UDC 621.315.211.2.015.51: 621.315.616.96

論 文

51-A73

CV ケーブルの直流、逆極性インパルス 重畳電圧破壊特性

電力中央研究所
電力中央研究所
電力中央研究所
藤倉電線株式会社
藤倉電線株式会社

坂 本 雄 吉
深 川 裕 正
相 原 良 典
木 村 寛 次
竹 鼻 始

1. ま え が き

近年、直流送電が各種の利点を有しているところから、国の内外を問わず大きな注目を集めている。我が国においては、北海道～本州間の直流海底ケーブルによる連系が計画され、更に大容量長距離直流送電も検討されている。しかし、かなりの実績を有する交流ケーブルとは異なり、直流ケーブルには温度分布に伴うストレス逆転現象や潮流変更による極性反転現象など直流ケーブルに特有な問題がある。更に変換装置の異常動作などによってかなり大きな過電圧が発生する事も予想されており、直流避雷器の開発いかんによっては、「絶縁厚が薄くできる」という直流ケーブルのメリットを失う恐れもある。

直流ケーブルとしての CV ケーブルは、OF ケーブルに比して給油装置が不要であり、取扱いも簡便なところから、超長距離の海底ケーブル用として非常に有望なケーブルであるが、反面、プラスチック材料として特有の電極からの電荷の注入が容易なために⁽⁵⁾、逆

極性電圧が重畳された場合の絶縁体の特性が、その絶縁設計に決定的な要因になることが予想される。

このような直流に逆極性サージが重畳した電圧下での絶縁体の特性については、油浸紙や OF ケーブルではかなりのデータもとられ、その現象も明らかにされているが⁽¹⁶⁾、プラスチック材料ではシートに関する実験的検討が二、三なされているに過ぎず、ケーブルタイプでの検討はほとんど行なわれていない。不平等電界となるケーブルでは、平等電界のシートとは異なった挙動を呈することも考えられ、シートの結果をそのまま適用することには問題があり、ケーブルの絶縁設計ならびに試験法の検討にあたって、ケーブルタイプでのデータ採取が要望されていた。

本論文は、このような状況の下で、三層同時押出しによって製造された絶縁厚 4.4mm、導体断面積 60mm² の CV ケーブルを用いて、直流に逆極性インパルスが重畳した電圧の破壊特性をワイブル分布を用いて求め、空間電荷効果を検討すると共に、直流ケーブルの新しい絶縁設計法を提案したものである。

2. 実験方法

〈2.1〉 実験回路 実験回路は第1図に示すように、3,000kV インパルス発生装置と、300kV、1mA 可搬式直流高電圧発生装置を棒-棒ギャップ G を介して結合したものである。実験能率をあげるため実験は5本のケーブルを一括課電した。ケーブル破壊により負荷容量が変動するため、波形調整用として C_f, R_1 、

The Effect of DC Prestressing on the Opposite Polarity Impulse Breakdown Strength of XLPE Cables. By Yūkichi Sakamoto, Member, Hiromasa Fukagawa, Member, Yoshinori Aihara Member (Central Research Institute of Electric Power Industry), Kanji Kimura, Member & Hajime Takehana, Member (The Fujikura Cable Works Ltd.).

坂本雄吉: 正員, 電力中央研究所
深川裕正: 正員, 電力中央研究所
相原良典: 正員, 電力中央研究所
木村寛次: 正員, 藤倉電線株式会社
竹鼻 始: 正員, 藤倉電線株式会社

第 1 図 電圧発生回路

Fig. 1. Voltage-supply circuit.

R_f なるコンデンサ、抵抗をそう入した。 r は 1 本のケーブルが破壊したときに発生する振動性異常電圧が健全ケーブルへ侵入しないためにそう入した $200\ \Omega$ の無誘導形保護抵抗である。また R_0 はインパルス波形測定用の編組抵抗体分圧器であり、印加波形はシンクロスコープで観測し、破壊の有無を確認した。インパルス波形は $(2 \times 40)\ \mu\text{s}$ とした。

試料ケーブル長は $5.5\ \text{m}$ とし、有効試料長は両端末部 (B-801 がい管使用) を除いて約 $3\ \text{m}$ である。試料の本数が多いことから作業性を考慮して、課電は通常とは逆にケーブルしゃへい層に高電圧を印加し、導体をアース電位とした。極性は直流電圧を負極性、インパルス電圧を正極性とした。

〈2・3〉 実験方法 直流電圧の前課電時間効果は判然としないが、空間電荷が比較的安定するといわれる緩和時間よりも長くとる事とし、試料に直流電圧を 1 時間印加してから、インパルス電圧を印加する事とした。縄田氏らのポリエチレンブロックに針を刺した実験結果では、針先端に発生する直流トリーの伸びの長さが 10 分以上の時間になると一定値を示す傾向があることが明らかにされており⁽⁴⁾、今回の前課電時間で空間電荷の集積は十分であると考えられる。試料ケーブルが破壊した場合、直流電圧をいったん降し、破壊試料を除去した後直流電圧を 10 分間印加してから、次のインパルス電圧を印加した。供試ケーブルの接地は高い電圧で接地するとトリーなどの発生原因になる恐れもあるので、残留電圧が $10\ \text{kV}$ 以下になってから $400\ \Omega \sim 1\ \text{k}\Omega$ の抵抗を介して行なった。

実験条件の一覧を第 1 表に示すが、今回の実験は大きく二つのグループに分けられる。第 1 グループは、直流電圧によりケーブルのインパルス破壊値がどの程度低下するかを知ることを目的とした実験で、直流電圧を $0 \sim 170\ \text{kV}$ まで 6 ケース変化させて破壊電圧を求めた。インパルス破壊電圧は通常行なわれている 3 回ステップ昇圧法で、 $30 \sim 60\ \text{s}$ 間隔で同一電圧を 3 回

第 1 表 実験条件
Table 1. Experimental condition.

実験グループ		実験ケース	直流電圧 V_d (kV)	インパルス電圧 V_r (kV)	試料数 (本)
第1グループ	常温	$i-0$	0	ステップ昇圧	10
		$a-0$	40	〃	9
		$b-0$	80	〃	15
		$b'-0$	80→120	〃	8
		$c-0$	120	〃	10
		$d-0$	145	〃	5
		$e-0$	170	〃	5
	60°C	$b-0$	80	〃	5
		$d-0$	145	〃	5
	90°C	$i-0$	0	〃	5
		$b-0$	80	〃	5
		$d-0$	145	〃	5
第2グループ	常温	$a-1$	40	360	8
		$a-2$	40	300	5
		$b-1$	80	380	5
		$b-2$	80	320	5
		$b-3$	80	260	6
		$c-1$	120	340	6

印加し、5 分経過後次のステップの電圧を同様に 3 回印加し破壊値を求める方法で行なった。なお印加ステップ電圧は、初期電圧を予想破壊電圧の 50% とし、昇圧ステップは $10\ \text{kV}/3$ 回とした。破壊電圧の温度特性を明らかにするため、常温のほか高温についても実験を行なった。昇温は課電サンプル 5 本の導体部を直列に接続し、5 サンプル一括して $100 \sim 250\ \text{A}$ 導体通電を行ない、ケーブルに保温層を巻くことによりケーブルが所定の温度になるようにした。測温は 5 本の課電サンプルの通電回路に直列にそう入したダミーケーブルによって行なった。その他、第 1 グループの試験に関連して、ゆっくりした両極性サージが重畳した場合のインパルス破壊値の低下についても実験した。これは直流電圧を $80 \sim 120\ \text{kV}$ に変化させ、その瞬間にインパルス電圧を印加して行なったものである。

第 2 グループの実験は、直流電圧を印加した状態で一定のインパルス電圧を加え、破壊に至る回数を求める、いわゆる $V-N$ 特性試験で、常温についてのみ直流電圧を変えて行なった。

なおインパルス課電時間間隔は、5 分間隔以上ではデータに有意差が認められなかった⁽¹⁸⁾ので、5 分間隔に統一して行なった。

3. 実験結果

〈3・1〉 直流電圧重畳時のインパルス破壊電圧

破壊は大部分、逆極性インパルス電圧印加時に生じており、直流電圧が $170\ \text{kV}$ の e-0 ケースの 1 サンプ

第2図 破壊電界のワイブルプロット

Fig. 2. Weibull plot for breakdown strength.

ルのみが、逆極性インパルス重畳秒後の直流電圧で破壊している。一般にCVケーブルの破壊電圧はかなりのばらつきを示すことが知られており、ワイブル分布を用いて統計的に解析されている。特に金子氏らは、CVケーブルのインパルス破壊値を詳細に解析⁽²⁾⁽³⁾し、

1° 均一に製造された絶縁体の破壊強度は、次式で示される平均電界に関するワイブル分布に適合する。

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{(E - E_L)}{E_e}\right\}^{1/a}\right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し、 E : ケーブル破壊平均電界、 E_L : 位置母数、 E_e : 尺度母数、 a : 形状母数。

2° 印加電界一定の場合にも、破壊までの繰返し印加回数 N の分布はワイブル分布に適合する

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{N}{N_e}\right\}^{1/b}\right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ことなどを明らかにしている。そこで、直流と逆極性インパルスが重畳した場合の破壊値についてもワイブル分布に適合するかを検討する。

第2図は第1グループの各ケースの常温のデータを破壊平均電界についてワイブルプロットした一例である。今回実験の各ケースとも、位置母数 E_L の値を適当に選ぶことにより、形状母数 $a=0.21$ の平行な直線となり、直流電圧の大きさに関係なく摩耗故障形の破壊であることがわかる。なお、 $i-0$ ケースのこれらのデータは、金子氏らがインパルス単独印加で求めた⁽⁴⁾ $a=0.22$ 、 $E_L=50\text{ kV/mm}$ と比較的良く一致しており、直流に逆極性インパルスが重畳した場合でも、インパルス単独印加の場合と同様に平均電界に関するワイブル分布によく適合することを示している。

インパルス破壊値のワイブルプロットより得られた位置母数 E_L と、メディアン値 $E_m[F(E)=50\%$ の破壊値]の値を第2表に、 E_m と直流平均電界の関係を

第2表 破壊電界の位置母数とメディアン値
Table 2. Location parameter and median of breakdown strength.

実験ケース	直流電圧 V_d (kV)	位置母数 E_L (kV/mm)	メディアン値 E_m (kV/mm)
$i-0$	0	50	92.0
$a-0$	40	45	84.2
$b-0$	80	35	80.6
$b'-0$	80→120	30	78.0
$c-0$	120	20	71.7
$d-0$	145	0	62.0
$e-0$	170	-20	54.2

第3図 インパルス破壊電界の直流電界特性

Fig. 3. Dependence of impulse breakdown strength on DC prestressing.

第3図に示す。図にはインパルス破壊の実験値も示してあるが、インパルス破壊値は直流電圧の上昇と共に低下し、その低下率は直流平均電界が20 kV/mm前後から著しくなっている。このような直流電圧によるインパルス破壊値の低下の原因は、直流電圧により生じる空間電荷が電界を変えさせるためによるものと考えられるが、この点については次節で詳述する。

第2表より位置母数 E_L も直流電圧と共に低下し、直流ストレス33 kV/mmでは $E_L=0$ になることがわかる。位置母数 E_L は統計上の最低破壊値と考えられるから、 $E_L=0$ に相当する直流電界で使用されるケーブルは、逆極性インパルス電圧が重畳したとき、その大きさがいかに小さくても統計的にみて破壊する可能性があり、また $E_L<0$ の直流電界下にあるケーブルは、統計的にみてその E_L の絶対値に相当する電圧だけ残留電圧が下がってから接地する必要があることを意味する。

なお、分布の適合度を検定するために、試料本数の多いケースで χ^2 検定を行なった結果、自由度2、信頼度90%でワイブル分布に従うことがわかった。

〈3・2〉 直流電圧重畳時のインパルス破壊電圧の高

第 3 表 高温における位置母数とメディアン値
Table 3. Location parameter and median at elevated temperature.

温度	実験ケース	直流電圧 V_d (kV)	位置母数 E_L (kV/mm)	メディアン値 E_m (kV/mm)
60°C	b-0	40	25	67.0
	d-0	80	-5	62.0
90°C	i-0	0	35	62.5
	b-0	40	20	58.5
	d-0	80	-10	55.7

第 4 図 インパルス破壊電界の温度特性
Fig. 4. Dependence of impulse breakdown strength on temperature.

温特性 高温における実験は直流電圧の異なる 2 ケースについて導体温度 60°C, 90°C で行なった。

実験結果は、常温の場合と同様にワイブル統計により解析した。その結果、高温の場合も適当な位置母数 E_L を考慮することにより、破壊平均電界に関するワイブルプロットはすべて平行な直線になることがわかった。直線の傾きから形状母数を求めると、 $a=0.21$ と常温と同様な値となり、直流電圧だけでなく、温度が変化しても $a < 1$ の摩耗故障形の破壊であることがわかった。高温におけるワイブルプロットより得られた位置母数 E_L 、破壊電界のメディアン値 E_m を第 3 表に、そのメディアン値の温度特性を第 4 図に示す。

図よりケーブルのインパルス破壊値は温度と共に低下するが、その低下率は直流電圧が上昇するにつれて小さくなり、d-0 のケースでは常温から 60°C まで破壊値はほとんど低下していない。これはおそらく、高温になるにつれ空間電荷による電界変わいが減少したためによるのであろう。特に直流電圧が大きく、常温の空間電荷による電界変わいが大きい d-0 ケースの場合、高温と共に変わいが減少し、インパルス破壊値にはほぼ等しくなってくるものと考えられる。

〈3.3〉 直流電圧重畳時のインパルス $V-N$ 特性

直流電圧がインパルス $V-N$ 特性に与える影響については、直流電圧が 80 kV のケースを中心にして、インパルス初期予想破壊値の 100%, 90%, 80% 電圧を印加して破壊に至る回数を求めた。

第 5 図 破壊回数のワイブルプロット

Fig. 5. Weibull plot for repetition number to breakdown.

第 4 表 破壊回数の形状母数とメディアン値
Table 4. Shape parameter and median of repetition number to breakdown.

実験ケース	インパルス電圧 V_r (kV)	形状母数 b	メディアン値 N_m (回)	等価インパルス電圧 (kV)
a-1	360	0.79	3.5	394
a-2	300	0.79	130	334
b-1	380	0.68	3.1	430
b-2	320	1.32	19.1	370
b-3	260	1.32	126	310
c-1	340	1.32	4.5	429

第 6 図 $V-N$ 特性

Fig. 6. $V-N$ characteristics.

得られた実験データを、前述した位置母数零のワイブル分布によりプロットした例を第 5 図に、ワイブルプロットより得られる形状母数 b と破壊回数のメディアン値を第 4 表に示す。第 5 図からわかるように、破壊回数のワイブル分布 $F(N)$ は破壊平均電界のワイブル分布 $F(E)$ のように直線の傾きが等しくならず、形状母数 $b < 1$ の摩耗故障形破壊のグループと、 $b > 1$ の初期故障形破壊のグループに分けられる。

第 4 表の破壊回数のメディアン値より、直流電圧が 80 kV のケースについて $V-N$ 特性を求めたのが第 6 図である。図には破壊回数の実験データも示してある。実験値はかなりばらつきを示すが、メディアン値は傾き 9 の直線となる。これは、金子氏らのインパル

ス単独印加の V - N 特性の傾き 9.6 と良く一致している⁽⁴⁾。

直流に逆極性インパルスが重畳した電圧は、後述する直流空間電荷の影響を示す量 K [(8)式, 第6表参照] によって、次のような等価インパルス電圧に換算する。

$$V = V_r + K V_d \dots\dots\dots (3)$$

但し、 V_d : 直流電圧, V_r : 重畳インパルス電圧の対地波高値

換算結果を第4表に示したが、この換算値を用いて得た V - N カーブが第6図の $n=10$ の直線である。このように直流電圧に重畳したインパルス V - N 特性の傾きは $n=9\sim 10$ となり、インパルス電圧のみの V - N 特性の傾き 9.6 とほとんど変わらないことがわかる。

4. 破壊電圧に対する空間電荷効果の検討

直流電圧に逆極性インパルス電圧が重畳した際の破壊値の低下の原因に、空間電荷による電界変わりを挙げてきたが、その考え方を以下に詳述する。

直流電圧が印加されると、電極からは電子、正孔が絶縁体内に注入され、バルク内を移動してきた電子、正孔およびイオンなどが絶縁体内に空間電荷を形成する。ポリエチレンのような物質では、この空間電荷はホモチャージと考えられている^{(5)~(8)}、特に電極近傍に偏在し、抵抗分布で支配される電界を変わらせている。この状態で逆極性の電圧が印加されると、電荷が凍結されているために変わい電界が重畳し、ホモチャージの場合、電極近傍に局所的に高電界が発生し、破壊に至るものと考えられる。

この影響は電荷の凍結が解除されないほど、つまり急いしゅんな電圧ほど大きく、従ってインパルス電圧が最もかこくとなり、直流重畳のないインパルス破壊よりも著しく破壊電圧は低下する。その結果、逆にこの低下率から変わい電界を推算することができる。

直流電圧 V_d が印加されたときの電界分布 $f(r)$ は、抵抗分布で決まる電界分布 E_{dc} と空間電荷による変わい電界 E_s の差として、次式のように表わされる。

$$f(r) = E_{dc}(r) - E_s(r) \dots\dots\dots (4)$$

但し、 r : ケーブル半径

これに逆極性インパルス電圧 V_r が重畳したときの電界分布 $E(r)$ は、 $V_d + V_r$ の電圧は容量分布に従って分布するので、次式で表わされる。

$$E(r) = \frac{V_d + V_r}{r \ln(r_2/r_1)} - f(r) \dots\dots\dots (5)$$

第7図 ストレス分布

Fig. 7. Stress distribution.

第5表 空間電荷電界の計算結果

Table 5. Calculated value of space charge stress.

温度	実験 ケース	$E(r_1)$ (kV/mm)	$F(r_1)$ (kV/mm)	$E_{dc}(r_1)$ (kV/mm)	$E_s(r_1)$ (kV/mm)
常温	a-0	125.0	1.8	9.5	7.7
	b-0	132.3	9.1	19.4	10.3
	c-0	132.6	9.4	28.4	19.0
	d-0	127.1	3.9	34.0	30.1
	e-0	124.4	1.2	39.6	38.4
60°C	b-0	114.0	16.7	18.4	1.7
	d-0	127.1	29.8	33.1	3.3
90°C	b-0	102.5	18.9	17.2	-1.4
	d-0	118.6	35.0	32.2	-2.8

但し、 r_1, r_2 は導体半径、絶縁体半径を示す。この電界分布は空間電荷の性質と共に変わり、第7図に概念的に示すように、ホモチャージのときは下に凸、ヘテロチャージのときは上に凸の曲線になるものと考えられる。従って『 $E(r)$ の最大値がインパルス電圧のみのケーブル破壊電圧 V_0 の最大電界と等しくなったときに破壊する』と仮定すれば、 V_0 は容量分布するから、(4), (5) 式より次式として空間電荷による導体直上の変わい電界を求めることができる。

$$E_s(r_1) = E_{dc}(r_1) - \frac{V_0 - V_r - V_d}{r_1 \ln(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (6)$$

以上の推論の下に、今回の実験データから E_s を求めると第5表を得る。但し、抵抗分布による電界 $E_{dc}(r)$ は絶縁体の固有抵抗を次式で近似し、RKG 法で数値計算して求めた。

$$\rho = \rho_0 \exp(-\alpha T - \beta E) \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_0 = 2.34 \times 10^{-18} (\Omega \cdot \text{cm}), \quad \alpha = 0.06 (1/^\circ\text{C}),$$

$$\beta = 0.15 (\text{mm/kV})$$

表から空間電荷による導体直上の変わい電界 $E_s(r_1)$ は、直流平均電界 40 kV/mm でほぼ抵抗分布による電界 $E_{dc}(r_1)$ と同じであることがわかる。

第 8 図 空間電荷電界と直流電界の関係

Fig. 8. Relation between space charge stress and DC stress.

第 5 表から得られた常温の変わい電界 $E_s(r_1)$ の直流電界特性を第 8 図に示す。変わい電界は直流平均電界 20kV/mm で折れ曲がる直線となり、20kV/mm 以上の電界では急増している。このような空間電荷による変わいストレス急増の原因は、電極からの電荷注入の急増と考えられるから、第 8 図の結果は 20kV/mm 程度のストレスより電極からの電荷注入が急増することを示している。矢作氏ら⁽¹⁰⁾は、ポリエチレンシートのパルス電流の急増電界⁽¹¹⁾、電圧パルス法におけるピーク観測電界⁽¹²⁾、CV ケーブルの熱刺激電流のホモチャージ急増電界⁽⁸⁾、電圧-電流特性における電流急増電界⁽¹³⁾の 4 点より 20kV/mm 程度の外部電界から電子注入が急増すると述べており、今回の実験結果と現象的に良く一致している。

第 9 図は変わい電界 $E_s(r)$ の温度特性を示したもので、高温になると共に変わい電界は低下し、70℃ 前後で電界変わい量は零となり、それ以上の温度では $E_s(r)$ は負となり、ヘテロ空間電荷を生じていることになる。

ヘテロ電荷の場合は、第 7 図に示すように絶縁体中央に高ストレスを生じるから、導体直上の変わいストレスは定量化できない。ここでは 70℃ 以上の高温になると空間電荷の極性がホモからヘテロに変化すると

第 9 図 空間電荷電界の温度特性

Fig. 9. Dependence of space charge stress on temperature.

述べるにとどめる。このような高温時の空間電荷の極性がホモからヘテロに変化する傾向は、ポリエチレンの熱刺激電流の測定から観測されており⁽¹⁴⁾、極性が反転する温度も 80℃ 程度と筆者らの結果と良く一致している。空間電荷の極性反転の原因は、高温になるにつれ電荷の移動量が電極からの電荷注入量以上に増加したためと考えられる。そこで $E_s(r)$ の見かけの活性化エネルギーを、 $E_s(r)$ が正となる 70℃ 以下の温度範囲について求めてみると 0.3eV となり、電荷の移動量の目安となるポリエチレンの移動度の活性化エネルギーが、約 0.12eV であるという結果⁽¹⁵⁾に比較的近い。

5. 直流 CV ケーブルの絶縁設計に関する検討

交流ケーブルの場合には、交流電圧およびサージ性異常電圧とも容量分布で電圧、電界分布が定まるので、比較的容易に絶縁設計することができる。直流ケーブルにあっては、直流電圧の電界分布は電界と温度によって変化する抵抗率によって決まり、この直流電圧に変換器異常動作による過電圧や極性反転、雷サージなどの過渡異常電圧が重畳した場合は、容量分布で定まる電界分布が重畳し、更に空間電荷が残留して電界を著しく変わいさせている。これらの電圧の中で、直流ケーブルの絶縁厚を支配するほどかこくなものは、直流電圧に逆極性サージ電圧が侵入した場合であり、この場合、空間電荷による電界変わい効果が絶縁厚を決めるポイントになる。Bahder 氏らはこの空間電荷による破壊値の低下を評価する目安として、(8)式で定義される K を導入して、ケーブルの所要インパルスレベルを決める方法を提案している⁽¹⁶⁾。

$$K = \frac{V_{\text{imp}} - V_r}{V_d} \quad (8)$$

$$V_{\text{BIL}} \geq M(V_{pl} + K V_d) \quad (9)$$

但し、 V_{imp} : インパルス単独のケーブルの破壊電圧、 V_r : 直流電圧に重畳したインパルス破壊電圧、 V_d : 定格直流電圧、 V_{BIL} : 所要インパルスレベル、 M : 裕度、 V_{pl} : アレスタの保護レベル。

従って、この K が小さければ V_{BIL} も小さくなり、絶縁厚が低減されることになる。今回の実験データから、この K の値を求めると第 6 表を得る。直流電圧と共に変わること、高温になると著しく小さくなることからわかる。同表には Bahder 氏が油浸紙モデルで求めた値も示してあるが、常温の場合、架橋ポリエチレンのほうが若干大きい。

第 6 表 K と p の値Table 6. Value of K introduced by Bahder and of p .

温 度	実 験 ケース	V_d (kV)	V_m (kV)	K	p
常 温	a-0	40	371	0.85	0.81
	b-0	80	355	0.63	0.53
	c-0	120	316	0.74	0.67
	d-0	145	273	0.91	0.89
	e-0	170	239	0.98	0.97
	b'-0	80→120	343	0.77	—
60°C	b-0	80	295	0.31	0.09
	d-0	145	273	0.32	0.10
90°C	b-0	80	257	0.23	0.08
	d-0	145	245	0.21	0.09
油浸紙モデル (常温) ⁽¹⁰⁾		30	18.8	0.79	—
		45	28.1	0.68	—

なお、この値には当然のことながら、厚さ効果もあるので注意を要する。つまり、逆極性インパルス電圧 V_r が重畳したときのケーブル絶縁体内電界分布は、(5)式で与えられるから、(8)式に代入して次式を得る。

$$K = 1 - (1 - p) \frac{E_{dc}(r)}{E_c(r)} \dots\dots\dots (10)$$

$$p = E_s(r) / E_{dc}(r) \dots\dots\dots (11)$$

但だし、 $E_c(r)$: V_d の容量分布の電界

導体半径に比較して、絶縁厚の非常に薄いケーブルモデルでは近似的に次式で表わされるから、 K と p はほぼ等しくなる。

$$E_c(r) \doteq E_{dc}(r) = \frac{V_d}{r_2 - r_1} \cdot \frac{r_1}{r} \dots\dots\dots (12)$$

第 5 表の計算結果を用いて、今回の実験値についての p を求めて第 6 表に示した。絶縁厚が 4.4mm と比較的薄いため、導体、シース間に温度差のない常温では、 p と K に大きな差は見られない。しかし高温では、導体、シース間の温度差が 10~15°C と大きいいため、 p と K はかなり異なっている。

交流 CV ケーブルの所要絶縁厚は

$$t = \frac{V_{BIL} \times k_1 \times k_2 \times k_3}{E_L} \dots\dots\dots (13)$$

但し、 k_1 : 経年劣化に対する裕度、 k_2 : 常温と常時最高許容温度の破壊値の比、 k_3 : 試料試験その他不確定要素に対する裕度、 E_L : 常温下での破壊値のワイブル分布の位置母数で計算されている⁽¹⁷⁾。

直流ケーブルについても同様な考え方をを用いて異常電圧に対する絶縁厚を求めてみる。第 6 表に示した常温、60°C、90°C の K 値を用いて計算すると、常温の絶

第 10 図 両極性サージ電圧

Fig. 10. Surge wave of dual polarity.

縁厚を 1 とすれば、60°C で 1.2、90°C で 1.3 となり、90°C における絶縁厚が最大となる。これは高温の k_2 値が大きいことによるものである。なお、この計算の際、 V_{pl} は定格直流電圧 V_d の 1.5~2.0 倍以上を想定している。

従って、直流 CV ケーブルの絶縁設計に対して、高温の p 値を用いて K を求め、 V_{BIL} を計算して絶縁厚を求めればよい。つまり、 p の値は高温における値 0.1 程度で良いことが指摘され、従来 CV ケーブルについて推測された値よりかなり低くて良いことが明らかにになり、直流 CV ケーブルの所要 BIL 値をかなり低減することができる。

変換器の異常動作によっては、第 10 図のように直流電圧と同極性の交流性過電圧が発生し (数十 μ s ~ 数十 ms)、ギャップ、避雷器などでフラッシュオーバーして逆極性サージ電圧がケーブルに侵入する場合が想定される。このときの p 値としてどのような値をとるべきかは、絶縁設計上極めて重要な要素となる。すなわち $n_0 V_d$ の影響はなく、 V_d のみでよいのか、 $n_0 V_d$ 全体を考える必要があるのかで絶縁設計が異なってくる (n_0 はほぼ 1.2~2.0)。

そこで、逆極性インパルスが印加される直前に直流電圧を手動で上昇させて破壊電圧を求めた ($b'-0$ ケース)。直流電圧は 80kV を常時印加し、インパルス侵入直前に 120kV に昇圧して (昇圧時間 0.1~0.5s) 破壊電圧を求めたが、ワイブル確率紙にプロットして得られた K の値は、 $V_d=80$ kV をベースにして 0.77 であり、前述した第 6 表にある 80kV の K 値 0.63 の約 1.2 倍である。この上昇分が $n_0 V_d$ による効果と考えられるので、新たに (14) 式で定義される前課電効果係数 f を導入すると、 f の値は 0.45 となり、ほぼ 0.5 に近い値が得られる。

$$[1 + (n_0 - 1)f]K = \frac{V_{imp} - V_r}{V_d} \dots\dots\dots (14)$$

$$n_0 = V_{pl} / V_d \dots\dots\dots (15)$$

今回のデータは常温で、しかも $n_0=1.5$ での値であり、このまま高温の場合や $n_0=2.0$ の場合にも拡張

することは問題がある。 f は K や ρ と同様、一般的には電圧の関数とも考えられるので、今後更に詳細な検討が必要である。

なお、このような電圧波形に対する V_{BIL} は、前述した記号を用いて次式で定義されることとなる。

$$V_{BIL} \geq M \{ V_T + K \{ 1 + (n_0 - 1) f \} V_d \} \quad \dots\dots\dots (16)$$

6. あとがき

直流 CV ケーブルの絶縁設計にとって最も重要な直流、逆極性インパルス重畳電圧に対する CV ケーブルの絶縁破壊特性を明らかにするために、交流 6.6kV 相等の 3 層同時押しケーブルを用いて実験を行なったが、その主な結果をまとめると次のようになる。

(1) CV ケーブルの直流、逆極性インパルス重畳電圧の破壊値も、インパルス単独と同様ワイブル分布に従う (常温、高温とも)。

(2) 重畳電圧の V - N 特性はほぼ 9~10 のこう配を持つものであり、インパルス単独の場合とほぼ等しい。

(3) 直流平均電界が 20kV/mm 以上になると、常温のインパルス破壊電圧の低下率は大きくなっていく。これは空間電荷効果によるものと考えられる。

(4) 破壊電圧の低下率より空間電荷による変わり電界を計算すると、常温で直流平均電界が 40kV/mm の場合、抵抗分布電界と同程度となるが、高温になると変わり電界は低下し、70°C 前後で変わりは零になる。

(5) 破壊電圧から、Bahder 氏が OF ケーブルの絶縁設計で提案した K の値を求めてみると、4.4mm 厚のケーブルでは直流電圧の関数となり、常温で 0.6~0.9、高温で 0.3 程度であることが明らかとなった。絶縁設計は高温特性で決定されるので、空間電荷効果

がそれほど大きく影響しないことがわかった。

(6) 両極性サージ電圧に対しては、前課電効果係数 f を導入した新しい所要インパルスレベルの計算法を提案した。なお、この f 値は 0.5 程度と考えられるが、 K 値と同様温度、電圧などによって変化するものと考えられ、今後更に詳しく検討することが必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始絶大な御指導、御討論を賜った超高压電力研究所主催の直流ケーブル試験法小委員会および異常電圧抑制対策小委員会の関係各位、並びに藤倉電線(株)鹿間貞吉技術開発部長、実験に多大な御協力をいただいた電力中央研究所 今城尚久氏、および藤倉電線(株)の関係各位に深甚な謝意を表します。

(昭和 50 年 12 月 25 日受付, 同 51 年 4 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 縄田・河村・家田: 第 8 回絶縁材料シンポジウム I-2 (昭 50-9)
- (2) 金子・春田・杉山: 電気学会論文誌 93-B, 147 (昭 48-4)
- (3) 金子・杉山: 同上 94-A, 137 (昭 49-4)
- (4) 金子・春田・杉山: 大日本電線時報 56 号, 35 (昭 48-11)
- (5) 田中: 電中研究報告 74079 (昭 50-4)
- (6) R. Cooper, et al.: 1975 Conference on Dielectric Materials Measurements and Application p. 209 (1975-7)
- (7) 湯本, 他: 第 8 回絶縁材料シンポジウム I-9 (昭 50-9)
- (8) 安藤・遠藤・沼尻: 絶縁材料研究会 IM-74-7 (昭 49-2)
- (9) 竹鼻・吉田: 昭 49 電気学会全大 874
- (10) 矢作: 電学誌 95, 425 (昭 50-5)
- (11) 青笹・矢作: 電気学会論文誌 92-A, 83 (昭 47-2)
- (12) 前田, 他: 昭 49 電気学会全大 178
- (13) 中川・小島: 大日本電線時報 56 号, 17 (昭 48-11)
- (14) 矢作: 第 7 回絶縁材料シンポジウム I-1 (昭 49-9)
- (15) 松本・前田・矢作: 昭 48 電気学会全大 307
- (16) G. Bahder, et al.: CIGRE Paper 21-03 (1972)
- (17) 高電圧試験法専門委員会: 電気学会技術報告 112 号 (昭 50-6)
- (18) 深川, 他: 電中研究報告 175033 (昭 51-3)