

A prototype of 3-phases, 60 Hz, 275 kV, 250 MVA on-load tap-changing transformer has been built to 3-phase full scale. The results of the performance test disclosed a good consistency with the design values.

The feature of the iron core, coils, insulations, cooling units and the countermeasures for leakage flux, which are critical to a high impedance transformer, are described. And the results of analytical calculations performed in the designing and studying are also introduced.

1 まえがき

当社は、昭和49年に大形変圧器工場を建設し、以来着々と実績を重ね、154kV級については、既に100台余を納入し、いずれも順調に運転されている。

275kV級の実績については、容量50MVAに留まっておき、より大容量のものを製作する機会を伺っていた。このたび、これまでに得られた数々の経験と技術を基に、275kV 250MVAの負荷時タップ切換変圧器のプロトタイプ器を、3相実規模にて製作し、優秀な成績を得た。

最近、コンピュータによる電界、磁界等の解析技術が著しく発達し、従来経験または実験に頼っていたところを、定量的に精度よく把握することができるようになった。そして電気機器設計の分野においても、これらの解析技術が大きな役割を果たしている。本器の製作に当たってこれを全面的に取り入れ、合理的な設計を行うことができた。

以下試作器の概要並びに解析結果の一端について紹介する。

2 仕様

- (1) 形式 屋外用3相送油風冷式負荷時タップ切換装置付
- (2) 周波数 60Hz
- (3) 容量 250MVA
- (4) 電圧 1次 300~R275~243.8kV (19タップ)
2次 77kV
- (5) 絶縁階級 1次線路側 200号 (LIWL 1,050kV)
1次中性点 80号 (LIWL 450kV)
2次 70号 (LIWL 400kV)
- (6) インピーダンス電圧 22%

*1 変圧器事業部 設計部 *3 変圧器事業部 品質保証部
*2 変圧器事業部 技術部

3 設計諸元

設計諸元は下記のとおりである。ただし、高さ寸法は500号ブッシングを装着した場合の値である。

また、完成姿を図1に示す。

(1) 無負荷損	120kW
(2) 負荷損	694kW
(3) インピーダンス電圧	22%
(4) 騒音レベル	75ホン (本体)
(5) 総重量	228 t
(6) 油量	53.5 kl
(7) 輸送重量	140 t
(8) 寸法	
幅	9,220mm
奥行	11,520mm
高さ	9,300mm

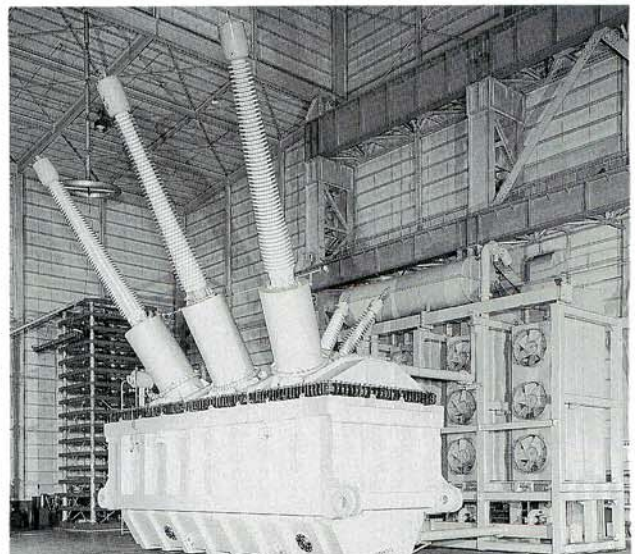


図1/275kV 250MVA 負荷時タップ切換変圧器
Fig. 1/275kV 250MVA on-load tap-changing transformer

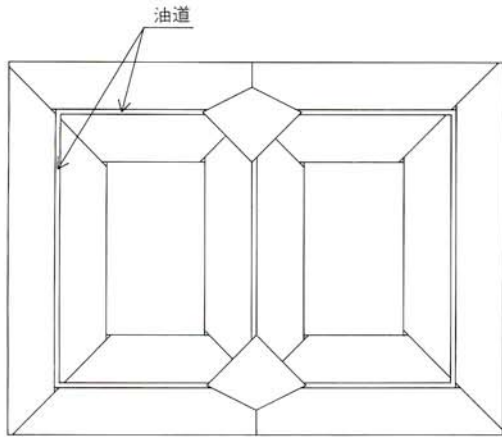


図2/二重額縁形鉄心
Fig. 2/ Split core

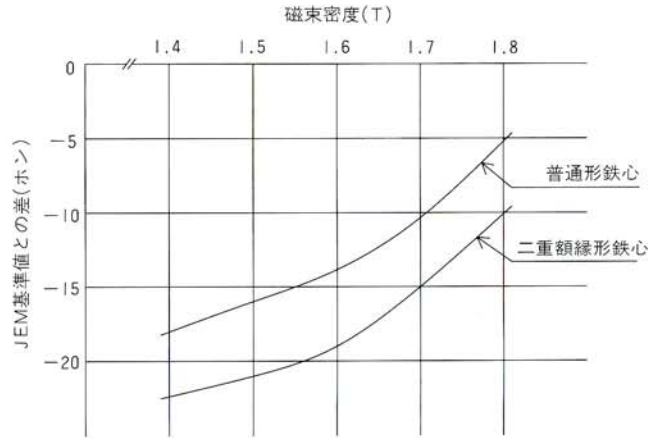


図3/騒音特性
Fig. 3/Noise characteristics of core

4 試験結果

特性試験結果は下記のとおりで、設計値に対し極めて高い整合性を示した。

- | | |
|---------------|---------|
| (1) 効 率 | 99.67% |
| (2) 無負荷損 | 123kW |
| (3) 負 荷 損 | 698kW |
| (4) インピーダンス電圧 | 21.5% |
| (5) 零相インピーダンス | 19.5% |
| (6) 温度上昇 油 | 33.0°C |
| 高圧巻線 | 48.3°C |
| 低圧巻線 | 50.2°C |
| (7) 騒 音 | 72ホン |
| (8) 補 機 損 | 17.95kW |

5 構 造

5.1 鉄 心

(1) 構 造

鉄心には、高品質の冷間圧延方向性珪素鋼板(G6H, 0.3mm厚)を使用し、二重額縁形を採用した。

これは図2に示すように脚部、継鉄部とも、幅方向に2分割され、それぞれ中央に油道を有しており、且つ、中央脚の上下には菱形形状の鉄心が配置された独特の形状である。

この二重額縁形鉄心の特長は次のとおりである。

- ① 菱形状鉄心の寸法を最適値に選択することにより、各部の磁束分布がほぼ均一化されるため、素材の特性を損うことがなく、鉄損増加率を、最大でも10%以下に抑えることができる。
また同様に騒音、振動も小さい。
- ② 珪素鋼板の幅が1/2になるため、鉄心中央部の温度

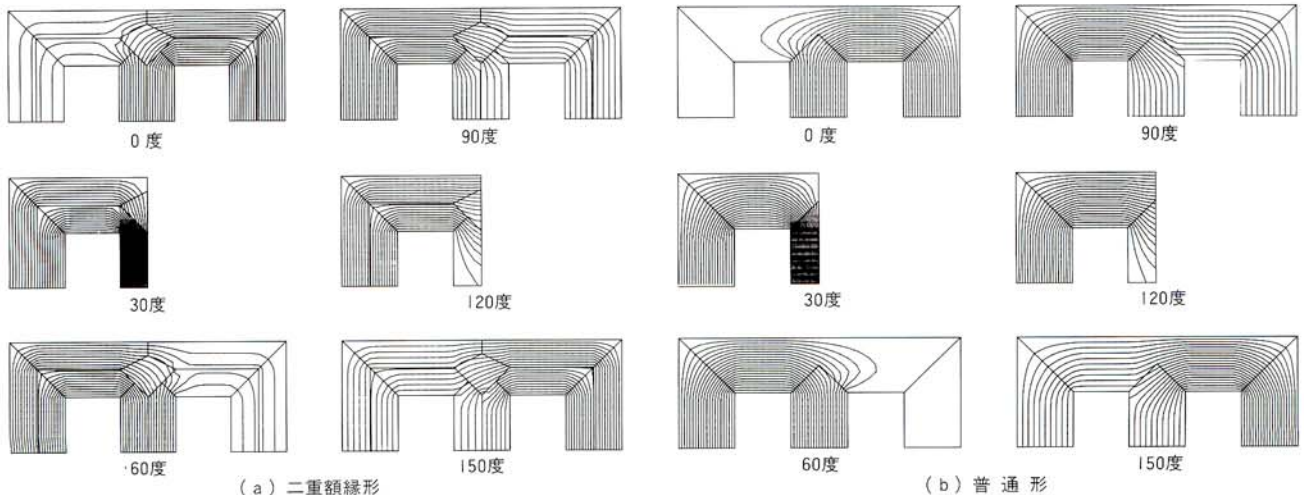


図4/磁束分布計算結果
Fig. 4/Calculated results of flux distribution in core

上昇は1/4に低減されるほか、漏洩磁束による局部過熱をも防止できる。

③ 珪素鋼板の熱伝達特性は、積層方向の熱伝導度に比べ、積層と直角方向の熱伝導度が著しく高いため、冷却が良好である。

(2) 騒音特性

磁歪特性にも優れた珪素鋼板G6Hの使用と、前述の二重額縁形鉄心の採用により、磁束密度を低減することなく72ホンを得ることができた。

一般に、当社二重額縁形鉄心の場合、図3に示すように、JEM規格の騒音基準値より10~20ホン低減でき、普通形鉄心に比べても5ホン程度低くなる。

(3) 磁束分布

二重額縁形鉄心は前述のように多くの利点を持っているが、内外に分割されているため、磁束の分流状況について十分把握しておく必要がある。

磁界の計算には通常有限要素法が用いられる。二次元磁界の場合、z方向の電流密度及びベクトルポテンシャルをそれぞれJ, A, 鉄心のx, y方向の磁気抵抗率を ν_x, ν_y とし、渦電流を無視するものとすれば(1)式が成立する。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_y \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_x \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad \dots\dots(1)$$

これは、(2)式の汎関数Aを最小にするAを求めることと等価になる。

$$A = \frac{1}{2} \iint \left[\nu_y \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \nu_x \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \iint J A dx dy \quad (2)$$

(2)式より系の離散化方程式を作り、ベクトルポテンシャルAを計算する。また磁束密度Bは(3)式で与えられる。

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \quad \dots\dots(3)$$

上記により磁束分布を計算した結果を図4(a)に示す。この場合、鉄心内外周部の磁束の不均衡は6%程

度で、普通形鉄心に比べ約半分になる。なお図4(b)には普通形鉄心の場合についても示した。

図4から、二重額縁形鉄心ではコーナー部において磁束の乱れの少なくなることが分かる。

5.2 巻線

(1) 構造

巻線は、内側から2次(低圧側)、1次(高圧側)、1次粗タップ、1次密タップ巻線の順に同心配置され、粗タップ巻線以外はディスクコイルとした。

本器は、22%という高インピーダンス器のため、特に漂遊損低減に最大ウエイトを置き、密タップ巻線以外は転位導体を使用している。

一方、耐雷対策としては、インターリーブ巻を採用した。

(2) 雷インパルスによる内部電位振動

変圧器に雷インパルスが印加された場合、変圧器巻線の自己リアクタンス、相互リアクタンス、巻線間の直列キャパシタンス及び対地キャパシタンスにより、内部に電位振動が発生し、局部的に大きな電圧の発生する可能性がある。従ってこの電圧を正確に把握することが絶縁設計上重要となる。

内部電位振動の計算は図5の等価回路により行う。

図5において、各コイルの自己リアクタンスを $l_{11}, l_{22} \dots\dots$ 、コイル間の相互リアクタンスを $l_{12}, l_{13} \dots\dots$ 、コイル間の等価キャパシタンスを $k_{01}, k_{12} \dots\dots$ 、コイルと大地間のキャパシタンスを $k_{11}, k_{22} \dots\dots$ 、また各コイルに流れる電流を $i_1, i_2 \dots\dots$ 、接続点の電圧 $e_0, e_1 \dots\dots$ とすれば、(4)、(5)式が成立する。

$$i_1 - i_2 = -k_{01} \frac{de_0}{dt} + (k_{01} + k_{11} + k_{12} + \dots + k_{1n}) \frac{de_1}{dt} - k_{12} \frac{de_2}{dt} \dots - k_{1n} \frac{de_n}{dt} \quad \dots\dots(4)$$

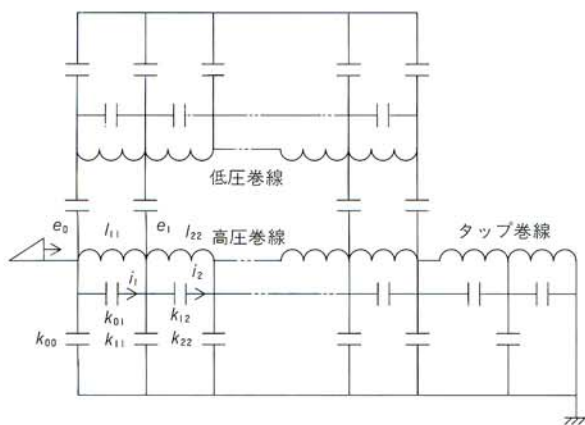


図5/等価回路(電位振動計算用)

Fig. 5/Equivalent circuit for calculation of voltage distribution

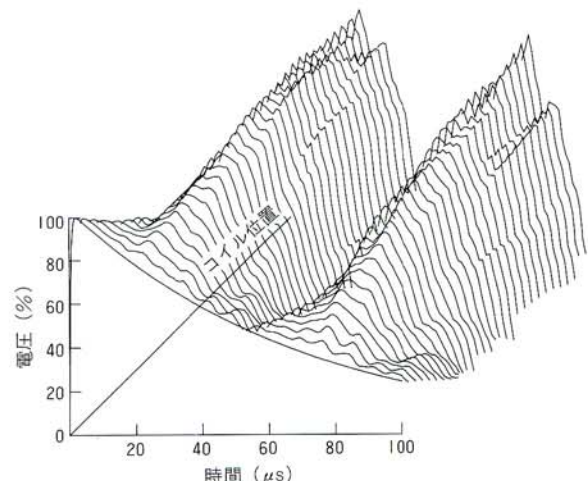


図6/電位振動波形(標準波)

Fig. 6/Calculated result of voltage distribution on HV winding (Standard wave)

$$e_0 - e_1 = l_{11} \frac{di_1}{dt} + l_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + l_{1n} \frac{di_n}{dt} \dots (5)$$

(4), (5)式を整理してマトリクスの形に表示すれば、(6)式の如くなる。

$$LK \frac{d^2 E}{dt^2} + (LG + RK) \frac{dE}{dt} + (X + RG)E = LK_0 \frac{d^2 E_0}{dt^2} + Rk_{01} \frac{dE_0}{dt} + E_0 \dots (6)$$

(6)式においてL, Kはリアクタンス及びキャパシタンスの係数マトリクス, Rはノード間の抵抗マトリクス, Gはノード大地間のコンダクタンスマトリクス, Xはノード電圧の係数マトリクス, Eはノード電圧, E₀は印加電圧を表す。なお, 簡単のため(4), (5)式においては, 抵抗分を省略した。

図6は計算結果で, 横軸に時間, 縦軸に電圧をとり, 奥行方向にコイル位置をとって示したものである。また計算条件は下記の如くである。

- 印加電圧 標準波 (1.2×50μs)
- 中性点接地
- タップ位置 最低タップ (19)

図6は標準雷インパルスによる計算例であり, 一般的な絶縁設計はこれを基準として行っている。しかし, 実際の送電線路においては, 多種多様な雷に遭遇するため, あらゆる場合に対して検討しておくことが必要である。最近ではEMTP (Electro Magnetic Transient Program) により, 変圧器に侵入する雷サージをかなり精度良く算出出来るようになったので, それに対する検討も合わせて行っている。

5.3 絶 縁

(1) 構 造

絶縁構成は, 各部とも油狭小ギャップと絶縁物の交互配置を主体としている。シリンダーやスペーサ等の絶縁物は, 通常のプレスボードより密度が約10%大き

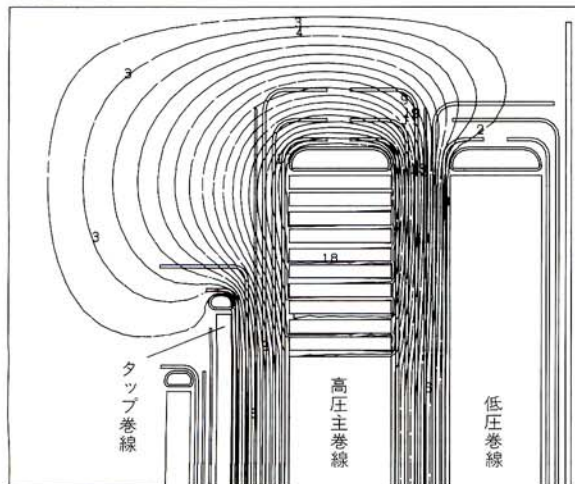


図7/電界分布計算結果
Fig. 7/Calculated result of electric field

い高密度プレスボードを使用している。また巻線端部にはアングルリング, アングルキャップ等を配置し, これらによって優れた電氣的・機械的特性を発揮することができる。

各絶縁物は, 図7に示すように極力等電位面に沿うように配置され, 沿面方向に電界ストレスが加わらないよう注意を払っている。

(2) 電界計算

変圧器巻線にかかる電圧ストレスとしては, 商用周波電圧によるものと, 雷サージによるものとがある。前者は巻線内に平等に分布するため, 最大電界強度の計算は比較的容易であるが, 後者は前述のように時間と共に複雑な電位振動が発生するため, 最大電界強度とそれの発生する場所の算出はかなり複雑になる。そのため内部電位振動計算で求めた各コイル毎の電位を固定値として与えて計算し, 更に局部的に各ターン毎に電位を与えて詳細に計算する方法を採った。

電界解析の手法としては, 大別して領域分割法(差分法, 有限要素法), 境界分割法(電荷重畳法, 境界要素法)があり, それぞれ一長一短があるが, 今回は磁界解析と共通部分の多い有限要素法を採用した。

二次元電界の場合, ポテンシャルをφ, 誘電率をεとすれば, (7)式が成立する。

$$\epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \dots (7)$$

これは(8)式の汎関数Aを最小にするφを求めることと等価になる。

$$A = \frac{1}{2} \iint \epsilon \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \dots (8)$$

(8)式より系の離散化方程式を作り, ポテンシャルφを計算する。また電界強度Eは,

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \dots (9)$$

図7に計算結果を示す, 計算条件は次のとおりである。

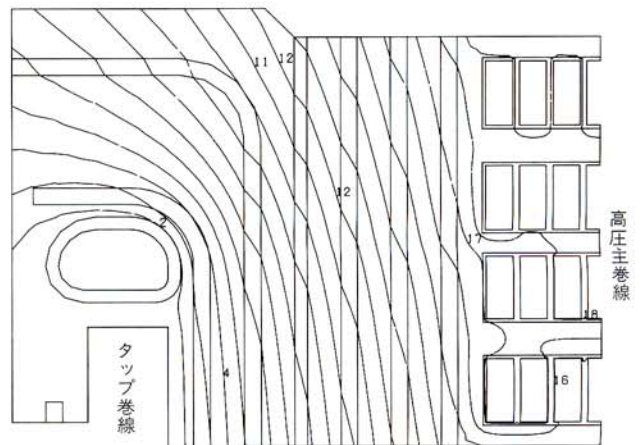


図8/電界分布計算結果(詳細)
Fig. 8/Calculated result of electric field (Detail)

印加電圧 標準波 ($1.2 \times 50\mu\text{s}$)
 中性点 接地
 タップ位置 中間タップ (10)
 時間 $7\mu\text{s}$

この場合電界強度は、主巻線のタップ巻線に対向する部分で最大となったため、更にこの部分だけ詳細に計算した結果を図8に示す。

5.4 冷却

(1) 冷却器

送油風冷式ユニットクーラ6組を使用している。各相コイルが等しく冷却されるよう、相ごとに2組ずつを効果的に配置した。そのため、各相別々に測定された巻線の平均温度上昇値の相間の差は 0.5°C 以内で、誤差の範囲であった。

また、流動帯電については、別途モデル試験を実施し、各コイルの油流入口付近における油流速を、漏洩電流の温度特性をも考慮して、十分安全な値に設定した。

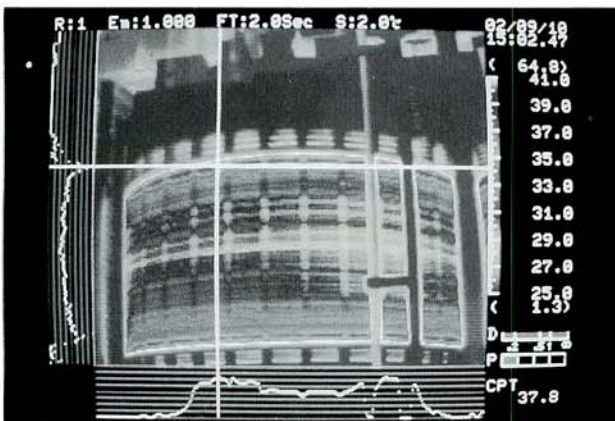


図9/サーモグラフィによる測定例

Fig. 9/An example of temperature measurement by thermography

(2) 巻線の冷却

いわゆるジグザグ・フロー冷却方式を採用しており、1次、2次巻線共、数コイルごとに内径側、外径側交互に仕切を挿入し、油流の向きを反転させている。仕切の挿入位置は、油が各コイルに極力均等に流入するよう、流体解析を行って決定している。

この流体解析については、別の機会に報告する。

5.5 漏洩磁束対策

前述のように、本器は22%という高インピーダンス器であり、種々漏洩磁束に関する検討を行い、各部の構造・材料の選定には細心の注意を払っている。採用した漏洩磁束対策の中から数例を説明する。

なお、これらの対策の効果は、サーモグラフィによる直接温度観測や漏洩磁束実測等によって、予測値との整合性も含めて確認されている。

(1) 鉄心

5.1項に述べたように、鉄心は幅方向に2分割されており、鉄心表面に侵入する漏洩磁束による渦電流が

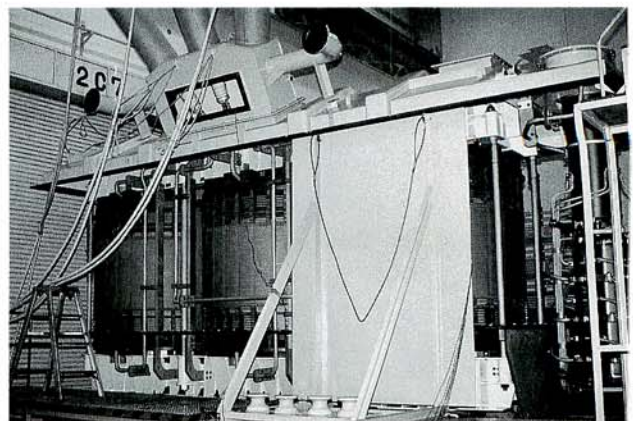


図11/磁束量測定風景

Fig. 11/A scene of flux measurement

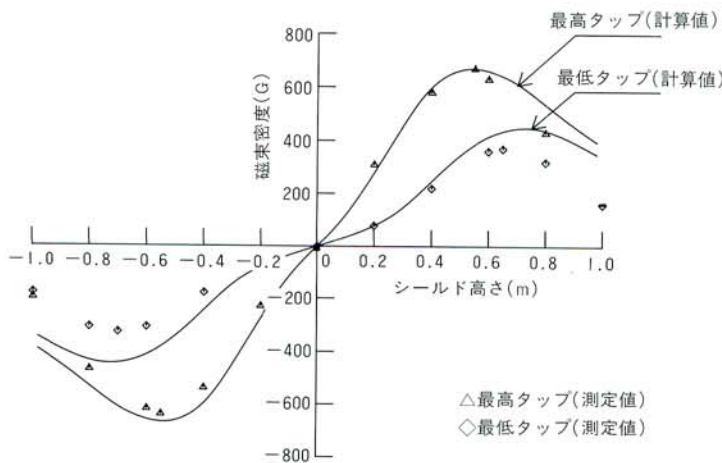


図10/タンクシールド表面磁束密度

Fig. 10/Flux density on the surface of tank shield

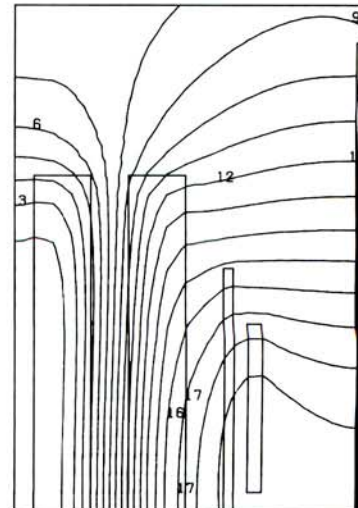


図12/磁束分布計算結果

Fig. 12/Calculated result of flux distribution

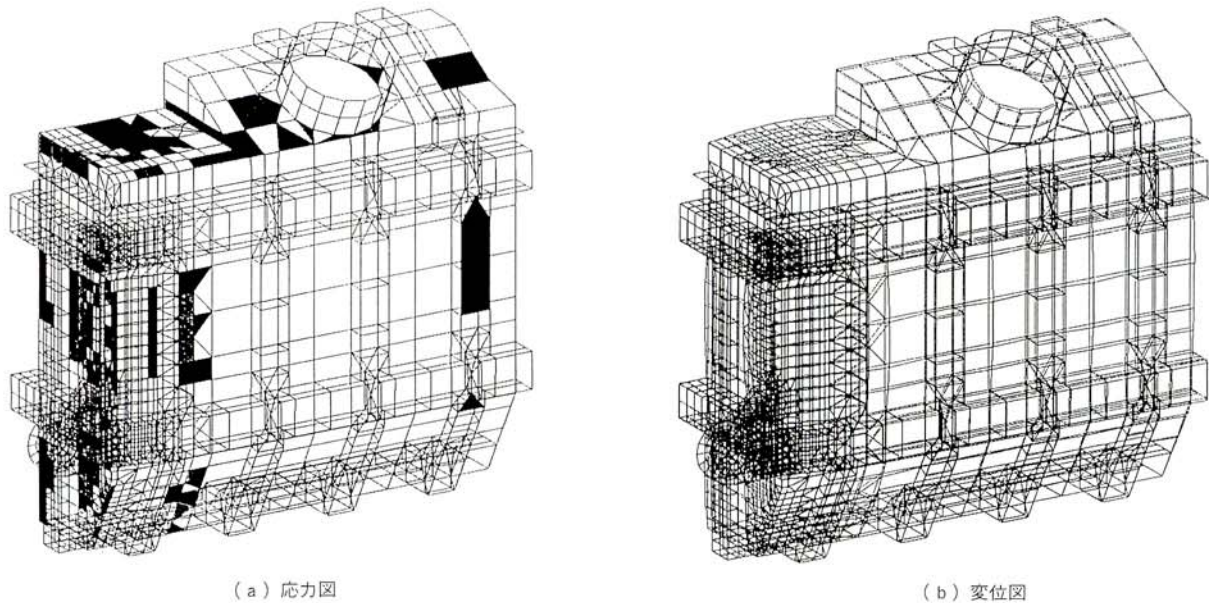


図13/タンク強度計算結果

Fig. 13/ Calculated result of tank strength

流れにくい構造になっているが、今回、最小幅段の鉄心を更に2分割して万全を期している。

(2) 巻線

転位電線による導体の細分化を行い、漂遊損の低減を図っている。また、各巻線上下に配置された電界集中緩和用の静电シールドは、絶縁物の表面に厚さ0.2 mm、幅2 mmの単位銅箔を編んだテープにて覆って電位を持たせる構造として、漂遊損を極小化している。

(3) クランプ

継鉄締付クランプは、上下共、巻線との対向面側に非磁性ステンレス鋼を採用し、磁束の侵入を防止している。

(4) 継鉄シールド

コイルから流出する漏洩磁束が周囲の不特定の金属構造物へ流入するのを防止するため、上下の継鉄締付クランプの各々のコイルとの対向面には、珪素鋼板を接着硬化させて構成した継鉄シールドが装着されている。

この継鉄シールドは、三相分を一体で構成する必要から、全長9 m近くにもなる。そこで今回、数cmの厚みに個々の珪素鋼板を接着硬化する方法その他に新しいアイデアを採用した。

継鉄シールドへの侵入漏洩磁束による温度上昇は、他の部分の温度分布と同時に、サーモグラフィによって測定、確認された。図9にその測定例を示す。

(5) タンクシールド

タンク構造物材への漏洩磁束対策として、幅の狭い珪素鋼板を複数枚接着硬化させたシールド材をタンク内

面に配する構造とした。

当シールド材への侵入磁束量は実コイルと実規模モデルシールドによって測定され、図10に示すように、次に述べる計算値との一致が確認されている。図11に磁束量測定風景を示す。

なお、シールド材のタンクへの取付に当たっては、特に振動の防止、接地方法について検討を加えた。

(6) 漏洩磁束分布

漏洩磁束の計算は、積分方程式を併用した有限要素法(有限積分方程式法)を採用した。この方法は境界条件をビオサバルの法則またはクーロンの法則により算出するもので、比較的狭い領域内においても、精度の良い計算を行うことができる。

図12に最高タップ時における、コイル及びタンクシールド部の磁束分布を示す。

ここで求めた磁束密度から、巻線に発生する渦電流損、2次短絡時巻線に加わる電磁機械力、継鉄、タンクシールド内の損失や温度上昇等々も容易に計算することができる。

5.6 タンク

(1) 構造

従来の154kV 200MVA以下の変圧器の輸送は、JRシキ800C形式によるガータ吊り掛け方式であったが、250MVAでは、シュナーベル方式が必要となった。この場合、変圧器のタンクそのものが貨車の一部を構成するので、輸送条件を十分吟味しなければならない。

今回は、タンク側板と四角ビーム2本からなる複合梁によって輸送時強度を得る構造とし、その効果は荷重試験にて確認した。

(2) 応力と変位

気密試験時、真空試験時、荷重試験時等にタンクにかかる応力や変位の計算には、NASAによって開発されたNASTRANを使用した。図13は0.5kgf/cm²の内圧が加わった場合の応力及び変位図である。

(3) 磁気探傷

シュナーベル貨車との結合ピン部、四角ビーム等、特に重要な溶接部分については、蛍光磁気探傷によるチェックを実施し、確認を行った。

(4) 荷重試験

シキ800形式の実貨車を使用し、輸送重量140トンの1.5倍、即ち、210トンにて15.5時間保持し、各部の応力、変位が許容値以内であることを確認した。

6 あとがき

基本設計着手後、様々な検討・実証を繰返ししながら、製作・試験を無事終了することができた。引続き一層の小形軽量化、分割輸送構造の研究等々、検討すべき点が残されているが、実規模第1号器として所期の成果を挙げる事ができた。

最後に、本器の製作に当たり数々の有意義な助言を頂いた、中部電力(株)殿並びに社内の関係の方々には深謝します。

最近公開された愛知出願(II)

実用新案

公開番号	名 称	考 案 者	共同出願人
2-6595	シートペーパー自動供給便座	野々村勝巳 浅井 宏忠	東陶機器(株)
2-16878	電磁弁	横山 武弘 安藤 幸彦	東陶機器(株)
2-18576	衛生洗浄装置	平塚 保博 永田 和重	東陶機器(株)
2-18577	水抜栓	横山 武弘 永田 和重	東陶機器(株)
2-19299	衛生洗浄装置	横山 武弘 布施三千雄	東陶機器(株)
2-19300	衛生洗浄装置	横山 武弘 布施三千雄	東陶機器(株)
2-22199	暖房便座	横山 武弘 布施三千雄	東陶機器(株)
2-23080	衛生洗浄装置	横山 武弘 平野 修一	東陶機器(株)
2-26599	便座の取付装置	横山 武弘 布施三千雄	東陶機器(株)
2-26683	衛生洗浄装置の配線構造	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-26684	衛生洗浄装置のケーシング	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-29982	衛生洗浄装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-33872	つまみ装置	平塚 保博 梶田 雅也	東陶機器(株)
2-33873	つまみ装置	平塚 保博 平野 修一	東陶機器(株)
2-36394	便座又は便蓋の取付装置	横山 武弘 布施三千雄	東陶機器(株)
2-37972	衛生洗浄装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-37975	衛生洗浄装置	平塚 保博 梶田 雅也	東陶機器(株)
2-37976	衛生洗浄装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-37978	衛生洗浄装置の吐水量調節装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-37979	電磁切換弁のリード線固定装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
2-41655	電動機の軸受装置	滝野 秀雄	恵那愛知電機(株)

公開番号	名 称	考 案 者	共同出願人
2-61297	シートペーパーの残量表示装置	稲垣 邦利	東陶機器(株)
2-71396	シートペーパーの紙詰り防止装置	山本 修 山下 直治	東陶機器(株)
2-77000	シートペーパー自動供給便座のシートペーパーロール支持構造	稲垣 邦利 法月仙一郎	東陶機器(株)
2-79894	シートペーパー自動供給便座	山本 修 野々村勝巳 山下 直治	東陶機器(株)
2-79895	シートペーパー自動供給便座	野々村勝巳 山下 直治	東陶機器(株)
2-79896	シートペーパー自動供給便座	稲垣 邦利	東陶機器(株)
2-79897	シートペーパー自動供給便座	稲垣 邦利	東陶機器(株)
2-82997	シートペーパー自動供給便座	法月仙一郎	東陶機器(株)
2-82998	シートペーパー自動供給便座	法月仙一郎	東陶機器(株)
2-82999	シートペーパー自動供給便座	山下 直治	東陶機器(株)
2-88595	シートペーパー自動供給便座における機能部ケーシング構造	稲垣 邦利 野々村勝巳	東陶機器(株)
2-98799	シートペーパー自動供給便座	浅井 宏忠 大橋 政紀	東陶機器(株)
2-100594	シートペーパー自動供給便座	山下 直治	東陶機器(株)
2-113317	移動変圧器の安全柵	水野 良勝 小島 千人	
2-113321	移動変圧器の無電圧タップ切換装置	水野 良勝 森 鉄夫	
2-114361	電動機の冷却装置	城處 元彦	
2-115993	ドレンポンプ	滝野 秀雄	恵那愛知電機(株)
2-121128	混合・造粒装置	大嶋 昭彦	愛知電機商事(株)
2-129174	誘導電動機速度検出素子取付装置	城處 元彦	
2-140814	油入電気機器	近藤 哲	
2-141295	シートペーパー自動供給便座	浅井 宏忠 大橋 政紀	東陶機器(株)
2-141296	シートペーパー自動供給便座	山下 直治	東陶機器(株)
2-142512	油入電気機器用タンク	近藤 哲	
2-143716	耐塩ブッシング	須田 芳和	
2-146718	ブッシングの保護装置	廻間 正樹 磯部 治男	