CV ケーブルの直流漏れ電流特性に生じるピーク現象

正員 篠田 千春 (矢崎電線)
 正員 堀田 昌弘 (矢崎電線)
 正員 橋詰 俊成 (矢崎電線)
 正員 谷 恒夫 (矢崎電線)
 正員 田中 康寛 (武蔵工大)
 正員 高田 達雄 (武蔵工大)

Study on the Peak in DC Leakage Current Characteristics of XLPE Cables

Chiharu Shinoda, Member, Masahiro Hotta, Member, Toshinari Hashizume, Member, Tsuneo Tani, Member (Yazaki Electric Wire Co., LTD), Yasuhiro Tanaka, Member, Tatsuo Takada, Member (Musashi Institute of Technology)

DC leakage current measurements have been carried out regularly to diagnose the insulation of XLPE cables. The degree of the deterioration of the cable insulation is determined by the DC leakage current value. On the measurement at the installation of XLPE cables, the DC leakage current sometimes shows a large value with a peak. To clarify the causes of the DC leakage current peak, we investigated the DC leakage current of 6.6 kV dry-cured XLPE cables at different temperatures. The results show that the residue of the crosslinking reaction influences the peak of the DC leakage current. To discuss mechanism of the peak, we also measured the DC leakage current repeatedly at the same cable, and investigated the space charge distribution in the cable insulation by the Pulsed Electroacoustic Method. It is expected that the DC leakage current peak depends on the space charge relative to the residue.

キーワード：CV ケーブル，架橋剤分解残渣，直流漏れ電流特性，パルス静電応用法，ヘテロ電荷

1. ま え が き

従来より，架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル（以下，CV ケーブルと略記）の絶縁劣化診断試験として直流漏れ電流試験が行われており，電圧印加数分後の電流値やその時間特性などからケーブルの良否が判定されている⁽¹⁾。ところが，6 kV 級 CV ケーブルの竣工時の測定では，ピークを伴う大きな電流を示し，「不良」と判定されることがある⁽²⁾。このような現象は，ケーブルの劣化とは関係のない別の原因によって生じているものと予想される。

本研究では，6 kV 級 CV ケーブルを用いて，種々の条件で直流漏れ電流の測定を行い，直流漏れ電流にピークが生じる原因について検討した。その結果，ケーブルの製造直後で測定温度が高いときにピークが生じることが判明し，この原因は絶縁体中の架橋剤分解残渣の影響と推察された。そこで，測定温度を変え，架橋剤分解残渣量（以下，残渣量と呼ぶ）と直流漏れ電流特性との関係について詳細に調査した。そして，測定温度が 20°C 以上で，残渣

量が 0.4 wt% 程度以上になるとピークが生じ，このピークによって電流値が大きくなることが判明した。更に，直流漏れ電流値を大きくするピーク現象について検討するため，直流漏れ電流の繰返し測定を行うとともに，パルス静電応用法で絶縁体中の空間電荷分布の測定も行った。そして，これらの結果から，ピーク発生機構について考察を加えた。

2. 実験方法

〈2・1〉 供試ケーブル 調査には，製造日の異なる数種類の三層同時押出乾式架橋 6 kV 級 CV ケーブル (1×250 mm²) を用いた。ケーブルの絶縁体材料は，HFDJ-4201（日本ユニカー製）であり，一般的な条件で製造したものである。

〈2・2〉 測定条件および方法 直流漏れ電流の測定には，100 m 条長のドラム巻き試料を用い，図 1 に示すようにして行った。試料は恒温槽内に設置し，所定の温度 (13°C～40°C の範囲) に昇温したのち，直流電圧発生器

図 1 直流漏れ電流測定回路
Fig. 1. Circuit for measuring DC leakage current.

図 2 空間電荷分布測定回路
Fig. 2. Circuit for measuring space charge distribution.

(中部精機製 HLD-20 A) を用いて、試料の導体に -16 kV の電圧を 7 分間印加して直流漏れ電流を測定した。なお、後述する繰返し測定を除き、同一試料での測定は 1 回だけとした。

また、絶縁体中に含まれている残渣量は、製造後大気中(室温)に放置する期間を変えて調整した。そして、直流漏れ電流測定前にガスクロマトグラフィー(島津製作所製 GC-1 A)で架橋剤分解残渣の主成分であるアセトフェノンおよびクミルアルコールを定量し、両者の重量和を残渣量とした。

更に、絶縁体中の空間電荷分布の測定にはパルス静電応力法を用い⁽⁹⁾、図 2 に示す回路で行った。直流漏れ電流測定と同様、試料を恒温槽内に設置し、所定の温度まで昇温したのち、 -16 kV の電圧を印加した。この電圧印加状態でパルス電圧(-4 kV, 50 ns)を加え、直流電圧印加直後(0 分)、印加後 1, 3, 7 分に空間電荷分布を測定した。

3. 実験結果

〈3・1〉 直流漏れ電流にピークが生じる条件 まず、製造後の放置日数の異なる試料を用い、種々の測定温度で直流漏れ電流特性を調査した。得られた直流漏れ電流特性は図 3 に示すように、三つのタイプ(A, B, C)に分類する

図 3 代表的な直流漏れ電流特性
Fig. 3. Types of DC leakage current.

図 4 測定温度と直流漏れ電流値との関係
Fig. 4. Relationship between temperature and DC leakage current.

ことができた。A タイプは通常の特性であり、時間とともに電流が減少するものである。また、C タイプは測定時間の 7 分間に電流のピークが生じ、A タイプに比べて著しく大きな電流を示すものである。更に、B タイプは電流がいったん減少するものの、その後時間とともに増加し、その電流値は A タイプと C タイプとの間になるものである。

図 4 に測定温度と直流漏れ電流値(7 分値)との関係をタイプ別に分類して示す。同図から明らかなように、 20°C の温度付近に変曲点があり、この温度より低い領域では直流漏れ電流の特性は A タイプに、この温度より高い領域では B あるいは C タイプになることがわかる。また、電流値は、測定温度の上昇に伴い 20°C 付近まで増加するものの、これ以降では顕著な温度依存性が認められない。更に、放置日数が約 20 日と約 200 日では、約 20 日のほうが大きい。

周知のように、CV ケーブルの絶縁体中には架橋剤分解残渣が含まれており、この物質の量は放置日数に依って減少する。また、架橋剤分解残渣の主成分であるアセトフ

エノン、クミルアルコールの直流漏れ電流の温度特性は、両者ともこれらの物質の融点に相当する 20°C 付近に変曲点がある⁽⁴⁾。これは、図 4 に示した温度特性と一致している。このようなことから、直流漏れ電流特性はケーブル絶縁体中に存在する架橋剤分解残渣の影響を大きく受けているものと考えられる。

〈3・2〉 架橋剤分解残渣量と直流漏れ電流特性との関係

直流漏れ電流値が大きくなる 20°C の温度以上で、架橋剤分解残渣の量と直流漏れ電流特性との関係を調査した。この結果を図 5 に示す。同図からわかるように、直流漏れ電流の特性は、各温度で C タイプが多くを占めており、残渣量が比較的少なくなる (0.4 wt% 程度以下) と B タイプになっている。また、各温度における直流漏れ電流の 7 分値は、残渣量の増加に伴い大きくなっており、この増加傾向は、20°C の温度に比べ、30、40°C の温度で顕著である。しかし、30、40°C の 7 分値には大きな差が認められない。

図 5 架橋剤分解残渣量と直流漏れ電流値との関係
Fig. 5. Relationship between crosslinking reaction residue and DC leakage current.

図 6 直流漏れ電流の 7 分値とピーク値との関係
Fig. 6. Relationship between DC leakage at 7 min. and peak current.

これらのことから、20°C の温度以上で絶縁体中に架橋剤分解残渣が多く含まれていると直流漏れ電流特性にピーク (C タイプ) が生じることがわかった。また、直流漏れ電流の 7 分値は、直流漏れ電流にピークが生じることによって大きくなっていると考えられる。

そこで、直流漏れ電流の 7 分値とピーク値との関係を調査した。その結果を図 6 に示す。同図からわかるように、ばらつきはあるもののピーク値が大きくなると 7 分値も大きくなる傾向を示している。このように、直流漏れ電流特性に C タイプが生じることによって、直流漏れ電流値 (7 分値) は大きくなる。

上記の調査結果から、ケーブル絶縁体中に架橋剤分解残渣が 0.4 wt% 程度以上存在し、架橋剤分解残渣の融点 (約 20°C) 以上の温度になると直流漏れ電流特性にピークが生じ、このピークによって直流漏れ電流値 (7 分値) が大きくなることがわかった。このことから、次章では、直流漏れ電流特性のピーク (C タイプ) がどのような現象によって生じているのか検討する。

4. C タイプで生じるピーク現象の検討

〈4・1〉 直流漏れ電流のピークと架橋剤分解残渣との関係

直流漏れ電流のピーク値とピークが生じるまでの時間 t_p と架橋剤分解残渣の量との関係を調査した。これらの結果を図 7、図 8 に示す。図 7 からわかるように、各温度で残渣量が多くなるとピーク値も大きくなっている。30°C、40°C は 20°C に比べて大きいものの、30°C と 40°C には顕著な差が認められない。一方、残渣量と t_p との関係は、図 8 に示すように、残渣量の増加に伴い t_p が短くなっている。30°C と 40°C が 20°C に比べて短くなっているが、30°C と 40°C には著しい差は認められない。

絶縁体中を流れる電流は、移動するキャリアの量とその移動度によって変化する。図 7 に示したように、残渣量に依存してピーク値は大きくなっている。また、図 8 に示し

図 7 架橋剤分解残渣量とピーク値との関係
Fig. 7. Relationship between crosslinking reaction residue and peak current.

たピークが生じるまでの時間 t_p から推定されるキャリアの移動度は⁽⁶⁾、残渣量によって大きく変化している。これらのことから、架橋剤分解残渣はキャリアの量とその移動度に関与していると考えられる。

〈4・2〉 直流漏れ電流特性に及ぼす空間電荷の影響

高分子材料中に空間電荷が形成されていると電流時間特性にピークが認められることが報告されている⁽⁶⁾。C タイプの現象を示す試料の絶縁体中にも、空間電荷が形成されていることが予想される。そこで、比較的残渣量の多い試料 (0.8 wt%) に数回の電圧を繰返し印加し、繰返し測定による直流漏れ電流特性の変化を調査した。この試験では、導体に -16 kV の電圧を7分間印加して直流漏れ電流測定を行ったのち、導体と遮蔽銅テープを1時間接地するという測定を5回繰返した。なお、直流漏れ電流測定および接地時の温度は 40°C とした。結果を図9に示す。同

図からわかるように、ピーク値は繰返し測定することにより小さくなり、ピークが生じるまでの時間 t_p は長くなっている。この結果から、絶縁体中には空間電荷が形成されているものと考えられる。

そこで、絶縁体中の空間電荷の状況を詳しく調査するため、直流漏れ電流にピークが認められた同一ロットの試料を用いて、種々の条件で空間電荷分布を測定した。既に述べたように、直流漏れ電流のピーク現象は、20°C 以上の温度で認められ、そのピーク値は残渣量に依存して大きくなる。そこで、空間電荷分布の測定は、製造直後の残渣量の多い試料 (1.2 wt%) を 18°C と 30°C で測定するとともに、この同一ロットの試料を約 300 日放置させ、残渣量を減少させた試料 (0.55 wt%) を 30°C で測定した。これらの測定結果を図10(a)~(c)に示す。(a)、(b)図

図8 架橋剤分解残渣と t_p との関係
Fig. 8. Relationship between crosslinking reaction residue and t_p .

図9 繰返し測定による直流漏れ電流の変化
Fig. 9. Change of DC leakage current measured repeatedly at the same cable.

(a) 測定温度: 18°C, 残渣量: 1.2 wt%

(b) 測定温度: 30°C, 残渣量: 1.2 wt%

(c) 測定温度: 30°C, 残渣量: 0.55 wt%

図10 空間電荷分布の測定結果 (0, 1, 3, 7 分)
Fig. 10. Space charge distributions (0, 1, 3, 7 min).

図 11 印加電圧とピーク値、 t_p との関係
Fig. 11. Change of peak current and t_p with various applied voltages.

の比較から明らかなように、18°Cでは空間電荷が形成されていない。一方、30°Cでは負極性の電圧を印加した内部半導電層側に急峻な正のヘテロ電荷が、絶縁体中央部付近に緩慢な負の空間電荷が形成されている。また、両者の空間電荷量は時間とともに増大し、電極側にドリフトしている。このような空間電荷の形成は、既に高電界 (32 kV/mm) で確認されている⁽⁷⁾が、本実験のような低電界 (4.6 kV/mm) でも生じることが判明した。一方、残渣量の少ない試料での空間電荷分布は、(c)図に示すように、正、負の空間電荷量が(b)図の製造直後より大幅に減少している。これらの結果から、直流漏れ電流のピークは、架橋剤分解残渣に関与する空間電荷によって影響を受けていると推測される。

更に、直流漏れ電流のピーク値と空間電荷量との関係を調査するために、製造直後の同一ロットの試料に種々の負極性電圧 (10, 16, 20, 24 kV) を7分間印加して直流漏れ電流の測定および空間電荷分布の測定 (0, 1, 3, 7分) を行った。なお、測定温度はすべて30°Cとした。直流漏れ電流特性では、各印加電圧でピーク (Cタイプ現象) が認められた。ピーク値およびピークが生じるまでの時間 t_p と印加電圧との関係を図 11 に示す。同図からわかるように、印加電圧の上昇に伴いピーク値は大きくなり、 t_p は短くなる。一方、絶縁体中に形成される空間電荷量は印加電圧が高いほど多く、また各印加電圧の空間電荷量は時間とともに増加していた。その代表例として、各印加電圧での印加後1分および印加後3分の空間電荷分布を図 12(a), (b)に示した。このような結果から、ピーク値と空間電荷量との関係を調査した。空間電荷量は、各印加電圧でピークが生じた時間に近い印加後3分の空間電荷分布から求めており、正および負の空間電荷量の和を直流漏れ電流測定時と同じ長さ100 mに換算して求めた。ピーク値と計算によって求めた空間電荷量との関係を図 13 に示す。

(a) 印加後1分

(b) 印加後3分

図 12 各印加電圧の空間電荷分布
Fig. 12. Space charge distributions by various applied voltages.

図 13 ピーク値と空間電荷量との関係
Fig. 13. Relationship between peak current and space charge quantity.

す。同図に示すように、ピーク値と空間電荷量との間で良い関係が認められる。

以上の調査結果から、Cタイプのピークは、絶縁体中に形成された空間電荷と強く関係していることがわかった。

5. 考 察

絶縁体中に形成される空間電荷のキャリアについて検討し、そののちにピーク発生機構について若干考察する。

〈5・1〉 キャリヤの検討 図 10(b)に示したように、各測定時間でヘテロの空間電荷が認められた。この空間電荷分布は、4.6 kV/mm と比較的低い電界で測定されたものである。一般的に、このような電界では電極から電子性キャリアは注入されないと考えられる。また、電子性キャリアの注入がある場合、ホモの空間電荷が形成されることが知られている⁽⁷⁾。これらのことから、空間電荷を形成しているキャリアとしては、電極から注入された電子性キャリアは考え難く、絶縁体内部から生じたイオン性キャリアと推察される。

既に記述したように、架橋剤分解残渣の量に依存してピーク値が大きくなったことから、空間電荷を形成しているキャリアとして、架橋剤分解残渣が測定温度によって解離した熱解離イオンが考えられる。ここでは、その可能性について検討するため、十分に真空乾燥処理した 6 kV 級 CV ケーブルに架橋剤分解残渣の成分であるアセトフェノン、クミルアルコールなどを含浸させ、空間電荷分布の測定 (−16 kV, 30°C, 7 分間) を行った。実験には、アセトフェノン、クミルアルコールおよび蒸留水をそれぞれ 30 ml/として、40°C で混合した溶液を用いた。そして、その混合液を 40°C で 2.5 日間、ケーブルの外側から絶縁体中に含浸させた。なお、その含浸ケーブルの残渣量は、内層部で 0.96 wt%, 中層部で 1.81 wt%, 外層部で 2.29 wt% であった。その空間電荷分布の測定結果を図 14 に示す。なお、同図には残渣量が 1.2 wt% 含まれている製造直後のケーブルで同様な条件で測定した結果〔図 10(b)の結果〕も併せて示した。図 14 に示すように、製造直後ケーブルの絶縁体中には空間電荷が形成されているが、含浸ケーブルには空間電荷が形成されていない。このことから、絶縁体中に形成される空間電荷のキャリアは、アセトフェノン、クミルアルコールおよび水による熱解離イオンではないと推察される。

上記実験から、空間電荷を形成しているキャリアとして

図 14 空間電荷分布 (−16 kV, 30°C, 7 分)
Fig. 14. Space charge distributions (−16 kV, 30°C, 7 min).

は、ケーブル製造時によって生成された物質の熱解離イオン (上記の架橋剤分解残渣は除く) と、ケーブル製造時に生成された物質がイオン化され、そのイオンが絶縁体中で凍結された遊離イオン (測定前の絶縁体中に存在するイオン) とが考えられる⁽⁵⁾。

〈5・2〉 ピーク発生機構 これまでの調査、検討結果から明らかになった主な事項をまとめると次の四つになる。

(1) 絶縁体中に架橋剤分解残渣が 0.4 wt% 程度以上存在し、その融点付近の 20°C 以上の温度になると、直流漏れ電流にピークが生じる。

(2) 残渣量に依存してピーク値は大きくなり、ピークが生じるまでの時間 t_b は短くなる。

(3) 30°C, 40°C のピーク値は、20°C に比べて大きくなり、 t_b は短くなる。しかし、ピーク値および t_b とともに、30°C と 40°C で顕著な差が認められない。

(4) ピーク値は、ケーブル製造時によって生成された物質の熱解離イオンあるいは遊離イオンによって形成された空間電荷量と対応していると推測される。

上述した結果から、幾つかのピーク発生機構が考えられるが、ここでは空間電荷形成のキャリアの生成時期によって二つの機構を提案する。その一つは、測定温度によって熱解離したイオン性キャリアが架橋剤分解残渣を媒体として移動し、空間電荷を形成することによってピークが生じるとするものである。もう一つは、架橋剤分解残渣を媒体として遊離イオンがヘテロの空間電荷を形成することにより、負極性電極近傍の電界を高くし、電極側から電子が注入されることによってピークが生じるとするものである。後者の電子注入については、既にポリエチレンにアセトフェノンを塗布し、電圧を印加すると電極から電子性キャリアが注入されることが報告されている⁽⁸⁾。しかしながら、いずれの機構でもいくつかの疑問点がある。例えば、前者では空間電荷を形成するキャリアが熱解離イオンであるにもかかわらず、30°C と 40°C のピーク値 (図 7) に差がほとんど認められない。また、後者では、空間電荷形成時の負極性電極側の電界が図 10(b)に示した空間電荷分布からみると、さほど大きくない。今後、どのような機構によってピークが生じているのか解明したいと考えている。

6. ま と め

直流漏れ電流特性にピークが生じる原因を明らかにするために、6 kV 級 CV ケーブルを用いて、種々の温度で残渣量と直流漏れ電流特性との関係を調査するとともに、繰返し測定試験および空間電荷分布測定を行った。その結果、次のことがわかった。

(1) 架橋剤分解残渣は直流漏れ電流特性に大きく影響を及ぼし、残渣量が 0.4 wt% 程度以上、測定温度が 20°C 以上になると直流漏れ電流特性にピークが生じ、このピークによって電流値 (7 分値) が大きくなっている。

(2) 残渣量に依存して直流漏れ電流のピーク値は大き

くなり、またピークが生じるまでの時間は短くなる。

(3) ピークが生じる試料の絶縁体中には、空間電荷が形成されており、負極性を印加した内部半導体電層側には正の空間電荷が、絶縁体中央部付近には負の空間電荷が形成される。

(4) 直流漏れ電流のピークは、架橋剤分解残渣に関与する空間電荷と強く関係していると推察された。

終りに、日ごろから御指導をいただき愛知工業大学家田正之教授に深く感謝いたします。

(平成6年9月26日受付、同6年12月5日再受付)

文 献

- (1) 「絶縁劣化診断試験方法」, 電気学会技報 (II部), No. 182 (昭59)
- (2) 山田・宮本: 「CV ケーブルの漏洩電流特性」, 第10回電気絶縁材料シンポジウム, I-5 (昭52)
- (3) Y. Li, M. Yasuda & T. Takada: "Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. DEI*, 11, No. 2, 188 (1994)
- (4) 速水・山之内・八束: 「XLPE ケーブルの漏洩電流特性」, 第14回電気絶縁材料シンポジウム, P-7 (昭56)
- (5) 電気学会: 誘電体現象論 (昭48) オーム社
- (6) 例えば, 山下・金子・中村・日野: 「ポリエチレンテレフタレート of 極性反転破壊に及ぼすイオン空間電荷の効果」, 第12回電気学会絶縁材料シンポジウム, I-11 (昭54)
- (7) 李・保田・高田: 「XLPE 中の架橋残渣が空間電荷分布形成に及ぼす影響」, 電学論 A, 112, 209 (平4-3)
- (8) 峰雪・水野・長尾・小崎: 「アセトフェノン塗布ポリエチレンフィルムの高電界電気伝導特性」, 電気学会研資, DEI-93-115 (平5)

篠田 千春 (正員) 1960年1月1日生。1982年3月名城大学理工学部電気工学科卒業。同年4月矢崎総業(株)に入社, その後, 矢崎電線(株)に配属され, 現在に至る。主として, CV ケーブルに関する調査・研究に従事。

堀田 昌弘 (正員) 1964年10月11日生。1988年3月日本大学生産工学部電気工学科卒業。同年4月矢崎総業(株)入社。その後, 矢崎電線(株)に配属され, 現在に至る。主として, CV ケーブルに関する調査・研究に従事。

橋 詰 俊 成 (正員) 1953年1月8日生。1975年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年4月昭和電線電纜(株)入社。1983年武蔵工業大学大学院修士課程(電気工学専攻)修了。同年4月矢崎総業(株)入社, その後, 矢崎電線(株)に配属され, 現在に至る。工学博士。この間, 有機絶縁材料, CV ケーブルの研究に従事。

谷 恒 夫 (正員) 1940年7月16日生。1963年3月東北大学工学部電気工学科卒業。同年4月矢崎電線(株)入社。主として, 高電圧ケーブルの設計・特性評価技術, 特性向上の研究開発に従事。現在, 同社電線技術開発事業部長。

田 中 康 寛 (正員) 1961年9月10日生。1991年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。1990年4月同大学理工学部助手嘱任。1992年4月武蔵工業大学機械工学科専任講師着任。工学博士。有機高分子絶縁材料の高電界特性, 特に空間電荷分布の研究に従事。1990年電気学会論文発表賞受賞。

高 田 達 雄 (正員) 1939年8月8日生。1963年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。1966年東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻修士課程修了。1967年4月武蔵工業大学講師, 1974年4月同助教授, 1986年同教授。工学博士。1981年9月~83年2月アメリカMIT 客員研究員。主として, 高分子誘電体中の帯電現象と空間電荷測定技術の研究に従事。1974, 81, 90年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。