水トリー劣化 CV ケーブルの直流成分電流 発生機構に関する実験的考察

正員 熊澤孝夫 (中部電力)

正員 都築律統 (岐阜大)

正員 有馬泉 (岐阜大)

正員 渡邊貞司 (岐阜大)

正員 高木伸之 (岐阜大)

Experimental Study on Mechanisms for DC Component Current Evolving in XLPE Cables with Water Trees

Takao Kumazawa, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.), Norimoto Tsuzuki, Member, Izumi Arima, Member, Teiji Watanabe, Member, Nobuyuki Takagi, Member (Gifu University)

The mechanisms for evolution of DC component current have been explained on the behavior of space charge around the tip of water trees. Recently, it was shown that DC component current was closely associated with the water tress linking between inner and outer semiconducting layer. So that, we assumed that the origin of DC component current was present outside the XLPE bulk, and we investigated the influence of semiconducting layer and moisture in it on DC component current. The experimental results indicate that the origin of DC component current is essentially independent of semiconducting layer and water trees. The results also suggest that DC component current arises from the interaction between the moisture in semiconducting layer and conductor or shielding layer.

キーワード：CV ケーブル，水トリー，直流成分電流，半導電層，界面

1. はじめに

近年、6.6 kV 用 CV ケーブルの活線劣化診断法が種々提案されているが⁽¹⁾，その一つに，充電電流に重畳して流れる微小な直流分を検出する，いわゆる直流成分電流法がある⁽²⁾。従来，この直流成分電流は水トリー先端部の整流作用に基づくと考えられてきたが，絶縁体 (XLPE) を貫通する水トリーがその発生に不可欠であるとの報告もあり⁽³⁾，必ずしも水トリー先端部の整流作用のみでは説明できない。このことは，直流成分電流法がどのような水トリー劣化の診断に有効であるかといった，極めて基本的かつ重要な問題を提起する。

そこで，著者らは，直流成分電流の発生源が絶縁バルク以外にも存在すると仮定し，特に水トリーおよび半導電層内部に存在する微量な水分に着目して，これらの水分と心線や遮蔽銅テープとの間に生じる界面現象をモデル実験により詳細に調べてきた⁽⁴⁾。更に，本研究では，直流成分電流の発生に対して，貫通水トリーや半導電層がどのように

関与するのか実験的に明らかにし，水トリー劣化 CV ケーブルにおける直流成分電流の発生機構を考察した。

2. 実験方法

図 1 に，貫通水トリーを有する絶縁体 (XLPE) を用いた実験回路を示す。試料は，外導トリーが多数発生した CV ケーブルの絶縁体から，その一部をマイクロームにより切り出したもので，このときに先端部がカットされた外導トリーを選択し，模擬貫通水トリーとして採用した。当該水トリー部での試料厚さは 1.6 mm および 2.6 mm で，試料に 1 時間煮沸前処理を施した。

半導電層には半導電性テープ (古河電工製，C テープ) を用い，60°C，408 時間の乾燥処理を施した後，更に 60°C の温水浸漬による吸水処理を施して，その前後の重量変化から吸水率を評価した。

電極 (5 mm×5 mm) には，タフピッチ銅板 (JIS H 3100，C 1100 P，厚さ 0.1 mm) を用いた。更に電極対の一方には，実布設ケーブルにみられる遮蔽銅テープの腐

食を模擬するため⁽⁴⁾、あらかじめ蒸留水に2枚の銅板を浸漬し(銅板間隔40mm, 浸漬部5mm×40mm), 両銅板間にAC 1kV_{rms}を1時間印加して表面腐食処理を施した。以下, このような銅板電極を処理銅, ケーブル心線を模擬するための腐食処理しない銅板電極を未処理銅とする。

上記により作製した半導電層および処理銅・未処理銅を, 図1に示すように絶縁体試料中の1個の模擬貫通水トリ部に密着させ, 3.8kV_{rms}の交流電圧を印加した。電源からの雑音や直流分はLC帯域フィルタにより除去した。これと直列に接続された10MΩの抵抗は, XLPE短絡時の回路保護用である。発生した直流成分電流は, LC帯域フィルタで遮断されるため, 試料系と並列に10MΩの抵抗を挿入して直流閉回路を構成し, ここに流れる直流成分電流を測定した。なお, 半導電層および処理銅・未処理銅は一測定ごとに新たに作製したものと取り替えた。

次に, 絶縁体を取り除き, 半導電層および処理銅・未処理銅からなる試料系で発生する直流成分電流の測定を行った。図2に, 実験回路を示す。半導電層および処理銅・未処理銅の作製方法は前述と同じである。これらを同図に示すように密着させ, 電極間を流れる電流が貫通水トリを

図1 絶縁体-半導電層-銅板電極からなる試料系を用いたときの実験回路

Fig.1. Experimental circuit on using a sample which consists of XLPE, semiconducting layer and copper electrode.

図2 半導電層-銅板電極からなる試料系を用いたときの実験回路

Fig.2. Experimental circuit on using a sample which consists of semiconducting layer and copper electrode.

有するCVケーブルの交流損失電流程度⁽⁵⁾($10^{-5} \sim 10^{-4}$ A)となる範囲で交流電圧を印加して, 直流閉回路を流れる直流成分電流を測定した。図中に示した10MΩの抵抗は, 図1の場合と同様に, 直流閉回路を構成するためのものである。

以上の測定では, いずれも同じ測定器(四国計測工業製, DISC-10G)を使用し, 30秒間の直流成分電流の平均値を求めた。また, 直流成分電流が高圧側から絶縁体(半導電層)を介して低圧側へ流れる場合を正極性とした。

3. 実験結果

図3に, 模擬貫通水トリを有する試料で, 半導電層の吸水率を変えて測定した直流成分電流を示す。模擬貫通水トリはすべて同一で, 左側より直流成分電流測定値の大きい順に表示してあり, 便宜上, 実験番号を付してある。

図3 絶縁体-半導電層-銅板電極からなる試料系を用いたときの直流成分電流測定結果

Fig.3. A result of measured DC component current on using a sample which consists of XLPE, semiconducting layer and copper electrode.

図 4 半導電層-銅板電極からなる試料系を用いたときの直流成分電流測定結果

Fig. 4. A result of measured DC component current on using a sample which consists of semiconducting layer and copper electrode.

(a)図から、半導電層が乾燥状態（吸水率0%）にあると、観測される直流成分電流は ± 0.5 nA以内に集中し、絶対値の比較的小さい直流成分電流が生じることがわかる（後述のように測定系の起電力による可能性もある）。また、処理銅・未処理銅の組合せによる差異はほとんどみられない。一方、(b)図から、半導電層が吸水状態にあると、乾燥状態に比べて絶対値の大きい直流成分電流が観測されるケースが現れており、半導電層の吸水により直流成分電流が流れやすくなっていることがわかる。更に、処理銅・未処理銅の組合せに着目すると、高圧側に未処理銅、低圧側に処理銅を用いた場合（長期布設ケーブルがこの場合に相当する）、1 nAを超える正極性の直流成分電流が生じるケースが2例みられる。これとは逆に、高圧側に処理銅、低圧側に未処理銅を用いた場合、上記のようなケースはなく、また、観測される直流成分電流のほとんどすべてが負極性であることがわかる。

次に、図4に吸水率の異なる半導電層および処理銅・未処理銅からなる試料系で測定した直流成分電流を示す。ここでは、直流成分電流に及ぼす半導電層中の微量な水分の影響を詳細に調べるため、吸水率は図3に示した値よりも更に小さい値とした。同図より、半導電層が吸水するに従って、直流成分電流の交流印加電圧依存性が顕著になり、その絶対値が増大する傾向がみられる。更に処理銅・未処理銅の組合せに着目すると、(a)図から、半導電層が乾燥状態（吸水率0%）にあるときは、これらの組合せの違いによる直流成分電流の差異はほとんどみられない。また、交流印加電圧依存性も極めて弱い。他方、(b)図および(c)図から、半導電層の吸水が進むと、処理銅・未処理銅の組合せの違いにより、まったく逆の交流印加電圧依存性を示すことがわかる。すなわち、高圧側に未処理銅、低圧側に処理銅を用いた場合、交流印加電圧の上昇に伴って、直流成分電流は負極性から正極性に反転するように増大するのに対し、高圧側に処理銅、低圧側に未処理銅を用いた場合、これとは逆に負極性のまま絶対値のみ増大するように変化する。なお、同図に示した結果は、いずれも -250 pA程度の直流電流が別に重畳している（負のバイアスが印加されている）ような挙動を示している。この電流の起源は試料系でなく、例えば端子接続部の熱起電力など測定系に存在する可能性もあるため、今後更に調査する予定である。

4. 考 察

〈4・1〉 水トリーと直流成分電流の関係 図3に示したように、模擬貫通水トリーを有する絶縁体試料を用いた場合、直流成分電流の大きさや極性は、絶縁体外部にある半導電層の吸水状態や処理銅・未処理銅の組合せにより変化する。例えば、(a)、(b)図の比較から、直流成分電流の絶対値が、前述のように1 nAを超えるためには、半導電層が少なくとも吸水状態になければならない。このことは、吸水した半導電層と絶縁体もしくは処理銅・未処理銅

とのいずれかの界面で直流成分電流が発生していることを示唆している。一方、(b)図から、発生した直流成分電流の極性は、処理銅・未処理銅の組合せにより反転する傾向を強く示している。仮に、半導電層と絶縁体との界面で直流成分電流が発生しているとすれば、このような傾向は生じないと思われる。従って、直流成分電流は、吸水した半導電層と処理銅・未処理銅との界面で発生していると推察される。

上記の考察から、直流成分電流の発生源に対する貫通水トリの直接的な関与はほとんどないと考えられる。しかしながら、貫通水トリは、直流成分電流の経路に存在し、かつ依然として大きな絶縁抵抗（数十～数百 MΩ）を有するため、直流成分電流を制限する重要な因子になると考えられる。そのため、水トリが貫通しておらず、健全な XLPE が残存すれば、更に高い絶縁抵抗となり、直流成分電流は極めて流れにくいと考えられる。すなわち、見掛け上、直流成分電流は発生しないことになり（発生源は存在するものの電流は流れない状態）、貫通水トリの存在が発生に不可欠とする報告⁽³⁾と矛盾しない。

〈4・2〉 直流成分電流の制限機構 最近、貫通水トリ一部の電気伝導に関して、イオンのホッピング伝導よりむしろ Poole-Frenkel 型の電気伝導（キャリア種は明らかな）の可能性があることが報告されている⁽⁶⁾。特に、貫通水トリが多数存在すると、分極損失よりも伝導損失が支配的に現れることから、貫通水トリ一部では、交流コンダクタンスに対する直流コンダクタンスの寄与が極めて大きいことが予想される。これは、交流損失電流と直流電圧重畳時の“直流成分電流”が、互いに類似した交流印加電圧依存性を示すことと矛盾しない⁽⁷⁾。従って、直流成分電流は、交流印加電界によって増大した貫通水トリ一部の直流コンダクタンスに制限されると考えられる。これらのことから、直流成分電流と交流印加電界の関係が、形式的

に Schottky-plot⁽⁸⁾ に対して直線になれば、貫通水トリ一部において、直流成分電流に対する Poole-Frenkel 型のバルク制限機構が存在する可能性が示される。ただし、厳密には、直流成分電流発生源（見掛け上の起電力）と交流印加電界の関係も明らかにする必要がある。そこで、図 1 に示した実験回路により、交流印加電界と直流成分電流の関係を調べた。図 5 に、その結果の一例を示す。同図より、両者の値は、ほぼ直線上にプロットされることがわかる。この結果は、上記の考察から、直流成分電流が Poole-Frenkel 型のバルク制限電流であること、また直流成分電流発生源の交流印加電界依存性が比較的弱いことを示唆している（強いと非線形性が顕著になるとと思われる）。なお、図 5 に示すように、直流成分電流の平均値よりも最大値を用いたほうが、直線の再現性は良かった。

〈4・3〉 半導電層および水分の影響 図 4(a)より、半導電層が乾燥している場合には、直流成分電流がほとんど発生しないことから、直流成分電流の発生に対する半導電層の直接的な関与は存在しないと考えられる。更に、(b)図および(c)図より、処理銅・未処理銅の組合せが異なると、直流成分電流の交流印加電圧依存性が逆になることから、直流成分電流発生源は、半導電層の吸水により新たに生じた処理銅および未処理銅と水の界面に存在すると考えられる。

著者らの実験では、蒸留水に浸漬した処理銅と未処理銅を電極として交流電圧を印加すると、それらの電極界面では、酸化・還元反応の不均衡性や亜酸化銅と水の接触などにより見掛け上の整流作用が発現し、交流印加電圧に依存する直流成分電流が観測された⁽⁴⁾。本実験のように吸水した半導電層を用いた場合、処理銅や未処理銅と水の界面は、浸漬の場合と比較して非常にソフトな接触状態にあるといえる。しかしながら、この状態においても、浸漬の場合と極めて類似した直流成分電流の交流印加電圧依存性を示したことから、同一の直流成分電流発生機構が存在する可能性が高い。

〈4・4〉 実験モデルと CV ケーブルとの等価性 本実験は、CV ケーブルの内・外部半導電層に半導電性テープ（C テープ）、心線に未処理銅、遮蔽銅テープに処理銅を対応させて行った。そこで、これらの等価性を確認するため、処理銅に現場撤去 CV ケーブルの遮蔽銅テープ、未処理銅に未劣化 CV ケーブルの遮蔽銅テープ（心線を用いるべきであるが形状が不適当であるため代用した）をそれぞれ用いた試料系で発生する直流成分電流を、図 2 に示した実験回路により測定した。なお、半導電層には、未劣化 CV ケーブルから採取したものをを用いた。図 6 に、半導電層の吸水率を変えて測定した直流成分電流の一例を示す。同図と図 4 を比較すると、吸水率 0% における直流成分電流の交流印加電圧依存性がやや異なるものの、ほぼ同じ結果が得られており、試料系による顕著な差異は見られない。このことは、実布設ケーブルにおいても、貫通水トリが存在すれば、同じ機構により直流成分電流が発生すること

図 5 交流印加電界と直流成分電流の関係
Fig. 5. Relationship between AC applied electric field and DC component current.

表 1 撤去 CV ケーブルの調査結果
Table 1. Investigative result of removed XLPE cables.

極 性	条 数	水分量 (p p m)	直流成分電流 (n A)	$\tan \delta$ (%)	絶縁破壊電圧 (k V)
1 相以上 正 極 性	12	715	4.41	0.110	21
3 相全て 負 極 性	17	475	-0.51	0.087	22

(a) 吸水率 0%

(b) 吸水率 2%

図 6 CV ケーブルの半導電層-遮蔽銅テープからなる試料系を用いたときの直流成分電流測定結果の一例

Fig. 6. A result of measured DC component current on using a sample which consists of semiconducting layer and shielding copper tape of XLPE cable.

を示唆している。

〈4・5〉 水トリリー劣化と直流成分電流 図 3 (b) および図 4 (c) から、高圧側に未処理銅、低圧側に処理銅を用いたとき (長期布設ケーブルが this 場合に相当する)、少なくとも半導電層が吸水状態にあれば、正極性の比較的大きな直流成分電流が観測されることがわかる。一方、半導電層が乾燥状態にあれば、絶対値の小さい負極性の直流成分電流が現れやすい (既に述べたように測定系に起因する可能性もある)。

そこで、CV ケーブルにおいても上記の実験結果に類似した傾向が現れるかどうか、水トリリー劣化した CV ケーブルを用いて、水分量と直流成分電流の関係を調べた⁽⁹⁾。ただし、半導電層の水分量に関する測定実績がないため、布設環境の評価指標を与える意味で、ここでは絶縁体外層部の平均水分量を用いた。試料は、直流漏れ電流測定で不良判定され撤去した E-T (内導押出し-外導テープ巻き) タイプの 6.6 kCV ケーブル 29 条 (87 相) で、直流成分電流測定器は、これまでの実験で使用したのと同じである。表 1 に、水分量および直流成分電流などの測定結果 (いずれも平均値) を示す。同表から、1 相以上正極性を示すケーブルは、3 相すべて負極性を示すケーブルよりも絶縁体外層部の水分量が多く、また、直流成分電流と $\tan \delta$ が相対的に大きな値を示すことがわかる。従って、半導電層の水分量が、絶縁体外層部の水分量に対応して増減するとすれば、この調査結果は、これまでの一連の実験結果と矛盾しない。

以上の考察から、直流成分電流の発生条件はほぼ明らかになったが、これを劣化信号としてとらえた場合、直流成分電流は直流漏れ電流や $\tan \delta$ よりも多くの発生条件を要すると考えられる。また、劣化信号自体が非常に微弱であることから、近年では直流重畳法⁽¹⁾も提案されている。今後は、直流重畳時における劣化信号の発生機構を検討し、水トリリー劣化との関係を調査する予定である。

5. ま と め

直流成分電流の発生機構を実験的に考察した結果、水トリリーの直接的な関与は見いだされず、絶縁体 (XLPE) の外部にその発生起源が存在する可能性が強く示唆された。また、半導電層においては、吸水しない限り直接的な関与はないことが示された。吸水した半導電層は、実布設ケーブルの心線および遮蔽銅テープに相当する銅とその酸化物よりなるモデル電極対表面に、水とのソフトな接触界面をつくり、その界面で直流成分電流が発生する可能性が示された。更に、水トリリー劣化 CV ケーブルの直流成分電流や水分量の調査では、これらを支持する結果が得られた。

最後に、絶縁体試料の提供ならびに実験方法に関する助言をいただいた矢崎電線 (株) 橋詰俊成氏ほか関係各位に感謝いたします。また、実験を手伝っていただいた岐阜大学大学院工学研究科 山本貴志君に感謝いたします。

(平成 6 年 2 月 24 日 受付)

文 献

- (1) 例えば、地中配電用ケーブルの信頼性向上調査専門委員会：「地中配電ケーブルの信頼性向上技術」，電気学会技報，(II部)，No. 404 (平4)
- (2) 大西・浦野・内田・仙・小谷・市川：「CVケーブルの水トリー劣化活線診断法の開発」，電気学会絶縁材料研究，EIM-84-75 (昭59)
- (3) 石川・長谷川・橋詰・堀田・谷：「直流成分電流による水トリー劣化診断に関する一考察」，電気学会誘電・絶縁材料研究，DEI-91-63 (平3)
- (4) 熊澤・加藤・有馬・渡辺・高木：「水トリー劣化CVケーブルの直流成分電流発生機構に関する一考察」，電学論B，114，317 (平6-3)
- (5) 坂本・井上・堺：「水トリー劣化CVケーブルの交流充電電流の電圧特性と高調波成分の測定」，平3電気学会全大，No. 1479
- (6) 坂本・井上・堺・中川：「水トリー劣化CVケーブルの交流誘電特性の検討 ($\tan \delta$ の電圧特性と温度特性)」，平4同上，No. 1426
- (7) 坂本・井上・堺・中川：「水トリー劣化CVケーブルの直流重畳法による直流成分電流発生機構に関する検討」，同上，No. 1434
- (8) 電気学会通信教育会：誘電体現象論 (昭48) 電気学会
- (9) 中・熊澤：「撤去CVケーブルの直流成分電流極性に関する一考察」，平5電気関係学会東海支部連大，No. 267

熊澤孝夫 (正員) 1958年6月26日生。1983年岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月中部電力(株)入社。現在，電力技術研究所。CVケーブル，高分子絶縁材料の劣化に関する研究に従事。1990年度電気学会渋澤賞受賞。

都築律統 (正員) 1968年8月17日生。1994年3月岐阜大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。高分子絶縁材料の劣化に関する研究に従事。同年4月(株)日立製作所入社。

有馬泉 (正員) 1931年12月15日生。1957年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。岐阜大学工学部電子情報工学科教授。工学博士。雷放電および気中ギャップの前駆放電に関する研究に従事。静電気学会，レーザー学会，大気電気学会会員。

渡邊貞司 (正員) 1941年11月1日生。1967年3月金沢大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。岐阜大学工学部電子情報工学科教授。工学博士。雷放電および気中ギャップの前駆放電に関する研究に従事。電子通信学会，応用物理学会，静電気学会，レーザー学会，大気電気学会会員。

高木伸之 (正員) 1957年6月28日生。1985年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程後期課程修了。岐阜大学工学部電子情報工学科助教授。工学博士。雷放電に関する研究に従事。大気電気学会会員。