Surge Phenomena on the 100 kV Cable Connected System

井 清 哲 夫*徳 光 定 行*笈 川 俊 雄**Tetsuo IseiSadayuki TokumitsuToshio Oikawa奥 山 賢 一***橋 本 博 治****渡 辺 靖 明****Ken'ichi OkuyamaHiroji HashimotoYasuaki Watanabe

內 容 梗 概

架空線ケーブル接続系統におけるサージ伝播特性はケーブルの低サージインピーダンスに起因して複雑な現象を呈する。筆者らは100kV中国電力神戸製鋼線において架空線での逆せん絡を想定し,一連のサージ特性実測を行った。また,サージ解析器によっても同様の実験を行い両者を比較検討した。

この結果,架空線とケーブルとの接続点近傍で逆せん絡が発生すれば,ケーブルには過酷な電圧が生じ,サ ージ保護に対する十分な検討を要することが明らかとなった。

1. 緒 言

ここ数年来わが国においては都市電力需要の増加,用地買収難な どから 60 kV 以上の電力ケーブルの布設亘長は急激な伸びを示し ている。これら高電圧ケーブルは従来多量に使用されていた 20~ 30 kV 級ケーブルとは異なり,架空線に直接接続されることが多い。 ば、サージ波形のひずみなどがそれである。

このような観点から種々の線路のサージ特性データーを集積し, より正確な模擬計算に資するとともに実際の線路で得た結果とサー ジ計算盤によるものとを比較検討しておくことは有意義である。

従来架空線あるいはケーブル単独でサージ特性を測定した例は多いが、今回中国電力神戸製鋼線(100kV1回線)で架空線とケーブ

この場合には、これらケーブルは架空線から侵入する雷サージの脅威に常時さらされていることとなる。

架空線ケーブル変圧器という系統において架空線からサージが侵入した場合,避雷器を考慮しなければ,変圧器端に生ずる電圧はケーブルの低インピーダンスに起因して架空線のみの場合よりも低い値となる⁽¹⁾。このことはケーブルがその終端に接続される機器にとって外雷に対する保護装置としてもある程度有効であることを示している。事実ケーブル亘長が十分大きく,架空線から侵入するサージの波高値を一定値以下に制限する場合にはケーブル端には保護装置を必要としないことがある。東京電力蔵前線がその一例である。

しかしながら,ケーブルは架空線とは異なり,それ自身保護を要 するものであり線路亘長も1km 前後のものが多い。したがって多 くの場合にはケーブル端における避雷器の設置は不可避であるが, その設置位置,避雷器の形式などが問題となる。

一方,架空線とケーブルの接続点で両者のサージインピーダンス の差異に起因して生ずる反射現象は系統のサージ伝播特性を複雑化 し,さらにサージの減衰,ひずみあるいは避雷器の特性などを考慮 に入れると机上での解析はきわめて困難となる。

さらに接続点近傍の架空線で逆せん絡を生じた場合には、きわめて過酷な電圧の発生することが、 I. Herlitz 氏らによって指摘されている⁽²⁾。

このようにケーブル接続系統のサージ保護方式についての検討は 現在世界的にも重要視されているものであるが,その現象が複雑な ために決定的な保護方式は確立されていない。

筆者らも従来変圧器直結ケーブル系統などを主としてサージ計算 盤により種々検討を進めるとともに 70 kV ケーブルによるサージ特 性実測も行ってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。

-

ルを接続した状態でサージ特性を実測する機会を得た。架空線およ びケーブルのサージ諸特性を求めるとともに,両者を接続した状態 で架空線での逆せん絡を想定し,模擬避雷器を使用して,各部に発 生する電圧を測定した。

その結果興味あるデーターを得たのでここにその全容を報告し参 考に供する次第である。

2. ケーブルの構造および線路の状況

2.1 ケーブルの構造および諸定数計算値

測定に供したケーブルは 100 kV 3×125 mm² 一重鉛被クロロブ レン防食鋼帯がい装 OF ケーブルで⁽⁵⁾その構造詳細を第1図および 第1表に示す。

本ケーブルにおいて各線心は銅テープにより遮へいされているか

第1表 110 kV 3×125 mm² OF ケーブル構造表

| | 項 | | 目 | | 単 | 位 | 数 | 値 |
|------|-------------|---------|--------|-----|-----------------|-----|------------|-------|
| 道 | (公 | 称 断 | 面 | 積 | mm ² | | 12 | 5 |
| | 形 | | | 状 | | | 圧 縮 | 円形 |
| 体 | (外 | | | 径 | mm | | 1 | 3.5 |
| 杀伤 | (導体 | 上カーポン | 紙卷 | 厚さ | mm | | | 0.2 |
| 禄 | 一絶 | 縁 | 厚 | 3 | mm | | 1 | 1.65 |
| 体 | (絶縁 | 体上 カーボン | 紅卷 | 厚さ | mm | | | 0.15 |
| 瀌 | $\sim \psi$ | 用 銅 テ ー | ブ 厚 | Ž | mm | | | 0.1 |
| L | 12 | 合 せ 外 | 径(| 約) | mm | | 8 | 3.0 |
| 2H | (内 | | | 径 | mm | | $16.0 \pm$ | = 0.5 |
| 通 | 子厚 | さ | | (約) | mm | | 1 | 0.6 |
| 正合 | (紙 テ | ーブ巻周 | 1 2 | (約) | mm | | 3 | 0.25 |
| 22 | 1 | ング | 厚 | 3 | mm | | (| 0.5 |
| 鉛 | | 被厚 | . /1 | さ | mm | | ; | 3.6 |
| 補 | (綿ラ | ープ巻 | 「厚さ | (約) | mm | | (|),5 |
| 动 | 」短 ビ | ッチ黄銅 | テー | ・ブ | mm×ŧ | 女 🗌 | 0.4	imes | 2 |
| J.R. | 長ビ | ッチ 黄 錦 | リテー | ・ブ | mm×ŧ | 文 | 0.5 	imes | 27 |
| 眉 | 6.1 | ン ド 黄 錦 | テー | プ | mm×ŧ | 攵 | 0.2	imes | 2 |
| 防層 | 57 0 | ロプレン | 層厚 | 5] | mm | | 3 | 3.0 |
| 食 | しクロ | コプレン付 🌵 | 则布卷) | 享さ | mm | | 1 | .0 |
| 鋼 | 带 | が い 装 | 厚 | 2 | mm×校 | 攵 | 0.8 	imes | 2 |
| ジ | л | - ŀ | 厚 | さ | mm | | 2 | 2.0 |
| 概 | | 算 外 | | 径 | mm | | 112 | 2.0 |
| 概 | | 算 重 | | 量 | kg/km | | 33,400 | |
| 標 | 準 静 | 電容量 | t (20° | °C) | μ F/km | L I | 0 | .21 |
| 最 | 大 導 | 二体 抵 扩 | ī (20° | °C) | Ω/km | | 0 | .145 |

| しかし | ながらサージ計算盤で模擬計算を行うに当り、当然架空線 | 層 | | ピイ | 1.1 |
|------|----------------------------|----|----|-----|-------------|
| やケーブ | ルの各種サージ特性定数を正確には握する必要があり,他 | 防層 | 57 | P | ţ |
| 方これら | の定数が判明してもその模擬が困難なものもある。たとえ | 食鋼 | の帯 | 口口力 | 2. 2. 2. 10 |
| * | 中国電力式株会社 | ジ | 3. | | |
| ** | 日立製作所日立研究所 工博 | 概 | | 貨 | £ |
| *** | 日立製作所日立研究所 | 概 | | 第 | E |
| **** | 日立電線株式会社電線工場 工博 | 標 | 準 | 静 | |
| **** | 日立電線株式会社電線工場 | 最 | 大 | 導 | |

— 73 —

2070 昭和 36年 11 月

Ħ

17.

評

第 43 巻 第 11 号

| | 項 | | | | 目 | | 単 | 位 | 数 | 値 | 1.5 | 備 | 考 |
|----------|-----|--------|---|----|---|--------|-----------|------------|-----|----------------|-----------|-----------|---------|
| イ : 静 | ン 1 | ダ 電 | 7 | タ容 | Z | ス 量 | mΗ μF/ | /km ′km | (|).204).202 | カー 実測 | ボン紙は 値 | 絶縁体とみなす |
| | | | ε | | | | - | | 3 | 3.59 | カー | ボン紙はi | 尊体とみなす |
| 伝 | 3 | 幸 | | 速 | | 度 | m/p | 's | 156 | 5 | 1 | | |
| イン | Ŀ°- | - (| 1 | | | ۰Ľ۲ | 2 | Ω | 31 | 8 | | | |
| ダン | ス | 1 | 3 | 心 | | 括 | 2 | 2 | 10 | 0.6 | | | |



第1図 110 kV 3×125 mm² 一重鉛被クロロプレン 防食鋼帯がい装 OF ケーブル断面図

第1鉄塔 第6鉄塔 第7鉄塔

らこれを完全同軸ケーブルと考え定数を計算すると**第2表の**とおり である。ただし静電容量は実測値であり ε はこの値から逆算して求 めた。

2.2 架空線および線路の状況

論

神戸製鋼線は下関変電所から神戸製鋼変電所に給電するもので架 空線1,795mケーブル1,103m(いずれも100kV1回線)からなって いる。ルートの概略を第2図に示すが架空線は鉄塔7基を含み、山 間部を通ってNo.7鉄塔に至り、ここでケーブルと直接接続される。 第7鉄塔付近の状況を第3図に示す。

電線は 160 mm² 中防食 ACSR であり全区間架空地線が1 条張ら れている。途中 2 箇所で 40 kV 送電線と交差しており,このため後 記するように誘導電圧があった。懸垂がい子は塩害対策から 9~10 個連となっており 招弧 装置を取付けて 620 kV で放電 するように 設定してある。なお上記した誘導電圧実測値は下記のとおりであ る。

(1) 第7鉄塔側開放とし下関変電所で測定した場合

対地電圧

| U | 相 | 165 V |
|---|---|------------------|
| V | 相 | $160 \mathrm{V}$ |
| W | 相 | 180 V |

注:測定はテスタで行った。テスタの内部抗抗 1 ΜΩ

(2) 線間雷圧





| (- | TYN I | 11-11 | HE / | | | |
|-----|-------|-------|------|--|--|--|
| | | | | | | |

| U - V | 間 | 13.7 V |
|-------|---|--------|
| V-W | 問 | 11.3 V |
| W-U | 問 | 9.0 V |

注:テスタ内部抵抗 200 kΩ

(3) V相と大地間に抵抗を接続した場合の対地電圧

| 抵抗值 | 誘導電圧 |
|--------------|------|
| $10 k\Omega$ | 7 V |

| 5 | kΩ | 3.5 V |
|----|----------------------|-------------------|
| 1 | $k\Omega$ | $0.62 \mathrm{V}$ |
| 0. | $5 \mathrm{k}\Omega$ | 0.27 V |
| 0. | $1 \mathrm{k}\Omega$ | 0 V |

(4) 下関変電所側を接地して第7鉄塔側で測定した場合 この場合は各相とも1V程度で問題なかった。

以上の測定結果からこれは静電誘導であり長さ方向の電圧分布は 微少なので1点で1kΩ程度の抵抗で接地すれば全く問題のないこ とがわかった。すなわち,サージ発生器を接続すれば誘導電圧は微 少なものとなる。

なおこの誘導電圧波形をブラウン管で観測したところ,ひずみの 少ない€0 c/s 正弦波であった。したがって放送電波などではなく途 中で交差している40 kV 架空線からの静電誘導と考えられる。

ケーブルの布設ルートは大体一様な傾斜地でケーブルは道路横断 部を除いて鉄筋コンクリート製トラフ内に収められ直埋布設となっ ている。途中3箇所に普通接続箱があり、ここと両端部の計5箇所 でケーブル鉛被は接地されている。

なおケーブルヘッドのがい子は塩害を考慮して 140 kV 用のもの を使用しているため棒間げきを設けてインパルス電圧に対する協調 を保つようにしてある。神戸製鋼所側変電所には受電用の12,500

第3図第7鉄塔の状況

kVA 変圧器 2 台がおかれまた避雷器も日立製作所製 ODB-200 形 (放電電圧305 kV) 1 組が置かれることとなっている。

| | 3. | 測 | 定 | 装 | 置 | |
|-----------|-----|-----|---|---|---|--|
| 測定に使用したおも | らな様 | 幾器は | | | | |
| シンクロスコープ | 7° | | 3 | 台 | | |
| 繰り返しサージ系 | 着生暑 | 品 | 1 | 台 | | |

----- 74 ------

模擬避雷器 2台 である。シンクロスコープは岩崎通信機製 SS 5301 1台, SS 5151 2台でこれは現地発送前に工場で3台の特性を完全に合致させさら に現地到着後 gain や周波数特性を綿密に再調整した。繰り返しサー ジ発生器は電源周波数に同期してすなわち 60 c/s 地区では 16.7 ms 間隔でインパルスを発生するもので波形はブラウン管上に静止して 見ることができる。波形は 0.5/20, 1/40, 1/100 μ s の 3 種類とし放 電抵抗は後述するように逆せん絡を模擬するため 10 Ω とした。この サージ発生器の最大発生電圧は約 1,000 V であるが, 今回は放電抵 抗を 10 Ω としたため波形により 160~400 V であった。模擬避雷器 はサイラトロンを使用して放電開始電圧, 制限電圧を自由に変化で きるようにしたものである。放電開始電圧は 100~300 V の範囲に 変化できる。

4. 各種定数測定方法および測定結果

4.1 伝 達 速 度

4.1.1 測 定 方 法

第7鉄塔にサージ発生器を置き架空線およびケーブル終端開放の状態でサージの往復時間を測定する。1/40 µs 波使用。

4.1.2 測 定 結 果

測定結果をまとめて第3表に,また測定波形の1例を第4図お よび第5図に示す。3心一括と1心とで伝達速度が異なるのは通 常線間波が対地波に比して伝達速度が大きいためで1心では線間 波,3心一括では対地波の伝達速度を測定していることになる。 線間波の伝達速度は従来の測定によると大体計算値に近いのであ るが今回は計算値を若干下回った値となった。 ことも線心間に結合のあることを示している。この測定結果から 結合係数は約4%であった。

2071

架空線のインピーダンスも予想より大きかった。これは山間で 谷間を横断しているためであろう。また,結合係数は平均で約 31%であった。第6図から明らかなように鉄塔部では明らかに反 射が認められた。これは架空地線の影響が大きいためと考えられ る。

4.3 減衰およびひずみ特性

4.3.1 測 定 方 法

架空線あるいはケーブル終端を開放しておき電圧印加端と終端 で印加波の電圧を測定する。この時減衰は次式で定義される。

$rac{E_2}{2 imes E_1}$

ただし E_1 は印加電圧, E_2 は終端に到達して反射した後の電圧である。なお波尾長の変化はケーブルを純抵抗で整合させることができない上、3心ケーブルでは線心間に結合があって十分な精度が期待できないので今回は測定しなかった。

4.3.2 測 定 結 果

測定結果は第5表に示す。

また第7,8 図に各々架空線およびケーブルの測定波を示す。 これらの図から明らかのようにケーブルのほうが架空線に比して 波形のひずみは大きい。

4.2 サージインピーダンス

4.2.1 測定方法

第2京大法によった(6)。

4.2.2 測定結果

測定結果を第4表に示す。第6図は架空線3心一括の場合の測 定波形を示したものである。ケーブルの1心のサージインピーダ ンス測定値は計算値より約20%大きい。これは各線心遮へい用 銅テープがサージに対しては有効でなく帰路電流の多くが鉛被あ るいは大地に分流していることを示している。また3心一括時の インピーダースが1心の場合のインピーダンスの1/3より大きい

| 試 | 料 | 条 | 件 | 伝達速度(m/µs) | 備 | | 考 |
|----|----|----------|----------|------------|--------|--------|----|
| 架空 | 線 | 1 3 線 | 線 一 括 | 275 266 | 線 対 | 間 地 | 波波 |
| ケー | ブル | 1 3 心 | 心 一 括 | 148 133 | 線 対 | 間地 | 波波 |

第3表 サージ伝達速度測定値

しかし実際の場合には架空線ではコロナによるひずみが期待さ れる。ケーブル中でのサージの減衰は従来計算あるいは実測で確 認されているように波尾の長いものほど少なく、1/100 µs では 10% 程度減衰するのに対し 0.5/20 µs 波では 24% も減衰する。架 空線の減衰は第5表に示すように負の値が得られた。実際にはこ のようなことは考えられないからこれは第7鉄塔と下関変電所の 接地抵抗の差異あるいはサージインピーダンスの長さ方向の不平 等が起因しているのであろう。しかしながら架空線におけるサー ジの減衰が微少なことは第8図に示した波形で波頭部のひずみが ほとんど認められないことからも推定できる。ただし、さらに長 距離の送電線で測定すれば主として分波現象による大きな減衰が 認められるであろう。

第4表 サージインピーダンス測定結果

| | | art in the second second | and the second second second second | | N. F. C |
|------|------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------|
| 弒 | 料 | 条 | 件 | サージインピー ダンス(Ω) | 注 相配置は下 |
| le . | -1 1 | 1 | 心 | 38.3 | 2409 080 |
| ケーフル | 3 心 | 一 括 | 13.8 | ★─架空 | |
| | | U | 相 | 513 | X |
| 架空線 | V | 相 | 505 | VEX | |
| | W | 相 | 536 | | |
| | | 3 線 | 一 括 | 279 | |



振幅 20 V/目盛 掃引速度 2 µs/目盛 第4図 ケーブルの伝達速度測定波形 (1心)

振幅 20 V/目盛 掃引速度 2 µs/目盛 第5図 架空線の伝達速度測定波形 (3線一括)

— 75 —

振 幅 60 Ω/目盛 掃引速度 2 μs/目盛 第6図 サージインピーダンス測定例 (架空線3線一括) 日

論 評

Ц.

第43卷第11号

4.4 他 心 誘 起

4.4.1 測定方法

終端開放の状態で1心に電圧を印加し電圧印加点で波形を測定 する。この場合波形測定相は両端とも開放とした。 1/40 µs 波使 用。

4.4.2 測 定 結 果

測定結果の一例を第9図および第10図に示す。

架空線はもちろん、ケーブルにおいても若干の誘導があり、こ れが分波現象のために短時間極性が逆転し,このせん頭値は印加 電圧の 30% にも達することがある。図中で1往復時間ごとに現 われている負極性のせん頭波形がそれであるが今回の測定では線 間波のひずみが比較的大きいためこのせん頭値は小さなものとな っている。このように3心 OF ケーブルは厳密には多導体系とし て解析しなければならないものである。

| 15/5 | F | -1- | Nr.12 | | 4++- | 141- | CERT | C | 4-t= | HI | |
|------|---|-----|-------|---|------|------|------|---|------|----|--|
| 弗 | Э | 衣 | 问义 | 衣 | 行 | 任 | (則) | 止 | 示口 | 木 | |

| 試 | 料 | 線 | 心 | 波 形 | $E_2/2 E_1(\%)$ | 伝達後の波頭長 (µs) |
|-------|-----|-----|---------|--------|-----------------|-----------------|
| | | | | 0.5/20 | 76.5 | 2.1 |
| ケー | ブル | 1 | 心 | 1/40 | 81.8 | 2.5 |
| | | | | 1/100 | 93.7 | 3.6 |
| | | | | 0.5/20 | 98.5 | 1.2 |
| | | U | 相 | 1/40 | | 1.5 |
| | | | | 1/100 | | 1.9 |
| | | | | 0.5/20 | 101 | 1.1 |
| | | v | 相 | 1/40 | 103 | 1.4 |
| 12.52 | | | | 1/100 | 101 | 1.6 |
| 架 3 | 空 線 | | | 0.5/20 | 102 | 1.0 |
| | | W | 相 | 1/40 | 104 | 1.3 |
| | | | | 1/100 | 102 | 1.7 |
| | | | | 0.5/20 | 100 | 1.7 |
| | | 3 線 | 一括 | 1/40 | 100 | 1.8 |
| | | | A ANDRO | 1/100 | 101 | 2.5 |

5. 逆せん絡模擬試験およびサージ解析器 による実験値との比較

5.1 実系統における測定方法

W相1線だけを使用して逆せん絡地点は下関変電所および第6鉄 塔とした。第6鉄塔と第7鉄塔(架空線とケーブルの接続点)間の 距離は300mである。

避雷器は神戸製鋼所内変電所と第7鉄塔に設置した場合の両者に ついて測定したが、本稿では実際と同様の条件である前者の場合に ついて主として検討した。避雷器の放電開始電圧は逆せん絡電圧の 40~60%の範囲で3点測定した。

電圧印加法は逆せん絡を完全に模擬することが困難だったため, 第11図のように導体と鉄塔基部の接地線との間にサージ発生器を そう入し、サージ発生器の内部抵抗を 10Ω とした。すなわち、鉄 塔のインピーダンスを10Ωとみなしたことになる。

5.2 サージ解析器

サージ解析器によって検討する際一般に, 模擬回路のインピーダ ンス,減衰およびひずみ特性,あるいは伝達速度などを実線路のそれ に完全に一致させることは困難である。今回は線路の模擬回路は遅 延線で組み、定数は次のように選んだ。すなわち、実系統では前述 のとおり架空線およびケーブルのサージインピーダンスはそれぞれ 536 Ω, 38.3 Ω である。一方, 模擬回路では架空線側は840 Ω, ケ -ブル側は65 Ω で、実系統と模擬回路との比は

注 E1: 印加電圧

E2: 反射電圧

(A) 印

加



掃引速度 2µs/目盛 1/40 µs 波 幅 20 V/目盛 振 第7図 減衰特性測定波形 (ケーブル1心)





となって若干の相違がある。

次に伝達速度は模擬架空線 3.03m/µs, 模擬ケーブル m/µsのも のいずれも6mとし、時間軸換算は実系統の1/3としたので、換算 実長は架空線1,634m, ケーブル1,013m

となる。これは架空線で9%、ケーブ ルでは 8% 実系統線路より小さな値 であるが, 模擬回路要素の関係から差 異をこれ以下にはできなかった。

模擬回路の減衰は第12図に示すと おり、 L および C 形遅延線ではかなり 減衰は大きいが,今回はこれを用いて 時間軸を1/3にした場合と遅延ケーブ ルを用いて時間軸を1/6,1/3としたも のについて実験した。遅延ケーブルを 用いれば時間軸1/3で実ケーブルと大 体同一の減衰特性を示し、1/6とすれ ば模擬回路の減衰のほうが実系統のそ れよりも少なくなることが第12図か らわかる。

5.3 試験結果 5.3.1 避雷器がない場合 結果は実系統での実測値とサージ 解析器による実験値とを対比して第 6表に示す。また,測定波形の一例を 第13図に示す。 まず, 下関変電所で逆せん絡した 場合を考察してみる。避雷器がなけ れば1/40µs波でせん絡電圧の100% 程度の電圧がケーブル終端に発生す

(B) 終端の波形 1/40 µs 波 掃引速度 2 µs/目盛

----- 76 ------

幅 50 V/目盛 振 第8図 减衰特性測定波形 (架空線V相)

形

波



第9図 他心誘起波形(ケーブル)



第6表 避雷器なしの場合の各部電圧比

| 逆せん | 波形 | E | a/E_i (2) | %) | E | e/E_i (2) | %) | E_{c} | e/Ea (? | %) |
|-------|-------------------------|-------------------------|---------------------|--|------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 絡地点 | (µs) | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 |
| 下関変電所 | 0.5/20 1/40 1/100 | 65.4 105.5 148.8 | 66.5 98.6 135 | $1.68 \\ -6.55 \\ -8.8$ | 62.6 99 129.5 | 63.5 94 125 | $1.44 \\ -5.3 \\ -3.1$ | 95.6 93.8 87.5 | 95.5 95.3 92.5 | -0.1 1.58 5.71 |
| 第六鉄塔 | 0.5/20 1/40 1/100 | 109.3 143.1 201.8 | 128 147.5 195 | $ \begin{array}{c c} 17.4 \\ 2.98 \\ -3.37 \end{array} $ | 75.3 107.1 143.1 | 100 119 145 | 3.28 10 1.47 | 68.8 74.9 71 | 78.2 81 74.4 | 12 7.52 4.8 |

- 注 ケーブル模擬は遅延ケーブル
 - E_i : 印加電圧
 - Ee: 接続点電圧
 - Ea: ケーブル終端電圧

る。さらに、1/100 µs 波では最大 150% にも達する。したがって、 第7鉄塔と下関変電所間を完全に遮へいしたとしても、ケーブル 端部に避雷器は必要である。

次に,第6鉄塔すなわちケーブルとの接続点から300mの距離 で逆せん絡したと想定すれば条件はさらに過酷となり,ケーブル 終端の電圧はせん絡電圧の約2倍にも達する。

ケーブル両端の電圧波形は第13図から明らかなように減衰振 動状であり、その周期は印加電圧波形にはほとんど無関係で、ケ ーブルの静電容量と架空線のインダクタンスとの直列回路として 概略求められる⁽⁶⁾。

2073

誘起電圧

電圧印加: W相 誘導測定: V相 属 幅 100 V/目盛 掃引速度 5 μs/目盛 第 10 図 他心誘起波形(架空線)



第11図 電 圧 印 加 方 法



ケーブル両端の電圧を比較すると,第7鉄塔側に比較して神鋼 変電所側すなわちケーブル終端のほうが必ず大となっている。こ の差は逆せん絡地点が近いほど大となり,サージの波尾長にも影 響される。また,両者の電圧波形を観察すると,第13図から明ら かなようにケーブル終端のほうが立上りが早い。この事実は避雷 器をケーブル両端のどちらか一方だけに設置するとすれば,架空 線との接続点よりもケーブル終端のほうが好ましいことを示して いる。

サージ解析器ではこの場合模擬ケーブルとして遅延ケーブルを 用いた。測定結果を実測値と比較すると、逆せん路地点が下関変 電所のときは誤差は大体 ±7%以内におさめられていることが わかる。第6鉄塔で逆せん絡のときも大体同様であるが、一部に 若干誤差の大きなものが認められる。この原因は明らかではない が、実測の際のサージ発生器の電圧変動などが関係しているので あろう。

避雷器なしの場合を検討する際には模擬線路の減衰が直接関係 してくるので,実ケーブルのそれに極力近似させることが重要で ある。

5.3.2 神鋼変電所側に避雷器を設置した場合

前述のように実系統では神鋼変電所側に避雷器を設置する計画 となっているのでこの場合について検討した。

実測値およびサージ解析器による測定結果は第7表に,また波 形の一例を第14図に示す。この場合に架空線とケーブルの接続点 部分に発生する電圧はケーブル終端に設置した避雷器の放電開始 電圧よりも必ず大となる。しかしながら,下関変電所で逆せん絡 したときにはその増加は30%程度であり,実系統では約400kV となるので,B.I.L. には十分余裕がある。したがって,下関変 電所と第7鉄塔間の架空線を完全に遮へいしたと考えれば避雷器 は神鋼変電所だけに設置すれば十分である。 次に,第6鉄塔で逆せん絡を起したと想定すると上記の場合に 比してかなり大きな電圧が発生し,第7鉄塔側の電圧はせん絡電 圧の90%以上にも達する。このように近距離での逆せん絡を想 定すると,非常に過酷な電圧が架空線とケーブルの接続点に発生 するのでこの部分にもなんらかの保護装置が必要となる。





系





掃引速度 20 µs/目盛 1/40 µs 波 (A) 下関変電所で逆せん絡の場合



印加電 圧 (Ei)



接続点電圧 (Ec)



掃引速度 30 µs/目盛

1/40 µs 波

神鋼変電所側電圧 (Ea)









掃引速度 15 µs/目盛 1/40 µs 波







1

模擬回路 (遅延ケーブル)

模擬回路 遥 延

掃引速度 20 µs/目盛 1/40 µs 波 (B) 第6鉄塔で逆せん絡の場合

第13図 避雷器がない場合の各部電圧波形



1992



印加電圧(Ei)

避雷器端電圧 (Ea)

模



掃引速度 20 µs/目盛 1/40 µs 波 $E_a/E_i = 39.6\%$ (B) 第6鉄塔で逆せん絡の場合

第14図 神鋼変電所側に避雷器を設置した場合の各部電圧波形

79 —

| 逆せん | 波形 | E_{c} | a/E_i (| %) | E_{c} | c/E_i (? | %) | E_{c} | e/Ea (| %) |
|---------------------|---------------|---------|-----------|-------|---------|------------|-------|---------|--------|-------|
| 絡地点 | (µ s) | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 |
| | | 39.9 | 40 | 0.25 | 48.5 | 47 | -3.1 | 121.7 | 117 | -3.29 |
| Т | 0.5/20 | 45.5 | 50 | 10.15 | 53 | 56.6 | 6.8 | 116.8 | 113 | -3.36 |
| 関 | | 57.1 | 58.6 | 2.62 | 59.2 | 63.3 | 6.9 | 103.5 | 108 | 5.3 |
| 変 | | 46.2 | 45 | -2.6 | 59.2 | 59 | -0.34 | 130.5 | 131 | -0.38 |
| 電 | 1/40 | 47.7 | 50 | -48.3 | 63.9 | 63 | -1.4 | 133.9 | 126 | -5.9 |
| 所 | | 58.1 | 60.4 | -3.96 | 66.3 | 72 | 8.6 | 114 | 119.5 | 4.8 |
| | 1/100 | 55.6 | 55 | -1.09 | 66.7 | 70 | 6.45 | 120 | 127.2 | 6 |
| | | 38.3 | 40 | -4.45 | 63.1 | 63.4 | 0.475 | 164.5 | 158.1 | -3.9 |
| 545 | 0.5/20 | 48.4 | 50 | 3.31 | 66.8 | 70 | 4.8 | 138.1 | 140 | 1.5 |
| <i>(</i> b) | | 58.3 | 58.5 | 0.33 | 76.1 | 73.3 | -4.2 | 130.5 | 125 | -4.23 |
| ~ | | 39.6 | 41 | 3.54 | 72.9 | 84 | 15.3 | 184 | 205 | 6 |
| 鉄 | 1/40 | 48.7 | 50.7 | 4.1 | 92 | 87 | -5.44 | 189 | 172 | -9 |
| 塔 | | 53.1 | 60.4 | 13.8 | 84.9 | 92 | 7.71 | 159.5 | 152 | -4.71 |
| - | 1/100 | 61.9 | 62 | 0.163 | 105.3 | 111 | 5.4 | 170 | 179.5 | 5.6 |

| 第71 | モ 神鋼変 | 電所側に | 避雷器を | 設置 | した | 場合 | の各 | 部電圧出 |
|-----|-------|------|------|----|----|----|----|------|
|-----|-------|------|------|----|----|----|----|------|

なお、これらの場合第7鉄塔側ケーブル端部の電圧波形をみる と, 避雷器の放電による負の波がこの点に到達した瞬間に電圧は 急激に低下している。したがって,避雷器の特性としては放電開 始電圧が重要であり、制限電圧が変化しても第7鉄塔側の電圧は ほとんど影響を受けない。

サージ解析器による測定結果もまた,実測値とかなり良く一致 している。この場合は模擬ケーブルとしてL, C形遅延線を使用 したのであるが、その減衰は実ケーブルにおけるよりも大きいに もかかわらず、下関変電所で逆せん絡した場合の実測値との差異 は ±7% 以内であった。これは避雷器動作状態を検討する際に

は避雷器の放電時の電圧を比較しているため、それに至るまでの 時間が短く,減衰があまり重要な役割を果していないためと考え られる。したがって,避雷器を接続しない状態での電圧様相を検 討するときには遅延ケーブルを用いる必要があるが, 避雷器動作 時の状態を検討する際には遅延線を使用しても十分であることが わかった。 次に,実測時とサージ解析器による測定の時とで避雷器の放電

立 評

論



日

| 逆せん絡 | 波 形 | $ E_a/E_i $ (%) | E | Ec/Ea (%) | | | | | | | |
|---------------|--------|------------------|------|-----------|------|-------|-------|-------|--|--|--|
| 地点 | (µs) | 実測値 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | 実測値 | 実験値 | 誤 差 | | | |
| | | 49.9 | 48.5 | 47 | -3.1 | 121.7 | 117 | -3.29 | | | |
| 下 | 0.5/20 | 45.4 | 53 | 52 | -1.9 | 116.8 | 114.5 | -2 | | | |
| 関 | | 57.1 | 59.2 | 62 | 4.7 | 103.5 | 109 | 5.3 | | | |
| 変 雷 | | 46.2 | 59.2 | 60 | 1.35 | 130.5 | 130 | -0.4 | | | |
| 所 | 1/40 | 47.7 | 63.9 | 61.5 | -3.8 | 133.9 | 128 | -4.4 | | | |
| 101 | | 58.1 | 66.3 | 69.5 | 4.8 | 114 | 121 | 6.1 | | | |

開始電圧を完全に一致させること は実際上できなかった。したがっ て,第7表に示した誤差にはこの 放電々圧の差異も含まれることと なるのでこの点を修正してみた。 まず,第7表の結果から放電開始 電圧と接続点電圧の関係を求めて 図示すると第15図のとおりとな る。この図をもととして放電開始 電圧をそろえ、 E_c/E_i 、 E_c/E_a の 値を換算すると第8表のとおりと なる。この修正の結果, 誤差はかな り減少してはいるが, まだ完全で はなく, これ以上は模擬回路自体 の問題すなわちインピーダンス, 線路長などの換算誤差あるいは読 取り誤差に起因しているものと判 断される。しかしながら,これら の解析にはきわめて困難な問題が

付随しており,後日改めて検討して報告したい。ただ,今回の実験における程度の各種定数,条件の不整に起因する誤差は±5%以下と考えてよいであろう。

印 Ei: 印加電圧

Ec: 接続点電圧

Ea: 避雷器放電開始電圧

第9表 架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置した場合 の各部電圧比(実測値)

| 逆せん絡点 | 波 形 (μs) | E_a/E_i (%) | E_T/E_i (%) | E_T/E_a (%) |
|-------|----------|---------------|---------------|---------------|
| | | 38.4 | 53.7 | 139.5 |
| | 0.5/20 | 47.4 | 57.1 | 120.5 |
| | | 55.9 | 63.4 | 113.0 |
| | | 40.1 | 58.3 | 145.2 |
| 下関変電所 | 1/40 | 49.5 | 68.5 | 138.1 |
| | | 57.0 | 75.1 | 131.5 |
| | | 39.9 | 57.5 | 143.0 |
| | 1/100 | 48.6 | 71.2 | 146.1 |
| | | 56.4 | 83.3 | 147.1 |
| | | 39.1 | 83.2 | 212.0 |
| | 0.5/20 | 49.7 | 91.5 | 184.0 |
| | | 56.2 | 92.7 | 167.5 |
| | | 40.3 | 88.3 | 219.0 |
| 第六鉄塔 | 1/40 | 52.8 | 100.4 | 191.0 |
| | | 51.2 | 108.9 | 213.0 |
| | | 36.1 | 66.5 | 184.5 |
| | 1/100 | 44.4 | 99.3 | 224.0 |
| | | 58.9 | 109.7 | 186.0 |

注 Ei: 印加電圧

5.3.3 架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置した場合

前述したように,架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置し た場合にはケーブル終端に設置した場合に比較して避雷器の放電 開始が遅れ,保護方式としては不利となることが予想される。こ の点を確認するため接続点に避雷器を設置した場合についても実 測を行った。

この結果は第9表に示すが、ケーブル終端に避雷器を設置した 場合の第7表の値と比較すれば過酷な条件となっていることが明 らかである。

この結果はケーブル終端に避雷器の設置が不可能である変圧器 直結ケーブル方式の場合には特にサージ保護についての検討が重 要であることを示している。

6. 保護法についての二三の検討

6.1 概 説

- 80 -----

前章までの実験によりサージ解析器の信頼度が確認できたので, 逆せん絡電圧波形が 1/40 µs の場合についてこの系統の保護に関す る若干の検討を行った。

まず,実系統では架空線の招弧角の衝撃放電々圧は 620 kV に設定されているが,このほかに招弧角なしでがい子7 個連の 50% せん絡電圧 695 kV の 10% 増しである 764 kV を逆せん絡電圧すなわち侵入電圧と考える。一方,避雷器は神鋼変電所側に日立 ODB-200 形が設置されることになっているが,参考までに ODB-110, 130 形が設置された場合についても考察する。

これらの条件を組み合わせて避雷器放電開始電圧と侵入電圧の比 を求めると第10表のとおりとなる。すなわち,多くの場合避雷器 の放電開始電圧と侵入サージ電圧との比率は40~60%の範囲内に 24

| E_a : | 避雷器放電開始電圧 |
|---------|------------|
| E_T : | ケーブル終端側の電圧 |

| | 第10表 避常 | 重器放電電圧と侵入 | 、電圧の比 |
|-----|---------|-----------|----------------|
| 招弧角 | 避雷器 | ODB-200 | ODB-110 130 |
| 無 | L | 44.0% | 49.1% |
| 有 | り | 49.1% | 60.5% |

あると考えて良いであろう。そこで、この比を 40、50、60% とした場合、避雷器の設置されていない架空線とケーブルの接続点にどのような電圧が発生するかを求めてみた。 なお、架空線逆せん絡では内部インピーダンスの非常に低い電源とみなせるので、逆せん絡地点より遠距離にある避雷器その他機器の影響はないと考えてよい。



第16図 接続点電圧に及ぼす避雷器放電電圧の影響



接続点電圧を100号 B.I.L.の比で示したものである。

これらの図から明らかなように,接続点近傍において逆せん絡し た場合にはきわめて過酷な状態となるので,接続点から少なくとも 1km 程度は十分に遮へいすることが重要である。また,招弧角によ り侵入電圧を抑制することが近接点での逆せん絡時に有効であり, さらに放電々圧の低い ODB-200 形避雷器の使用が非常に効果的で あることがわかる。避雷器放電々圧低減の効果は逆せん絡地点が接 続点からある程度離れたときに著しい。

しかしながら,招弧角などによるがい子せん絡電圧の低減は場合 により地絡事故のひん度を増加させ,1線地絡時の健全相の対地電 圧の上昇,1線地絡から3相短絡への事故の発展,中性点の問題あ るいは高速度再閉路方式の検討などの非常に重要な問題が付随して くるので,これに対する十分な検討を行うことが必要である。した がって,ここでは架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置しない 場合には招弧角などによりがい子のせん絡電圧を下げておくのもケ ーブルのサージ保護に関して一つの有効な対策になるというに止め る。

7. 結 言

架空線ケーブル接続系統で接続点近傍における逆せん絡を想定す るとケーブルにはかなり過酷な電圧が発生する可能性がある。した がって、ケーブル終端だけに避雷器を設置する場合には直撃雷に対

6.2 実験結果

実験結果を第16図に示す。また,第17図は架空線とケーブルの

する保護を十分考慮するとともに,接続点近傍における逆せん絡を 極力防止しなければならない。

また,招弧角などによるがい子せん絡電圧の低減,放電電圧の低 い避雷器の使用もケーブルのサージ保護に関してきわめて効果的で ある。一方,ケーブル両端に避雷器を設置することも一つの方法で あり⁽⁷⁾,これらの方法によって保護される必要のあることは明らか である。

参考文献

(1) H. G. Brinton, F. H. Buller, W. J. Rudge: T. A. I. E. E. 52, 121 (1933)

- (2) I. Herlitz, N. Knudsen: C. I. G. R. È. No. 324 (1952)
- (3) 渡辺: 昭和34 電気学会東京支部大会, 256 (昭34-11)
- (4) 橋本,渡辺,浜田,秋丸: 昭35 電四連大,817 (昭35-7)
- (5) 潮見, 大和, 橋本: 昭36連大, 912 (昭36-4)
- (6) 林: 電力, 37, 985 (昭 28-12)
- (7) G. Ban, P. Ignacz: C. I. G. R. E. No. 314 bis pt. II (1960)
- (8) 馬場,森本,岡田,永井:昭36 電四連大,841 (昭36-4)

| ② 敢 立 の | 計 測 技 | 術の | 進步 | : 12 | S | 1, | 7 | © H ∑ | Z R | AM- | -3 形力 | 次 射↑ | 生ダス | トモ | ニタの | り構 | 置と' | 実験約 | 吉果 |
|---|--------|-------|---------|-----------------|------|-------|--------|-------------------------|-------------|------|-------|-----------------------|-------------|-----------------------|------|-----|-----|------|----|
| ◎磁 気 変 | 調 方 | 式 記 | 録 計 | · の | 諸 | 特 | 性 | ©Χ | 線 | 7 1 | · _ | μŢ | アナ | ラ | イザ | と | そ | の応 | 厈 |
| ◎日立空気作動 | 訪調節計お | よびベロ | ーズ形 | 差圧爭 | è信器 | の特 | 性 | ◎磁 | 5 | xi | 共 | 鳴 | と | | そ | Ø | J | 心 | 月 |
| ◎電 子 式 流 | 量変換 | 器, 積 | 算 計 | およ | び調 | 前節 | 器 | ◎配 | 電力 | と 用 | 指示 | 電 | 気 計 | 器 | の空 | 戾 | 制 | 動 装 | 置 |
| ◎多 点 | 監 視 | 記錄 | 录 制 | 御 | ** | 表 | 置 | \bigcirc \checkmark | ン | ク | ц | ス | コ | | プ | の | 諸 | 問 | 題 |
| ◎空 気 分 | 離装 | 置) | 刊 ガ | ス | 分 | 析 | 計 | ◎遠 | 隔 | 測 | 定 | 装 | 置 | の | 最 | 近 | の | 傾 | 向 |
| ◎新 し | 6. | 自 | 動 | 分 | 析 | | 計 | Øタ | - | ビ | ン | 用 | 伸 | び | 差 | 計- | の | 改 | 良 |
| ◎最 近 | の日 | Ш. Г | ī 子 | 顕 | i. A | 銰 | 鏡 | | | | | | | | | | | | |
| | 発 | 行 所 | 日 | <u>.</u> | 評 | 刑田 | 命 社 | 東京 | 都千 | 代田 | 区丸の | 内1 | 丁目4 | 番」 | 也 | | | | |
| | HQ | 次庄 | 株式イ | ×壮 オ | | 1. 2- | 1 ま 店 | 振者 | 李 口 邦王 | 座 | 東京 | 7 全自用了 | 182 21 F | 4 1 | 督 | | | | |
| | 44 | | 11 11 2 | | | AL | L 百 /山 | 泉京 振 春 | ap 1 季 口 | 座 | 東 京 | ^{亚市叫} 」 2 | 001 | 1 日 1 1 1 | 督 | | | | |
| ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | ······ | ~~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~ | ~~~~~ | ~~~ | ~~~~ | ~~~ | ~~~ | ~~~~ | ~ |