

# → 最近のドイツ技術

## 変圧器の短絡時電磁機械力の測定

### Measurement of Dynamic Short-circuit Forces in Transformers

#### I. ま え が き

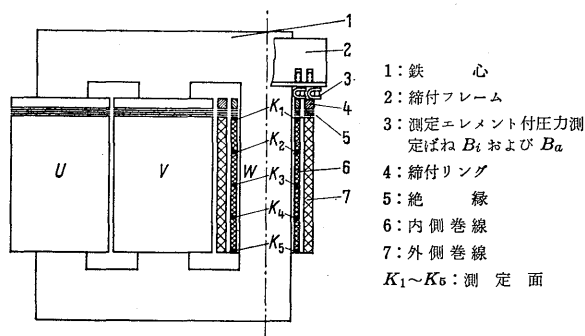
変圧器が短絡した際、巻線内に電磁機械力が発生するのであるが、その大きさと方向は変圧器の構造に対し、きわめて重大な影響を与えるので、製作時、それに対して慎重な考慮が払われなければならない。従来用いられている電磁機械力の計算式では、鉄心ヨークおよび隣接脚の影響、鉄構造部分の影響、巻線の弾性による反作用などが正確には考慮されていないので、短絡時電磁機械力の真の値を求めるためには結局実験によるほかない。電磁機械力の測定に関する論文はこれまで数多く発表されているが、実際の短絡電流を流して、発生する動的ストレスを測定した例はきわめて少ない。筆者は以前、800kVA 変圧器の外側巻線に発生する軸方向機械力を、カーボンエレメントを用いて測定した結果を報告したことがあるが、本論文では、やはりカーボンエレメントを用い、同じ変圧器について行なった軸方向、および半径方向機械力のその後の新しい測定結果を報告する。

#### II. 巻線高さに沿う軸方向機械力分布の測定

以前行なった外側巻線における軸方向機械力分布の測定では、外側脚の外側巻線を高さ方向に4等分し、 $\frac{1}{4}$ ずつの高さの所にそれぞれ48個のカーボンエレメントを直列に接続した測定回路をそう入し、カーボンエレメントが機械力により圧縮されたときの抵抗変化によって変化する電流を、CTを通してオシロ撮影した。カーボンエレメントをはさむコイル間に遊びがあるかどうかはシグナルコンタクトにより監視した。また巻線の上側にある締付ねじの下にはカーボンエレメントの組み込まれた圧力測定ばねを取り付け、CTを通さず直接オシロ撮影した。このようにして得られたオシロ波形から、巻線高さに沿う瞬時的な機械力の分布図はもちろん、三次元的な空間的・時間的分布図を描くことができた。

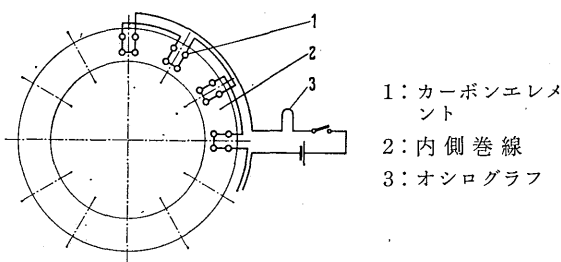
今回行なった内側巻線についての実験も、前述と同様の方法で行なった(第1図)。内側巻線(脚当たり34コイル、102ターン)の $K_1 \sim K_5$ なる5か所にある測定回路は前述のように接続されているが、CTは接続しなかった(第2図)。

実験は前回同様、約%の電圧を印加して行なったが、



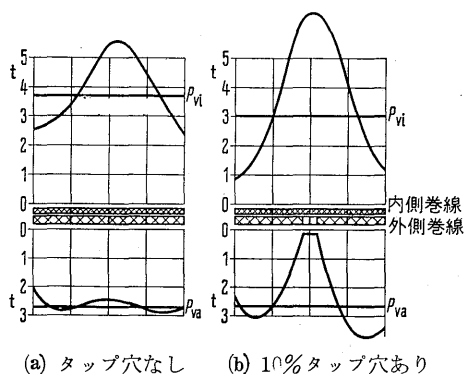
第1図 内側巻線軸方向機械力の測定

Fig. 1. Measurement of axial forces of inner winding



第2図 軸方向機械力測定回路 ( $K_1 \sim K_5$ )

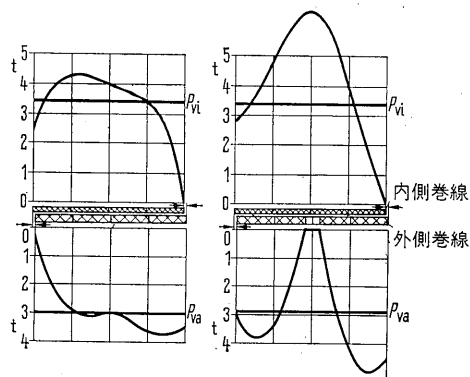
Fig. 2. Connection of measuring circuit



第3図 内側巻線、外側巻線の軸方向機械力  
(印加電圧 66.7% 最大衝撃係数 ( $K=1.65$ )  
前締力 約 3 t (換算値))

Fig. 3. Axial forces of inner and outer winding in case of symmetric arrangement

その測定結果と前回の外側巻線についての測定結果を、同一ベースに換算して比較した。第3図および第4図は、内側および外側巻線の機械力の最大値を比較して示



(a) タップ穴なし (b) 10%タップ穴あり

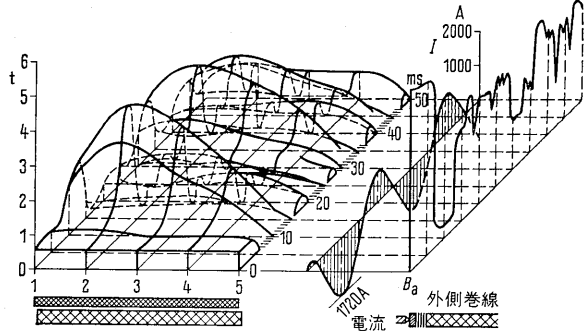
第4図 内側、外側巻線の磁気中心にずれのある場合の軸方向機械力

Fig. 4. Axial forces of inner and outer winding in case of unsymmetric arrangement

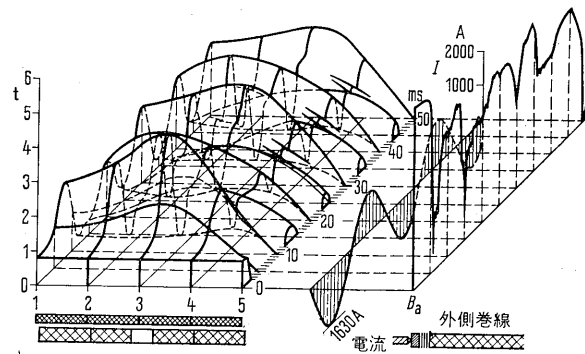
したものである。各図で中央に巻線断面を、その上に内側巻線の、またその下に外側巻線の機械力の分布を示す。第3図は両巻線の配置が対称で、外側巻線にタップ穴なし（左図）、10%のタップ穴あり（右図）の場合のものである。第4図は両巻線間に3%の磁気中心のずれのある非対称配置の場合のものである。これらの結果によれば内側巻線の軸方向機械力は必ず外側巻線より大きく、またどんな場合でも巻線を圧縮するように作用する。外側巻線からタップを取った場合、タップ穴付近の巻線では軸方向圧縮力が急激に減少し、引裂力が発生する。タップ穴の両側にくると軸方向圧縮力が増加する。これに対し内側巻線では軸方向圧縮力は巻線中央で大きくなり、上下両端では著しく小さくなる。両巻線が非対称配置の場合、各巻線にはそれぞれ逆向きの軸方向機械力が発生する。

これら軸方向機械力の分布図は、一般に計算により求められるものを実証しており、また Waters が測定した分布とも余り違っていない。ただしタップを抜かない対称配置における内側巻線の場合〔第3図(a)〕だけは、この測定結果ではとがった分布曲線となっているが、Waters の測定では平坦な最大値をもつ分布曲線となっている。

3本の直交軸でそれぞれ、巻線高さ、軸方向機械力の大きさ、および時間を表わす場合、第5図に示すような軸方向機械力の立体的分布図が得られる。第5図(a)は非対称配置で、前締力が小さく、外側巻線の中央にタップ穴なしの場合、第5図(b)は同じく10%のタップ穴ありの場合の内側巻線に対する分布図である。同図中には、外側巻線の電流も、外側巻線の締め付けねじの下にある測定ばねの指示も一緒に示した。これら機械力の時間的変



(a) タップ穴なし  $P_{vi}=0.55\text{ t}$



(b) 10%タップ穴あり  $P_{vi}=0.8\text{ t}$

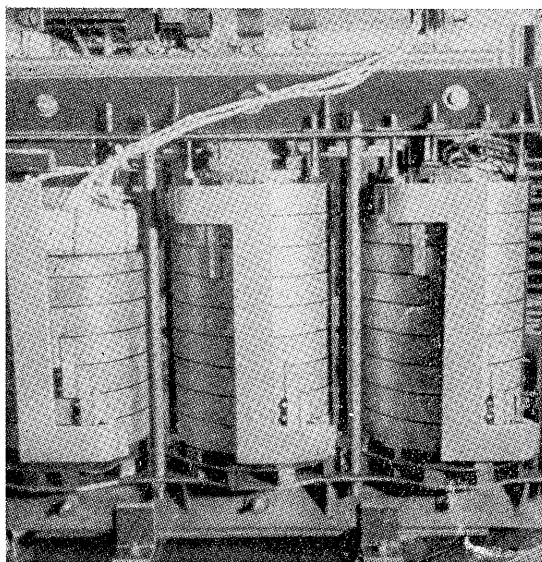
第5図 巻線が非対称配置で前締力  $P_{vi}$  が小さい場合の内側巻線の軸方向機械力の立体分布図

Fig. 5. Distribution of axial forces of inner winding

化から、短絡期間中の巻線の動作を知ることができる。すなわち、同図の巻線右端における機械力の時間的変化曲線が所々切れているのは巻線がおどることを示し、また機械力の時間的位相が電流の時間的位相に対しおけているのは巻線の摩擦力および慣性力によって生じたものと思われる。

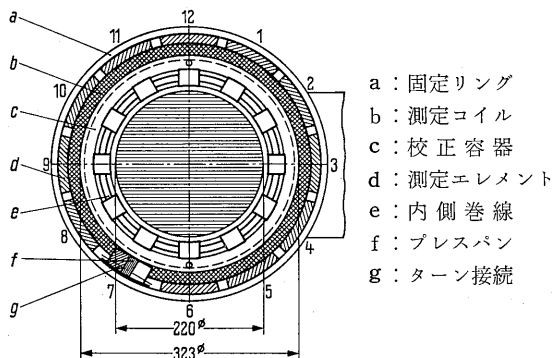
### III. 外側巻線の半径方向機械力の測定

外側巻線の半径方向機械力測定には第6図に示す装置を用いた。すなわち、供試変圧器の外側巻線は9ターンのリングコイル1層からなり、任意の位置のリングコイルを、編組銅線によって作られた測定コイルと置きかえることができるようになっている。その測定コイルの周上には、11個の測定エレメントが12等分された位置に取り付けられている(第7図)。各測定エレメントは黄銅板の取付台に固定された8個のカーボンエレメントが直列に接続されて構成され(第8図)、強固な絶縁銅板製取付リングによって外側から測定コイルに固定された。この測定エレメントによって、円周上各場所の半径方向機械力をオシロによって測定した。上記の測定コイルは任意の脚に、また同一脚で任意の場所に移すことができる。実験では内側巻線に電圧を印加した。

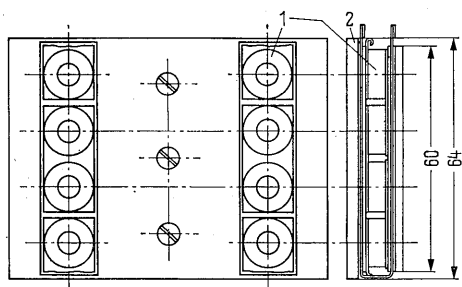


第 6 図 供試変圧器

Fig. 6. Transformer for measurement of radial forces



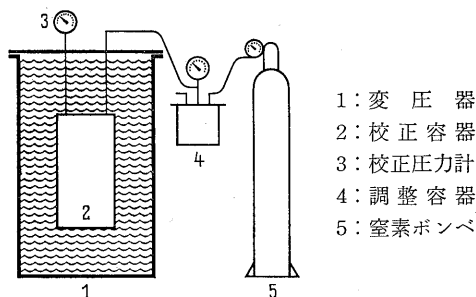
第 7 図 半径方向機械力測定用供試変圧器の断面図  
Fig. 7. Arrangement of winding and measuring device in tested transformer



1 : カーボンエレメント (10枚の素子よりなる)  
2 : 黄銅板

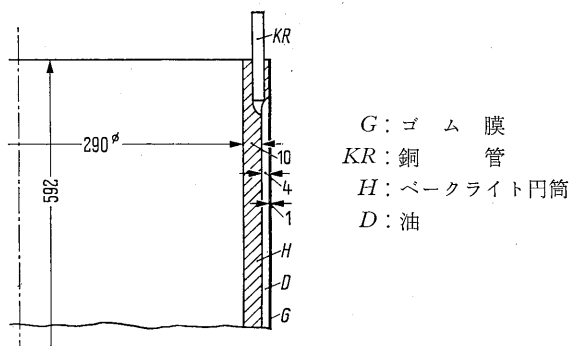
第 8 図 半径方向機械力測定エレメント

Fig. 8. Measuring element for radial forces



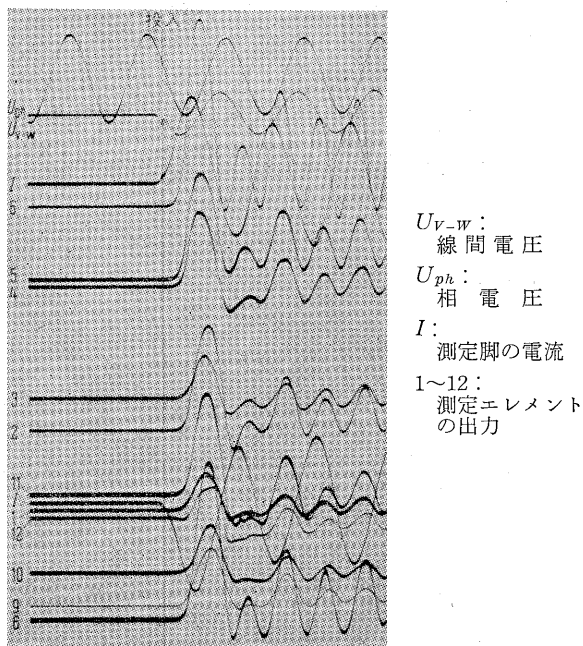
第 9 図 半径方向機械力測定用校正装置

Fig. 9. Calibrating device



第 10 図 主絶縁中にそう入する校正容器

Fig. 10. Calibrating vessel



第 11 図 半径方向機械力測定時のオシロ波形

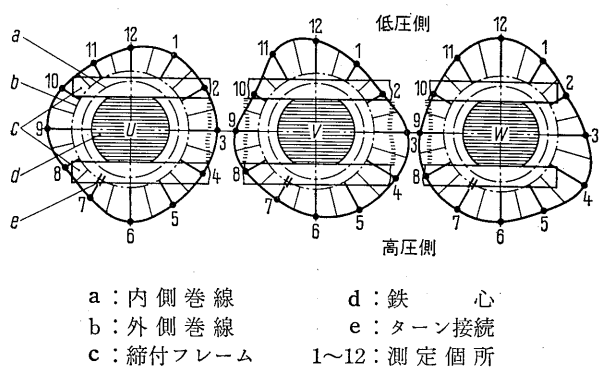
Fig. 11. Measured oscillogram

(第 10 図) は薄ハゴム膜をかぶせられたベークライト製円筒からなり、それら両者の間には円筒状のせまいすき間が生じるようになっている。またその両端では、円筒

測定によって得られたオシロ波形を定量的に評価するため、第 9 図に示すような校正装置を用いた。校正容器

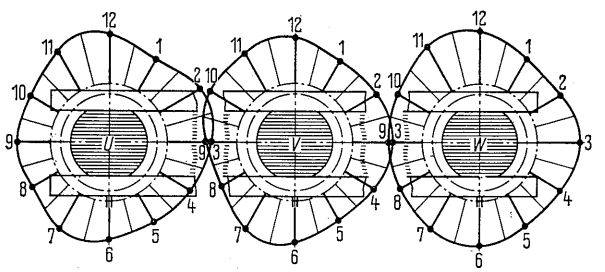
とゴム膜が密着するようになっている。この校正容器は、内側巻線と外側巻線間の主絶縁の中におかれる。校正容器に圧力をかけることによって測定エレメントは半径方向短絡機械力と同じようにストレスを受けることになる。

第 11 図は測定したオシロ波形の一例である。各実験



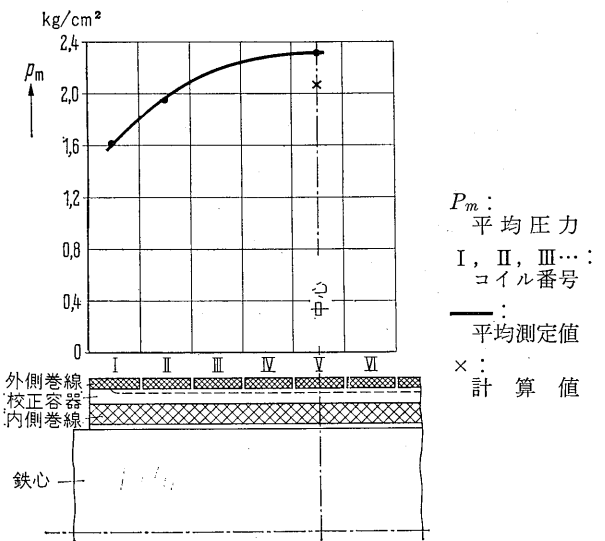
第 12 図 各脚における最上コイルの半径方向機械力の分布

Fig. 12. Peripheral distribution of radial forces in top coil



第 13 図 各脚における中央コイルの半径方向機械力の分布

Fig. 13. Peripheral distribution of radial forces in center coil



第 14 図 巻線高さに沿う半径方向機械力の平均分布

Fig. 14. Axial distribution of radial forces

では投入位相の関係で巻線のアンペアターンが平均値に対し、約 ±20% ばらついていたが、電流の 2 乗で同一ベースに換算した。このようにして測定コイルによって得られた平均円周上における各半径方向機械力はその円周上での分布状態を示している。

第 12 図は、3 本の各脚の一番上のコイルに働く半径方向機械力の測定結果を示し、第 13 図は中央のコイルでの測定結果である。これらの測定結果から、半径方向機械力が、隣接脚の影響や、近接する鉄構造部分の影響で、円周上不均一に分布していることがわかる。また中央コイルと端コイルの機械力の間には予期したとおり大きな違いのあることがわかる。第 14 図はこの両者の違いを示すもので、3 脚の平均値が巻線高さに対して示されている。半径方向機械力は巻線中央で最大となり、巻線端にゆくにつれてほぼ 1/2 まで減少する。この結果を近接した 2 枚の真直ぐな薄い電流板について計算した横方向電磁機械力

$$P = \frac{10}{9.81 \cdot 8\pi} \left( \frac{4\pi \cdot AW}{10^4 \cdot l} \right)^2 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

と比較すると、アンペアターン密度を 5.67 kAW/cm に選んだ場合、最大圧力は 2.06 kg/cm<sup>2</sup> となるのに対し、測定では 2.31 kg/cm<sup>2</sup> となった。この違いは第 11 図をみると大体理解されられると思われる。第 11 図によれば機械力は電流が最大となった後、少しおくれて最大となっていることがみられるので、半径方向機械力の場合でも、やはり巻線の慣性力および摩擦力の影響を考慮に入れて短絡時機械力を計算しなければならない。

IV. む す び

上述の多くの測定結果は、変圧器における短絡時の動的機械力を知るのに役立つものであるが、これでもって短絡時機械力の問題に充分答えているというわけではない。しかしながら、正確な計算にのらない動的電磁機械力を測定によって求める方法を示すことができた。

原著 E. FISCHER : Messung dynamischer Kurzschlußkräfte von Transformatoren. Siemens Z. 37 H. 11(1963)  
抄訳者 千葉工場 国枝 誠昭



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。