UDC [621.315.211.2.027.566: 621.315.616.96]: [621.3.014.31: 621.3.015.38]

論 文

58-B48

6.6 kV CV ケーブル系統の故障時における間欠アークと異常電圧

正 員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

准 員 吉 井 孝 次 (豊橋技科大)

正 員 鬼 頭 幸 生 (名古屋大)

1. ま え が き

最近の都市配電系統においては、CV ケーブルを主体とした地中配電系統が普及してきている。これらの系統においては、ケーブルの劣化および施工不良などが原因となり 1 線地絡故障がときどき発生している。事実、地下配電系統の全故障のうち 70~80% は 1 線地絡故障が占めている。ケーブルに地絡事故が発生すると、架空線系統とは異なり、高調波分を多量に含んだひずみ波形電流が発生する。特に故障相では間欠的な地絡状態が持続し、そのため保護継電器の動作を不確実にしたり、異常電圧が発生して配電系統の絶縁に種々の悪影響を及ぼす可能性がある。この原因はケーブル絶縁を貫通する破壊が生じるとアークの熱によってポリエチレンが熱分解し激しく有機ガスを噴出し、その結果、気中の故障点と著しく相連した故障様相を呈するものと考えられる。

一方、架空線系統に発生する大気中アークの特性は従来から解明されており⁽¹⁾、それらの結果を用いてアーク抵抗の非線形性を考慮した架空線系統故障時の過渡現象が明らかにされてきている⁽²⁾。しかしながら、ケーブルに発生する故障点アークの特性はいまだに明確ではなく、そのためケーブル系統におけるアーク地絡現象の解析が十分なされてきていない。

本研究では、最初にこれらのケーブル故障点アークの特性を単相回路における基礎実験から検討する。そこにおいて、回路が誘導性のときにはアークは連続し

て点弧し気中アークと類似しているが、容量性のときにはアークが点弧と消弧とを繰り返すいわゆる間欠アークの現象を呈することを述べる。

次に、実際のケーブルこう長に相当する分布キャパシタンスを集中キャパシタンスで模擬し、短絡発電機設備を用いてケーブル系統 1 線地絡の模擬試験を行ない、各相の電圧および電流波形を記録した。続いて、上述の基礎実験で得たケーブルの故障点アークの特性を考慮して、1 線地絡故障のシミュレーションを行ない、得られた各相の電圧波形および電流波形を模擬試験で得た波形と照合する。

更に、このシミュレーションを用いて三相電源の中性点接地抵抗による過渡異常電圧および持続性異常電圧の抑制効果に関して検討を加える。また、ケーブルの静電容量およびアーク再点弧電圧の値の変化が異常電圧に与える効果について考察する。

従来、この種の間欠アーク地絡による異常電圧についての定量的解明は少く、本論文はそのための手法の一つを提案するものである。6.6 kV 配電系統の中性点は現在では公衆安全の面から非接地で運転されるのが普通となっているが、ここでは一般的に異常電圧に対する中性点抵抗の影響を一つのパラメータとして取り扱っている。

2. ケーブル故障点アークの基本的特性

〈2・1〉 実験方法 CV ケーブルの故障点では、絶縁体のポリエチレンが熱分解することによりガスが激しく噴出する。そのため架空線で発生するフリーバーニングアークとは、異った特殊なアークが形成される。そこでまずこのようなケーブルアークの基本的性質を解明するために次のような基礎実験を行なった。供試ケーブルとしては CV 6.6 kV 単心 38 mm² ケー

Overvoltage due to Intermittent Arcing Fault in 6.6 kV CV-Cable Systems. By Tateki Sakakibara, Member, Kohji Yoshii, Associate (Toyohashi University of Technology) & Yukio Kito, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

榊原建樹：正員，豊橋技術科学大学
吉井孝次：准員，豊橋技術科学大学
鬼頭幸生：正員，名古屋大学工学部

図1 ケーブル故障時の基礎実験回路

Fig. 1. Basic circuit of the cable fault.

ブル（心線 $2.6\text{mm}\phi \times 7$ 、外径 $21\text{mm}\phi$ ）の外皮を取り去ったものを採用した。このケーブルに軸と直角に $1\text{mm}\phi$ の穴をあけ、その穴に $0.08\text{mm}\phi$ の銅の細線を挿入し、心線と銅テープとの間でその細線を溶断させることによって故障アークを発生させた。アークの特性は回路条件によっても影響されるため、図1(a)および(b)の2種類の回路に対して実験を行なった。定格電圧の関係上、(a)では低圧側にリアクトルを、(b)では高圧側にキャパシタンスを挿入し、それぞれ誘導性回路、容量性回路とした。なお、供試ケーブルに印加する電圧は 6.6kV 系統の対地電圧 (3.8kV) に近い 3.3kV とした。

〈2.2〉 誘導性回路におけるケーブル故障点アーク

図1(a)の誘導性回路において定常故障電流（故障点を短絡したときの故障電流）が 2.5A となるようにリアクトルをあらかじめ調整する。その後、供試ケーブルを接続し、電源スイッチを投入しケーブルにアークを発生させる。そのときの故障点アークの電圧および電流波形を図2に示す。電流波形は雑音を含みながらもほぼ正弦波で、電圧波形は高い点弧ピークと消弧ピークとをもちアークは連続して点弧している。波形自体は大気中アークのそれと極めて類似している。電流零点でアークが消弧しても、電源電圧は電流よりほぼ 90° 進んでいるため、その瞬間には故障点に電圧の波高値がかかり、直ちにアークが再発弧している。電流零点前後のアーク電圧のピーク値はおおよそ 3kV に達し、アーク電圧は電流ピーク値付近で約 220V である。

なお、定常故障電流値を 2.5A に設定した根拠は特

図2 誘導性回路におけるケーブル故障点の電圧電流波形

Fig. 2. Voltage and current waveforms in cable fault point with an inductive circuit.

になく、次節の容量性回路における定常故障電流値と一致させたに過ぎない。

〈2.3〉 容量性回路におけるケーブル故障点アーク

図1(b)の容量性回路において定常故障電流を 2.5A になるようにキャパシタンスを調整し、同様な実験を行なった。このときの故障点に発生するアークの電流、電圧および電源電圧の波形を図3に示す。電流波形からわかるように、アークはしきりに点弧と消弧とを繰り返している。点弧しているときは変圧器の漏れインダクタンスと回路のキャパシタンスとによって決まる周波数（この場合は約 400Hz ）の過渡振動電流が生じ、その振幅は周波数が高いために定常故障電流を上まわる。故障点から噴出するガスによる冷却効果のため過渡電流の最初の零点でアークが消弧すると、キャパシタンスがそのときの回路電圧に充電される。そのアーク電流零点瞬時ににおいては故障点にかかる回復電圧が低く、しかも噴出ガスにより絶縁耐力がかなり高くなっているため再発弧には至らずアークはいったん消弧する。しかし、時間が経過して回復電圧の瞬時値が絶縁耐力を超えると、極間（心線とシールドテープ間）が絶縁破壊しアークが再点弧する。

このような容量性回路におけるアークの点弧実験は次に述べるような状況を模擬している。中性点非接地のケーブル系統において1線地絡故障が起きたとき、故障点に供給される電流は、電源から故障点を通り健全相の対地静電容量を直列に経由して電源にもどる。完全地絡ならば故障点には容量性の進み位相の電流が

図3 容量性回路におけるケーブル故障点の電圧電流波形

Fig. 3. Voltage and current waveforms in cable fault point with a capacitive circuit.

図4 ケーブル故障時における電圧電流波形の時間的変化

Fig. 4. Time variation of voltage and current waveforms with the cable fault.

流れるはずである。ケーブル系統ではケーブルの絶縁物を貫通するアークを介しての地絡となる。その場合故障点電流は正弦波形式ではなく図3のような形状となるわけで、ケーブル系統1線地絡時の特異性をもたらすものと考えられる。また、この現象は単相回路の充電電流しゃ断時に発生するといわゆる高周波消弧に類似している⁽³⁾。

ところで、このような間欠地絡時の電流波形を観測すると三つの形式に分類できる。図3(a)は点弧後、過渡電流の最初の電流零点で消弧している場合、同図(b)は点弧後2回目の電流零点で消弧している場合、同図(c)は点弧後3回目の電流零点で消弧している場合を示している。しかし、いずれの場合も消弧した後半サイクルの時間において再点弧する故障形態を保持している。数十回に及ぶ実験の結果では、故障直後は(a)の形式が持続し、数100ms後は(b)の形式に移り、更に数秒後には(c)の形式に推移する。図4は電磁オシログラフの掃引速度を遅くして長時間にわたって間欠アーク形式(a),(b),(c)の推移を見たものである。極間電圧の包絡線はアークが再点弧するときの

図5 アーク再点弧電圧に及ぼす定常故障電流と過渡振動電流の形式

Fig. 5. Restriking voltage affected by the steady-state fault current and types of transient oscillatory current.

電圧値の時間的推移を示している。故障発生後、再点弧電圧は一定値をとった後、連続的に上昇するのではなく階段的に上昇しており、それらの値は電流波形が図3の(a),(b),(c)形式と推移するにつれて不連続的に高くなっている。このような推移は故障点の穴の壁面がアークによって熱分解し、徐々に削り取られていくことに密接に関連しているものと思われる。なお、CVケーブルは油浸紙ケーブルと異なり事故点がカーボナイズされにくい傾向にある⁽⁴⁾。事実、数秒にわたるアーク点弧後のケーブル事故点を切り開いて断面全体を観察したところ、穴の壁面はまったくきれいなものであった。図4のようなオシログラムを定常故障電流値すなわち直列静電容量の大きさを変えてとり、過渡振動電流の形式ごとに再点弧電圧を求めた。その結果を図5に示す。定常故障電流に対する依存性は少なく、過渡振動電流の形式が(a)であれば、再点弧電圧は2.5~3kVであり、(b)では4kV、(c)では5kV程度である。

実際の配電系統における故障現象を取り扱う場合には、保護継電器が動作するまでの時間が数10サイクル程度と短いため、故障点アークは過渡電流の最初の零点で消弧する(a)形式となる。従って、回復電圧が3kV程度に達するとアークが再点弧するものと考えてよい。

図 6 ケーブル系統 1 線地絡模擬試験回路

Fig. 6. An artificial fault test circuit for single line-to-ground fault in a cable system.

3. ケーブル系統 1 線地絡模擬試験

〈3・1〉 試験回路 ケーブルこう長 (10, 50, 80 km) を集中容量 ($0.2 \mu\text{F}/\text{km}$) で模擬した図 6 の試験回路を用い無負荷における 1 線地絡試験を実施した。試験条件は次のようである。試験電圧: 6.6 kV , ケーブル模擬集中容量: 2, 10, $16 \mu\text{F}$, 試験周波数: 60 Hz , 中性点抵抗: $75, 250, \infty \Omega$, 供試ケーブルとしては $6.6 \text{ kV } 22 \text{ mm}^2$ 3 心 CV ケーブルの外皮をむき単心ケーブルとし, 地絡発生箇所は $1 \text{ mm}\phi$ の穴をあけたものを用いた。このような損傷を与えた個所に交流電圧を印加した場合, 3 kV 程度で絶縁破壊を起こし, 損傷の程度は前章で単相試験と同程度であることが分かる。

〈3・2〉 試験結果 種々の電磁オシログラムのうち 2 例を図 7 に示す。両者とも集中容量は $10 \mu\text{F}$ (50 km 相当) と共通で, (a) は 250Ω の抵抗接地, (b) は非接地の場合である。故障発生後, (a) の場合は 7 サイクル, (b) の場合は 10 サイクルまで各相の電圧および電流は複雑に変化している。この原因の一つとしては, A 相の電圧波形にみられるように再点弧電圧がこの範囲では一定していないことが上げられる。しかしながら, (a) では 8 サイクル, (b) では 12 サイクル以後においては, 各相の電圧・電流波形は定常状態で持続するようになり, 故障電流 I_F は各時点における導通後最初の電流零点でいったん消弧している。すなわち〈2・3〉節で述べた (a) 形の電流波形となっている。

4. 間欠アーク地絡のシミュレーション

〈4・1〉 等価回路 図 6 の試験回路を等価回路で表すと図 8 のようになる。同図において回路定数 L および R の値は短絡発電機 ($6,500 \text{ kVA}$, 2.1 kV) および変圧器 ($8 \text{ MVA} \times 3$ 台, $11/20\sqrt{3} \text{ kV}$, 5%) の定格から短絡率を 0.1 として計算した数値である。具

(a) 抵抗接地の場合

(b) 非接地の場合

図 7 模擬試験による各相の電圧電流波形例

Fig. 7. Examples of the voltage and the current waveforms obtained in the artificial fault tests.

体的には, $L=24 \text{ mH}$, $R=0.98 \Omega$ である。また, R_n は電源の中性点抵抗, C はケーブルの対地静電容量である。実際のケーブルは各相ごとに銅テープでシールドされているから, 相間の静電容量は無視してよい。なお, ここの検討における対地静電容量は $10 \mu\text{F}$, 健全時の進相線路充電電流は 6.6 kV のとき 14.4 A である。

さて, 故障点でアークが点弧と消弧とを繰返す間欠地絡現象を図 8 の模擬回路では故障点の位置に設けた

図 8 ケーブル系統1線地絡の等価回路

Fig. 8 Equivalent circuit for single line-to-ground fault in the cable system.

スイッチの開閉で模擬する。すなわち、アークが点弧しているときはスイッチが「オン」の状態にあり、消弧しているときは「オフ」の状態にあるとする。図3の実測波形においてアーク電圧は100V程度認められるが、電源電圧および再点弧電圧(3kV)に比べてその値は3%と低く、過渡現象に及ぼす効果はほとんどないと考えられる。

〈4.2〉状態方程式 図8に示すように、各相の対地電圧を V_a, V_b, V_c 、線電流を I_a, I_b, I_c 、電源の起電力を E_a, E_b, E_c で表す。相順は a, b, c の順とする。また、 a 相を故障相とし、故障点電流を I_f とする。これらはいずれも瞬時値である。

故障中、アークが消弧している期間はスイッチがオフの状態であり、そのときの状態方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} L \frac{dI_k}{dt} &= E_k - RI_k - V_k - R_n(I_a + I_b + I_c) \\ C \frac{dV_k}{dt} &= I_k \\ I_f &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (k=a, b, c) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、故障中アークが点弧している期間はスイッチがオンの状態であり、そのとき状態方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} L \frac{dI_a}{dt} &= E_a - RI_a - R_n(I_a + I_b + I_c) \\ L \frac{dI_k}{dt} &= E_k - RI_k - V_k - R_n(I_a + I_b + I_c) \\ C \frac{dV_k}{dt} &= I_k \\ V_a &= 0 \\ I_f &= I_a \end{aligned} \right\} \quad (k=b, c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

〈4.3〉計算手順 状態方程式(1)および(2)を用いてコンピュータで各相の電圧および電流波形を計算するプロセスを以下に示す。

(1) 最初の絶縁破壊は a 相の対地電圧瞬時値が波高値(5,389V)で生じるとし、その瞬間における各相の電圧値および電流値を初期値とし、アーク点弧中の状態方程式(2)を解く。

(2) 上述の計算において故障点電流 I_f が零に達した瞬間にアークは消弧するものとし、そのときの各相の電圧値および電流値を初期値としてアーク消弧中の状態方程式(1)を解く。

(3) 故障点の極間電圧 V_a があらかじめ指定しておいた再点弧電圧に達した瞬間にアークが再点弧するものとし、そのときの各相の電圧値および電流値を初期値としてアーク点弧中の状態方程式(2)を解く。

(4) 以後、上記(2)、(3)を繰返す。

なお、連立微分方程式を解く際、きざみ幅自動可変のルンゲ・クッタ・ジル法を用いた。

〈4.4〉試験波形との比較 計算は種々のアーク再点弧電圧 V_{ra} および中性点抵抗 R_n について実行した。そのうち、 $V_{ra}=3\text{ kV}$ として $R_n=250\Omega$ および $2,500\Omega$ の場合の計算結果を図9(a)および(b)に示す。(a)の場合2サイクル以後は定常状態になっており、同様な波形が続いている。(b)の場合も1および7サイクル目の波形を除けばほぼ同じような波形となっている。

次に、試験波形(各電圧、電流の添字を大文字としている)と計算波形(添字を小文字としている)とを対比してみよう。まず図7(a)と図9(a)とを比較すると、図7(a)の7サイクル以後と図9(a)とはほぼ一致していると言えよう。例えば、 V_b と V_c とが三角波を呈する点、 V_c と V_b とが左肩が右肩より低い点、 I_b と I_c とが右端のピークが高い点、 I_c と I_b とで真中のピークが高い点などである。

図7(b)は中性点抵抗 R_n を切り離し、非接地系統状態で試験したものであるが、中性点電位測定のための接地抵抗や対地電圧測定用機器に零相抵抗分があるので、非接地といえども一種の中性点高抵抗接地系統と見なせる。この試験波形図7(b)を $R_n=2,500\Omega$ として計算した図9(b)と対比してみると次のようなことが言える。但し、試験波形の11サイクル以降の定常状態との比較である。 V_b, V_c の半波波形は共に左側に傾いている。一方、 V_c, V_b のそれらは右側に傾斜している。 I_b, I_c の半波波形は共に右側にピークがあるのに対し、 I_c, I_b では左側にピークがある。このように非接地の場合の試験波形も計算波形とほぼ一致

図 9 各相の電圧電流波形の計算結果

Fig. 9. Computer plot of voltage and current waveforms obtained from eqs. (1) and (2).

していると言えよう。しかしながら、全体的に計算波形の方が試験波形よりも丸みをもっている。この点に関し、回路定数の取り方など今後検討しなければならない。

5. 健全相の過電圧

試験波形と計算波形とがほぼ一致したことにより、前章のようなシミュレーションを用いてケーブル系統の間欠地絡の様相を算定できることが判明した。そこで間欠地絡がケーブルの他の個所に及ぼすストレスの影響を検討するために、このシミュレーションを用いて健全相に生じる過電圧の大きさを求める。

〈5・1〉 中性点抵抗の影響 このシミュレーションにおいて地絡は a 相の対地電圧瞬時値が波高値に達したときに発生するとしている。そのため異常電圧最大値は、いずれの健全相においても故障直後に発生している。シミュレーションにおいて中性点抵抗の値を変えて波形を求め、この過電圧の値を読み取った。その結果を図 10 に実線で示す。同図において (a) は C

$= 2.0 \mu\text{F}$ (ケーブルこう長 10 km に相当)、(b) は $C = 10 \mu\text{F}$ (ケーブルこう長 50 km に相当) の場合である。(a) において過電圧は中性点抵抗が 10Ω で 1.7 倍、 52Ω で 2 倍、 220Ω で 2.5 倍、 $1,000 \Omega$ 以上では飽和傾向を呈し、その飽和値は 2.8 倍である。例えば、過電圧倍数を 2 倍以下に押えたいならば、中性点抵抗の値は 52Ω 以下にすべきであることがわかる。同様に (b) において過電圧は 10Ω で 1.8 倍、 20Ω で 2.0 倍、 80Ω で 2.5 倍、 $1,000 \Omega$ 付近から飽和し 2.9 倍となる。過電圧倍数を 2 倍以下にする必要があるならば中性点抵抗は 20Ω 以下にしなければならない。

図 10(a), (b) の実線どうしを比較すると、過電圧倍数は $C = 10 \mu\text{F}$ の場合が $C = 2 \mu\text{F}$ の場合よりも全体的に高く、特に中性点抵抗値が $20 \Omega \sim 200 \Omega$ の範囲においてそれらの差が大きい。

中性点抵抗値を 75Ω , 250Ω , ∞ として試験を行ない、オシログラムから読み取った過電圧値を図 10 に I 印で示す。試験は各中性点抵抗値について 5~8 回行ない、 $R_n = \infty$ の場合は便宜上 $R_n = 8,000 \Omega$ の位

図 10 過電圧 (常規対地電圧波高値に対する倍数) と中性点抵抗との関係

Fig. 10. Overvoltage (multiple to crest value of normal line-to-ground voltage) against neutral resistance.

置に記してある。実測値はかなりばらついてはいるものの、実線で示す計算値と傾向は一致している。しかしながら、数値自体は実測値が計算値よりも全体的に低い。この原因は試験で用いた供試ケーブルの耐圧が 3,000 V であり、一方シミュレーションにおいては波高値 5,800 V で絶縁破壊が生じるとしていることにある。従って、実際の配電系統の立場から考えるならばシミュレーションから得た数値を採用する方がより安全であろう。

配電系統に故障が生じた場合、リレーが動作し、しゃ断が行なわれるのは数 10 サイクル後である。この間、間欠アークが持続し健全相のケーブルに過電圧が周期的にかかる。このような持続的過電圧は避雷器に対して悪影響を及ぼす可能性がある。従って、故障直後の最初の過電圧よりもその後続く数サイクルの過電圧にも注意しておく必要がある。図 9 のようなシミ

ュレーション波形から最初の半サイクルを除き、その後の 10 サイクルまでの過電圧の平均値を求めることができる。その結果を図 10 の破線で示す。同図が示すように過電圧倍数は、中性点抵抗値の大小にほとんど関係なく約 2 倍となった。すなわち、故障後しゃ断器が動作するまで、この 2 倍の過電圧が避雷器にかかることになる。

〈5・2〉 ケーブルの対地静電容量の影響 本シミュレーションに必要なパラメータとしては、故障点再点弧電圧 V_{rd} 、中性点抵抗 R_n およびケーブルの対地静電容量 C の三つがある。本節では、ケーブルこう長に相当する静電容量の値が過電圧に及ぼす影響を検討する。 $V_{rd}=3\text{ kV}$ 、 $R_n=2,500\Omega$ の条件のもとで C の値を 2~16 μF と変化させシミュレーションを実行し得られた健全相 C 相の電圧波形から、異常電圧の最大値 (過渡異常電圧) と定常異常電圧とを求めた。結果を図 11 に示す。図に示すように過渡異常電圧の値は約 2.8 倍とほぼ一定である。すなわち、ケーブルのこう長の長短が過渡異常電圧にも定常異常電圧にもほとんど影響しないと言える。

図 11 過電圧と対地静電容量との関係

Fig. 11. Overvoltage against line-to-ground capacitance of cables.

図 12 過電圧とアーク再点弧電圧との関係

Fig. 12. Overvoltage against restriking voltage.

〈5・3〉 故障点の再点弧電圧の影響 ここまでは間欠アーク発生の再点弧電圧は実験データから算定して、3kV 一定としてシミュレーションを行ってきた。しかしながら、実際の場合再点弧電圧は故障の条件により 3kV とは異った値となる。そこで中性点抵抗値およびケーブルの対地静電容量の値を一定としたまま、再点弧電圧を極端な場合も考慮に入れて 0~10 kV と変化させ、シミュレーションを行なった。そのときの C 相の電圧波形から過渡異常電圧および定常異常電圧の値を読み取った。 $R_n=2,500\Omega$, $C=10\mu F$ の場合の結果を図 12 に示す。

過渡異常電圧は V_{bd} が 8kV まで 2.8 倍と一定値を保ち、 V_{bd} が 8kV を超えると直線的に上昇している。一方、定常異常電圧は V_{bd} が高くなるにつれて、除々に上昇し $V_{bd}=8kV$ では過渡異常電圧と一致するようになる。電源および回路の条件によっては $V_{bd}=8kV$ 以上になる可能性もあり、この場合には定常異常電圧が 3 倍以上となり、避雷器などに与えるストレスは過酷なものとなるのであろう。

6. ケーブル系統の模擬方法に関する検討

ケーブルの対地静電容量を集中静電容量で模擬して 6.6kV ケーブル系統における 1 線地絡現象を実験し、かつそのシミュレーションを行ってきた。最近では送電線などの開閉サージの計算においては分布定数回路として取り扱うのが一般的となっている。

しかしながら、6.6kV ケーブル配電系統は次のような点で送電系統とは異なる。第一に、6.6kV 系統のいたるところに並列に配電用トランスが設置されており、仮りに進行波が伝搬したとしても、多数回の反射、透過が繰り返され、波形は滑らかなものに変わってしまう。

第二に 6.6kV ケーブルの全長は比較的短い。配電線の性格上、配電変電所から長いケーブルがただ一本延びているよりも、長短あわせて数本のケーブルが母線から並列に設置されているのが普通である。20kV 級配電系統においてさえ全長は 0.5~15km のものから構成されており⁽⁵⁾、6.6kV 系統のほとんどはそれ以下である。従ってその長さが 1 波長に近い正弦波の周波数は数百 kHz 以上となり、図 7 などに現われる波形の周波数成分よりはるかに高い。

以上のように、6.6kV ケーブル系統は集中定数で取り扱ってまったくよいというわけではないが、分布

定数が適用されている送電系統よりは厳密に考えなくてもよいと言える。

7. む す び

6.6kV 用 CV ケーブル系統に 1 線地絡故障が発生すると、ケーブル系統は故障点からみると容量性回路となっていること、故障点はアークによってポリエチレンが熱分解し激しくガスを噴出することが主な原因となって、架空線系統とは著しく相違した故障様相を呈することを指摘した。すなわち、ケーブル系統の故障点に発生するアークは、高周波の間欠アークとなるため、これらの高周波間欠アークによってもたらされる異常電圧も完全な地絡時に発生するものとは非常に異なり、系統保護上の立場からも詳細に解析する必要がある。

本論文は、このような間欠アーク地絡を起こしているケーブル系統のシミュレーションを行ない、これらの結果を実験と照合させ、シミュレーションの妥当性を得た。次に、中性点抵抗、ケーブル長さおよび間欠アーク再点弧時の破壊電圧などが異常電圧に及ぼす影響を検討した。6.6kV、非接地系統では無負荷状態において故障直後の過渡異常電圧でおよそ 3 倍、間欠アークによって持続する定常異常電圧でおよそ 2 倍（いずれも常規対地電圧波高値に対する倍数）の大きさをもつ。もしこれを中性点抵抗を低くすることによって抑制しようとする 50 Ω 以下にする必要がある。

本研究における実験データは、株式会社高岳製作所により提供いただいたものであり、関係各位に感謝致します。また、本研究は、文部省科学研究費一般研究 (C) の補助を受けた。

(昭和 57 年 2 月 1 日受付、同 57 年 8 月 9 日再受付)

文 献

- (1) C.F. Wagner, C.M. Lane & C.M. Lear: "Arc drop during transition from spark discharge to arc", *Trans. AIEE*, 77, III, pp. 242 (1958)
- (2) K.J. Cornick, Y.M. Ko & B. Pek: "Power system transients caused by arcing faults", *Proc. Inst. Elect. Engrs.* 128, Pt. C, No. 1, pp. 18 (1981)
- (3) 例えば、電気学会大学講座「遮断器：開閉器」電気学会, p. 69 (昭 43)
- (4) 土橋: 「地中配電設備の保守点検技術」電気評論 64, No. 8, 749 (昭 54)
- (5) 電気学会技術報告, II 部第 31 号, (昭 50)
- (6) JEC, 避雷器 JEC-203-1978, p. 69, (昭 54) 電気書院