

配電近代化用変圧器

Technical Considerations for Modern Distribution Transformer

In developing perfectly self-protecting distribution transformers and network transformers which have already been taken into extensive use for the modernization of distribution, the authors spent years in solving various technical problems concerning improvement of reliability, reduction of size and weight, and economization. This article deals with some of the basic technical problems in transformer design such as insulation coordination, exciting characteristics of a network transformer, empirical formulas for calculation of vault dimensions and winding temperature rise. Also introduced in the article are a built-in type vacuum switch developed for higher transformer reliability and the results of the critical tests for reliability at inside arcing faults which were conducted by subjecting a self-protecting distribution transformer to a forced failure.

松村和男* Kazuo Matsumura

上田太一* Taichi Ueda

小林 明* Akira Kobayashi

1 緒 言

近年、都市の過密化が進むとともに社会生活が高度化するにつれ配電事情も変遷し、電力会社では数年前より配電の近代化に対する種々の施策⁽¹⁾⁽²⁾がなされている。

このような動向に対処して、配電用変圧器においても電力会社の施策に適合した製品開発を志向し、側面より配電近代化の推進に寄与するため、現在までに次のような研究がなされてきた。

- (1) 柱上変圧器の大容量化を目的とした小形軽量化に対する技術開発
- (2) 高信頼度化を目的とした変圧器特性の改善および関連保護機器との保護協調
- (3) 装柱の省力化および環境の美化を目的とした保護機器の内蔵化
- (4) 地中配電用変圧器の開発に関する技術的問題点の検討

以上のような研究結果を基に、架空配電近代化用変圧器として大容量柱上変圧器⁽³⁾を始め、美化装柱用変圧器⁽⁴⁾、保護装置内蔵変圧器⁽⁵⁾等を開発するとともに、地中配電用変圧器としては、全地中変圧器、ネットワーク変圧器⁽⁶⁾を完成し実用化されている。

本稿では、これらの変圧器を開発するにあたり検討した技術的課題のうち、特に保護装置内蔵架空配電用変圧器の信頼性向上に対する基礎的な検討ならびに安全性検証試験結果について述べるとともに、ネットワーク変圧器の設計上の問題点について述べる。

2 保護装置内蔵架空配電用変圧器

図1は過密都市用として東京電力株式会社で採用された保護装置内蔵の大容量柱上変圧器の一例である。本変圧器は65℃変圧器として小形軽量化するとともに、異容量V結線方式の採用などの特徴を有しているが、従来のこの種変圧器に比較して特に次のような点で高信頼度化を図っている。

- (1) 避雷器の内蔵

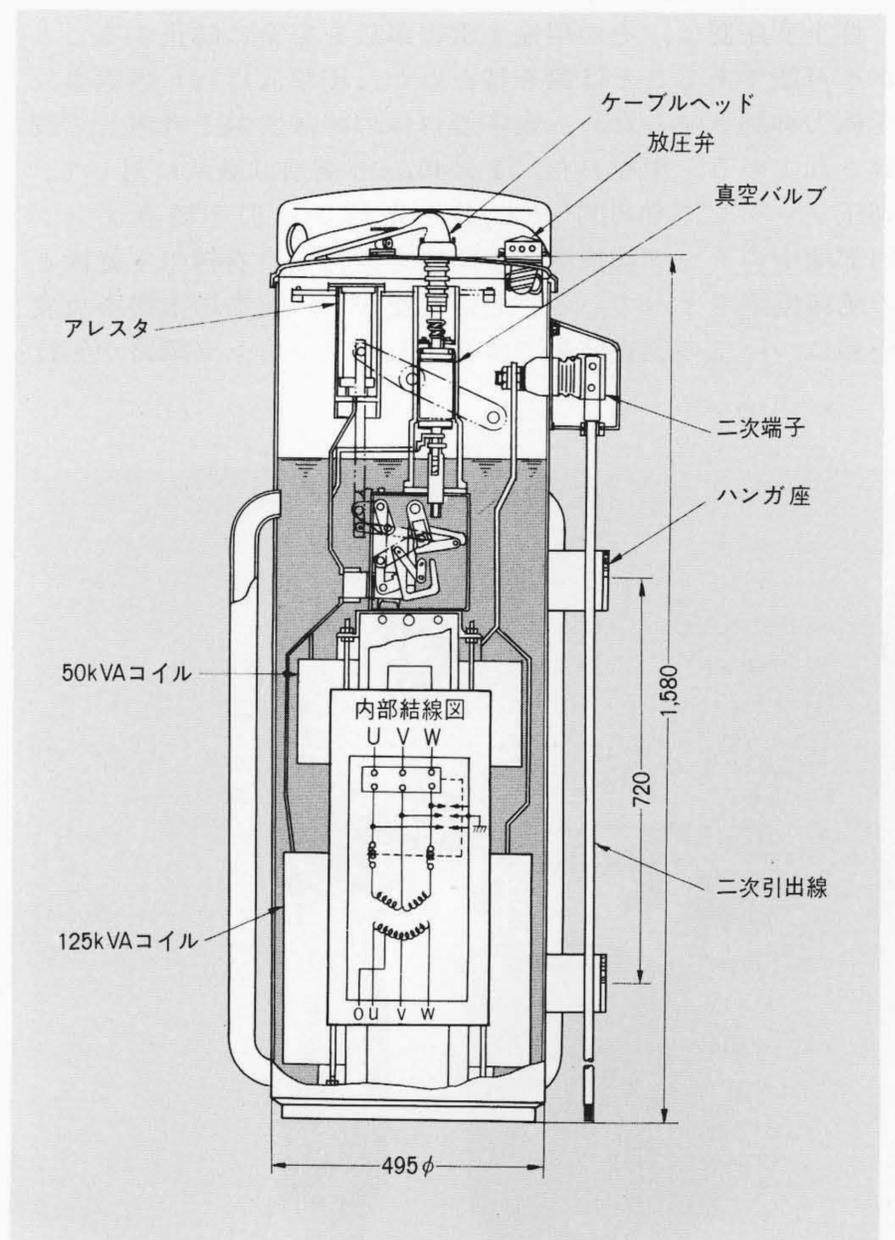


図1 過密都市配電用柱上変圧器の内部構造 おもな仕様は、異容量(50+125kVA)V結線三相4線式で、一次電圧6,600/3,300V、二次電圧210V(三相)210-105V(単三)、巻線温度上昇65degである。

Fig. 1 Inside View of Perfectly Self-protective Large Capacity Pole Mount Type Transformer

*日立製作所亀戸工場

- (2) 過電流保護機器として内蔵形真空しゃ断器の採用
- (3) 窒素ガス封入の完全密封構造
- (4) 高圧引下線のケーブル化とプラグインコネクタブッシングの採用

柱上変圧器が外部から受ける事故要因としては、(1)雷サージなどによる絶縁破壊、(2)低圧側短絡による巻線の機械的・熱的破壊、(3)過負荷運転による絶縁物の熱劣化破壊がある。したがって、変圧器の保護装置としてはこれら外部よりの事故防止機能を有するとともに、なんらかの要因で変圧器の内部事故が発生した場合、配電線からすみやかにしゃ断し、事故の拡大を抑制する機能が必要となる。

以下、本変圧器の開発にあたり検討した技術的問題点のうち、変圧器の絶縁協調に関する考察、内蔵真空しゃ断器の保護特性、変圧器の内部短絡時のタンク内圧上昇および図1の実機で実施した内部事故時の安全性検証試験について述べる。

2.1 柱上変圧器の絶縁協調に関する考察

現在、柱上変圧器の耐雷保護としては、配電線路上に設置された避雷器および架空地線などにより一応その目的を達している。しかしながら、近年いっそうの信頼度向上のため雷害事故の低減に対して検討がなされ、特に測定技術の向上とあいまって急峻(しゅん)波に対する保護協調についての研究がなされている。

柱上変圧器は、その用途上雷害事故を完全に防止することが不可能であることは論を待たぬが、衝撃波に対し巻線事故を極力抑制させるため、変圧器自体の絶縁協調を考慮して設計されている。すなわち、 $1 \times 40 \mu s$ の衝撃試験波に対して、高圧ブッシングでの閃(せん)絡を先行させ引き続きタンク内部油中のタップ切換盤での閃絡を期待し、巻線の主絶縁との絶縁協調をとっている。しかしながら、実際の雷害事故変圧器についての調査結果では必ずしもブッシング閃絡が先行



図2 標準形柱上変圧器の一例 現在多用されている柱上変圧器の一例として単相50Hz 6kV級50kVAの外観を示す。高圧ブッシングはスタット方式であり、高圧引下線を磁器製のハンドルにて締め付ける構造である。

Fig. 2 Standard Type of Pole Mount Type Transformers

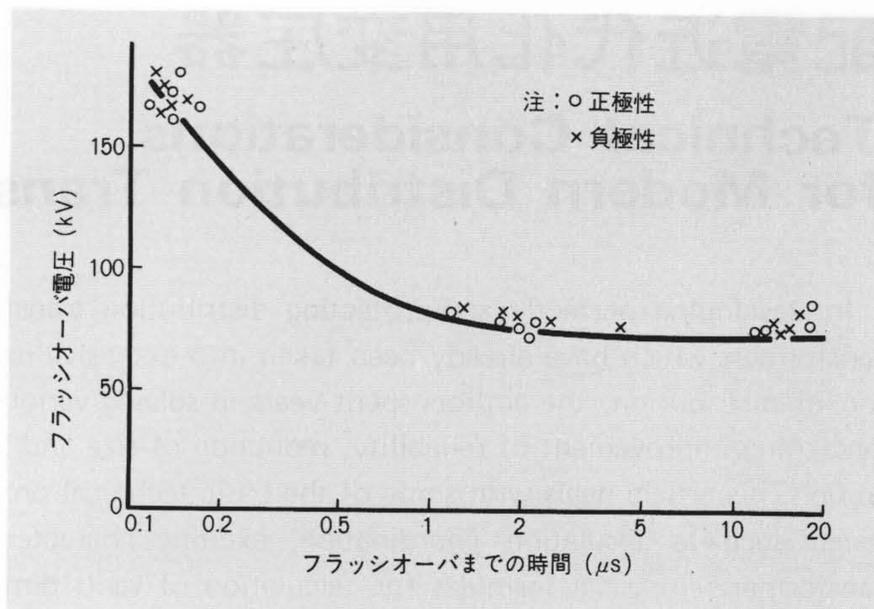


図3 一次ブッシングのV-t特性 図2の柱上変圧器の高圧側ブッシングとタンク間の閃絡特性を示す。

Fig. 3 V-t Characteristics of Primary Bushing

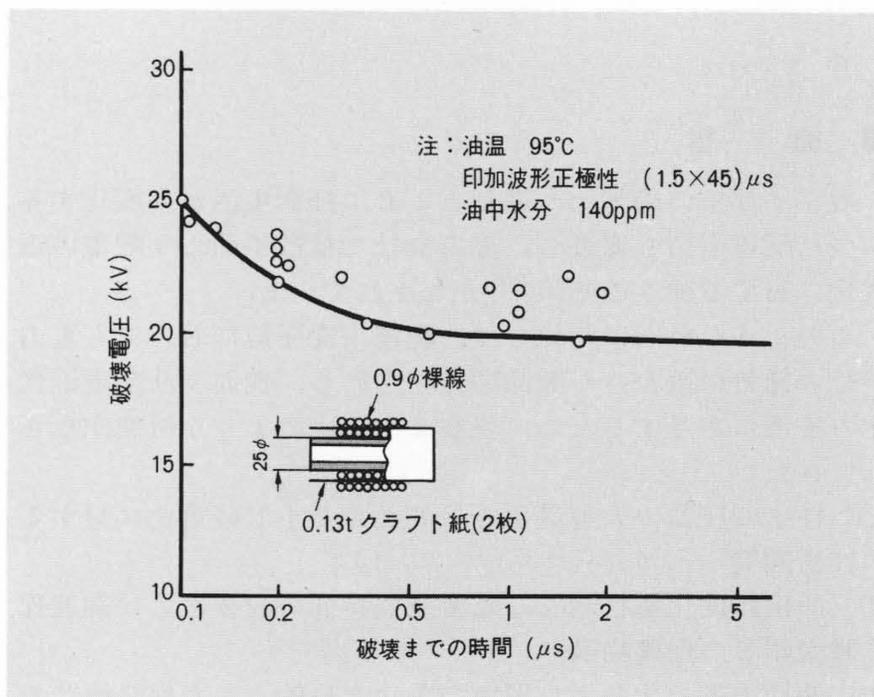


図4 油浸絶縁紙(モデルコイル)のV-t特性 実コイルの層間紙を模擬し、条件の悪い運転条件として油中水分180ppmの高温油中(95±5℃)にて試験した。

Fig. 4 V-t Characteristics of Oil-immersed Kraft Paper (by Model Coil)

せず、巻線事故に至っているものがある。これらの現象はまだ明確に論じられぬ雷現象に対するものとして容認されるものであろうが、この現象を実験的に再現させるため原因と予想される急峻波サージを図2に示す構造の柱上変圧器について基礎的検討を試みた。図3は一次ブッシングの外部放電のV-t特性であり、図4は巻線の層間絶縁紙のV-t特性をモデルコイルにより測定した結果である。これらの実験データをまとめ変圧器のブッシング、タップ切換盤および巻線についてV-t特性の傾向を比較すると、図5に示すように急峻波領域での絶縁協調は大幅にくずれることが実証された。これらの現象は避雷器の保護特性についても設置方法によっては問題が生ずることが報告⁽⁷⁾されており、変圧器の雷害に対する信頼度を向上させるためには避雷器の当該柱設置、さらには外観改良、装柱省力化などを考慮すると内蔵化が望まれることになる。

2.2 内蔵真空しゃ断器の特性

変圧器内蔵過電流しゃ断装置として要求される特性として

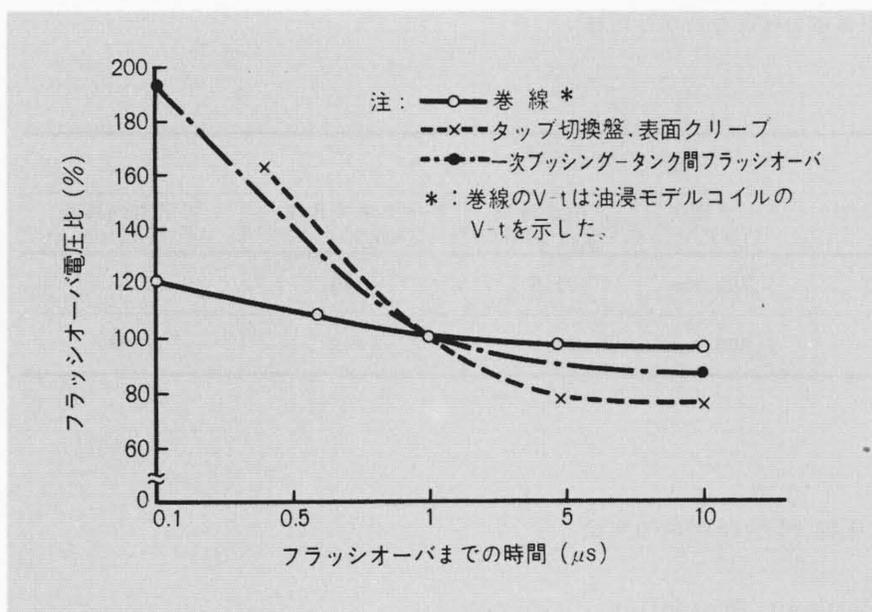


図5 標準柱上変圧器のV-t特性 図2の柱上変圧器の高圧ブッシング
タップ切換盤および巻線のV-t特性の傾向を百分率で表わしたものである。

Fig. 5 V-t Characteristics of Standard Pole Mount Type Transformer

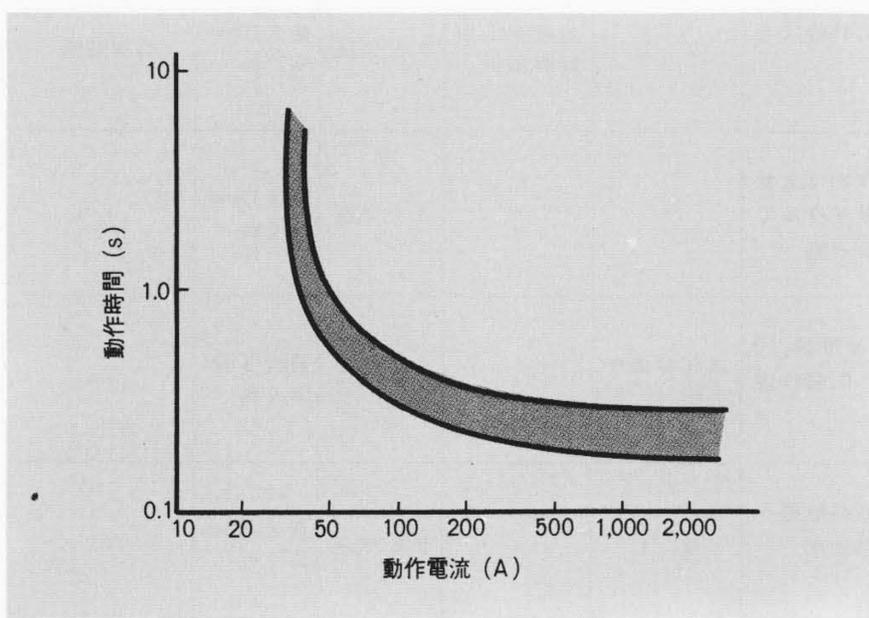


図7 真空しゃ断器動作特性 図1の過密都市用変圧器(50+125)kVA
に内蔵した真空しゃ断器の動作特性の一例である。

Fig. 7 Characteristic Curve of V.S

は、(1)変圧器事故時の配電線路からのしゃ断、(2)低圧側短絡に対する保護、(3)過負荷保護、(4)変圧器の配電線からの断路がある。これらを目的とした内蔵用機器として、油中ヒューズ、高圧油中開閉器、低圧過電流しゃ断器などが開発されているが、いずれも一つの機器で上記の要求特性をすべて満足するものではなく、それぞれ組み合わせて使用されている。これらの組合せはいずれも一長一短があり、上記のどの項目を重視するかによって決められるが、強いて共通の問題点をあげればいずれも変圧器と同一タンク油中での開閉、しゃ断動作にたよっている点にある。

このような観点から、いっそうの高信頼度化を図るとともに、大容量変圧器に適した内蔵用過電流しゃ断装置として図6に示す真空バルブを応用したしゃ断器を開発した。この内蔵用真空しゃ断器は特に次の特徴を持った設計となっている。

(1) 小形軽量化

柱上変圧器に内蔵されるため、真空バルブはエポキシ絶縁筒に収納し、コンパクト化した。

(2) 高信頼度化

異相間は絶縁筒にて絶縁し、真空バルブを採用しているた

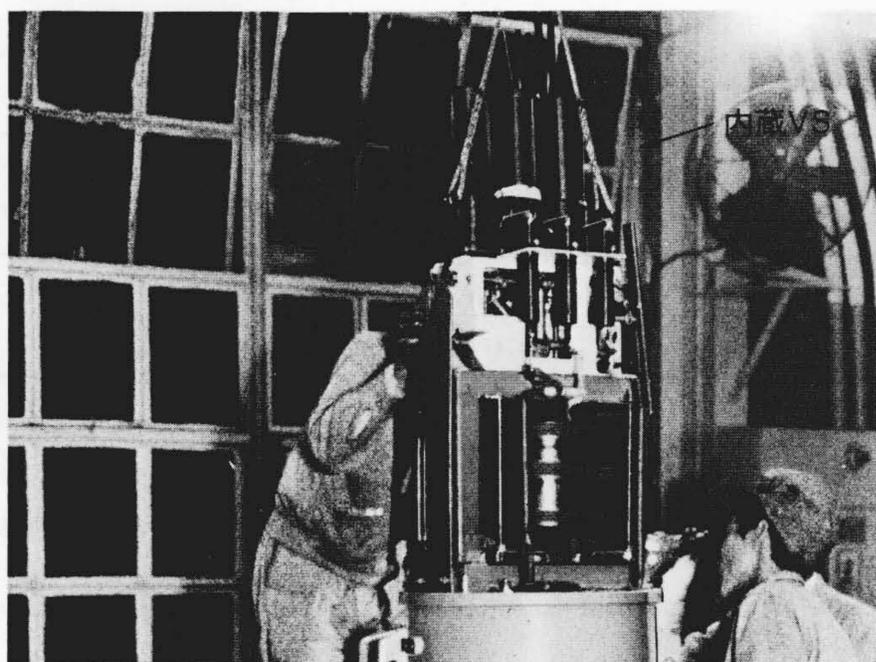


図6 変圧器内蔵真空しゃ断器 おもな仕様は定格電圧7,200V、定格電流60A、極数3極、定格短時間電流2,000A、定格投入電流5,000A、絶縁階級6号Aである。

Fig. 6 Outside View of V.S for Pole Mount Type Transformer

め、アークガスなどを外部に出さず、アークはすべて0.5サイクル以下でしゃ断する。

(3) 保守操作の省力化

可動部の質量は小さくストロークも少ないため、開閉操作力は小さく、外部からの手動開閉が容易であり、トリップコイルによる自動引はずしの確認はハンドル位置で確実に表示する構造。

(4) 動作時限を持った確実な保護特性

三相負荷に対し欠相を避けるため三極連動方式とし、変圧器の150%過負荷、変圧器励磁突入電流、電動機の起動電流などで動作せず、低圧引込線の保護ヒューズ、変圧器の短絡強度および低圧幹線などとの保護協調を考慮した時限特性を有している。

図7は本しゃ断器の動作特性であるが、これからわかるように温度と時間の積分値で論じられる熱劣化寿命損失を考慮した変圧器の過負荷保護特性は満足しない。しかしながら、現用の柱上変圧器の実績ならびにシアノエチル化紙を使用した65°C変圧器の耐熱寿命⁽⁸⁾に対する有利性を考慮すれば問題は少なく、むしろ過密都市の配電サービスの見地からすれば、きびしい過負荷保護しゃ断は避けなければならないと考える。

2.3 変圧器内部事故時の安全性

変圧器が外的要因または熱劣化によって絶縁破壊に至った場合、一般的には2.2で述べた保護機器が事故電流の拡大を未然に防ぎ配電線路からしゃ断する。しかしながら、万一しゃ断動作が不完全な場合の事故現象を把(は)握し、安全性を検証することは重要な課題であり、特に完全密封形変圧器においてはカバーのパッキンシール方式を採用している現標準方式と異なり、タンク内圧上昇を抑制するため、放圧装置などを考慮する必要がある。

油中でアーク放電が持続した場合、絶縁油が熱分解して水素、メタン、アセチレンなどを発生するが、このガスが変圧器空気室に放出されタンク内圧を上昇させることになる。

油中アークによる発生ガス量を算出するために適用できる実験式としては次の二つがある。

(1) Altbürger の実験式⁽⁹⁾

表1 油中短絡時の上昇圧力 油中アーク放電と圧力上昇との関係について計算値の確認を行なった結果である。タンクはすべて図2のものを用い完全密封とした。

Table 1 Pressure Rise by Arc Energy in Transformer Oil

試験 No.	計 算 値		実 測 値						
	発生ガス量 (l)	空気室内最高圧力(kg/cm ²)	放電ギャップ (mm)	試験電圧 (kV)	アーク電流 (A)	アーク電圧 (V)	アーク時間 (サイクル)	アークエネルギー (kWS)	空気室内最高圧力(kg/cm ²)
1	64.8	1.38	15	6.9	5,000	1,750 max	21.5	180	1.8
2	149.8	3.17	35	"	"	1,000 max	"	415	2.88

注：1. 力率はすべて0.1以下 2. 空気室内容積47 l 油量14 l
3. 変圧器油温度90~100℃ 4. 空気室内ガスはNo. 1は窒素, No. 2は空気

表2 安全性検証試験結果(保護装置なしの状態) 図1の過密都市用変圧器(50+125)kVAの実機で保護装置のみをはずして実施した安全性確認試験結果である。

Table 2 Critical Test Results for Reliability of Transformer Tank (without Protective Equipment)

試験の種類	電源容量 (三相6.6kV)	試 験 条 件	試 験 結 果	現 象				
				噴油の状態	噴焰の状況	タンクの 内 圧	カバーの 変 形	高圧引下線の 状況 (8mm ²)
タンク内 気中短絡	5,000A	変圧器ケーブルヘッドがい子部でUV相をヒューズで短絡 OCR: 0.45秒(5,000A)	三相短絡に波及し, 0.45秒にてOCRしゃ断	なし	放圧弁より瞬時微少	4.6 気圧	最大10mmふくれ	心線溶断
	12,000A	同上 OCR: 0.25秒(12,000A) DGR: 0.35秒(1A)	三相短絡に波及し, W相は2サイクル, UV相は2.5サイクルで電源接続がい子部でしゃ断	"	"	8.1 気圧	最大17mmふくれ	"
タンク内 油中短絡	5,000A	変圧器油面下200mmにて20φの電極を相間距離20mmにて固定UV, VW相をヒューズで短絡 OCR: 0.45秒(5,000A)	U相8.7サイクルでしゃ断後, 10サイクルで再点弧し, 0.45秒後OCRしゃ断	放圧弁より若干	"	1.85気圧	最大3mmふくれ	"
巻線内部 短 絡	12,000A	UV相高圧巻線層間短絡し, 電源印加4秒間, 停止60秒の周期で印加 OCR: 0.25秒(12,000A) DGR: 0.35秒(1A)	123サイクル後, 完全短絡状態となり, W相はがい子接続部 UV相はOCRしゃ断	なし	"	5.0 気圧	最大2mmふくれ	"

$$V = q \times Vg \times A \dots\dots\dots(1)$$

ここで, V: 発生ガス量(cm³) q: アークエネルギー係数
Vg: ガス発生効率(cm³/kWS)
A: アークエネルギー(kWS)

(2) Mariotteshen の法則

$$P = V \text{ ガス熱} / V \text{ 空気室容積} \times P'$$

ここで, P: 空気室内最大圧力(kg/cm²)
V ガス熱: アーク発生直後のガス発生体積(l)
V 空気室容積: (l), P': 常圧(1kg/cm²)

これら二式より Altbürger が実施した「6kVにおける油入しゃ断器」の実験結果から得られた値Vg=60cc/kWS, q=6.0を使用して算出すると表1のように空気室内最高圧力は予備実験として実施した油中短絡試験結果とほぼ同一となり油中放電によるアークエネルギーとガス発生量の関係は本式により推定できる。6.9kV5,000Aの油中短絡結果では表1に示すようにタンク内圧上昇は3kg/cm²程度にすぎないが, タンク内空気室内での異相間金属短絡などを想定すると, さらに過酷な状態が予想される。このため, カバー上に放圧装置を備えた図2の過密都市用変圧器の実機について各種事故現象による安全性の検証試験を実施した。短絡電源容量は実配電線で起こりうる最大として三相6.9kV12,000Aを想定し, 表2に示す試験条件にて検証した結果, タンク内圧最大8.1atm

まで上昇したが, タンクは異常なく十分な安全性を有することを確認した。

3 ネットワーク変圧器

過密地域に対する電力供給の安定化と信頼性向上の決め手として, 22kV受電の低圧ネットワーク配電方式が実用化されて以来, 数年を経過した。その間多くの実績が得られ, 技術的, 経済的改良が加えられ, 今後ますます普及される傾向にある。周知のとおりネットワーク配電方式⁶⁾は負荷の分布状態に応じてスポット ネットワーク方式とレギュラー ネットワーク方式に大別されるが, ネットワーク変圧器は設置される場所的条件から一般に前者はH種乾式変圧器(図8参照), 後者は油入変圧器(図9参照)が多く用いられている。

ネットワーク変圧器が一般の配電用変圧器と相違するおもな点は次のとおりである。

- (1) 受電フィーダ側から負荷側をみた場合, ネットワーク配電方式は複数回線の並列運転となるため, 各回線につながる変圧器のインピーダンス電圧をそろえる必要があり, 回路条件, 保護協調などからその裕度の範囲は一般の変圧器の1/2で製作される。
- (2) 受電フィーダが1回線停止しても残りのフィーダで無停電供給できるよう変圧器は過負荷(普通130~150%負荷)に

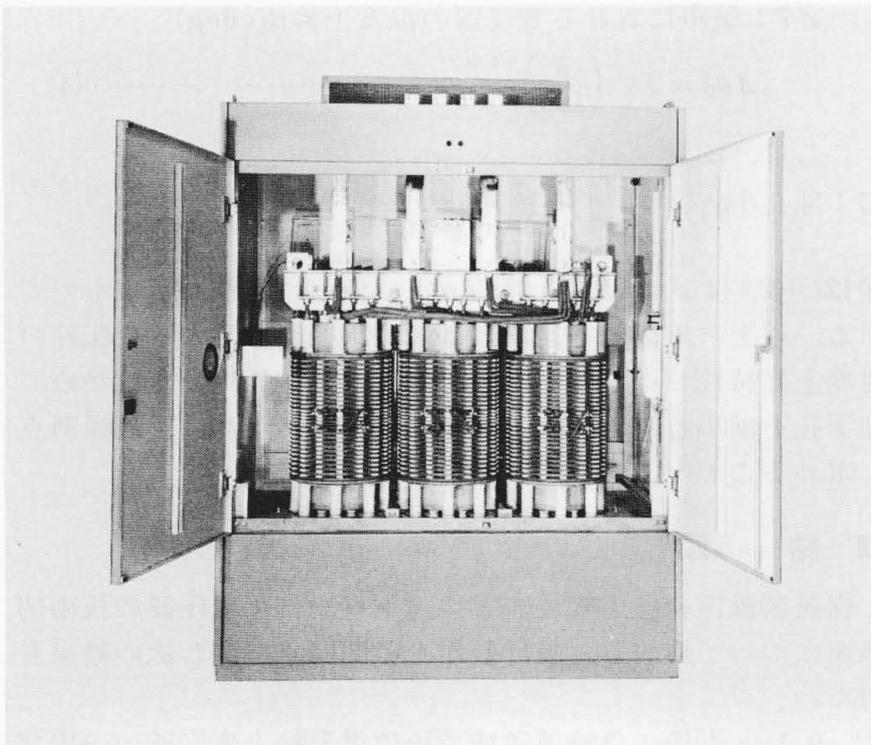


図8 22kV, 1,000kVA H種乾式スポット ネットワーク変圧器
下部に冷却ファン, 後部に一次断路器が収納されている。

Fig. 8 22kV, 1,000kVA Class H, Dry Type Transformer for Spot Network

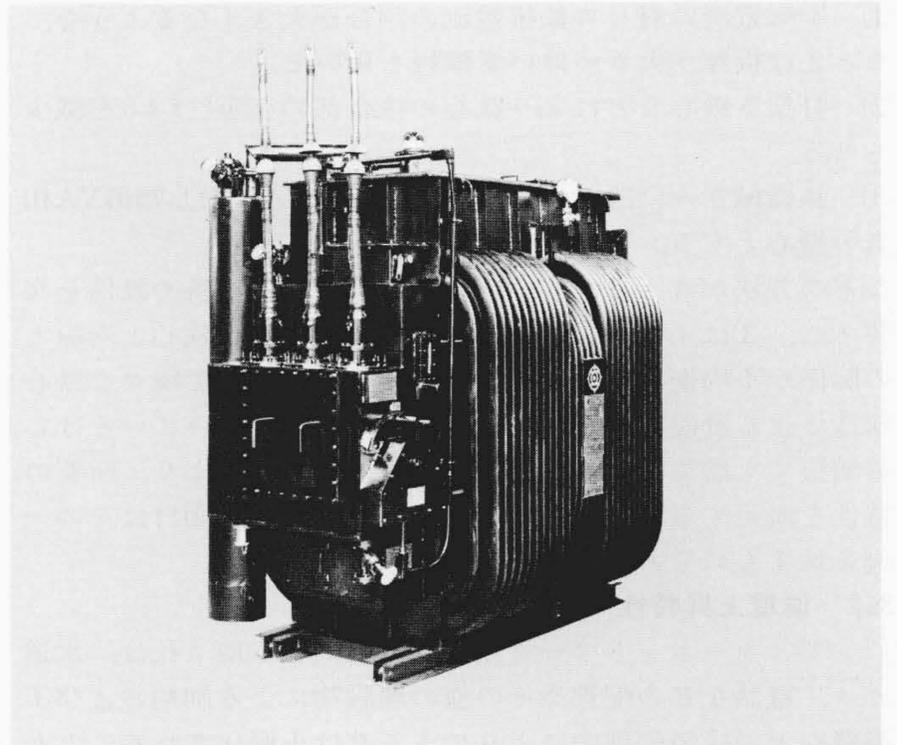


図9 22kV, 750kVA 油入自冷式レギュラー ネットワーク変圧器
一次側に断路器が直結し, 二次側にはプロテクタ装置が取り付けられる典型的な地下孔設置用ネットワーク変圧器である。

Fig. 9 22kV, 750kVA O.I.S.C Transformer for Regular Network

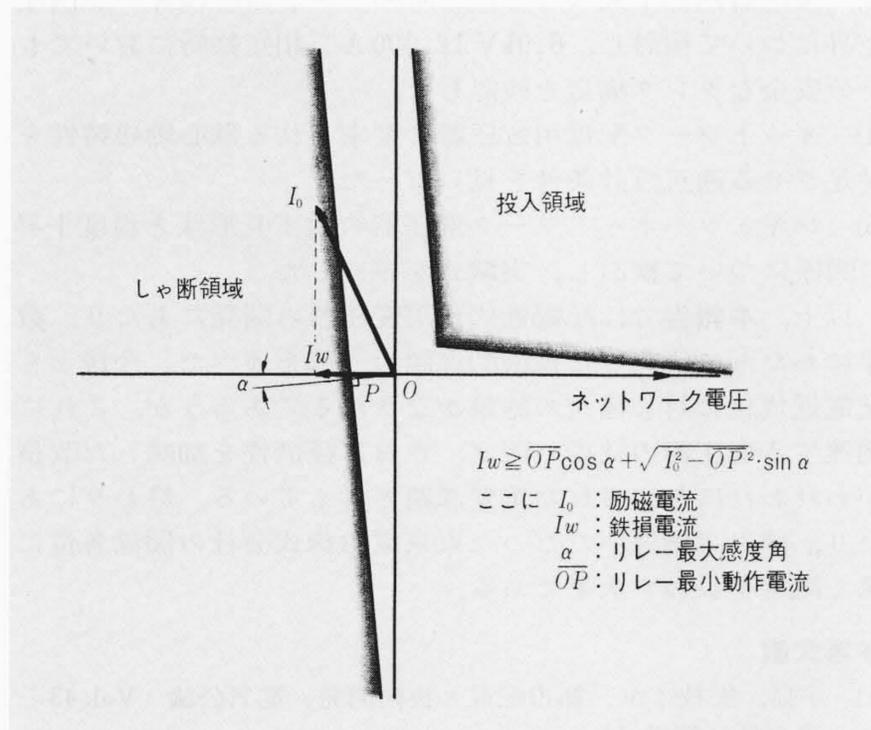


図10 プロテクタリレーの動作領域と変圧器の励磁電流 励磁電流はリレーのしゃ断領域にあるべきことを示す。

Fig. 10 Tripping Area of Protector Relay and Exciting Current of Transformer

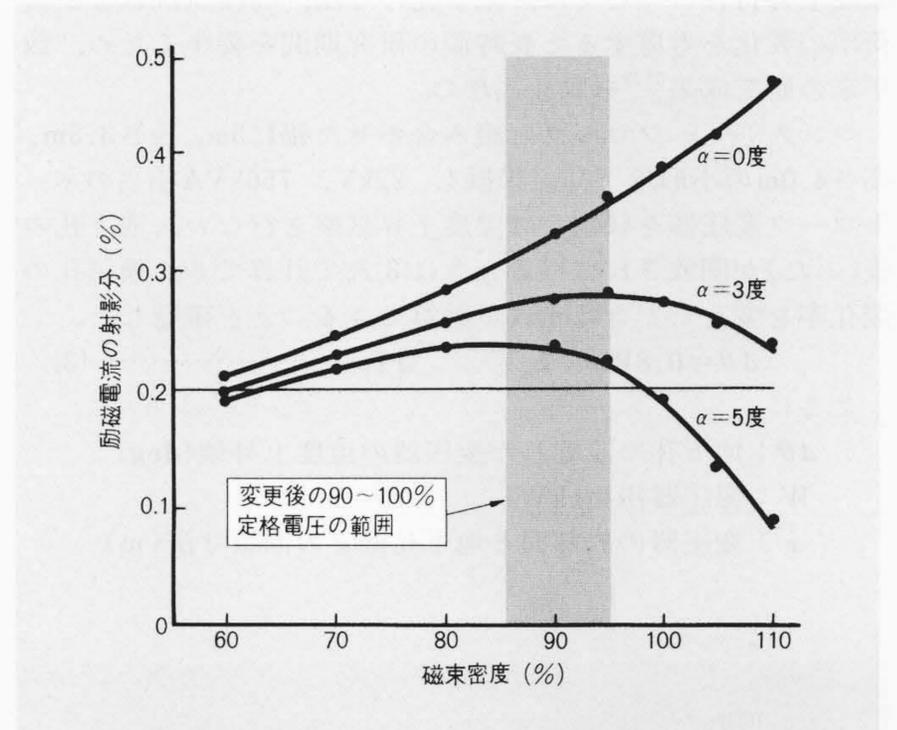


図11 変圧器の励磁特性 変圧器の磁束密度を変えれば満足な励磁特性を得ることを示す。

Fig. 11 Exciting Characteristics of Transformer

耐える。

(3) 停止した回線につながる変圧器を二次側のネットワーク母線から切り離すため, その変圧器に母線から逆流する励磁電流はプロテクタリレーを動作させるに十分な大きさである。

(4) レギュラー ネットワーク変圧器は, 設置場所の地理的条件により歩道下の地下孔に置かれることが多いが, 変圧器の温度上昇に十分な配慮がなされている。

本稿では, このうちネットワーク変圧器として特に重要な励磁特性および温度上昇特性についての研究結果について説明する。

3.1 励磁特性

一般に変圧器の励磁電流は同一設計であっても材料および製作上のばらつきが大きい, 絶対値そのものが定格電流の数パーセント以下であるため, できるだけ小さいことが望ま

しいとするが実用上はそれほど問題にはならない。しかしながら, ネットワーク変圧器においてはプロテクタしゃ断器が逆励磁しゃ断するためには, 励磁電流, 特に鉄損電流が大きいたることが必要で, 図10に示すようにプロテクタリレーのしゃ断領域になければならない。日本電設工業会の技術指針では, 励磁電流のリレー最大感度角への射影分が, 定格電圧の90%励磁の場合でも定格電流の0.2%以上とするよう規定し, リレー最大感度角は0~5度としている。

ネットワーク変圧器の単器容量は500~2,000kVAであるが一般の同容量の変圧器の励磁電流は定格励磁で, 通常1~4%, 母線電圧に対して遅れ70~80度であるため, 低損失のほとんどの変圧器は励磁特性を満足しない。たとえば, 励磁電流が2%, 遅れ80度の場合, 最大感度角5度に対して0.174%となり, 0.2%に満たない。満足な励磁特性を得るには,

- (1) 励磁電流に対して鉄損電流の割合が大きくなるような、たとえば板厚が大きいけい素鋼板を用いる。
- (2) 打抜き鉄心などにより鉄心の接合部の空隙(げき)を減少させる。
- (3) 鉄機械ぎみに設計する。つまり500kVAに対し750kVA相当の鉄心とする。

などの方法が考えられるが、(1)、(2)は特殊な材料や設備を必要とし、(3)はインピーダンス電圧を勘案すると鉄心と巻線との関係が不均衡となるため不経済である。そこで種々な鉄心構造による励磁特性を検討した結果、一般に用いているけい素鋼板でも磁束密度の決め方を変更することにより、所要の特性を満足するものがあることを見いだした。図11はその一例を示すものである。

3.2 温度上昇特性

レギュラーネットワーク変圧器を収納する地下孔は、水道ガス、電話などの配管やその他の埋設物による制約および工事費などの経済的理由によりできるだけ小形化されることが必要である。地下孔小形化に際しては、信頼性、作業性、経済性、変圧器の温度上昇特性などで検討すべき種々な問題があったが、東京電力株式会社との共同研究によりこれらを解決し多くの研究成果を得た。特に地下孔に設置した変圧器の温度上昇特性については、地下孔の寸法、周囲状況および負荷率の変化を考慮すると長時間の研究期間を要するため、数年来の研究成果⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を取り入れた。

コンクリートブロックを組み合わせた幅1.5m、長さ3.5m、高さ4.0mの小形地下孔を模擬し、22kV、750kVA相当のネットワーク変圧器を収納して温度上昇試験を行ない、地下孔の蓋(ふた)が開放されているときは(3)式で計算でき、換気孔の開孔率を変えたときは(4)式で計算できることを確認した。

$$\Delta\theta = 0.8W^{0.096} x^{-0.12W^{0.241}} \Delta T \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

- $\Delta\theta$: 地下孔に設置した変圧器の温度上昇値(deg)
- W : 変圧器損失(kW)
- x : 変圧器の放熱面と地下孔壁との間隙寸法(m)

ΔT : 気中における変圧器の温度上昇値(deg)

$$\Delta\theta\delta = \Delta\theta \left(\frac{\delta}{100}\right)^{-0.24} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

$$\delta : \text{開孔率}(\%) = \frac{\text{グレーティングの面積}}{\text{蓋の面積}} \times \text{グレーティングの開孔率}(\%)$$

図12は(3)、(4)式による計算値と実測値との比較を示すものである。以上の実験式を用いれば、地下孔に設置する変圧器の温度上昇特性および変圧器の有効利用率が計算できるため、地下孔を縮小したときの工事費の推移がわかれば、最経済点を求めることができる。

4 結 言

保護装置内蔵柱上変圧器とネットワーク用変圧器の技術的課題について検討し、設計製作上の問題点に関し次の結果を得た。

- (1) 0.1 μ s 近傍の急峻波領域での標準形柱上変圧器の一次ブッシング閃絡電圧と巻線(油浸絶縁紙)の破壊値は1 μ s近傍における値に比較し、それぞれ200%、120%程度となる。
- (2) 低圧幹線短絡保護と変圧器事故電流しゃ断特性を満足する大容量柱上変圧器内蔵形真空しゃ断器を開発した。
- (3) 変圧器内部事故による短絡時のアークエネルギーと内圧上昇について検討し、6.9kV 12,000 A 三相短絡時においても十分安全なタンク構造を検討した。
- (4) ネットワーク配電用変圧器に要求される鉄心励磁特性を満足させる適正設計条件を見いだした。
- (5) レギュラーネットワーク変圧器の地下孔形状と温度上昇の関係について検討し、実験式を確立した。

以上、本報告では配電近代化用変圧器の開発にあたり、数年にわたって研究した技術的課題の一部を述べた。今後とも配電近代化に対し種々の施策がなされるであろうが、これに関連する変圧器の技術の確立、さらに経済性を加味した改良がわれわれに与えられた重要課題と考えている。終わりにあたり、種々ご指導いただいた東京電力株式会社の関係各位に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 小島, 松枝ほか「都市配電と技術開発」電気公論 Vol.43 第1号(昭42-1)
- (2) 神野, 「過密化に対応する配電設備近代化の動向」電気学会雑誌 Vol.92 No.1(昭47-1)
- (3) 東松, 松室, 「耐熱紙を使用した大容量柱上変圧器の採用」電力 Vol.49 第7号(昭40-6)
- (4) 上田, 「美化装柱用変圧器」電気評論 Vol.53 第5号(昭43-5)
- (5) 上田, 長岡「最近の柱上変圧器について」電気評論 Vol.56(昭46-10)
- (6) 能, 平野「スポットネットワークならびにレギュラーネットワーク配電機器」日立評論 53 123(昭46-2)
- (7) 小沢, 奥山ほか「配電系統の絶縁協調に関する二、三の考察」日立評論 51 813(昭44-9)
- (8) 松村, 上田「シアノエチル化紙の変圧器への応用」日立評論 46 2023(昭39-12)
- (9) P. Altbürger: "Experimentelle Untersuchung des Abshaltungang es Untel Ölbei 6 kV" Arch. f. El, XXI Band p.61~96 (1928)
- (10) 青森, 「地下埋設変圧器の温度上昇」日立評論 51 1099(昭44-12)
- (11) 青森, 「地下埋設変圧器の温度上昇(その2)」日立評論 54 619(昭47-7)

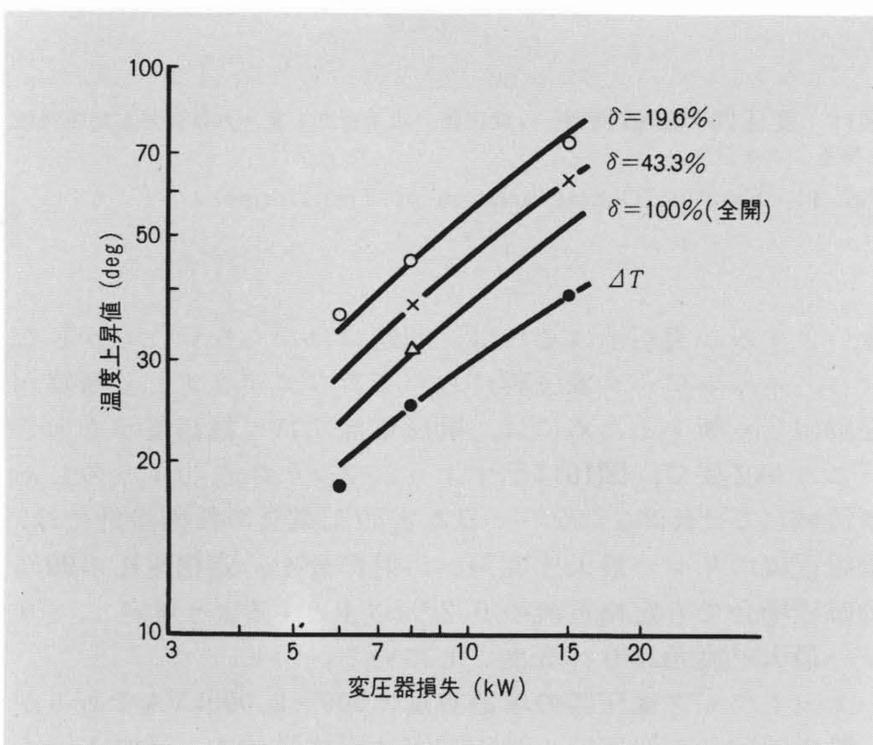


図12 小形地下孔における変圧器の温度上昇特性 変圧器の気中における温度上昇特性と小形地下孔に設置して、換気孔の開孔率を変えたときの実測値と計算値を示す。

Fig. 12 Thermal Performance of Transformer in Small-sized Vault