

変圧器直結 66 kV 3心 OF ケーブル

66 kV 3-Core OF Cable to be Connected Directly to Transformer

橋本 博治* 渡辺 靖明*
Hiroji Hashimoto Yasuaki Watanabe

浜田 義雄* 秋丸 舜二**
Yoshio Hamada Shunji Akimaru

内 容 梗 概

ケーブル終端箱を直接変圧器に挿入するいわゆる変圧器直結ケーブル方式は種々の利点を有するため、海外において古くから実用されわが国でも最近関心の高まっているものである。本稿はこの直結方式の概要ならびに予想される技術的問題点に対して日立電線株式会社が行っている各種の実験研究状況を述べ、終りに最近完成した自家工場受電用 66 kV 4,300 kVA 変圧器に直結したケーブル終端箱の設計上の諸問題、耐電圧試験結果などを報告したものである。

1. 緒 言

電力ケーブルによって電力の需給を行う場合、従来は変圧器など電力機器の近くにケーブル終端箱を設置し、これら機器との間を裸線によって接続する方式が採用されていた。この方式はもちろん今後も採用されてゆくであろうが、ケーブル終端を気中に露出させずに直接変圧器に接続する方法が用いられるようになった^{(1)~(3)}。これが変圧器直結ケーブル方式である。

この直結方式は 1940 年ころから実用され始め、その後主にヨーロッパにおいて発達してきたものでありスウェーデンにおいてはすでに 425 kV まで布設されたことが報告されている⁽³⁾。一方わが国においても最近本方式採用の機運が高まっており今後広範囲に採用されるものと考えられるが、その経済的、技術的特長は以下のとおりである。

(1) 空間利用率の向上

たとえば地下発電所、ビル内変電所などに変圧器が設置される場合には高電圧の露出した部分、いわゆる生きた部分がなくなるため絶縁に要する空間を必要としなくなり、従来の方式の約 40% 程度の空間に収容することが可能である。

(2) 塩害の防止

高電圧部分は直接大気に触れることはないので海岸付近における碍子の塩害、あるいは都会における塵埃による碍子の汚損を防止する手段としても有効である。

(3) 保守上の安全性

高電圧の露出部分がないため保守上もまったく安全である。

(4) 送電容量の増加

地下発電所などでは発電機の近くに主変圧器を設置することが容易なためリアクタンスが減少し送電容量の増

大が期待できる。

変圧器とケーブルの接続方式としては変圧器本体に接して中間箱を設けこの中でケーブル終端箱と変圧器ブッシングとを接続する間接形と中間箱を設けずに直接ケーブル終端箱と変圧器巻線とを接続する直接形とがあり、おのおの一長一短を有するのであるが、いずれにせよ本直結方式の実用化に当っては数多くの技術的問題が残されている。特にケーブルが変圧器に直接接続されるという点で変圧器あるいはケーブル製造業者単独では解決しにくい問題が多い。たとえば使用温度、耐電圧など従来の変圧器とケーブルとでは設計標準に不一致があることなどその一例である。幸いにも日立電線と日立製作所とは密接な関係にあるのでこれらの問題の解決には有利である。本稿においてはこの直結方式の実用化に当って問題となった諸問題およびその検討結果、さらに日立電線株式会社電線工場の受電用 66 kV 4,300 kVA 変圧器に実用した結果について報告する。

2. 予想される技術的問題点

日立電線株式会社においては上記した直結方式の利点にいち早く着目し、日立製作所変圧器部門との連絡のもとに 3 年前から実験研究を企画し現在も継続して行っているが、われわれがこの方式を実現するに当って綿密な調査を行い問題点として予想した主な諸点は次のとおりである。

2.1 使用温度

変圧器油の許容温度は 90°C であるがこの中にケーブルヘッドを設置して通電した場合、ケーブルヘッド部分のケーブル導体温度は許容温度の 80°C を上回る異常な温度にまで上昇する可能性がある。もちろんケーブルヘッドに許される温度は絶縁体の劣化状態との関連において決める必要があるが、従来の実績による 80°C をこえない方が望ましい。この温度基準および実際のケーブルヘッド周辺の変圧器油冷却方式に設計上の問題がある。

* 日立電線株式会社電線工場

** 日立製作所国分工場

2.2 変圧器の振動による鉛被の疲労

変圧器鉄心の磁歪振動あるいは巻線の電磁力に起因する 100 または 120 c/s の振動が変圧器ケースからケーブルに伝播しケーブル鉛被あるいは鉛工部が疲労破壊をおこす危険性がある。この点に関する対策としては変圧器とケーブルヘッドとの接続を可撓的に行い振動の伝達を防止する装置などが考慮されているが、ケーブルの振動特性ならびにケーブル鉛被の疲労限との関連において種々検討する必要がある。

2.3 絶縁設計

直結ケーブルヘッドの特質上、変圧器との接続部を極力縮少することが望ましく、このため油中ケーブルヘッドの小形化が要求される。油中碍子表面の閃絡距離は気中の場合に比して縮少することはもちろん可能であるが碍子内部ケーブル端末の絶縁距離をどの程度縮少可能であるかの問題は、電界分布とあわせ考えて検討する必要がある。

2.4 系統のサージに対する保護

直結方式では架空線—ケーブル—変圧器という系統においてケーブルと変圧器との接続点に避雷器を設置することが不可能である。したがって架空線とケーブルの接続点に避雷器を設置することとなり、雷サージに対して十分な保護が可能かどうかの問題がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この点についても雷撃点までの距離とケーブル長さによっては相当に高い電圧の生ずることも報告されており⁽⁶⁾慎重な検討が必要と思われる。

2.5 接続施工上の問題

上述の本質的な問題点のほかに接続作業方法と関連して接続部の設計上構造の検討を要する点が多い。これは単心ケーブルの際にはそれほど問題とはならないのであるが、3心ケーブルを使用する場合には若干困難な点があり、70 kV 以下では3心ケーブルが多く使用されることを考えるとこの問題についても十分な考慮をほらう必要がある。

3. 問題点の技術的説明

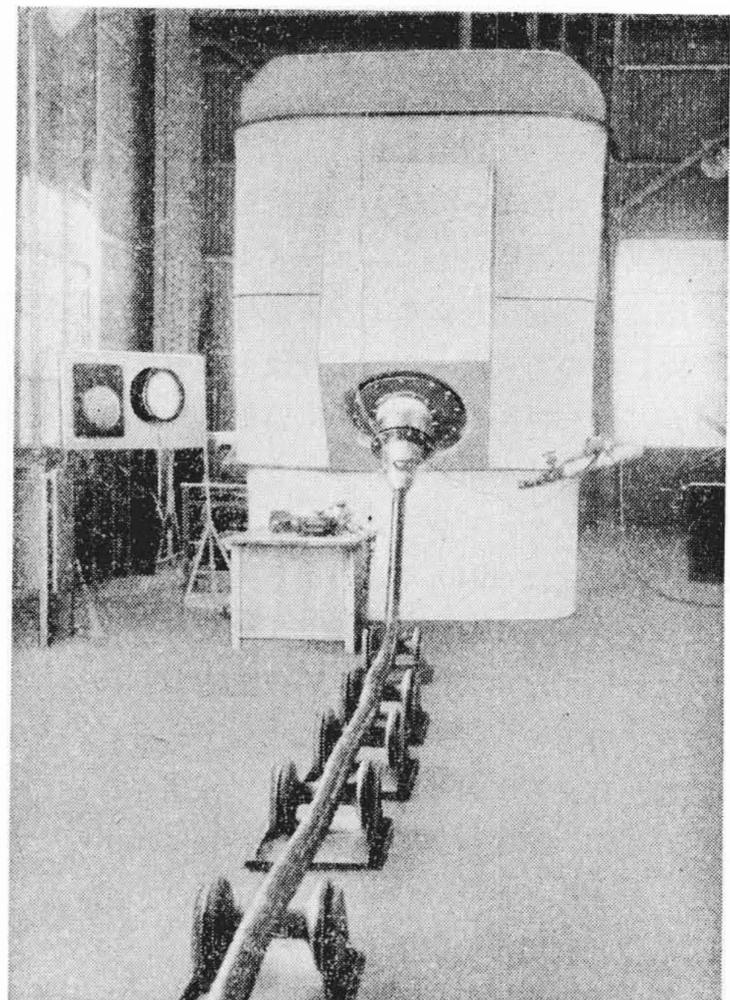
前章で説明した種々の技術的問題点に対してわれわれは個々に実験研究を行いその説明に努力してきたのであるが、その研究状況の概略を以下に述べる。

3.1 中間箱内の絶縁油の冷却

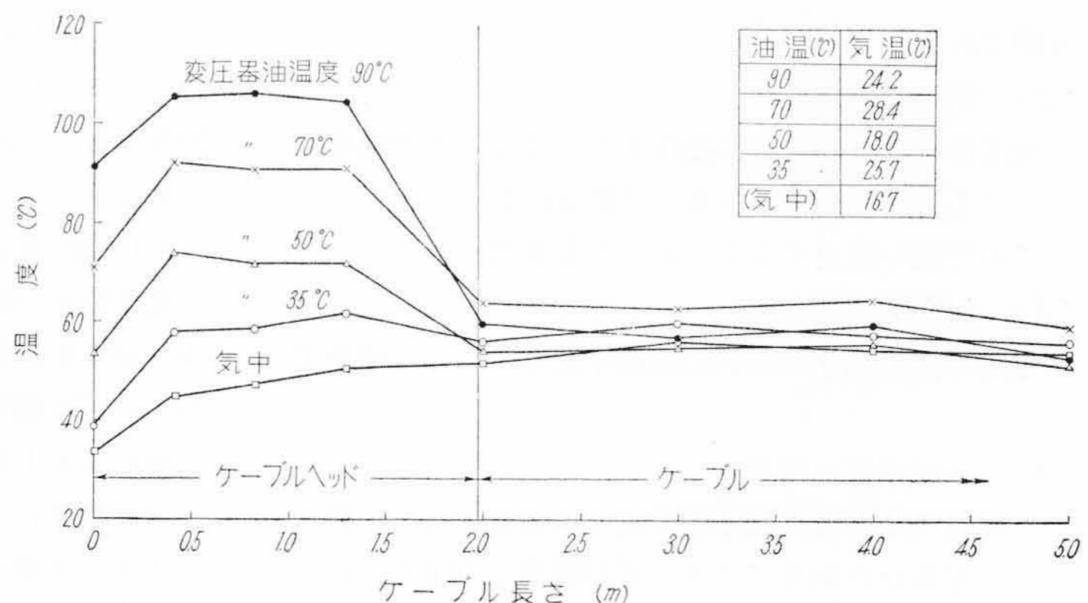
前述したとおりケーブルの許容温度は変圧器油のそれよりも低いため、変圧器油中に直接ケーブルヘッドを設置することには難点がある。したがってケーブルヘッド周辺の油

温は変圧器本体の油温よりも何らかの方法により若干低下させる必要が生ずるが、どの程度まで冷却すれば安全であるかが最も問題となる。ケーブルヘッドの温度上昇は数学的解析が困難であるのでわれわれは実際と同様の実験装置を作成し種々の条件における各部の温度分布を測定してこの問題を解明した。

実験装置は第 1 図に示すが図中のタンクの内部には変圧器油を充満し下部にラジエータを設置して加熱できる構造となっている。したがって変圧器油を適当に加熱しケーブルに通電すれば実際とまったく同様の状態となる。この実験装置によって種々の条件における各部の温



第 1 図 154 kV 直結 OF ケーブルの温度上昇試験状況



第 2 図 直結ケーブルの導体長さ方向温度分布 (154 kV 単心 OF ケーブル・定格電流)

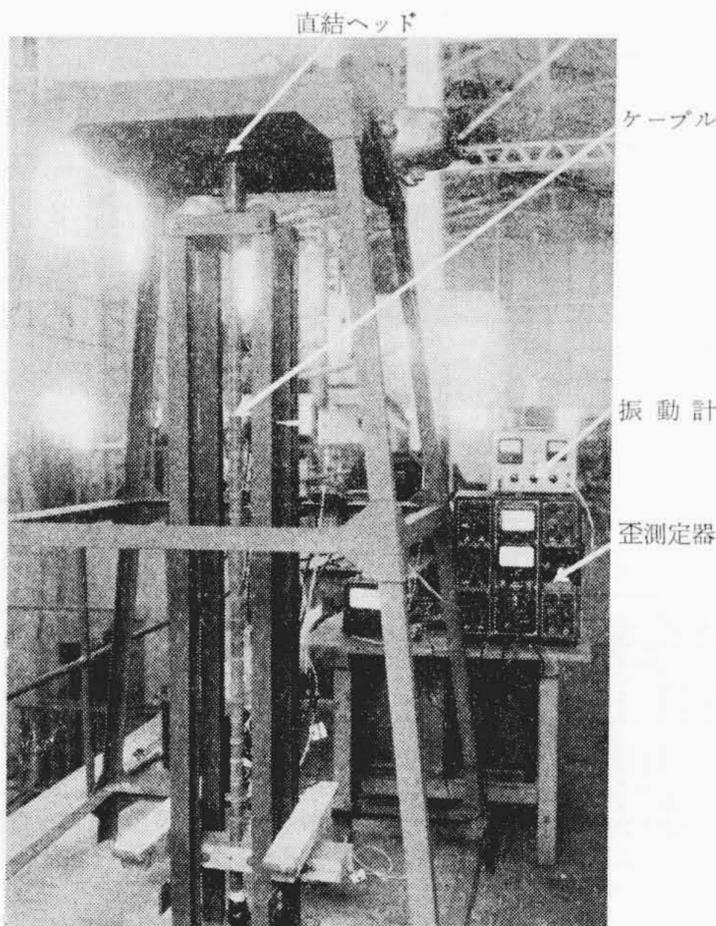
度分布を測定した。実験結果の詳細は後報する予定であるので、ここではその一部を示すにとどめる。

第2図は気中および変圧器油温度を種々変化させケーブルに定格電流を通電した場合のケーブル導体温度を示したものである。実験に使用したケーブルは154 kV 単心 OF ケーブルであるが、図から通常のケーブルヘッドは熱的に安易な条件のもとにおかれていたことが明瞭である。

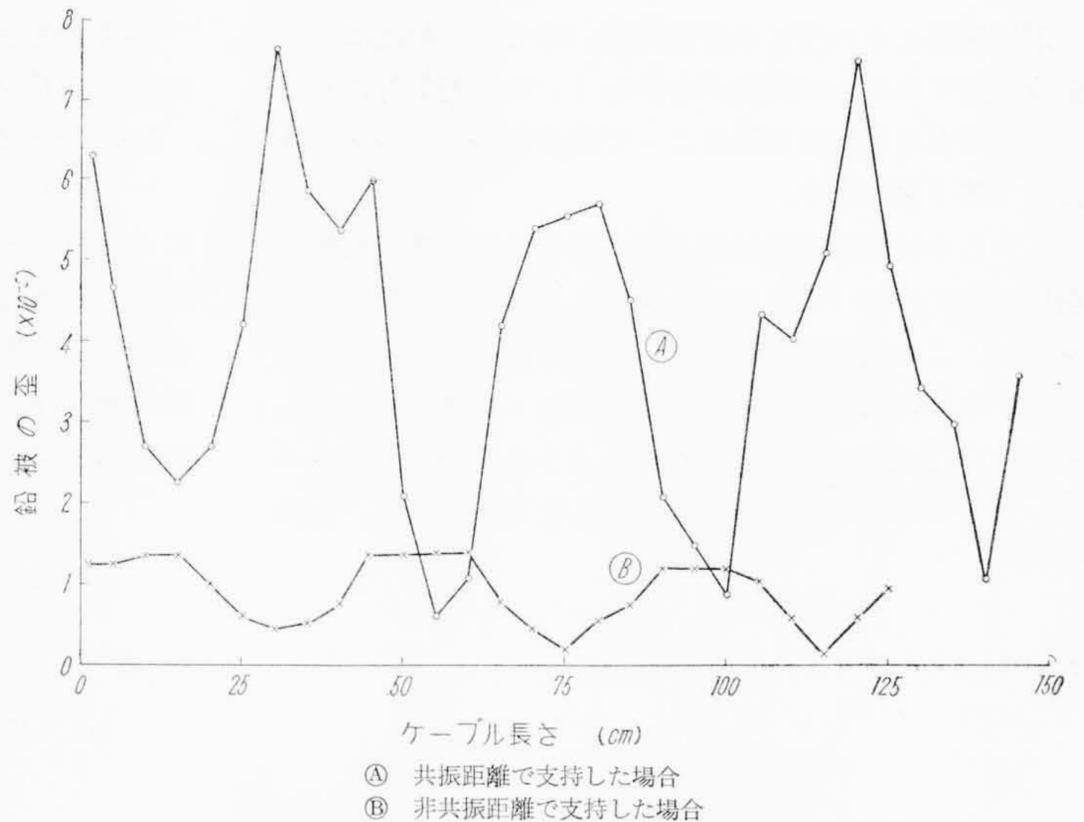
一方 90°C の変圧器油中にケーブルヘッドを設置した場合にはケーブル導体温度は最高 110°C にも達し、変圧器本体へ直接ケーブルヘッドを設置することの危険性を示している。ケーブルヘッド部導体許容温度の基準を決定することは容易な問題ではないが、ケーブルと同様に 80°C とするためにはケーブルヘッド周辺の変圧器油温度は 50~60°C とすればよいことが判明した。これは中間箱を設ける形のものでは比較的容易であり、また3心ケーブルの場合にはこの油温許容限界をさらに上昇させることが可能である。

3.2 ケーブル鉛被の振動疲労の問題

変圧器の機械的振動によるケーブル鉛被の疲労破壊を防止する装置は種々考案され海外においても一部実施されている模様であるが、もし可能であれば特別の防振装置を付加しないことが望ましい。このためには変圧器の



第3図 直結ケーブル模擬振動試験状況



第4図 ケーブル鉛被のひずみ分布比較

振動振幅がどの程度になった時に防振対策を講じなければならぬかを十分検討しておく必要がある。

この問題に対しては第3図に示す模擬振動試験装置を作成して種々の試験を行っている。この実験装置はタンク内へ挿入したケーブルヘッドにパイプレータによって振動を与え、ケーブル鉛被のひずみを抵抗線歪計で測定するものである。

ケーブルの一端を強制振動させた場合ケーブルには定在波振動が発生する。したがってケーブルの振動すなわちひずみはケーブルを支持する距離によって著しく異なり共振点では非常に大きなひずみとなる。20kV150mm² SLケーブルについて得た測定結果の一例を第4図に示す。図中の曲線A, Bは強制振動の振幅がまったく同一であるがケーブルを支持する距離が若干異なるものであり曲線Aは第3次共振点付近で支持した場合、曲線Bはこの共振点をはずして支持した場合である。曲線Aの場合にはケーブル鉛被に疲労限に近いひずみが発生するが曲線Bの場合にはまったく同一の振動を与えてもきわめて低いひずみが生ずるにすぎないことが明白である。

このように変圧器の振動に対してはその振動によってケーブルが共振しないように十分な考慮をばらう必要がある、この点に留意すれば振動によるケーブル鉛被の疲労破壊は完全に避けることが可能である。

3.3 絶縁設計

従来の普通形ケーブルヘッドでは碍子表面の閃絡距離および内部のベルマウス端から導体先端に至る油中油浸紙上の閃絡距離が絶縁設計の主な対象となっていた。直結形として油中にブッシングを入れた場合、碍子表面に関しては変圧器油中ブッシングにおけると同様にその絶

縁距離は大幅に減少できる。一方、後者については現行の電界条件とそれほどの変更はないのでどの程度にまで縮小可能であるかに疑問がもたれていた。両条件における電界状況を電界解析器によって求めた結果の一例を比較して第 5 図に示す。

これらの比較結果直結形では中間箱のケースが接地遮蔽板として作用するためベルマウス近傍の電界集中が緩和され、この点では有利となることを確認した。むしろ遮蔽ケースの影響のために高圧側にストレスの集中があり P. G. Priaroggia 氏⁽²⁾ のいうように高圧側電極のストレスシールドの設置が有効になると考えられる。われ

われは上記のように電界解析により最適のケーブルヘッド形状を決定するとともに、実際に各種電圧破壊試験を実施してブッシング寸法の縮小を検討している。

3.4 サージに対する系統の保護

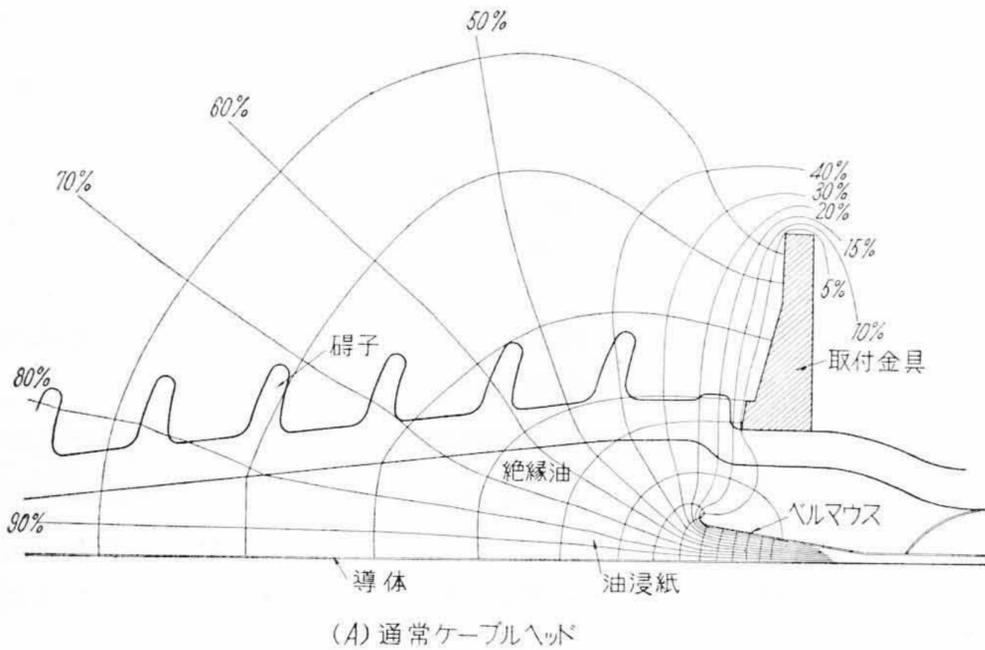
ケーブル接続系統のサージ特性を詳細に検討するためには実際に布設されたケーブルのサージ減衰および変歪特性、伝播速度、サージインピーダンスなどを考慮する必要がある⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このため中部電力金川線 70kV 3C×80mm² OF ケーブル (亘長 1,062 m) について上記の諸特性を測定し種々の検討を進めている。

4. 66 kV 変圧器直結 3 心 OF ケーブルの布設

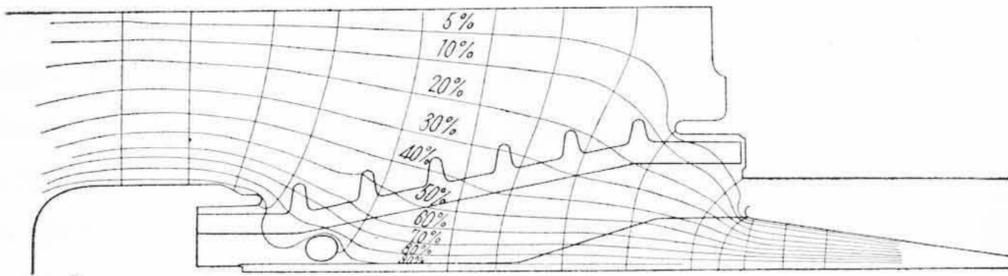
4.1 変圧器およびケーブルの仕様

本変圧器は既成の普通形変圧器をケーブル直結形に改造したものであり、改造後の変圧器およびケーブルの仕様は第 1 表のとおりである。また改造後の概略寸法および写真を第 6 図および第 7 図に示す。改造に当っては変圧器本体の改造をできるだけ行わず上部カバーのみの改造にとどめる方針をとったため、中間箱を変圧器本体の上部にのせる形式となり高さの縮小はそれほど期待できなかった。

しかしながら従来の変圧器との比較において高圧部分からの絶縁距離をも考慮すれば実効的にはかなりの縮小がなされた。本直結変圧器製作の目的は模擬試験装置などでは求めることのできない各種のデータをうるためと、机上では予測困難な施工の際の問題点を解明することであった。3 心ケーブルを変圧器直結とするには施工上困難が伴うのであるが本器は 3 心 OF ケーブルを直結したわが国最初の変圧器で

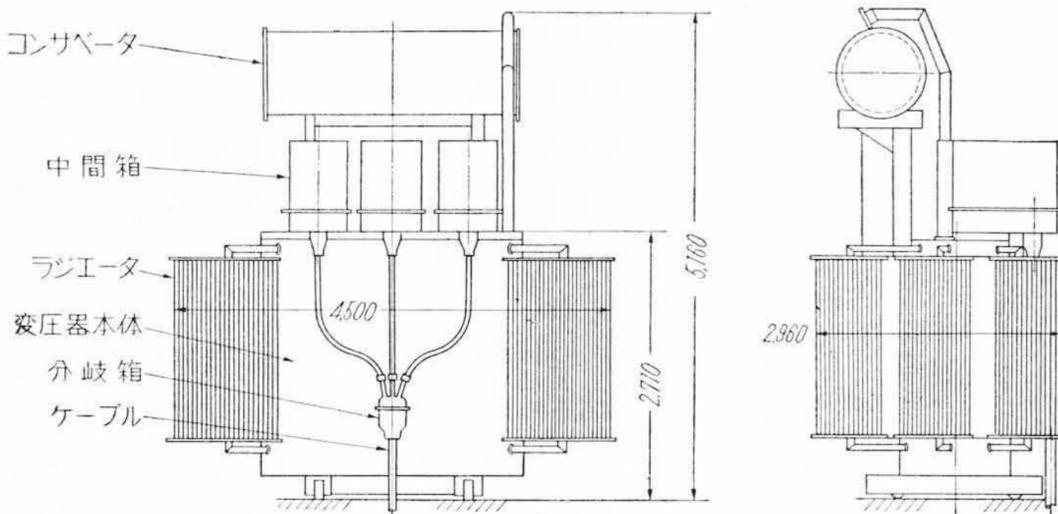


(A) 通常ケーブルヘッド



(B) 直結ケーブルヘッド

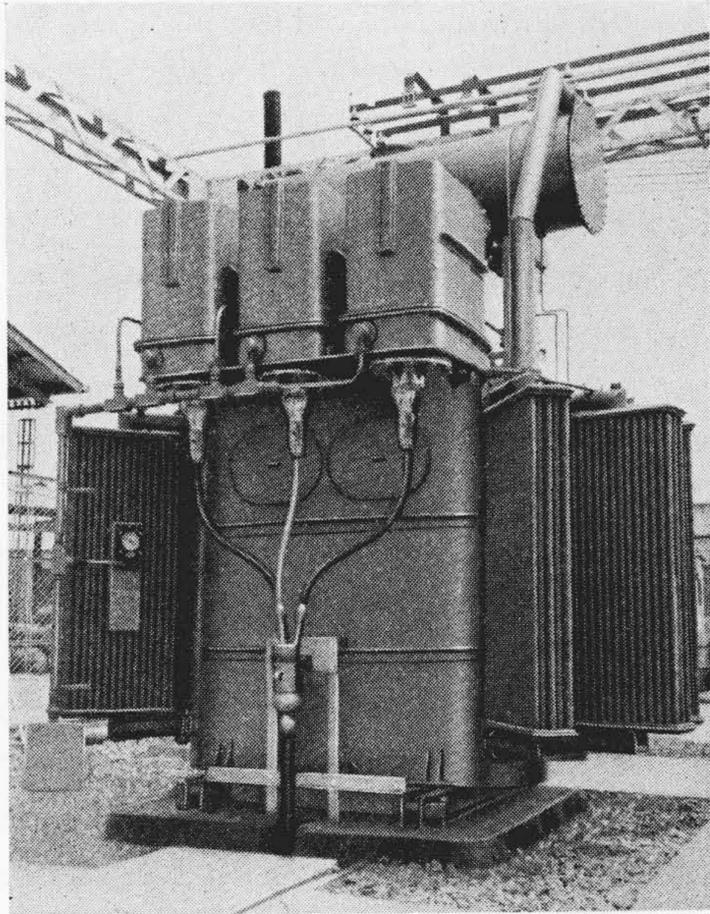
第 5 図 60 kV OF ケーブルヘッドの電界分布比較



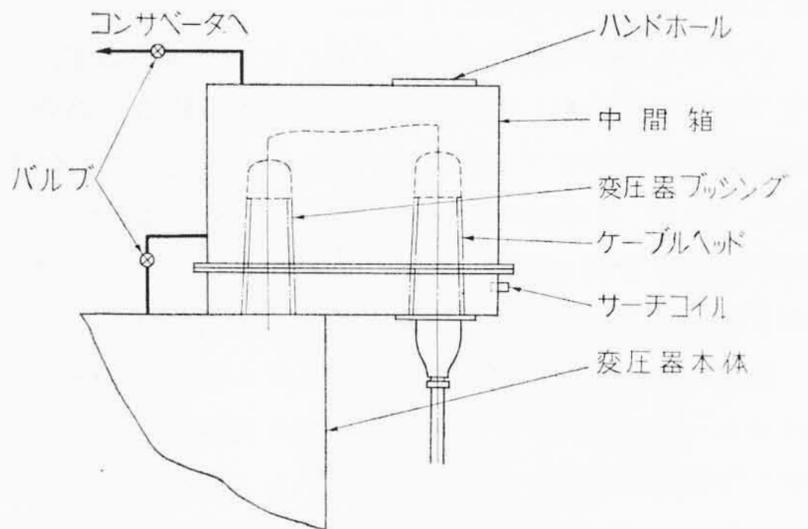
第 6 図 66 kV 4,300 kVA ケーブル直結形変圧器

第 1 表 変圧器およびケーブルの仕様

| 項目 | 仕様 |
|------|--|
| 変圧器 | 電圧 一次 66 kV 二次 3.3 kV 容量 4,300 kVA 三相 △-△結線 油入自冷式 内鉄形 |
| ケーブル | 60 kV 3C×80mm ² 防蝕鉛被鋼帯 鍍装 OF ケーブル |
| 接続方式 | 各相分離, 間接形, 並行配置, 遮蔽 形ケーブルヘッド |



第 7 図 66 kV 4,300 kVA ケーブル直結形変圧器



第 8 図 中間箱内ブッシング配置

ある。

4.2 ケーブルヘッドおよび中間箱の構造

4.2.1 ケーブルヘッド

前述のように遮蔽ケース内に收容された油中ケーブルヘッドでは電界の集中を避けるように適正な形状とすればコンデンサブッシングによらなくとも内部閃絡距離を従来のものの 50% 程度に縮小することは十分可能である。従来のケーブルヘッドに比して閃絡距離を 50~70% に縮小した油中ケーブルヘッドについて耐電圧試験を実施した結果、インパルス耐電圧 520 kV 以上、交流長時間耐電圧 190 kV 以上という結果を得た。

これらの予備試験によってベルマウス端の電界強度および油中碍子表面電界強度の検討を行って寸法を従来の約 1/2 に縮小したケーブルヘッドとした。特に注意した点はベルマウスとケーブルヘッド下部金具との相対位置および頭部ストレス遮蔽金具の形状などでありこれらについては電界解析を行ってもっとも良い条件を見出した。なお超高圧の場合にはコンデンサブッシングの採用が有利と考えられ、目下検討中であるが 70 kV 程度までは従来の遮蔽形端末で十分でありその大きさもコンデンサ形とほとんど同程度まで縮小することは可能である。

4.2.2 中間箱およびブッシングの配置

60 kV および 70 kV 級に対しては 3 心 OF ケーブルの使用される例が多いので今回のケーブルとしては前記のように 3 心ケーブルを使用している。したがっ

て 3 個のケーブルヘッドを同一の中間箱に收容する方式と個々別々の中間箱に收容する方式とが考えられる。前者ではケーブルヘッド間隔を縮小できるので全体を小形に仕上げられる利点があり諸外国における例でも 60 kV 級ではこの方式が多い。今回の例ではケーブルヘッドの温度条件を個々に変えて実用的比較試験を行うことを目的の一つとしたので各相分離形とした。また諸外国においては 60 kV 級では変圧器ブッシングを省略したいわゆる直接形が多いが国内の現状では変圧器とケーブルとの責任限界を明確にしておく必要と工場および組立現地での耐圧試験を個々に行う要求があるなどの点を考慮して間接形とした。なおこの方式では中間箱内油温の低減を期待しうるのでケーブルヘッドの温度条件を軽減することも可能である。

ケーブルヘッドと変圧器ブッシングの相対位置については直線形、直交形、並行形、および任意の角度をもたせた方式などがあるが、今回は改造変圧器という制約のため並行形とした。第 8 図に中間箱内のブッシング相対位置ならびに概略形状を示す。二つのブッシング間の接続には 50 mm² 硬銅撚線を使用し、これに油浸紙絶縁を施すなどの特別の方法はとっていない。

5. 布設ケーブルの試験および現地測定

5.1 耐電圧試験

変圧器とケーブルでは試験電圧が異なり、この調整をいかにするかが一つの問題となる。今回は工場内における試験の際は変圧器に通常のブッシングを取り付け、またケーブルヘッドは試験用タンクを使用して第 2 表に示

第 2 表 変圧器およびケーブルの試験電圧

| 項目 | 電 圧 | 衝 撃 電 圧 (1×40 μs) (kV) | 商用周波電圧 (50 c/s) (kV) |
|---------|-----|------------------------------|----------------------------|
| 変 圧 器 | | 350 | 140 (1 分間) |
| ケ ー ブ ル | | 450 (負) | 100 (10 分間) |

すようにおのおの別個に行った。

いずれも良好な結果を示したが、ケーブルヘッドに対しては第2表に示した試験のほかに520kV 3回の衝撃電圧試験(破壊せず良好)およびそれに引続いて170kVから10kV 3時間ステップで交流電圧を印加したが、190kV 10分間で閃絡した。この結果は従来のケーブルおよびケーブルヘッドの実績と同等の成績である。

現地における組立後の試験はケーブルが約30mと短尺であったため、ケーブルと変圧器を接続した状態で電気工作物規定に従い、交流82.5kVを10分間課電した。しかしケーブルが長く交流電圧印加が困難な場合には、ケーブルと変圧器を切り離しそれぞれ直流電圧および交流電圧によって試験することが妥当であろう。

5.2 実負荷による温度上昇測定

前述したようにケーブルヘッド周辺の油の温度、すなわち間接形では中間箱内の油の温度を変圧器本体の油温よりも低下させる必要がある。この冷却方式が設計上の重要な課題であり、中間箱専用の冷却器が必要か否か、あるいは変圧器本体から中間箱への熱伝導の阻止方法などが興味ある問題となっている。

この問題も解明するために実負荷使用状態で各部の温度上昇を測定したのであるが、十分満足な結果を得ることができ設計方式の妥当性を確認した。また中間箱内の油の温度はその配管方式、すなわち中間箱内の油を変圧器本体またはコンサベータあるいはその両者に連結するかによってその温度上昇値は若干異なり、どの方式が最も妥当であるかを決定する貴重なデータを得ることができた。

5.3 変圧器の振動および鉛工部のひずみ測定

3心OFケーブルの場合、ケーブル鉛被の振動疲労はほとんど問題とならない。今回の直結ケーブルヘッドでは振動伝達防止装置など特に考慮しなかったのである

が、各部の振動振幅ならびにひずみを測定した結果、鉛工部などのひずみはごく微少でありまったく問題のないことがわかった。

6. 結 言

今回66kV 4,300kVA変圧器に3心OFケーブルを直結し、その実用化に成功したが、温度の問題に関しては適当な形状と配置の中間箱を設けて間接形とすることによりほとんど解決できた。また振動についても実際測定結果まったく問題ないことを確認した。

もちろん絶縁設計においては従来の通常形ケーブルヘッドと同等の絶縁強度で十分形状を縮少できる自信を深めた。

なお、今回は自家受電用設備として実用し、各種の実用的データを得心することを目的としているため、必ずしも最良の設計形状ではなく、特に相分離形としたため機器全体の寸法は若干大きくなっている。しかしながら今回の実用化経験により、各所の現場条件に相応したもっとも合理的な方式を設計製作する上の基礎データを得心したので、これらを今後の製品に適用していきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) G. Vi Dito: C. I. G. R. E. No. 121 (1952)
- (2) P. G. Priaroggia: C. I. G. R. E. No. 205 (1954)
- (3) E. Stenkvis, B. Bjurstrom: Ele. Light and Power 87 (Mar 25, 1956)
- (4) 秋丸: 日立評論 40, 800 (1958)
- (5) C. M. Short, T. J. Bliss, M. K. Enns: T. A. I. E. E. 77, 1464 (1958)
- (6) I. Herlitz, N. Knudsen: C. I. G. R. E. No. 324 (1952)
- (7) H. G. Brinton, F. H. Buller, W. J. Rudge: T. A. I. E. E. 52, 121 (1953)
- (8) W. W. Valentine, J. K. Dillard, J. M. Clayton: T. A. I. E. E. 74, 1115 (1955)

日 立 電 線 別 冊 第 28 号

Vol. 20 目 次 No. 12

| | |
|---|--|
| <p>◎家庭電化への希望.....奥むめお</p> <p>◎冬の赤城山ケーブルカー</p> <p>◎アイロンの話</p> <p>◎暮らしの科学</p> <p>◎日本最大のしゅんせつポンプ</p> <p>◎ショールーム(お歳暮のしおり)</p> <p>◎明日への道標(センジマーミル)</p> | <p>◎生活と金属(V)自動車部品の話</p> <p>◎ビデオコントロールのできるテレビ</p> <p>◎粉末冶金“ニッカロイ”</p> <p>◎ポンプを利用したジェット船</p> <p>◎日立だより</p> <p>◎新しい照明施設</p> |
|---|--|

誌代 1冊 ¥60 (〒16)

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地 振替口座東京71824番
 取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座東京20018番