

誤動作防止回路付新形変圧器差動保護継電方式と 東京電力稲荷変電所における試験結果

The Transformer Differential Relaying System and Its Field Test
on the Inari Substation of the Tokyo Electric Power Company

石 田 与 吉*
Yokichi Ishida

岡 村 正 巳*
Masami Okamura

清 水 勝 良**
Katsuyoshi Shimizu

渡 井 三 夫***
Mitsuo Watai

柴 田 満 男****
Mitsuo Shibata

内 容 梗 概

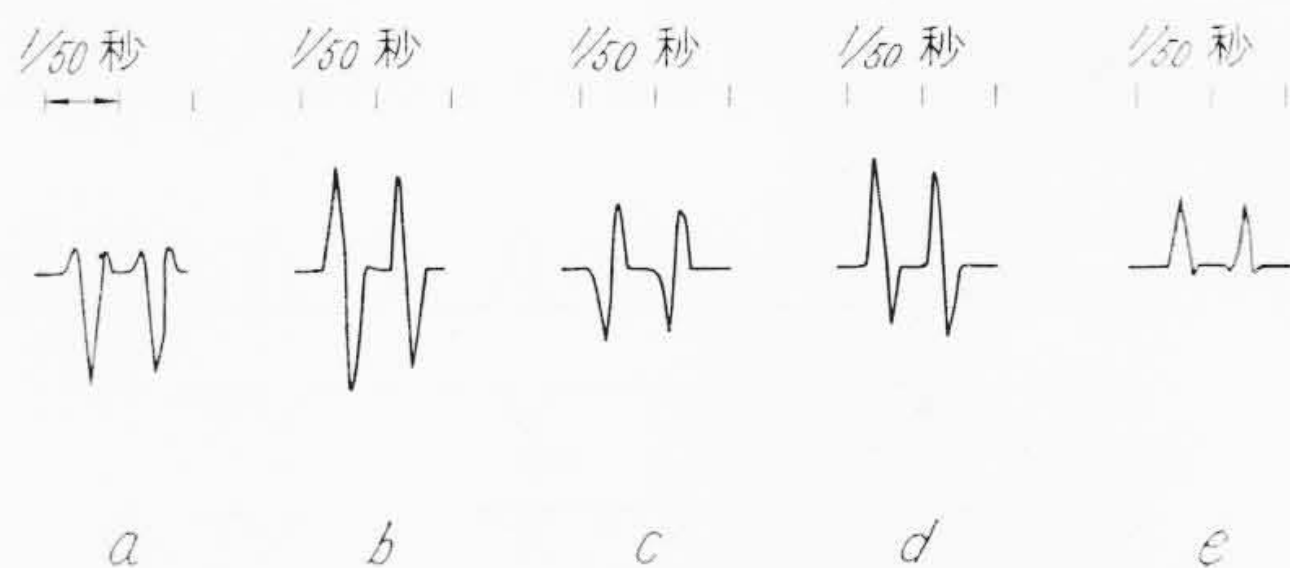
変圧器の差動保護継電方式においては励磁突入電流による誤動作の防止が重要な課題となっているが、本文は誤動作防止回路付差動継電方式について概要を紹介しあわせて東京電力株式会社稲荷変電所において実施された誤動作試験の結果について報告している。

1. 緒 言

変圧器の保護に差動電流方式を適用する場合は励磁突入電流の存在を無視することはできない。これは励磁突入電流が変圧器の励磁側巻線のみを流れて差動継電器に対してあたかも故障電流と同様の結果を与え、往々にして継電器誤動作の原因になるためである。ことに高速度継電器の場合は誤動作の機会が多くなる。このため変圧器差動保護継電器にとっては故障時の動作特性の向上もさることながら励磁突入電流による誤動作防止の対策が重要課題となっている。誤動作防止の方式としては、高調波抑制方式、励磁開始後一定時間継電器の感度を低下する方式などがすでに実用されているが、本稿には日立製作所がこのたび開発した励磁突入電流の特殊な非対称波形を利用した新構想の差動保護継電方式について概要を紹介し、あわせて東京電力株式会社稲荷変電所の、66 kV, 30 MVA 変圧器について実施した誤動作試験の結果について報告する。

2. 励磁突入電流の波形^{(1)~(3)}

励磁突入電流の発生原理および波形についてはすでに詳細に説明されているからここでは本方式の考案の基礎となっている三相変圧器の突入電流波形について簡単にふれることとする。一般に電力用三相変圧器巻線の結線は特殊のものを除き、Y-Δ, Δ-Y, Δ-Δ, Y-Y-Δ結線のいずれかであり必ずΔ巻線を有している。突入電流による鉄心磁束の飽和は主として励磁開始時の電圧位相と残留磁束で決まるから各相の鉄心の飽和度はそれぞれ異なる。このためインピーダンス降下に不平衡を

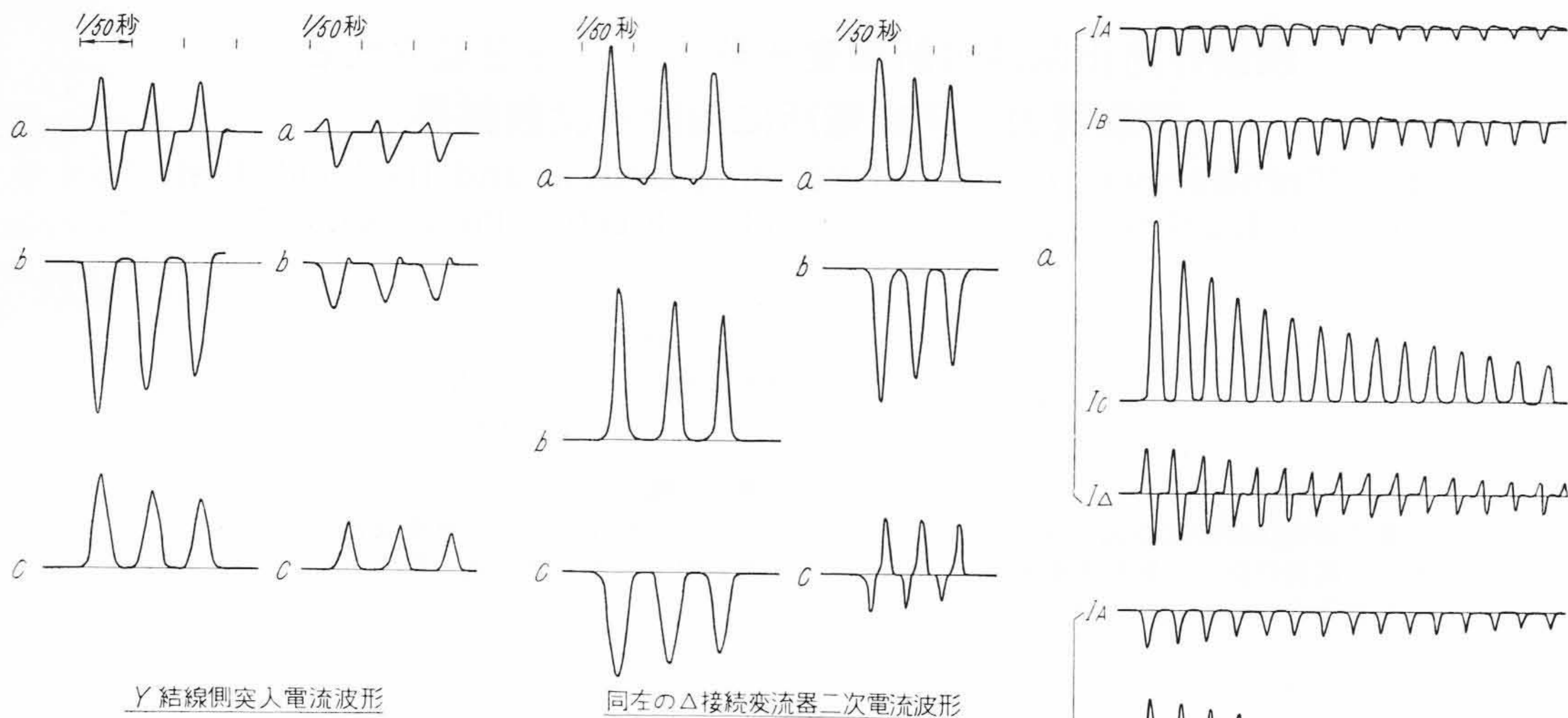


第1図 変圧器Δ巻線内環流電流波形

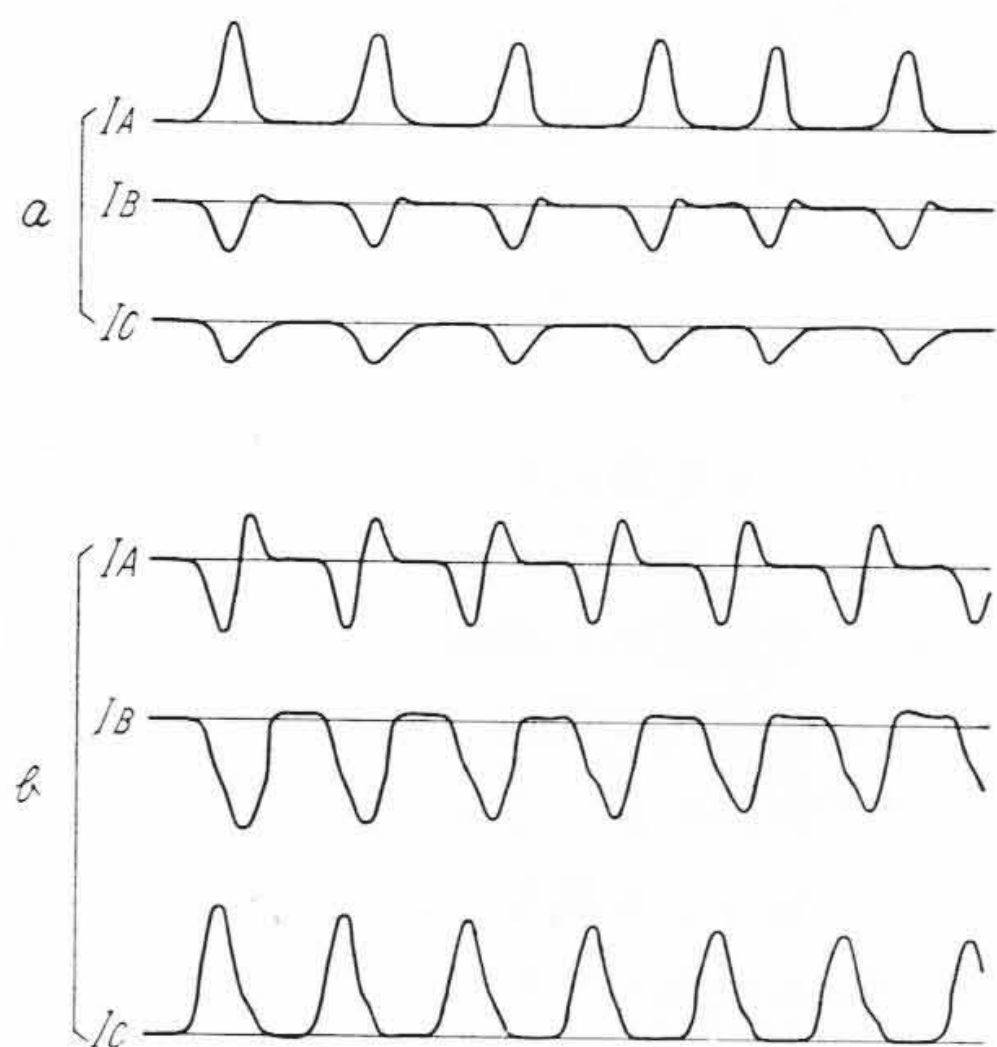
生じ中性点には零相電圧を誘起する。これがΔ巻線により短絡されてΔ巻線内に電流が環流する。この電流は励磁開始時の電圧位相によって複雑な波形をなしている。第1図a, bは、もっとも異なる代表的な波形であるが多くの同図c, d, eの如くであって突入電流減衰後は第3高調波のみとなる。Δ巻線内環流電流は変圧器作用によってそのまま励磁側相電流として流れるから三相突入電流波形は单相突入電流と環流電流の合成波形となる。ゆえに突入電流の発生しない相の電流波形は環流電流波形がそのまま現われる。線電流はY結線側は相電流と相等しいがΔ結線側は2相の電流の合成電流であるから両者の波形は多少異なるが差動保護方式では電流位相を合わせるためY結線側変流器をΔ結線にするので継電器電流としては同一になる。第2図はY結線側突入電流とそのΔ結線変流器の二次電流波形の一例である。第3, 4, 5図は各種容量の三相変圧器突入電流の変流器二次側における波形である。いずれの場合も3相のうち少なくとも2相は一方向に偏した非対称波形でありその方向は相反している。ほかの1相は必ずしも半波波形にはならずΔ内環流電流の波形によって変化するからほぼ対称波形になることもある。またわれわれが実測し継電器電流として利用するのは普通変流器二次電流であるから変流器の特性による波形の変化も考えなければならない。

突入電流は磁束が一方向に飽和するために生ずるから

* 東京電力株式会社
** 日立製作所国分工場
*** 日立製作所多賀工場
**** 日立製作所日立研究所



第2図 Y側突入電流波形とその△接続変流器二次電流波形



a, b は励磁開始時の電圧位相角によって各相の電流波形が異なることを示す一例である。

第3図 各種変圧器の突入電流波形
66kV 30MVA(Y-Y-△)三相変圧器
(東電稲荷変電所)

電流も飽和方向に大でその逆方向は常時の励磁電流以下である。したがってその波形はほぼ半波整流波形に近い。しかし変流器の二次電流は第10図のように時間の経過とともに漸次零線より逆方向にずれてその波形は一方は尖頭波形、他方は偏平波形となり直流分は急速に減衰する。偏平波の大きさは主として変流器の特性、残留磁束、二次負担の大きさと種類によってそれぞれ異なるが二次負担に対し変流器の定格負担に余裕があるほど小さくなる。第1表は三相変圧器突入電流波形の調波分析の一例であるが直流分の減衰が急であることと、第3高調波以上はごく少ないことが目だっている。

3. 保護方式の説明

本方式の基本的な回路および試験の結果についてはす

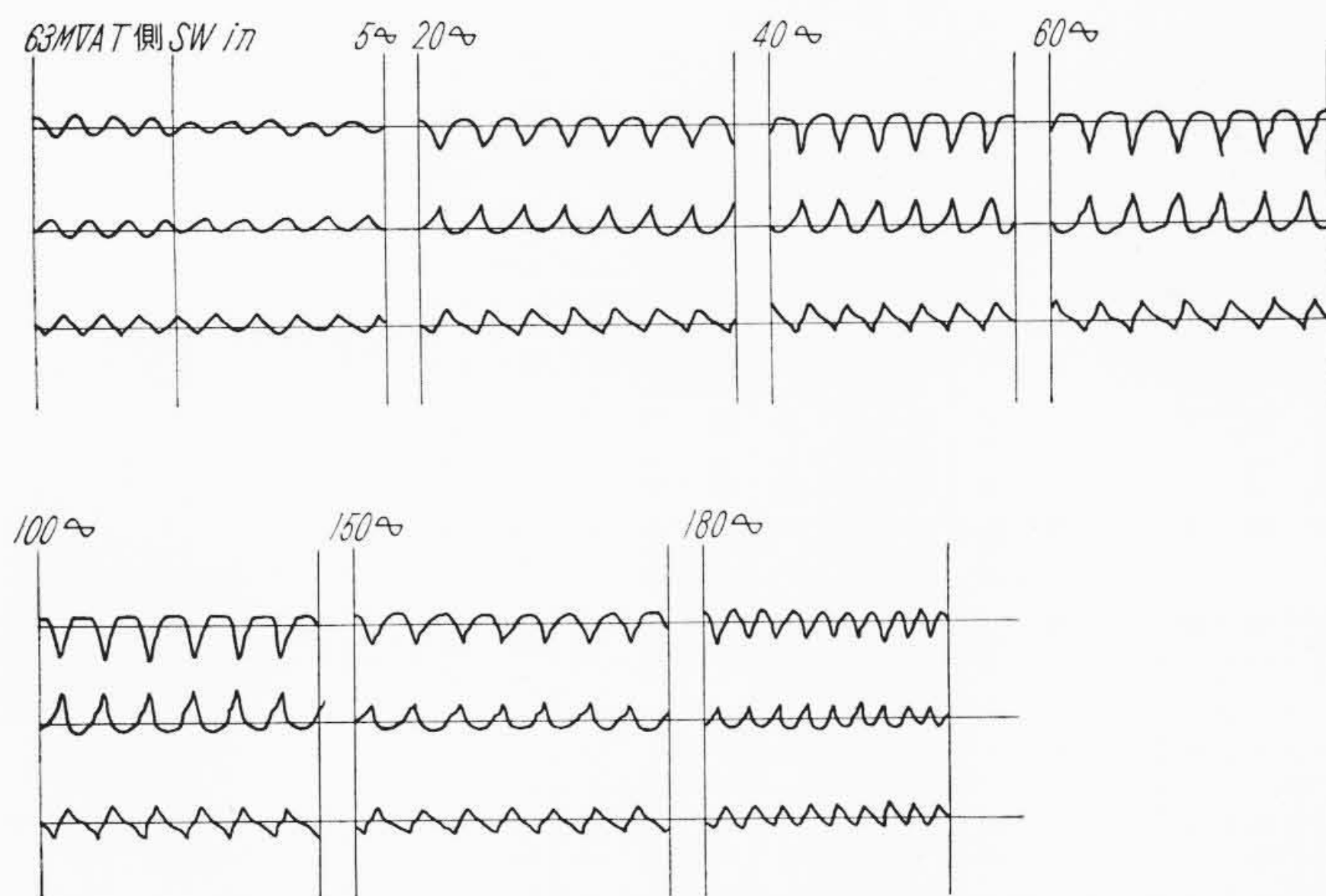
a, b は△巻線内環流電流波形のもっとも異なる場合でそれに対する一次側(△)電流波形を示したものである。

第4図 66kV 6MVA(△-△)三相変圧器
(東電勝田変電所)

第1表 三相変圧器突入電流波形の調波分析
(基本波を100としたときの百分率)

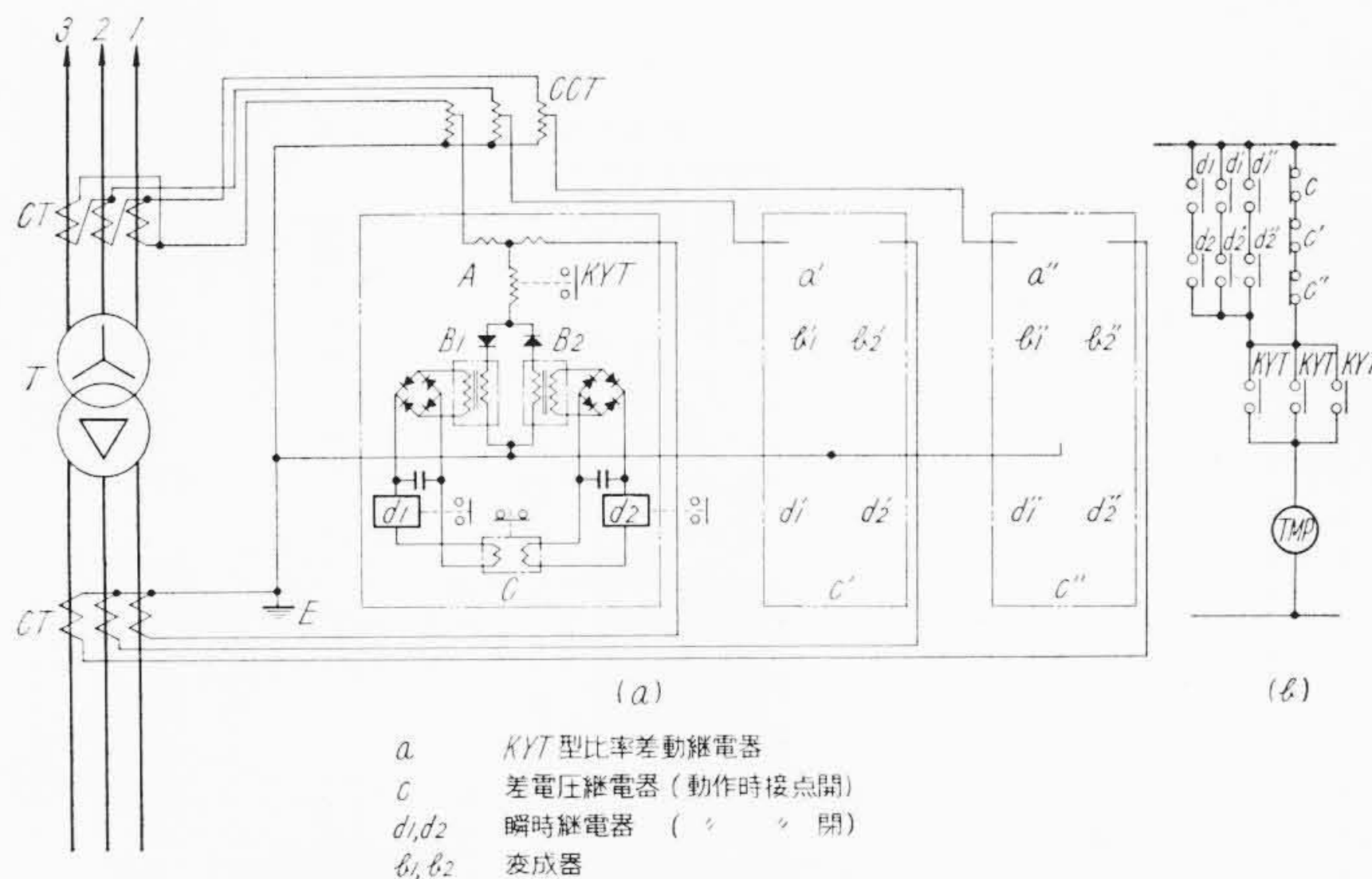
基本波	例 1		例 2		例 3	
	第1サイクル	第2サイクル	第1サイクル	第5サイクル	第1サイクル	第6サイクル
基本波	100%	100%	100%	100%	100%	100%
直流分	66	64	80	42	62	13.2
第2高調波	36	39	31	39	50	62
第3高調波	7	9	6.9	6.8	9.4	11.5
第4高調波	9	17	6.2	6.1	5.4	8.4
第5高調波	5	4	—	—	—	—

でにその一部を発表⁽²⁾したが引続き継電器特性の一段の向上を期して改良を重ね、ここに完成したのが第6図に示す方式である。その原理は前述のごとく突入電流の非対称波形を利用し突入電流時トリップ回路をロックする方式で図に示すように各相とも主継電器と誤動作防止回路から成っている。主継電器はKYT形比率差動継電器で変圧器の内部故障に忠動して所要のトリップを行う。誤動作防止回路は半波整流器、変成器、全波整流器、平滑回路、瞬時継電器、差電圧継電器によって構成され、各相の差動回路に接続されている。差電流は互に逆並列に接続された半波整流器により、おのおの半波に分離され変成器 B_1 , B_2 の一次側に入るこの変成器は一種の電流電圧変換器で一次電流の波高値に比例する二次電圧を

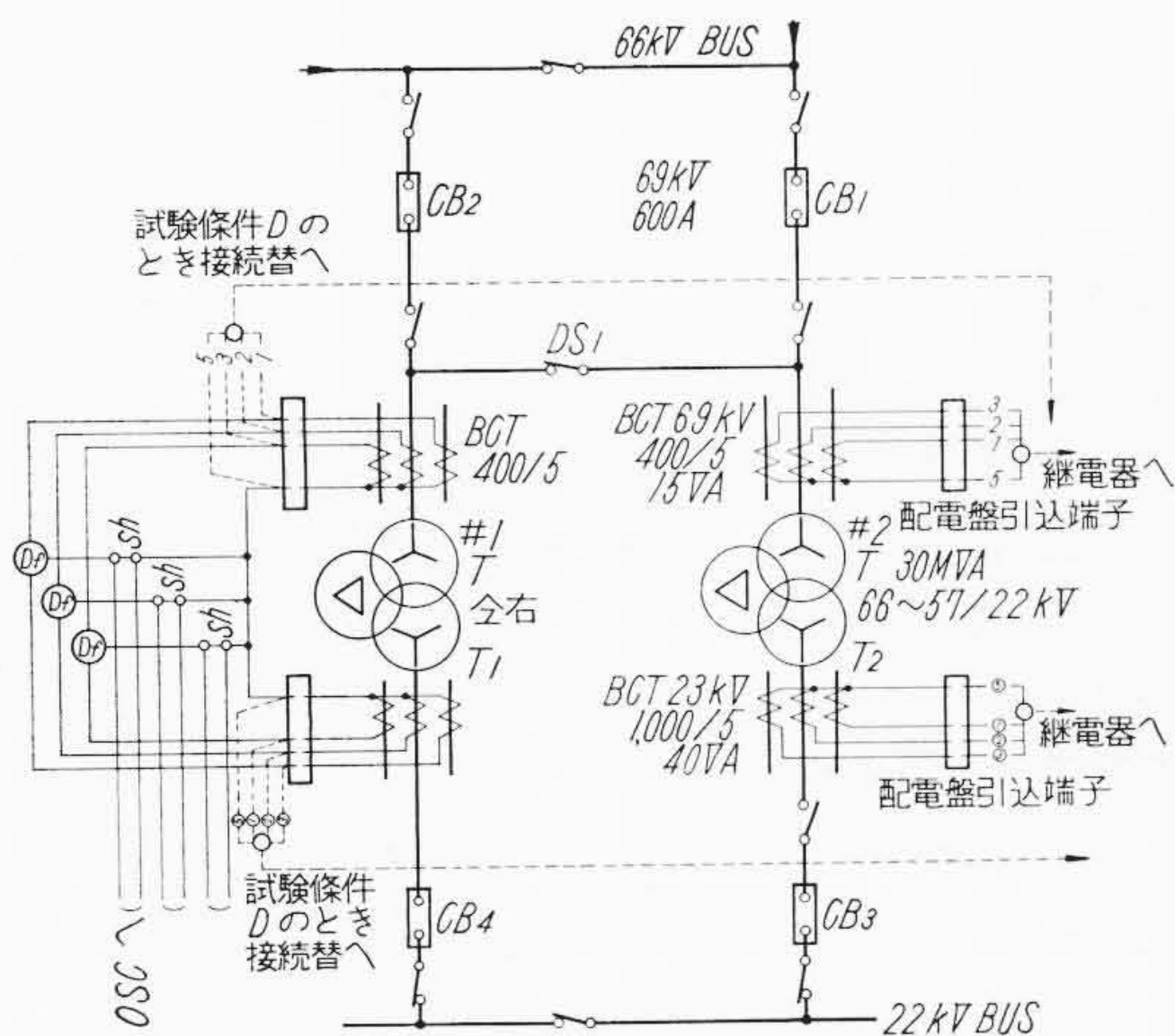


63MVATと6MVATとが並列運転される回路で6MVAT負荷中
63MVATを回路に接続した場合の電流で60%付近で最大値になっている。

第5図 66kV 6MVA (Y-Δ) 三相変圧器 (50%)
並列変圧器に生ずる突入電流の一例である。



第6図 変圧器差動保護継電方式説明図



第7図 東電稲荷変電所変圧器保護継電方式試験回路

誘起するから突入電流のように一方が尖頭波，他方が偏平波になる波形ではその波高値が異なるので二次誘起電圧に差を生ずる。Cは差電圧継電器で変成器二次電圧の差が一定値以上になればその接触を開くようになっている。d₁, d₂は瞬時動作継電器でそれぞれ変成器B₁, B₂の二次電圧によって動作しその接触を閉路する。三相変圧器の突入電流はいずれか1相は非対称波形にならないことがあるのでトリップ回路は第4図bのように接続してある。各接点の時間的關係は差電圧継電器接点の開路が常に主継電器接点閉路に先行するように感度および動作時間を調整してあるので，突入電流が大でたとえ主継電器が動作しても瞬時継電器は同時に二つの接点を閉路することがないから，差電圧継電器によってトリップ回路がロックされ遮断器の誤遮断は防止される。一方内部短絡故障電流は励磁側巻線と短絡巻線間の漏洩インピーダンスによって制限されるが，一般に漏洩磁束の通路の大部分は大気中であるから磁束の飽和は考えられない。このため故障電流波形は電圧と同様，対称波形をなしており変成器二次電圧はほとんど相等しくなるから差電圧継電器は動作せず主継電器の動作によってただちにトリップ回路が閉成される。しかし過大な故障電流は初期に直流分を含んでいることがあり，また短絡故障のある変圧器を電源に接続するときは電源側電流には故障電流のほか

に励磁突入電流が重畳することがある。このような場合には直流分，あるいは突入電流分の大きさによっては差電圧継電器が動作していったんトリップ回路をロック

第2表 KYT形比率差動継電器感度試験結果

相別	継電器最小動作電流 (A)		備考
	C ₁ ~C ₃ 端子	C ₂ ~C ₃ 端子	
黒	1.49	1.50	
赤	1.53	1.53	
白	1.50	1.50	

第3表 動作特性試験結果

印加電流	ロック リレー	(KYT) リレー	トリップ 回路	動作の正否
半波 5 A	動作	動作	不動作	正規動作
半波 10 A	動作	動作	不動作	正規動作
正弦波 5 A	不動作	動作	動作	正規動作
正弦波 10 A	不動作	動作	動作	正規動作

第4表 稲荷変電所における誤動作試験成績一覽表

東京電力株式会社 稲荷変電所 三相30MV A 変圧器差動保護継電方式試験成績一覽表 試験日時 昭和33年9月14日 9.00~15.00

試験 番号	試験 条件	励磁突入電流 (A)										継電器動作状況 (g)				黒相出力電流 最大値(A)		逆方向 電流 最大値 (f) (波高値)	備考				
		No.2 変圧器			No.1 変圧器			比率差動継電器				差電圧継電器			トロップ回路		黒相出力電流 最大値(A)			逆方向 電流 最大値 (f) (波高値)			
		黒 相	赤 相	白 相	倍率	波高値	倍率	黒 相	赤 相	白 相	倍率	波高値	倍率	黒 相	赤 相	白 相					動作時間	K Y T リレー 動作時間	回路
11°48'	A	(c) -10.1	1.89	+5.1	0.95	+5.4	1	(No.1 T 突入電流は微小でオシロに	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.2~	1.7~	×	1.05	2.8	57k Vタップ電圧 61k V No. 1 T 20 MW
2	A	(d) + 7.3	1.36	-5.68	1.06	-3.8	0.71	現われない)	○	×	×	○	○	○	○	○	○	1.5	2.5	×	2.72	0	57k Vタップ電圧 61k V No. 1 T 20 MW
3	A	(e) +3.86 -1.07	0.72	+4	0.75	-8.0	1.5		×	×	○	○	○	○	○	○	○	2.0	2.8	×	1.5	0.7	57k Vタップ電圧 61k V No. 1 T 20 MW
4	A	+4.46	0.83	-2.82	0.53	+1.31 -2.19	0.41		×	×	×	○	○	○	○	○	○	2.8	—	×	1.75	0	57k Vタップ電圧 61k V No. 1 T 20 MW
5	A	+3.26 -5.46	1.02	+7.9	1.48	-12.5	2.34		○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.2	1.7	×	1.31	2.28	57k Vタップ電圧 61k V No. 1 T 20 MW
12°20'	B	-1.55	0.28	-1.7	0.36	+3	0.54	(No.1 T 突入電流は微小でオシロに	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	—	×	0	0	22k Vタップ電圧 22.8k V No. 1 T 15 MW
7	B	+9.2	1.66	+1 -5	0.9	-4.1	0.74	現われない)	○	×	×	○	○	○	○	○	○	1.2	1.7	×	2.62	0	22k Vタップ電圧 22.8k V No. 1 T 15 MW
8	B	+4.16	0.75	+4.4	0.79	-8.24	1.48		×	×	○	○	○	○	○	○	○	1.5	2.2	×	1.4	0	22k Vタップ電圧 22.8k V No. 1 T 15 MW
9	B	+1.19	0.21	+1.3	0.23	-2.4	0.43		×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	—	×	0	0	22k Vタップ電圧 22.8k V No. 1 T 15 MW
10	B	—	—	—	—	—	—		×	×	○	○	○	○	○	○	○	—	—	×	—	—	22k Vタップ電圧 22.8k V No.1 T15MW オシロミス
2°5'	C	-1.42	0.27	+0.62 -0.52		+1.16	0.22	(並列変圧器なし)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	—	—	×	0	0	57k Vタップ電圧61.5k V
12	C	+4.28 -2.38	0.8	-8.65	1.61	-6.13	1.15		○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	2.5	×	1.84	0.88	57k Vタップ電圧61.5k V
13	C	-4.75	0.88	+2.54	0.47	+2.7 -1.16	0.5		×	×	×	×	×	×	×	×	×	3.0	—	×	0	1.75	57k Vタップ電圧61.5k V
14	C	-8.8	1.65	+9.6	1.8	+4.52 -4.73	0.88		○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.3	2.0	×	1.3	2.66	57k Vタップ電圧61.5k V
15	C	+10.0	1.87	+1.86 -4.3	0.8	-5.84	1.1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	2.0	×	2.98	0	57k Vタップ電圧61.5k V
2°45'	D	(No.2 T 突入電流は微小)	-5.35	1.07	+6.6	1.29 +2.92 -3.35	0.66		○	○	×	○	○	○	○	○	○	2.0	3.2	×	0	1.75	60k Vタップ電圧61.5k V No. 2 T 16.5MW
17	D		-8.45	1.65	+4.3	0.84	+5.1	1	○	○	×	○	○	○	○	○	○	1.3	2.0	×	0.88	3.16	60k Vタップ電圧61.5k V No. 2 T 16.5MW
18	D		+9.5	1.86	+1.97 -4.63	0.91	-6.13	1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.2	1.7	×	2.8	0	60k Vタップ電圧61.5k V No. 2 T 16.5MW
19	D		+3.26 -1.6	0.64	-6.9	1.35	+4.74	0.93	×	○	×	○	○	○	○	○	○	1.7	3.0	×	1.32	0.6	60k Vタップ電圧61.5k V No. 2 T 16.5MW
20	D		+2.78 -4.72	0.92	+8.2	1.6	-7.3	1.43	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	2.5	×	0.87	1.75	60k Vタップ電圧61.5k V No. 2 T 16.5MW

注：(a) 突入電流の大きさは第1サイクルの波高値

電流値はCT2次電流を示す

(b) 倍率は各タップ定格電流(波高値)の倍数

CT 66kV 400/5 22kV 1000/5

(c)(d)(e) 極性 + - となる

(f) 逆方向電流



この電流の波高値の最大のもの

(g) 継電器動作

○……………動作
×……………不動作

第5表 国分工場変電所における誤動作試験結果の一例

[illegible]

注：(a) 突入電流の大きさは第1サイクルの波高値
電流値はCT 二次電流 CT150/5

(b) 倍率は定格電流（波高値）の倍数

(c)(d)(e) 極性

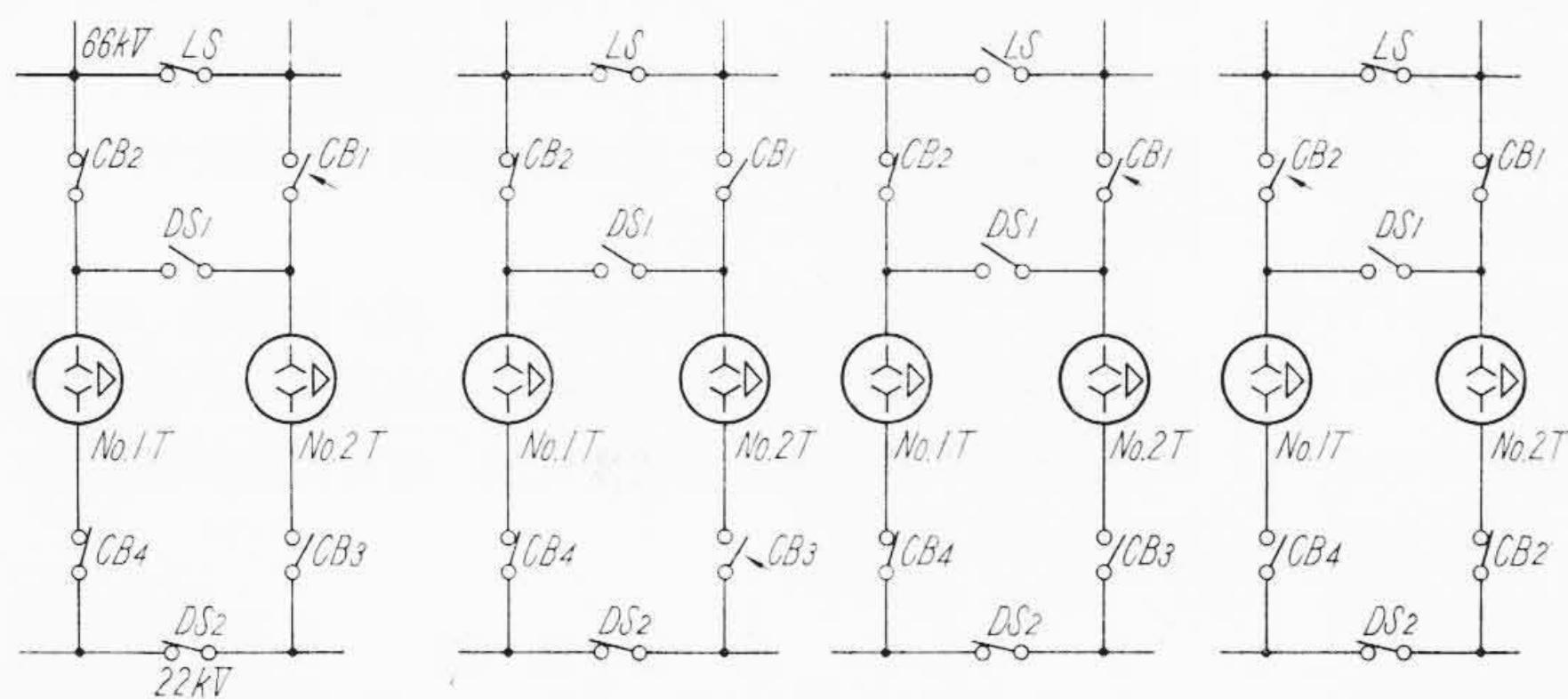
(c)(d)(e) 極性 

(f) 逆方向電流

(g) 繼電器動作

この電流の波高値の最大のものを示す

○……動作
×……不動作



試驗條件 A

CB ₁	開閉
CB ₂	閉
CB ₃	開
CB ₄	閉
LS	閉
DS ₁	開
DS ₂	閉

試験条件 B

CB ₃	開閉
CB ₁	開
CB ₂	閉
CB ₄	閉
LS	閉
DS ₁	開
DS ₂	閉

試驗條件 C

CB ₁	開閉
CB ₂	閉
CB ₃	開
CB ₄	閉
LS	開
DS ₁	開
DS ₂	閉

試験条件 D

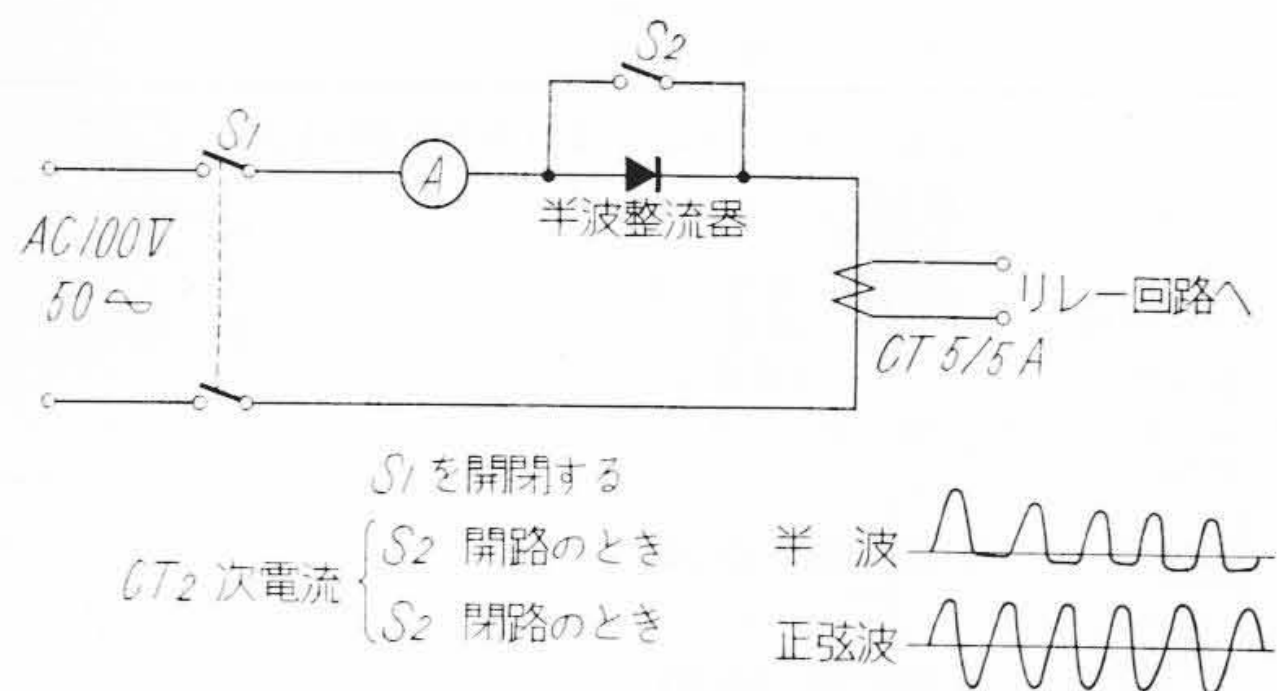
CB_2	開閉
CB_1	閉
CB_3	閉
CB^1	開
LS	閉
DS_1	開
DS_2	閉

第8図 試 験 条 件

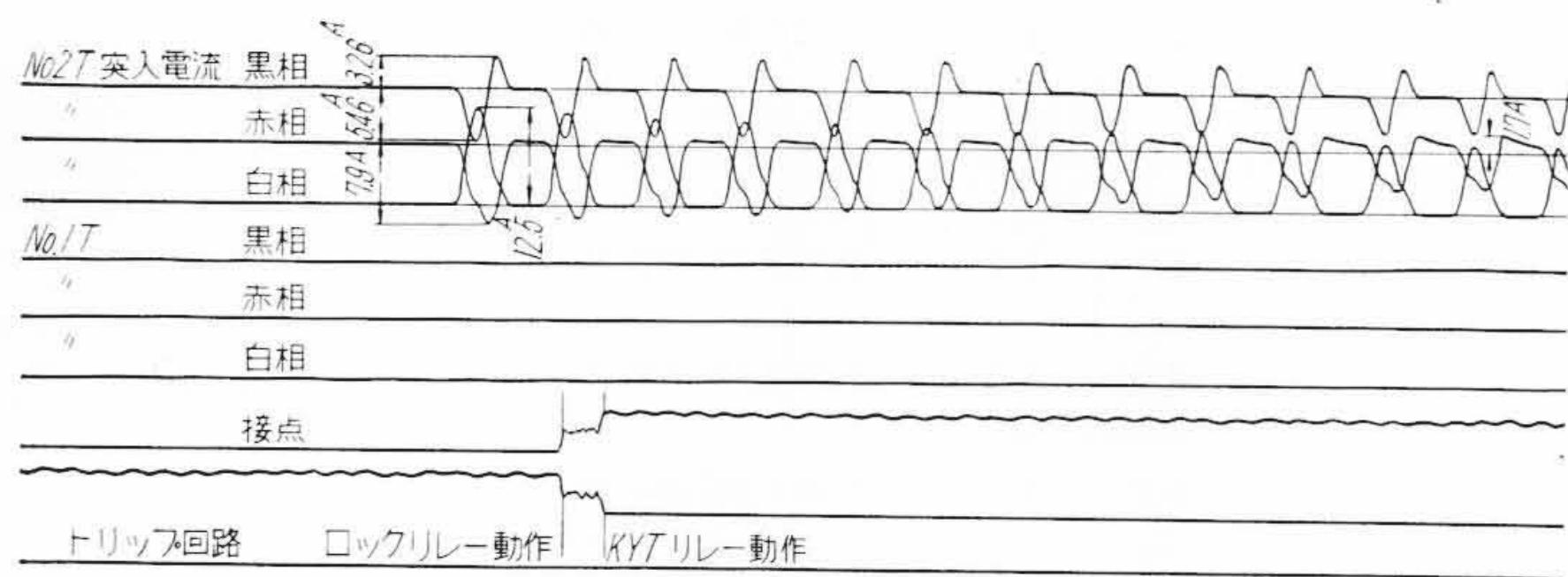
し、それらの減衰をまって復歸するので動作時間がそれだけ遅れることになるが、故障電流は突入電流と異なり直流分が大きいときでも整流波形にはならないので本方式では瞬時継電器が双方瞬時に動作してその接点回路を閉路し、ロック回路に関係なくトリップ回路を閉成するので動作時間のおくれは全くない。瞬時継電器の感度は突入電流の零線より反対方向にずれる偏平波の大きさによって制約されるからこの電流はなるべく小さいことが望ましい。実際には変流器の定格負担に対し二次負担が特に大きくないかぎり小さいのが普通である。

4. 東京電力株式会社稲荷変電
所における誤動作試験結果

この方式は日立製作所国分工場内の変



第9図 動作特性試験回路



第10図 誤動作試験オシログラムの一例

電所における各種の試験により誤動作防止の性能が確認されたが、さらに東京電力株式会社稲荷変電所において誤動作試験を実施し好成績を得たのでその結果について報告する。

試験日時：昭和33年9月14日

試験場所：東京電力株式会社神奈川支店 稲荷変電所

供試変圧器：No. 2 変圧器，66-63-60-57/22 kV 三相
30,000 kVA 50～

オリエントコア

No. 1 変圧器，同上 普通けい素鋼板

試験回路：供試変圧器は第7図のごとく並列に接続されそれぞれ差動保護継電器をもっているため、試験の際は一時これを除外し供試継電器を接続した。

試験条件：実際運転上考えられるすべての状態を検討し第8図に示す四つの条件について試験し、試験回数はおのおの5回とした。

動作特性試験：試験の性質上故障試験は不可能であるから誤動作試験に先立ち現地において、KYT形比率差動継電器の感度試験と第9図の回路により誤動作防止回路を含めた動作試験を実施した。その結果は第2,3表のとおりである。すなわち、半波一変流器二次電流波形は漸次零線より反対方向にずれ、突入電流に近い非対称波形になる一を印加すれば主継電器は動作するが差電圧継電器が瞬時にロックするのでトリップ回路は動作しな

い。これに反し正弦波の場合は差電圧継電器が不動作でロックしないからトリップ回路は動作している。これらはいずれも正規動作である。

誤動作試験：

試験結果を第4表に示す。20回の試験で得られた電流の最大値は定格電流波高値の2.34倍で、オリエントコア変圧器であるにもかかわらず電流が意外に小さいのは無騒音変圧器で磁束密度をきわめて低くとってあるためと思われるが、差電圧継電器の動作は常にKYT形主継電器より半サイクル以上先行しているので全試験を通じ誤

動作は全くなく好成績であった。第10図は誤動作試験オシログラムの一例である。なお突入電流がさらに大きい場合の動作状態を知るために第5表を示す。これは日立製作所国分工場内変電所，66-63-60/3.45 kV 12,000 kVA 50～三相変圧器について試験した結果の一例である。突入電流は定格電流の5.5倍に達しているが差電圧継電器のロックは確実に実行され数十回に及ぶ試験にも誤動作は皆無であった。瞬時継電器はいずれも5 A整定である。差電圧継電器の動作は電流の大小にかかわらず常に主継電器より半サイクル以上先行しているので突入電流がこれ以上増大しても確実に誤動作は防止される。

5. 結 言

以上、誤動作防止回路をもった新形変圧器保護継電方式の概要と現地試験結果について報告した。本試験に使用した試作継電器はさきに発表⁽²⁾したものと同一の変成器を使用したため、二次出力保持上、直流励磁を逆に加えて変成器の飽和をさけているが、製品化にあたっては直流励磁巻線を省略した変成器を使用し、誤動作防止回路の小形化をはかっている。

終りに、本試験の実施にあたり、種々御指導、御便宜を賜った、東京電力株式会社高木次長をはじめ、試験に協力された神奈川支店発変電課、稲荷変電所の各位に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) L. Blume 編：Transformer Engineering p. 23～36
- (2) 清水：日立評論 別冊 23, 1958 p. 53～57
- (3) W. K. Sonnemann, C. L. Wagner, G. D. Rockefeller：Power System and Apparatus, Oct. p. 884～892 1958