

# 回転機の衝撃電圧試験及び層間絶縁 試験に於ける故障発見法

井 上 利 夫\*

## A Method of Detecting Short-Circuited Turns in Impulse Voltage Test and Layer Insulation Test of Electrical Machinery

By Toshio Inoue

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

### Abstract

In the insulation test of electric machines, the turn-insulation test is not easily conducted because of the difficulty in detecting faults. There are several methods for detecting whether the layer-insulation is safe against the voltage caused between turns by impressing impulse voltage to an electric machine. This paper deals with the voltage balancing method which is capable of detecting insulation failures in large-sized generators as well as small machines.

In this method, two symmetrical points of two symmetrical windings are connected first with the deflection plates of the Braun tube. The zero line will be shown on the screen when there is no failure in the windings, because the voltages on the two points cancel out each other. If a failure exists, a difference would be resulted between the voltages on the two points, and the wave shape corresponding to this voltage difference will be represented on the screen showing that a failure has been occurred in the windings. The feature of this method lies in its ability of magnifying the voltage difference as large as the screen space allows.

### 〔I〕 緒 言

発電機のコイル絶縁破壊故障に際して、従来は破壊がコイル巻回間の絶縁破壊から出発した対地絶縁の破壊か又は直接の対地絶縁破壊によるものかの判定が困難であった。近年保護継電器等の発達に伴いコイル絶縁破壊部の損傷が拡大せぬうちに遮断しうるようになったため、コイルの損傷状況の観察により巻回間絶縁の破壊か否かの判定をなしうるようになった。その結果発電機全設備台数に対する絶縁破壊による故障の台数は僅かであるが、絶縁破壊事故のうちには直接対地絶縁破壊によるものの他に巻回間絶縁破壊から出発するものが相当件数あることがわかり、この点を明らかにすれば絶縁事故

の相当数が防止しうると考えられその対策を要望せられるに至った。需要家、大学、研究所、試験所、製造家等より成る各種委員会に於て、この点についても検討が進められ、逐次異常電圧の種類、発生状況及びその異常電圧が発電機にはいつた場合の特性等が明らかとなつて来た。そのうち急峻な衝撃電圧侵入の際コイル巻回間にかかる電圧を軽減するものとしてサージアブゾーバーの設置を推奨せられるに至り、各所に於て設置せられていることは御承知の如くである。

コイル巻回間絶縁を強化することは困難ではないが、ある程度の価格の増大はまぬかれず、いたづらに強化することは得策とは云い得ない。一方同一絶縁の発電機でも或一部のは事故を起し他のものは20年以上も無事故である等の例が多く、設置場所による特異性が認め

\* 日立製作所日立研究所

られ、一部に於ては、異常電圧が確認されたのであるが、全般の事故にわたる説明は未だなし得ない。又巻回間にかゝる異常電圧が最大何ボルトであるとの結論も出し得ない。即ち今後の研究にまたねばならない未知の現象も多いのである。従つてコイル巻回間の絶縁はどれ位が妥当であるとの完全な根拠は現在得難いが、避雷器の制限電圧等に基づく電圧には十分の余裕をもつもので、一応発電機の製作当初に於ける衝撃電圧試験、或は抜き取りコイルの衝撃電圧破壊値により一定電圧以上を保証せんとする気運にあり、その一部は既に実施せられている。

以上の点は発電機のみならず電車電動機、その他の回転機に於ても雷或は開閉サージ等にさらされるものは同様であるが、更にこれら低電圧機器に於ては絶縁が薄い関係上絶縁耐力のバラツキが多いと考えられる。対地間絶縁は耐電圧試験により、一定値以上を保証されているが、巻回間絶縁についても或電圧に耐えたことを保証せんとする気運にあり、米国に於ては既に実施せられている。

本報は発電機、電車電動機等の回転機に衝撃電圧を印加しコイル巻回間に或電圧を加えた時、コイル巻回間の絶縁破壊が起つたか否かを検出する方法について、日立独特の電圧平衡法<sup>(1)~(3)</sup>による場合を主として述べている。巻回間短絡の検出は発電機等巻線が長く、巻回数の多いもので而も巻線が広く分布しているものに於ては、困難を伴うものである。検出方法としてサージ波形比較法<sup>(4)</sup>及びサーチコイル法、錫箔法<sup>(5)</sup>等もあるが前者は一部盛に実用化されているが大型水車発電機等に於ては感度が悪く、後者については看視点附近に故障が起れば良く検出するが1箇所の看視で巻線の線路側より中性点迄のあらゆる場所の故障を検出するのは、現在の所困難で、なお検討が進められている。

衝撃電圧試験の際、対地間の破壊が起れば、これらの方法は巻回間破壊の時よりも高感度に検出することは勿論である。

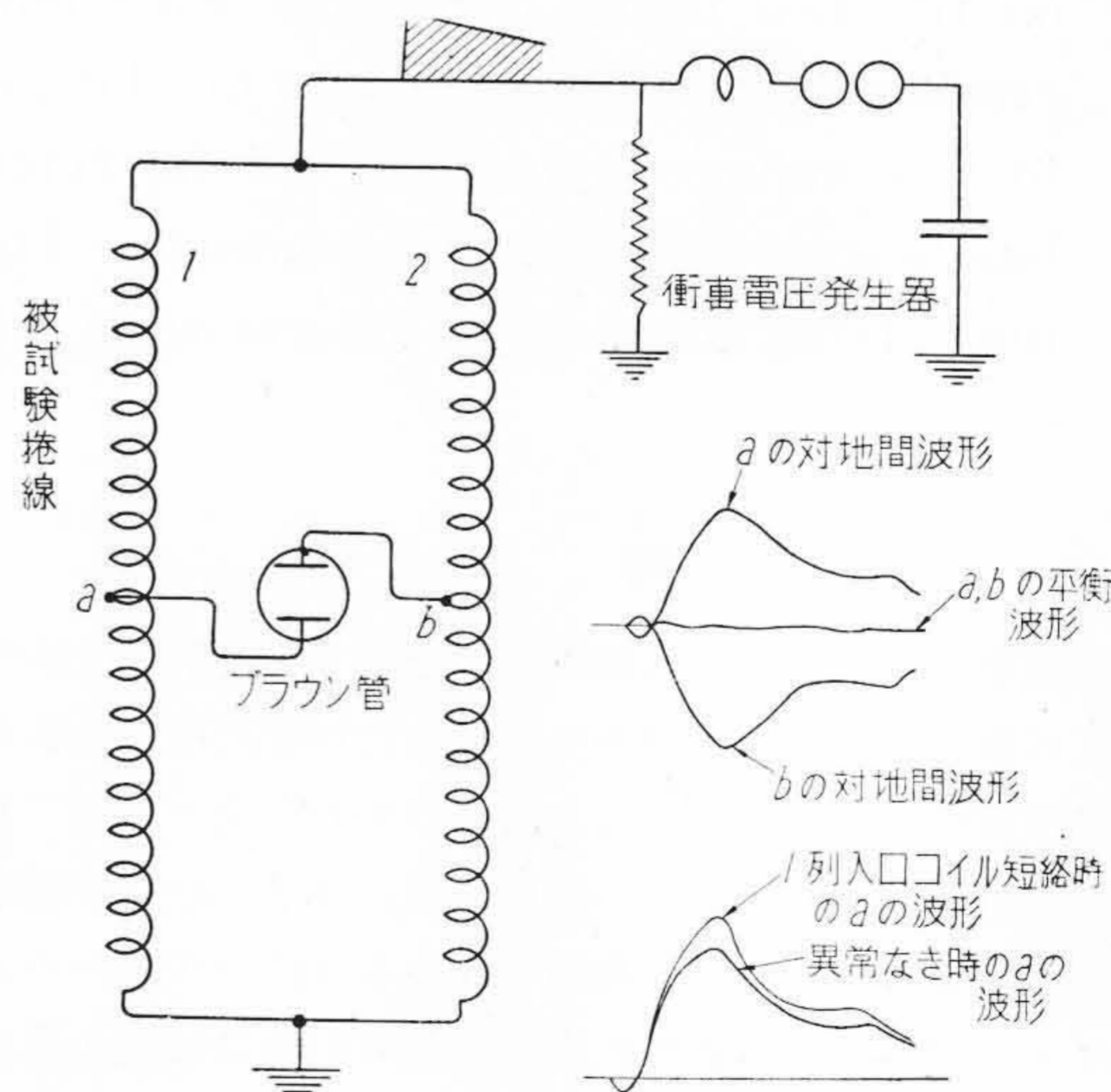
## 〔II〕 電圧平衡法による層間故障の検出原理

日立製作所に於ては先に変圧器の衝撃電圧試験に際しての巻回間短絡の検出法について電流平衡法、電流波形比較法及び二次巻線誘起電圧平衡法等<sup>(6)(7)</sup>を考案し、現在有効に実施せられている。これらの研究を基礎にし従来困難とされていた回転機の衝撃電圧試験の際の層間故障の検出をなすべく研究が進められた。

発電機、電車電動機或はこれを含む回路何れでも良い

が第1図の如き対称な二つの巻線1, 2がある時、両巻線の一端を接地し衝撃電圧を他端から同時に加えると、巻線1, 2内の対称な2点a, bの対地間電圧波形は殆ど一致する。従つてこれをブラウン管の両偏向板にそれぞれ加える時はお互に打消し合つて零線を描く。この衝撃電圧によりコイル層間にかゝる分担電圧に耐えず層間破壊がどちらか一方の巻線に起れば、その破壊がa或はbの印加側或は接地側かによつて定まるがa或はbの対地間電圧波形が上昇或は下降する。従つて破壊の生じた方と否とでa, bの電圧に差を生じ、平衡波形はその差に応じた波形を現わす。即ち衝撃電圧印加と同時に巻回間にかゝつた電圧に耐えたか否か即ち層間故障の有無を検出できるのである。

本法は差電圧を看視するのでa或はbの波形は必要としない。波形比較法によつて検出する場合にはブラウン管内に異常なき時の対地間波形を画かせておくので、第1図右下の如く比較的印加側に近い故障の時は相当差が出るが、分担電圧の小さい巻線の中央部よりも下位等の故障の場合はその差は僅かとなり検出困難になる。本法はこの差を拡大するためにa, bの波形をブラウン管から飛び出す位高くしておきa, bの打消し合つた平衡波形をブラウン管に画かせるわけである。斯くすれば層間故障を起した時差の電圧を拡大して見ることができ、巻線のどこの故障でも検知できる程度になしうるのである。



第1図 電圧平衡法による層間故障検出回路及び波形

Fig. 1. Schematic Circuit Diagram of the Voltage Balancing Method to Detect Short-Circuited Turn at the Impulse Voltage Test, and the Wave Forms to be Obtained

結線は対称になつていても、その配置、同相内の他の列、他相等の影響により又コイル絶縁の僅かな差、渡り線の長さの差等によつて完全な一致を望むことは無理である。従つて *a*, *b* の波形を大きくした場合異常なき時の電圧平衡波形は多少差電圧を表わす。従つて検出は異常なき時の平衡波形と異常が出た時のそれとの比較によつてなされる。故障箇所によつては変化が小さい場合もあるので比較して差をしらべるには異常なき時の平衡波形が安定していることが必要である。本法は巻線の電圧を使つているので非常に安定が良く何回測定しても異常なき時の平衡波形は完全に一致している。この点非常に有利である。2つの巻線の対称な数点に於てこれを看視すれば故障箇所の決定に都合が良いが、装置も複雑となり容易ではない。従つて1箇所を看視してどこで短絡しても検出しうることが望ましい。本法によつてこれがなし得たので以下にその結果を述べたいと思う。

### 〔III〕 水車発電機衝撃電圧試験の際の層間短絡の検出

発電機コイルの層間は何ボルトに耐えることと云う基準が定まればコイルの層間にこの電圧を加えて確かめれば良い。抜取り検査で被試験コイルを破壊してみるものはコイルの頭部で切断し、各巻回間に分け層間試験すればそれを知ることができる。而し発電機に組込むコイルの全数についてこのような試験はできないから、コイルを切断せずに層間に或電圧を加え耐えたか否かを知る必要がある。従来この目的のために火花式層間絶縁試験器によつて高周波電圧を数コイル直列のものに加え試験したのであるが安定度、再現性、層間にかゝる電圧等不明確な所があつた。コイルの層間に或電圧を加えることは高周波電圧でなくとも衝撃電圧によつて行うことができる。この場合は層間にかゝる電圧は容易に実測でき、数コイル直列の場合は各巻回間にはほぼ均等に電圧がかゝることも明らかになつた。従つて必要とする衝撃電圧を直列

第1表 衝撃電圧試験の電圧  
Table 1. Voltages of the Impulse Voltage Test

回転機公称電圧 (kV)	試験電圧 (kV)
3	25
6	40
10	60
....	....

コイルに加え耐たか否かを調べれば層間の耐圧試験は実施し得る。この場合も電圧平衡法によつて高感度に層間短絡の検出ができることは勿論である。

一方発電機の組線終了品について、避雷器の制限電圧等に基づく例えば第1表の如き衝撃電圧を加え、それに耐えるか否かを調べることは別の意義があり、さしあたりこの試験が実施されようとしている。こゝでは最も検出困難なこの場合について述べることにする。

発電機は仕様が多種多様であるため一種類についての実験でうまくいつても、他のものも同様にうまくゆくとはいきれない。従つて一応条件の異なる数種の発電機についてこれを確かめる必要がある。よつて製作予想される範囲の発電機を代表する第2表の如き4種の発電機について、模擬層間短絡を生ぜしめ電圧平衡法の検出感度を調べた。

#### (1) 25,000 kVA, 12極, 500/600 r.p.m., 11kV 発電機の場合

この発電機は整数溝巻品で平衡が比較的良くとれると考えられ又1相1列のコイル巻回数が72で割合少なく巻線全長も280mで短く層間短絡による検出感度が良いと推定されるものである。

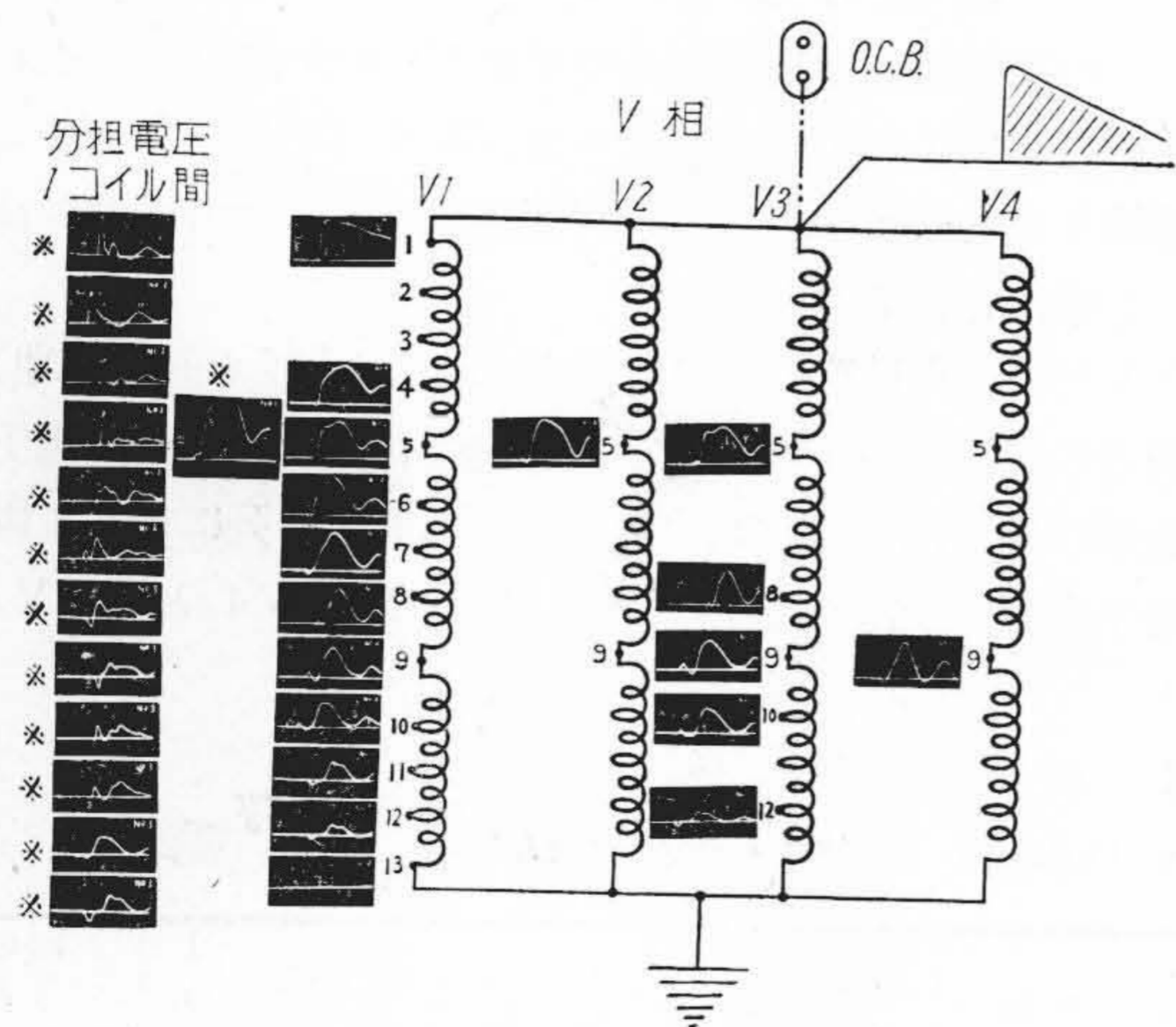
V相に標準波形の衝撃電圧を加えた(中性点直接々地)場合の対地間電圧波形及びV1列の各コイルの分担電圧波形は第2図(次頁参照)の如くである。4列に対して固定子内配置順時計廻りにV1, V2, V3, V4とし、V1

第2表 供試発電機の仕様  
Table 2. Ratings and Other Data of Tested Generators

整理番号	容量 (kVA)	極数	回転数 (r.p.m.)	毎極毎相スロット数	並列数	コイル数	1相1列のコイル数	1コイルの巻回数	1相1列の巻回数	1相1列のコイル全長 (m)
(1)	25,000	12	500/600	4.00	4	144	12	6	72	280
(2)	15,000	16	375	3.50	2	168	28	4	112	475
(3)	12,000	40	150	2.40	2	288	48	5	240	760
(4)	24,000	48	125	2.75	4	396	33	5	165	631

列の測定点は畳針をさして 1, 2, ..., 13 迄リードを出して作った。即ち V1-1 は V 相 1 列の入口、V1-2 は同列 1 番目のコイルから 2 番目のコイルに移る接続線の所、... V1-13 は 12 番目コイルの出口(N側)である。図中の対地間波形より V1-5 と V3-5 は良く一致しているが V2-5 は少し変つており、同様に V1-9 と V3-9 は一致し V4-9 はこれと少し変つていることに気付く。このことは、固定子コイルの結線第 3 図を見ればわかることで、主としてコイル配置による同相内各列間の誘導の差及び自列内各コイルの結合の差によるものと考えられる。電圧平衡法による異常なき時の平衡波形はこのため各列の組合せによつて多少変化する。第 4 図にそれを示した。V3-7 と V1-7 及び V2-7 と V4-7 は平衡の良い組合せ、V3-7 と V4-7 及び V2-7 と V1-7 は悪い組合せである。

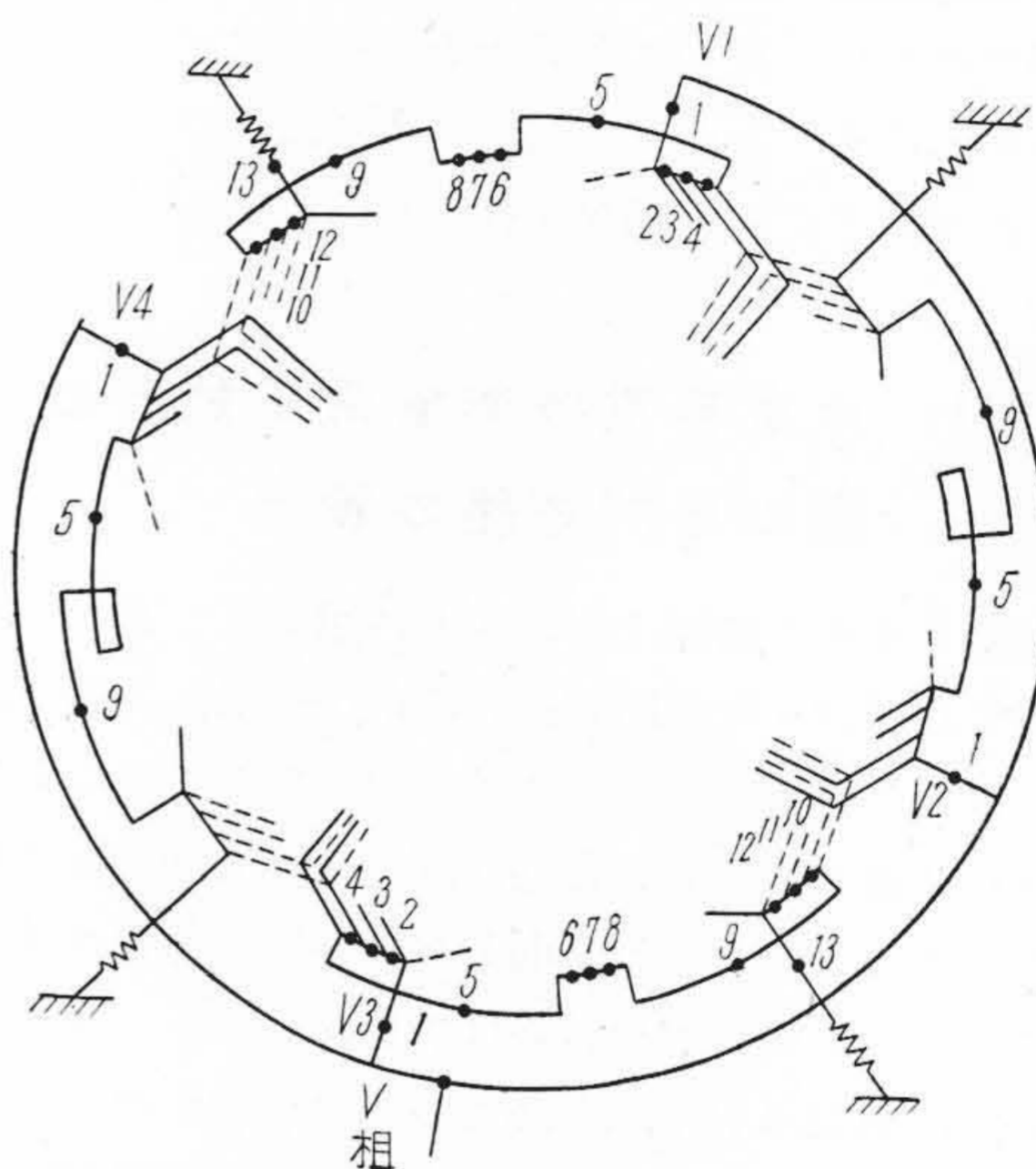
参考迄に対地間電圧及びコイルの分担電圧の最大値を入口対地間電圧最大値の百分率で図示したものが第 5, 6 図である。印加波形によつて相当変化するがこの場合分担電圧は入口コイルが最大でコイルに約 56%, 1 ターンに約 9% 出ている。これより 1 コイル内の各ターンには略均等に電圧がかゝっていることがわかる。即ち入口に波頭峻度 1.5  $\mu$ S の衝撃電圧が 60 kV 加われば入口コイルの各ターンには 5.4 kV かゝることになる。発電機の衝撃電圧試験を行つても各コイルにどのような波形及び波高値の電圧がかゝるか測定してなければ巻回間絶縁が



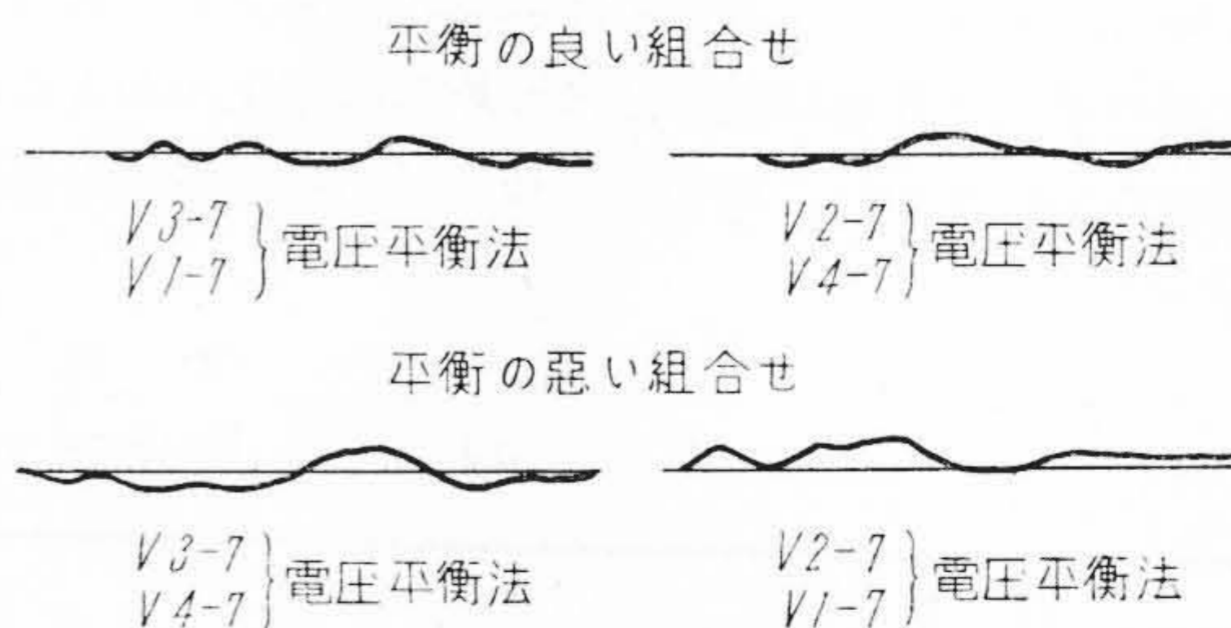
第 2 図 25,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧による対地間電圧及び 1 コイルの分担電圧波形 (ローターある場合、他相開放、V1-1 の電圧が \* は 856 V, その他は 452 V である)  
Fig. 2. Wave Forms of Voltage to Ground and Per Turn in the 25,000 kVA, 11 kV A.C. Generator under Surge Voltage Test

何ボルト迄耐えたとは云えない。なお分担電圧を新品発電機について 1 台 1 台測定することは手数が大変なので何種類かの発電機について測定し、大体的見当をつけることが必要で、その意味でここに記した。

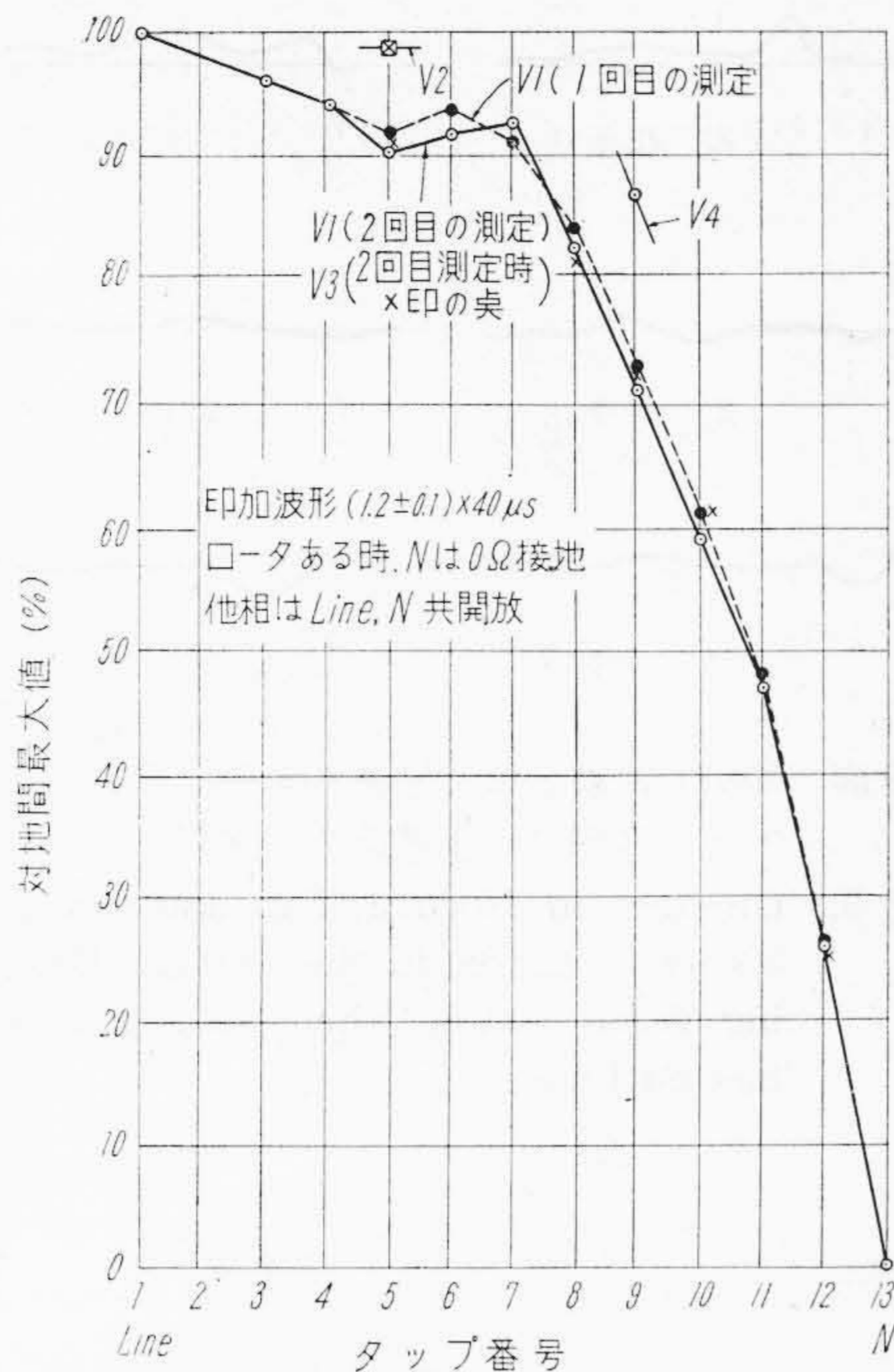
平衡の良い方の組合せにより 2 箇のブラウン管で 4 列中の各 2 列を看視し、V3 列の線路側から中性点迄の各コイルにわたり位置を変えて 1 ターンの短絡を生ぜしめた時の検出感度を調べた。短絡はコイルの 1 ターンの両側リード線に球間隙をつないでおき印加した衝撃電圧によりそのターンにかゝつた分担電圧によつてこれを放電させて起した。第 7 図は V3-7 と V1-7 を看視した電圧平衡法ブラウン管波形の 1 ターン短絡の位置による変



第 3 図 25,000 kVA, 11 kV 発電機のステータコイル結線図 (V 相のみを示した)  
Fig. 3. Winding Diagram of the 25,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator (Phase V)



第 4 図 25,000 kVA 発電機 V 相 4 列の組合せによる故障なきときの電圧平衡波形の違い (看視点の対地電圧約 430 V の場合)  
Fig. 4. Voltage Balancing Wave Forms in the Combination of Four Branches of Stator Coil on the 25,000 kVA A.C. Generator with no Fault

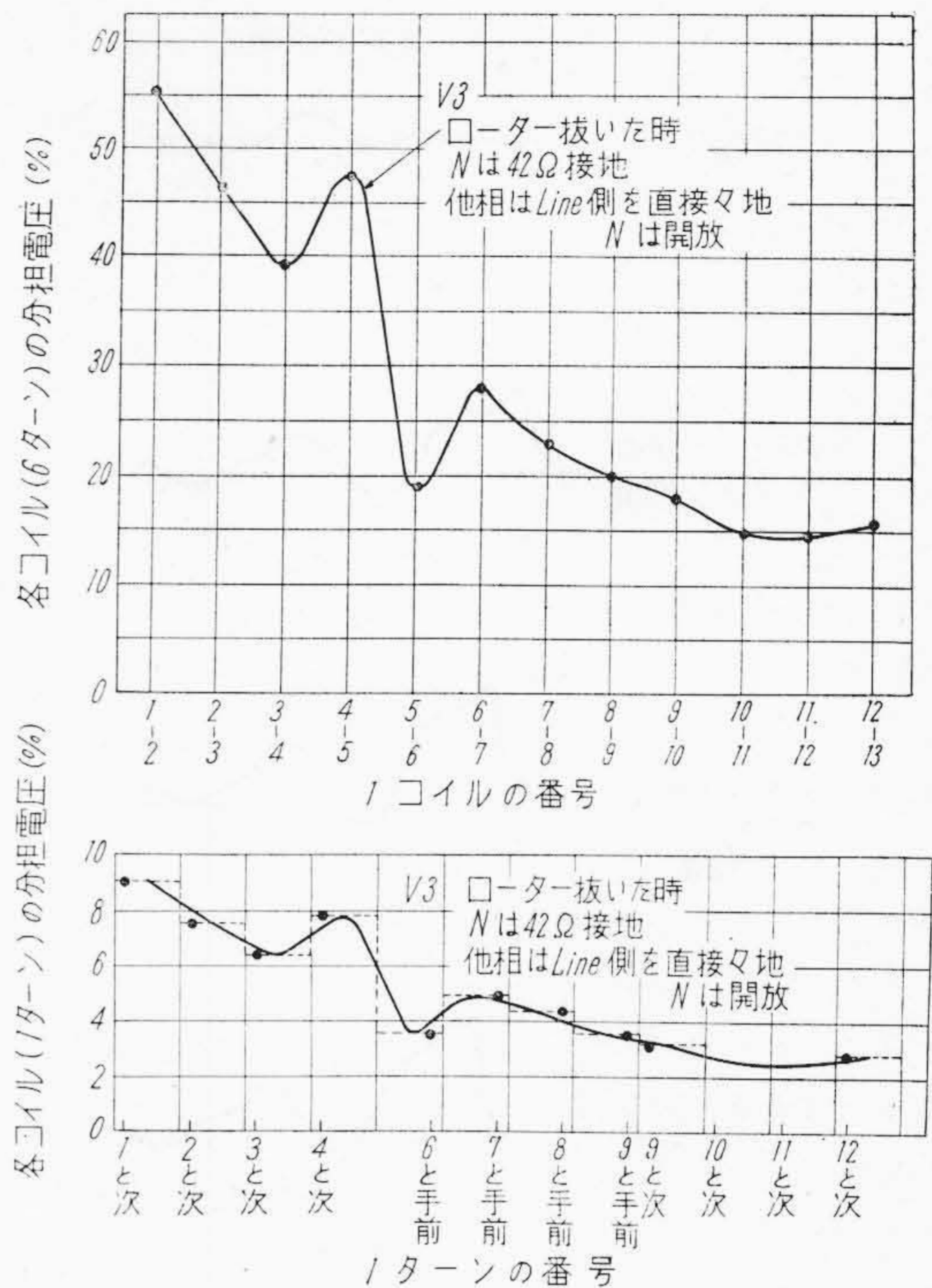


第5図 25,000 kVA, 11 kV 発電機の N 接地、一相印加時に於ける対地間電位分布 (V相入口即ち V 1, 2, 3, 4-1 に対する百分率で示した)

Fig. 5. Surge-Voltage Distribution in the 25,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator

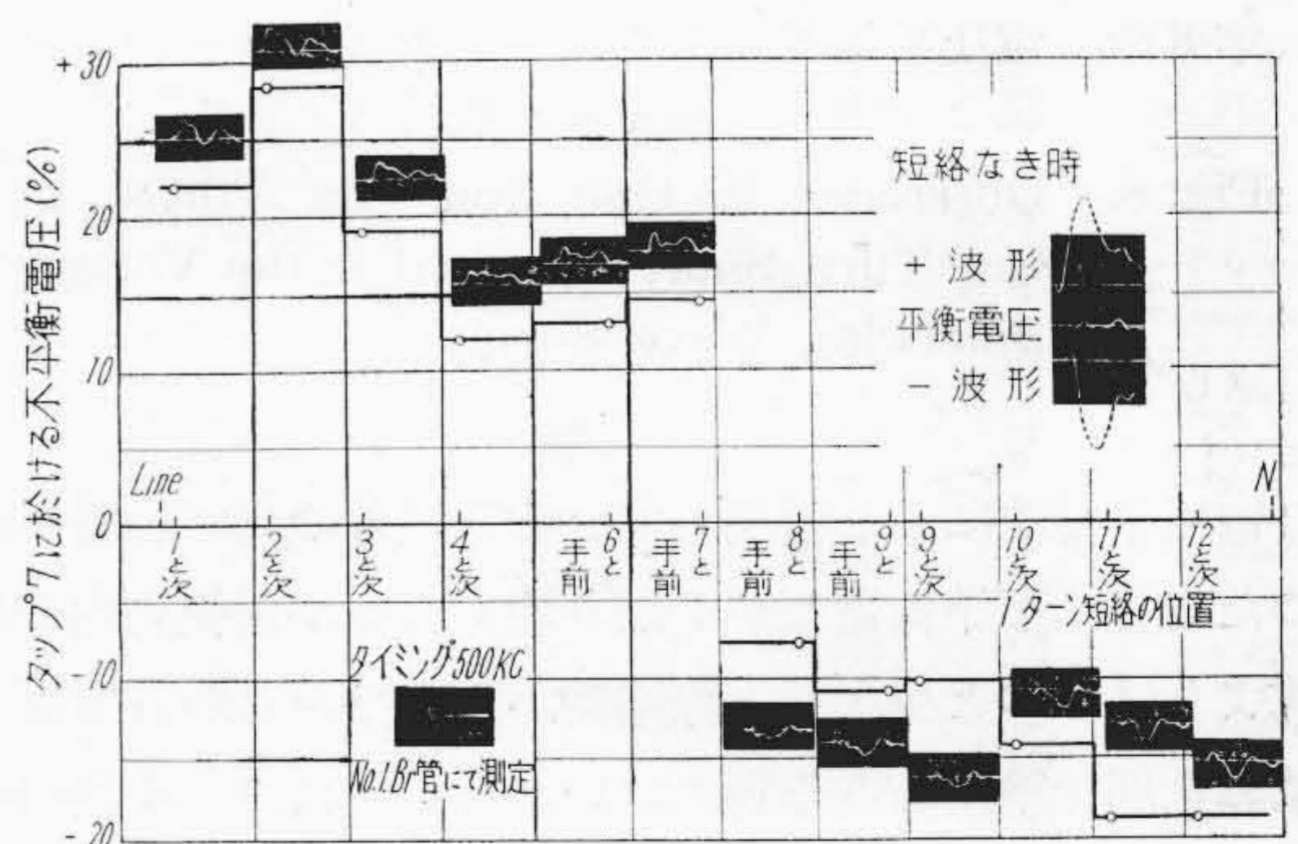
化及び V3-7 の対地間波高値に対する不平衡波形最大値の百分率の関係を示している。短絡なき時の平衡波形を図中に示したので対比して見れば、どこで1ターン短絡しても明瞭に差が認められる。この場合ブラウン管を見ているだけですぐ判定できる程非常に感度が良かった。V3 のタップ7の上位の故障の時は V3-7 が正の偏向板に接続されているから不平衡波形は正にふれ、下位の故障の時は負にふれる。この場合 V1 の側に故障が起ればこの関係が逆になる。しかも上位の場合と下位の場合では分担電圧が極大になる迄の時間が違うから不平衡波形の極大になる迄の時間が異つており、これらから巻線のどちらの列、或は看視点の上位、下位の何れに短絡が起つたかを波形から判定しうるのである。

1 ターン短絡と1コイル短絡でどれ位不平衡波形の大きさが異なるかは第8図(次頁参照)に示した。この発電機の場合前者は後者の約73~78%であつた。即ち1ターン短絡の場合1コイル(6ターン)の1/6にはならないのである。故障なき場合の平衡波形は平衡点を1コイルずらせると相当大きく変化する。それを第9図(次頁参照)に示した。



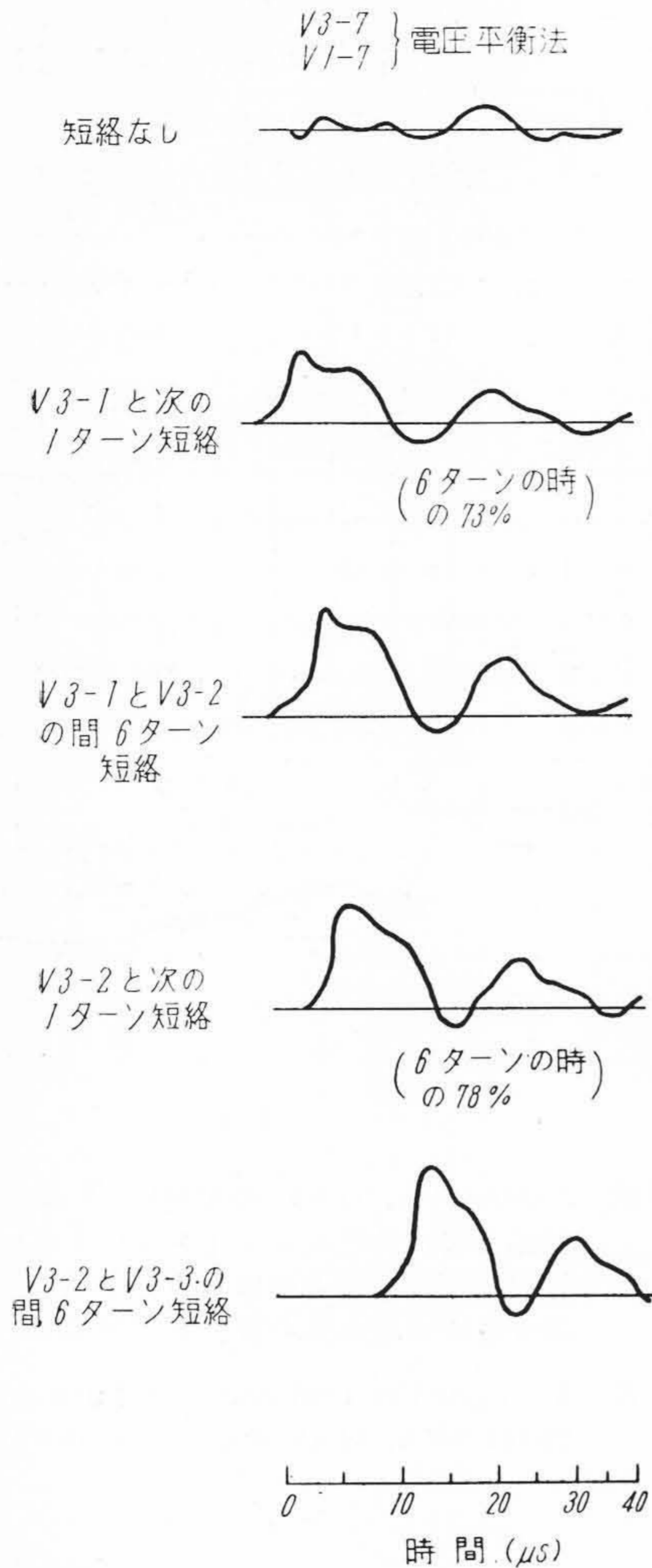
第6図 25,000 kVA, 11 kV 発電機の N 接地、一相印加時に於ける1コイル及び1ターンの分担電圧 (V相入口即ち V3-1 の最大値に対するその最大値の百分率で示した)

Fig. 6. Voltages Per Coil and Per Turn in the 25,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator



第7図 25,000 kVA, 11 kV 発電機の1ターン短絡の位置による不平衡電圧及びその波形 (ロータある場合、7の点の電圧1,170Vに対する最大値の百分率で示した)

Fig. 7. Detecting Sensibility and Wave Forms of Each Short-Circuited Turn in the 25,000 kVA, 11 kV A.C. Generator under Surge Voltage Test



第 8 図 電圧平衡法波形の 1 コイル (6 ターン) 短絡と 1 ターン短絡時の差

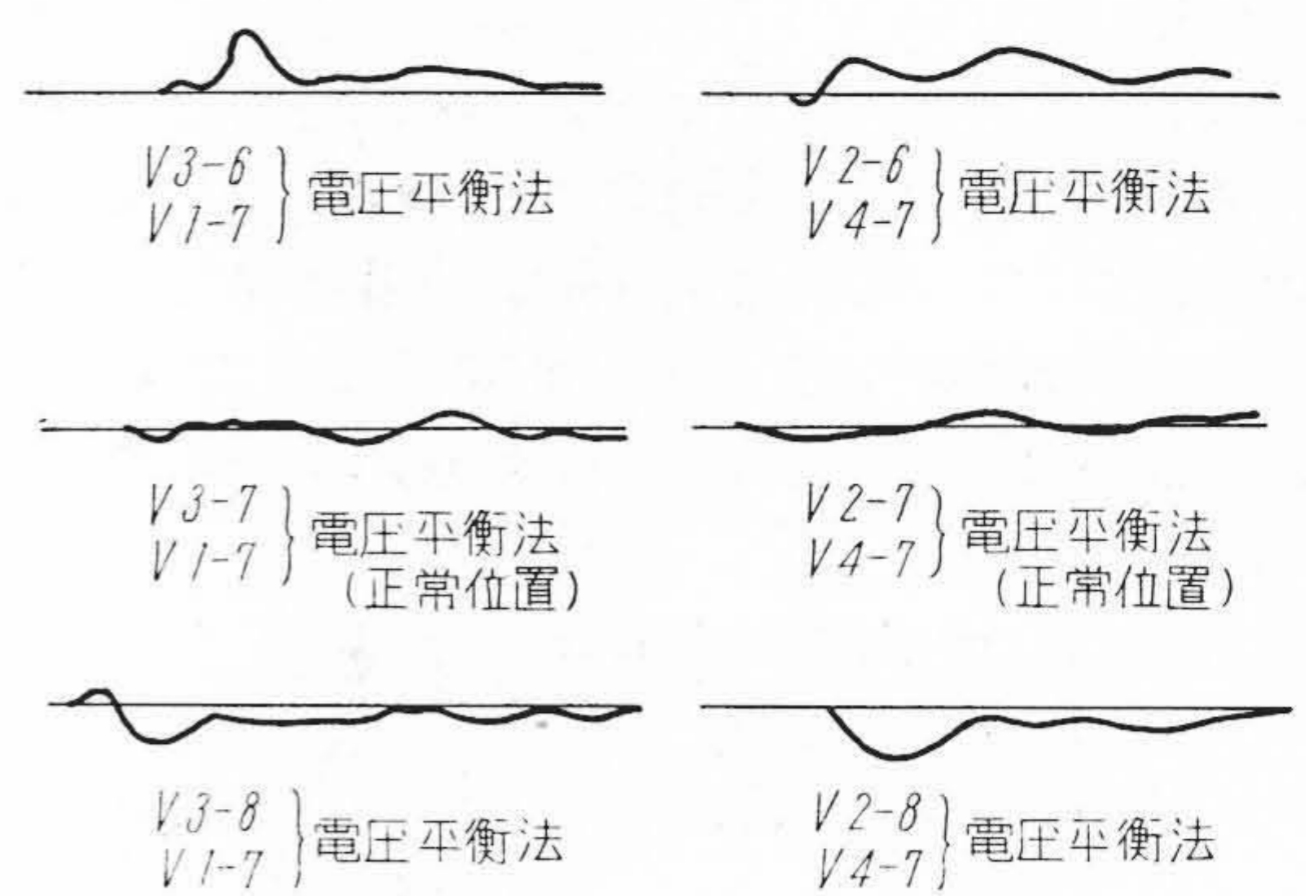
Fig. 8. Difference in One Coil (Six Turns) or One Turn Short-Circuited in the Voltage Balancing Wave Forms

電圧平衡法により看視している列以外の列に短絡が起つた場合は不平衡電圧がかなり現われるが看視列内の故障よりはずつと少なく、線路側から中性点迄の各位置の故障全部を検出しよう程にはいかない。従つて 4 列内のどこに故障が起きても検出するには各列を看視する必要があり、2 列巻線の場合 1 箇、4 列巻線の場合各 2 列づゝ 2 箇のブラウン管を必要とするのである。

(2) 15,000 kVA, 16 極, 375 r.p.m., 11 kV

発電機の場合

この発電機は分数溝巻品で、2 列中のコイル配置が全周に広く分布し、コイルグループ数の順序も異なり、1 列の巻回数 112 で多く、巻線全長も 475 m で長く上記



第 9 図 短絡なき時、電圧平衡法看視点を 1 コイルずらせた場合の平衡波形の変化

Fig. 9. Changes in Normal Tap and One Tap Upper or Lower in the Voltage Balancing Wave Forms, when A.C. Generator has no Fault

印加電圧	V1-1 と V1-2 コイル短絡	故障なし
700 V (V1-15 は 630V)		 V1-15 の波形 V2-15 の波形 電圧平衡波形
1.39 kV (V1-15 は 125kV)		
3.48 kV (V1-15 は 3.13kV)		

第 10 図 15,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧印加の際の電圧平衡法による層間短絡検出波形 (印加電圧標準衝撃波)

Fig. 10. Wave Forms Obtained by Short-Circuiting the Coils of the 15,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test

発電機よりも故障なき時の平衡波形が悪く又検出感度も落ちると考えられるものである。V 相について測定した。巻線中央の V1-15 及び V2-15 の対地電圧波形、この 2 点の電圧平衡波形並びに V1 の一番目のコイルを模擬短絡せしめた時の波形を第 10 図に示した。印加電圧を 2 倍及び 5 倍にした時の変化も示している。明瞭に故

障検出しうること及び異常なき時の平衡波形が(1)の発電機より少し悪くなっていることがわかる。V1-15の対地電圧最大値に対する短絡時の不平衡波形最大値の百分率は約 10.6% で、しかも 5 ターン短絡の場合であるから(1)の発電機の場合より感度は悪くなっている。なおこの発電機については都合で巻線全般にわたる模擬故障をつくれなかつた。

(3) 12,000 kVA, 40 極, 150 r.p.m., 11 kV

発電機の場合

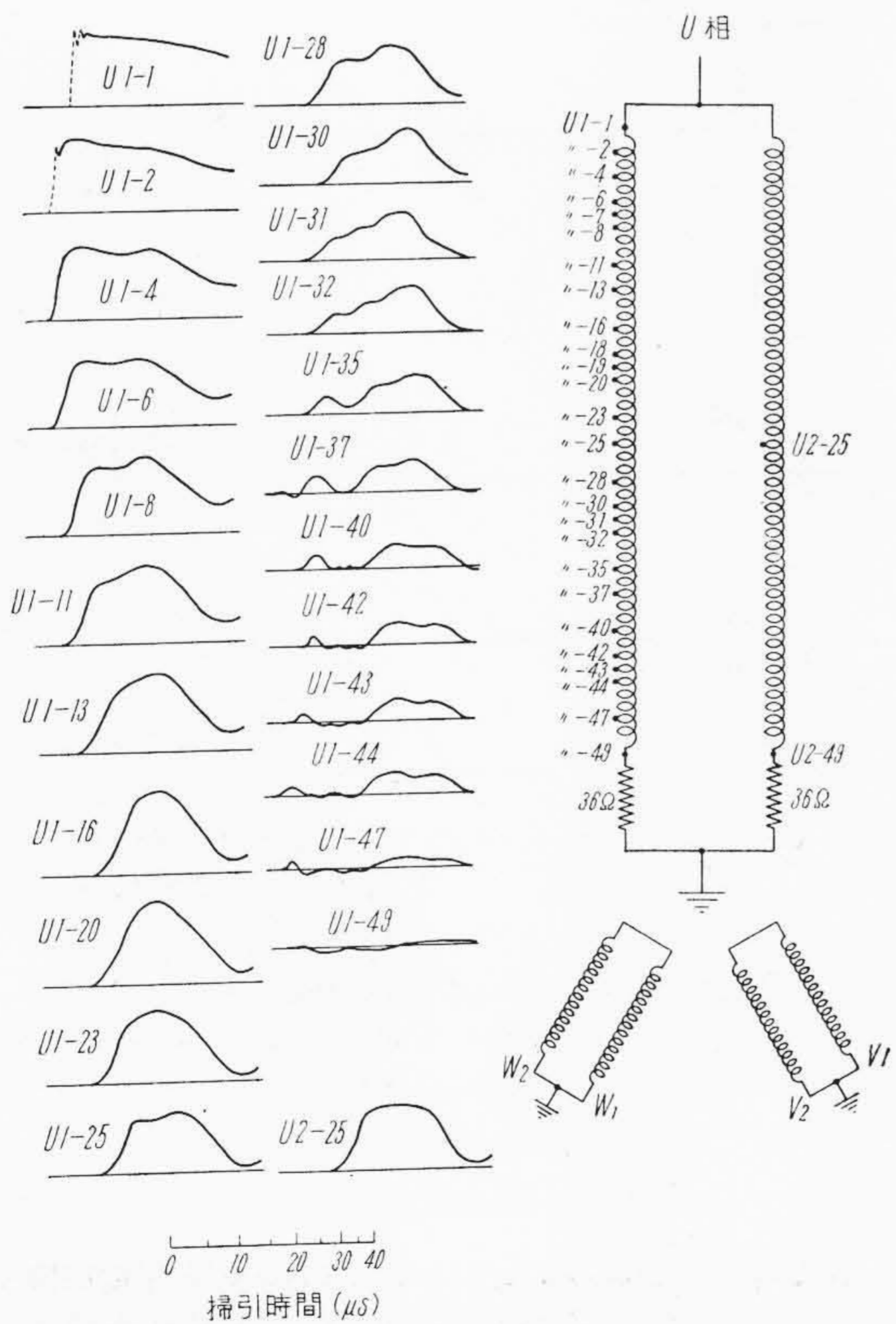
この発電機は分数溝巻品で、上記より一層条件の悪くなつたものである。即ち、コイル配置が全周に広く分布し、コイルグループ数の順序も一層異なり、回転数が小さくしかも 2 列 Y であるため 1 相 1 列の巻回数 240 で非常に多く、巻線全長も 760 m で非常に長いものである。

約  $0.5 \times 40 \mu\text{S}$  の衝撃電圧を印加せる場合の対地間電圧波形及びコイルの分担電圧波形は第 11, 12 図の如くである。中性点側の対地電圧波形は初期に相当高い山が現れ伝播してくるものとの間が長く離れているのに気付

く。これは中性点側コイルと他列の線路側コイルとが良く結合しているため、線路側波頭部の静電、電磁誘導分が他列の中性点側に現れるためと考えられる。なお巻線中央の U2-25 の波形も示したので U1-25 と比べ多少差のあることがわかる。

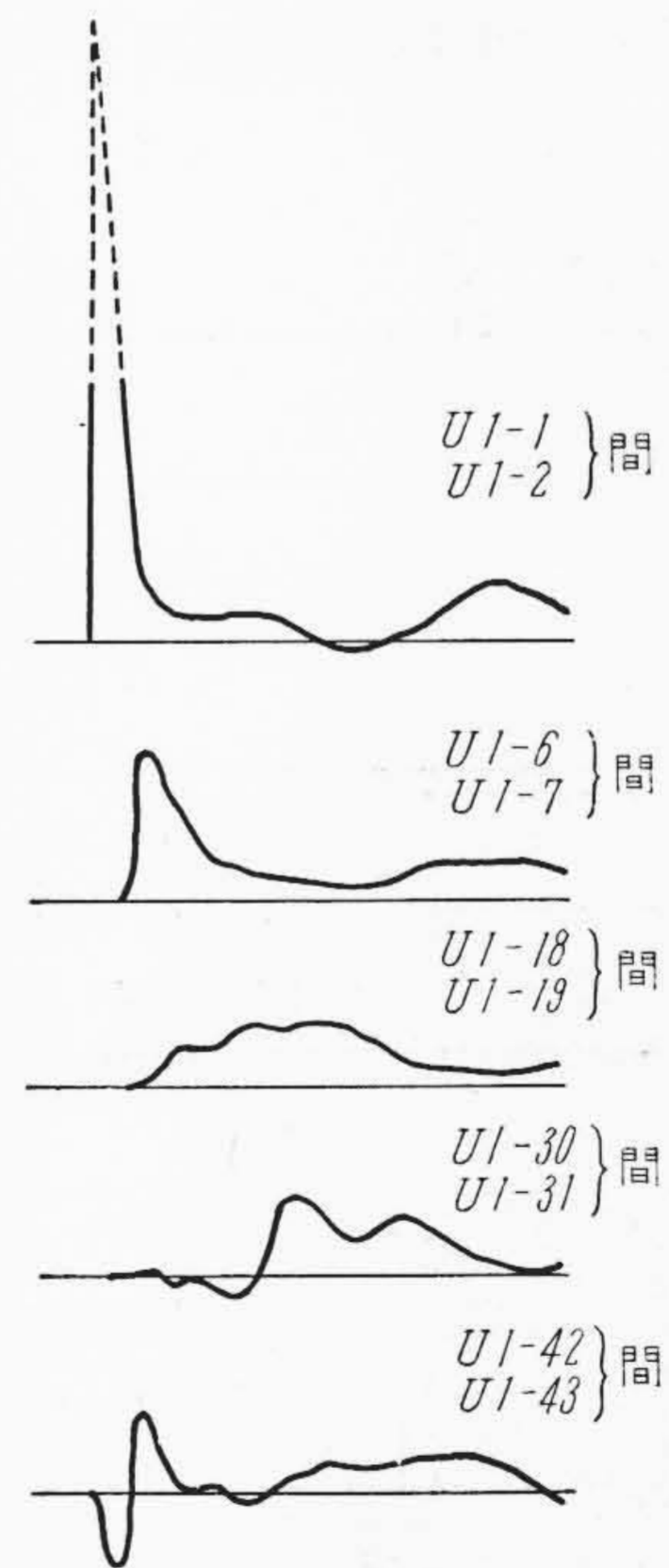
第 13, 14 図(次頁参照)には入口対地間電圧の波高点附近の振動の消えた所の電圧に対する対地間並びにコイルの分担電圧最大値の百分率を示した。振動部のオシロが明瞭でなかつたので対地間は 100% 以上の部分が出たが大体入口電圧の最大値で計算すれば 10~15% 低くなるので 100% 近くに下がる。

衝撃電圧印加の際の U1-25 と U2-25 の電圧平衡法による故障検出波形は第 15 図(次頁参照)の如くである。異常なき時の平衡波形が(2)の発電機より更に悪くなつており、1 コイル短絡時の不平衡波形は中性点側に於て差が小さくなつている。これは巻回数が多く又広く分布しているためで、線路側の故障は感度良いが中性点側に於てはブラウン管波形を見ているだけでは少々検出が困



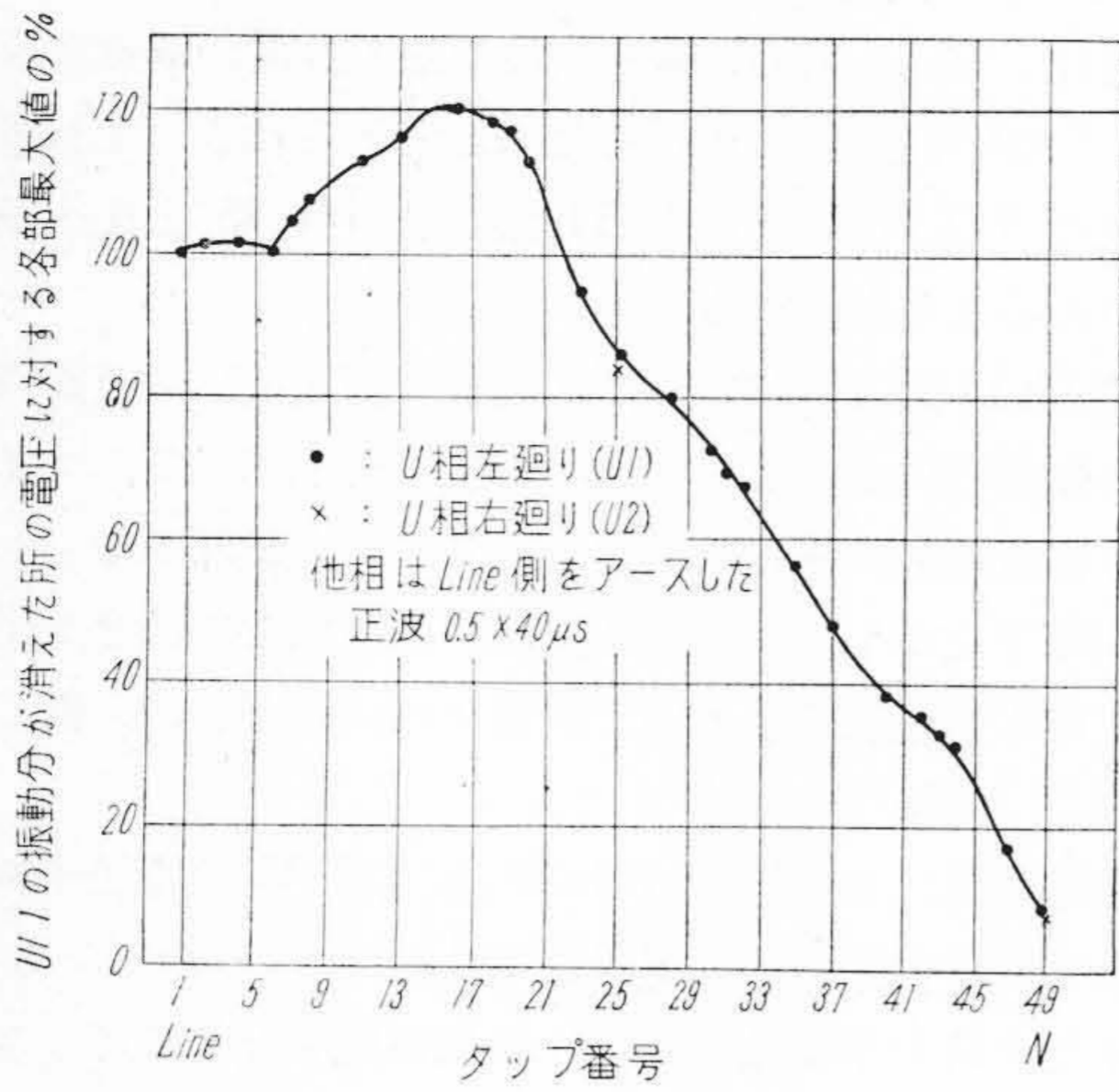
第 11 図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の N 36 Ω 接地、一相印加時に於ける対地間電圧波形 (印加波形正約  $0.5 \times 40 \mu\text{S}$ , ロータなし)

Fig. 11. Wave Forms of Voltage to Ground in the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator



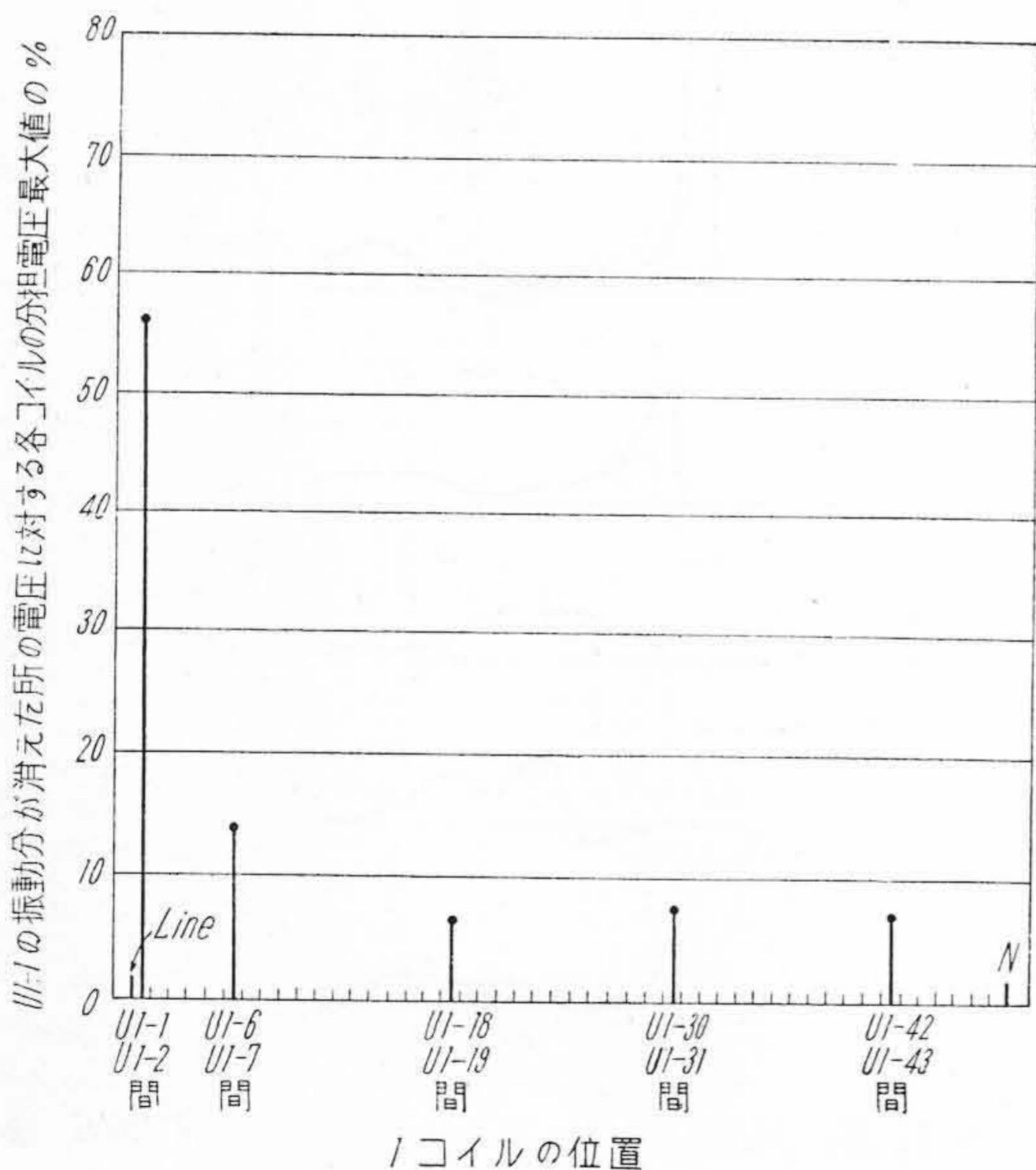
第 12 図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の N 36 Ω 接地、一相印加時に於ける各コイル (5 ターン) の分担電圧波形 (印加波形正  $0.5 \times 40 \mu\text{S}$ , ロータなし)

Fig. 12. Wave Forms of Voltage Per Coil (Five Turns) in the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Surge Voltage Applied to One Phase



第 13 図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の N 36 Ω 接地、一相印加時に於ける U 相各部の衝撃電圧対地間電位分布

Fig. 13. Surge Voltage Distribution in the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator Surge Voltage Applied to One Phase (Neutral Resistance is 36 Ω)

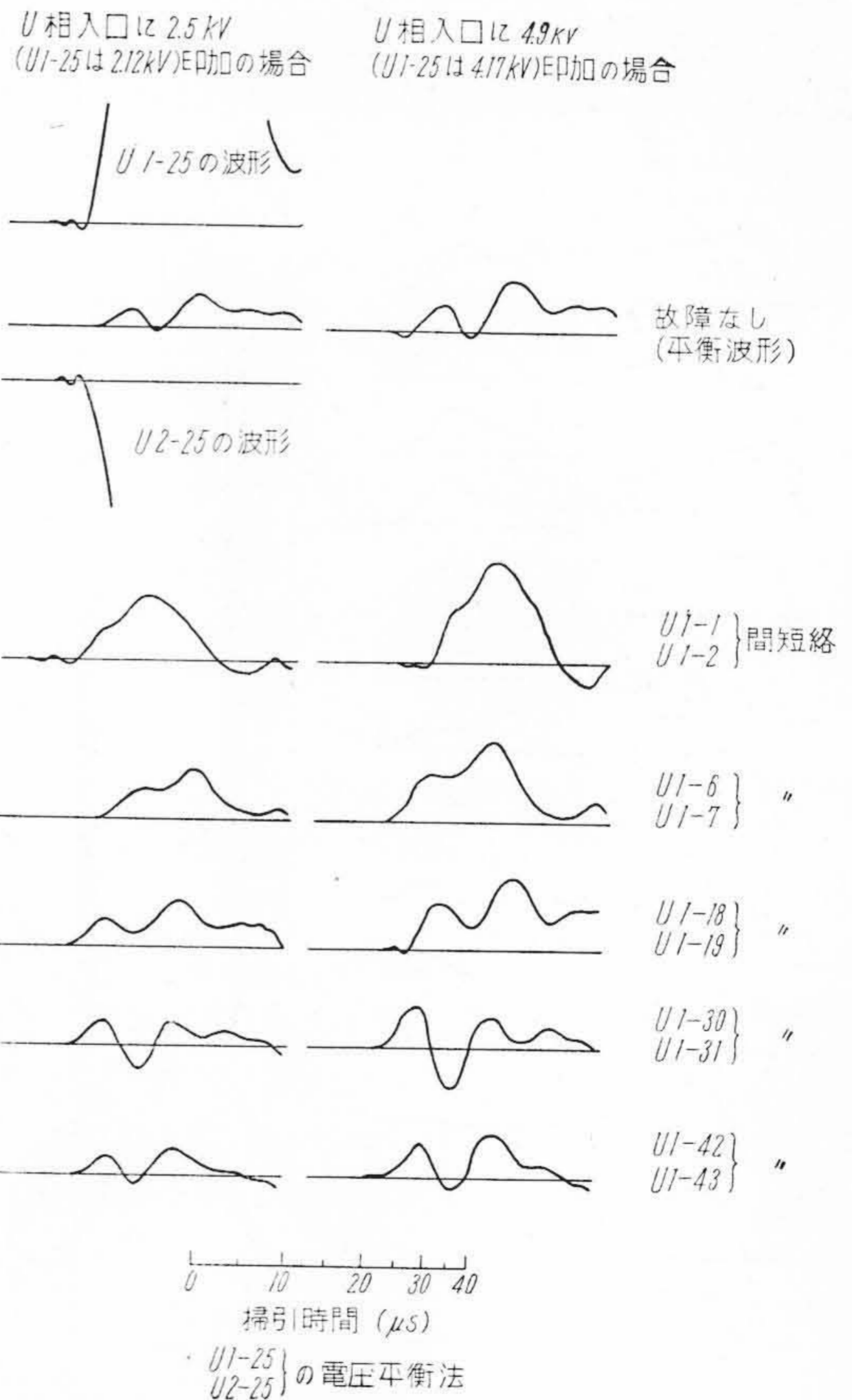


第 14 図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧印加の際の各コイルの分担電圧 (印加波形 0.5 × 40 μs, ロータなし)

Fig. 14. Voltages Per Coil in the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test

難となり、写真による比較を必要とする。この場合異常なき時の平衡波形が安定していないと検出できなくなるが、本法は非常に安定しており何回撮影しても一致しているから、この程度に差があれば十分検出できるのである。第15図は看視点に約 4 kV (即ちブラウン管偏向板に 4 kV) 印加して始めてこれだけに差を拡大できるのであつて、波形比較法でこれを検出する場合には差がこれの 1/6 位に減るから殆ど検出不能となるわけである。

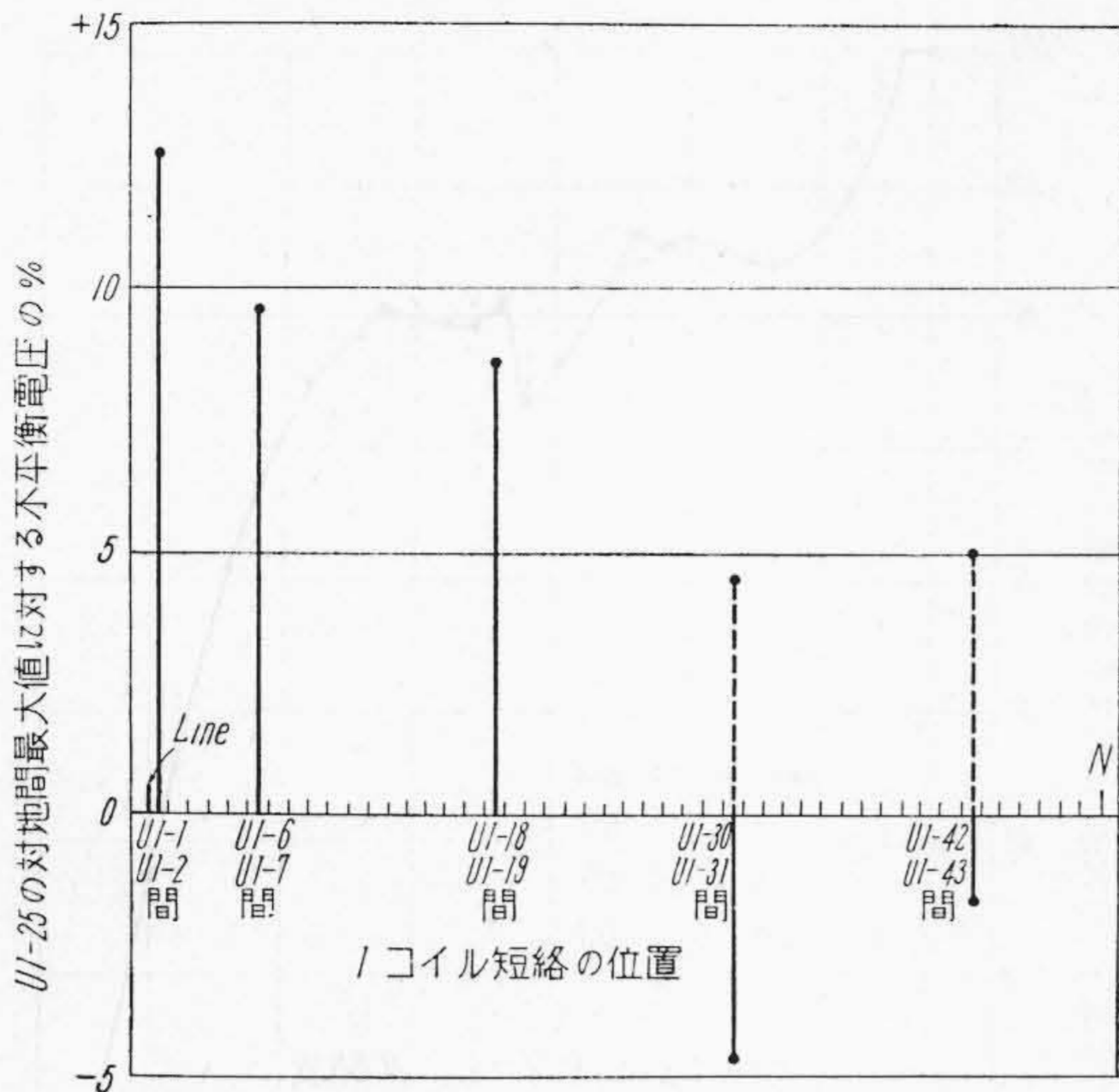
第 16 図に電圧平衡法による検出感度を U1-25 の対地電圧最大値に対する百分率で示した。これは 1 コイル (5 ターン) の短絡の場合で、1 ターンではこれの 70% 位になるから (1) の発電機よりは相当検出感度は悪くなつてゐる。1 列の巻回数がこれ位のものは特に大きい方で、先づこの結果より殆ど大抵の発電機は電圧平衡法



第 15 図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧印加の際の電圧平衡法による層間短絡検出波形 (印加電圧 0.5 × 40 μs, ロータなし)

Fig. 15. Wave Forms Obtained by Short-Circuiting the Coils of the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test





第16図 12,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧印加の際の1コイル(5ターン)短絡の位置による不平衡電圧(印加波形  $0.5 \times 40 \mu\text{S}$  ロータなし)

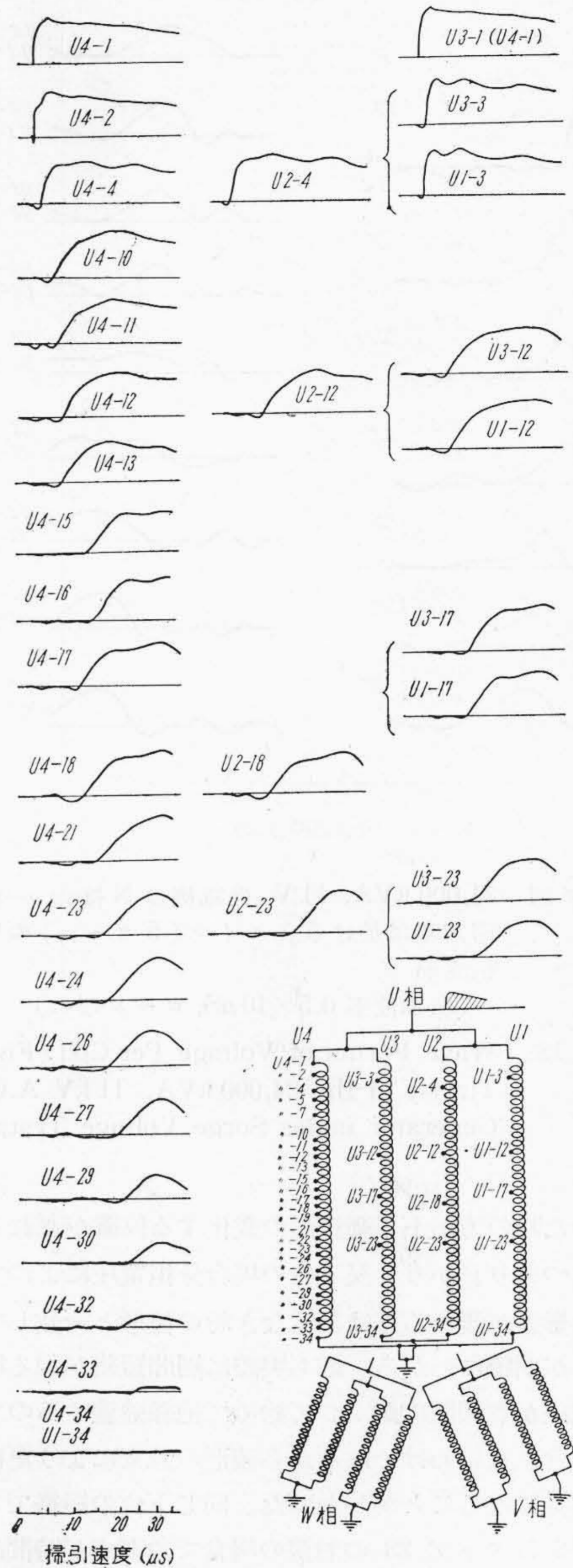
Fig. 16. Relation between Short-Circuited Coil (Five Turns) and Voltages of the Voltage Balancing Method in the 12,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Under Surge Voltage Test

によつて層間故障の検出が可能であるとの確信を得たわけである。

(4) 24,000 kVA, 48極, 125 r.p.m., 11 kV 発電機の場合

以上の発電機よりも更に回転数が小さい分数溝巻発電機の例としてこの発電機を選んだが、4列になつているため各列の巻回数は165, 直列コイル数33, コイル全長631 mで(3)の発電機よりは小さくなつている。U相に電圧印加の場合の対地間電圧波形及びコイルの分担電圧波形は第17, 18図の如くであり、その最大値の発電機入口電圧波高値に対する百分率は第19, 20図(次頁参照)の如くである。この発電機は結線図よりU1とU3, U2とU4がそれぞれ良く平衡すると考えられるものであるが、第17図に示したタップ12及び23の各列の波形並びにタップ17, 18の各2列の波形の差がこれを裏書きしている。尚電圧を更に高くした時のこれらのそれぞれの組合せによる異常なき時の電圧平衡法波形第21図(19頁参照)により明瞭に示されている。

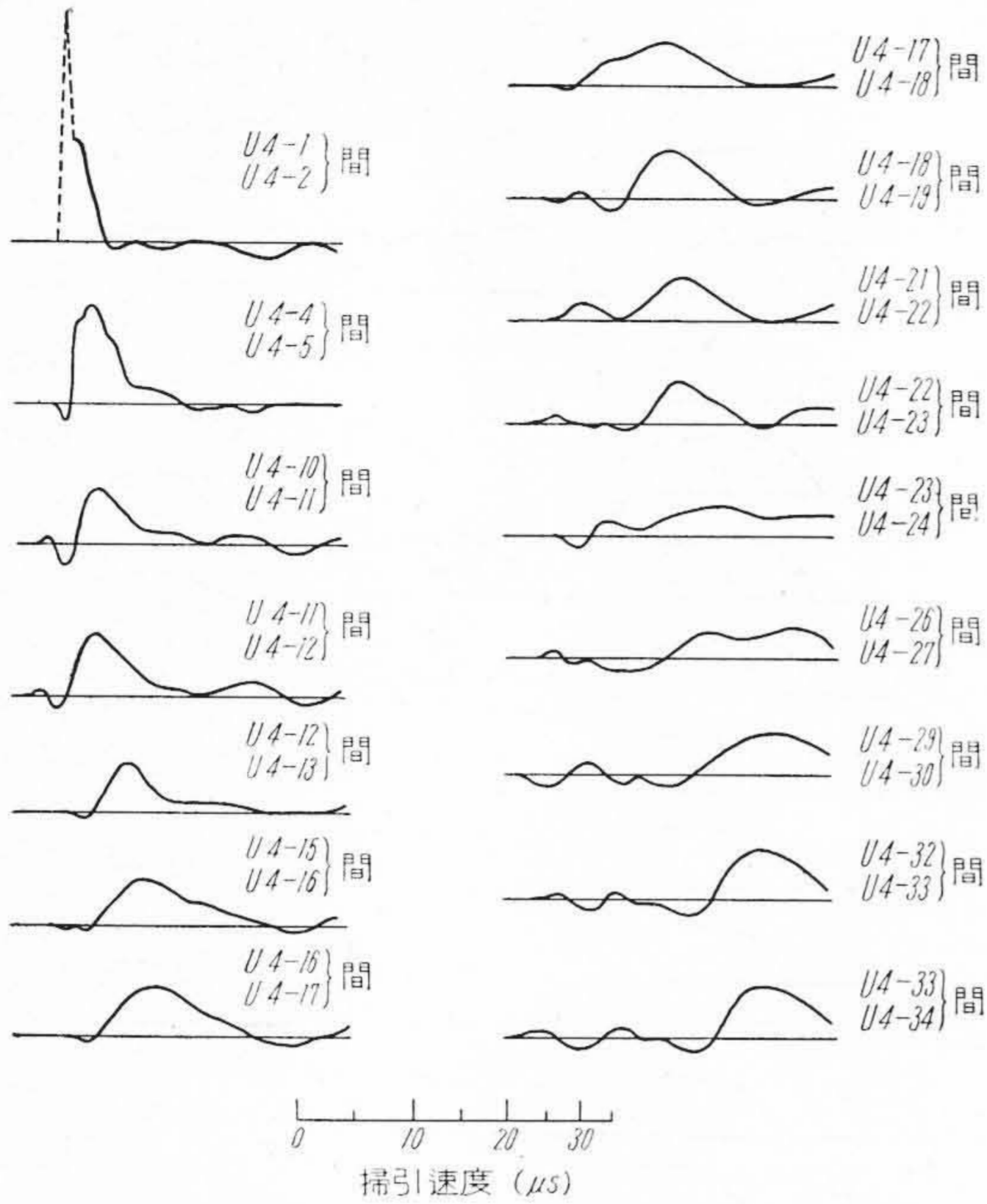
U4-12とU2-12, U4-18とU2-18及びU4-23とU2-23の電圧平衡法によりU4列の各所に1コイル短絡を起した場合の不平衡電圧波形は第22図(20頁参照)である。U4-18とU2-18の場合はブラウン管の掃引を遅



第17図 24,000 kVA, 11 kV 発電機のN接地、一相印加時に於ける対地間電圧波形(印加波形正  $0.5 \times 40 \mu\text{S}$ , ロータなし)

Fig. 17. Wave Forms of Voltage to Ground in the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator under Surge Voltage Test

くして  $100 \mu\text{S}$  にした場合(印加電圧も高くした)も一緒に示した。尚これ迄は短絡を球間隙或は針端間隙によつて行つたのに対し、今回は  $100 \text{V}$  のネオン管を使い分担電圧が  $100 \text{V}$  を越えた時に放電することによつて生ぜしめた。この図を見ると上位で短絡が起つた時よりも下位



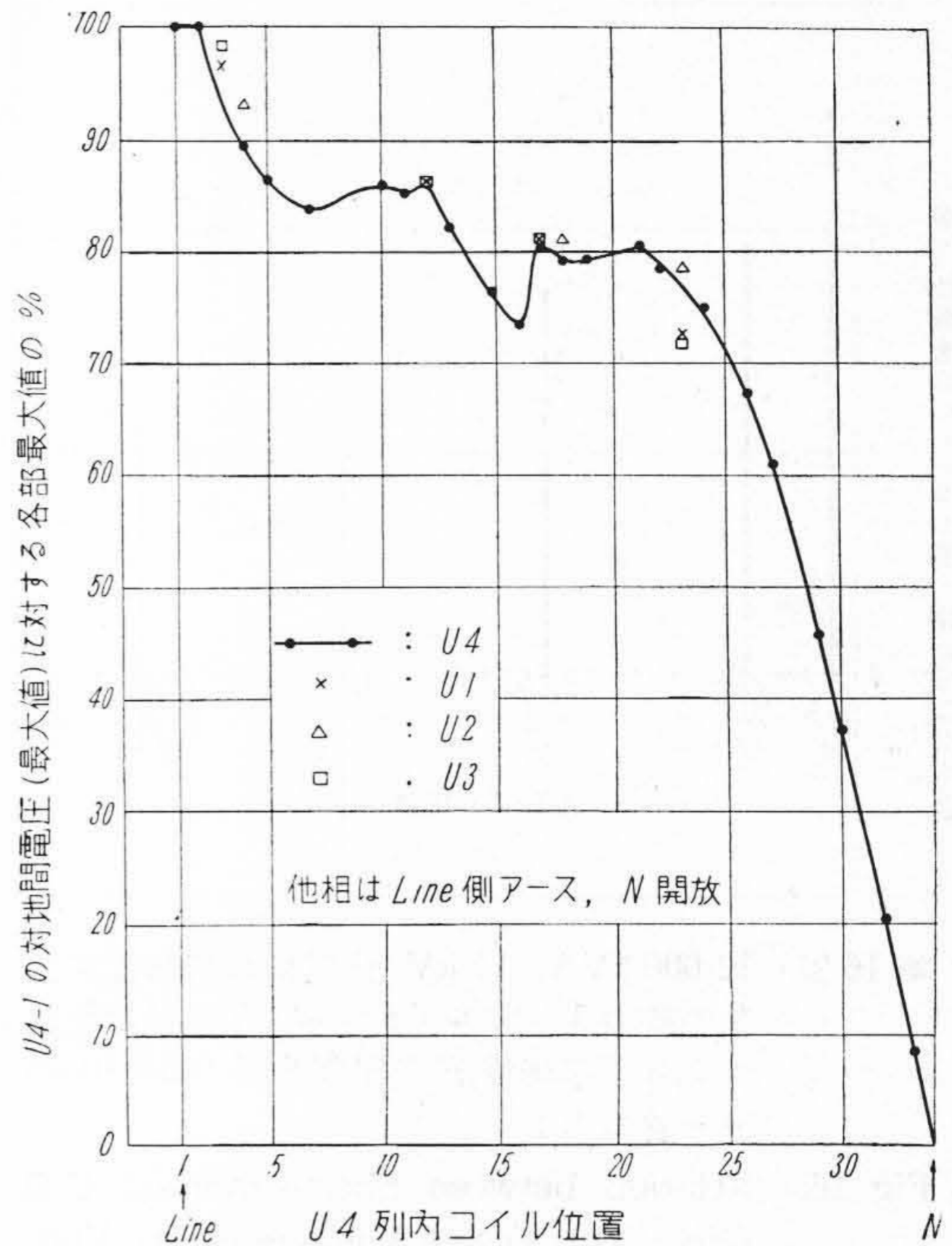
第 18 図 24,000 kVA, 11 kV 発電機の N 接地、一相印加時に於ける各コイル (5 ターン) の分担波形 (印加波形  $0.5 \times 40 \mu\text{s}$ , ロータなし)

Fig. 18. Wave Forms of Voltage Per Coil (Five Turns) in the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator under Surge Voltage Test

で起つた時の方が不平衡波形の変化する位置が遅れることがはつきりわかり、又下位の場合分担電圧によつて放電した影響が現れる迄は異常なき時の波形と一致していることが明瞭にわかる。即ち実際に層間短絡が起る場合は或電圧が巻回間にかゝつて始めて絶縁破壊するので、この場合に近いわけであるから波形の急変により更に検出が容易になることがわかつた。同じ下位の短絡でもタップ 12 とタップ 23 の看視の場合で急変点が時間的にずれていることがわかる。これは故障点から看視点迄の長さの違いによる伝播時間の差によるものである。

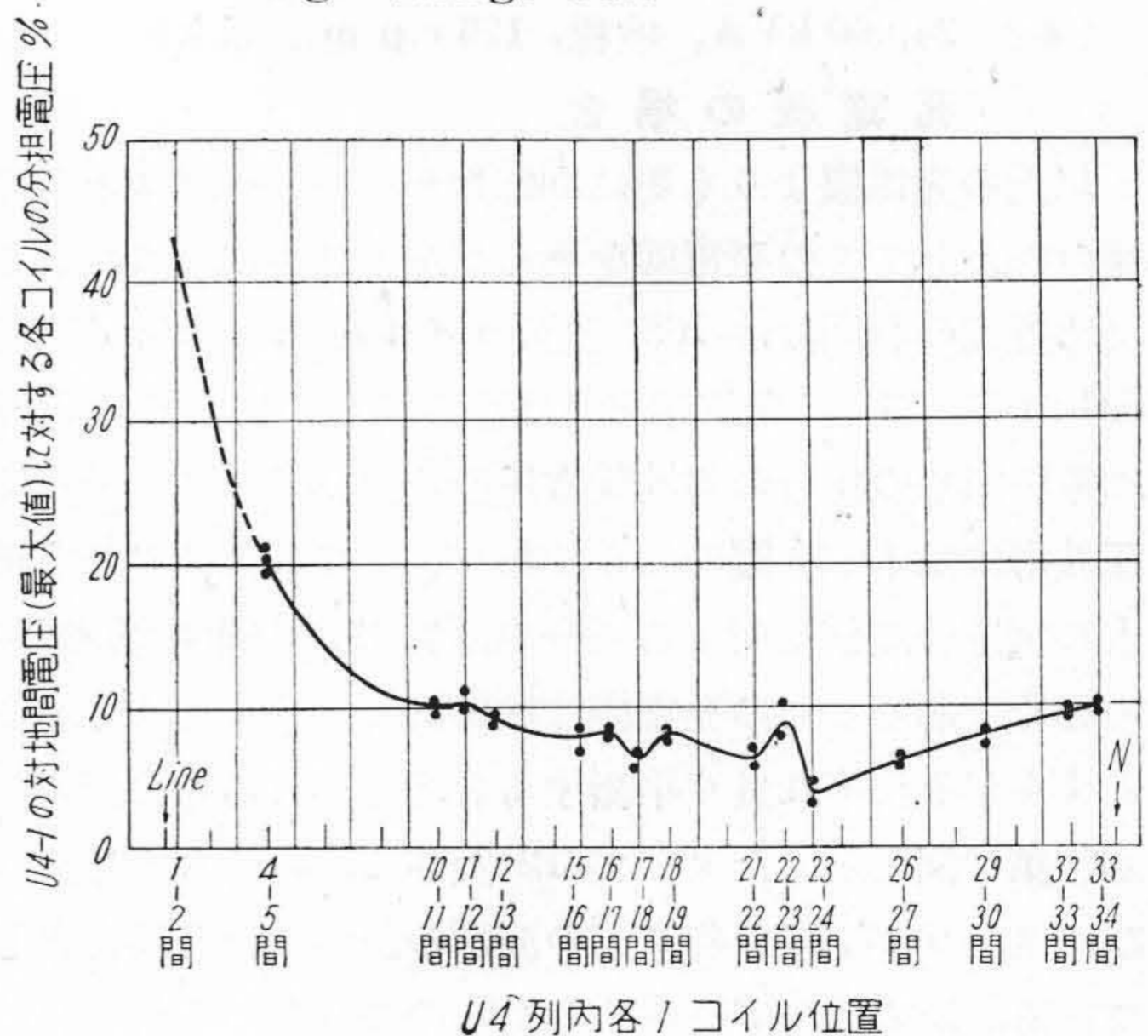
看視点の前後 2 コイル迄の間に短絡が起つた時は平衡波形の急変点に高周波振動が現れている。即ちこの高周波振動は数コイルで減衰してしまふことがわかる。これは破壊した時その位置を推定するのに役立つ。

看視点の前後 2 コイル迄の間に短絡が起つた時は平衡波形の急変点に高周波振動が現れている。即ちこの高周波振動は数コイルで減衰してしまふことがわかる。これは破壊した時その位置を推定するのに役立つ。



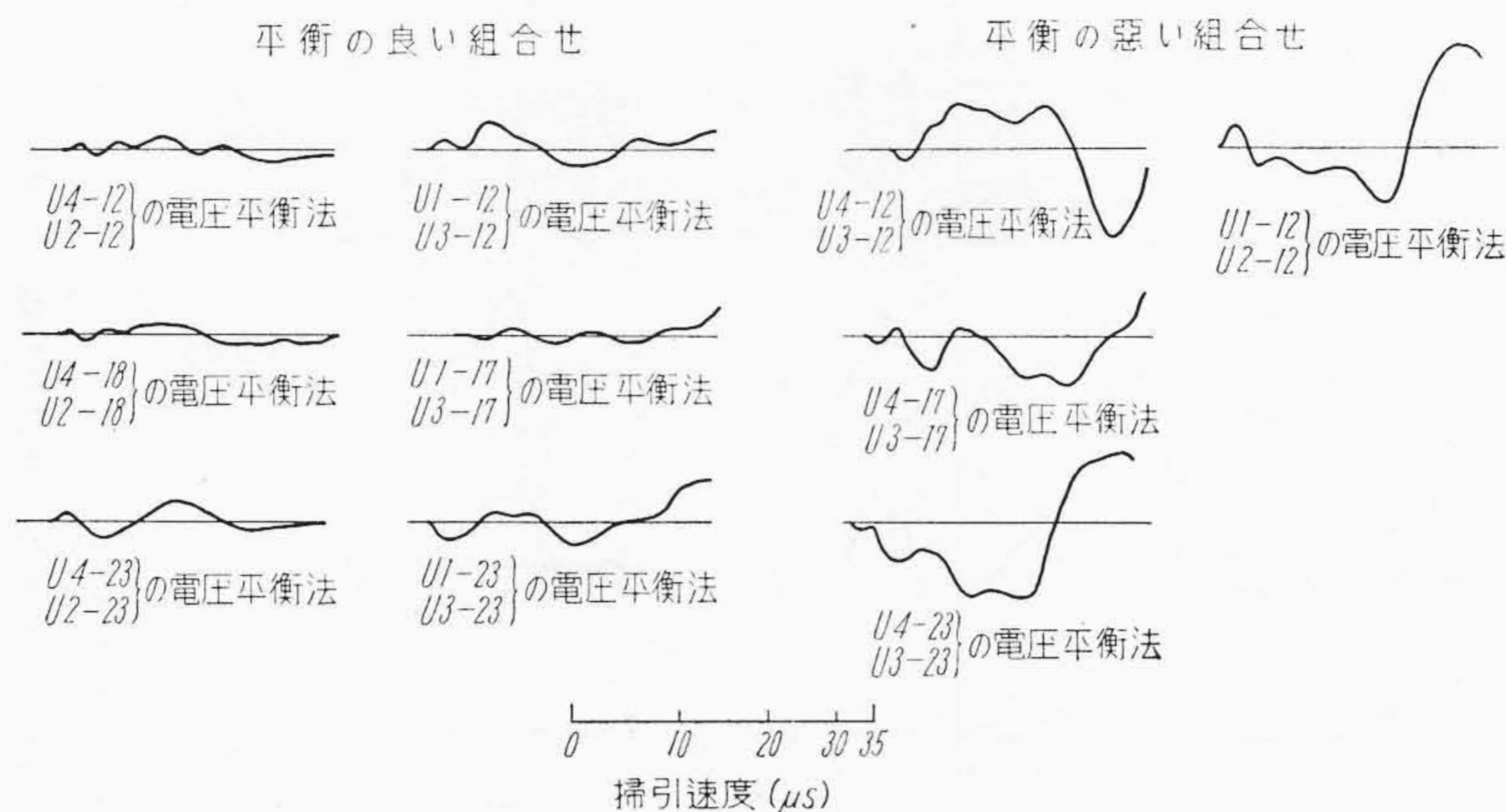
第 19 図 24,000 kVA, 11 kV 発電機の N 接地、一相印加時に於ける U 相各部の衝撃電圧対地間電位分布 (印加波形正  $0.5 \times 40 \mu\text{s}$ , ロータなし)

Fig. 19. Surge Voltage Distribution in the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test



第 20 図 24,000 kVA, 11 kV 発電機の N 接地、一相印加時に於ける U 相各部 1 コイル (5 ターン) の分担電圧 (印加波形  $0.5 \times 40 \mu\text{s}$ , ロータなし)

Fig. 20. Voltages Per Coil in the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test



第21図 24,000 kVA, 11kV 発電機U相4列の組合せによる故障なきときの電圧平衡波形の違い (印加電圧 3.6~3.7 kV, U4-12 3.1 kV, U4-17 2.9 kV, U4-18 2.9 kV, U4-23 2.9 kV の場合)

Fig. 21. Relation between Four Branches Combination and the Voltage Balancing Wave Forms on the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator with no Fault

μS では速すぎ 100 μS 位が適当である。掃引速度は巻線の長さや伝播速度の大小によつて加減するのが良いが、むしろ遅目にとつておく方が良い。

看視点がタップ 18 の場合の1コイル短絡の位置と不平衡電圧最大値の U4-18 対地電圧最大値に対する百分率との関係を第23図(21頁参照)に示した。この感度は(1)の発電機の場合より悪く、(3)の発電機より良くなつてゐる。

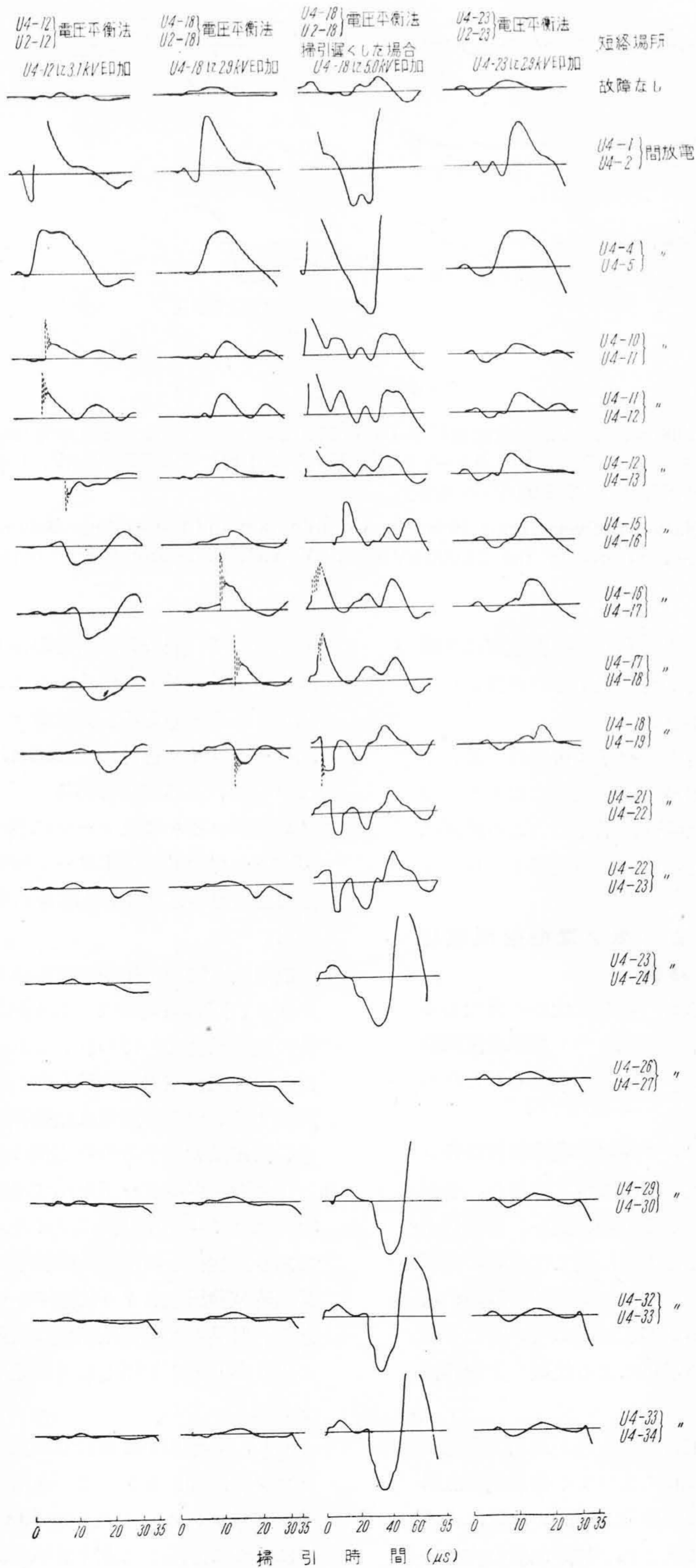
(5) 電圧平衡法による水車発電機層間短絡の検出に対する結論

以上の如く全般を代表するものとして仕様の異なる4種の発電機について、電圧平衡法によつて衝撃電圧試験の際の層間短絡検出感度を調べ次のことが明らかとなつた。

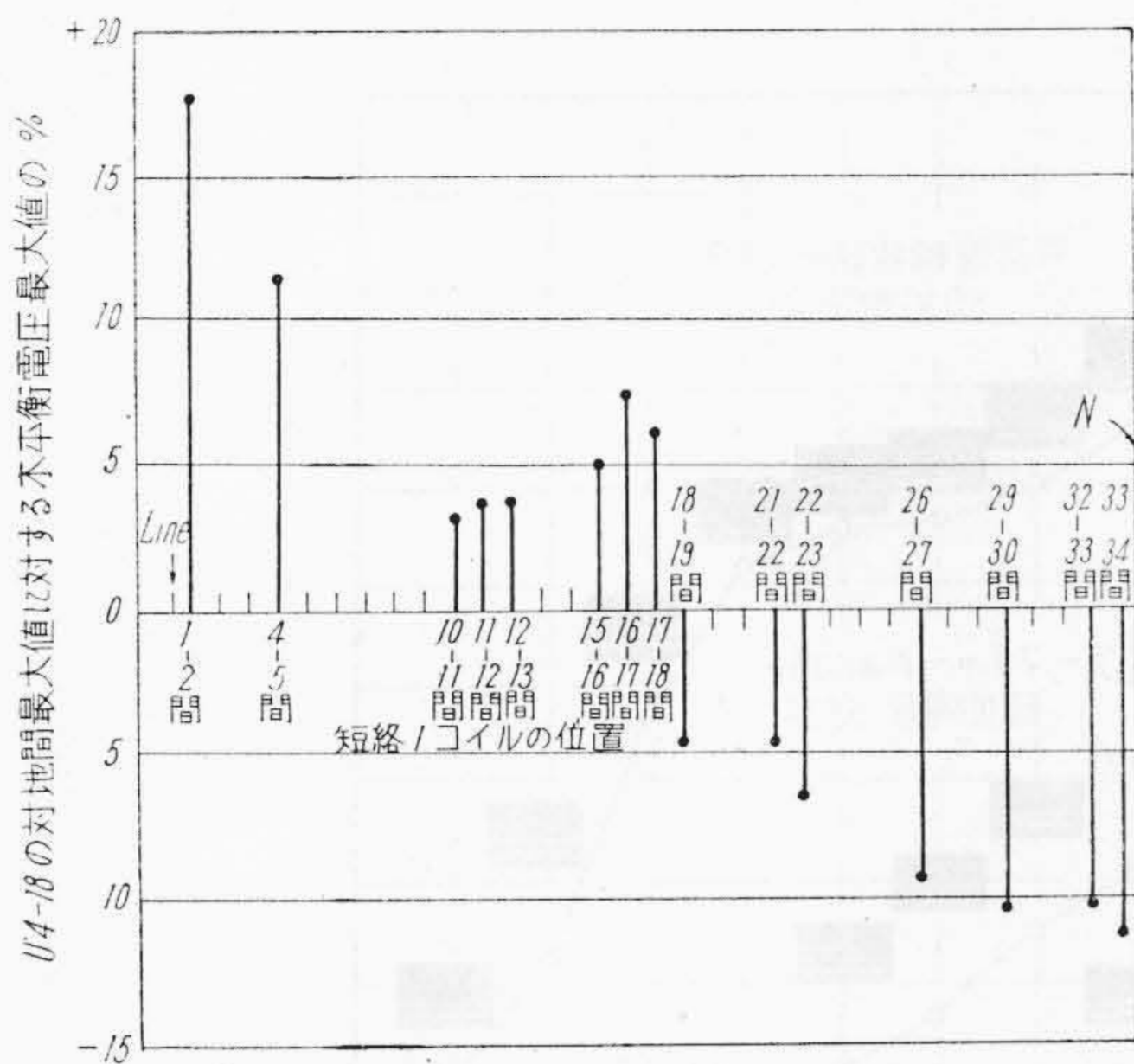
1. 検出感度は1相1列のコイルの総巻回数及び各コイル間の結合度、巻線長さ等によつて異なり、巻回数が少なく、結合度の大きなるもの程良い。巻回数が多く、しかも広く分布したものに於ては故障の位置によつてブラウン管波形を見ていて瞬間に故障の有無を判定し難い場合もあるが、故障のない時の平衡波形が安定しているため写真による比較で十分判定しうる。
2. 模擬故障としては放電管による方が適当で実際の場合に近いと思われ、これによつて平衡法看視点附近の短絡の場合の高周波振動分及び故障位置による平衡波形変化点が明瞭に示され、故障位置の大体の推定がなしうる。更に故障が2巻線の何れか及び看視点の上下何れにあるかは波形の逆転によつて決定

しうるので一層故障箇所を限定しうる。必要の場合には平衡法看視点を変えることによつて故障コイル迄決定しうると思ふ。尚故障コイルの決定の目的にはサーチコイルを併用すれば口出し線を出す必要がないので、更に容易である。

3. 1箇のコイルは数ターンに巻かれているがコイル(6ターン)短絡時と1ターン短絡時とでは不平衡電圧波形の高さは6:1にはならず100:75程度であつた。
4. 故障なき時の電圧平衡波形は発電機により多少差があり、同じ発電機内でも4列Yの場合一般に対称性の良い組合せが得られ、これは結線図から判断したものと実験結果が一致した。従つて電圧平衡法を実施する看視点の選定は結線図を見て行うことができ、決定後調整する等の面倒は必要がない。
5. 平衡看視点のリードを出す必要があるが、新品の場合はコイル間接続部はコイル入れ後絶縁する部分であり試験後その部分を絶縁することは簡単であり又随時試験出来るように端子をつけておくこともできる。旧品の衝撃電圧試験は特殊の場合以外はないと思ふがリードを出した後の絶縁は数時間で復旧しうる。  
60kVも印加する場合看視点の電圧をそのままブラウン管に加えることはできないから巻線のサージインピーダンスより大きい1,000Ω程度の無誘導抵抗によつて分圧して加えれば良い。
6. 発電機に衝撃電圧を印加した後に、その試験電圧よりずつと低い別な電圧によつて故障しているか否



第 22 図 24,000 kVA, 11 kV 発電機の衝撃電圧印加の際の電圧平衡法による層間短絡検出波形 (印加波形  $0.5 \times 40 \mu\text{s}$ , ローターなし)  
 Fig. 22. Wave Forms Obtained by Short-Circuiting the Coils of the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator Stator under Surge Voltage Test



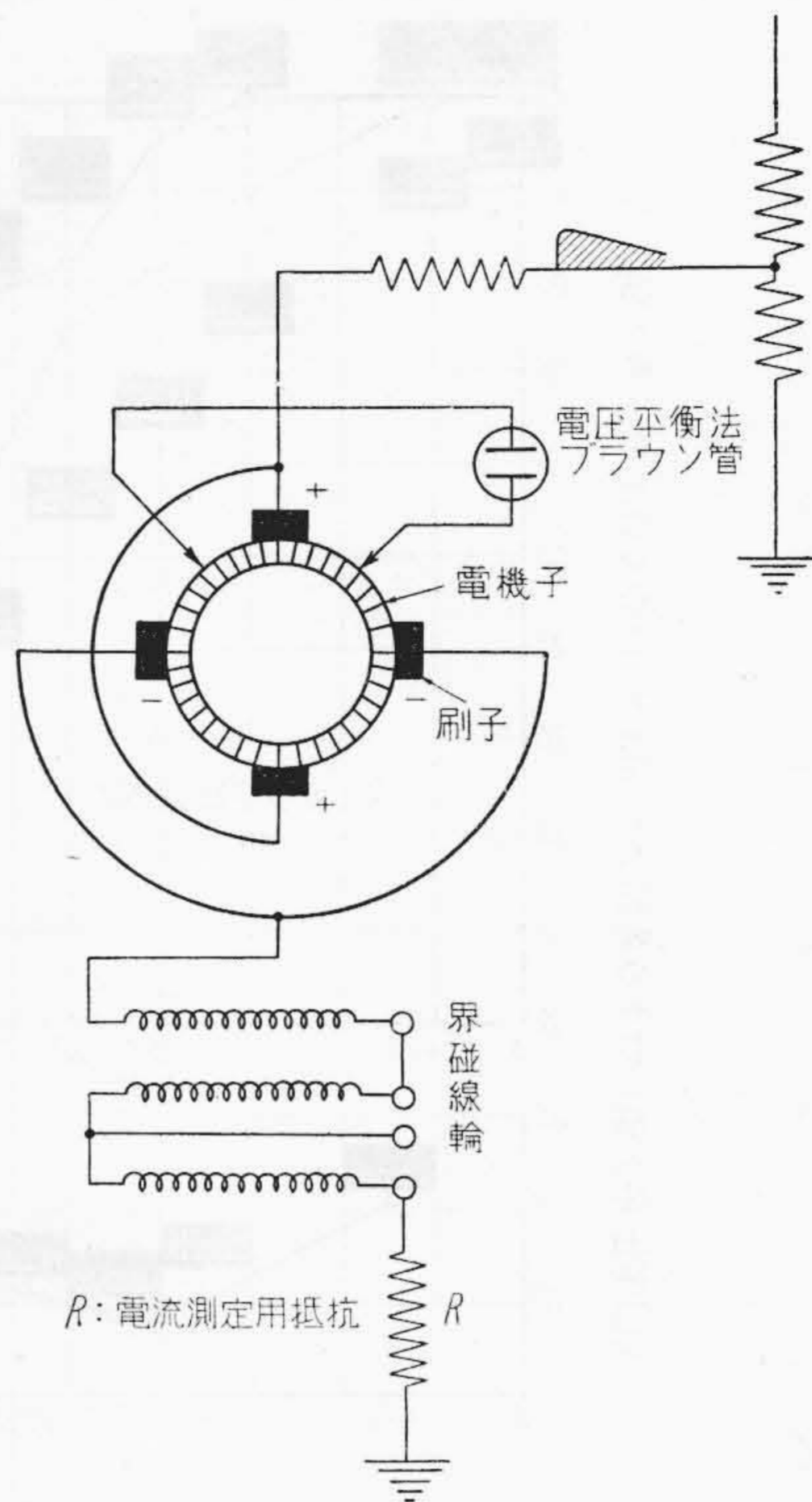
第23図 24,000 kVA, 11 kV 発電機の1コイル (5ターンの) 短絡の位置による不平衡電圧 (印加波形  $0.5 \times 40 \mu S$ , ロータなし) (看視点 U4-18 と U2-18)

Fig. 23. Relation between Short-Circuited Coil (Five Turns) and Voltages of the Voltage Balancing Method in the 24,000 kVA, 11 kV A.C. Generator under Surge Voltage Test

かを判定する方法は、衝撃電圧による破壊ではコゲ跡 (track) ができず高抵抗をもっているから不適當で、巻回間が破壊しても数割低い電圧にすれば放電しない例が多いのである。どうしても試験電圧印加と同時に判定することが必要で本法による時は層間破壊と同時に判定するから破壊した後のその部分の抵抗には無関係である。

〔IV〕 直流機電機子層間絶縁試験の際の層間短絡の検出

発電機の場合と同様小型回転機に衝撃電圧を印加し、コイル層間に或電圧を生ぜしめて層間絶縁試験を行う場合層間破壊の有無を調べるのに電圧平衡法を用いることができる。即ち直流機電機子には1台の中に対称2巻線が得られる。量産品に於ては2台を並列に使用すればより以上好都合である。こゝには MT-30 電車用主電動機についての実験結果を述べることにする。その結線は第24図の如くであり、正刷子から負刷子迄は両側が対称になつてゐる。層間絶縁試験の目的には全巻線の層間に同じ電圧がかかることが望ましいが、標準衝撃波を印加する場合均等分布にはならない。しかし発電機の如き極端な差はなく、第25図(次頁参照)の如き分担電圧の分布を示している。図中一番左の点は10ターンの分担電圧で

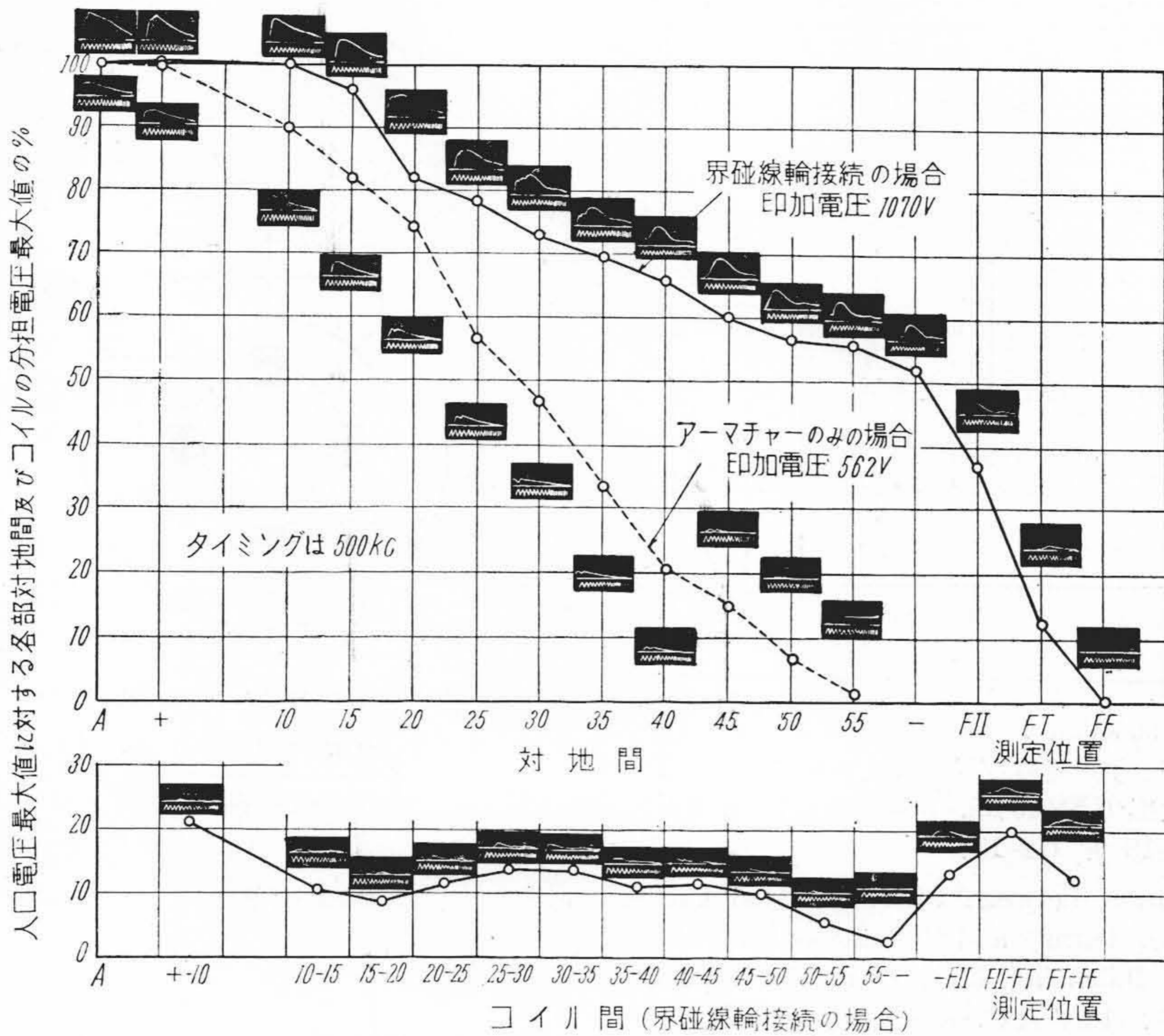


第24図 MT-30電車用主電動機の結線及び電圧平衡法による衝撃電圧層間試験回路

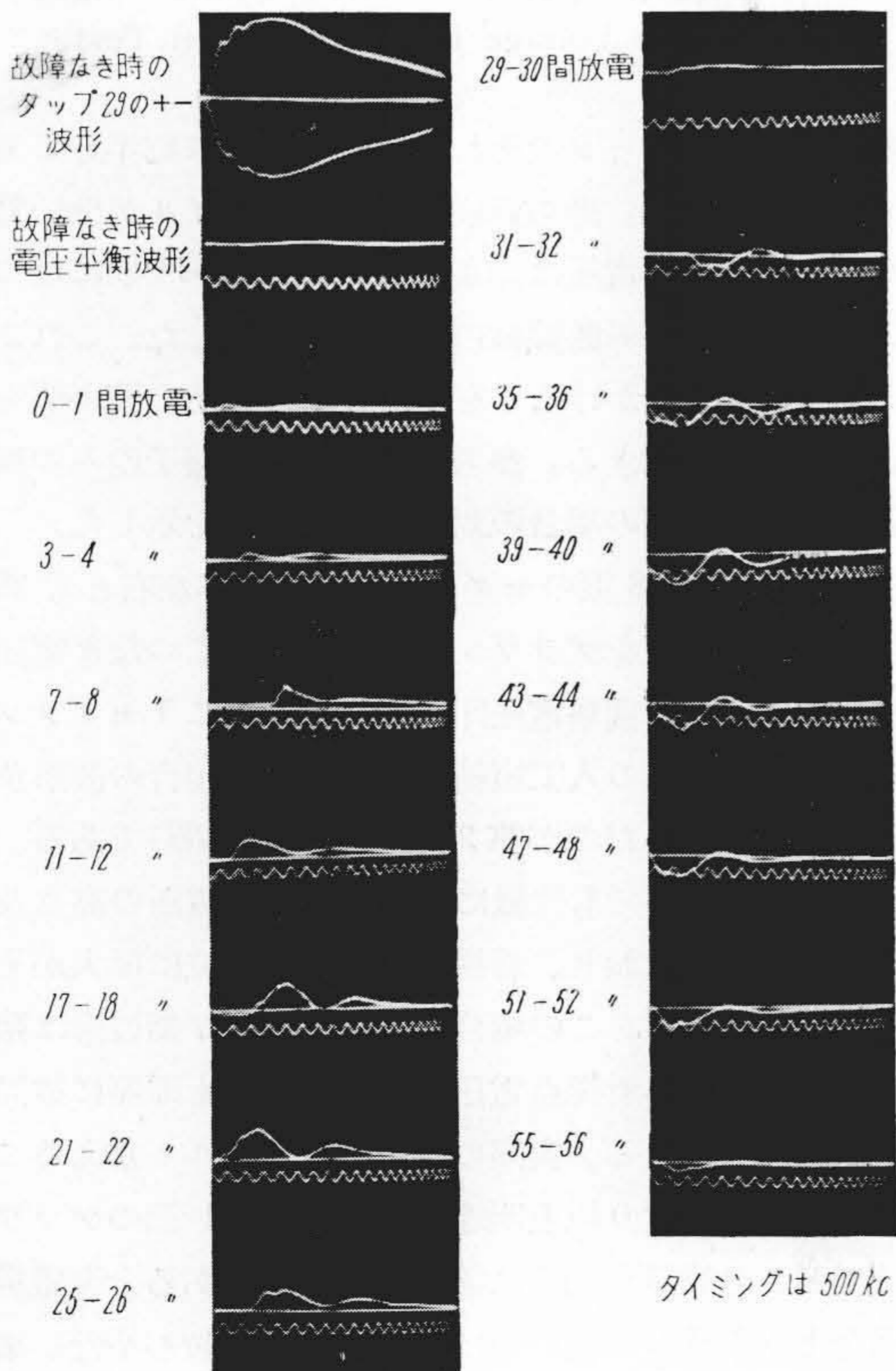
Fig. 24. Connecting and Circuit Diagram of MT-30 Main Traction Motor under Surge Voltage Layer Insulation Test

あるから他の5ターンのそれと比較する時は約半分と考えて比較されたい。即ち負刷子側の拾数コイルが低い他は5ターンの分担電圧は印加電圧の大体9~14%になつてゐる。図中には界磁線輪の分担電圧も示した。これより1ターンの幾らかけるかを定めて印加電圧の波高値を選定することができる。参考迄に同図に電機子の場合と界磁線輪接続の場合の対地間電位分布を示した。

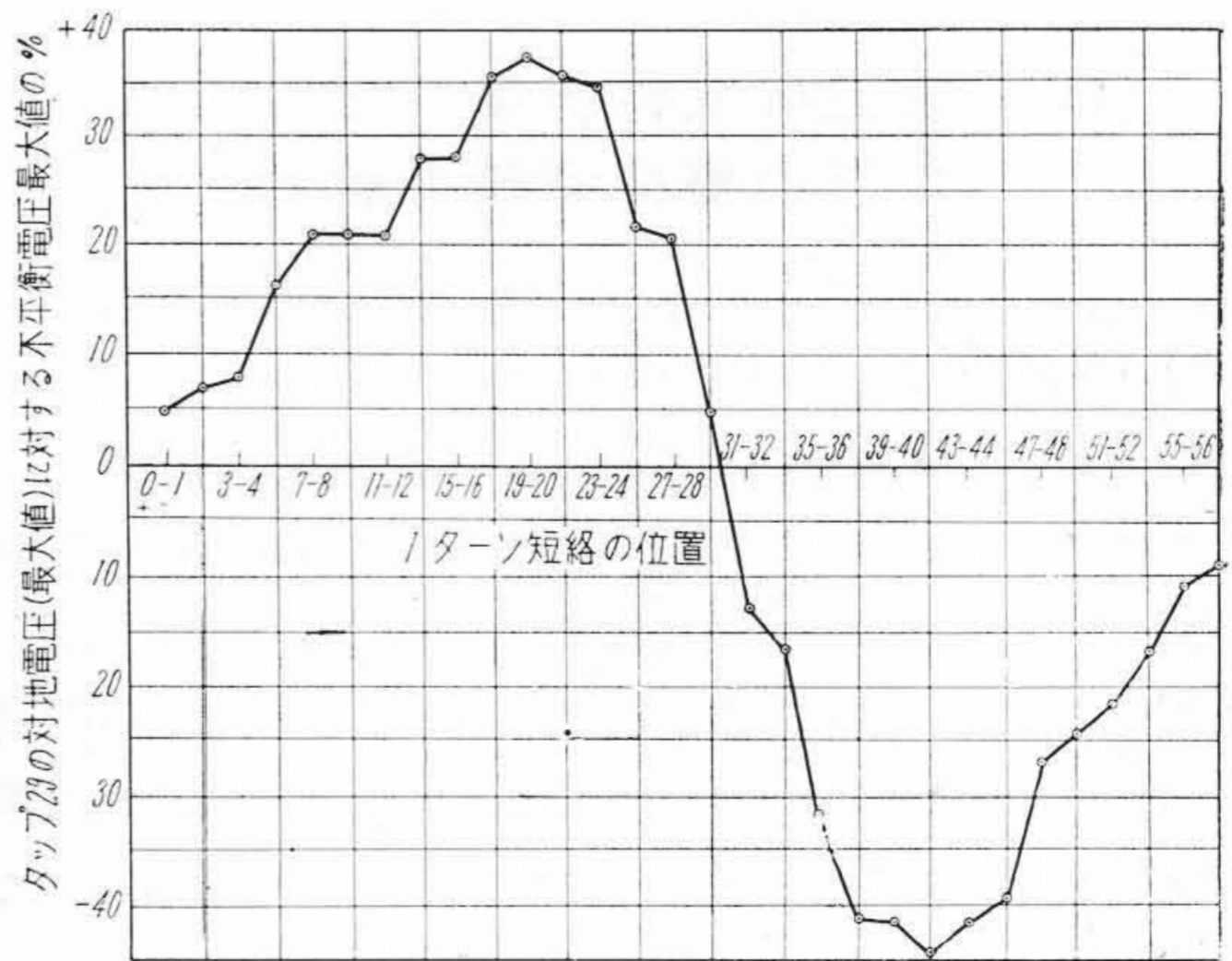
正負刷子間に58箇のセグメントがあるが左右とも29番目のセグメントをブラウン管の両偏向板につなぎ電圧平衡法によつて、衝撃電圧印加時に各位置に1セグメント間(1ターンの)人工短絡を生ぜしめた場合の波形及び検出感度を示したのが第26, 27図(次頁参照)である。同じ1ターン短絡でも位置によつて不平衡電圧の高さ及び波形が異なつており、看視点の上位、下位に極大がそれぞれ現れている。この場合故障なき時の平衡波形は殆ど零線であるから看視点電圧5%の変化でも即座に故障の有無を判定できる。実際の試験は数千ボルト加えることになるから、より以上明瞭に検出し得、1箇のブラウン管でどこの故障も完全に検知しうるのである。発電機の場合よりも感度が良いのはコイルの巻回数が少ない事



第 25 図 MT-30 電车用主電動機の衝撃電圧対地間電位分布及びコイルの分担電圧並びにその波形  
 Fig. 25. Voltages to Ground and Per Few Turns and their Wave Forms in the MT-30 Main Motor under Surge Voltage Test



第 26 図 MT-30 電车用主電動機の衝撃電圧印加の際の電圧平衡法による層間短絡の検出波形 (平衡視点タップ29に775V印加の場合)  
 Fig. 26. Wave Forms Obtained by Short-Circuiting the Turns of the MT-30 Main Motor under Surge Voltage Test

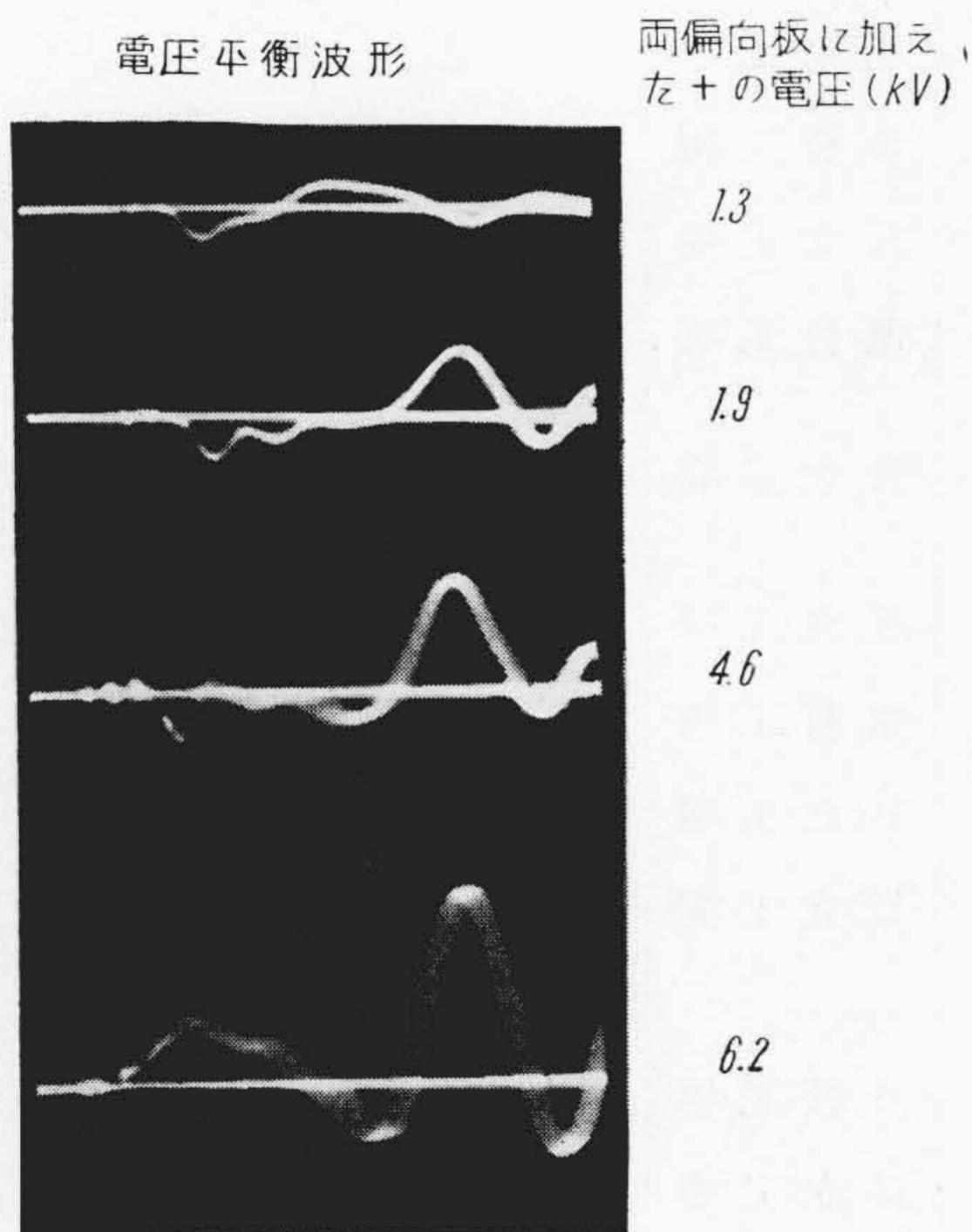


第 27 図 MT-30 電车用主電動機の衝撃電圧印加の際の電圧平衡法による層間短絡の検出感度  
 Fig. 27. Detecting Sensibility of Each Short-Circuited Turns in MT-30 Main Motor under Surge Voltage Test

と各コイルの結合が良いためと思う。もしも層間短絡を生じた場合は電機子を回転して調べることによりその位置を知ることができるので発電機の場合より手軽に故障位置の決定をなしうる。

〔V〕 ブラウン管にかける電圧と  
焦点のボケ

発電機の衝撃電圧試験に際し電圧平衡法によつて層間短絡を検出する場合不平衡波形を拡大するためブラウン管に高い電圧を加えるので、ブラウン管の電場を乱し焦点ボケを生じ波形が太くなる。その程度は75D, B11高速度ブラウン管で加速電圧約8kVの場合第28図の如くである。両偏向板に正の電圧約6kVを加えた場合か



第28図 ブラウン管偏向板に+の高電圧を加えた場合の焦点ボケ

Fig. 28. Shade of Trace Shown by Oscillograms when High Voltage Applied to Deflection Plate of Braun Tube

なり太くなるが、これでも故障検出には殆ど差支えはない。しかし普通の場合は偏向板に3kV位加えれば十分である。

〔VI〕 結 言

以上の如く回転機の衝撃電圧試験に於て最も困難とされているコイル巻回間絶縁破壊の検出法として、電圧平衡法について実験的に検出能力を確めた。その結果殆ど大抵の回転機について全巻線にわたる層間短絡の検出が可能であることを明らかにし得た。

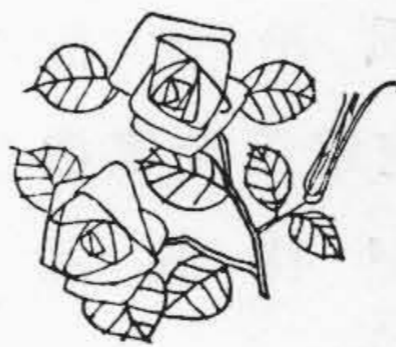
本法は発電機の衝撃電圧試験のみならず、小型回転機の層間絶縁試験に今後大いに活用される予定である。

擧筆するに当り一部の試験は電力技術研究所主催回転機衝撃電圧試験調査委員会委員各位、並びに関西電力株式会社関係各位の御指導並びに御援助をいただいたものでここに深く御礼申し上げる次第である。

尚御指導下された日立製作所日立研究所三浦倫義博士、牧元主任研究員、実験に協力された田原孝、赤津芳、熊坂正、電検課忠末裕治の4氏に深謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 日本特許 190796 及び 189736
- (2) 井上: 電気3学会 26 連大 4 16 (昭 27-5)
- (3) 井上: 電気3学会東支連大 4 18 (昭 27-10)
- (4) G.L. Moses, Earl F. Harter: T.A.I.E.E. 64 499 (1945-7)  
M.C. Halleck: G.E.R. 20 (1948-10)  
D.J. Reynolds 他: W.H. Eng. 112 (1951-7)  
F.H. Catlin 他: E.E. 591 (1951-7)  
その他
- (5) 大槻、原田、上之園: 電気3学会 26 連大 6 16 (昭 27-5)
- (6) 日本特許 164798, 168699, 実新 340256
- (7) 三浦、二宮: 日立評論 27 25 (昭 19-1)



# 特 許 月 報

## 最近登録された日立製作所の特許及び実用新案

(其の1)

区 別	登録番号	名 称	工場別	氏 名	登録年月日
特 許	197358	昼 光 色 螢 光 体	中央研究所	伴 野 正 美 江 本 正 正 角 野 正 正 青 木 米 米 神 津 興 興	27. 12. 17
"	197359	レ ン ト ゲ ン 操 作 用 計 算 器	亀戸工場	稲 木 利 市	"
"	197360	エ キ サ イ ト ロ ン 型 整 流 器	日立工場	木 村 鐘 治	"
"	197361	主クラブゲーターと補クラブゲーター とを有する起重機	亀有工場	平 栗 保 平	"
"	197362	ガ ス 圧 縮 機 の 調 整 装 置	川崎工場	緒 方 剛	"
"	197363	機 関 起 動 装 置	多賀工場	飯 島 登	"
"	197364	機関起動用ピニオン移送装置	日立工場	田 中 貞之助	"
特 許	197365	交 流 巻 上 機 の 速 度 制 御 方 式	亀有工場	秋 田 六 郎 保 延 誠	27. 12. 17
実用新案	398661	交 流 電 動 機 速 度 制 御 装 置	日立工場	泉 千 吉 郎 平 川 克 巳	27. 12. 18
"	398662	交 流 発 電 機 自 動 電 圧 調 整 装 置	日立工場	今 尾 隆	"
"	398663	警 報 器 付 指 示 装 置	亀有工場	大 西 昇	"
"	398664	制 御 器	日立工場	豊 田 隆太郎	"
"	398665	タワ-エキスカベータ操作装置	日立工場	泉 千 吉 郎 平 川 克 巳 西 一 郎	"
"	398666	ホ イ ス ト と ケ ー ジ と の 取 付 装 置	多賀工場	加 茂 谷 春 一	"
"	398667	揚 水 式 発 電 所 運 転 制 御 装 置	日立工場	鯨 沢 秀 夫	"
"	398668	電 動 機 制 動 装 置	日立工場	西 一 郎	"
"	398669	電 磁 開 閉 器 の 消 弧 装 置	亀戸工場	松 井 茂 彦 千 原 錦 吾	"
"	398670	帯 鋼 端 面 剪 断 機 用 カ ッ タ ー ス タ ン ド	笠戸工場	浜 原 一	"
"	398671	回 転 変 流 機 安 全 起 動 装 置	日立工場	梅 沢 信 義	"
"	398672	風 冷 単 極 整 流 器 セ ッ ト	日立工場	緑 川 勝 弥	"
"	398673	単 極 水 銀 整 流 器 風 冷 装 置	日立工場	桑 島 千 秋	"
"	398674	水 銀 整 流 器 風 冷 装 置	日立工場	緑 川 勝 弥	"
"	398675	カ ー ボ ン パ イ ル 付 定 電 圧 発 電 機	多賀工場	古 川 繁 治	"
"	398676	エ レ ベ ー タ 扉 把 持 装 置	多賀工場	神 峰 次 郎	"
"	398677	エ レ ベ ー タ 用 イ ン デ ケ ー タ ー	日立工場	山 本 一	"
"	398678	エ レ ベ ー タ 用 イ ン デ ケ ー タ ー	日立工場	山 本 一	"
"	398679	印 刷 機 に 於 ける 印 刷 紙 の 汚 染 防 止 装 置	川崎工場	大 野 光 寿	"
実用新案	398680	テ ン シ ョ ン ロ ー ラ 真 空 除 塵 装 置	川崎工場	森 久 雄	27. 12. 18