22 kV CV ケーブルの絶縁劣化測定法の検討

正 員 海老沼 康 光 (昭和電線電纜)

正 員 久保田 泰 行 (昭和電線電纜)

正 員 川 井 二 郎 (昭和電線電纜)

正 員 藤 原 靖 隆 (昭和電線電纜)

Discussion on Measurement Method of Insulation Diagnosis for 22 kV XLPE Cable

Yasumitsu Ebinuma, Member, Yasuyuki Kubota, Member, Jiro Kawai, Member, Yasutaka Fujiwara, Member (Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd)

Measurement method of Insulation diagnosis for 22 kV cable has not yet been fully established. We measured electrical properties of the cables with different degradation grade by various methods. As a result, we found some desirable methods of insulation deterioration for future study. For DC leakage current and $\tan\delta$ measurements, it is possible to analyze their effective data using these insulation diagnosis methods. Measurements of residual charge, loss current and transient current under DC superimposition enable us to detect the insulation degradation. Therefore it is necessary to gather a lot of data using these method for an effective insulation diagnosis. In this study, we also discussed the generating mechanism of residual charge and loss current, and influence of outer semiconductor layer in these methods.

キーワード: CV ケーブル, 絶縁劣化測定, 残留電荷, 損失電流

1. ま え が き

電力エネルギーの安定供給のため、電力ケーブルの絶縁破壊事故を未然に防止することは重要なことである。このため、保守点検の一環として絶縁劣化診断が行われている。6.6 kV 高圧 CV ケーブルでは各種測定法が提案されているが、22 kV 以上の特別高圧ケーブルについては研究中であり、まだ有効な測定法が提案されていない。そこで著者らは、劣化程度の異なるケーブルに各種測定を試み、劣化診断の可能性について検討した。

2. 供試ケーブル

供試試料は 22 kV CV ケーブル(試料長 5 m)で、表 1 に示すような 3 種類である。実使用後撤去されたケーブルは 2 種類あり、各々劣化の程度が異なっている。もう 1 種類は新品で、比較用である。これらの交流破壊試験結果も表 1 に示す。同表によると、交流破壊電圧は試料②より③のほうが低いので、このことから③のほうが劣しているといえる。また、試料③は水トリーが多発しているばかりでなく、外部半導電テープが著しく劣化しており、この点も試料②と異なっている。

表 1 供 試 試 料

Table 1. Samples.

供試ケーブル	試料数	破壊電圧	備 考
① 新品	1	(250~300 kV)	他の破壊値も含む
② 撤去品(劣化小)	2	80, 130 kV	約 10 年使用
③ 撤去品(劣化大)	4	50 ~ 80 kV	水トリー多発

3. 測 定 項 目

絶縁劣化測定法としては各種提案されている⁽¹⁾。それらは測定原理により部分放電、誘電緩和(界面分極)、絶縁抵抗、直流分電流など、大きく 4 種類に分類できる。各分類の中から少なくとも一つ以上を選択し、表 2 に示す項目について測定を実施した。

測定条件も表 2 に示すが、交流は使用電圧(損失電流は 60 Hz で、損失電流以外は 50 Hz の $22 \text{ kV}/\sqrt{3}$)、直流電圧は 22 kV CV ケーブルの絶縁測定に推奨されている 30 kV⁽²⁾とした。なお、部分放電は CV ケーブルの場合欠陥があっても直流では発生しにくい⁽³⁾ので、交流とした。また、直流重畳はその波高値が 30 kV 以下となるように 10 kV を選んだ。

表2 測定項目
Table 2. Measurement methods.

項目	測定条件
① 部分放電	AC 12.7 kV
② 直流漏れ電流	DC 30 kV の 10 分値
③ $\tan\delta$	AC 12.7 kV
④ 損失電流	AC 12.7 kV (この測定のみ AC 60 Hz)
⑤ 残留電荷	DC 30 kV 10 分→10 分接地→AC 12.7 kV
⑥ 直流成分	AC 12.7 kV
⑦ 直流重畳	AC 12.7 kV と DC 10 kV

表3 直流漏れ電流および $\tan\delta$ の測定結果
Table 3. Results of leakage current and $\tan\delta$.

試料	直流漏れ電流 (nA)	$\tan\delta$ (%)
① 新品	0.2	0.02
② 撤去品(劣化小)	2 試料とも 0.4	0.07, 0.08
③ 撤去品(劣化大)	すべての試料 0.2	3.3~3.8 (0.53*)

* 外導テープ巻き直し後の測定値

4. 測定結果

〈4・1〉 部分放電 部分放電は使用電圧まですべての試料で発生しなかった。一般的には、更に電圧を上げると、水トリー先端から電気トリーが進展し、部分放電も発生する。このような劣化状況を部分放電によって検出することは可能であるが、今のところ放電開始電圧が使用電圧(測定可能な最高電圧)まで低下した例はほとんどない。従って絶縁劣化診断としての有効性は不明である。

〈4・2〉 直流漏れ電流 直流漏れ電流測定結果を表3に示すが、交流破壊値(表1)には明らかに差があるにもかかわらず、漏れ電流の差はほとんどない。直流漏れ電流については表1の試料以外のデータもあるので、それらも含めて第5章で考察する。

〈4・3〉 誘電正接 $\tan\delta$ 測定結果も表3に示す。これによると、劣化に伴って $\tan\delta$ の増加が見られ、試料③は $\tan\delta$ が著しく大きい。この試料は外部半導電テープが劣化している可能性があるため、新品の外部半導電テープで巻き直して再測定した。その結果も表3の()内に示すが、約 1/6 に小さくなっており、外部半導電テープの劣化の影響があったといえる。しかし、 $\tan\delta$ としてはまだ非常に大きく、 $\tan\delta$ が絶縁体自身の劣化特性を示していると考えられる。

〈4・4〉 損失電流 $\tan\delta$ 測定と同様な手法で供試ケーブルの静電容量分(基本波成分のみ)を打ち消した残りの電流(主としてケーブルの抵抗成分の電流なので損失電流と呼ばれている)を観測する手法⁽⁴⁾が開発されている。そこで著者らも、図1に示すような損失電流測定器を試作し、損失電流波形をシンクロスコープで観測した。その波形は所らの結果⁽⁴⁾と同様に正弦波(基本波)にひずみ(高調波)が重畳していた。そこで、更に周波数分析を行い、そ

図1 損失電流測定回路

Fig. 1. Measuring circuit of loss current.

図2 損失電流の周波数解析

Fig. 2. Frequency analysis of loss current.

図3 損失電流(第三調波)と交流破壊電圧との相関

Fig. 3. Correlation between loss current and AC breakdown voltage.

の結果を図2に示す(この損失電流については第3章で述べたように 60 Hz で測定した)。これによると基本波の次に第三調波が大きく現れている。そこで損失電流に含まれる第三調波の大きさと交流破壊電圧の相関を調査した。その結果を図3に示す。同図中の斜線の四角は各々縦、横軸のばらつきの範囲を示す。図3によると、第三調波分が大きくなるに従って、破壊値は低下している。そこで更に試料③について、外部半導電テープを新品に巻き直して再測定した。その結果も図3に示す。損失電流(第三調波)も $\tan\delta$ と同様に、巻き直しにより小さくなっている。しかし、試料①や②に比べて 20 dB (1 桁) 以上大きい。従って、ケーブルの絶縁劣化測定法として損失電流は有効な手

法と考えられる。

＜4・5＞ 残留電荷 直流課電後に交流電圧を印加すると、接地線に直流成分が流れる。この電流の積分を残留電荷と称し、絶縁劣化診断に応用する研究が行われている⁽⁶⁾。著者らも表2に示す条件で測定を行った。その残留電荷と交流破壊電圧の相関を図4に示すが、良い対応が見られる。また、外部半導電テープを新品に巻き直した結果も同図に示す。これによると、これまでの各種測定値と同様に残留電荷は小さくなるが、試料①や②に比較して大きい傾向にある。従って残留電荷は絶縁劣化測定に有効と考えられる。

そこで、残留電荷の特性を更に調査した。図5(a)に直流印加電圧をパラメータとして、交流電圧印加特性を示す。同図の縦軸は、交流電圧をステップアップしたときに発生する残留電荷の累積である。その残留電荷は交流印加電圧とともに増加し、直流印加電圧以上の交流電圧(波高値)では一定になる傾向がある。(b)図に直流印加電圧特性を示す。同図によると、直流印加電圧の増加に伴って残留電荷も大きくなっている。また、劣化の程度が大きい試料では大きな残留電荷が発生している。(c)図に直流電圧の印加時間と印加後の接地時間を変えて測定した結果を示す。これによると、残留電荷として観測される電荷は、直流課電直後に急速に注入されるが、接地してもすぐに放出されずトラップされている電荷といえる。このような特性は絶縁測定実施上からも望まれるところである。以上を考え合わせると残留電荷は有効な絶縁劣化測定法といえる。

＜4・6＞ 直流成分 今回の試料では、直流成分はすべて0.2 nA以下であった。そこで、図6に示すように、φ3の穴あきポリエチレン(3 mm厚)の穴に水を注入し、水トリ－模擬とし直流成分の測定を試みた。各測定電圧で3回測定し、その正負それぞれの極性の最大値を図7に示す。図6の試料(貫通水トリ－模擬)では直流成分が観測され、

極性が不安定で大きさも変動する。この傾向は水トリ－劣化ケーブルで観測される結果と似ている⁽⁶⁾。

上述のことは貫通水トリ－の模擬についてであった。そこで、図6の試料と低圧電極間に約30 μmのポリエチレ

(a) 残留電荷の交流電圧印加特性(試料③)

(b) 残留電荷の直流印加電圧特性

(c) 残留電荷への直流印加時間、接地時間による影響(試料③)

図4 残留電荷と交流破壊電圧との相関

Fig. 4. Correlation between residual charge and AC breakdown voltage.

図5 残留電荷の特性

Fig. 5. Characteristics of residual charge.

ンシートを挟んで、同様の試験を行った。この場合は直流成分が観測されなかった。このことから、貫通水トリーが存在しないと直流成分は測定されないと推定される。22 kV ケーブルにおいて貫通水トリーが発生している状態では使用電圧で長期間耐えるとは考え難い。このことから、直流成分は 22 kV ケーブルの絶縁劣化測定への適用が難しいと思われる。

〈4・7〉 直流重畳(直流重畳過渡電流) 交流電圧に直流電圧を重ねたとき流れる直流分を測定する方法があ

図 6 模擬水トリーによる直流成分の測定回路
Fig. 6. Measurement circuit of DC component for water tree.

図 7 直流成分測定結果
Fig. 7. Measurement results of DC component.

図 8 重畳過渡電流と交流破壊電圧との相関
Fig. 8. Correlation between AC breakdown voltage and transient current for DC superimposed method.

る⁽⁷⁾。著者らも通常の直流重畳法で測定したが、0.2 nA 以下で劣化信号をとらえることができなかった。しかし直流電圧を印加し十分時間がたった(充電電流がなくなった)後、交流電圧を印加すると、その後過渡的に流れる電流(直流重畳過渡電流と呼ぶ)が観測された。そこで、その電流のピーク値を測定し、交流破壊電圧との相関を調査した(図 8)。これによると、直流重畳過渡電流と交流破壊電圧にはよい相関がある。しかし、試料③の外半導電テープを巻き直すと、直流重畳過渡電流は小さくなり、試料②と同程度となる。このことから、感度よく測定するには更に工夫が必要と考えられる。

5. 絶縁劣化測定法の検討

〈5・1〉 比較検討 各種測定データと交流破壊電圧について、その相関を述べてきた。そこで、ここでは各種測定法の比較検討を行う。測定法の有効性を比較するには相関係数が合理的と考える。今回のデータは非常に少ないが、参考ため解析を行った。縦軸は交流破壊電圧とし、横軸は測定値が桁違いに変化すること、相関が右上り関数になるようにすることなどを考慮して $\log(1/x)$ (x : 各測定データ)とした。その結果を表 4 に示す。ここで直流漏れ電流については表 1 の試料以外のデータもあるので、それも含め解析し、その結果を表 4 に示した。しかし、その相関係数は 0.01 と小さかった。そこで、漏れ電流が極端に小さい(0.2 nA 以下)場合を除いて再び解析すると相関係数は 0.31 と大きくなる。絶縁体の漏れ電流に影響しないような(例えば、外部半導電テープ劣化など)絶縁劣化形態を層別できるとすれば、上述の解析も有効となる。また、 $\tan \delta$ についても表 1 に示した以外の手持ちデータがある。そこでそれらも含め、交流破壊電圧との相関係数を漏れ電流と同様に計算した。その結果も表 4 に示すが、相関係数は 0.22 であり、データ数が増えても相関係数に向上が見られない。従って、直流漏れ電流や $\tan \delta$ については劣化状態によって層別することが理想だが、布設ケーブルでは不可能なので、今後は製造年、構造、布設環境によって層別を行い、その有効性を高める方法を検討する方向がよいと考える⁽⁸⁾。一方、損失電流、残留電荷、直流重畳過

表 4 各種測定法の相関係数
Table 4. Correlation factor of each method.

測定項目	相関係数
部分放電	(5 pC 以上発生せず)
直流漏れ電流	0.01 (0.31*)
$\tan \delta$	0.48 (0.22**)
損失電流	0.72
残留電荷	0.86
直流成分	(計測されず)
直流重畳過渡電流	0.67

* 1 層別を考慮した場合

* 2 データ数を増加した場合

文 献

- (1) 海老沼, 他:「ケーブル劣化診断技術の現状」, 電気学会電線ケーブル研資, EC-90-23 (平2)
- (2) 「特別高圧 CV ケーブル絶縁測定」, 電気協同研究 36, No. 4 (昭55)
- (3) 上野, 他:「33 kV CV 気中終端箱の交流部分放電測定による劣化検出」, 昭和電線電纜レビュー, 37, No. 2, 196 (昭62)
- (4) 所, 他:「交流損失電流波形による新しい劣化診断法の開発」, 平2電気学会全大, No. 314
- (5) 池田, 他:「CV ケーブルの水トリー劣化診断」, 電力中央研報告, No. 86008
- (6) 大西, 他:「CV ケーブルの水トリー活線診断装置」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-86-35 (昭61)
- (7) 秋本, 他:「直流重畳法による CV ケーブルの活線劣化診断」, 同上, EIM-87-102 (昭62)
- (8) 久保田, 他:「22 kV CV ケーブル絶縁診断法の検討」, 同上, DEI-93-102 (平5)
- (9) 斉藤, 他:電気絶縁紙, p.194 (昭44) コロナ社

渡電流については相関係数が0.5以上であり, 劣化診断法として有効性がみられる。今後はデータを蓄積し, その有効性を確認する必要がある。

〈5・2〉 遮へい層の影響 損失電流, 残留電荷および直流重畳過渡電流については有意義な結果が得られている。しかし, 外部半導電テープを新品で巻き直すと, 測定値が少し影響を受ける。そこで, これらについて以下で検討する。

(1) 損失電流(第三調波) 損失電流には図2に示したように第三, 五, 七調波が含まれている。すなわち, 電圧に比例した以上に電流が流れ, 極端に言えば三角波的な電流となっている。

ケーブル絶縁体が劣化すると, 絶縁抵抗が低下する。この絶縁抵抗は一般に電圧特性があり, 電圧が高くなると低下する。この影響で劣化した絶縁体の損失電流に第三調波が含まれていると考えられる。また, 外部半導電層の影響は次のように考えられる。外部半導電層の影響のみを検討する場合, その等価回路はコンデンサ(絶縁体)Cと抵抗(外部半導電層)Rの直列等価回路で表せる。このとき流れる電流の実数部(損失電流)は ωCRI (I :充電電流)となる。 R はカーボンを混入した半導電なので電流の増加とともに大きくなると考えられる⁽⁹⁾。このため, 印加電圧とともに第三調波が大きくなると考えられる。従って外部半導電テープを巻き直すことにより, その半導電抵抗の電流依存性が違ったため, 第三調波の出方が変わったと考えられる。

(2) 残留電荷(直流重畳過渡電流) 〈4・5〉節で述べたように残留電荷は直流課電直後に急速に注入されるが, 接地してもすぐに放出されずトラップされている電荷と考えられる。この電荷の注入・放出にはケーブル絶縁体と半導電層の界面が影響する。このため外部半導電テープを巻き直したことにより残留電荷が変化したと考える。

6. あとがき

22 kV CV ケーブルの絶縁劣化測定法の検討のため, 劣化程度の異なる試料に各種測定を試み, 交流破壊電圧との相関を検討した。その結果および今後の方向づけをまとめると次のとおりである。

(1) 直流漏れ電流や $\tan\delta$ は合理的な層別(例えば, 製造年, 構造, 布設環境)を図り解析する必要がある。

(2) 静電容量分を打ち消した残りの電流である損失電流(第三調波)について劣化診断法の観点から交流破壊電圧との相関を調査し, 有効なデータを得た。

(3) 直流電圧印加に伴う注入電荷を検出する方法(残留電荷, 直流重畳過渡電流)は絶縁劣化測定に有効と思われる。しかし, まだデータ数が少ないので, 更にデータの蓄積が必要である。

(4) ケーブル半導電層は損失電流(第三調波)や残留電荷の測定値にある程度の影響を及ぼす。前者は半導電層抵抗の電流依存性, 後者は半導電層と絶縁体の界面特性によると考えられる。

(平成5年6月23日受付)

海老沼 康 光

(正員) 1947年10月5日生。1972年3月東京都立大学大学院修士課程修了。同年4月昭和電線電纜(株)入社。高圧ケーブルの絶縁設計と絶縁診断方法の開発に従事。1989年電気学会論文賞受賞。

久保田 泰 行

(正員) 1963年8月20日生。1988年3月東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年4月昭和電線電纜(株)入社。高圧ケーブルの絶縁診断方法の開発に従事。

川 井 二 郎

(正員) 1958年3月12日生。1982年3月三重大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年4月昭和電線電纜(株)入社。この間, 電力ケーブルおよび保守技術に関する開発に従事。

藤 原 靖 隆

(正員) 1942年5月9日生。1966年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月昭和電線電纜(株)入社。極低温ケーブルや半合成紙絶縁275~500 kV OF ケーブルの開発を担当。現在, 主として超高圧 CV ケーブルの絶縁やケーブル劣化診断に関する研究に従事。