

真空負荷開閉器の開発

Development of Vacuum Load-interrupter

高橋 功* 和田 昭*
Isao Takahashi Akira Wada

要 旨

真空負荷用開閉器の一般的性能のほか、実用上、問題となる励磁電流遮断時における異常電圧の発生とその抑制について述べ、終わりに今回、電気炉の電源開閉用に試作して、好調に使用されている定格 12 kV 600 A の真空負荷開閉器の実例を、納入先で行なった三相励磁電流遮断時の異常電圧測定結果とともに紹介している。

1. 緒 言

最近、数年間の研究がようやく実を結び定格 12 kV 600 A の真空負荷開閉器の開発に成功した。これは日立製作所の真空負荷開閉器の実用化第 1 号であって、負荷変動のきわめて激しい電気炉の電源開閉用として従来の空気遮断器に代わって毎日約 100 回にも及ぶ回数の開閉操作に耐え、開閉操作回数は営業運転にはいつてから 1966 年 1 月末現在まですでに 3 万回をこえている。日立製作所の真空開閉器の研究は 1960 年に開始され、最初に真空ポンプ付バルブで、各種電極材料と絶縁耐力および遮断性能の検討試験、続いて日立製作所茂原工場の協力を得て、12 kV 200 A 真空負荷開閉器用封切バルブを製作し、ほぼ満足すべき結果を得た。さらに 1962 年 3 月には、36 kV 用負荷開閉器の真空バルブを製作し、各相 1 個のバルブで実用化し得る見通しを得た。その後電力用遮断器開発のための大電流遮断に主力を注ぎ、研究所および関係工場の協力態勢をいっそう強化した。一方真空負荷開閉器の研究は十分実用化できる段階にまで進み、主として、真空バルブの実用上の問題点を短期間には握るために、遮断操作がきわめてひん繁で、実用的な意味において負荷開閉器にとって、最も過酷な使用状態の一つである電気炉電源用開閉器として使用しその実績をみることになり、定格 12 kV 600 A の真空負荷開閉器を製作、1964 年 11 月現地に納入して、ただちに営業運転にはいった。

以下に真空負荷開閉器の原理と特質について簡単に述べた後、その一般的な性能にふれ、真空負荷開閉器の実用上問題となる励磁電流遮断について、現地試験結果とともに説明し、最後に電気炉用真空負荷開閉器の実例を紹介する。

2. 真空負荷開閉器の原理と特質

2.1 原 理

真空負荷開閉器とは、高真空中における電子の平均自由行程が、電極間距離にくらべて、はるかに大きいので、電極間で、気体分子との衝突がまったく起らないため、絶縁耐力が高く、さらに電流遮断後の金属イオンや電子の拡散速度がきわめて大きく、極間から急速に遠ざかって行くために、電流遮断後の絶縁回復が速いことを、高電圧回路の電流遮断に応用したものである。

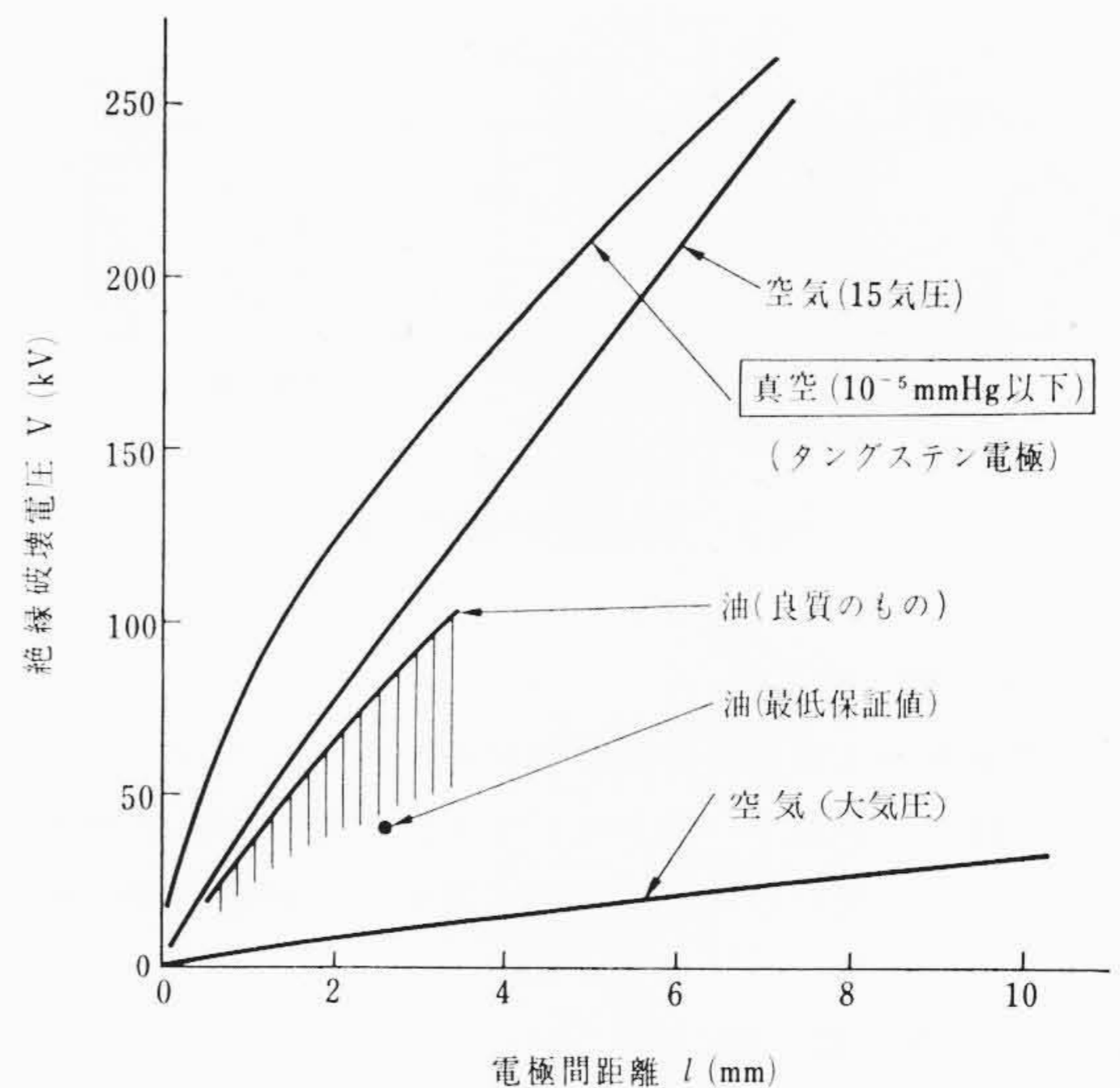
2.2 特 質

真空負荷開閉器の特質を列挙すると、次のようになる。

(a) 長 所

- (i) 短いギャップ長で、高電圧に耐える。
- (ii) 再起電圧周波数の高い回路に適用できる。
- (iii) アークを密閉バルブ内で消弧させるので安全で騒音も小さい。
- (iv) 温度上昇による接触部の酸化がなく、また金属に有害な

* 日立製作所日立研究所



(電極は球形、平等電界の場合、電圧は直流)

図 1 消弧媒質の絶縁耐力

ふん囲気中でも使用できる。

(v) 小形軽量にできるので同期遮断に適用しやすい。

(vi) 長寿命である。

(b) 短 所

(i) さい断現象があるため無負荷変圧器の励磁電流遮断の際には、適当な方法で異常電圧を抑制する必要がある。

(ii) 電極材料には高純度の金属が要求される。

(iii) 現在のところ大電流遮断が困難である。

3. 性 能

3.1 絶 縁 耐 力

高真空中の絶縁耐力はきわめて高く、短いギャップ長で高い電圧に耐えることができる。図 1 は油中および圧縮空気中の絶縁耐力との比較を示す。真空中では電極材料によっても異なるがタングステンを電極とした平等電界の場合ギャップ長 2 mm の放電電圧は 125 kV で、これを 15 気圧の圧縮空気中の場合に比較すると、約 1.6 倍である。

3.2 電 流 遮 断 性 能

3.2.1 励 磁 電 流

真空アークには、さい断現象があるので、無負荷変圧器の励磁電流遮断の際には異常電圧が発生するが、前に述べたように、真空中では電流遮断後の絶縁回復特性が早く、かつ耐圧も大きいので、発生した異常電圧は放電することなく極間にあらわれ、機器の絶縁をおびやかすので危険である。この異常電圧の発生とその抑制については後に詳しく述べる。

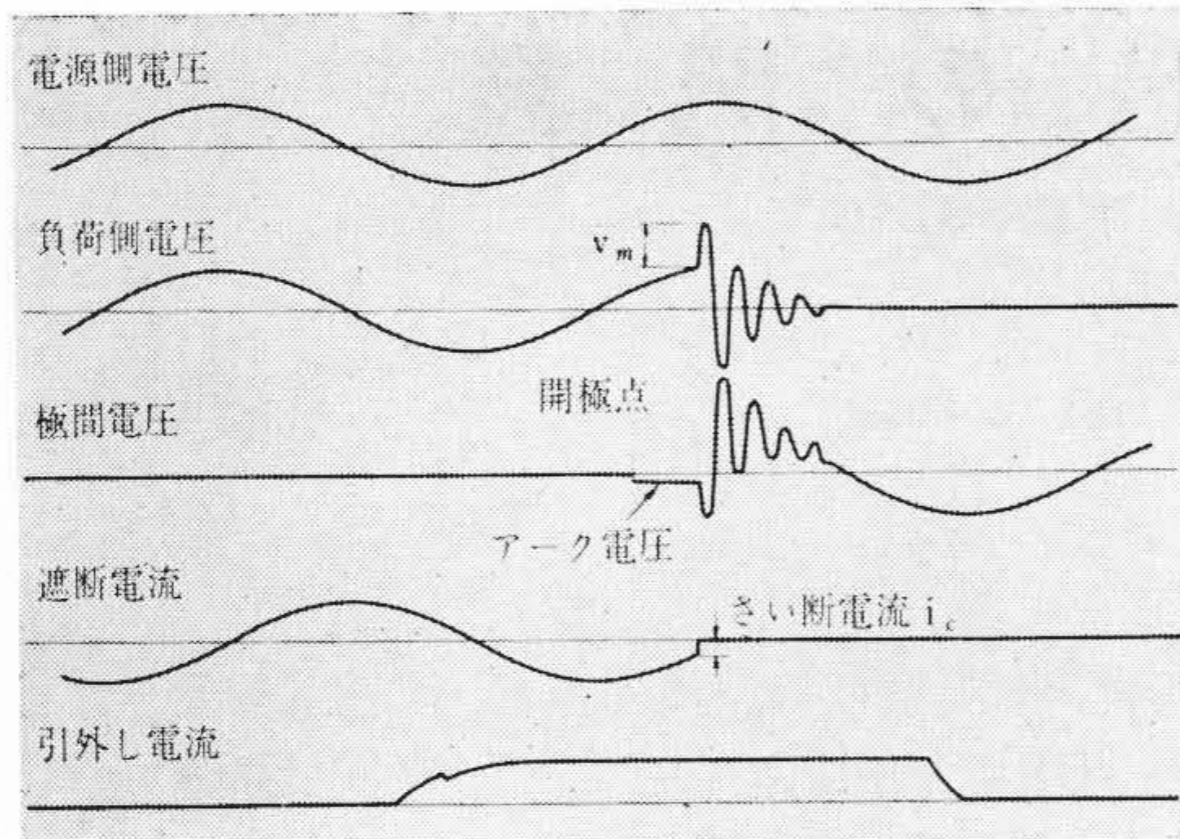


図 2 励磁電流オシログラム模写

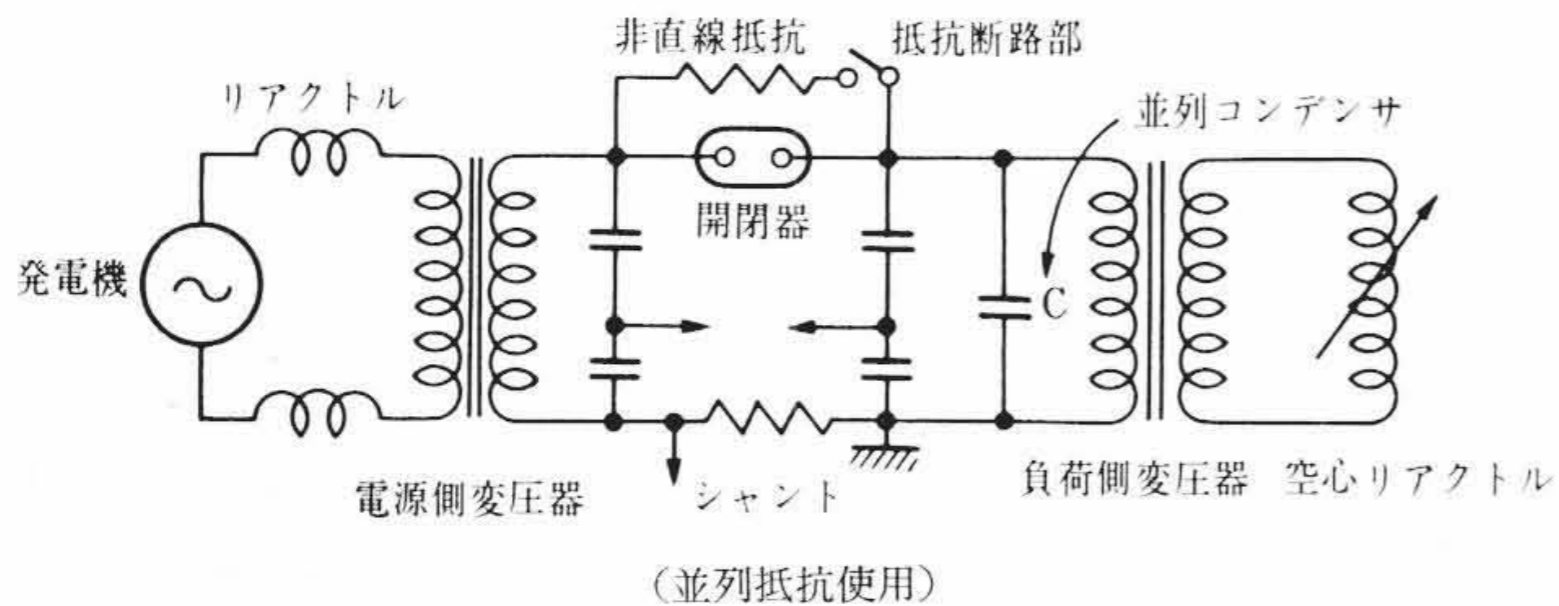


図 3 異常電圧測定回路

3.2.2 充電電流

充電電流遮断は真空負荷開閉器の最も得意とするところである⁽¹⁾。回路上、電流さい断を生じて異常電圧を発生せず、極間電圧の上昇率も低いので遮断可能の限界は、短絡電流の場合と同等以上と推定される。

3.2.3 負荷電流

負荷電流の遮断では通常の力率 0.7 の遮断を行なうかわりに、試験能率を上げるため充電したコンデンサを適当なインダクタンスを通して放電し、実際よりも過酷な力率 0.1 以下の振動電流を遮断する方法をとった。ステンレスや特殊銅合金を含む各種の電極材料について定格電流の数倍に相当する 1,500 A 以下の電流遮断を多数回行なって、性能が変化しないことを確かめた。また真空コンタクタの開発に関連して交流 1,000 A の投入 200 A 遮断を 28 万回以上行なった例がある。

真空コンタクタについては稿を改めて報告する予定である。

3.2.4 短絡電流

簡単な突合せ構造の電極の場合には、電極を大きくすると、遮断可能限界も上昇する傾向があるが、いろいろ構造を吟味しても、20 kA 以上の遮断は、今のところ困難である。しかし試験電圧を上げるとは比較的簡単で、たとえば、後に述べる電気炉用に試作した真空バルブについていえば、単相 10.5 kV 8,400 A をアーク時間 1 秒以内で遮断、参考として行なった単相 24 kV の試験では、4,600 A 以上を同じアーク時間以内で遮断できた。

3.3 消耗

真空中で直流約 100 A のアークを点じた場合、陰極の消耗は意外に少なく、たとえば材質が純銅の場合には 0.14 mg/A・s⁽²⁾ であるが、大電流遮断で磁気駆動を加味した場合、全消耗率は 0.28 mg/A・s⁽³⁾ 程度である。純銅より消耗の少ない銅合金の場合には、今までの現地試験の結果を考え合わせると、たとえば三相約 600 A、50,000 回の遮断でも電極直径が 30φ では全消耗量が 1 mm 程度と推定されるが、この点に関しては真空バルブの使用経験を積むことにより、寿命の限界を確認したいと考えている。

3.4 真空度の変化

十分に gas-free な金属を電極に使用すると負荷電流遮断時のアークによって溶融飛散した金属のスパッタ作用のために、電流の遮

断を繰り返すと真空度は、むしろ良好になることが多い。たとえば、遮断試験前の真空度が $P=6 \times 10^{-5}$ mmHg であったステンレス電極の真空バルブが、試験後 $P=3 \times 10^{-5}$ mmHg に変化していた例がある。したがって電気炉用真空バルブのように毎日多数回の遮断動作を行なうものは、真空度の点からは都合が良い。バルブの真空度が 10^{-4} mmHg より悪くなると、絶縁耐力が低下する。

3.5 温度上昇

真空中では金属の酸化がまったく起こらないため、電流を多数回遮断後のバルブにおいても、電接面における通電が比較的良好でバルブと、リードワイヤの接続部における温度上昇を規定値以下におさえることは、特に定格電流の大きいものをのぞき、比較的容易である。

3.6 投入容量

12 kV 以下の試験結果では電流波高値 40 kA 以上を異常なく投入できる電極材料もあるが、純銅はこれの約 30% である。溶着によって開極不能におちいることを防ぐには、電極材料を選択するほかに、接触力を強くし、操作部にワイプをもうけて軽い溶着を生じても衝撃力を利用して引きはなす構造とすることが有利である。

4. 励磁電流遮断性能

無負荷変圧器の励磁電流遮断の場合、自然零値をまたずアーク電流が突然零になる(さい断)現象があるため回路のインダクタンスに異常電圧を発生し、これを抑制しなければ電力機器の絶縁をおびやかすので危険である。

4.1 異常電圧とその抑制

負荷側変圧器に発生する異常電圧 v_1 は近似的に(1)式で与えられる。

$$v_1 = b_1 v_0 = \eta \sqrt{v_0^2 + \frac{L}{C} \cdot i_c^2} \approx \eta \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot i_c \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、 b_1 : 相電圧波高値に対する倍数
- v_0 : 電源電圧波高値 (V)
- i_c : さい断電流 (A)
- L : 負荷側インダクタンス (H)
- C : 負荷側並列静電容量 (F)
- η : 損失係数 ($0 < \eta < 1$)

すなわち、 i_c と L が小さく C が大きいほど、異常電圧は小さくなる。図 2 は励磁電流遮断時のさい断現象説明図である。

非直線抵抗の特性は(2)式であらわされる。

$$v = Ki^{1/4} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 v : 電圧瞬時値 (V)
- i : 電流瞬時値 (A)
- K : 定数

従来の空気遮断器と同様にこの抵抗を図 3 に示すように真空バルブと並列に使用して、異常電圧を効果的に抑制できる。電流さい断の瞬間に負荷側回路の持っているエネルギーから、さい断発生後異常電圧波高値に達するまでの時間に、非直線抵抗で失われるエネルギーを計算することにより抑制後の倍数 b_2 は、近似的で(3)式で示される。

$$b_2 = \frac{v_0 + v_m}{v_0} = 1 + \frac{\eta}{v_0} \left(\frac{15\pi}{8} \cdot f_0 \cdot K^4 \cdot L \cdot i_c^2 \right)^{1/4} \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、 v_m : (非直線抵抗がある時の異常電圧波高値) - v_0
- f_0 : 再起電圧周波数

4.2 試験結果

4.2.1 所内試験

(a) 異常電圧を抑制しない場合

実験所内の試験では励磁電流の調節は負荷側変圧器の二次側

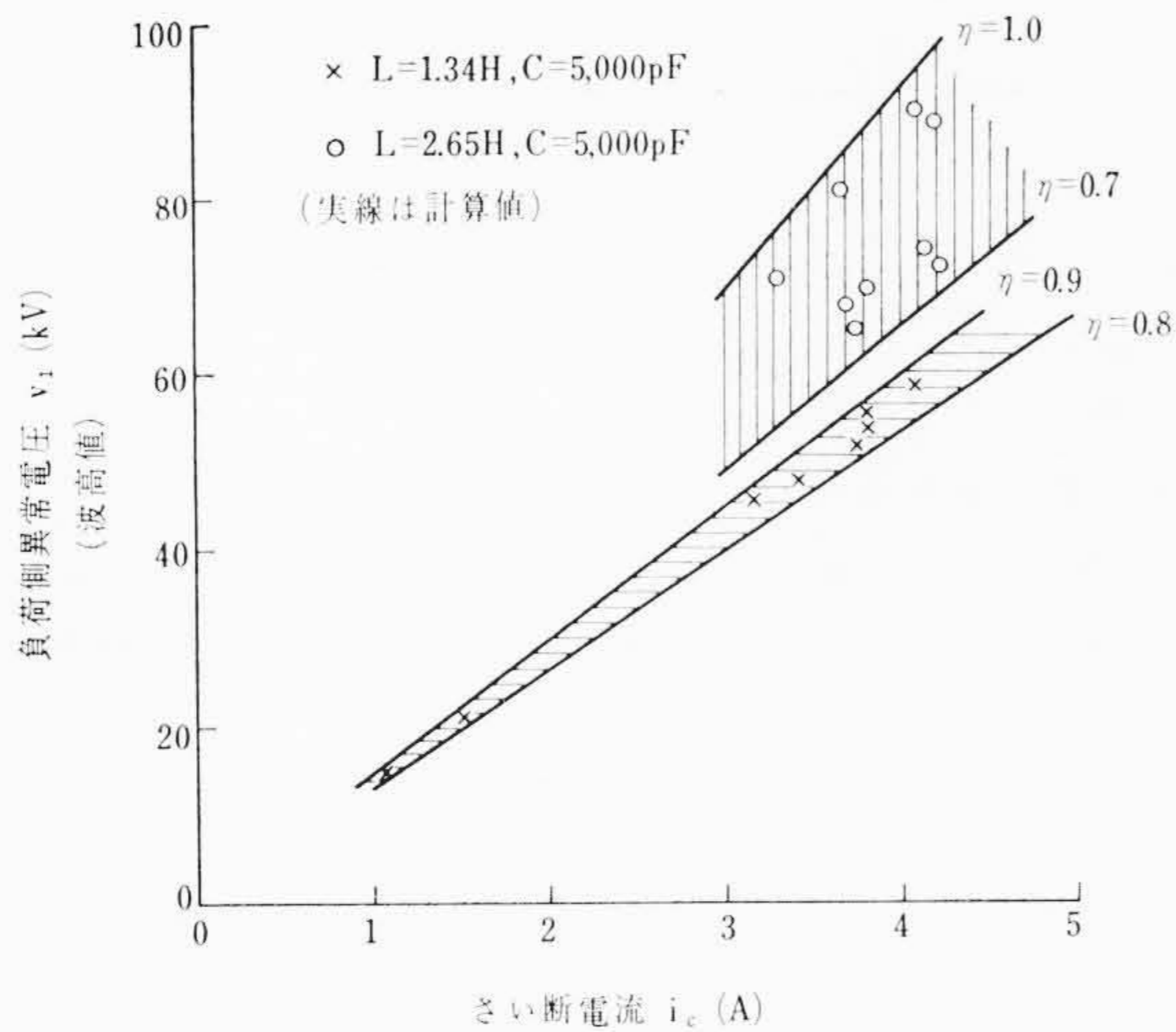


図4 さい断電流と異常電圧

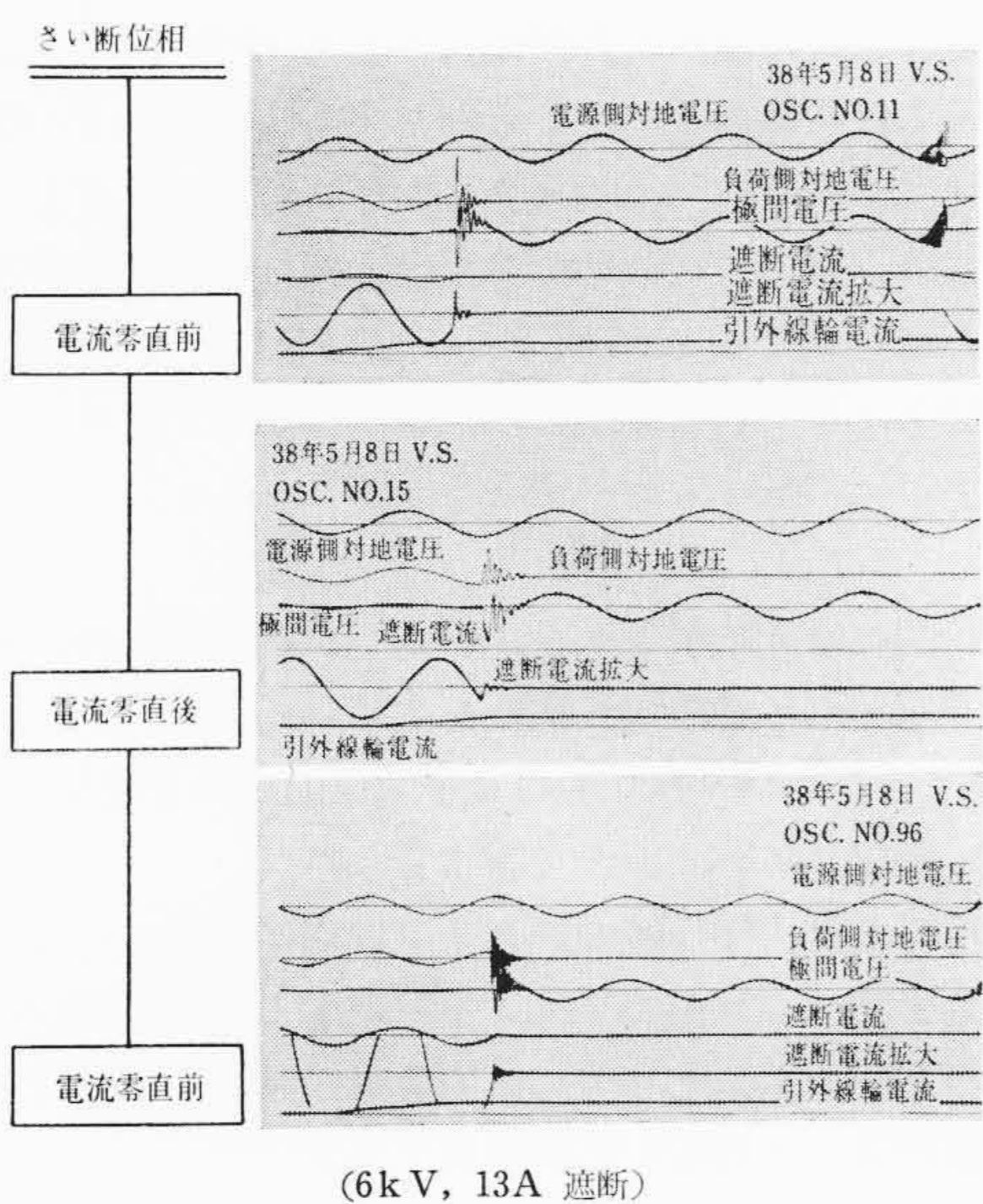


図5 さい断の位相と異常電圧波形

に入れた空心リアクトルの調節によった。抑制しない場合の異常電圧の一例を図4に示した。図5は、発生した異常電圧の代表的なオシログラムである。その波形をみると、電流の自然零値直前でさい断すると負荷側の異常電圧が、商用周波と同じ極性で、零値直後にさい断すると、発生する異常電圧の極性が反対となる。

(b) 異常電圧を抑制した場合

電流の調節に空心リアクトルを使用すると、実際の変圧器にくらべ、損失が少ないので、負荷開閉器が非直線抵抗を持っていても、励磁電流遮断の際に発生する異常電圧は実回路遮断の場合にくらべいくぶん高いのが普通である。この実際の励磁回路の損失分は、インダクタンスと並列の直線性抵抗で、近似的に置きかえることができ、この場合再起電圧周波数がだいたい0.5~1kc程度で、電源周波数よりもかなり高いために、鉄心のヒステリシスによる損失は考える必要がなく、渦流損失のみによって、抵抗値が決定される⁽⁴⁾。

このような考え方で後に述べる実際の励磁電流現地試験回路に最も近いと思われる単相等価回路で行なった試験結果の例を図6に示す。遮断電流8~16Aの場合に異常電圧が最も高く、遮断電流がこれより小さくとも、大きくても、異常電圧倍率は小さくなる。遮断電流が、この範囲より大きくなると、回路の

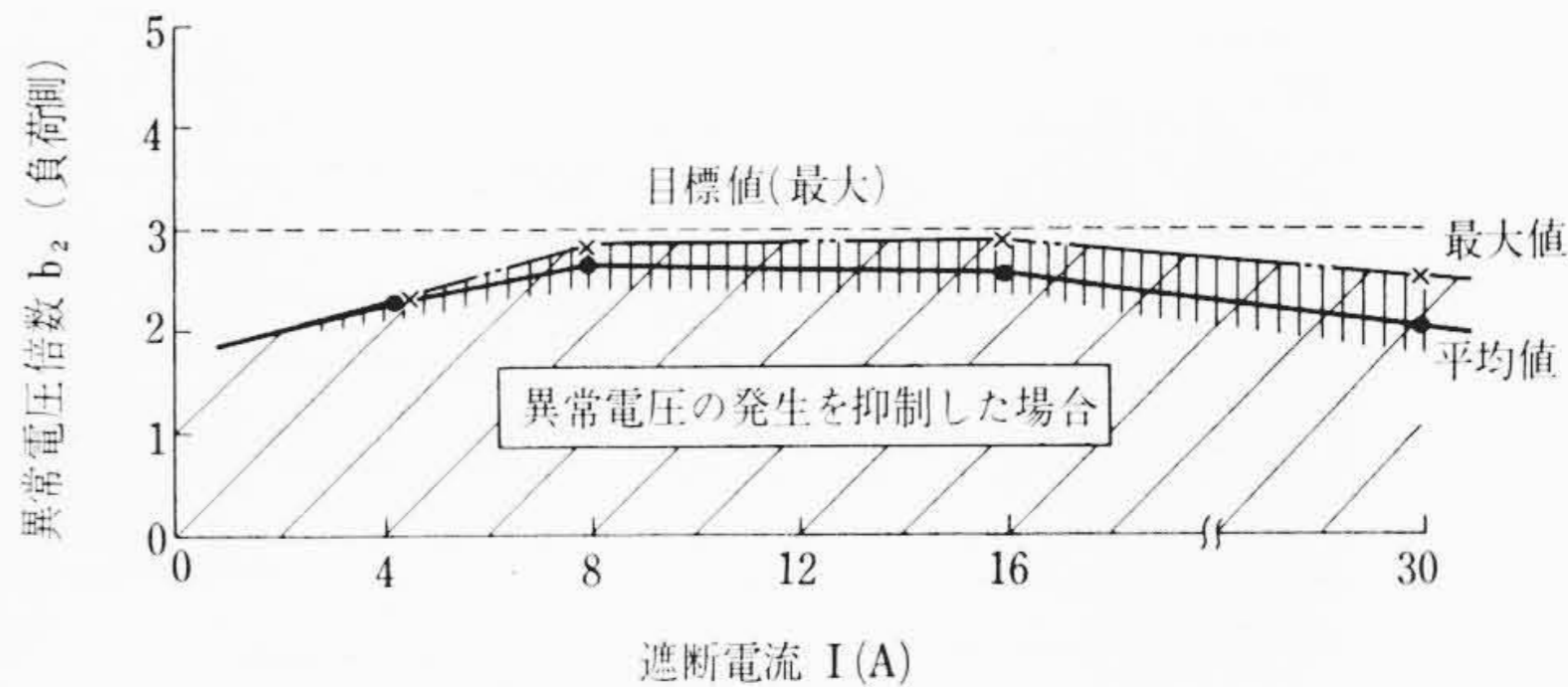


図6 励磁電流遮断時の異常電圧倍率

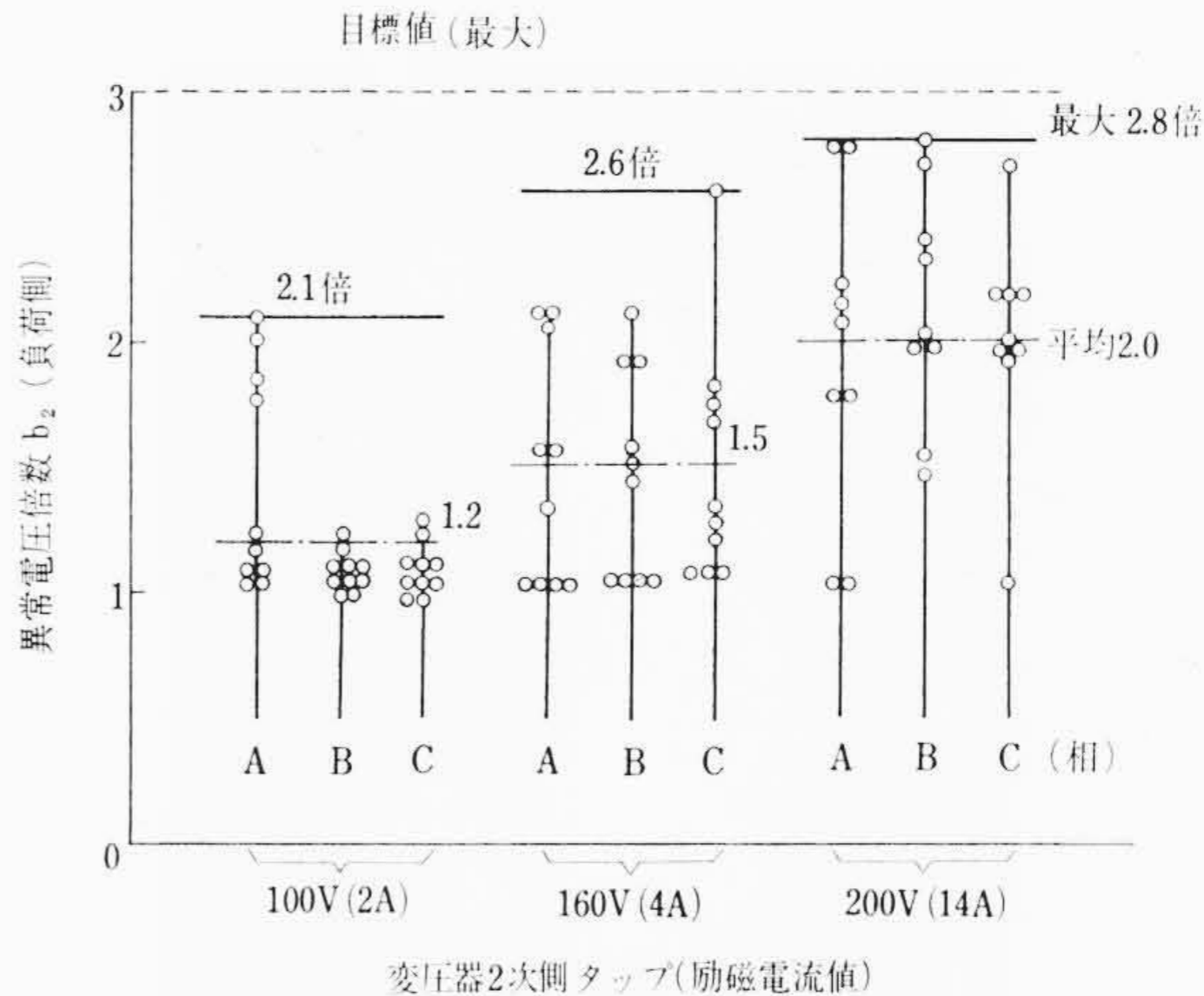


図7 現地試験における異常電圧

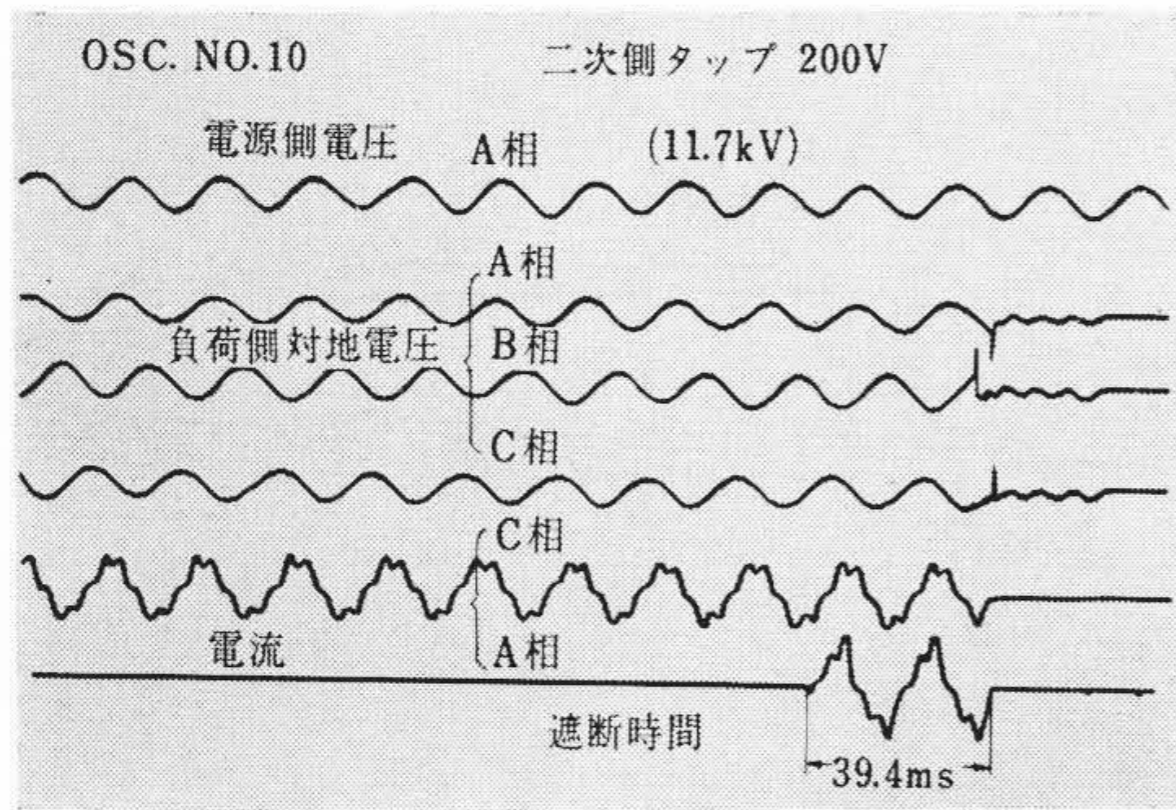
インダクタンスが小さいわけで(1)式から明らかであり、一方遮断電流が、極端に小さくなると、発生するさい断電流波高値も小さくならざるを得ないこと、および回路のインダクタンスが大きいので再起電圧周波数が低くなり、電流遮断後、再起電圧波高値に達するまでの時間が長いので、抵抗で熱として失われるエネルギーが増加するためである。

コンデンサバンクや、定常状態のモータ回路の開閉など、さい断現象によって異常電圧の発生しない回路のほか、以上述べたように、適当な特性の非直線性抵抗を使用することにより、電力機器にとって有害な異常電圧を、相電圧波高値の3倍以下に抑制し一般的な回路に真空スイッチを安全に使用することができる。

4.2.2 現地試験

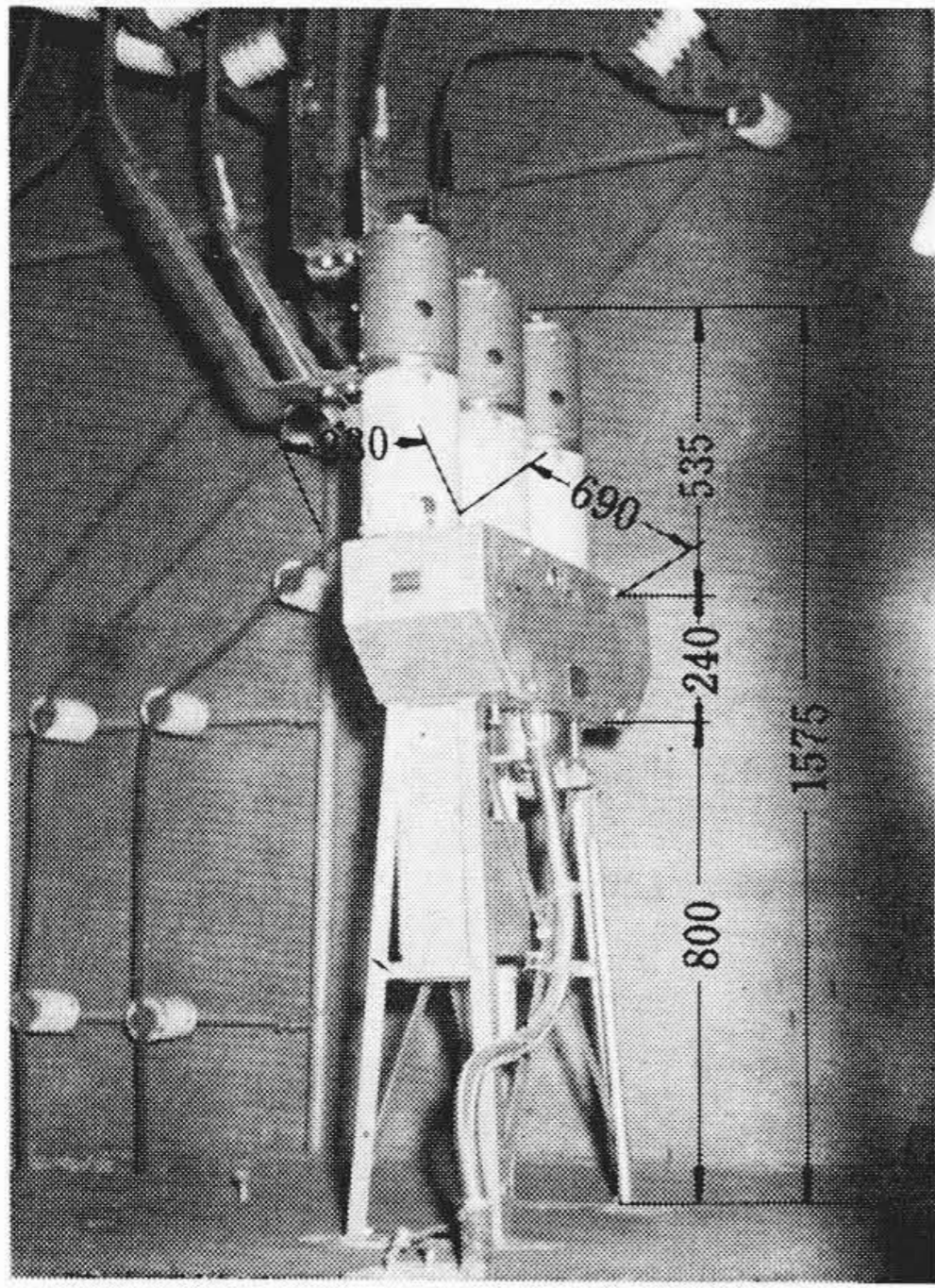
4.2.1で述べた励磁電流遮断は単相試験であり、また遮断電流を調節するために空心リアクトルを使用しているの、実回路に近い損失を生ずる直線抵抗を使用し補正してはいるが、三相回路との等価性の検討もかねて、励磁電流の現地試験を行ない、遮断の際に発生する異常電圧を測定した。励磁電流は三相中二相のみ測定し、そのうち単相の電流波形は、遮断指令を与えるリレーの接点と同一動作を行なう他の接点を通して、ブラウン管へ送っているの、その電流波形のあらわれたときが、ちょうど、開閉器の引はずしコイル励磁開始の瞬間にほぼ一致し、励磁開始から、遮断完了までの時間つまり、遮断時間もわかるように工夫した。この試験に使われた電気炉用三相変圧器の定格は11kV/200V、4,500kVAであって、定格電流は236/12,990Aである。なお、励磁電流の投入時には、異常電圧がほとんど発生しなかった。

図7は、現地試験の結果であって励磁電流遮断時に、さい断現象のために発生した異常電圧を相電圧波高値に対する倍率として整理したものである。負荷側最大異常電圧倍率は図から明らかな



(最大の異常電圧が発生した場合遮断電流 14A)

図 8 励磁電流現地試験のオシログラム



(定格 12kV, 600A 電気炉用)

図 9 試作真空負荷開閉器の運転状況

ように、変圧器の二次側が 200V タップの場合にあらわれているが、最大でも 3 倍以下である。二次側電圧の低いタップになると、さい断電流が減少するため異常電圧が小さくなり、100V タップでは、最大でも 2.1 倍である。

異常電圧の発生ひん度についていえば、200V タップでは 2 倍程度の異常電圧が多く、160V, 100V タップでは、1.3~1.0 倍の低い異常電圧の発生が多数をしめている。図 8 は励磁電流の遮断現地試験の代表的オシログラムの一例である。図 6 と図 7 を比較

表 1 試作真空負荷開閉器の定格

項	目	定 格 値
定 格	電 圧 (kV)	12
定 格	電 流 (A)	600
絶 縁 圧 力 (kV)	AC 1 分 間	28 以上
	インパルス (1×40 μs)	75 以上
励磁電流遮断時の異常電圧倍数		3 以下
負 荷 電 流 遮 断 寿 命		50,000 回以上
短 絡 電 流 遮 断 寿 命		1,500A 20,000 回以上

すると、異常電圧が、だいたい同じ値に抑制されているので、4.2.1(b)で述べた単相回路の等価性は、かなり良好であるといふことができよう。

5. 定格 12 kV 600 A 真空負荷開閉器の実用化⁽⁵⁾

以上述べたような研究結果をもとに定格 12 kV 600 A の真空負荷開閉器を試作し、電気炉電源開閉用として 1964 年 11 月以来実用している。その定格は表 1 に示すとおりであって 4.2.2 の励磁電流の現地試験は、この試作品の納入先において行なわれたものである。この開閉器は据付以来、100 回/日程度の操作ひん度で使用され、操作回数 3 万回をこえる 1966 年 1 月末現在でもなお好調に使用されている。図 9 は真空負荷開閉器の運転状況を示すものである。

6. 結 言

最近数年間の研究結果をもとに、真空負荷開閉器の性能を、実用上重要と考えられる励磁電流遮断を主体に紹介し、あわせて、1964 年 11 月以来定格 12 kV 600 A の真空負荷開閉器を電気炉の電源開閉用として実用していることを報告した。

保守点検が容易、操作時の騒音や、性能劣化のないこと、小形軽量でしかも密閉バルブ内でアークを処理するため、安全なことなど、多ひん度用高圧開閉器として、真空負荷開閉器が最適で、今後あらゆる産業用に適用されるものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 和田, ほか: 昭 40 電気学会東京支部大会 No. 159 (昭 40)
- (2) J. D. Cobine, ほか: I. E. E. E. (Com. & Elect.) 82, 240 (May, 1963)
- (3) 菅原, ほか: 昭 40 電気学会東京支部大会 No. 160 (昭 40)
- (4) D. C. Damstra: CIGRE No. 120 (1964)
- (5) 高橋, ほか: 昭 40 電気学会東京支部大会 No. 158 (昭 40)