超低周波耐圧試験による水トリー劣化ケーブルの寿命診断

Life Estimation Method of Water Treed XLPE Cables by VLF Voltage Withstand Test

内田克己*	加藤洋一*	中出雅彦*2
Katsumi Uchida	Yoichi Kato	Masahiko Nakade
井上大輔*2	榊原広幸*3	田中秀郎*3
Daisuke Inoue	Hiroyuki Sakakibara	Hideo Tanaka

概 要 筆者らは,水トリー劣化した特別高圧クラスCVケーブルに超低周波(VLF)電圧を用いた耐圧試験を行うことにより,ケーブル線路の余寿命を判定する方法について検討した。VLF耐圧試験は,試験設備の規模,水トリーの検出能力,試験の健全性の観点から最も優れた耐圧試験と考えられた。撤去ケーブル及びモデルケーブルの破壊試験を行い,水トリー劣化と破壊レベルの相関を調査した。その結果をデータベースとして統計的に解析し,22 kV ~ 77 kV CVケーブルの余寿命判定を可能とする試験電圧を求める新手法を考案し,適切な試験電圧を求めた。これらの結果を基に,フィールド用試験装置を試作,現地試験を行い良好な結果を得ることができた。

1. はじめに

CVケーブルの代表的な経年劣化に水トリー劣化がある。図 1にケーブル絶縁体に発生した水トリーの一例を示す。

水トリーは電界及び水分の作用でケーブル絶縁体に発生する 劣化部分であり,水トリーの存在により絶縁性能が大幅に低下 することが知られている。これら水トリーの発生・伸展は,線 路の健全な運転を阻害することがある。そのため,水トリー劣 化ケーブルの診断技術が強く望まれている。特にそのケーブル が今後何年間使用できるかといった余寿命に関する情報は,ケ ーブル線路の安定的な運用に欠かせない極めて有用なものであ る。

一方,22~77 kVクラスの特別高圧CVケーブルでは,水ト リーが絶縁体を橋絡していない,いわゆる非橋絡水トリーを検 出する必要がある¹⁾。この場合,水トリーから得られる劣化信 号は非常に小さく,これらの劣化診断法で実線路運用されてい るものはない。そこで,我々は,非橋絡水トリーを検出するこ とができ,かつ線路の余寿命推定が可能な方法として,耐圧試 験法に着目した。

我々はまず,現地試験への適用性を踏まえ,耐圧試験に用い る電圧波形の選定を行った。その結果,水トリー劣化ケーブル の耐圧試験には周波数の低い交流高電圧,すなわち,超低周波 (Very Low Frequency, VLF)電圧が最も優れていると結論で きた。そこで,水トリー劣化ケーブルの破壊特性を詳細に調査 し,その結果を統計的に解析することにより,最適な試験電圧 を求める方法を考案した。更に,これらの試験電圧が水トリー 劣化ケーブルに悪影響を与えないことを確認した。

以上の研究成果を基に,現地試験可能な試験装置を試作し, フィールド試験を実施したので報告する。

2. 耐圧試験波形の選定

一般的に,耐圧試験には商用周波交流(以下,AC)及び直 流(以下,DC)高電圧が用いられる。しかしながら,以下の 理由により現地耐圧試験には適していない。まず,ACの場合, 運転電圧以上の電圧を課電する場合は非常に大型の設備が必要 となり,現地で容易に試験を行うことが難しい。一方,DCの 場合,課電設備は簡易なものが使用できるが,接地トリー¹¹が 発生しやすく,健全性に問題がある。以上の観点から,現地耐 圧試験を行うために必要な要素として,以下に示すものが望ま れる。

(1) 試験設備が軽量コンパクトであること

- (2) 欠陥検出能力に優れていること
- (3) ケーブル線路に有害性を与えないこと



図1 ケーブル絶縁体に発生した水トリー Water treed XLPE cable

^{*} 中部電力株式会社

^{*2} 東京電力株式会社

^{*3} 環境・エネルギー研究所 エネルギー伝送研究部

これらの要素を最も多く満たす試験波形が,耐圧試験に適した波形と言える。我々は従来の耐圧試験に用いられるAC,DCにくわえて,機器サイズ低減が期待されるVLF及び減衰振動波(Oscillating Wave,OSW)²⁾⁻³⁾を加えて実験的に上記の(2)及び(3)を検証した。

まず,各種電圧波形における検出能力を把握するために,水 トリーモデルを設けたケーブル^{の、7)}を用いて各種電圧波形下の 破壊試験を行った。図2に各種電圧波形破壊値をACに対する 比率で表したものを示す。同図より,水トリーの破壊電圧は, ACが最も低く,次いでVLF,OSWとなりDCは最も高いこと がわかる。

つぎに,有害性に関して検証した。水トリー劣化ケーブルに は様々な劣化程度の水トリーが存在する。この場合,様々な劣 化程度の水トリーの中に,当面は運用に無害な水トリーと運用 に有害な水トリーが混在していることが想定される。耐圧試験 では,運用に有害な水トリーを破壊する際に,当面運用に無害 である水トリーの特性を変えることは許されない。特に,接地 トリーに代表されるように運用に無害な水トリーから電気トリ ーを発生させることは,ケーブルの絶縁性能を大幅に低下させ る。以上の観点から,複数の水トリーモデルを設けたケーブル を用いて,各種電圧下で破壊試験を行った。破壊試験によって, 一つの水トリーモデルは破壊するが,同一ケーブルに設けたそ の他の水トリーモデルは破壊しない。この破壊しない水トリー モデルの先端を観察し,電気トリー発生有無に関して調査し た。

図3に一例として,VLF及びDCの水トリーモデル先端の写 真を示す。同図より,VLFでは電気トリーが発生していないこ とがわかる。これに対してDCの場合,水トリーモデルの先端 から電気トリーが発生している。このようにして,電気トリー 発生有無を調査した結果,AC及びVLFは電気トリーを発生さ せる恐れは極めて少ないが,DC及びOSWは電気トリーを発 生させやすいという特性があることがわかった。

以上の試験結果を基に,前述した耐圧試験波形として望まれる3つの要素を満たすか否かを最適,適する,適さないの基準 で判断した。結果を表1に示す。

ACは,水トリーの検出能力は高いものの,運転電圧以上の 課電を行うには大規模な試験設備が必要であり,劣化ケーブル の耐圧試験波形として適しているとは言えない。









(b) DC

図3 水トリーモデル先端の写真 Tip of the water tree model

長1	耐圧試験波形の適性 Aptitude for voltage withstand test

試験波形	試験装置規模	水トリー検出能力	健全性
AC	×		
DC		×	×
VLF			
OSW			×
目、卒		いきさわい	

; 最適 , ; 適する , x ; 適さない

つぎに, DCは, 試験装置を最も軽量かつコンパクトにでき るが,水トリーの検出能力に劣り,有害性の面からも耐圧試験 波形として適していない。

一方, VLFは, 試験装置をACに比べて軽量・コンパクトに することが可能であり, 水トリーの検出能力もACに次いで高 い。更に, ケーブル健全性にも優れており, 耐圧試験波形とし て適していると言える。

最後に,OSWは,試験設備の規模・水トリーの検出能力は VLFに匹敵するものの,有害性の面からは耐圧試験に適してい るとは言い難い。

よって,水トリー劣化ケーブルの耐圧試験に用いる試験波形 としてVLFが最も適していると結論した。

3. 水トリー劣化ケーブルのAC及び

VLF破壊電圧と水トリーの進展特性

2章の結果より,水トリー劣化ケーブルの耐圧試験にはVLF 電圧が最も優れていることがわかった。そこで,VLF耐圧試験 条件を検討するために,撤去ケーブル及びモデルケーブルを用 いてAC及びVLF破壊電圧を詳細に調査した。AC破壊電圧は, モデルケーブルのAC破壊試験及び22~77kV撤去ケーブルの AC前駆遮断試験に関する文献データ¹⁾を調査することにより



図4 AC破壊電圧(前駆遮断電圧)の残存絶縁厚依存性 AC breakdown (pre interruption) voltage as a function of residual insulation thickness

取得した。一方,VLF破壊電圧は,モデルケーブル及び撤去ケ ーブルのVLF破壊試験及び前駆遮断試験を行うことにより取 得した。

AC破壊値と残存絶縁厚の関係を図4に示す。ここで,残存 絶縁厚とは水トリー劣化状態を表す指標であり,ケーブル絶縁 体の厚さから水トリー長さを差し引いた健全部分の長さであ る。したがって,残存絶縁厚が小さいほど水トリー劣化が進行 していることを意味する。

図中には,22 kV ~ 77 kVの異なる絶縁階級におけるデータ を示しており,図中の点線は,それぞれの階級におけるケーブ ル絶縁体厚さを示している。同図より,AC(実効値表示)破 壊電圧は,モデルケーブル,撤去ケーブル共に,ばらつきはあ るが残存絶縁厚に依存する特性があり,図中の曲線に示したよ うな特性になると考えられる。すなわち,水トリー劣化があま り進んでおらず水トリー部の残存絶縁厚が絶縁体厚さとほぼ等 しい領域では,残存絶縁厚の減少とともに破壊電圧が急激に低 下する。更に水トリー劣化が進んで残存絶縁厚が絶縁体厚さよ り2 mm程度小さくなると,破壊電圧は徐々に低下していく。

この残存絶縁厚の小さい領域の破壊値は,ケーブル絶縁体の 厚さが異なるにも拘わらず同一の特性曲線上に乗った。これは 破壊電圧が欠陥先端の電界で決まることを意味し,妥当な結果 である。残存絶縁厚が大きくなると背後電界の影響により,破 壊電圧は絶縁体厚さの影響を受ける。寿命診断は,運転電圧領 域まで破壊電圧が低下したケーブルが対象となるため,絶縁階 級の異なるケーブルにおいても同一の曲線にて破壊値特性を評 価できると考えられる。

図5にVLF破壊値(ピーク値で表示)と残存絶縁厚の関係を 示す。同図より,VLFの場合も破壊値は残存絶縁厚に依存する 特性があることがわかる。また,残存絶縁厚が絶縁体厚さに比 ベ半分以下の領域でのデータであるため,ACと同様に同一の 曲線上に破壊電圧が乗っていることがわかる。

一方,水トリーの成長速度は,撤去ケーブルの水トリー調査 結果¹⁾より得た。図6に,文献調査より求めた劣化ケーブルの



図5 VLF破壊電圧(前駆遮断電圧)の残存絶縁厚依存性 VLF breakdown (pre interruption) voltage as a function of residual insulation thickness



図6 使用年数と最大水トリー長の関係 Relationship between serviced ages and maximum water tree length

使用年数と観測された最大水トリー長の関係を示す。同図より, 水トリーの成長速度を概(おおむ)ね200μm/年と考えると大 多数のデータが包括されると考えられる。

このような水トリーの成長速度に関するデータと図4及び図 5に示したAC及びVLF破壊値の残存絶縁厚依存性を基にして 試験電圧を求める。

4. 耐圧試験による余寿命判定の考え方

VLF耐圧試験により水トリー劣化ケーブルの余寿命を判定す る方法について検討した。

図4及び5に示したように,残存絶縁厚が小さいすなわち水 トリーが長いほど絶縁破壊電圧が低下する特性が得られてい る。図7は,絶縁破壊電圧と残存絶縁厚の関係を示しており, 水トリーが成長し残存絶縁厚が減少するとともに絶縁破壊電圧 が低下し,やがて系統運転電圧で破壊する特性を模式的に表し たものである。

同図より,試験電圧で破壊する残存絶縁厚と系統運転電圧で 破壊する残存絶縁厚の差をaとすると,試験電圧で合格した場 合は,aを水トリーの成長速度で除したもの以上の余寿命があ ると判定される。逆に,判定したい余寿命年数を決めることに より,必要な試験電圧が設定できる。 古河電工時報



図7 試験電圧設定の基本的考え方 Basic method of remaining life estimation

しかしながら,図4及び図5からわかるように,破壊電圧に はばらつき,あるいは分布が存在する。したがって,図5に示 した耐電圧特性はばらつきに応じた幅を持つ。このため,劣化 ケーブルに耐圧試験を行うと,表2に示すように,VLF耐圧試 験に合格するか否か,AC運転電圧で判定期間内に破壊するか しないか(当面の間,有害であるか無害であるか)の組合せに より,4種類の試験結果を生じることが考えられる。

理想的な耐圧試験では,継続使用可能なケーブルは耐圧試験 をクリアさせ,継続使用不可能なケーブルのみを耐圧試験で破 壊させることができる。しかし,実際にはまだ継続使用可能な ケーブルを耐圧試験で破壊させたり,耐圧試験をクリアしたケ ーブルが運転中に破壊することもあり得る。これは,耐圧試験 として,誤った判定を下したことになる。

従来の耐圧試験では,有害なものを確実に破壊する意味合い が強く,破壊電圧にばらつきがあるような場合,その最低値を 取る等,安全サイドで検討する場合が多い。これは,有害なも のを確実に除去することになるが,その分まだ継続使用可能な ケーブルを除去してしまう可能性が高くなる。しかしながら, 設備の効率的な運用を考えると安全サイドでは無く,誤判定を 少なくすることにより判定精度を高めることが必要となる。

そこで,破壊電圧のばらつきを統計的に解析し,種々のVLF 電圧について耐圧試験結果の取り得る上記4種類の確率を計算す ることにより,適切な耐圧試験電圧を求める方法を考案した⁷。

統計解析手法を用いて,水トリー劣化した22~77 kV CVケ ーブルの3年及び5年の余寿命を判定する試験電圧を求めた結 果,表3に示す電圧が適していると考えられた。ただし,66 kV及び77 kV CVケーブルに対しては,まだ検討課題があるた めに暫定的な条件である。

また,このような統計解析によって定量的に評価することに より,様々な検討が可能である。例えば,耐圧試験をクリアし たケーブルが,余寿命判定年数内に破壊しない確率を計算する ことができる。上記試験電圧の耐圧試験をクリアした場合,余 寿命判定年数内は97%の確率で破壊しないとの評価結果が得 られており,余寿命判定は十分な精度で行うことができると考 えられる。

表2 耐圧試験結果における4ケース Four results by VLF test

		VLF耐圧試験	
		不合格	合格
AC運転電圧	有害	正答	誤判定
	無害	誤判定	正答

表3 22 ~ 77 kV CV ケーブルに対する VLF 試験電圧 VLF test voltage for 22~77-kV XLPE cable

絶縁階級	寿命判定年数		
	3年	5年	
22-kV CV	50 kV _p	53 kV _p	
33-kV CV	60 kV _p	65 kV _p	
66-kV CV	95 kV _p	100 kV _p	
77-kV CV	110 kV _p	115 kV _p	

注)但し,66 kVおよび77 kVは暫定条件

5. フィールド用試験装置と現地耐圧試験

以上の検討結果を現場に適用すべくフィールド用試験装置を 試作し,実線路で耐圧試験を行った。

フィールド用試験装置の写真を図8に,概要を表4に示す。 本装置は中部電力(株)保有の試験装置であり,VLF発生部は 2段カスケードで構成される。VLF1段で22/33 kVクラスCV, 2段カスケードで66/77 kVクラスCVのVLF耐圧試験を行うこ とが可能である。

現地耐圧試験は,1999年5月に中部電力(株)管内の33 kV CV,2000年2月に東京電力(株)管内の66 kV CV で行われた。 耐圧試験を行った線路の概要は以下のとおりである。

線路への課電は,図9に示すように課電用リードを用い変電 所側の気中終端からいずれも3相一括で行った。

耐圧試験の様子を図10に示す。

試験結果は,いずれも破壊せず耐圧終了であり,本線路には 向こう3年の余寿命があると判定された。また,本試験の準備



図8 超低周波電圧発生装置 VLF high voltage generator

— 70 —

表4 超低周波電圧発生装置概要 Specification of the VLF high voltage generator

仕様	VLF1段	VLF2段カスケード
発生電圧	VLF 85 kV _p	VLF 170 kV _p
負荷容量	2 µF	1 μF
周波数	0.01 ~ 0.19 Hz	
装置重量	約2 t	約4 t

表5 耐圧試験当該線路概要 Outline of the cable lines for on-site VLF test

	33-kV CV耐圧試験	66-kV CV耐圧試験
経年数	27年	22年
ケーブル種	33-kV CVT 150 mm ²	66-kV CVT 80 mm ²
ケーブル長	約150 m (NJ1カ所含む)	約260 m (NJ2カ所含む)
布設状態	一部管路 , 一部直埋	一部管路 , 一部直埋
終端接続部	両端EB - A	両端EB-A (片側鉄塔上)
試験条件	VLF 60 kV _p /10分	VLF 95 kV _p /10分 ^(注)

注)66-kV CVに対する試験条件は暫定条件



図9 現地耐圧試験概要 On-site VLF withstand test



図10 耐圧試験の様子(66 kV CV耐圧試験) VLF voltage withstand test (for 66-kV XLPE cable)

表6 VLF 耐圧試験に要した時間 Time required to VLF voltage withstand test

活線中		線路停止中	
作業項目	所要時間	作業項目	所要時間
準備作業	60分		
		課電リード延線 鉄塔立ち上げ	90分
		電圧校正 (無負荷試験)	20分
		絶縁抵抗測定試験	20分
		VLF耐圧試験	20分
撤去作業	60分		
合計	120分	合計	150分
総計 270分			

表7 VLF 耐圧試験に必要な線路停止時間 Time for on-site VLF voltage withstand test

ケース	必要停止時間
標準ケース	2時間
最短ケース	1時間
鉄塔作業有りのケース	3時間

から終了まではDC耐圧とほぼ変わらない時間で行うことができ,簡便な余寿命診断が可能である。

表6に66 kV CVケーブルの試験での所要時間実績を示す。 表中には,活線中の作業と線路停止中の作業に分けて示した。 このようにVLF耐圧試験は,非常に簡便に試験を行うことが 可能である。

これらの試験結果より,VLF耐圧試験に必要な線路停止時間は,表7のように考えられる。

VLF耐圧試験は,特別な測定を必要とせず,現地でノイズ対 策等の特別な処置を行う必要が無い。「合格・不合格」の判定 により線路の余寿命が判定されるため簡便な試験方法であると 言える。

更に,今回の試験結果から,VLF耐圧試験を現地で行ううえ で特に問題となるようなことは無いものと考えられ,特別高圧 CVケーブルに対するVLF耐圧試験の実用化に目処(めど)が 得られた。今後,現地VLF耐圧試験の実績を積み,ケーブル 線路の余寿命判定試験としての技術の確立を目指す。

6. おわりに

水トリー劣化した特別高圧クラス CV ケーブルに超低周波 (VLF)電圧を用いた耐圧試験を実施し,ケーブルの余寿命を 判定する試験方法について検討した。VLF 耐圧試験は,試験設 備の規模,水トリーの検出能力,ケーブル健全性の3つの観点 から,最も優れた耐圧試験であると考えられた。

撤去ケーブル及びモデルケーブルのAC及び超低周波破壊特 性を調査し,水トリー長と破壊電圧の関係を調べた。これらの データを統計的に解析して,22 kV ~ 77 kV水トリー劣化CVケ ーブルの余寿命判定を行うための耐圧試験電圧を求める新手法 を考案し、適切な試験電圧を求めた。

これらの検討結果を基に,フィールド用試験装置を試作し, 現地耐圧試験を行い,良好な結果を得た。今後,フィールドで のデータ蓄積を図る。

参考文献

- 1)特別高圧 CV ケーブル絶縁診断技術調査委員会:「特別高圧 CV ケーブル絶縁劣化形態と絶縁診断技術の動向」,電気学会技術 報告第668号,(1998)
- 2) K. Uchida, S. Kobayashi, T. Kawashima, H. Tanaka, S. Sakuma, K. Hirotsu, and H. Inoue: "STUDY ON DETECTION FOR THE DEFFECTS OF XLPE CABLE LINES", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.11, No.2, pp663-668 (1996)
- 3) P. Gronefeld and R. von Olshausen: "TREE INCEPTION AND PROPAGATION IN POLYETHYLENE AT 0.1 Hz AND 50 Hz AC VOLTAGE", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, 21.10 (1987)
- 4) R. Bach and W. Kalkner: "Comparison of different voltage types for the evaluation of layed medium voltage cables", 8th International Symposium on High Voltage engineering, 61.04 (1993)
- 5) J. Y. Koo, J. T. Kim, S. J. Kim, I. K. Song, J. Y. Kim, and Y. O. Cho: "A study on the oscillating wave voltage test as an after-laying test for distribution power cables", Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, (1997)
- 6)内田,加藤,小笠原,田中,田中,中出,榊原,田中:「超低周波(VLF)耐圧試験による水トリー劣化ケーブルの余寿命診断」,電気学会電線・ケーブル研究会資料,EC-99-8,(1999)
- 7) 内田,加藤,中出,井上,榊原,田中:「超低周波耐圧試験によ る水トリー劣化 CV ケーブルの寿命診断」,電気学会論文誌, Vol.120-B, No.11