

配電用変圧器の技術動向と配電近代化用変圧器

Technological Trends of Transformers for Modern Power Distribution Systems

坂本 勝* Masaru Sakamoto

電力会社での最近の配電機器は、都市機能の高度化、都市構造の変化、または生活文化の多様化に合わせた対応が迫られている。このような背景の中で、柱上変圧器に対しても高信頼性、多機能化、高効率化、市街地景観との調和など多くの課題が出されている。日立製作所では長年の技術の蓄積を基にこれらニーズに対応し、配電用機器と変圧器の一体化によって装柱の簡素化を指向した保護機器内蔵変圧器、工事中停電の絶無を期し多機能化を図った工事中変圧器など、各種の配電近代化用変圧器を開発した。開発に当たっては、電力需要の過密な市街地に設置されることを想定し、機器の信頼性を確保するとともに、設置環境に対応した安全性を検証し実用化を図った。

1 緒言

電力各社は、地域社会の電力需要、環境に合致した供給信頼度の高い配電設備の整備に力を注いでいる。一方、施工面から見ると、道路事情の逼(ひっ)迫、工事工数の確保面から配電器材の簡素化、複合化、装柱作業の省力化など多くの改善策が要望されている。さらに経営効率改善策の一環として、配電線損失の低減を意図した柱上変圧器の低損失化など、配電機器に与えられた課題は多い。日立製作所ではこれらのニーズに対応して、長年の柱上変圧器生産によって培われた技術を基に、関連各社の協力を得て各種の配電近代化用変圧器を開発した。開発に当たっては、機器の信頼性確保を最重要課題として取り組むとともに、実用線路で予測される事故現象を分析して再現し、市街地設置に対する各種安全性を検証して実用化を図った。以下、これらの概要について紹介する。

2 配電用変圧器の技術動向

昭和33年、柱上変圧器は方向性けい素鋼帯を鉄心に用いた巻鉄心変圧器の誕生によって、従来の積鉄心構造から大きく変革している。その後鉄心材、絶縁材の改良研究成果が順次実機へ適用化され現在に至っている。主な技術的変遷を次に述べる。

2.1 変圧器構成材の動向

(1) 巻鉄心用鉄心材

変圧器用鉄心にはけい素を約3%含み、低損失特性を得るため素材に張力を与えるように、表面に無機質のコーティン

グを施した方向性けい素鋼帯を用いている。最近では素材の改良によって磁気特性の改善を図るとともに、低渦流損失を指向した薄肉材が量産され、現在の低損失形柱上変圧器では、厚さ0.23mmの鉄損値が0.9W/kg(W1.7T/50Hz)程度以下のものが多く用いられている。さらに特性改善を図るため、新たに開発された機械的に磁区を細分化した極低鉄損方向性けい素鋼板の製品への適用評価を進めており、従来比10%程度の特性改善が図れる見通しである。

一方、従来比25~30%と大幅な低損失化が期待されるアモルファス素材の実用化研究も進められており、変圧器構造、製造技術の開発進行と適用化条件が整備されれば、量産化への動きは早まると考えられる。

(2) 巻線用導体および絶縁紙

高圧巻線に用いられる導体は、二重綿巻銅線からホルマール銅線に移行して以来これが主流である。その後、被覆素材に改良が加えられているが大きな変化はない。低圧巻線を見ると、昭和40年代まで二重綿巻平角銅線が主であった。昭和50年代に入り、絶縁紙に油浸性能改善と生産性向上を意図し、あらかじめ半硬化状のワニスをはん点状に塗布した自己融着絶縁紙(以下、はん点塗工紙と略す。)が採用された。これに伴い30kVA程度以下のものは紙巻平角銅線に換えられていった。これははん点塗工紙のワニス付着厚さが十数マイクロメートルと薄く、絶縁紙と導体の接着力を確保していくためである。紙巻平角銅線採用による絶縁強化も付随効果として期

* 日立製作所中条工場

待された。

一方、50 kVA変圧器程度以上のものは、実フィールドでの短絡事故などを想定した場合、巻線内に発生する電磁機械力に対しはん点塗工紙の接着性では信頼性に欠けると考えられ、軸方向の電磁機械力に有利な条導体の採用へと向かった。また条導体は、巻回する導体の各端面がすべて絶縁油中にさらされており、巻線内の局部過熱を抑制する効果も期待できる。

変圧器の取り扱い作業性改善、装柱容量の拡大に伴う電柱への荷重軽減のため、変圧器の小形・軽量化を指向した“65℃ RISE”変圧器の採用は75 kVA変圧器以上のものに多く見られ、アミン処理を施した耐熱絶縁紙を使用している。今後、装柱作業の自動化、マニピュレータ化を検討していくうえで配電機材の小形・軽量化は必須(す)条件であり、“65℃ RISE”適用変圧器の拡大、さらには新素材の開発による温度上昇限度の格上げを図っていく気運にある。

(3) 変圧器タンク構造

柱上変圧器タンクの基本形状は取り扱い作業性を考慮した円筒形である。20 kVA変圧器程度以上のものは、この周辺に冷却用フィンを取り付けて熱放散を良くしている。75 kVAを超えるものでは、タンク胴部に円形あるいは長円形の断面を持った冷却管や、鋼板をプレス成形した薄形の冷却管を溶接し、絶縁油の循環を図って温度の上昇を抑制している。

昭和52年、他社に先駆けてタンクの冷却構造を所定の鋼帯から連続的に折り曲げ成形する、いわゆる波形冷却構造タンクを実用化し、冷却効率の向上を図るとともに、変圧器の小形・軽量化に大きく寄与した。日立製作所での100 kVAの低損失形柱上変圧器の例では、“65℃ RISE”を採用した効果とあいまって一般形柱上変圧器に比べ容積で68%、質量で75%と大幅な小形・軽量化を達成している。

2.2 配電用変圧器技術開発の変遷

変圧器構成材料の技術開発とともに、電力会社のニーズに合わせ、変圧器および周辺機器の改良、開発を行っている。製品の開発に当たっては、新材料の適合性評価、製造技術の開発、開発機器の実用性検証を進めるとともに、過去の高信頼性機器を提供した実績ある技術を踏まえ、新技術の開発に取り組んでいる。日立製作所で実施した技術開発の内容および今後の方向を図1に示す。

3 配電近代化用変圧器

配電機器は電力流通設備の末端に位置し、需要家に直結するものとして良質かつ安定した電力を供給する重要設備である¹⁾。特に最近では都市機能の高度化、都市構造の変化、生活文化の多様化などへの対応を迫られており、配電用変圧器の分野でもニーズに合致した製品開発が盛んに行われている。日

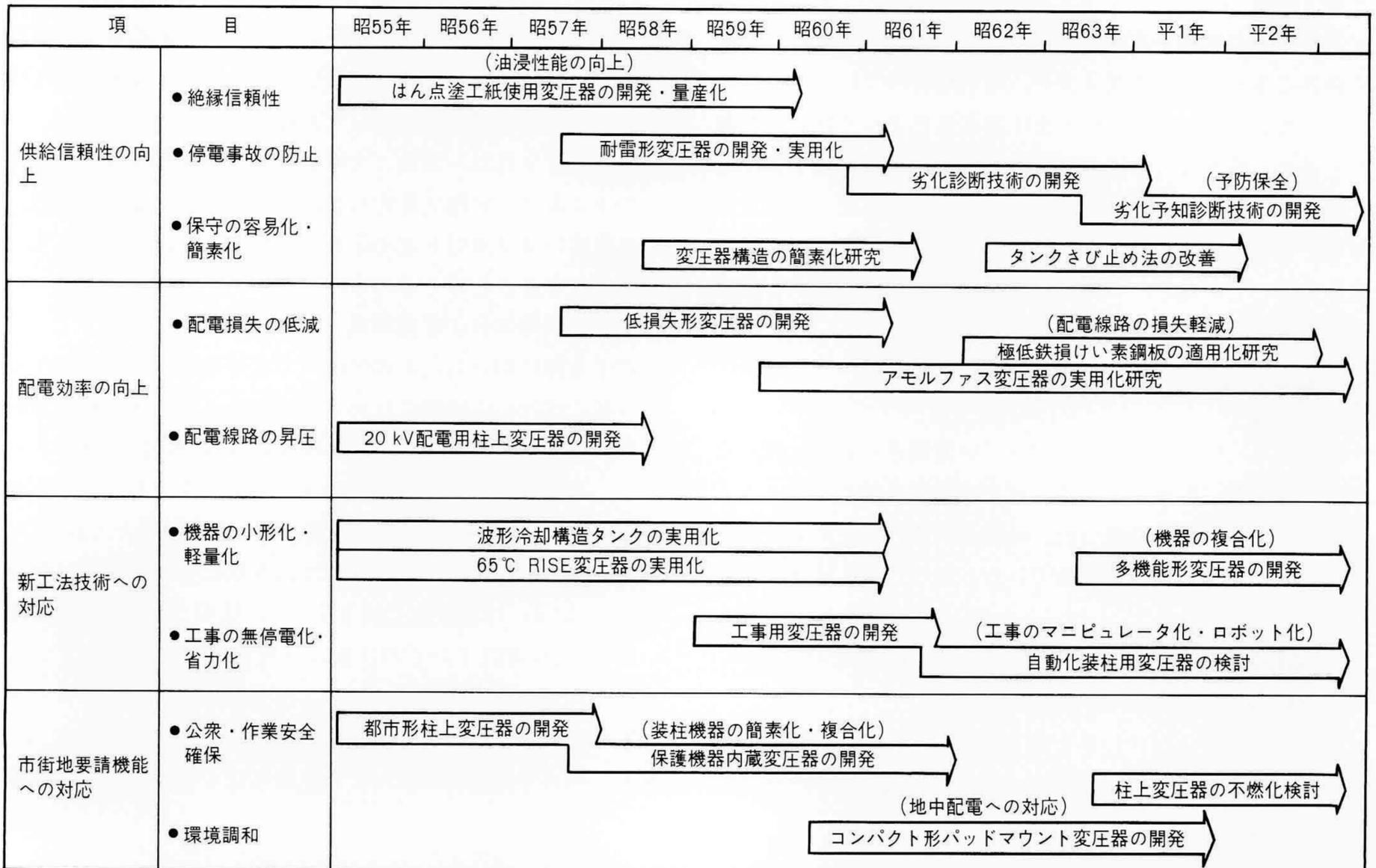


図1 配電用柱上変圧器の技術開発 電力会社のニーズ別に、技術開発内容を集約した。

立製作所では、東京電力株式会社との共同研究を主体に各種の配電近代化用機器を開発し実用化している。以下、これら最近の6kV配電線路に適用されている新しい配電用変圧器の概要について紹介する。

3.1 保護機器内蔵変圧器

保護機器内蔵変圧器は、6kV架空配電での現有技術を結集して開発したもので、装柱機材として高信頼度を確保するとともに、市街地景観の改善を意図して環境調和に配慮し、また装柱形態の簡素化と装柱作業、保守作業の省力化を図ったものである。この変圧器は東京電力株式会社と共同で開発したもので、通常「コンパクト柱上変圧器」と呼称され、構造に関しては特許を出願中である。従来の装柱形態と保護機器内蔵変圧器の装柱形態比較を図2に示す。

3.1.1 仕様および構成

この変圧器は、1台で電灯および動力負荷に対応可能なもので、タンク内に単相変圧器2台を組み込んでいる。また、電柱に別置きされてきた避雷器または高圧カットアウトに相当する耐雷素子、高圧気中開閉器、高圧限流ヒューズを内蔵し多機能化を図っている。高、低圧端子はケーブル引き出しで、充電部は隠ぺい構造とし、工事や保守の安全を確保するとともに、線路側端末は活線着脱可能なプラグイン構造を採用して幹線接続作業を簡素化している。変圧器の仕様を表1に、構成を図3に、内部結線を図4に示す。現在、標準仕様として(20+50)kVA、(30+70)kVAの2機種が実用化されているが、需要過密地区へ適用するため、(50+125)kVAの開発を進めてシリーズ化を図る。

表1 保護機器内蔵変圧器の仕様 二次側105V回路は2回路構成である。

項目	仕様		
	区分	(20+50)kVA	(30+70)kVA
定格容量	U~V間	単相50kVA	単相70kVA
	V~W間	単相20kVA	単相30kVA
定格一次電圧	6,600V		
定格二次電圧	u~0~v間	210-105V(単相三線式用)	
	v~w間	210V	
定格二次電流	u~v間	238A	333A
	u~0間	238A	333A
	v~0間	238A	333A
	v~w間	95.2A	143A
定格周波数	50Hz		
結線方式	異容量V結線三相四線式		

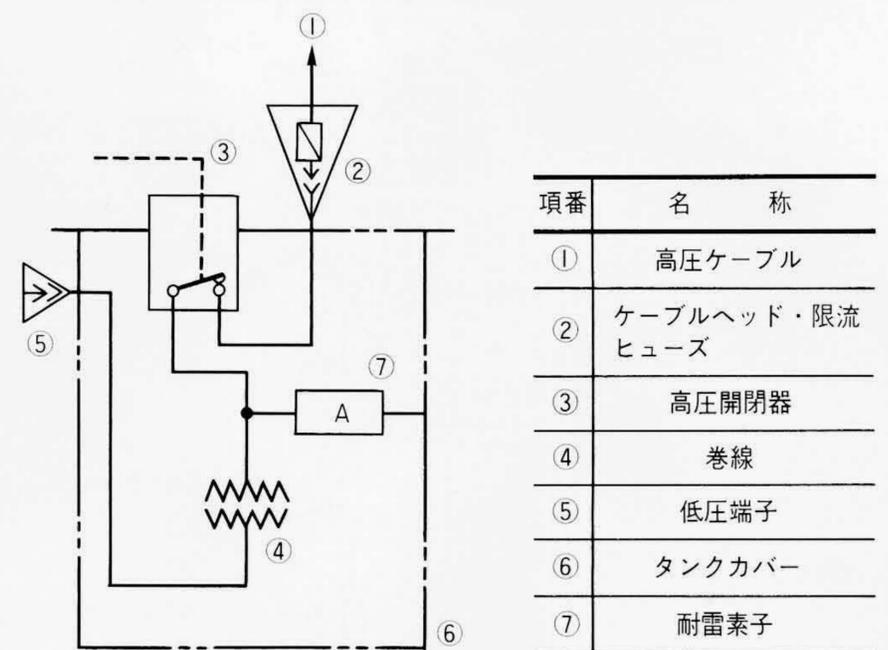


図3 変圧器の構成 内蔵機器を模式化し表示した。

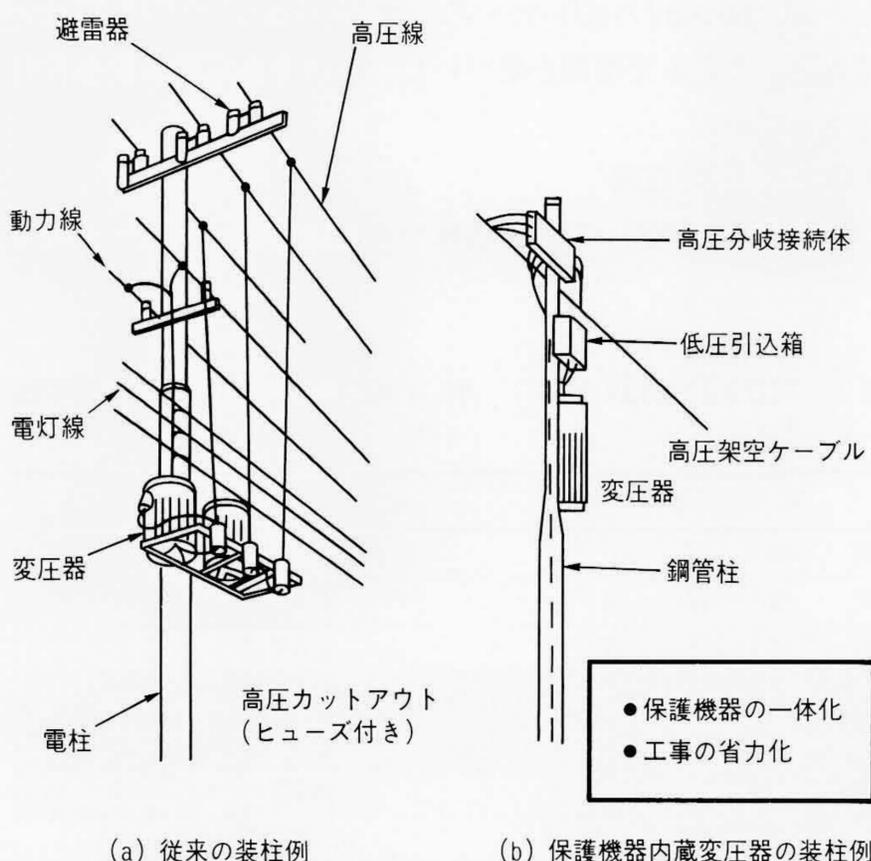
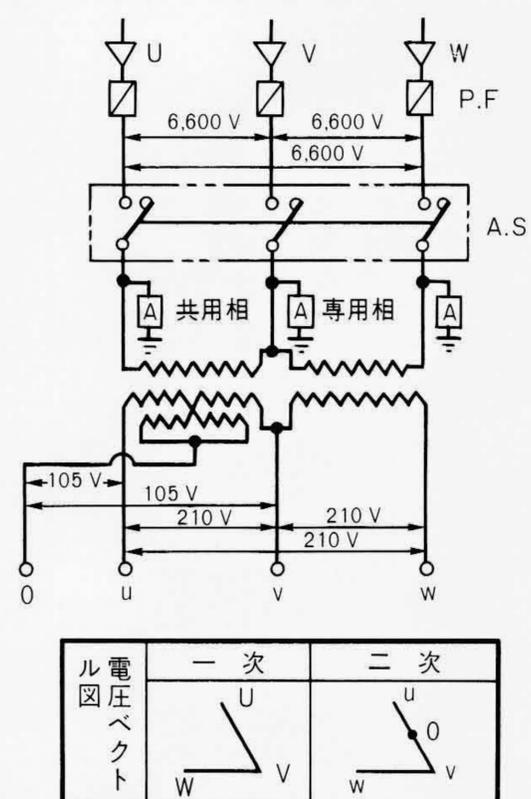


図2 装柱形態比較 従来は単相変圧器2台を使用し、保護機器はそれぞれ別置きとされている。保護機器内蔵形はこれらを一体化した。



注：略語説明 P.F(限流ヒューズ), A.S(気中開閉器)

図4 保護機器内蔵変圧器内部結線 1台の変圧器内に単相器2台を組み込み、単相、三相の両負荷に対応可能としている。

3.1.2 構造および特長

変圧器の外観は、市街地環境との調和を図るため電柱に添う形で極力細径化し、内蔵機器を小形化するとともに変圧器カバーに集約して取り付けました。内部構造を図5に、外観を図6に示す。

(1) 変圧器本体構造

変圧器の鉄心および巻線部は、単相変圧器を2段に重ねV結線とし、下段に位置する共用相から中性線を引き出し単相三線式回路を構成する。鉄心は低渦流損鉄心材である厚さ0.23mmの方向性けい素鋼帯を用いた巻鉄心構造で、低損失化、低騒音化を図っている。巻線部は“65℃ RISE”適用のため耐

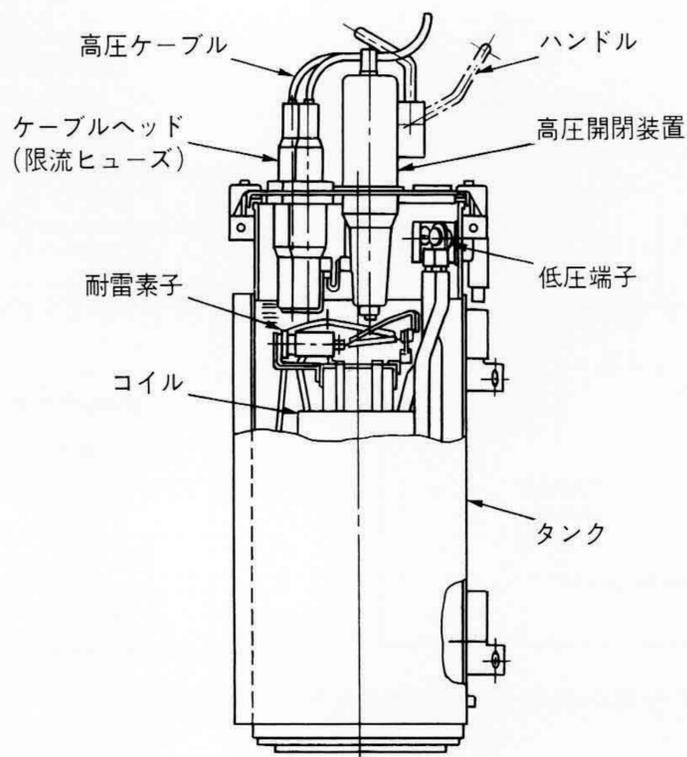


図5 保護機器内蔵変圧器の内部構造 各種保護機器を集約して一体化し、変圧器カバー上に配置してタンク胴部をスリム化している。

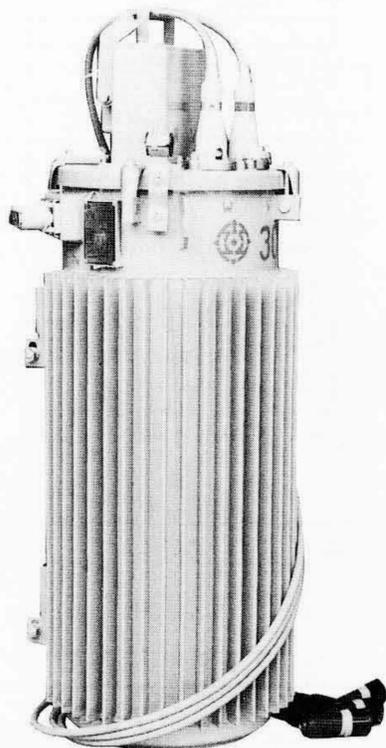


図6 保護機器内蔵変圧器の外観 内蔵機器を変圧器カバー上に集約し、細径化を図った。

熱絶縁紙を基紙としたはん点塗工紙を使用し、共用相の導体には銅条を採用して短絡強度を確保した。

変圧器タンクは細径化が図られているため、内部配線の絶縁を強化し、絶縁信頼性を保持している。

(2) 高圧開閉装置

装柱した変圧器を高圧幹線から引き離し可能なように、高圧気中開閉装置を内蔵している。一般の装柱形態では、高圧引き下げ線を高圧カットアウトを介し変圧器に引き込んでいて、この中に挿入されているヒューズ筒を、各相ごとに着脱することで幹線との切り離しが行われている。この変圧器では、新たに三相一括開閉可能なコンパクト形気中開閉器を開発した。開閉操作は、変圧器カバー上に設けたハンドルを絶縁操作棒によって操作する構造としているが、緊急時の対応を考慮して、直接手で開閉しても危険のないように安全設計としている。

(3) 高圧側端子および保護ヒューズ

高圧側引き出し部はケーブル構造とし、充電部を隠ぺいした安全策をとっている。高圧ケーブルの変圧器側端末用ケーブルヘッドは、タンク内挿入部分に限流ヒューズを内蔵し、変圧器以降の事故の幹線への波及を防いでいる。また、カバー上面部分に永久磁石を利用した溶断表示機構を備え、変圧器外部からヒューズ溶断の有無を確認できる構造とした。一方、線路側端末はエルボ形のプラグイン構造とし、ホットスティックによる活線着脱可能な構造で接続作業の簡素化を図った。

高圧開閉装置の仕様を表2に、断面構造を図7に示す。

(4) 低圧端子

低圧側引き出し部は変圧器容量に応じ、U・V相に325 mm²、W・O相に60 mm²の低圧ケーブルが接続可能なプラグイン構造である。これも充電部を隠ぺいし、活線着脱可能な安全設計となっている。

3.2 工所用変圧器

事業所をはじめ一般の需要家でも最近のコンピュータ関連

表2 高圧開閉装置の仕様 JIS C 4605高圧交流負荷開閉器に準拠している。

項 目		仕 様
定 格	電 圧	7,200 V
定 格	電 流	30 A
絶 縁	階 級	6 A号
開閉能力	負 荷 開 閉	7.2 kV, 30 A, 力率0.7~0.8で50回 7.2 kV, 3 A, 力率0.2以下で20回
	無 電 圧 開 閉	300回
操 作	力	10~25 kg
備 考		限流ヒューズと組み合わせた状態での遮断電流能力12,500 A 実効値1回

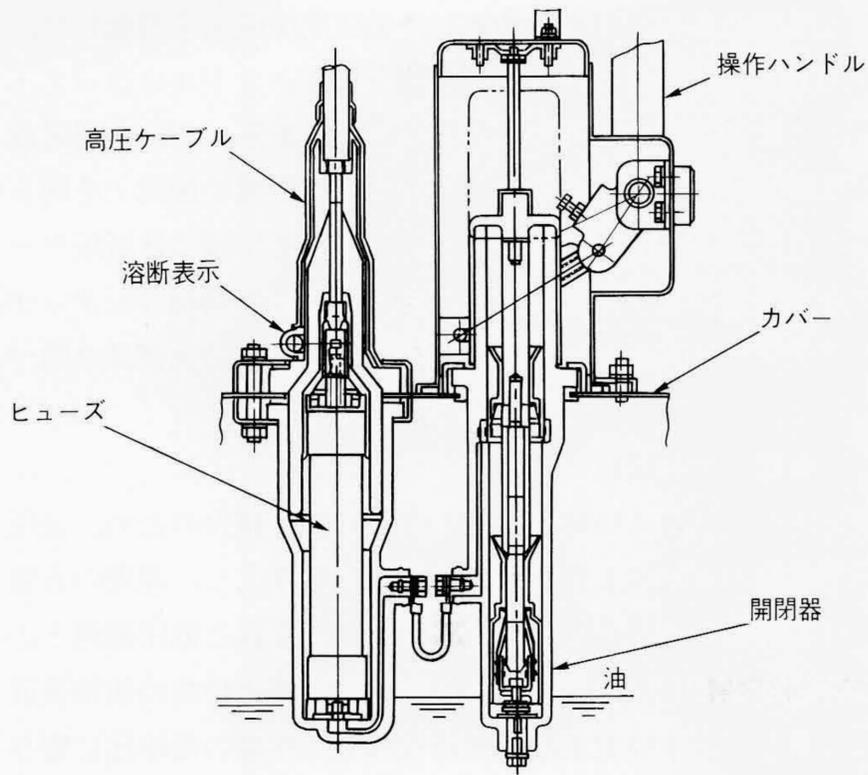


図7 高圧気中開閉器構造 各相ごとに独立した構造で絶縁信頼性を確保するとともに、三相一括開閉が可能である。

表3 工事中変圧器の仕様 内蔵機器仕様の概要を示す。

項目		仕様	
変圧器	定格容量	区分	50 kVA (30+30)kVA
		U ~ V 間	単相50 kVA 単相30 kVA
		V ~ W 間	— 単相30 kVA
	定格一次電圧	6,600 V	
定格二次電圧	u ~ 0 ~ v 間	210-105 V (単相三線式用)	
	v ~ w 間	—	210 V
定格周波数	50 Hz		
結線方式	単相三線式	異容量V結線三相四線式	
定格電圧	7,200 V		
定格電流	30 A		
開閉能力	負荷開閉	7.2 kV, 30 A 力率0.7~0.8	50回
		7.2 kV, 3 A 力率0.2以下	150回
	無電圧開閉	1,000回	
遮断能力	限流ヒューズと組み合わせ12.5 kA×1回		
制限ヒューズ流	定格電圧	7,200 V	
	定格電流	25 A	
	遮断容量	150 MVA	
低圧開閉装置	定格電圧	210 V	
	定格電流	300 A	200 A
	遮断容量	220 V 15 kA	
負荷開閉	220 V 定格電流×300回		

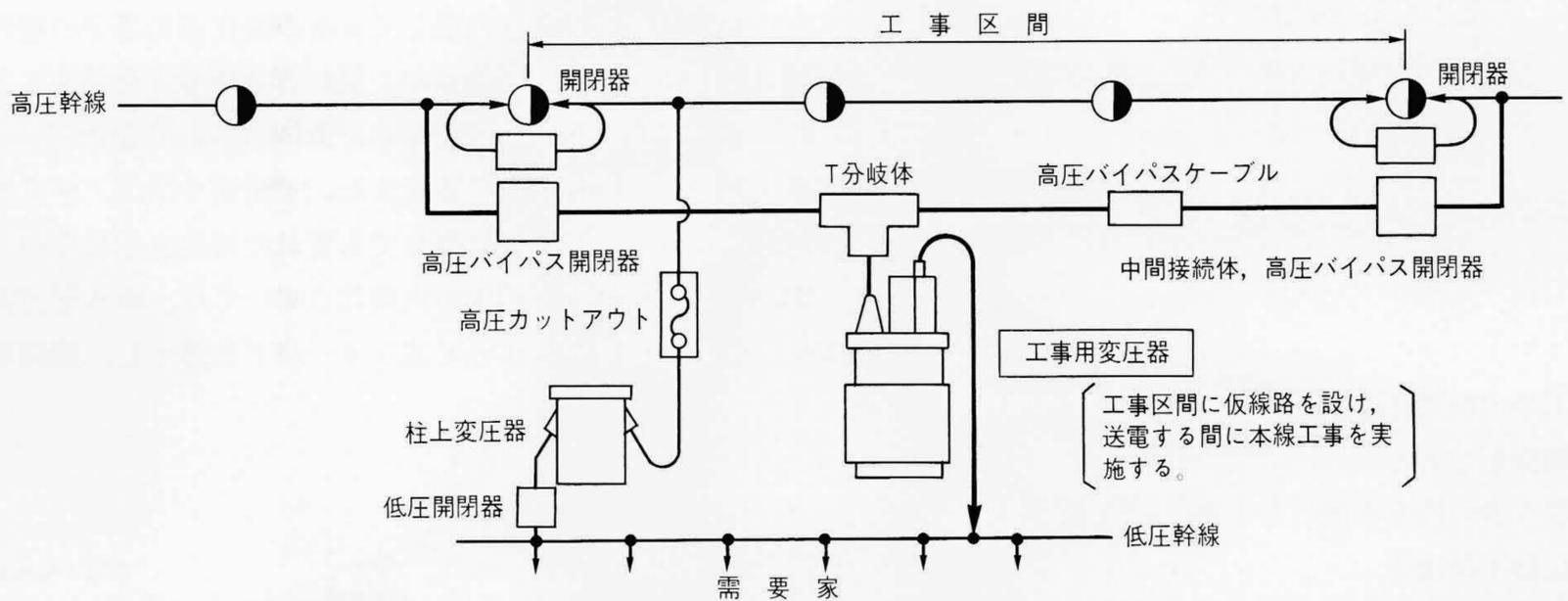


図8 バイパス工法の概要 無停電工法とは、需要家に電気を供給している状態で、工事区間は送電を停止して本線工事を行う工法である。

機器の普及は目覚ましい。また、医療機関などでも機能確保のため瞬時の停電も許されない状況になっている。一方、電力の安定供給を図るため、配電設備の増強または保守・点検作業が避けられない現況下では、各電力会社とも無停電工法の研究を精力的に進めている。東京電力株式会社でもこの研究の一環として、バイパス工法に供する各種機材の開発が進められ、日立製作所では工事中変圧器の共同開発に参画した²⁾。バイパス工法の概要を図8に示す。

3.2.1 仕様および構成

工事中変圧器は先の保護機器内蔵変圧器を基本仕様とし、低圧開閉装置、検電・検相装置を付加して変圧器を構成している。これは工事区間の負荷状況に対応するため、単相専用器と単相変圧器2台を組み込み、V結線による三相四線式の単

相、三相共用器の2系統を開発した。変圧器の仕様を表3に、内部結線を図9に示す。

3.2.2 構造および特長

この変圧器は、変圧器の揚げ替え工事のときなどに工事区間の需要家へ電力を供給するための仮設変圧器とも言え、工事当該柱へ仮固定して使用する場合、または工事車両に積載されたまま使用する場合など、使用・設置個所は多岐にわたる。したがって、一般の変圧器と異なり工事に伴う移動、輸送の多頻度に対応するため次の特長を持っている。

- (a) 作業者の至近距離に設置されるため、機器操作性、安全性の確保を考慮している。
- (b) 移動に伴う輸送振動、取り扱い性を考慮した強度補強策を採用している。

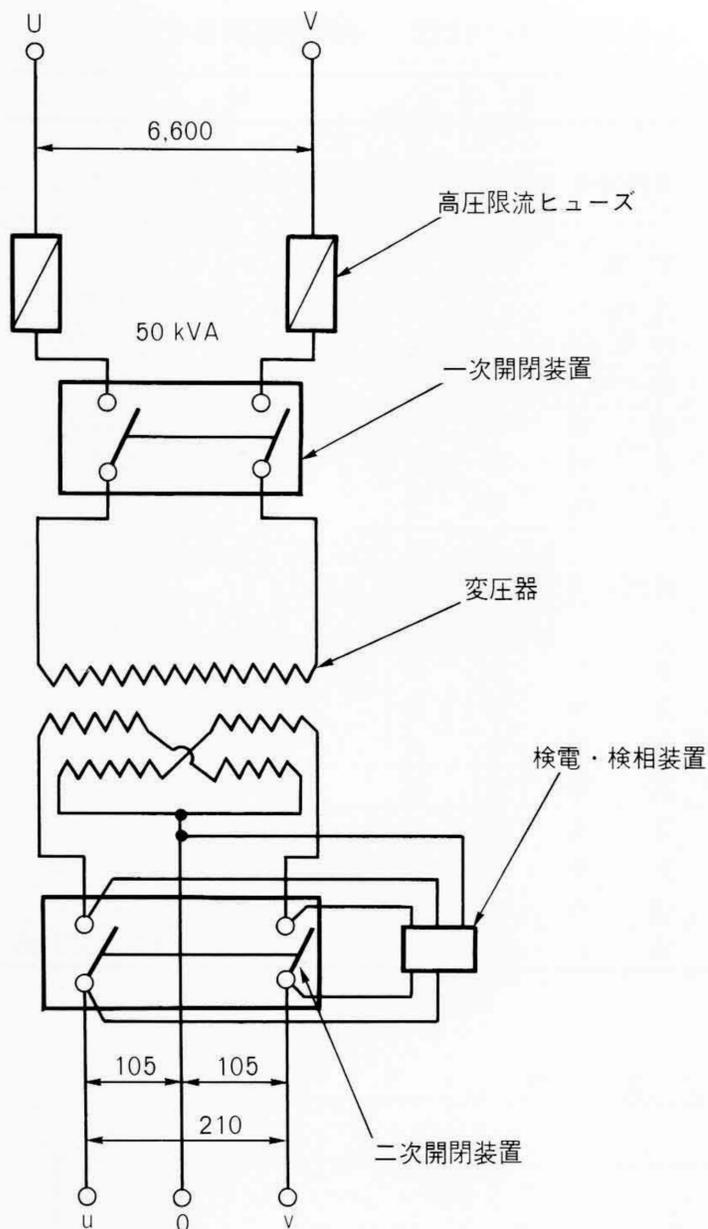


図9 工所用変圧器の内部結線 単相専用器の例を示す。

(c) 工事の簡素化，省力化を意図し，関連機器を一体化した多機能形である。

(d) 取り扱い性を考慮した小形・軽量化構造である。

(1) 変圧器本体構造

変圧器の鉄心および巻線部は，保護機器内蔵変圧器の設計思想を踏襲し，多頻度移動による振動，衝撃力に対処するため鉄心とコイルを絶縁材を介して締結する固定策を講ずるとともに，絶縁強化策を採用している。また，小形・軽量化を図るため耐熱絶縁紙を採用して“65℃ RISE”設計とし，タンクは冷却効率の良い波形タンク構造としている。

(2) 高圧開閉装置および保護ヒューズ

変圧器を幹線へ接続または切り離すため，保護機器内蔵変圧器で開発したコンパクト形気中開閉器を組み込み，また幹線保護用として限流ヒューズを内蔵している。高圧ケーブルは，作業性を考慮し可とう性の良い6.6 kV PNケーブルを使用し，線路側端末はT形分岐体にワンタッチで固定できるプラグイン構造としている。また，中間接続体を利用し延長ケーブルを使用すれば，工事車両に載せた状態でも幹線へ接続可能なように，使い勝手の面にも配慮している。

(3) 低圧開閉装置および低圧端子

低圧側の負荷開閉を目的とし，低圧開閉装置を内蔵した。開閉操作は変圧器カバー上に設けた操作ハンドルによって三相または単相の一括開閉が可能な構造である。また，過電流や短絡電流に対する遮断能力を付加し，保護性能向上を図るとともに欠相防止策としている。一方，低圧端子は低圧ケーブルの接続作業を簡素化するため，高圧側と同様ワンタッチのプラグイン構造とし，安全性を確保するため充電部を隠ぺいした。

(4) 検電・検相装置

低圧ケーブルの誤接続防止と作業の安全確保のため，低圧開閉装置の電源側と負荷側に検電装置を挿入し，課電の有無の目視確認を可能としている。また，変圧器と低圧線路との相回転を確認し，誤接続による相間短絡防止のため検相装置を内蔵して，無停電工法の信頼性向上と作業の効率化に寄与している。

変圧器外観構造として，単相器の例を図10に示す。

3.3 耐雷形柱上変圧器

変圧器の雷サージに対する保護性能を向上させ，配電信頼性確保を目的としたもので，変圧器油中に酸化亜鉛素子を使用した耐雷素子を内蔵している。酸化亜鉛素子の特性については本稿では割愛するが，優れた非直線性を示すことからギャップレス化が可能となり，急峻(しゅん)なサージに対しても即応性を持っている。また，多重雷や間欠アーク地絡などの繰り返しサージに対しても優れた特性を示している。

この耐雷素子の油中内蔵化については，東京電力株式会社との共同研究によって実フィールドを想定し，過酷条件下で

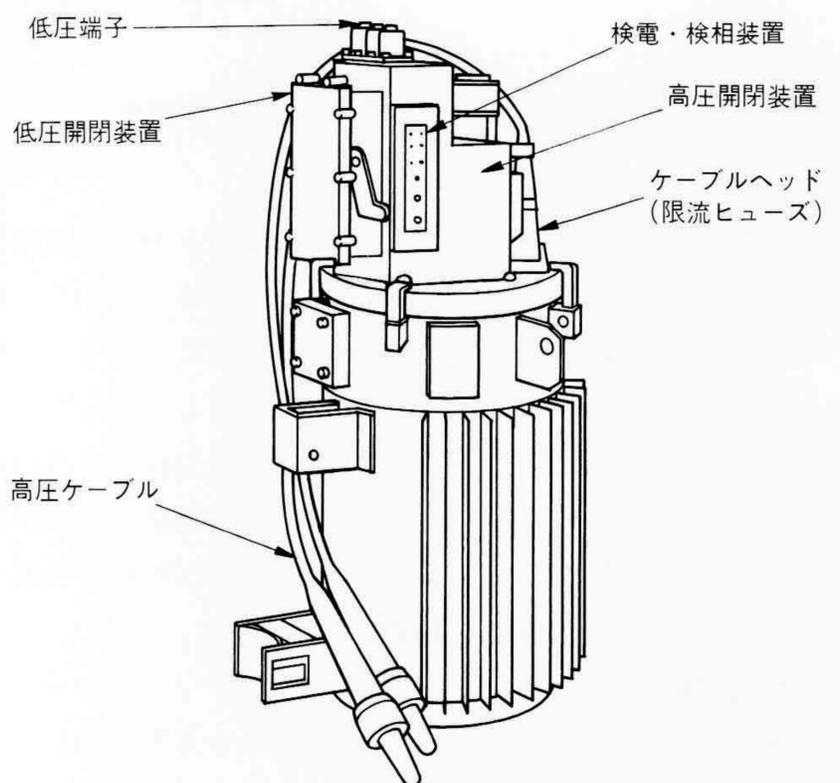


図10 工所用変圧器の外観 単相器の例を示す。これは，電柱へ仮固定する場合および工事車両に積載したまま使用される場合の両方について配慮した構造である。

の各種検証試験，フィールド試験を繰り返して信頼性を確認して実用化し，電力の安定供給面で大きな成果を挙げている。

耐雷素子の構造および性能を図11，表4に，変圧器本体への取り付け状況を図12に示す。

3.4 コンパクト形パッドマウント変圧器

配電線路の地中化対応とし，市街地の路上または公共施設などにパッドマウント変圧器が設置され，市街地景観の改善に寄与している。しかし，道路管理者，地域住民などから機器のさらなる小形化，特に地上高低減の要請が出されている。日立製作所はこれに対処するため，東京電力株式会社との共同研究により，変圧器の小形化を図るとともに，設置作業性，保守性の向上を意図した新たなパッドマウント変圧器の開発に着手した。

3.4.1 仕様および構成

変圧器は，既設の埋め込み架台に設置できる寸法に合わせて極力高さ寸法を縮小するため，コンパクトな内蔵機器を開

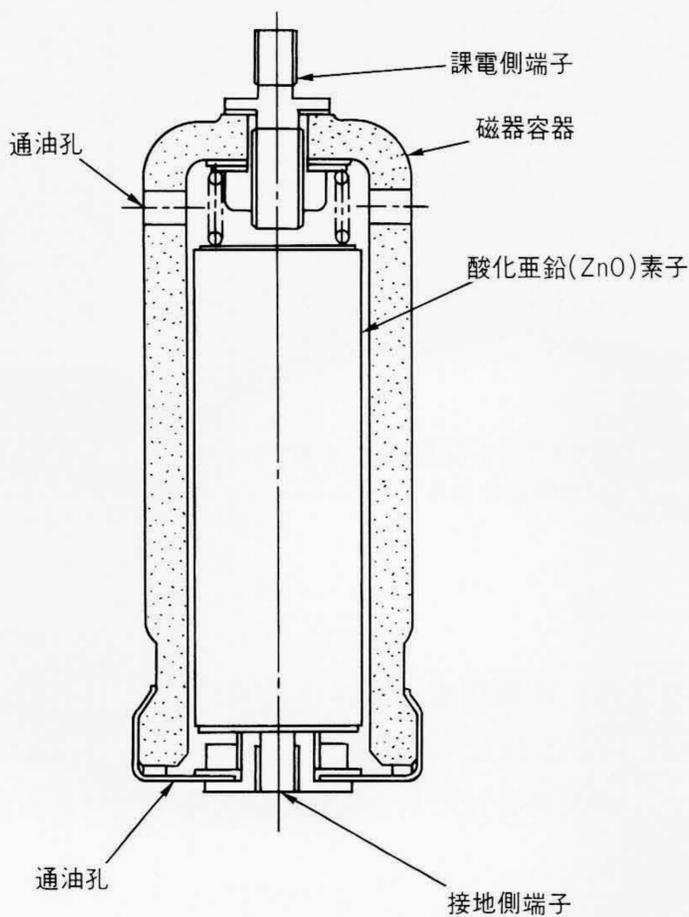


図11 耐雷素子の構造 磁器容器には通油孔を設けて絶縁油が流入する構造とし，内部にZnO素子を組み込んでいる。

表4 耐雷素子の仕様 特性は120℃絶縁油中の特性を示す。

項目	仕様
定格電圧	8,400 V
公称放電電流	2,500 V
動作開始電圧	17,000 V以上(V1mA)
制限電圧	36,000 V以下[2,500 A(8×20μs)]
絶縁階級	6 A号(容器だけ)

注：本表以外の性能は，JEC-217に準拠している。

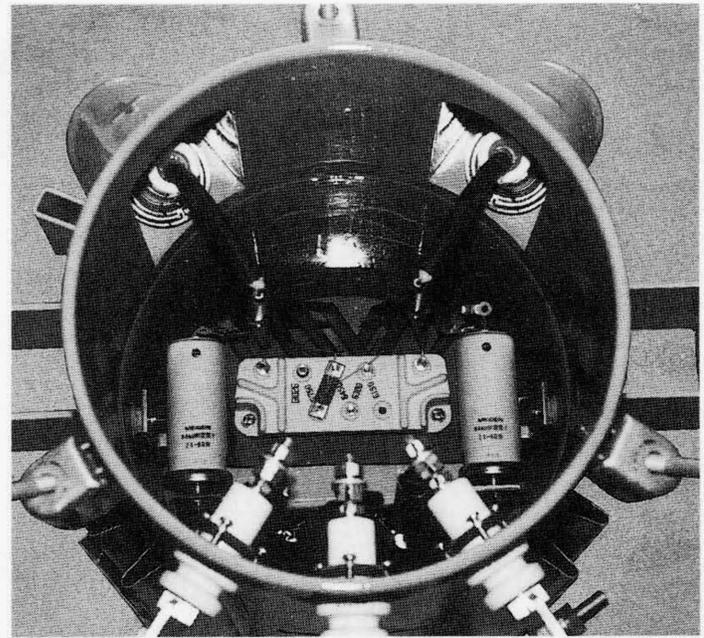


図12 耐雷形変圧器の内部 変圧器絶縁油中に耐雷素子を各相ごとに取り付けられている。

発するとともに機能向上を図った。従来品との寸法比較を表5に，変圧器および内蔵機器の仕様を表6に，内部結線を図13に示す。

3.4.2 構造および特長

変圧器の開発に当たっては，モデル器によるケーブル接続作業性，路上設置を考慮した安全性，長期信頼性など各種の検証試験を実施し，実用器へ反映させている。変圧器の内部構造および外観を図14，15に示す。特長を次に述べる。

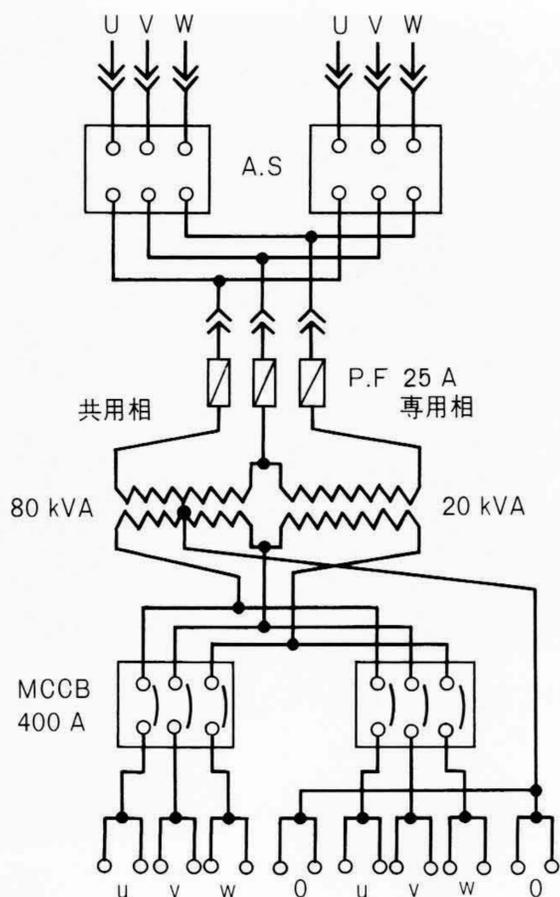
- (a) 設置環境に合わせた機器操作方向を検討し，高压機器は正面(歩道側)，低压機器は側面方向を採用している。
- (b) 高・低压ケーブル引き込み作業性向上を意図し，高压ケーブル接続端末はエルボ形として高压開閉装置上に設け，

表5 パッドマウント変圧器寸法比較 変圧器高さの縮小化を図っている。

区分	幅(mm)	奥行(mm)	高さ(mm)	容積比(%)
従来品	1,100	450	1,450	100
開発品	1,100	450	1,100	76

表6 パッドマウント変圧器および内蔵機器仕様 開発品は従来品の性能を保持し，小形化を図っている。

項目	仕様	
変圧器容量	三相(30+80)kVA異容量V結線三相四線式	
変圧器定格電圧	一次	6.6 kV(タップなし)
	二次	単相210-105 V・三相210 V
高压気中開閉器	7.2 kV・400 Aπ連系開閉可能(三相一括形)	
高压カットアウト	7.2 kV・30 A(限流ヒューズ内蔵)	
高压限流ヒューズ	7.2 kV・25 A遮断容量150 MVA	
低压遮断器	210 V・400 A路上設置仕様	



注：略語説明 MCCB (配線用遮断器)

図13 パッドマウント変圧器の内部結線 変圧器は1台のタンク内に単相器2台を組み込み、単相、三相の両負荷に対応可能としている。

地上高約700 mmを確保している。低圧側も約600 mmの接続作業スペースを確保している。

(c) 高圧ケーブル接続点のエルボ形端末で、接地および回路試験が可能である。

(d) 高圧開閉装置、低圧遮断器は路上設置を考慮した防じん構造である。

(e) 低圧端子は2系統、各2回路の4分岐が可能である。

4 結 言

電力会社向け配電用変圧器を主体に、技術の変遷と最近の配電近代化用変圧器について紹介した。今後いっそう電力の安定供給に寄与し設置環境に調和した機器の技術開発を推進するとともに、電力会社の経営効率向上策の一環として、低損失化、工事の省力化を指向した機器の開発要請に対応していく考えである。特に、配電線路損失の大幅低減を目的としたアモルファス変圧器は、実用線路に装柱されフィールド試験を実施中であり、実用化に向かって生産体制を整えていく。

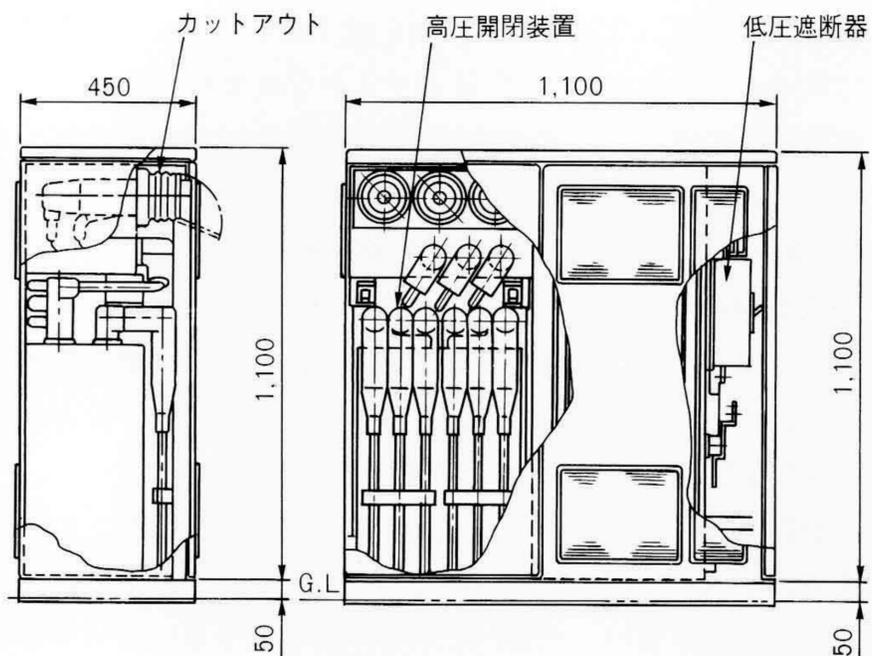


図14 パッドマウント変圧器の内部構造 高圧側は π 連系の2回路開閉、低圧側は2系統各2回路の4分岐可能となっている。

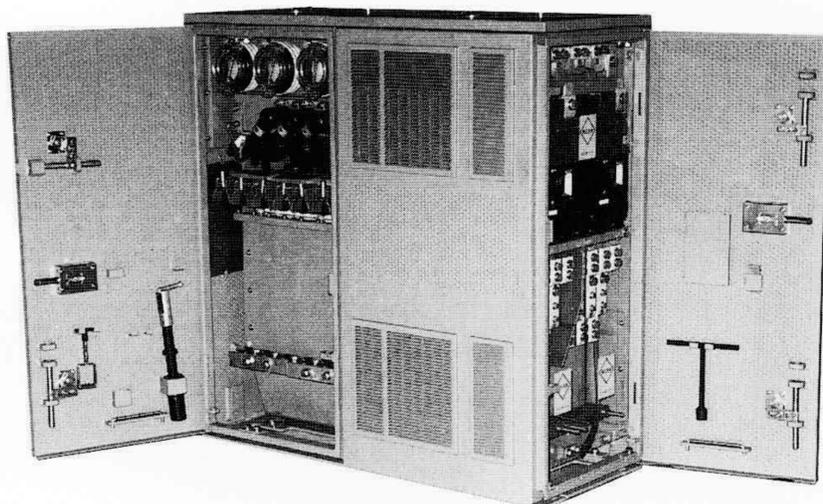


図15 パッドマウント変圧器の外観 高圧機器操作は正面(歩道側)、低圧機器操作は側面となる。

終わりに、配電用変圧器の技術開発と実用化に当たり、終始ご指導・ご支援をいただいた東京電力株式会社殿をはじめ、電力会社の関係各位に対し厚くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 電気協同研究会：配電設備の技術動向，電気協同研究，第42巻，第1号，6～15(昭61-7)
- 2) 坂本，外：無停電工事の新テクニック，電気計算，第55巻，第10号，55～61(昭62-7)