UDC 621.316.925.2 : 621.314.22.08

保護継電方式における検出端機器（PT）の特性

Characteristic of PT in Protection Scheme

四　十　万　　稔*
Minoru Shijima

I. ま　え　が　き

保護継電方式の適用可否には検出端機器（CT，PTまたはPD）と検出器（継電器）の有機的な結合の良否が大きな影響をもっている。

継電器単体についての開発は，トランジスタ，サイリスタなど半導体製品の進歩に伴って著しく改善され，すでに実用段階に入っているが，他方検出端機器としての変成器類は未検討の分野が多い。

実系統における故障現象を的確に掌握し，継電器への判定入力とするためには検出端機器の性能向上が継電器同様に論じられなければならない。

特に，故障発生初期における過渡現象時にどのような特性を有するかが問題であり，一次系統現象を忠実に継電器に提供し得るかということは保護継電方式全般の高信頼性，高速度化解決の一課題でもある。

トランジスタ，サイリスタなど軽量，小形半導体素子は本質的にサージ，高調波異常電圧に対する許容レベルが低いから，これらの対策も考慮しなければならないし，変成器自体の忠実な変成がどの程度可能であるかは継電方式高性能化の重要な問題である。

この意味で保護継電器用計器用変圧器についてサージ移行特性，残留電圧測定試験を行ない，性能向上調査の一助に資するとともに，継電器には変成器との結合において検討すべき諸点を提起したつもりである。

II. PTの二次側移行電圧

最近の傾向として保護継電器にはトランジスタおよびサイリスタを使用した半導体継電器が多くなり需要は増大する一方である。

半導体継電器はある値以上の電圧を加えると破壊する致命的な欠陥を持っており，したがってPT，(PD)二次側に接続されるこの種継電器が一次側の開閉サージまたは衝撃波（インパルス）の値によって破壊することも予想されるのでPTの二次側へどの程度異常電圧が移行するかを調査した。

1)　供試品定格仕様

(a)　油　入　PT　ETO200/33 形　3,300/110V

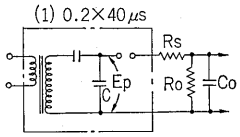
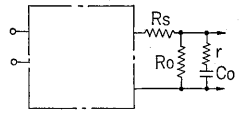
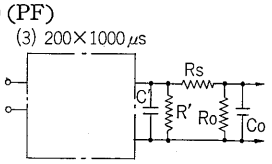
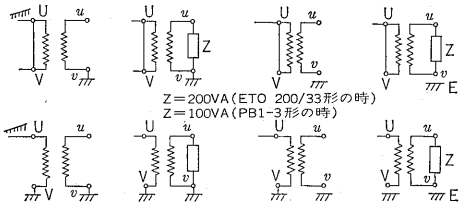
(b)　モールドPT　PB1-3 形　3,300/110V 100VA

(c)　油入三相PT　mETO 200/33 形

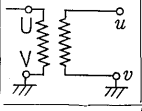
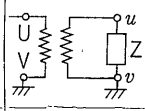
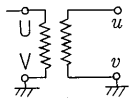
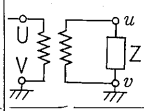
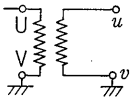
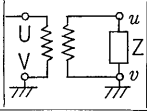
2)　試　験　内　容

絶縁階級に対応した異常電圧を一次側へ印加し，二次側に移行する電圧をアナライザにより測定した。

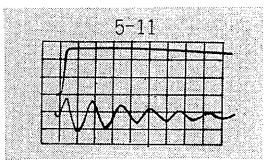
3)　試験結果（その1）

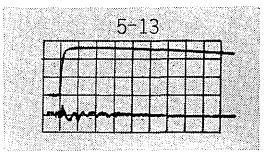
①試験内容	アナライザ試験による二次側への移行電圧調査測定 一次側印加波形　T_f=0.2 μs, 1.0 μs, 200 μs の3種類 0.2×40 μs（開閉サージ） 1.0×40 μs（開閉サージ） 200×1,000 μs（開閉緩波頭）	
②供試品形式	油入PT　ETO 200/33形 (3,300/110V)	モールドPT　PB1-3形 (3,300/110V 100VA)
③試験回路	(1) 0.2×40μs  C=0.1 (μF)　R_O=880 (Ω)　E_P=310 (V) R_S=150 (Ω)　C_O=220 (pF) (2) 1×40μs  R_S=150 (Ω)　R_O=880 (Ω)　r=15 (Ω) C_O=2,500 (PF) (3) 200×1000μs  C'=0.6 (μF)　R_S=2 (kΩ)　R_O=30 (kΩ) R'=4.5 (kΩ)　C_O=0.5 (μF)	
④供試品の結線	 Z=200VA(ETO 200/33形の時) Z=100VA(PB1-3形の時)	

* 制技・系統技術部

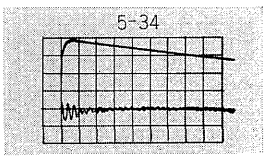
⑤ 試験結果		油入PT　ETO 200/33 形						モールドPT　PB1-3形					
印加波	結線	オシロ番号	V/div 印加波	V/div 検出波	μs/div	測定点	二次移行電圧(%) 検出波Peak/印加波Peak	オシロ番号	V/div 印加波	V/div 検出波	μs/div	測定点	二次移行電圧(%) 検出波Peak/印加波Peak
0.2×40 μs		5-11	100	50	1	u-v	18.8	1-22	100	10	0.2	u-v	5.4
		5-13	100	2	1	u-v	0.44	1-23	100	10	0.2	u-v	3.1
1×40μs		5-34	100	50	5	u-v	9.7	1-11	100	10	1	u-v	3.9
		5-35	100	0.5	1	u-v	0.23	1-13	100	10	1	u-v	2.6
200×1,000 μs		6-18	100	0.5	200	u-v	0.34	1-4	100	5	200	u-v	3.3
		6-19	100	0.5	500	u-v	0.17	1-6	100	5	200	u-v	3.3

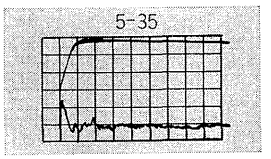
油入PT：ETO200/33 形



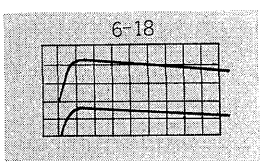


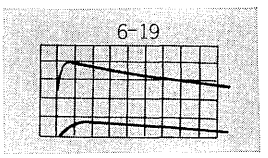
印加波 0.2×40 μs





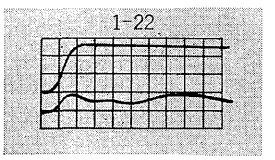
印加波 1×40 μs

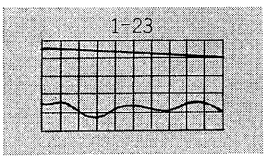




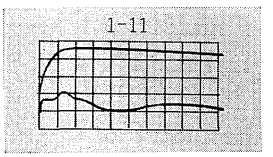
200×1,000 μs

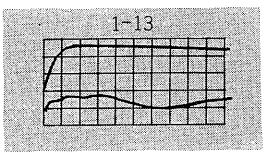
モールドDT：PB1-3 形



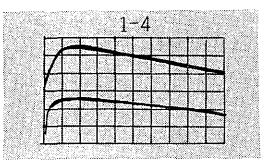


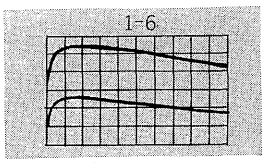
印加波 0.2×40 μs





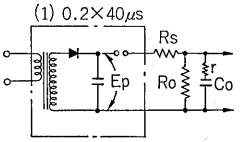
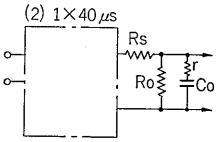
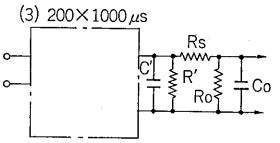
印加波 1×40 μs

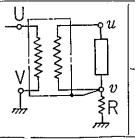
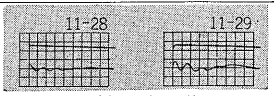
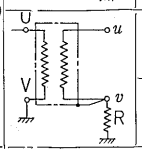
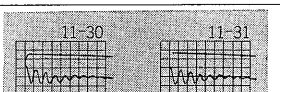
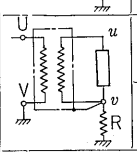
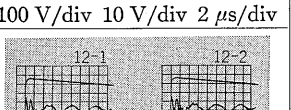
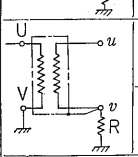
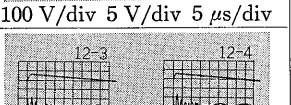
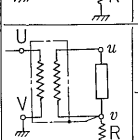
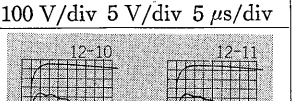
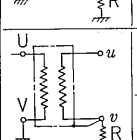
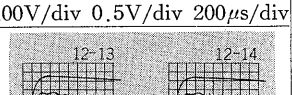


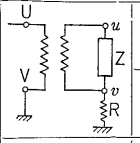
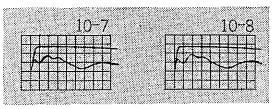
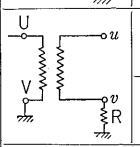
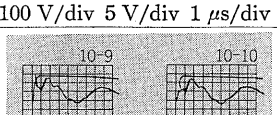
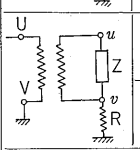
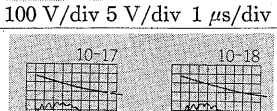
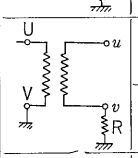
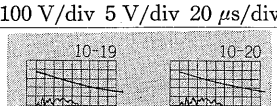
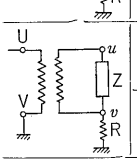
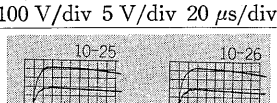
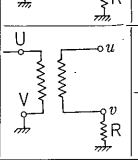
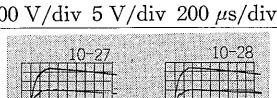


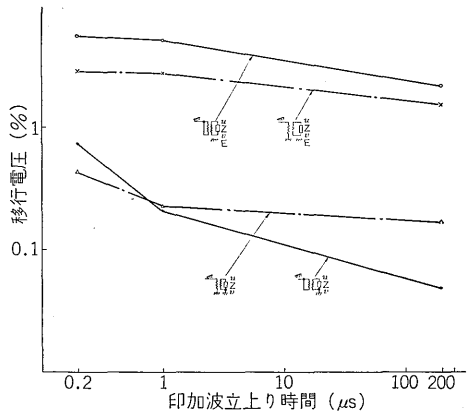
印加波 200×1,000 μs

4) 試験結果（その２）

	油入，モールドＰＴ	ＥＴＯ 200/33 形，　ＰＢ１—３形
① 試験内容	アナライザ試験による二次側への移行電圧調査測定 一次側印加波形　T_f=0.2 μs, 1.0 μs, 200 μs の３種類 0.2×40 μs（開閉サージ） 1.0×40 μs（開閉サージ） 200×1,000 μs（開閉緩波頭） （その１）では接地抵抗を考慮せず直接接地したが （その２）では接地抵抗（集中抵抗）をそう入し試験を行ないその影響を比較した。	
② 供試品形式	油入 ＰＴ ＥＴＯ 200/33 形（3,300/110 V）	モールド ＰＴ　ＰＢ１-３形 (3,300/110V, 100VA)
③ 試験回路	(1) 0.2×40μs  (2) 1×40μs  (3) 200×1000μs 	C : 0.1 (μF)　E_P : 310 (V)　R_S : 150 (Ω)　C_0 : 2,500 (PF)　C' : 0.5 (μF)　R' : 4.5 (kΩ) R_S : 150 (Ω)　C_0 : 200 (pF)　R_0 : 1.2 (kΩ)　r : 15 (Ω)　R_S : 1.2 (kΩ)　C_0 : 0.05 (μF) R_0 : 1.2 (kΩ)　　R_0 : 10 (kΩ)
④ 供試品の結線	試験結果中に示す。 （その１）における油入ＰＴの試験の際，油タンクを接地せずに試験を行なっているため接地の場合の結果が（その２）と異なっている．この点（その２）による試験方法の方が正しいと考えられる。 また接地抵抗≒零の場合（その１）と（その２）で同一結線，同一条件で多少差違があるがこれはシンクロスコープのアンプの違い試験時の配置，配線などの違いによるものと考えられる。	試験結果中に示す。
⑤ 試験結果	1. 同一結線では上段が R=10 Ω，下段が R=0 の場合。 2. 油タンクは接地抵抗を含むようにv点でアースした。	同一結線では上段が R=100 Ω，下段が R=0 の場合。

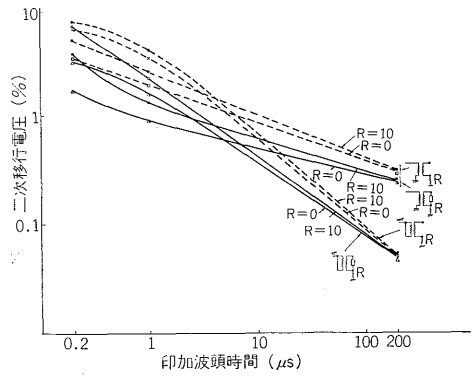
印加波形	結線	移行電圧(%)	測定点	オシログラム ＥＴＯ 20/33 形 R=10	オシログラム ＥＴＯ 20/33 形 R=0
0.2×40 μs		3.6	u-v		
		1.7	u-v	10V/div (11-28) 100V/div 5V/div (11-29) 2μs/div	
		4.9	u-v		
		3.3	u-v	100 V/div 10 V/div 2 μs/div	
1×40 μs		1.3	u-v		
		0.9	u-v	100 V/div 5 V/div 5 μs/div	
		2.5	u-v		
		1.9	u-v	100 V/div 5 V/div 5 μs/div	
200×1,000 μs		0.25	u-v		
		0.25	u-v	100V/div 0.5V/div 200μs/div	
		0.30	u-v		
		0.30	u-v	100V/div 0.5V/div 200μs/div	

印加波	結線	移行電圧(%)	測定点	オシログラム ＰＢ１-３形 R=100Ω	オシログラム ＰＢ１-３形 R=0
0.2×40 μs		4.1	u-v		
		3.1	u-v	100 V/div 5 V/div 1 μs/div	
		5.4	u-v		
		5.1	u-v	100 V/div 5 V/div 1 μs/div	
1×40 μs		1.6	u-v		
		1.6	u-v	100 V/div 5 V/div 20 μs/div	
		1.8	u-v		
		1.8	u-v	100 V/div 5 V/div 20 μs/div	
200×1,000 μs		2.8	u-v		
		2.8	u-v	100 V/div 5 V/div 200 μs/div	
		3.0	u-v		
		3.0	u-v	100 V/div 5 V/div 200 μs/div	



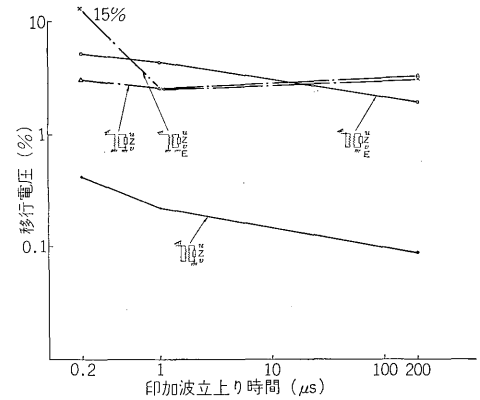
第1図　油入ＰＴ：ＥＴＯ200/33 形 定格負担を入れた場合の二次端子間移行電圧比較

Fig. 1. Static transfer voltage of PT's 2ry terminal (at Rated Burden)



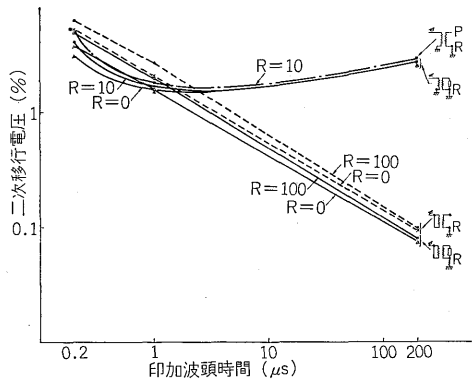
第2図　油入ＰＴ：ＥＴＯ200/33 形 移行電圧特性

Fig. 2. Static transfer voltage



第3図　モールドＰＴ：ＰＢ1-3 形定格負担を入れた場合の二次端子間移行電圧比較

Fig. 3. Static transfer voltage of PT's 2 ry terminal (at Rated Burden)



第4図　モールドＰＴ：ＰＢ1-3 形移行電圧特性

Fig. 4. Static transfer voltage type; PB 1-3

5)　試験結果（その３）

油入 3φ ＰＴ　mＥＴＯ 200/33 形		
①	試験内容	結果（その１），（その２）に同じ
②	供試品形式	油入3φＰＴ　mＥＴＯ 200/33
③	試験回路	結果（その２）に等しい。
④	供試品の結線	試験結果中に示す。 Ｒ：接地抵抗に相当する集中抵抗
⑤	試験結果	油入3φＰＴ　mＥＴＯ 200/33

1. 結線のうち，二次側の接地点は“V”のみとし，“W”点の接地については試験せず。
2. 油タンクは接地抵抗を含むように“V”点で接地した。

印加波形	結線	移行電圧 (%)	測定点	オシログラム u-E	オシログラム w-E
02×40 μs	U-W, V-W 各短絡 R=10Ω	9.6	u-E	1-3	1-7
		9.6	w-E	100V/div 10V/div 2 μs/div	
	同上 R=0	5.3	u-E	1-1	1-2
		5.3	w-E	100V/div 10V/div 2 μs/div	
1×40 μs	U-W, V-W 各短絡 R=10Ω	8.7	u-E	2-21	2-23
		8.7	w-E	100V/div 10V/div 2 μs/div	
	同上 R=0	3.8	u-E	2-19	2-20
		4.1	w-E	100V/div 5V/div 2 μs/div	
200×1,000 μs	R=10	0.31	u-E	4-12	4-13
		0.05 ≒零	w-E	100V/div 1V/div 200 μs/div	

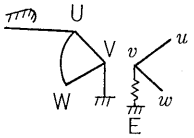
Ｒ=0.10Ω および負担の有無に関係なく，u-E=0.31%，W-E≒0 となる。

結果の検討

〔ｍＥＴＯ200/33 形油入 3φ ＰＴ〕

1) 緩波頭波を印加した場合，二次側への移行電圧が２種類に分けられる．一次側を接地しないで印加した場合，二次側への誘起電圧は零，また接地した場合は約0.31%の移行分を示している．しかも，接地抵抗および負担の有無に関係なく一定値である点から，静電的な移行ではなく，電磁的な結合をしていることが考えられる。

たとえば，一次側接地の場合で，結線を下記のようにしたとき



u-E，w-E ともに 0.31%である。

この場合の二次誘起電圧（u-E間 or w-E間）は，オシログラムから判明するように，印加波 Peak，320 V，検出波 Peak，1 V で

$$\delta=\frac{1}{320}\times100=0.31\%$$

またこの P，T の変成比から $\frac{110}{33{,}000}\times100=0.33\%$ となり，二次誘起電圧はこの変成比にほぼ一致する．

なお，試験時の印加波の dv/dt は $\frac{dv}{dt}=\frac{320}{200\times10^{-6}}=1.6\times10^{6}$ v/s

定格の変成比で見ると，33,000 V で 50 Hz から

$$\frac{dv}{dt}=\frac{33\times\sqrt{2}\times13^{3}}{5\times10^{-3}}=9.3\times10^{6}\ \text{v/s}$$

となり，周波数から見ても電磁的結合が充分可能である。

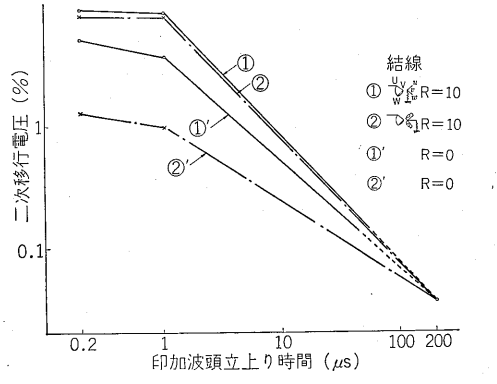
2) CT 同様，油タンクの接地をはずすと，0.2×40 μs，1×40 μs の各波については，かなり，検出電圧が増大する．鉄心，タンクなどのシールド効果がきわめて小さくなる影響によるものと考えられる。

3) 接地抵抗の有無によりかなり差が出ている（特に負担を入れた場合）．0.2 μs，1 μs の早い立上り時間を持つものにおいては集中定数としてそう入した接地抵抗の影響が相当大きくなっている．使用時は分布的な抵抗であり，接地線の持つ静電容量は相当大きく，接地点の電位振動はほとんどないものと思われる．したがって，この結果そのままが使用時発生するとは考えられず，条件としてはかなり過酷な場合とみて良い。

なお，この試験においては，測定線，接地抵抗，負担などの接続に際し，これらの持つ浮遊容量的なものの影響を種々の配置を考慮して減らして測定したが，完全に除くことはほとんど不可能である。

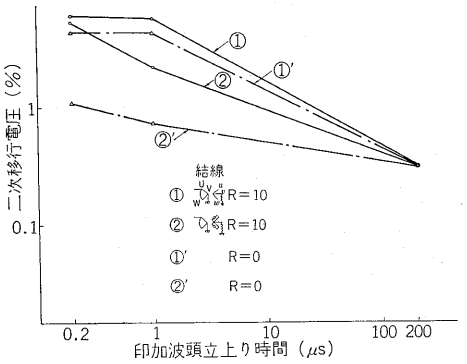
4) そ の 他

二次測の接地点はＶ点のみとした．これは実際に使用する場合，接地は通常Ｖ端子で行なうため，今回の試験はこれに準ずることとした。



第５図 三相油入 PT mETO 200/33 形移行電圧特性

Fig. 5. Static transfer voltage type ; Oil PT mETO 200/33



第６図 三相油入 PT mETO 200/33 形移行電圧特性

Fig. 6. Static transfer voltage type ; Oil PT mETO 200/33

III. 三相接地形計器用変圧器の残留電圧

三相送配電系統の地絡事故は，事故時に系統に現われる零相電圧と零相電流をもとにして検出される．零相電圧を検出するには普通三相接地形計器用変圧器の開放三角結線された三次巻線を用いる。

この三次巻線開放端子間に異常残留電圧が発生し，地絡継電器が誤動作したりするので，この残留電圧を調査した。

1. 異常残留電圧の発生例

1) 三相接地形計器用変圧器の例

三相接地形計器用変圧器定格仕様	形式	α GTDO 200/66
	定格電圧	66,000/110/110/$\sqrt{3}$
	定格負担	3×200/3×200 ＶＡ
	階級	1.0/3 Ｇ級
	定格周波数	50Hz

GPT 端子 ＼ 系統構成		(イ) 正常系統の場合	(ロ) 連系されている66kV 系送電線の約⅔(亘長)を切離した場合	(ハ) 66kV 母線のみ充電の場合
二次	u-o	66.4 V	63.2 V	65.0
	v-o	67.6	65.8	66.4
	w-o	62.4	65.3	64.0
	u-v	113.2	111.8	112.5
	v-w	113.0	112.0	112.3
	w-u	113.3	112.1	112.3
三次	a-b			64.0
	b-c			66.8
	c-f			65.2
	a-f	9.1	4.6	3.9

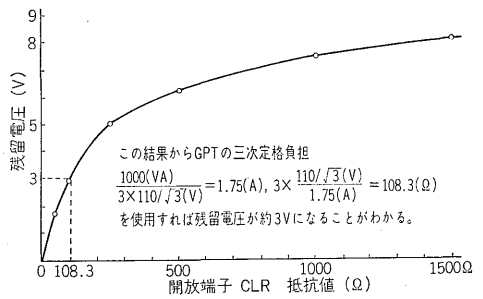
2) 三相五脚鉄心接地形計器用変圧器の例

供試品仕様	形	ＬＦ 103/3		200ＶＡ
	相数	3	定格負担	3,300/110/ $\frac{110}{\sqrt{3}}$ V
	出力	1kVA(一次，三次間)	定格電圧	
	誤差階級	1.0級(一次，二次間)	絶縁階級	一次60号Ａ 二次 0.2 号 三次 0.2 号
	定格周波数	50/60 Hz		

第 1 表
Table 1.

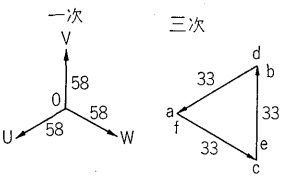
試番	GPT三次開放端子接続抵抗 (Ω)	U-V 端子間 (V)	V-W 端子間 (V)	W-U 端子間 (V)	o-u 端子間 (V)	o-v 端子間 (V)	o-w 端子間 (V)	a-b 端子間 (V)	b-c 端子間 (V)	c-f 端子間 (V)	a-f 端子間 (V)	発電機電圧 (V)
1	∞	3,300	3,300	3,300	66	64	60.5	66	64	60.5	10.15	
2	1,500	3,260	3,260	3,260	65	63.5	61	65	63.5	61	8.1	
3	1,000	3,260	3,260	3,260	64.5	63.5	61	65	63.5	62	7.5	
4	500	3,260	3,260	3,260	64.5	63.5	61.5	64.5	63.5	62.5	6.25	3,800
5	250	3,270	3,270	3,270	65	64	63	65	64	62.5	5.0	
6	100	3,270	3,270	3,270	63	62.5	62.5	63.5	63	63	3.0	
7	50	3,270	3,270	3,270	63	63	62.5	64	63	63.5	1.70	
8	∞										11.5	3,500
9	∞										9.85	3,150
変圧器結線												

電源は三相，1,000kVA，3,800V交流発電機
二次，三次負担はOVA，測定用電圧計は真空管電圧計（APE-102）



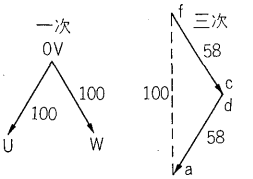
第7図　三次開放端子接続抵抗と残留電圧との関係
（第1表の結果参照）

Fig. 7. Current limitting resister and residual voltage



第9図　正常時電圧ベクトル図

Fig. 9. Normal voltage vector



第 10 図　V相完全地絡時電圧ベクトル図

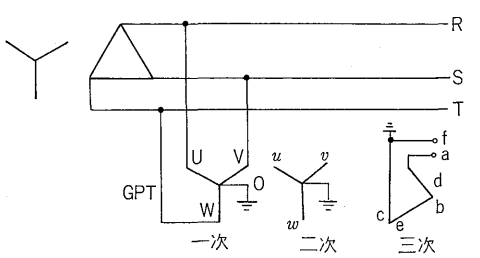
Fig. 10. Voltage vector at ground fault(phase-V)

2. 三次端子（a-f）間に現われる電圧

1)　正常に動作している場合

ここでは三相接地形計器用変圧器が理想的に動作している場合について考えてみる。

正常状態では，三次電圧のベクトルは閉じていて端子（a－f）間には電圧は現われないが，V相が完全地絡すると第 10 図のように中性点電位はV相と一致し，健全なほかの二相の一次巻線には線間電圧が加わる．したがって一次電圧は正常時の $\sqrt{3}$ 倍になり，開放端子（a－f）間にはさらにその $\sqrt{3}$ 倍すなわち常規三次電圧の 3 倍の電圧が発生することになる。



第8図　主　回　路　図

Fig. 8. Main circuit

2)　規格による残留電圧

正常状態で端子（a－f）間に電圧が発生すると保護継電器誤動作の原因となる．（JEC-143）では三角結線の端子（a－f）間に定格負担を接続し，一次側に平衡三相定格一次電圧を加えた場合，端子（a－f）間に生ずる電圧（これを「残留電圧」と呼ぶ）を三次の階級にしたがって定格零相三次電圧の 3％（3G級）または 5％（5G級）以下と規定している。

3)　残留電圧の発生原因

残留電圧の発生原因としては，各相電圧変成特性の不平衡と，鉄心励磁特性の非線形とが考えられる。

(1)　各相電圧変成特性の不平衡

個々の計器用変圧器（ここでは単相計器用変圧器 3 台で構成される三相接地形計器用変圧器を扱う）の三次誤差電圧を v_1, v_2, v_3 とすると，開放端子（a－f）間に現われる電圧 v_R は

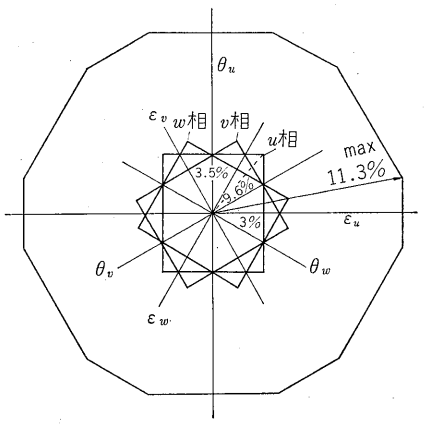
$$v_R = v_u + \alpha^2 v_v + \alpha v_w \qquad \cdots\cdots(1)$$

ただし　$\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$,

$$\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

これを定格三次電圧に対する誤差で表わすと

$$\delta_R = \delta_u + \alpha^2 \delta_v + \alpha \delta_w \qquad \cdots\cdots(2)$$



第 11 図　3G級の最大誤差
Fig. 11.　Maximum error of GPT 3G class

となる。

たとえば 3G 級について，図式計算で求めると第 11 図となる。

これから 3 G 級の発生電圧の 最大値は 11.3% となる。

これは絶対誤差 3 G 級の限界である 4.6% の 2.46 倍である。

残留電圧は定格三次電圧の 3 倍である定格零相三次電圧を基準に表現するから 11.3% を残留電圧で表現すると 11.3/3=3.76% となる．これから三次の誤差が規格の範囲内でまったく無作意に分布しているとすると残留電圧は規定された範囲を越える可能性がある。

しかし，普通接地形計器用変圧器の規格は 1.0 級を保証する二次の特性で決定されるので必然的に三次の特性は指定された値より良いものとなる．仮に絶対誤差が三次階級の⅔程度とすれば大部分の接地形計器用変圧器ではほとんどこれ以下になっている）残留電圧は 3 %以下となる。

これは三次の誤差が指定階級の⅔程度の範囲で（＋）から（－）にわたり無作意に分布しているとした場合であるが，実際はもっとばらつきの範囲が小さくなっている．ここで 22kV 接地形計器用変圧器の統計量[(1)(2)]より誤差を $\delta=\varepsilon+j\theta$ で表わすと式(2)より

$$\delta_R=\varepsilon_R+j\theta_R=\left\{(\varepsilon_u-\varepsilon_v)-\frac{1}{2}(\varepsilon_w-\varepsilon_v)-\frac{\sqrt{3}}{2}(\theta_w-\theta_v)\right\}+j\left\{(\theta_u-\theta_v)-\frac{1}{2}(\theta_w-\theta_v)+\frac{\sqrt{3}}{2}(\varepsilon_w-\varepsilon_v)\right. \quad \cdots(3)$$

また同時に製作した 22kV 接地形計器用変圧器の誤差のばらつきの一例を下記に示す．今仮に誤差の差を 4′ とし最悪の条件で考えると式(3)より

$$|\delta_R|=\left[\left\{0.358+\frac{1}{2}\times0.358+\frac{\sqrt{3}}{2}\times0.252\right\}^2+\left\{0.252+\frac{1}{2}\times0.252+\frac{\sqrt{3}}{2}\times0.358\right\}^2\right]^{1/2}=1.03\% \quad \cdots\cdots(4)$$

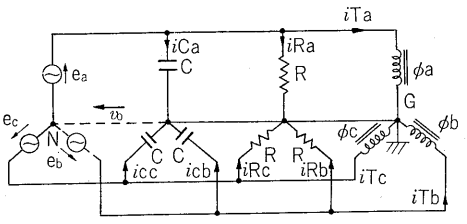
誤差のばらつき	一次，二次間				一次，三次間	
	200V		50VA		200VA	
	比誤差	位相角	比誤差	位相角	比誤差	位相角
平均値	-0.55%	+6.3分	+0.46%	+2.7分	−1.14%	+34.7分
標準偏差 δ	0.0404%	0.682分	0.0208%	0.344分	0.0895%	2.17分

すなわち，電圧変成特性の不平衡ではさほど残留電圧は発生しない。

(2)　励磁特性の非線形

計器用変圧器の鉄心には，磁気飽和があるから一次端子間に正弦波を誘起させるためには，励磁電流に高調波を含むことになる．逆に励磁電流に高調波を含み得ない場合には，誘起電圧に高調波を含むことになる．三相接地形計器用変圧器の二次，三次を開放し中性点の接地してない電源で一次巻線を励磁すると励磁電流には，第三高調波を含み得ないから，線間には現われないが，各相の誘起電圧に第三高調波を含むことになり，三次の開放端子（a－f）間にはこの第三高調波電圧が現われる。

今対地キャパシティおよび漏洩コンダクタンスのある系統に三相接地形計器用変圧器が接続されている場合を第 12 図に示す。



第 12 図　回　路　図
Fig. 12.　Equivalent circuit

これから次の関係が得られる[(3)]。

$$\left.\begin{aligned}e_a+v_0&=\frac{d\phi_a}{dt}=\frac{1}{C}\int i_{Ca}dt=Ri_{Ra}\\ e_b+v_0&=\frac{d\phi_b}{dt}=\frac{1}{C}\int i_{Cb}dt=Ri_{Rb}\\ e_c+v_0&=\frac{d\phi_c}{dt}=\frac{1}{C}\int i_{Cc}dt=Ri_{Rc}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(5)$$

$$(i_{Ta}+i_{Ta}+i_{Tc})+(i_{Ca}+i_{Cb}+i_{Cc})+(i_{Ra}+i_{Rb}+i_{Rc})=0 \quad \cdots\cdots(6)$$

また

$$\left.\begin{aligned} e_a &= e\sin\omega t \\ e_b &= e\sin\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right) \\ e_c &= e\sin\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(7)$$

さらに計器用変圧器の励磁特性を

$$\left.\begin{aligned} i_{Ta} &= f(\phi_a) \\ i_{Tb} &= f(\phi_b) \\ i_{Tc} &= f(\phi_c) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

とする。

ここで計器用変圧器各相の磁束鎖交数 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c の零相分を ϕ_0 とすると

$$\phi_0=\frac{1}{3}(\phi_a+\phi_b+\phi_c) \quad \cdots\cdots(9)$$

式(5), (9)および $e_a+e_b+e_c=0$ の関係より

$$v_0=\frac{d\phi_0}{dt} \quad \cdots\cdots(10)$$

式(5), (7)および式(10)より

$$\left.\begin{aligned} \phi_a &= \frac{-e}{w}\cos\omega t+\phi_0 \\ \phi_b &= \frac{-e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right)+\phi_0 \\ \phi_c &= \frac{-e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right)+\phi_0 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(11)$$

一方式(5)および式(8)より

$$\left.\begin{aligned} &i_{Ta}+i_{Tb}+i_{Tc}=f(\phi_a)+f(\phi_b)+f(\phi_c) \\ &i_{Ca}+i_{Cb}+i_{Cc}=3C\cdot\frac{dv_0}{dt}=3C\cdot\frac{d^2\phi_0}{dt^2} \\ &i_{Ra}+i_{Rb}+i_{Rc}=\frac{3}{R}\cdot v_0=\frac{3}{R}\cdot\frac{d\phi_0}{dt} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(12)$$

が得られる．これらを式(6)に代入すると零相磁束鎖交数 ϕ_0 に関する微分方程式が得られる。

$$3C\frac{d^2\phi_0}{dt^2}+\frac{3}{R}\cdot\frac{d\phi_0}{dt}+[f(\phi_a)+f(\phi_b)+f(\phi_c)]=0 \quad \cdots\cdots(13)$$

ここで $C=0$, $R=\infty$ の場合を考えると式(13)は

$$f(\phi_a)+f(\phi_b)+f(\phi_c)=0 \quad \cdots\cdots(14)$$

この ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c に式(11)を代入すると

$$f\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\omega t+\phi_0\right\}+f\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right)+\phi_0\right\}+f\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right)+\phi_0\right\}=0 \cdots(15)$$

今仮に励磁特性を $f(\phi)=K_1\phi$ とすれば式(15)から

$$\phi_0=0 \quad \cdots\cdots(16)$$

他方三次開放端子 (a－f) 間に現われる電圧 v_{03} は下式となる。

$$v_{03}=\frac{d}{dt}(\phi_a+\phi_b+\phi_c)=3\frac{d}{dt}\phi_0 \quad \cdots\cdots(17)$$

したがって励磁特性が $f(\phi)=K_1\phi$ の場合は三次開放端子 (a－f) 間に電圧は現われない。

実際の励磁特性は直線で近似することはできず，従来いろいろな近似式が提案されている。

これらは計算機による解析には便利であるが，手計算による解析には繁雑すぎる．そこで非線形のもっともシンプルな近似として

$$f(\phi)=K_2\phi^3 \quad \cdots\cdots(18)$$

を用いると式(15)から

$$K_2\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\omega t+\phi_0\right\}^3+K_2\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right)+\phi_0\right\}^3+K_2\left\{-\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right)+\phi_0\right\}^3=0 \quad \cdots\cdots(19)$$

$$E_0^3+\frac{3}{2}E_0-\frac{1}{4}\cos 3\omega t=0 \quad \cdots\cdots(20)$$

ただし $E_0=\dfrac{\omega\phi_0}{e}$，式(20)より近似解として

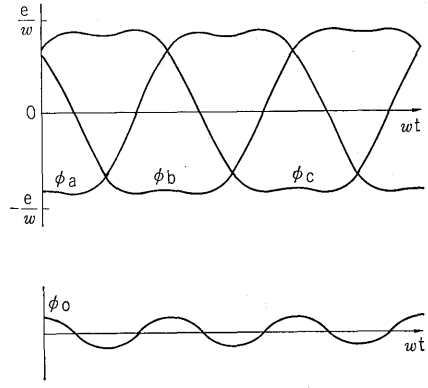
$$E_0\fallingdotseq\frac{1}{6}\cos 3\omega t \quad \cdots\cdots(21)$$

が得られる。

したがって零相磁束 ϕ_0，および各相磁束 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c は

$$\left.\begin{aligned} \phi_0 &= \frac{1}{6}\cdot\frac{e}{\omega}\cos 3\omega t \\ \phi_a &= -\frac{e}{\omega}\cos\omega t+\frac{1}{6}\cdot\frac{e}{\omega}\cos 3\omega t \\ \phi_b &= -\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{2}{3}\pi\right)+\frac{1}{6}\cdot\frac{e}{\omega}\cos 3\omega t \\ \phi_c &= -\frac{e}{\omega}\cos\left(\omega t-\frac{4}{3}\pi\right)+\frac{1}{6}\cdot\frac{e}{\omega}\cos 3\omega t \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

となる．これらをグラフに示すと第 13 図となる。



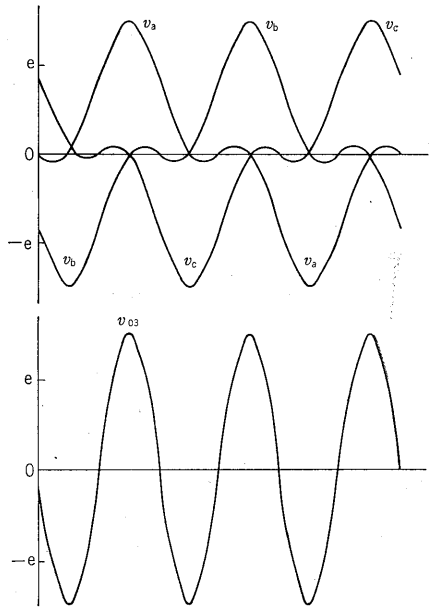
第 13 図　各相磁束と零相磁束

Fig. 13.　Each phase flux and zero phase flux

三次開放端子 (a－f) 間に現われる電圧 v_{03} および各相誘起電圧 v_a, v_b, v_c は

$$\left.\begin{aligned} v_{03} &= -\frac{3}{2}e\sin 3\omega t \\ v_a &= -e\sin\omega t + \frac{1}{2}e\sin 3\omega t \\ v_b &= -e\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{2}e\sin 3\omega t \\ v_c &= -e\sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) + \frac{1}{2}e\sin 3\omega t \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(23)$$

となる．これをグラフに示すと第 14 図となる。



第 14 図　各相誘起電圧と残留電圧

Fig. 14.　e. m. f of each phase and residual voltage

以上大胆な近似ではあるが，解析的に三次開放端子（a－f）間に第三高調波電圧の発生機構を説明した。

4)　系統の零相電圧

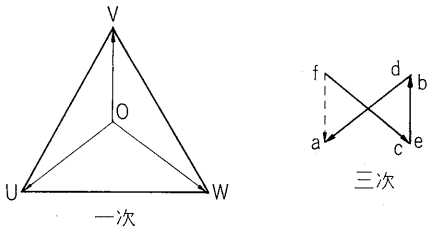
これまでの検討は，平衡している系統についてのものである．第 12 図で対地キャパシティ，対地漏洩コンダクタンスおよび計器用変圧器の励磁特性は各相共同一と考えている。

しかし三相接地形計器用変圧器が実際に使用される系統はすべて平衡しているとは限らない．たとえば対地キャパシティ，あるいは励磁インピーダンスの不平衡により，系統に零相電圧を発生することがある。

(1)　系統固有の零相電圧

第 12 図で $R=\infty$，V相の C が他相の C にくらべ若干大きくなっている場合のベクトル図は第 15 図となる。

系統の中性点電位は，電圧ベクトル三角形の幾何学的中心からずれ，接地形計器用変圧器の各相には，$\overrightarrow{OU}$，$\overrightarrow{OV}$，$\overrightarrow{OW}$の電圧が印加される．これにより三次開放端子（a－f）間には第 15 図の$\overleftarrow{af}$で示される電圧が生ずる（ここでは計器用変圧器の変圧比誤差は無視している）。



第 15 図　ベクトル図

Fig. 15.　Voltage vector

このように系統に地絡がないにもかかわらず，接地形計器用変圧器の三次開放端子（a－f）間には電圧が生ずる．これは系統固有の零相電圧であり，連系される送電線によっても変ってくる．前述の異常残留電圧の発生例は，このケースに該当する。

(2)　接地形計器用変圧器の励磁インピーダンスの不平衡

励磁インピーダンスは，鉄心に使用するけい素鋼板の特性によって一義的に決まるものであり，ある程度のばらつきは避けられない．たとえば先に 22kV 接地形計器用変圧器の場合[2]には励磁電流（したがって励磁インピーダンス）の変動係数が 0.051 であり，これから 99% の確率で入る範囲（平均値 ±2×標準偏差）の上限と下限では略 20% の差が出る。

第 12 図で $C=0$，$R=\infty$ の場合には系統の中性点は接地形計器用変圧器の励磁インピーダンスのみで決定され，各相に差があると系統に零相電圧を生じ，これが三次開放端子（a－f）間に現われる。

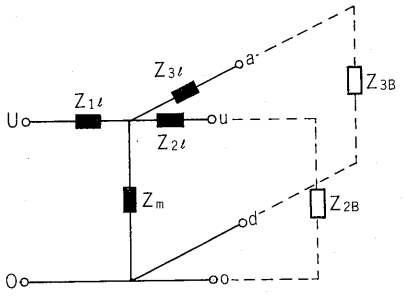
(3)　二次負担の不平衡

以上はいずれも接地形計器用変圧器の二次が開放されている場合のことである．実際の使用状態では，二次に負担が接続されている．これが系統の零相電圧におよぼす影響を考えてみる。

接地形計器用変圧器の等価回路は第 16 図のように表わせる。

ここで Z_{1l}，Z_{2l}，Z_{3l} はおのおの一次，二次，三次の漏洩インピーダンスであり Z_m は励磁インピーダンスである。

この図から u－O 間に二次負担 Z_{2B}，a－d 間に三次負



$$\frac{(Z_{2l}+Z_{2B})\,(Z_{3l}+Z_{3B})/(Z_{2l}+Z_{2B})+(Z_{3l}+Z_{3B})}{(Z_{2l}+Z_{2B})\,(Z_{3l}+Z_{3B})/(Z_{2l}+Z_{2B})+(Z_{3l}+Z_{3B})+Z_m}\times Z_m$$

第 16 図　ＧＰＴの等価回路

Fig. 16.　Equivalent circuit of GPT

担 Z_{3B}〔(a-f) 間に接続する負担を $3\times Z_{3B}$ とする〕を接続した場合の U-O 端子からみたインピーダンスは次式で表わされる。

$$Z=Z_{1l}+\frac{Z_m(Z_{2l}+Z_{2B})(Z_{3l}+Z_{3B})}{Z_m(Z_{2l}+Z_{2B})+(Z_{2l}+Z_{2B})(Z_{3l}+Z_{3B})+(Z_{3l}+Z_{3B})Z_m} \quad \cdots\cdots(24)$$

二次，三次開放の場合

$$Z=Z_{1l}+Z_m=Z_m\left(1+\frac{Z_{1l}}{Z_m}\right) \quad \cdots\cdots(25)$$

となり普通

$$1\gg\frac{Z_{1l}}{Z_m}$$

であるから上式は

$$Z\fallingdotseq Z_m$$

となり(2)項で励磁インピーダンスのみを問題にしたことの妥当性が説明できる。

二次に Z_{2B} の負担が接続され，三次が開放されていると式(24)は

$$Z=Z_{1l}+\frac{Z_m(Z_{2l}+Z_{2B})}{Z_m+Z_{2l}+Z_{2B}} \quad \cdots\cdots(26)$$

Z_{2B} に不平衡があれば，励磁インピーダンスが均一であっても，一次端子からみた接地形計器用変圧器のインピーダンスは不平衡となり，系統には零相電圧が生ずることになる．見方を変えれば励磁インピーダンスのアンバランスを二次 Z_{2B} によりある程度保証することもできる。

(4) 三次負担の影響

三次負担は三相で均等に分担されるので，この不平衡は考えなくてよい．それだけでなく，三次負担が大きいと二次インピーダンスおよび励磁インピーダンスの合成が不平衡のときはこれを平衡の方へ移行させることが式(24)から明らかである。

IV. むすび

計器用変成器の過渡変成特性並びに残留特性として本号では PT, GPT を中心として述べた．これら諸現象に対する保護継電方式上の対策並びに補償上留意すべき点については後日，発表する予定である。

参考文献

(1) 坪内：三次巻線の誤差限度からみた残留電圧（開放三角結線の端子電圧の大きさ。）

(2) 前川・岡田：S35 東支大会 No. 173
計器用変圧器における特性の統計的考察

(3) 泥堂：電試所研究報告 第635号
接地形計器用変圧器の鉄心飽和に起因する中性点不安定現象の研究

＊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。