

高直列容量巻線変圧器の耐サージ性

川崎電機製造KK 小林 茂* 藤田宏恭** 児玉匡敏*

1. ま え が き

変圧器は送電線路に直結されているので、雷撃等により発生した急峻なサージを受ける。そのため、古くから変圧器巻線の衝撃電圧に対する諸特性の研究、解明に努力がなされてきた。¹⁾²⁾³⁾

ここでは、いわゆる非共振変圧器である English Electric 巻線変圧器の衝撃電圧印加時の電位分布及び巻線模形と実用機特性の比較について述べることにする。

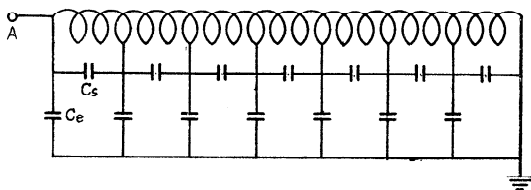
よく知られたように、EE巻線では従来の変圧器巻線に較べて直列静電容量が増加する。その結果衝撃電圧印加時の初期電位分布は比較的線形になり、対サージ性が優れている。

実験手段としてまず定格 154KV、容量17,000KVA 変圧器の各部寸法を3分の1に縮小したEE巻線模形を作製し、これを用いて電位分布を測定し、更に二次巻線への移行電圧、中性点保護方式等使用状態での各種の現象を検討した。ついで実用機を用い若干の実験を行った。これら一連の測定から、この種の変圧器の特性がより深く明らかになった。

2. 初期電位分布

変圧器巻線は減衰を無視すれば一般に、図1に示すようなインダクタンスと静電容量との分布定数回路に、おきかえて考えることが出来る。衝撃電圧を印加した直後の初期電位分布は、インダクタンスが非常に大きいインピーダンスに示すために、その部分を流れる電流は無現出来、周知のように、ほぼ静電容量のみにより決定され

図1 変圧器巻線の分布定数等価回路 (終端子接地の場合)



* 鈴鹿市南玉垣町・三重工場

** 神戸市兵庫区和田山通・本社工場

る。その様子は、巻線終端子が接地されているか否かにより、次式、図2に示すようになる。¹⁾²⁾

$$\text{終端子接地: } V(x) = V_0 \frac{\sinh \alpha(1-x/l)}{\sinh \alpha}$$

$$\text{終端子非接地: } V(x) = V_0 \frac{\cosh \alpha(1-x/l)}{\cosh \alpha}$$

$$\text{ただし } \alpha = \sqrt{C_E/C_S}$$

C_E : 巻線の対地静電容量

C_S : 巻線の直列静電容量

l : コイル長

V₀ : 印加電圧

図2 αの値による初期電位分布の変化

実線: 終端子接地 点線: 終端子非接地

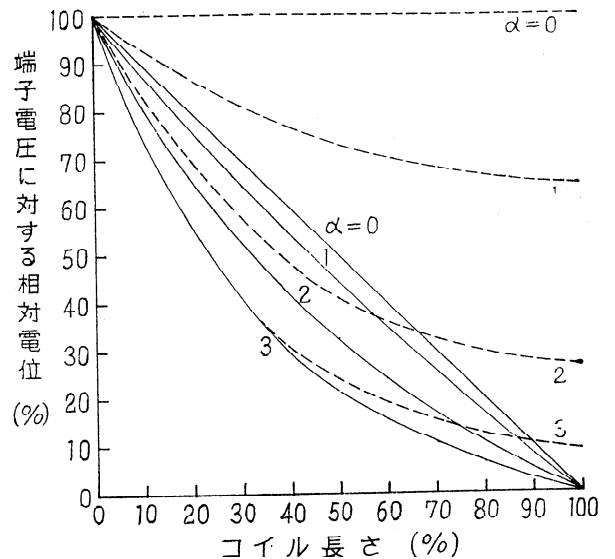


図2は、αをパラメータとして表わしたものである。これより判るように、αの値が小さいほど、したがって直列静電容量 C_S が大なるほどまた対地静電容量 C_E の小なるほど、定常の電位分布(α=0に相当)に近づく。時間の経過につれ、初期電位分から定常分布に移行する際に発生する、巻線中の過渡振動の大きさもそれだけ軽減されることになる。

3. 単相模形による実験

3.1 模形の構造

模形変圧器の構造は、図3に示すように、鉄心の代わ

表2 2次移行電圧 単位%

1次端子		2次端子*			
線路側	終端子	測定箇所	1端接地	両端開放	コンデンサ**挿入
印加	接地	a	6.4	32.4	
		e'	—	21.6	
接地	印加	a	—	17.1	
		e'	9.5	20.3	
印加	開放	a	7.7	27.2	(3.2) <1.8>
		e'	—	31.8	(4.1) <1.5>
開放	印加	a	—	30.8	(3.6) <0.4>
		e'	10.0	27.6	(2.8) <1.4>

注 * 2次端子は a~c-a'~e' と接続した。
 ** コンデンサは a, e' 端子に挿入した。() は 0.1μF < > は 0.2 μF のコンデンサを挿入した場合である。

より決定されると仮定すれば、およそ次式によって与えられるべきである。¹⁰⁾

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{1.5 C_{12}}{C_{12} + C_2} \times 100 (\%)$$

ただし C₁₂ : 1次2次間の静電容量 (pF)

C₂ : 2次巻線の対地静電容量 (pF)

ここで係数 1.5 は、1次巻線の入力端電圧を 1、開放端電圧を 2 とし、直線的電位分布を仮定して平均値をとったものである。万能ブリッジを用いて測定した静電容量は、C₁₂=270、C₂=1230 であって、これを用いると移行電圧は 27% となりほぼ一致する。

つぎに、終端子を接地した場合は、1次巻線の電位が終端子非接地の場合より低いから、移行電圧は減少するはずである。しかしながら、その最大値は表 2 に見るように終端子非接地の場合と大差はない。この理由は、衝撃電流の波頭が急峻であるために、電磁的誘起電圧が重畳されるためと思われる。この場合も、電圧印加後数 μsec 以降は終端子非接地の場合と同様、静電結合により決定される。この差異は図 8 より一層明らかとなる。

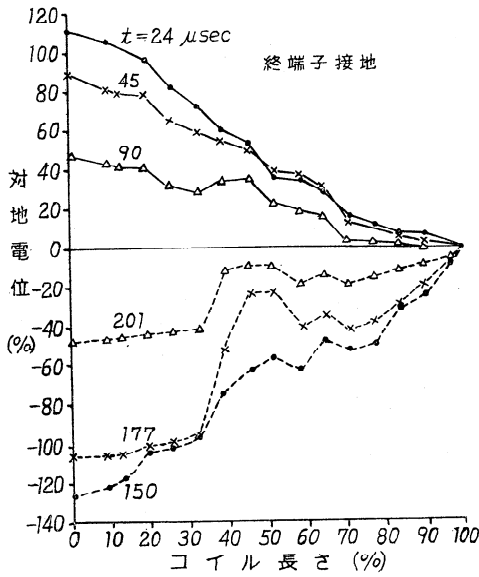


図6 矩形波電圧による電位分布 (持続時間 135 μsec)

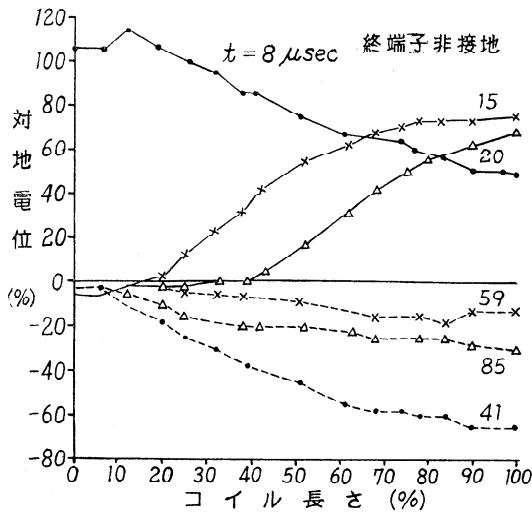
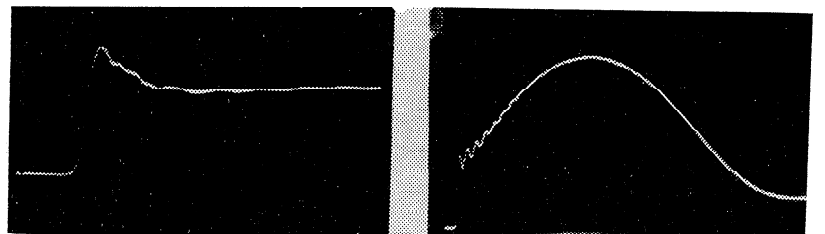


図7 矩形波による電位分布 (持続時間 9 μsec)

まず、1次巻線の終端子および2次巻線端子が開放されているときは、1次2次間の電磁結合は無視でき、移行電圧は主として静電結合によるものと思われる。一方、終端子が接地されているときは、1次巻線を通る衝撃電流による電磁結合をも考慮しなければならないから現象は複雑となる。

1次、2次巻線の端子の状態をいくつか組合せて、移行電圧の最大値を求め、その結果を表 2 に掲げた。この表から、たとえば終端子および2次端子開放の場合の移行電圧は、27.2~31.8% であることが判る。この値は、上述のように静電結合のみに



(b) (a)

(a) 終端子接地 二次側開放 1μsec/div.

(b) 終端子開放 二次側開放 5μsec/div.

図8 二次移行電圧の一例

なお、2次巻線の1端を接地した場合は、いずれの場合も移行電圧は微少である。これについては 4.2 節において述べる。

以上のように、移行電圧は主として1次2次間の静電結合によるものであるから、その軽減法としては、従来からよく知られたようにコンデンサを介して、2次端子を接地するのが有効である。これに対する実験結果も併せて表2に掲げた。たとえば、 $0.1\mu F$ のコンデンサで2次端子を接地したときは、誘起電圧は3~4%となり、2次端子開放のときと較べて、8~9分の1に減少する。

3.4 タップ電圧の測定

変圧器の1次巻線には通常、電圧調整タップが設けられている。サージが進入した場合、この部分に高い電圧が誘起され、故障の原因となることがある。このタップ電圧の値を知ることは設計上、重要な問題である。

約13%を遊びコイルとした直列タップ接続における初期電位分布を求めてみると、上部タップの隣接するセクションには、入力電圧の約5%の電圧が加わることが判った。

この点をさらに詳細に検討するために、上下タップにおける開放端子をそれぞれ差動増中器に接続し、その差

表3 タップ間電圧 単位 %

タップ接続	終端子	上部タップ	下部タップ
直列	接地	6.6 12.9	5.4 10.8
	開放	5.5 9.8	2.4 4.2
並列	接地	6.9 13.2	5.3 10.8
	開放	5.5 9.2	2.4 —

注：各欄の上行は調整電圧8.7%下行は17.4%の場合である。

電圧をシンクロスコープにより求めた。最大タップに対して、電圧低減率を8.7%および17.4%とした場合の各タップにおける分担電圧の最大値を表3に示す。シンクロスコープで得た波形の一例を図9に掲げる。

表3より判るように、タップにおける誘起電圧は、終端子非接地の場合は接地した場合より小である。とくに下部タップでは終端子接地の場合は、上部タップの分担電圧と大差ないのに対し、非接地の場合は、上部タップの2分の1以下に減少している。

なお、巻数比を同一として、直列タップと並タ

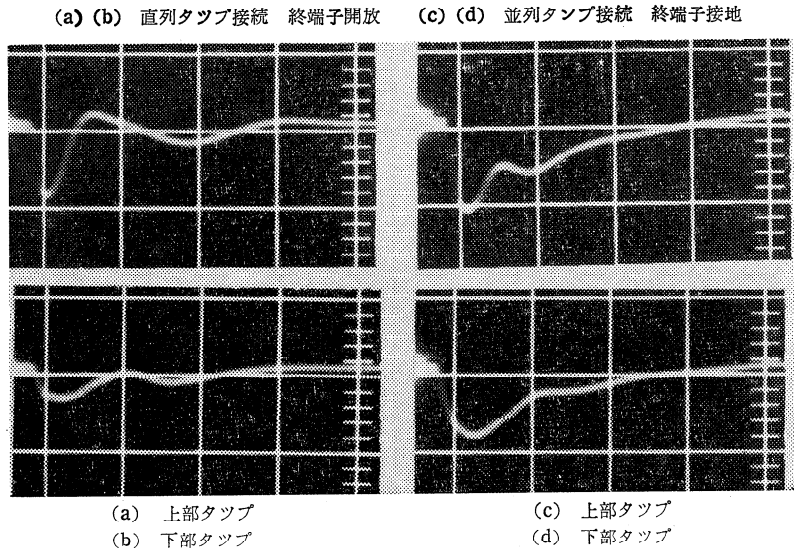


図9 タップ電圧波形の一例

ップ接続との比較も表3に併せて掲げた。誘起電圧は、両者の間に著しい差異は認められなかった。したがって、その選択は構造、操作等の簡便さによって決定されるべきであろう。

図に9掲げた写真に対して、現象を説明すると、いずれの場合も下位セクションの電位の高いことを示している。したがって、終端子非接地の場合は電流の反射が同付号であるので、誘起電圧は急激に逆方向となる。それに対し、終端子接地の場合は、電流の反射が逆付号であるので、誘起電圧は同付号のものが重畳される。

3.5 中性点保護方式の検討

終端子を非接地とした場合には、中性点電位は著しく上昇し、その部分の絶縁がおびやかされるので、非接地系統では中性点に火花ギャップあるいは避雷器を設けて異常電圧の発生を防ぐ場合がある。

これらの中性点保護方式を検討するために、図10(a)(b)に示めすような特性を有するサイラトロンあるいはダイオードを用いた保護装置を巻線終端子に取付け、衝撃電圧印加による電位分布を測定した。これらの模擬回

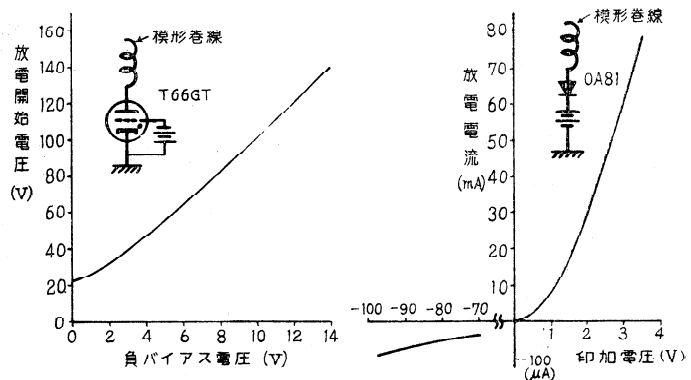


図10 模擬避雷器および火花ギャップの特性

図11 ダイオード接地の場合の電位分布
点線：終端子非接地

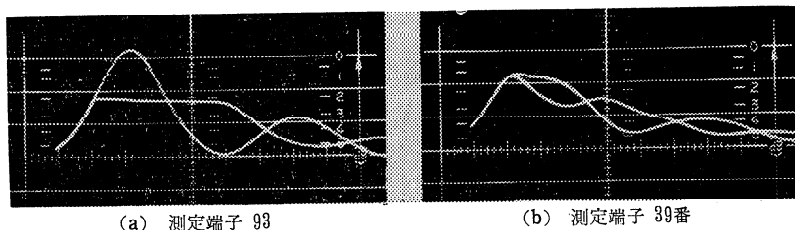
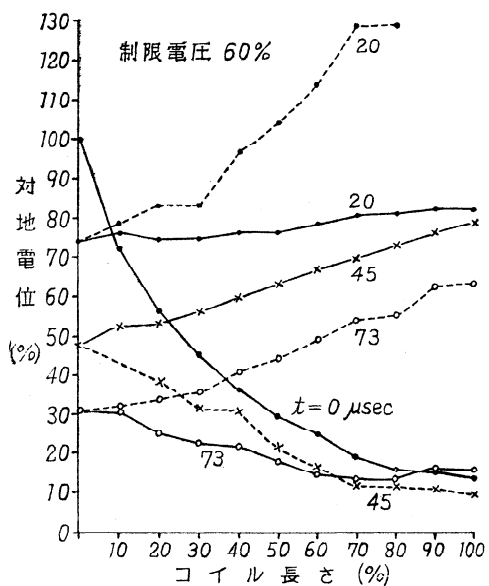


図12 ダイオードによる中性点保護の一例 (制限電圧60%)

路の制限電圧は、それぞれグリッドバイアスあるいは直列バイアス電圧を加減することにより、任意に設定できる。

3.5.1 避雷器

ダイオードで模擬して、制限電圧を2, 3の値に設定して電位分布を測定した。1例として制限電圧を60%とした場合の電位分布を、終端子非接地の場合と比較して図11に示す。非接地の場合に較べて、中性点電位の上昇は著しく減少する。図12には、中性点および中間のセクションにおける電圧波形を示すが、これより判るように制限電圧における持続時間は非接地の場合より長くなっている。この理由は、避雷器のもつ静電容量を模擬するために 0.01 μF という巻線自体の対地静電容量に対して無視できない、バイパス用コンデンサを挿入したための影響であると思われる。

3.5.2 火花ギャップ

サイラトロンを用いて模擬した場合の電位分布は、図13に示すごとくである。サイラトロンの内部抵抗が比較的低いために、残留電圧はほとんど零となり、それ以降の電位振動も微弱である。このことは、図14に例示した写真からも推測できる。ただ

し、制限電圧の選定には若干の考慮が必要であり、図13から推測できるように、放電が開始した直後には巻線の一部の電界強度が高くなり、その部分の絶縁がおびやかされる。

3.6 等価回路の検討

変圧器巻線の等価回路は、一般にインダクタンスLと静電容量Cとの反復回路となる。高調波をも含めて考える場合には、少なくとも、その次数より多くの要素からなる等価回路を考えなければならない。筆者らの実験では、基本波が卓越しており、高調波は無視できる程度であった。

実験方法は、変圧器インピーダンスと比較して、十分大きい抵抗を介して衝撃電圧を印加し、その端子電圧を測定した。一方巻線の代わりに既知抵抗Rを接続し、その端子電圧を測定して、両者の比として変圧器インピーダンスを求めた。すなわち、電流が十分制限されていると

すれば、次式が成立つ。

$$Z_T(P) = \frac{V_T(P)}{V_R(P)} \cdot R$$

ただし $V_T(P)$: 巻線の端子電圧のラプラス変換
 $V_R(P)$: 既知抵抗Rの端子電圧

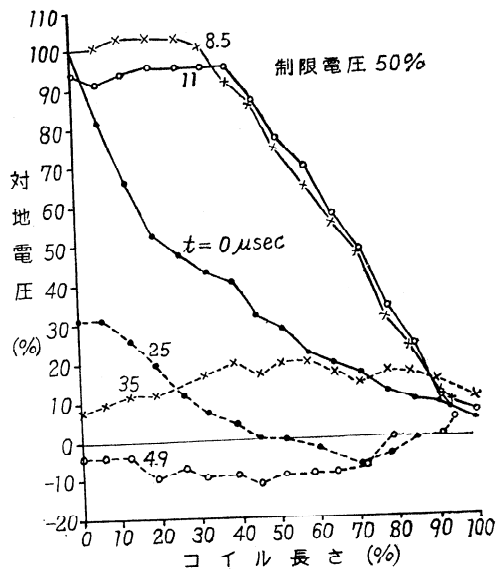


図13 サイラトロン接地の場合の電位分布

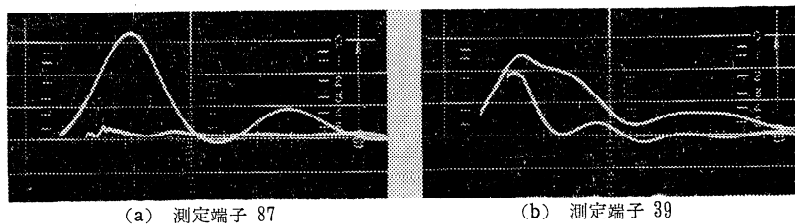


図14 サイラトロンによる中性点保護の一例 (制限電圧50%)

$Z_T(P)$: 変圧器のインピーダンス

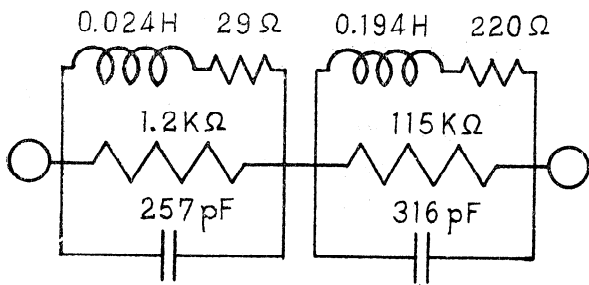


図15 回路等価

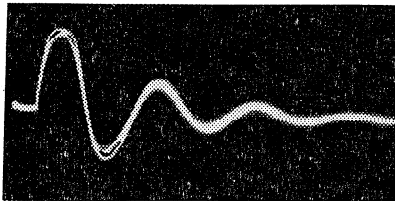


図16 模形変圧器とその等価回路の応答波形の比較

シンクロスコープで観測した電圧波形を、適当な形で近似して、上式に代入すれば図15のごとき共振回路のインピーダンスが得られた。

この等価回路を構成し、応答波形をブラウン管上で模形巻線に対するものと比較しながら最も適当な回路定数を求めると、同図に示した値が得られた。図16は、この等価回路と模形巻線とについて応答波形を比較したものである。

3.7 故障個所の検出

変圧器巻線において、絶縁破壊の有無を判定したり、あるいは絶縁破壊を起こしていると判定されたとき、その部位が解体前に予め推定できるならば、補修作業等は労力が著しく軽減される。

模形変圧器に種々の人工故障を起させた状態で、矩形波電圧を印加し、各部の応答波形を健全時と比較することにより、故障部位が判定できるか否かを検討した。実変圧器では、測定に利用できるのは、中性点端子と中間

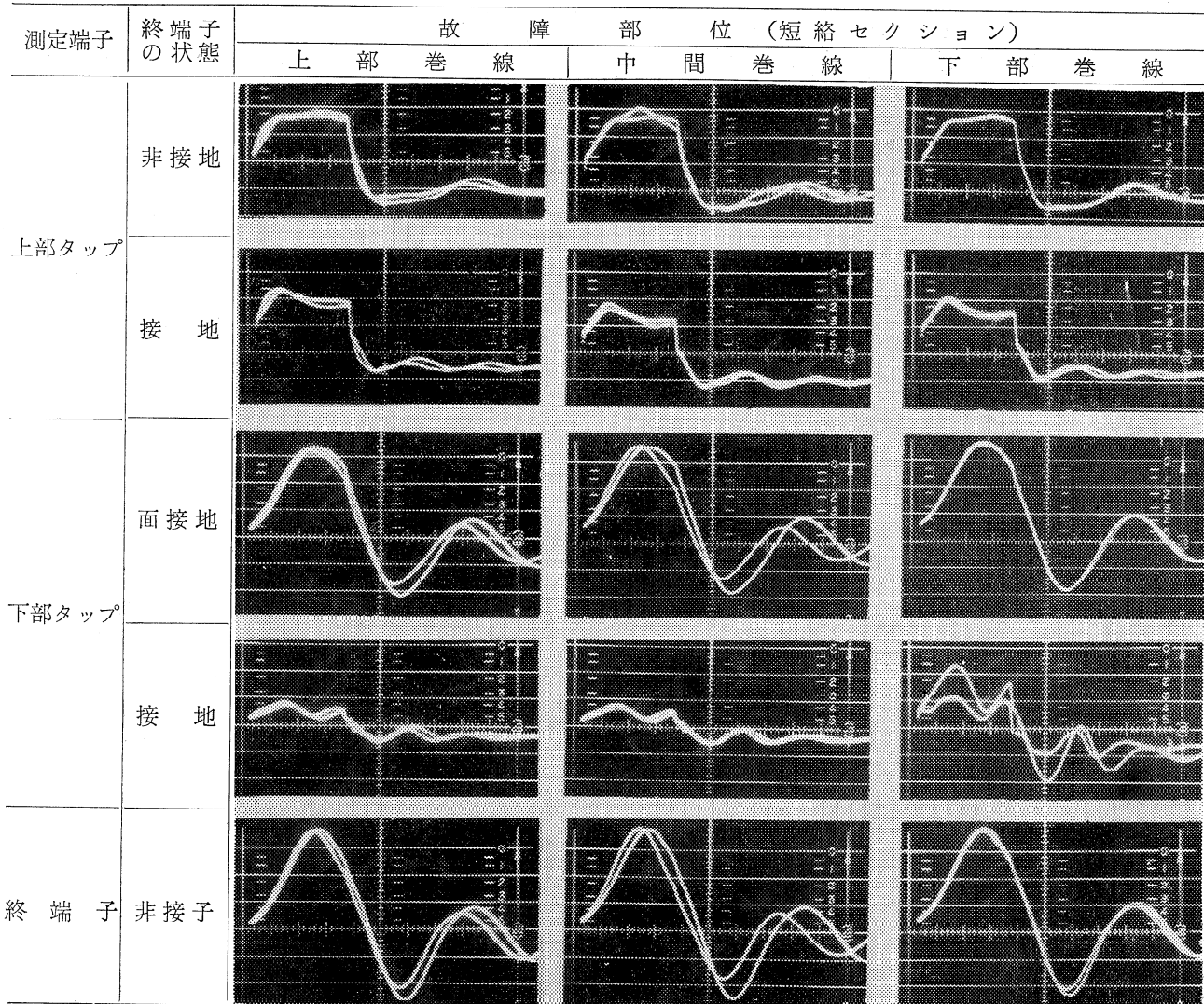


図17 故障時と健全時の電位の比較
縦軸、右行の下から二番目のみ 15V/div. その他は 50V/div

のタップ端子に限られるから、模形変圧器に関しても、それらに限って考察する。

3. 7. 1 短絡故障

まず最も簡単な故障の模擬として、相隣るセクション間の絶縁が破壊され、導体間が短絡している場合を想定し、巻線中の 1 個所の相隣る測定端子を銅線で短絡した。図17は、このような状態でタップ端子および中性点（ただし中性点接地の場合を除く。）の電位を、健全時と比較したものである。これらの写真から、短絡部位の差による差異を 2.3 あげてみる。ここでは、故障部位を表わすのに二個所のタップを境界として、それぞれ上部巻線、中間巻線および下部巻線の故障と呼ぶ。

上部タップの波形を比較すると、まず終端子開放の場合、上部巻線の短絡では波頭に若干の高調波振動を生ずる。それに対し、中間巻線の短絡では $20\mu\text{sec}$ 付近に著しいピークを生ずる。一方、下部巻線の短絡ではほとんど健全時との差異は認められなかった。つぎに、終端子を接地した場合は、上部巻線の短絡により波頭の立上りが早くなり、中間巻線の短絡では逆に立上りが遅れ、波高値も低くなるのが認められた。

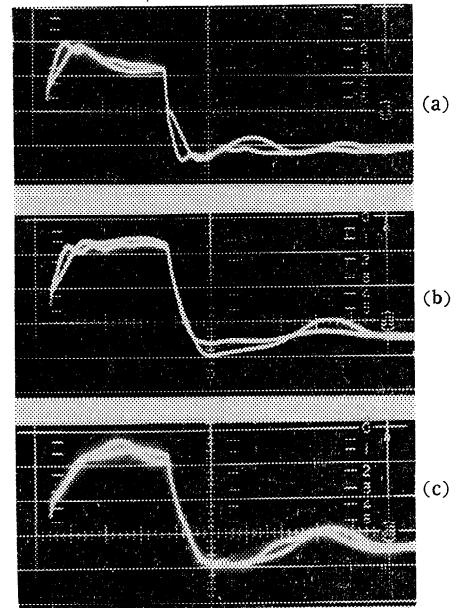
そのほか、下部巻線に短絡セクションを設けると、終端子接地の場合、下部タップの電位が著しく減少するなど、特徴的な差異がいくつか認められる。逆に、このような各部電位が健全時と比較して与えられると、故障部位が推定できるものと考えられる。

3. 7. 2 非短絡故障

現実に起り易い巻線の故障は、上述のような永久短絡故障ではなく、高圧印加時のみ短絡し、低圧時においては絶縁油により絶縁が保たれている場合が多い。このような故障に対しては、サイラトロンを用いて模擬することができる。この場合は、絶縁油の破壊特性、故障個所のだん電圧を併せて考察されなければならない。サイラトロンで模擬した場合の例を図18に掲げるが、この写真においても 3.7.1 項で述べたと同様の特徴を認めることが出来る。すなわち、同図 (a) は上部巻線に故障個所があり、終端子を接地して上部タップの波形を健全時と比較したものであるが、短絡故障の場合と同様、波頭の立上りが早くなっているのが顕著に認められる。

4. 3 相変圧器に対する実験

模形変圧器における実験の結果から、1 次巻線に EE 巻線を用いた変圧器は、対サージ特性がきわめて良好であることが判ったので、これと同一巻線構造をもつ内鉄形 3 相変圧器を製作し、その衝撃電圧特性について実験した。実変圧器では、模形に較べ寸法が大となり、外部



	測定端子	故障部位	終端子
a	上部タップ	上部巻線	接地
b	"	"	開放
c	"	中間巻線	"

図18 サイラトロンによる故障模擬の一例

からの誘導等も受け易いので簡単な測定では精度に若干問題がある。ここでは、154 KV 系統の一般的な場合として、中性点非接地の場合について述べる、

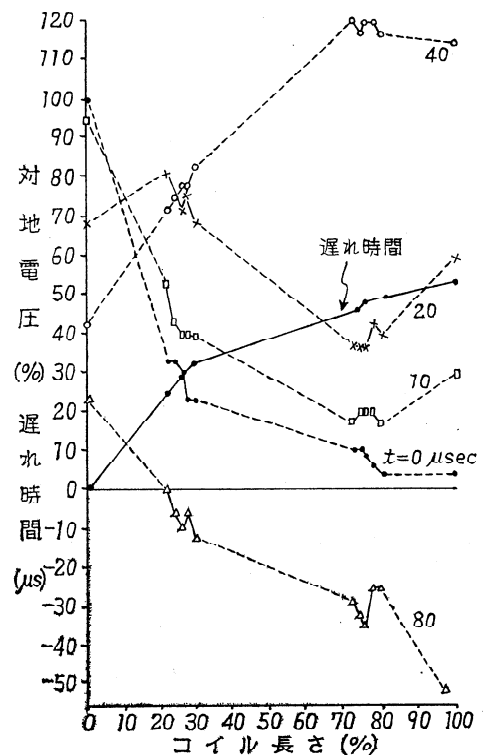


図19 三相変圧器における衝撃電位分布 (三相一括印加の場合)

4.1 電位分布

4.1.1 3相一括印加の場合

3相に同大のサージが進入した場合を想定して、3相を一括して衝撃電圧を印加した。この場合、各相巻線の対地静電容量には若干の不均衡があるので、電位分布は厳密には相違するが、測定の結果各相間に有意差が認められなかったため、一例としてW相の電位分布を図19に示す。ここで初期電位分布(すなわち $t=0$)の曲線を図6における対応する曲線と比較してみると、 α の値はかなり大きいように見受けられる。しかしながら、この差異は主として外部からの誘導防止のために用いたシールド線の静電容量が、巻線自体の静電容量に対して無視できないことによるものであって、本質的な相違でないと思われる。

なお、図19では波動の伝播速度の目安として、各部対地電位が最大となる遅れ時間を併せて掲げた。これを図5の巻線模形における遅れ時間と比較すると、場所により2.5~3倍である。3.1節で述べたように、巻線模形の寸法が実変圧器の3分の1であることとはほぼ一致している。

4.1.2 1相印加他相接地の場合

特殊な場合として、1相のみにサージが進入した場合、あるいは各相に進入したサージの不均衡分を考える場合は他相は大地電位と考えられる。この場合の電位分布は図20に示す。このときは、中性点から大地をみたサージインピーダンスは一相あたりの2分の1となるから、中性点電位の上昇は低く、電位の過渡振動も3相一括印加の場合と比べて微弱である。

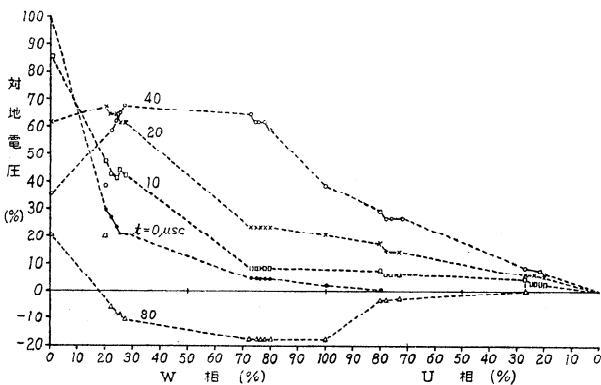
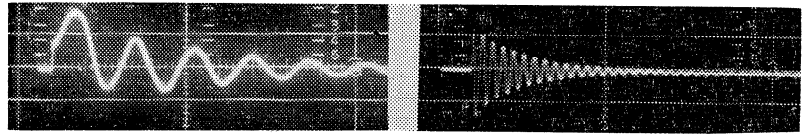


図20 三相変圧器における衝撃電位分布 (一相印加, 他相接地の場合)

4.2 2次巻線への移行電圧

2次巻線は、3.1節で述べたように、ほぼ1次巻線により遮閉される位置にあり、一方、移行電圧は3.3節から判るように、主として静電結合により決定されるか

(a) 中性点非接地 二次側開放 50 μ sec/div
(b) 中性点接地 二次側一相接地 20 μ sec/div



(a) (b)
図21 三相変圧器における移行電圧の一例

表4 三相変圧器における移行電圧 単位 %

1次端子				2次端子						
U	V	W	中性点	測定箇所	接地相			3相非接地		
					u	v	w			
一括印加				非接地	u	—	12	—	28	
					v	—	—	12	—	28
w	12	—	—		—	28				
一括印加				接地	u	—	27	—	47	
					v	—	—	—	—	47
接地印加				非接地	u	—	—	—	33	
					v	23	—	—	—	35
					w	23	—	—	—	37
接地印加				接地	u	—	—	—	17	
					v	23	—	—	—	—
					w	27	—	—	—	17

ら、3相変圧器においても単相模形で論じたことが適用できる。ただし、3相変圧器では2次巻線が Δ 結線であるために1次巻線の1相のみに印加した場合には、2次側各相には微小な高周波振動の発生が認められる。なお移行電圧の波形の一例を図21に掲げる。

1次巻線および2次巻線端子の種々の組合せによる移行電圧の大きさは表4に示めすが以下簡単に説明する。

4.2.1 3相一括印加の場合

まず中性点および2次各相が非接地であれば、現象的に単相模形と同等と考えられ、移行電圧の大きさも表2の値とはほぼ一致している。2次端子のどれか1相を接地した場合は、2次巻線は静電的に大地電位であり、移行電圧は図21(b)に示すような2次巻線の固有振動数と思われる170KC程度の高周波振動となる。この場合、中性点を接地すると、電磁結合によりさらに高い電圧を発生する。

もっとも高い移行電圧を生ずるのは、中性点接地2次各相開放の場合であって、これは図8(b)に示したように静電結合と電磁結合とによる誘起電圧が重畳されたものに相当する。

4.2.2 1相印加他相接地の場合

この場合は2次端子を非接地としても、各相移行電圧

に不平衡があるので、これにより発生する2次側固有振動が重畳し、結果的に2～4%の差異が生ずる。

なお、この場合においても2次端子のどれか1相を接地すれば、移行電圧は電磁結合により生じ、4.2.1項で述べたと同様な持続時間数10 μ secの高周波振動となる。

結 論

EE巻線を用いた3相変圧器とその3分の1に縮小した単相分模形について、衝撃電圧に対する種々の特性に関し実験および検討を行った。3相変圧器に対しては、期間の都合で十分な測定が行われなかった。以下にこの一連の実験に対する検討結果をまとめる。

(1) 模形変圧単は、実変圧器の3分の1相似構造をもち、現象の速さを3分の1とすれば、ほぼ実際の現象が推定できる。

(2) 電位分布の測定により、EE巻線における α の値は油中において約2.3であり、対サージ特性の優れていることが判った。

(3) 移行電圧は、2次端子を開放とした場合に大となり、その大きさはほぼ静電結合により決定される。したがってコンデンサを介して2次端子を接地する方法は有効である。

(4) タップ電圧に関しては、中性点を接地するか否かにより現象的に差異が認められた。直列タップ接続と並列タップ接続の間には著しい差異は認められなかった。

(5) 中性点保護方式としては、避雷器あるいは火花ギャップいずれも満足すべきものであるが、火花ギャップの制限電圧の選定には若干の検討が必要である。

(6) 等価回路は、比較的簡単な集中定数回路により、高周波領域における変圧器の特性を表わすことが出来た。

(7) 故障検出の一方法として、衝撃電圧に対する応答波形を健全時と比較して絶縁破壊個所を検出する方法を検討した。導体が短絡している場合は可能である。非短絡故障に対しては、サイラトロンにより模擬した結果、短絡故障と同様な結果が得られたが、さらに詳細な検討が必要と思われる。

謝 辞

実験遂行に当っては大阪大学工学部電気工学教室山中千代衛教授をはじめ同研究室助手豊田浩一氏、大学院学生南条基氏、内地留学生王子工業高校教諭米田茂信氏に色々とお世話になった。又測定に際しては当社三重工場、森田健一郎、下山肇、石崎方敏の各氏に協力を願っ

た。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 電力機器便覧(オーム社)40(昭33)
- 2) A.T. Chadwick, J.M. Ferguson, P.I.E.E. pt II 97, 737 (1950)
- 3) 山村, 岡, 電学誌78, 206(昭33)
- 4) E.L. White, P.I.E.E. ptA 107, 421(1960)
- 5) P. Waldvogel, Rouxel C.I.G.R.E 125(1956)
- 6) 米田, 藤田他, 昭37 関西連大 7-1
- 7) 米田, 藤田, 児玉他 昭38連大 721
- 8) 豊田, 藤田, 児玉 昭38 関西連大 7-3
- 9) P.A. Abetti, F.J. Maginnis, Trans. A.I.E.E. pt III 72, 495(1953)