気学会全国大会, No.5-145, 2004
- 7) 安喰, 久水, 相原, 木下, 高井, 内沼, 佐藤: 交流き電回路における続流抑止型電力用保安器の開発, 平成16年電気学会産業応用部門大会, No.3-51, 2004

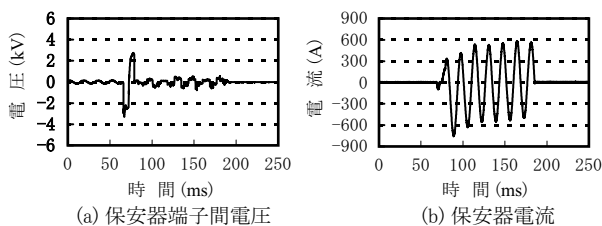


図15 地絡模擬放電電流試験波形