

ケーブル直結型変圧器の諸問題

Problems Concerning Transformers Directly Connected to Cable

秋 丸 舜 二*
Shunji Akimaru

内 容 梗 概

ケーブル直結型変圧器は充電部分が露出しないため、地下発電所、屋内変電所などには、その建設費節減の点から非常に有利な方式であり、また塩害汚損対策としても好ましい手段である。

本稿はこの直結型のケーブルヘッドと変圧器との接続方法の二、三について説明するとともに、最も問題になるケーブル接続回路の衝撃電圧特性について考察し、変圧器の接続端子に生ずる電圧と架空線の遮蔽を必要とする範囲を検討した。

1. 緒 言

ブッシングの代わりにケーブルヘッドを直接変圧器外函内に挿入するケーブル直結型変圧器は、露出充電部分がまったくないので普通の変圧器に比べて外部の対地距離を極度に縮小することができる。したがって地下発電所、屋内変電所などにおいてはその建設費用の節減は大きく⁽¹⁾また塩害の多い場所にも適している。

諸外国においてはイタリアで1940年に135 kV OFケーブルとの直結型変圧器を初めて製作し、後1953年までに230 kVケーブルにおいて、45の実施例をあげている⁽²⁾。一方スウェーデンにおいても1948年に最初の220 kVケーブル、さらに1954年には、400 kVケーブルの直結を完成した。

このように諸外国においては、ケーブルの発達とともに直結方式の実績はかなり上っており、その経済性の有利な点が多く認められている。

わが国においても都市では60 kV乃至70 kV系統のケーブル回路が発達し、さらに140 kV系統にもケーブルが採用されつつある現状から、この直結方式も次第に利用されるものと期待される。

2. 構 造

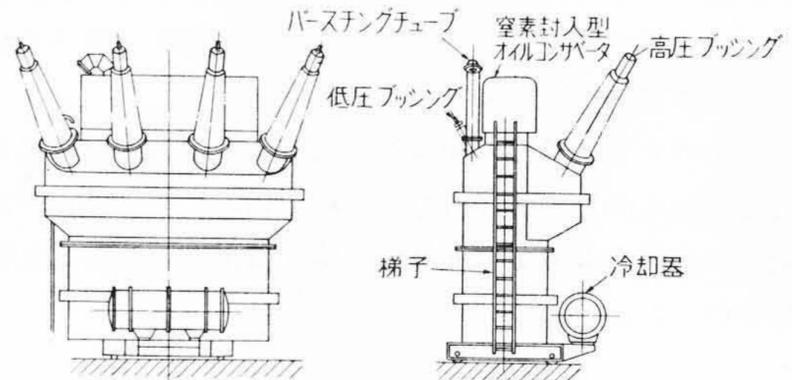
2.1 直結方式

変圧器とケーブルの直結法は次の二つに分類される。

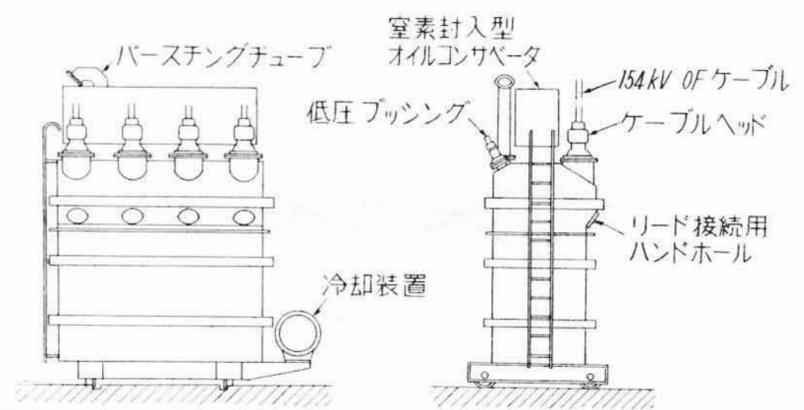
- (1) 変圧器のブッシングを廃止して、ケーブルヘッドを直接変圧器巻線に接続する方法(第1図(b))
 - (2) 変圧器に外函貫通用ブッシングを設け、ケーブルヘッドと中間接続箱内で接続する方法(第1図(c))
- (1)の方法は多くは60 kV以下のソリッドケーブルに用いられ、気中用ケーブルヘッドがそのまま直結に使用されることがある。

60 kV以上には通常(2)の方式が採用され、多くはOFケーブルで400 kVの高電圧にまで及んでいる。

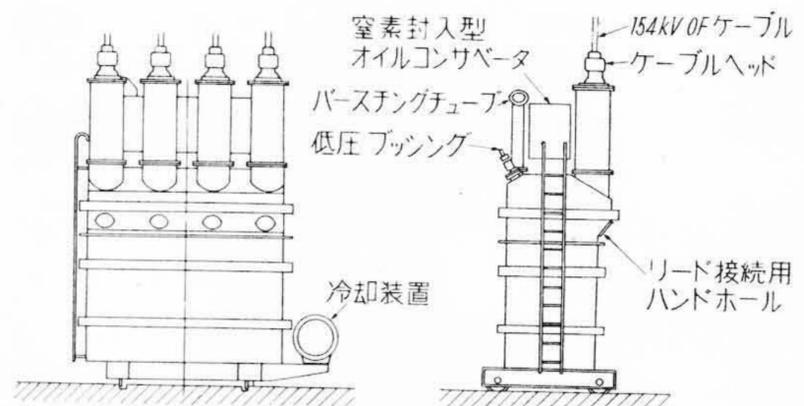
* 日立製作所国分工場



第1図(a) 変圧器外形図
普通型変圧器

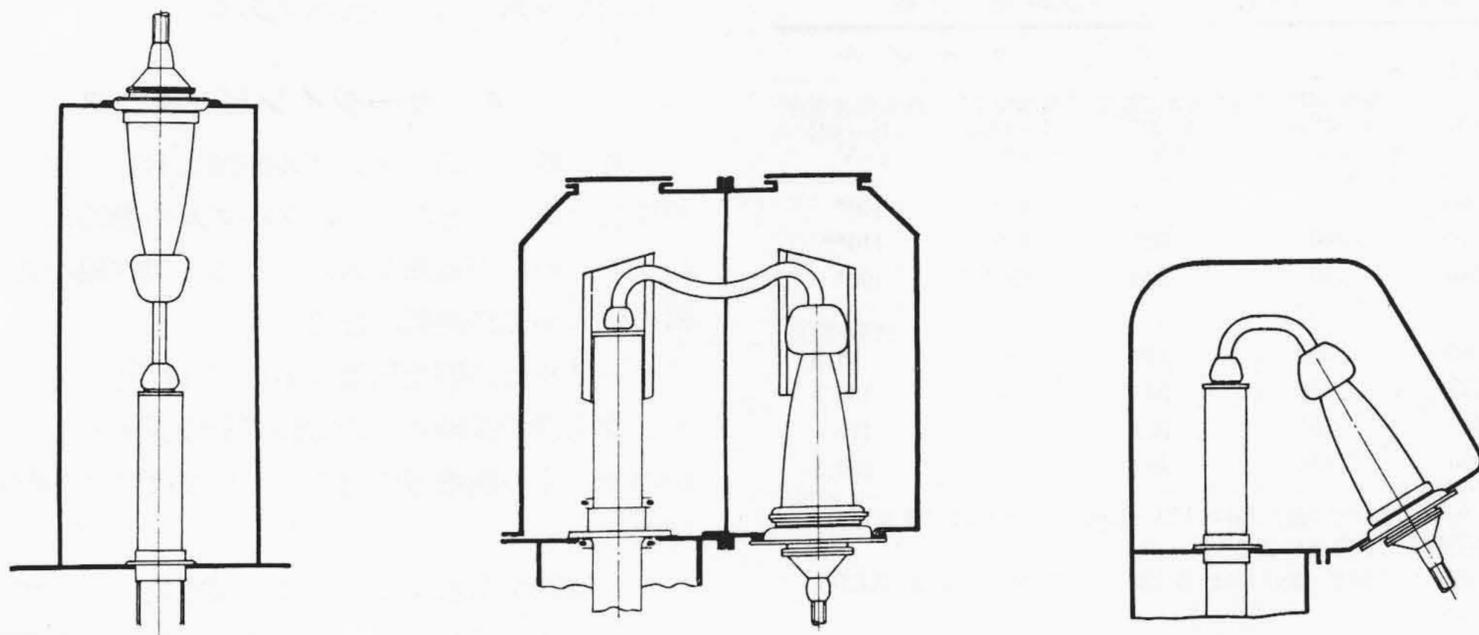


第1図(b) 変圧器外形図
ケーブルを直接巻線に接続する方式



第1図(c) 変圧器外形図
ケーブルと巻線間に油浸ブッシングを入れる方式

(2)の方式が多く採用される理由は、変圧器とケーブル回路の分離の簡易化、ケーブルヘッド取付作業の容易性、変圧器油温がケーブルヘッドへ及ぼす影響の防



(a) 油浸ブッシングとケーブルヘッドが同一直線上に配置される方式

(b) 油浸ブッシングとケーブルヘッドが並行に配置される方式

(c) 油浸ブッシングとケーブルヘッドがある角度に配置される方式

第2図 ケーブルヘッドと油浸ブッシング取付方式

止、事故の相互波及の防止などの技術面ばかりでなく変圧器製造者とケーブル製造者との責任の限界を明確にするためである。

2.2 直結型ケーブルヘッドの電気的特性

直結型ケーブルヘッドは絶縁油中にあるため、気中ケーブルヘッドと異なり、塵埃、塩分などによる汚染がなく、高い絶縁性能が維持されるが、接続箱内のブッシングとケーブルヘッドの配置の仕方によつては、取付金具に近い部分のブッシング表面の電界強度を増加せしめることがあるから、十分注意しなければならない。

電圧が高くなるとケーブルヘッドと変圧器ブッシングの頭部を遮蔽する必要が生じてくるが、ケーブルヘッドの取付作業を考慮して、両者をそれぞれ別個に遮蔽し、可撓導体で接続する構造が採用される。

2.3 変圧器ブッシングと直結ケーブルヘッドの配置ならびに接続

この両者の相互配置は、その変圧器の設置場所により制約をうけ、種々の形態をとるが、大別して次の3種類となる。

- (1) 両者が同一直線上にある場合 第2図(a)
- (2) 両者が並行に取り付けられる場合 第2図(b)
- (3) 両者が(a), (b)の中間の位置に取り付けられる場合 第2図(c)

これらを接続箱内の電界分布や、空間の利用度から考えると

(1)はケーブルが上部からくる場合に適し、接続箱内の電界分布に対しブッシングと直結ケーブルヘッドが相互に影響を与えないので、3種類中では最も条件がよい。

(2)はケーブルヘッドが変圧器下部から挿入される場合に多く用いられ、ケーブルヘッドとしても好ましい姿

で空間の節約も大きい。直結ケーブルヘッドとブッシングが、相互に電界に影響を及ぼさないように、電氣的に遮蔽されている場合は(1)と同様になるが、絶縁油中で単に並行に並ぶときは、2.2に述べたように接続箱取付部の電界集中に注意しなければならない。

(3)は中間の状態である。

2.4 接続箱内の絶縁油の冷却

接続箱の油温を下げることは、ケーブル劣化を防ぐばかりでなく、鉛被の疲労を少なくする点からも重要である。

したがって温度上昇許容限度の高い変圧器油温の影響を避けるために通常接続箱内の絶縁油と変圧器本体の絶縁油とは隔離されているが、さらに接続箱自体に冷却装置をつけることもある。

2.5 振動

変圧器の振動によるケーブル鉛被の疲労、油密部分からの洩油防止のため取付部分の防振構造には、特に注意しなければならない。このために、ケーブルヘッドを変圧器外の構造物より支持し、ケーブルヘッドと接続箱との取付に可撓性をもたせる方式もある。

3. 直結型変圧器の試験

直結型変圧器においては変圧器単独で完全な試験を行うことが困難な場合があり、またケーブルと変圧器の試験電圧、印加時間も異なるので完成時の試験については次の点を考慮しなければならない。

3.1 試験電圧

変圧器とケーブルの試験電圧の一例を第1表に示す。表から明らかなように、商用周波試験電圧印加時間が異なるが、これを Montinger 氏の示す次式⁽⁴⁾で1分間に換算した場合を第2表に示す。

第 1 表 変圧器, ケーブル試験電圧比較

| | 回路電圧 (kV) | 変 圧 器 | | ケ ー ブ ル | |
|---|--------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 衝撃電圧 (1×40μs) (kV) | 商用周波電圧 (1分間) (kV) | 衝撃電圧 (1×40μs) (kV) | 商用周波電圧 (10分間) (kV) |
| A | 60 | 350 | 140 | 450* | 100* |
| | 70 | 400 | 160 | 480** | 110** |
| | 140 | 750 | 320 | 850* | 190* |
| B | 69 | 350 | 140 | — | (15分間) 85.5 |
| | 115 | 550 | 230 | — | 130.5 |
| | 161 | 750 | 325 | — | 177 |
| | 230 | 1,050 | 460 | — | 250.5 |

A: 日本における例 (変圧器は JEC-120, ケーブルは *東京電力, **関西電力, 規格による)

B: 米国における例 (変圧器は ASAC 57.11 ケーブルは AEIC による)

第 2 表 変圧器ケーブル商用周波試験電圧比較
(1分間試験電圧に換算した値)

| | 回路電圧 (kV) | 変 圧 器 a | ケ ー ブ ル *b | a/b |
|---|--------------|------------|---------------|------|
| A | 60 | 140 | 117 | 1.2 |
| | 70 | 160 | 128 | 1.25 |
| | 140 | 320 | 220 | 1.45 |
| B | 69 | 140 | 102 | 1.37 |
| | 115 | 230 | 155 | 1.48 |
| | 161 | 325 | 210 | 1.55 |
| | 230 | 460 | 298 | 1.54 |

$$* Rt = a + \frac{1-a}{\sqrt{T}} \quad a=0.675$$

$$Rt = a + \frac{1-a}{\sqrt{T}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに Rt: 絶縁耐力の比

a: 材料により定まる定数

固体絶縁物および絶縁油では 0.5~0.675

T: 印加時間 (min)

第 1, 2 表によれば, 変圧器とケーブルでは試験電圧値には相当な差があるが, ケーブルは短尺の試料で必ず破壊値を求めているので, ケーブルを直結した状態で試験を行う場合は, 変圧器の試験電圧を印加することが望ましい。

3.2 試験方法

直結型変圧器の耐压試験を行う場合は, 次のいずれかの方法によらねばならない。

(1) 試験用ケーブルヘッドを用いる方法

この方法によれば一般の変圧器と同様に耐压試験が実施できる。

(2) 試験の時ブッシングを取り付ける方法

この方法では変圧器製作工場において変圧器単独に試験を行うことができるが, ブッシングを取り付けるために変圧器の構造が制約され直結型変圧器としての

特長が削減されるおそれがある。

4. サージインピーダンス

一般に低圧の地中ケーブル回路においては外雷の侵入の機会ほとんどないが, ケーブルの発達により超高圧にまでその使用範囲が広げられると架空線を通しての外雷の侵入が当然問題になる。

ケーブル直結型変圧器においては構造上, そのケーブルと変圧器の接続点に避雷装置を設置することができないので, その衝撃電圧特性については特に考慮しなければならない。

この特性を左右するものは, 架空線, ケーブル, 変圧器などのサージインピーダンス, 雷撃点から架空線とケーブル接続点までの距離, ケーブルの長さ, ケーブル中の衝撃電圧の減衰特性, 衝撃電圧波形など多くの要素がありアナログ計算機による解析結果⁽⁵⁾も発表されているが, 数学的解析によつても相当精度の高い結果⁽⁶⁾がえられ, それに現地試験によるデータも加味して精度を向上せしめた報告⁽⁷⁾もある。

進行波は, 各サージインピーダンスの不連続点で反射透過現象を生ずるので, 衝撃特性について述べる前に, 各回路のサージインピーダンスならびに反射透過現象について説明する。

4.1 架空線の特性

普通の架空線においては通常次のようにいわれている。

自己サージインピーダンス(Z) 500Ω

相互サージインピーダンス(Z¹) 80Ω

また各線の自己および相互サージインピーダンスが等しければ, n本一括並列としたときの合成サージインピーダンス Z_{on} は

$$Z_{on} = \frac{Z + (n-1)Z^1}{n} \dots \dots \dots (2)$$

3線一括の例では Z_{on} は 227Ω となる。

また伝播速度は導体を往路および復路とするとき

300m/μs

大地を帰路とするとき 250~290m/μs

となる。

4.2 ケーブルの特性

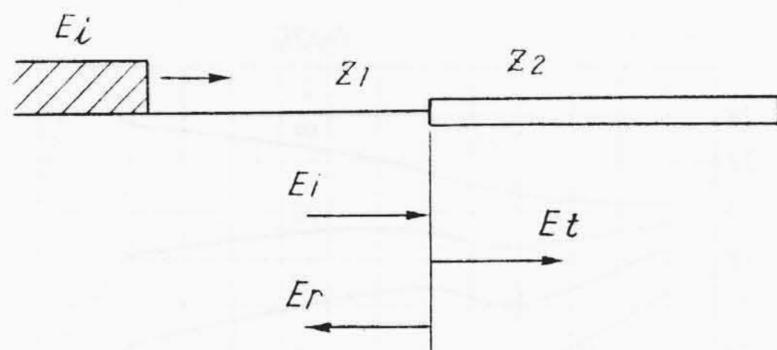
ケーブルのサージインピーダンス Z_c は次式で与えられる。

$$Z_c = 3.3 \frac{\sqrt{\epsilon}}{C} \Omega \dots \dots \dots (3)$$

ε: 絶縁材料の誘電率 2~4

C: 心線と鉛被間の静電容量 μF/km

伝播速度は



反射透過

第3図 進行波のサージインピーダンス不連続点での反射、透過現象

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに V_0 : 光速 $300\text{m}/\mu\text{s}$
したがって V は $210\sim 150\text{m}/\mu\text{s}$ 程度である。

4.3 変圧器の特性

変圧器は上記回路と異なり、その形態が複雑であり、簡単な計算にはのらないが、理論式として次式⁽⁸⁾がある。

$$Z = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{\frac{L}{Cg + Cw 4\pi^2 n^2}} \dots \dots \dots (5)$$

- ただし n : 巻線長と波長の比
- L : 洩漏インダクタンス (H)
- Cg : 巻線の対地静電容量 (F)
- Cw : 巻線の直列静電容量 (F)

中性点接地の場合 $n = \frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2} \dots \dots \frac{m}{2}$ m : 整数

中性点開放の場合 $n = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4} \dots \dots \frac{m}{2}$ m : 奇数

また巻線内部の進行波の伝播速度は $100\sim 150\text{m}/\mu\text{s}$ である。

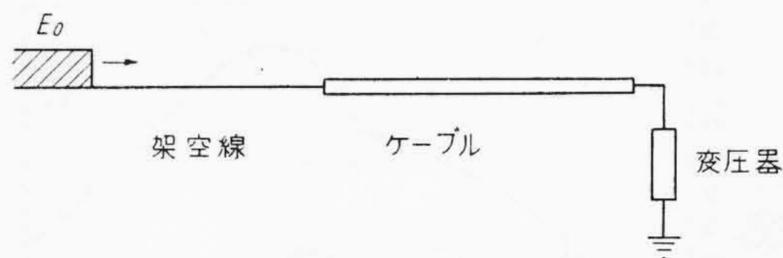
4.4 反射透過

第3図のような回路では、反射係数、透過係数は次式で与えられる。

$$\text{反射係数} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = z \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{透過係数} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} = 1 + z \dots \dots \dots (7)$$

ここに E_i : 到来波 E_t : 透過波 E_r : 反射波
これから述べる現象中、ケーブルから変圧器への透過係数および反射係数は、それぞれほとんど2および1に近くケーブル終端開放の場合と考えてよい。



第4図 基本系統構成

5. 衝撃電圧特性

5.1 架空線とケーブルの接続点に避雷器のない場合

架空線よりケーブルに進行波が入ると、そのサージインピーダンスの相異により透過係数は $0.1\sim 0.2$ の低い値となり、たとえこれが変圧器端子で2倍にはねあがっても $0.2\sim 0.4$ という値にしかならないが反射波の重畳ではるかに高い値となる。

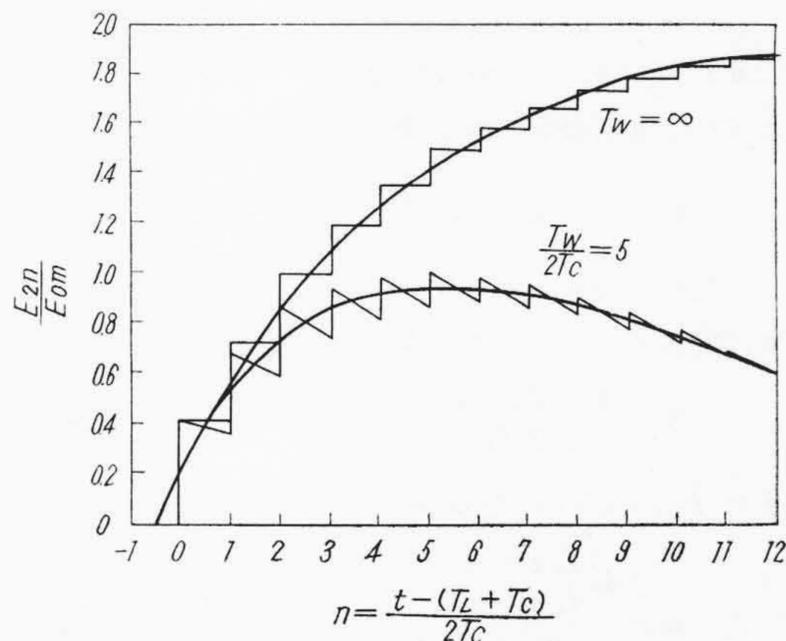
(1) 雷撃点が遠くてその点とケーブル接続点との間の反射往復を考慮しなくてよい場合

これは最も簡単で、第4図のように進行波の侵入してきたとき、次のように計算される。

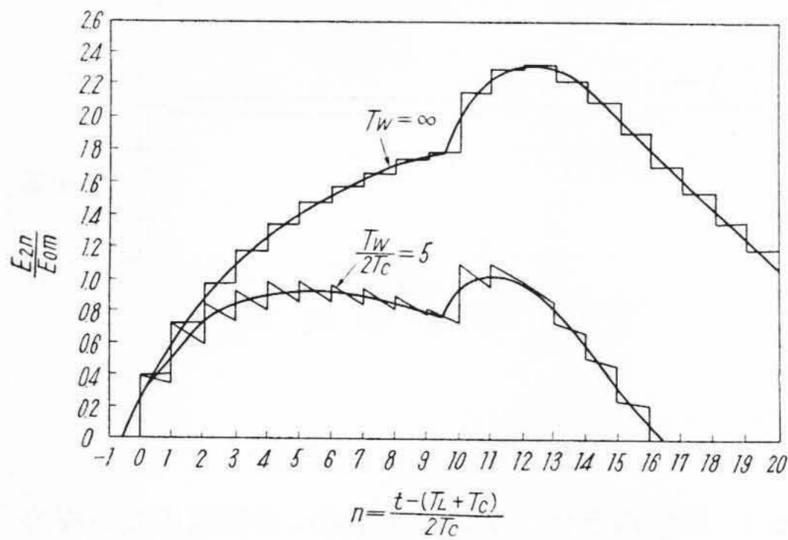
- Z_L : 架空線のサージインピーダンス
- T_L : 進行波が架空線を通過するに要する時間
- Z_C : ケーブルのサージインピーダンス
- T_C : 進行波がケーブルを通過するに要する時間
- E_0 : $E_{0m} \epsilon^{-\alpha t}$ 侵入電圧: 波形が $0 \times 40 \mu\text{s}$ なるときは $\alpha = 0.0173$
- E_{0m} : 最高電圧
- $a = \epsilon^{-2\alpha T_C}$ $2T_C$ 間の進行波の減衰

$T_w = \frac{1}{\alpha} \ln 2$ 波尾: 波高値の1/2になるまでの時間とする

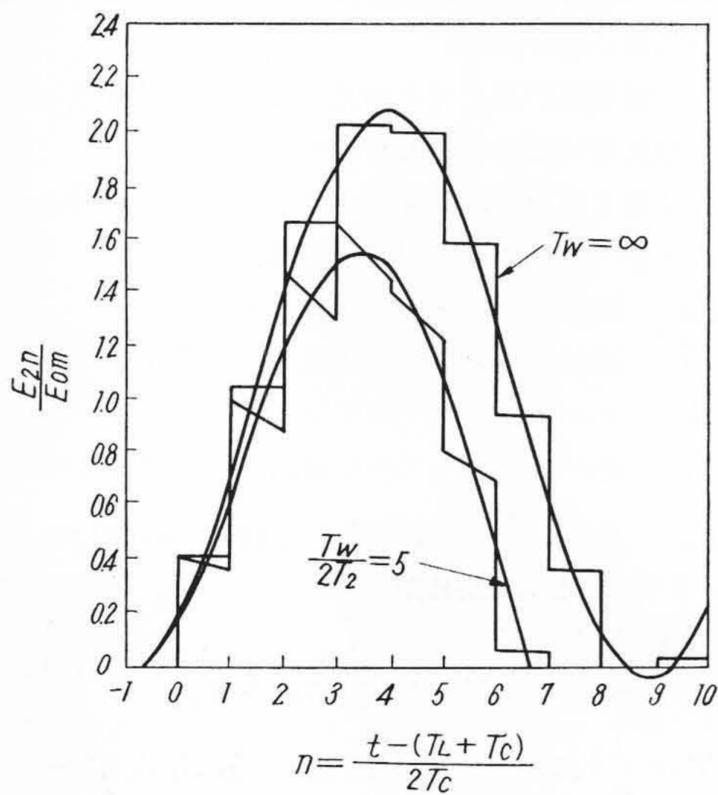
$$z = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \text{ ケーブルから架空線への反射係数}$$



第5図(a) 変圧器端における進行波のケーブル内反射による電圧上昇 (避雷器なし、雷撃点との反射往復を考慮せず)



第5図(b) 変圧器端における進行波のケーブル内反射による電圧上昇
(避雷器なし, 雷撃点との反射を含む)
 $T_L > T_C$



第5図(c) 変圧器端における進行波のケーブル内反射による電圧上昇
(避雷器なし, 雷撃点との反射を含む)
 $(T_L = T_C)$

n : 変圧器端での反射回数

とすれば変圧器端の電圧 E_{2n} は

$$E_{2n} = 2E_{0m}(1-z) \frac{a^{n+1} - z^{n+1}}{a-z} \dots\dots\dots (8)$$

ただし $a \neq z$

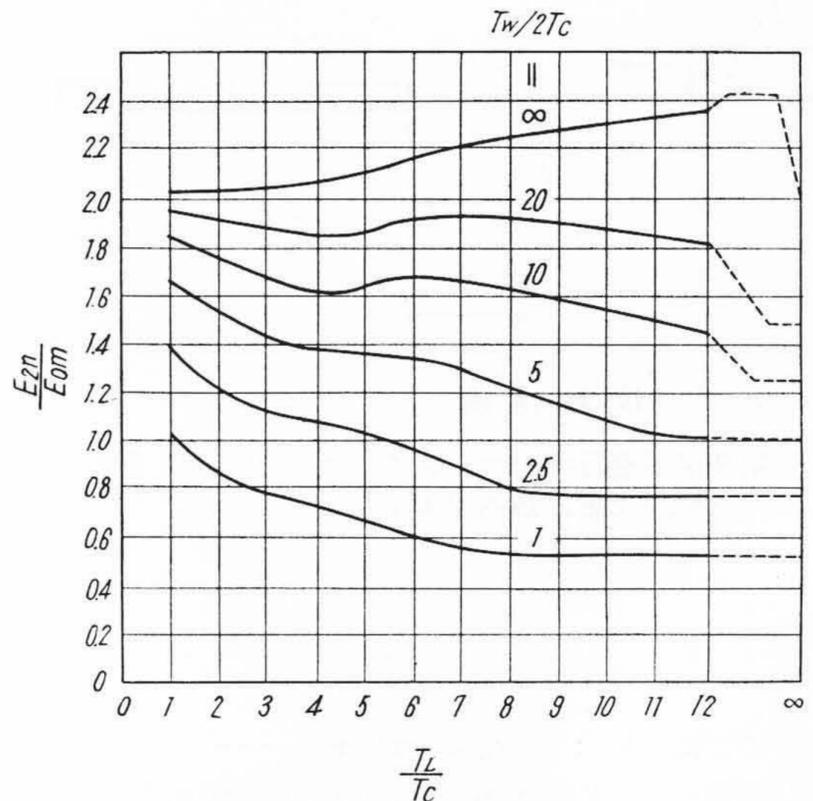
n は整数で それまでの時間との関係は

$$n = \frac{t - (T_L + T_C)}{2T_C} \dots\dots\dots (9)$$

また E_{2n} が最大になる n の値は

$$n = \frac{l_n \frac{l_n z}{l_n a}}{l_n \frac{a}{z}} - 1 \dots\dots\dots (10)$$

一方 架空線端の電圧 E_{1n} は



第6図 変圧器端に生ずる電圧上昇に及ぼす波形ケーブル長, 雷撃点からの距離の影響

$$E_{1n} = \frac{1}{2} (E_{2(n-1)} + E_{2n}) = E_{0m} \frac{1-z}{a-z} \{ a^n(a+1) - z^n(z+1) \} \dots\dots\dots (11)$$

$$n = \frac{t - T_L}{2T_L} \dots\dots\dots (12)$$

E_{1n} が最大になる n の値は

$$n = \frac{l_n \left\{ \frac{z+1}{a+1} \cdot \frac{l_n z}{l_n a} \right\}}{l_n \frac{a}{z}} \dots\dots\dots (13)$$

計算の一例を第5図(a)に示す。

(2) 雷撃点との反射往復を考慮する場合

架空線の遮蔽が十分でなく, ケーブル接続点の近くに雷撃をうけた場合, ケーブル接続点で反射された進行波は雷撃点にてふたたび反射して先の進行波に重畳する。この問題については, I. Herlitz 氏および N. Knudsen 氏⁽⁹⁾ によつて計算され, その結果は次式で与えられる。

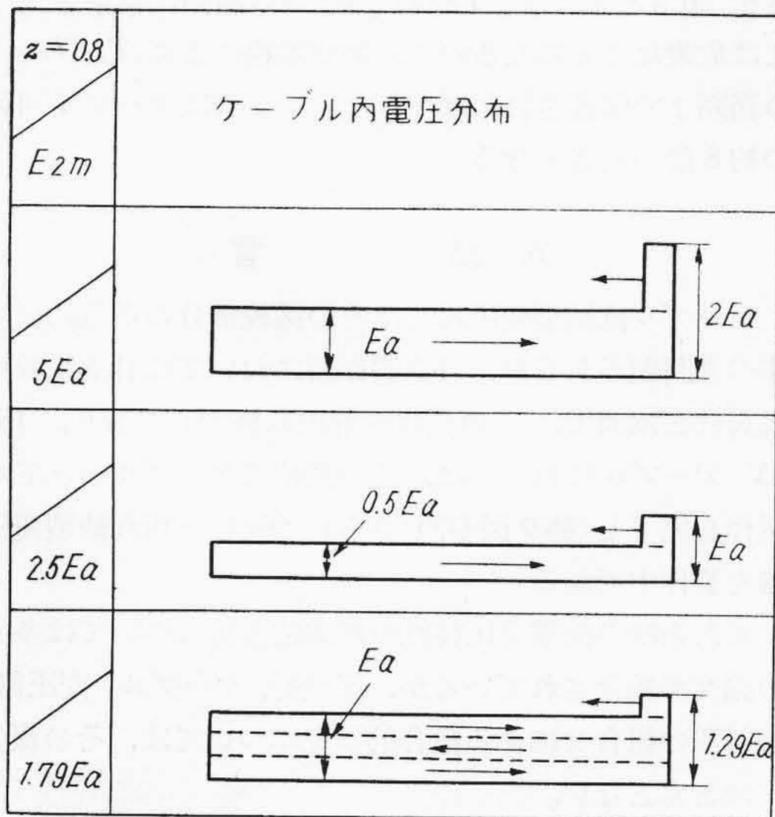
$$E_{2n} = \frac{E_{0m}}{\cosh p T_L \cosh p T_C + \frac{Z_L}{Z_C} \sinh p T_L \sinh p T_C} \dots\dots\dots (14)$$

E_{2n} : 変圧器端の電圧

E_{0m} : 侵入電圧

p : 伝播定数

この式において, T_L と T_C は対称であるから, これらを入れ換えても解は同一である。したがつて $T_L > T_C$ および $T_L = T_C$ の場合については次のように表わされる。



第7図 避雷器設置の場合のケーブル内電圧上昇説明図

$T_L > T_C$

$$\left. \begin{aligned}
 E_{2n} &= 2(1-z) E_{0m} \varepsilon^{-p(T_L+T_C)} (A_0 + A_1 \varepsilon^{-2pT_L} + A_2 \varepsilon^{-4pT_L} + \dots) \\
 A_0 &= 1 + z \cdot \varepsilon^{-2pT_C} + z^2 \cdot \varepsilon^{-4pT_C} + \dots \\
 A_1 &= z + (2z^2 - 1) \varepsilon^{-2pT_C} + (3z^3 - 2z) \varepsilon^{-4pT_C} + \dots \\
 A_2 &= z^2 + (3z^3 - 2z) \varepsilon^{-2pT_C} + (6z^4 - 6z^2 + 1) \varepsilon^{-4pT_C} + \dots
 \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

第5図(b)にこの一例を示す。

$T_L = T_C$

$$E_{2n} = E_{0m} - \sum \frac{2(1-z) E_{0m}}{(\beta + 2n\pi) \sin(\beta + 2n\pi)} \cos(\beta + 2n\pi) \frac{t}{2T_C} \dots (16)$$

$$\cos \beta = z \quad \beta \text{は } 0 \sim \frac{\pi}{2}, \quad n \text{ は整数}$$

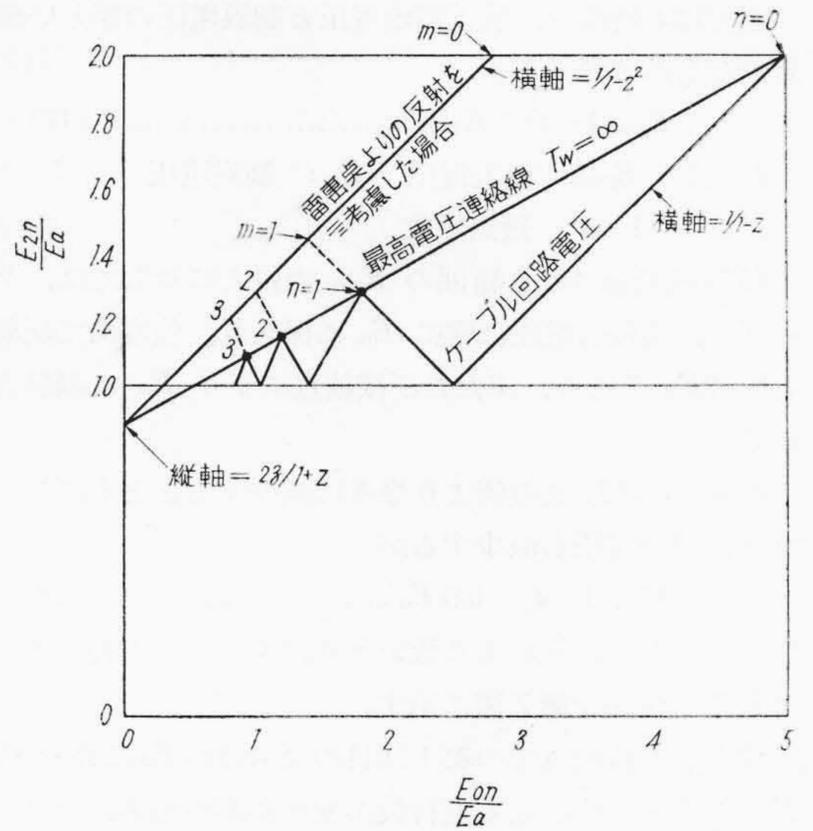
第5図(c)に一例を示す。

第6図は、 T_L/T_C と、 $T_w/2T_C$ によつて変圧器端の電圧がいかに変化するかを示したもので、これによつて、架空線の遮蔽すべき範囲が計算される。

5.2 架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置する場合

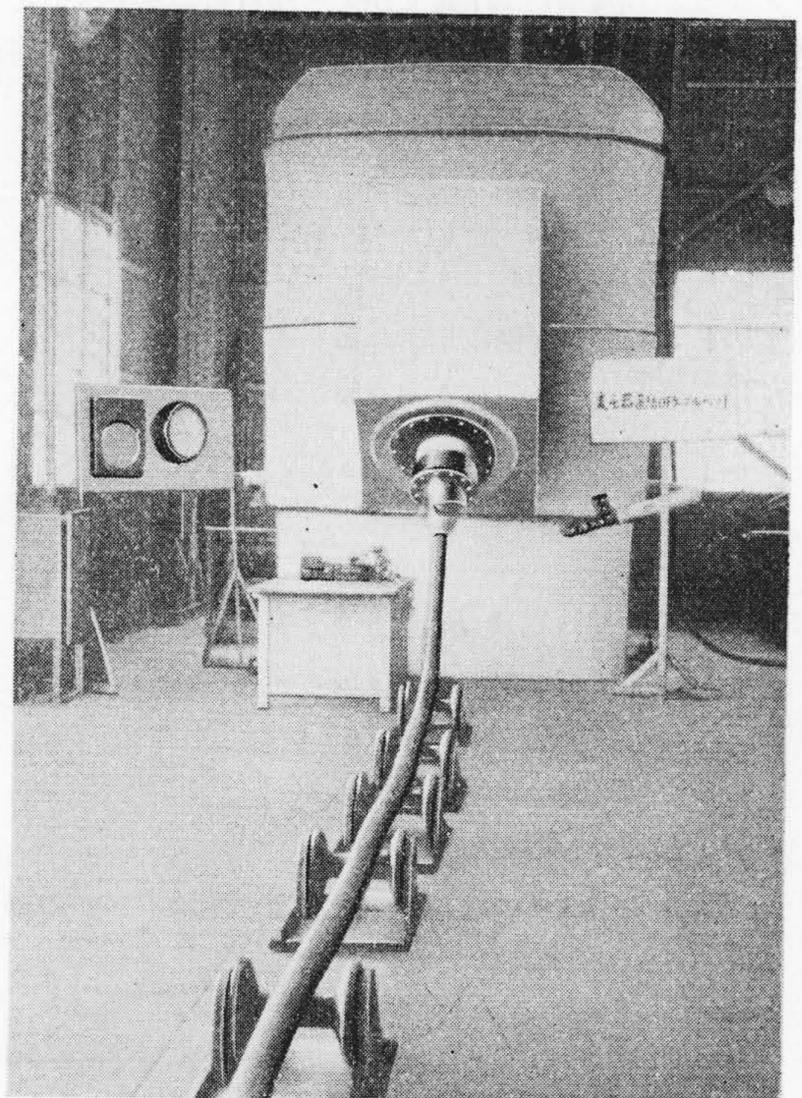
ケーブル回路両端の往復反射を考えると、波尾の長い進行波では、相当な電圧に達することもあるので避雷器を設置して保護する必要が生ずる。

(1) 雷撃点が遠くて、その点とケーブル接続点との間の反射往復を考慮しなくてよい場合



n : ケーブルと架空線との接続点での反射回数
 $m = T_L/T_C$
 $z = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C}$
 この例では $z = 0.8$

第8図 避雷器によるケーブル回路電圧抑制計算図



第9図 154 kV 直結式ケーブルヘッド試験状況

避雷器の特性を、放電開始電圧と制限電圧の等しい理想的なものと考え、

$$E_{0m}(1-z) \geq E_a \dots\dots\dots (17)$$

ただし E_{0m} : 侵入電圧 E_a : 制限電圧
 $1-z$: 透過係数

(17)式で示される範囲の E_{0m} の侵入に対しては、ケーブル回路侵入電圧は常に E_a に保たれ、他端にて反射して $2E_a$ となり、ふたたび接続点に至り E_a に制限される。

E_{0m} が (17) 式の値より徐々に減少するとともにケーブル回路の電圧も減少するが

$$E_{0m}(1-z) = 0.5 E_a \dots\dots\dots (18)$$

を境にして、それより低いときはふたたび上昇する。これらの関係を第 7 図に示す。

すなわち接続点での第 1 回目の反射波が E_a に達せず、 $E_a - 2(1-z)E_{0m}$ なる進行波が変圧器端へ進み、そこで反射して、 $E_a + \{E_a - 2(1-z)E_{0m}\}$ となりこの値は E_{0m} の減少とともに上昇する。その限界は、

$$E_{0m} = \frac{E_a}{(2+z)(1-z)} \dots\dots\dots (19)$$

で、その時の変圧器端の電圧 E_{2n} は

$$E_{2n} = \frac{2(1+z)}{2+z} E_a \dots\dots\dots (20)$$

となる。 E_{0m} が (19) 式で与えられる値より小さいときはふたたび減少するが、第 2, 3 回の反射によつて同様なことが繰り返される。

一般に最高電圧は

$$\frac{E_{2n}}{E_a} = \frac{2z}{1+z} + \frac{2(1-z)}{1+z} \cdot \frac{E_{0m}}{E_a} \dots\dots\dots (21)$$

で表わされ、第 8 図に示される。

(2) 雷撃点からの反射を考慮する場合
 $T_L/T_C = m$ とすれば

$$E_{2n} = 2E_{0n} (1-z) \frac{a^{m+1} - z^{m+1}}{a-z} + 2Er \dots\dots\dots (22)$$

$$Er \leq z(1-z)E_{0n}$$

ただし Er は雷撃点よりの反射波

$$\frac{E_{2n}}{E_a} = \frac{2z}{1+z} + 2(1-z) \frac{E_{0n}}{E_a} \dots\dots\dots (23)$$

これも第 8 図に示す。

今、避雷器の保護絶縁レベルと機器の絶縁レベルの裕

度を 20% とすれば、 $T_L/T_C = 0 \sim 3$ の範囲は雷撃を受けては危険なことになるので、架空地線により $T_L/T_C = 4$ の範囲まで保護されねばならない。これはケーブル回路の約 8 倍の長さとなる。

6. 結 言

ケーブル直結型変圧器ではその接続部分の構造に研究すべき問題があるが、日立製作所においては日立電線株式会社と協同で、その具体的解決に努力しており、154 kV ケーブルにおいては、その直結式ケーブルヘッドの試作を完了し(第 9 図参照)さらに 66kV 三相直結型変圧器を製作中である。

また系統の衝撃電圧特性の理論的解析については多くの論文が紹介されているが、架空線、ケーブル、変圧器、避雷器の組合せによる総合的研究については、その報告がほとんどない。

われわれは日立製作所日立研究所、日立電線株式会社と協同してこれらの総合的研究を進めており、近くこれらの実験結果の詳細な報告が提出されるはずである。

参 考 文 献

- (1) Giovanni Di Vito; Transformers with cable connected high tension terminals for use in underground power stations CIGRE No.121 (1952)
- (2) P. G. Priaroggia: Sealing ends for high voltage cables to be connected direct to transformers or switchgear: CIGRE No.205(1954)
- (3) E. Stenkvis, B Bjurstrom: Built-on cable terminals for 400-kV transformers: Electirc light and power March 25, 1956
- (4) L. F. Blume: Transformer engineering Chapter XV (1951)
- (5) R. L. Witzke, T. J. Bliss; Surge protection of cable connected equipment: TAIEE. Vol 69 1950
- (6) H. G. Brinton F. H. Buller, W. J. Rudge: Traveling wave voltages in cables: TAIEE Vol 52 1933
- (7) W. W. Valentine, J. K. Dillard, J. M. Clayton: Surge attenuation in Power Cables: TAIEE Vol 74 1955
- (8) Surge phenomena-Seven years' research for the central electricity board(1933-1940) part III chap 12
- (9) Iven Herlitz, Niele Knudsen: Surge protection of electric equipment connected to overhead lines through cable: CIGRE 324(1952)