

# HI-VAC コンタクタによる現地試験結果

## Field Trials of the HI-VAC Contactor

石田真之助\* 上田敏信\*  
Shinnosuke Ishida Toshinobu Ueda

### 要 旨

日立製作所では1965年初頭に3.3 kV および6.6 kV 級の真空接触器“HI-VACコンタクタ”の実用化に成功し、これを世に送って以来早くも約3年を経過した。すでに現在、各種産業分野で種々の環境、使用条件のもとで多数が稼働しており、多くの現地試験結果が得られている。従来、真空式スイッチでは誘導性小電流遮断時に生ずる開閉サージが大きく、変圧器や巻線形電動機には適用不能とされていたが、HI-VACコンタクタはこれを克服し、過酷な負荷への適用も可能となった。多数の現地試験のうち、本稿では変圧器、電動機、コンデンサおよび電気炉に適用した場合の結果について報告する。

### 1. 緒 言

一般に真空式スイッチは、高真空内の高い絶縁耐力と強い拡散作用を消弧に利用したものであるが、その強い消弧力のために小電流域で交流自然零点移行を待たずに電流を切断する、いわゆる電流さい断現象がある。電流さい断が生ずると誘導負荷の場合は蓄積された磁気的エネルギーが巻線間キャパシタンスなどの並列キャパシタンスを介して電圧サージとなって現われる。このときの過電圧倍数は近似的に次式で表わされる<sup>(1)</sup>。

$$b = \frac{v}{v_0} \approx \eta \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{i_c}{v_0} \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、  $b$  : 常規電圧に対する電圧サージの倍数
- $v_0$  : 常規電圧波高値 (V)
- $v$  : 発生電圧波高値 (V)
- $\eta$  : 損失係数 ( $0 < \eta < 1$ )
- $\sqrt{L/C}$  : 負荷のサージインピーダンス ( $\Omega$ )
- $i_c$  : さい断電流値 (A)

(1)式からわかるように同一のスイッチでは、発生する電圧サージの最大値は一定であるから、たとえば3 kV 回路と6 kV 回路に同じものを使用する場合は、3 kV 回路で使用する場合のほうが、2倍過酷であるといえる。

また負荷回路のサージインピーダンス  $\sqrt{L/C}$  は、負荷のインダクタンスが大で並列等価キャパシタンスの小さいものほど大となるから、無負荷の変圧器などでは数千オーム( $\Omega$ )にもなる。このような負荷に対して電圧サージを低く押えるには、ほかの諸性能との調和ののりとしてさい断電流値を小さくしなければならない。ここに筆者らの多年の努力が集中され、過電圧のきわめて小さい真空式の接触器“HI-VACコンタクタ”の開発に成功したのである。

本稿では主として、適用負荷の種類に対する開閉過電圧測定<sup>(2)</sup>を主とする現地実負荷開閉試験の結果を紹介する。

### 2. 試験の内容と結果

#### 2.1 電動機を負荷とした場合

各種電動機のうち、最も一般に使用される誘導電動機に関していえば、かご形は巻線形に比較して過電圧は小で、問題とならない。各種容量についての多数回の試験においても常規電圧波高値の1.5倍を越える過電圧はほとんど発生しない。これは従来の開閉器で一般負荷を開閉する場合の過渡電圧と同等ないしはそれ以下の値である。この理由はかご形電動機のインダクタンスが巻線形電動機に比べてはるかに小さく、換言すればサージインピーダンスが小さいこ

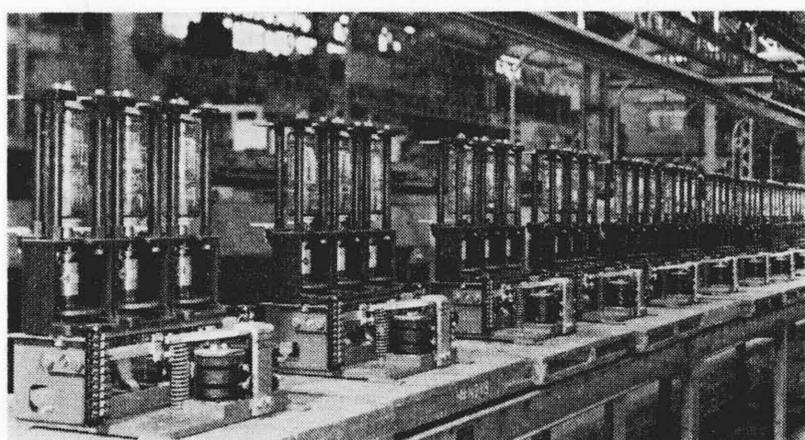


図1 量産中のHI-VACコンタクタ

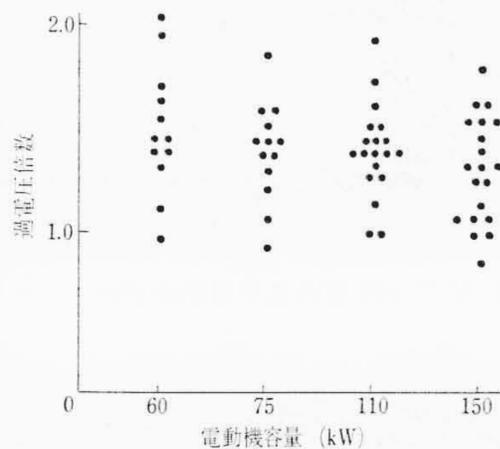


図2 電動機容量と過電圧

とによる。

容量について見ると、比較的小容量のものほど開閉過電圧の点からは過酷であるといえる。3 kV と6 kV については同一開閉器では3 kV 級のほうが条件として酷であるから、3 kV 級の小容量巻線形電動機が最も過酷な条件下にあるといえよう<sup>(1)</sup>。

図2は3 kV 無負荷巻線形誘導機における電動機容量と過電圧との関係を示すグラフである。

同一電動機をとっても、負荷の条件や二次回路の状態および負荷側ケーブルの長さなどによっても影響される。これは負荷側の等価リアクタンスおよび並列等価キャパシタンスの影響と考えられる。図3に3.3 kV 110 kW 3φ巻線形誘導電動機の負荷の状態を変えたときの電流遮断時の過電圧の状態を示す。

次にある鉱山において1966年初頭より、コンプレッサ用の三相誘導電動機の開閉制御に使用されているV. マグス内蔵のHI-VACコンタクタによる現地試験の結果を紹介する。測定回路は図4のとおりで、電動機定格は3.3 kV 50 c/s 100 HP (75 kW) である。

\* 日立製作所日立工場

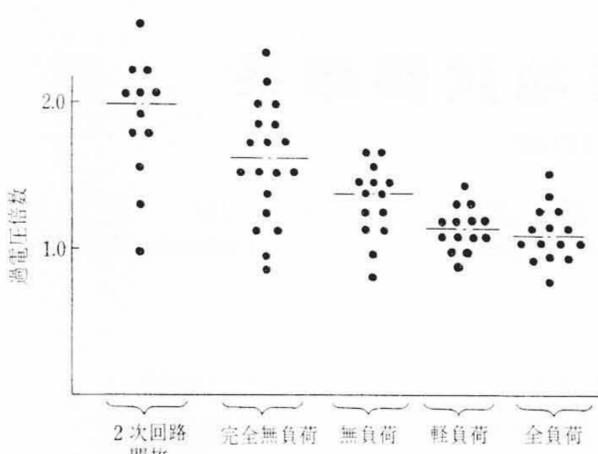
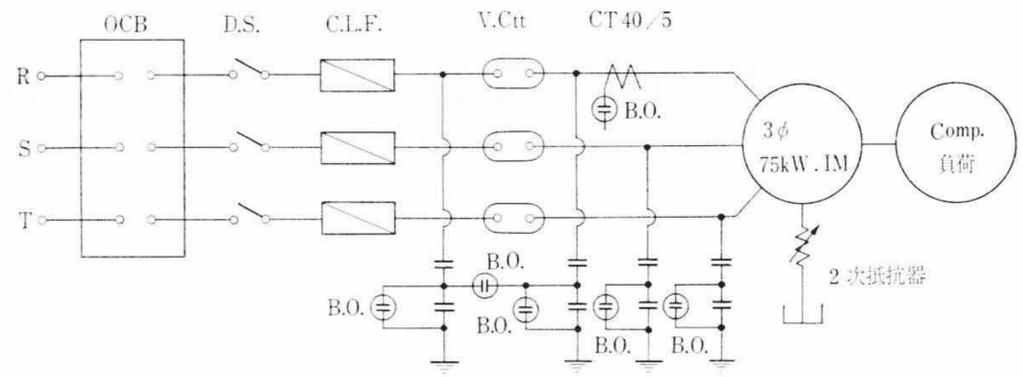


図3 負荷の状態と過電圧



B.O.: 高速度ブラウン管オシロスコープ

図4 測定回路

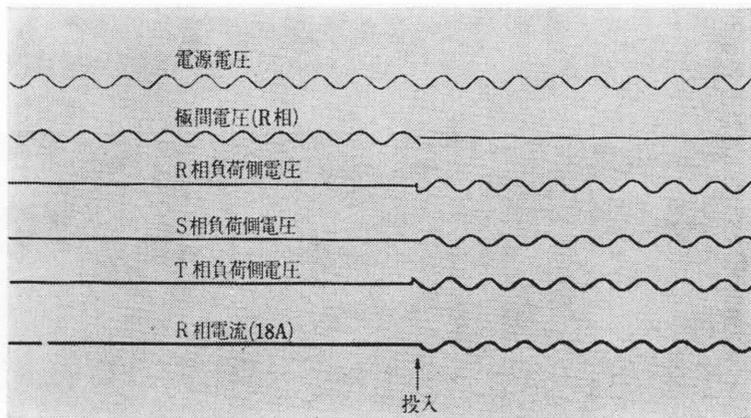
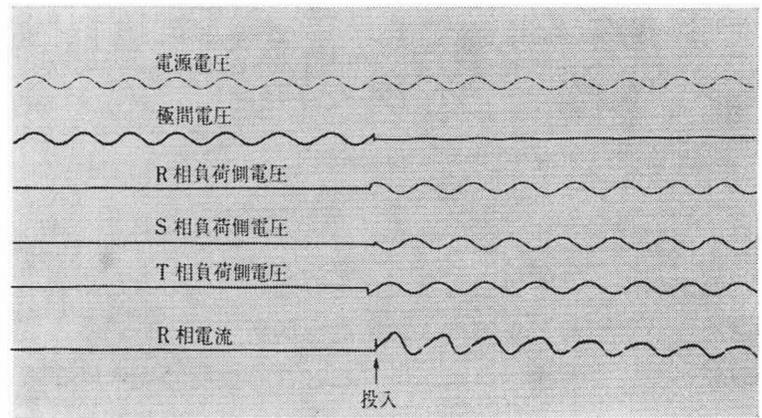


図5 3kV 75kW 定格負荷電動機投入オシログラム



(a) 投入

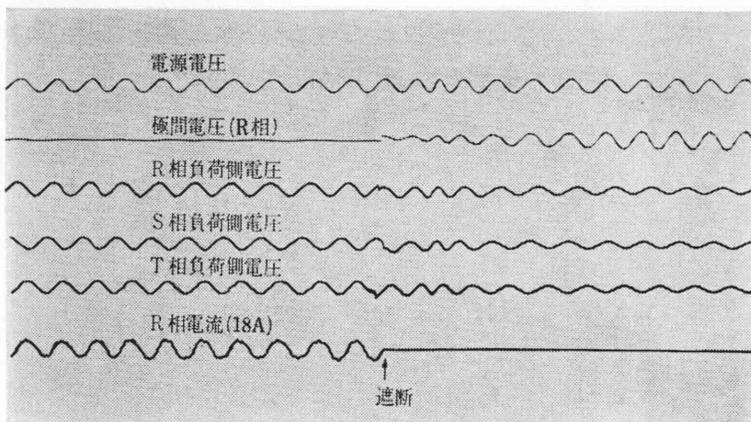
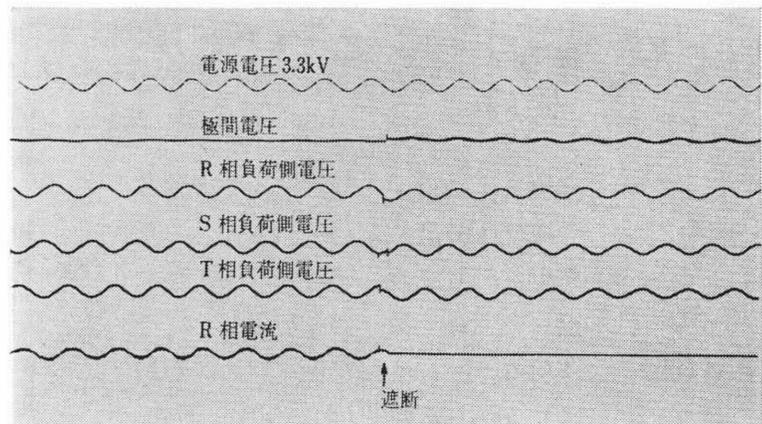


図6 3kV 75kW 定格負荷電動機遮断オシログラム



(b) 遮断(起動完了後)

図8 3kV 110kW 無負荷電動機開閉オシログラム

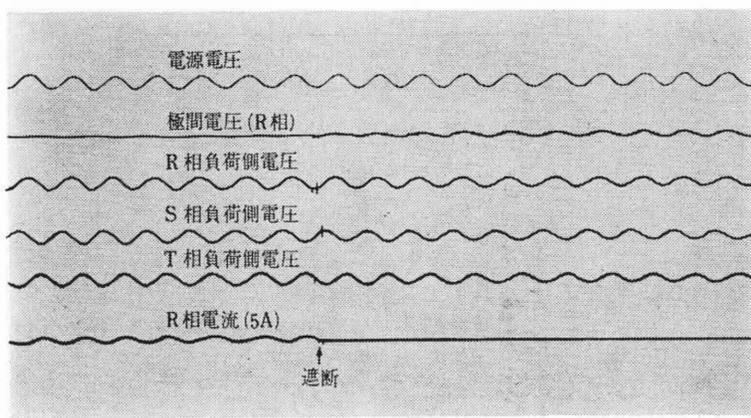
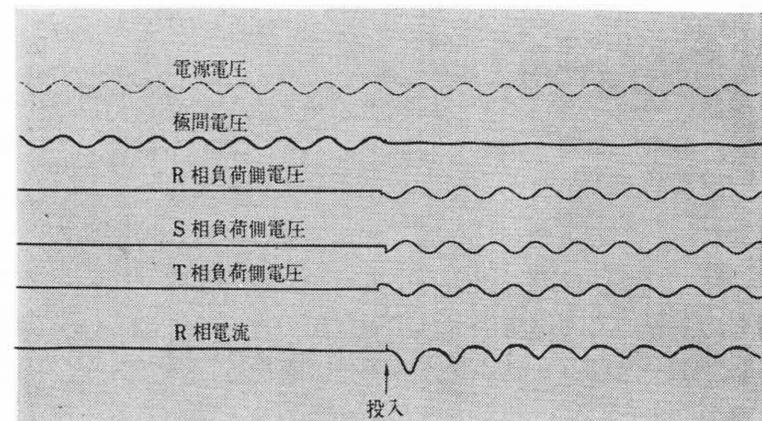
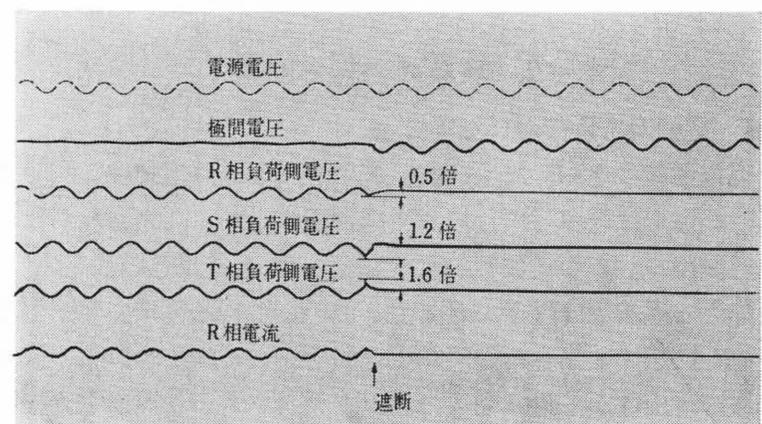


図7 3kV 75kW 無負荷電動機開閉オシログラム



(a) 投入



(b) 遮断(起動途中)

図9 3kV 110kW 無負荷電動機開閉オシログラム

起動投入時の状況を示すオシログラムを図5に、定格負荷状態の遮断オシログラムを図6に、また負荷の連結ベルトをはずし、完全無負荷とした場合の遮断オシログラムを図7に示す。

図5は本器の投入時のチャタリングが皆無であること、したがって異常過渡現象を全然生じないことを実証している。また図6および図7は本器のさい断電流値がきわめて小さく、5A~6Aの小電流においても電流の強制さい断はほとんど生じていないこと、また再点弧も生じていないこと、したがって過電圧の発生がきわめて小さいことを示している。

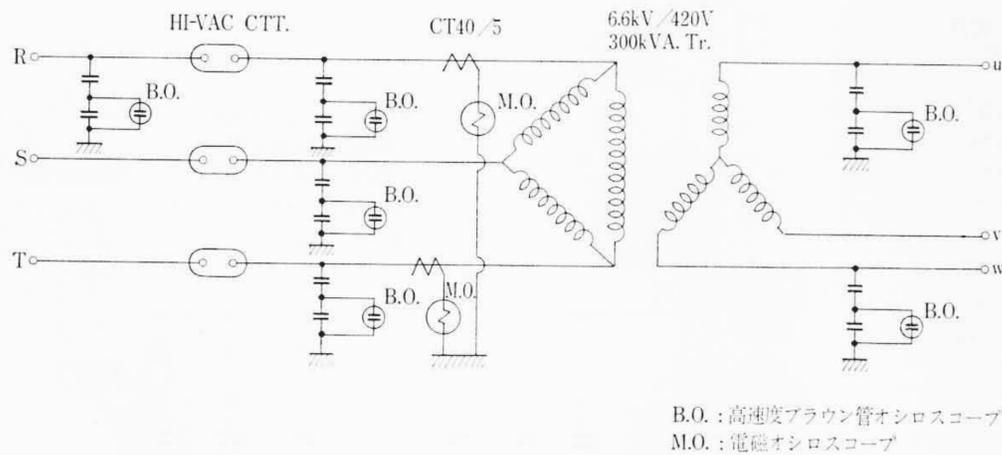
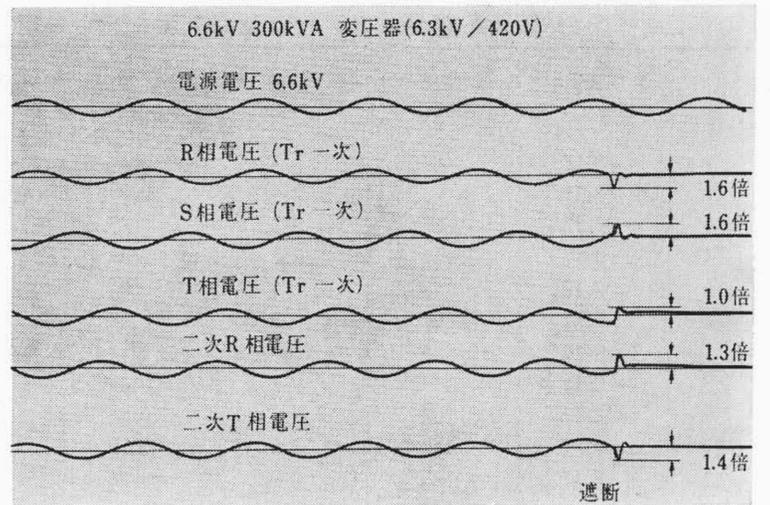


図10 変圧器開閉試験回路



(供試コンタクタ VGF<sub>30-3</sub>)

図11 無負荷定常状態変圧器遮断オシログラム

表1 試験条件と測定結果

No.	試験条件	試験電流波高値 (A)	測定過電圧数*	備考
1	無負荷定常状態	1.2	2.2倍以下	無負荷励磁電流を遮断
2	無負荷過渡状態	6.7	3.1倍以下	投入過渡電流を遮断
3	二次側: 50 kVA SC**	5.9	1倍以下	過電圧は皆無
4	二次側: 100 kVA SC	12.9	1倍以下	過電圧は皆無
5	二次側: 175 kW IM**	8.8	2.1倍以下	力率遅れ 0.55
6	二次側: 220 kW IM	13.2	2.0倍以下	力率遅れ 0.68
7	160 kW. IM+ 50 kVA SC	8.1	1.8倍以下	実使用状態
8	160 kW. IM+100 kVA SC	9.2	1.5倍以下	実使用状態

\* 相電圧波高値 ( $6.6 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 5.4 \text{ kV}$ ) に対する倍数

\*\* SCは力率改善用蓄電器, IMは誘導電動機を示す。

なお本試験の測定にはコンデンサ分圧法と高速度ブラウン管オシロスコープを採用したため、電圧の変化は鋭敏にキャッチされており、クリドグラフを用いる方法や電磁オシロスコープを用いる方法に比べ精度は高いと考えられる。

次にあるセメント工場において、吸塵風車用電動機の開閉制御に使用されている例を紹介する。

電動機: 3,000 V 150 HP (150 kW) 6極

三相巻線形誘導電動機, 無負荷

供試品: 3.3 kV 200 A VGF<sub>25-3</sub>

HI-VAC コンタクタ

試験回路: 図3に同じ

図8(a)は電動機回路投入時の、また(b)は無負荷電動機が起動完了した場合の(二次側起動抵抗短絡後の)遮断時のオシログラムである。

また図9(a)は上述の電動機を投入したときの、また(b)はその回路の起動途中における遮断の状況を示すオシログラムである。

いずれも、これらのオシログラムは、本器投入時の接点跳躍、チャタリングがなく、遮断時に電流さい断がないかきわめてわずかで、巻線形電動機の無負荷状態という過酷な条件下でも過電圧の発生はきわめて小であることを示している。

なお、投入時の接点跳躍は、溶着、異常消耗、異常過渡現象などの原因となるから避けなければならない。

## 2.2 変圧器を負荷とした場合

変圧器の一次回路を開閉した場合のさい断電流値および過電圧は変圧器負荷の種類や一次-二次結線法などにより影響を受ける。一般に小容量の変圧器の励磁電流の遮断が条件として最も過酷である。負荷に電動機またはリアクトルが接続された場合は条件が緩和される。電動機と力率改善用コンデンサが接続された場合には、過電圧はほとんど発生しなくなり、コンデンサのみが負荷された状態ではゼロとみなしてよい。これは負荷の状態によって、変圧器回路

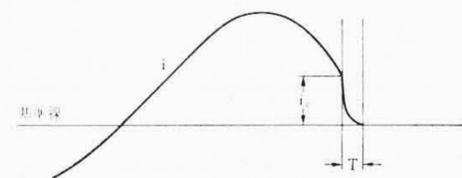


図12 電流波形

のサージインピーダンスが数十オームから数千オームにわたって変化するためと考えられる。

また変圧器の励磁電流は、電動機のそれに比較して定格電流に対する割合が小さいので定格電流が20A以下であるような場合には、その無負荷励磁電流が波高値で1~2Ap以下となり、さい断電流値の絶対値が小となるため、過電圧は小さくなることもある。このような場合にさらに厳密を期するには、投入時の突入電流波高値を遮断してみるとよい。

次に、1965年末より、ある化学工場の電源変圧器の開閉制御に使用されているHI-VACコンビネーションスタータ内蔵コンタクタの現地測定結果を紹介する。

図10はその測定回路を、表1は試験条件と測定結果を示したものである。

変圧器: 6.6 kV/420 V 300 kVA 三相内鉄形変圧器

供試品: HI-VAC コンビネーションスタータ内蔵 HI-VAC コンタクタ 6.6 kV 100 A VGF<sub>30-3</sub>

図11は、表1中のNo.1に相当する無負荷定常状態遮断時のオシログラムである。電流さい断による過電圧は負荷側にのみ表われるもので、電源側には決して生じない。これは電流さい断現象に基づく過電圧が、開閉器自身の特性と負荷側の回路条件のみによって決まることを示している。その波形は比較的急しゅんでパルス状であるが、その立上り時間は約0.5msで、インパルス標準波形の1×40μsに比べれば波頭長、波尾長とも数百倍以上ゆるやかである。これは電流さい断に際し、

$$i=i_c \text{ から } i=0$$

までの時間  $T$  がゼロでないこと、すなわち図12のような経緯をたどっているであろうことを類推させる。この傾向が強くなれば電流さい断は生じなくなる。図8および図9の電流波形には、さい断電流値を見出し得ない。接点材料およびストローク特性により、このような特性をもたせることが本器のねらいの一つであった。

以上のように、比較的小容量の変圧器において、負荷の状態ならびに試験条件を種々変えて行なった場合、測定された過電圧の大きさは、無負荷過渡状態、無負荷定常状態、誘導電動機のみを負荷した場合の順で小さくなり、電動機とコンデンサが組み合わされ負荷された状態(実使用状態)ではほとんど常規電圧の1.5倍以下であり、コンデンサのみを負荷した場合の過電圧は皆無(1倍)に等しい。この結果は(1)式から推定される結果とよく一致している。

表2 高周波コンデンサ遮断試験結果

No.	回路周波数 (kc/s)	遮断電流 (A)	アーク時間		回復電圧 (kV)
			(c/s)	(ms)	
1	3.17	54	0.5	0.16	0.57
2	3.17	72	0.4	0.12	0.60
3	3.17	87	0.8	0.25	0.60
4	3.17	117	0.3	0.09	1.27
5	3.17	125	1.0	0.32	1.13
6	3.17	127	0.5	0.16	1.00
7	3.17	145	0.9	0.28	1.41
8	3.17	149	0.8	0.25	1.41
9	3.17	153	0.9	0.28	1.70
10	3.17	159	0.6	0.19	1.83
11	3.17	163	0.9	0.28	1.63
12	3.17	163	1.0	0.32	1.77
13	3.17	167	1.0	0.32	1.69
14	3.17	170	0.6	0.20	1.77
15	3.17	182	0.9	0.28	2.05
16	3.17	182	1.1	0.35	1.91
17	3.17	192	1.1	0.35	2.12
18	3.17	200	0.6	0.19	2.26

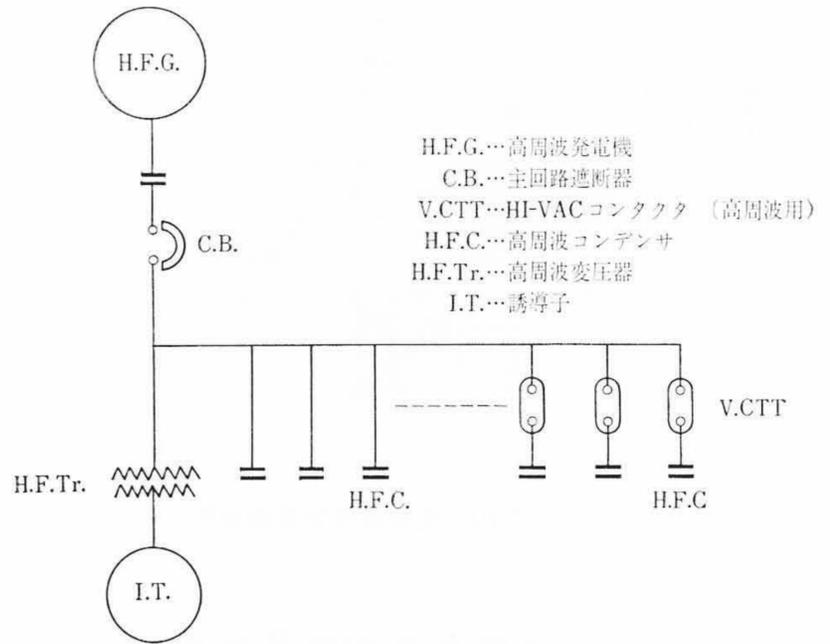


図13 高周波焼入装置回路図

2.3 力率改善用コンデンサを負荷とした場合

コンデンサ開閉はHI-VACコンタクタの最も得意とするところで、開閉過電圧の点からは全く問題がない。それは、もし電流さい断があってもサージインピーダンス  $\sqrt{L/C}$  がゼロに等しいため(1)式から明らかのように過電圧を発生しないこと、および真空の早い絶縁回復と高い絶縁耐力のために再点弧の発生がなく、累積異常電圧を生じないための2点による。むしろ、複数個の並列コンデンサが開閉される場合、順次投入の際の充電コンデンサと非充電コンデンサの短絡回路に基づく突入電流による接点溶着の成否を検討する必要がある。HI-VACコンタクタによるこの試験を実施した結果、定格電流の30倍の突入電流に対しても溶着を生じなかった。

商用周波コンデンサのサイクル適用については別稿で述べるので、次にある高周波焼入装置の高周波力率改善用コンデンサを負荷とした例について紹介する。

図13にその実使用回路の単線結線図を示す。

焼入装置誘導子の電圧は低いため、変圧器一次側で自動的に力率改善し、それに基づいて逐次自動的にHI-VACコンタクタが可変分コンデンサを開閉する。

HI-VACコンタクタを高周波コンデンサ開閉に使用する場合、上述した並列コンデンサの順次投入の際の突入電流のほかに、高周波という特殊性に基づいてさらに二つの点を特に考慮する必要がある。その一つは高周波電流遮断の遮断時間の問題であり、ほかの一つは高周波電流による鉄損および銅損の問題である。

周波数と遮断困難度との間には、一般に

$$V^\alpha \cdot I^\beta \cdot f^\gamma = K \dots\dots\dots(2)$$

- ここに、V: 遮断電圧 (V)
- I: 遮断電流 (A)
- f: 回路周波数 (c/s) ただし  $f > 50/60$
- $\alpha, \beta, \gamma$ : 遮断方法および構造によって決まる定数
- K: 定数

の関係があり、HI-VACコンタクタの場合はその最高使用電圧(7.2kV)以下で使用される場合は

$$\alpha \approx 0, \beta \approx 1, \gamma \approx 0.9$$

と見なし得る。すなわち(1)式は

$$I \cdot f^{0.9} = K \dots\dots\dots(3)$$

となる。 $\alpha \approx 0$ と見なし得ることおよび  $\gamma < 1$ の性質をもつことの2点は特殊な高真空中の消弧原理に起因するもので、HI-VACコンタ

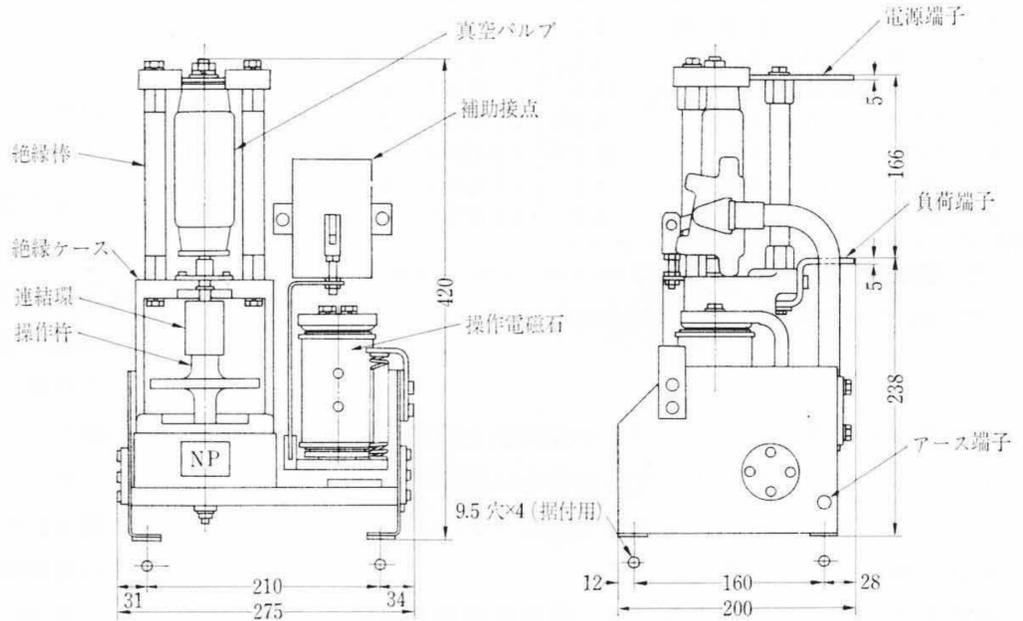


図14 高周波回路用 HI-VAC (VGF<sub>15</sub>-1) コンタクタ

クタの高周波電流遮断への利点を物語るものである。

表2に高周波電流遮断試験結果を示す。アーク時間は、周波数3kcのもとで電流を54~200Aまで変化せしめた場合でも、ほとんどが1c/s以下で、時間にして0.3msであり、商用周波交流の半サイクルと比較すると、アーク時間は約1/30である。

これは、高真空の急速な拡散と消弧を想起すれば容易に理解できる。また接点消耗量もほぼこの割合であり、電気的寿命を大きく延長させる。

なお、高周波電流に対しては、電流の表皮効果と、鉄損による温度上昇が問題となるが、この問題を詳しく本稿で論ずることは主旨に反するので割愛し、独自の構造と方法によってこれを解決していることのみを付記する(特許, 新案数件出願中)。

図14は高周波回路用HI-VACコンタクタのVGF<sub>15</sub>-1構造を示したものである。

2.4 低周波誘導炉へ適用した場合

交番磁界内に良導体たとえば金属を置くと、電磁誘導作用によりこれに渦電流が流れ、渦電流損を生ずる。さらに被熱体が磁性体の場合には、ヒステリシス損がこれに加わり導体は発熱する。この誘導加熱方式により金属を加熱溶解する電気炉を誘導炉といい、商用周波を使用するものを低周波誘導炉、商用周波数以上の場合には中間周波または高周波誘導炉と呼ばれる。

一般に十分長い円柱状導体が軸方向に一様な交番磁界中におかれたとき、導体表面からxの距離にある部分の電流密度iは

$$|i| = |i_0| \exp(-x/\delta) \dots\dots\dots(4)$$

$$\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu_r\mu_0} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $i_0$ : 導体表面の電流密度  
 $\rho$ : 導体の抵抗率  
 $\omega$ :  $2\pi f$   
 $f$ : 周波数  
 $\mu_r$ : 導体の比透磁率  
 $\mu_0$ : 真空の透磁率

で、 $\delta$ は渦電流の浸透の深さを表わす。

(4),(5)式から明らかなように、渦電流の浸透深さは周波数の1/2乗に逆比例するため、一般に微細な被熱体の溶解には高周波炉が適し、大形被熱体の溶解には低周波炉が用いられることが多い。前項の高周波焼入は、高周波による表面加熱の一例である。

次に1967年初頭よりある製鋼所で銑鉄溶解用低周波誘導炉の開閉制御に使用されているHI-VACコンタクタの現地試験結果を、同じ場所で使用されていた高圧交流気中電磁接触器のそれと比較して紹介する。

図15はその測定回路図で、変圧器二次回路の共振コンデンサに付随する従来気中開閉器では開閉困難なために、このコンデンサを開閉しようとするたびに変圧器一次側のHI-VACコンタクタを開閉し、電流開閉はHI-VACコンタクタで行なう方式になっている。そのため開閉ひん度は100~200回/日に達する。現在までに延べ3万回を越えているが、なんら異常を生じていない。このように開閉ひん度の多い場合には、特にHI-VACコンタクタの画期的長寿命性がクローズアップされる。

図16にHI-VACコンタクタによる投入遮断のオシログラムを示す。図16を見ると

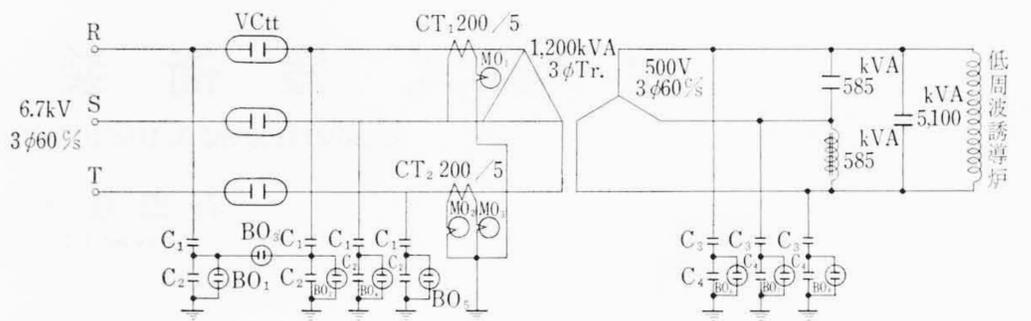
- (1) 電流が三相とも異なる波形をもっていること。
- (2) 突入電流が定格電流の8~9倍に達すること。
- (3) 遮断時のアーク時間は半サイクル以下で、しかも電流さい断も再点弧も生じていないこと。

がわかる。(1),(2)はこの種の負荷には必然の現象で、(3)はHI-VACコンタクタが特にこの種の負荷に適するものであることを示唆している。それはここには詳述しないが従来の気中式開閉器では、アーク時間が4~5c/sと長く、かつ再点弧現象を避けることができなかつたことの比較考証による。

### 3. 結 言

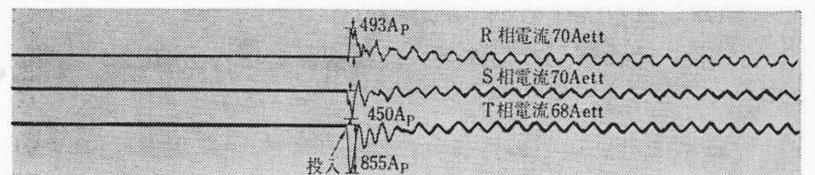
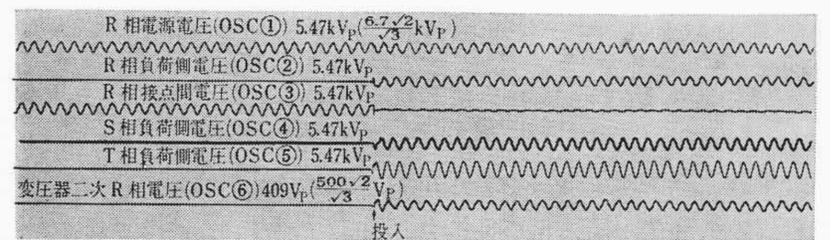
多年の開発研究が実って1965年に発売を開始して以来、HI-VACコンタクタは幸いにして好評をもって受入れられ、需要は増加の一途をたどり、供給力を上まわっている状態である。この間、需要家各位のご協力を得て、2年間にわたって各種の産業分野で、現地開閉試験と環境による劣化程度の調査を実施した。本稿では主として前者の結果について報告した。特筆すべき成果としては

- (1) 高圧電動機用コンタクタとして、安定したすぐれた性能を有していること。
- (2) 真空式開閉器としては異例の変圧器負荷にも安心して適用できること。

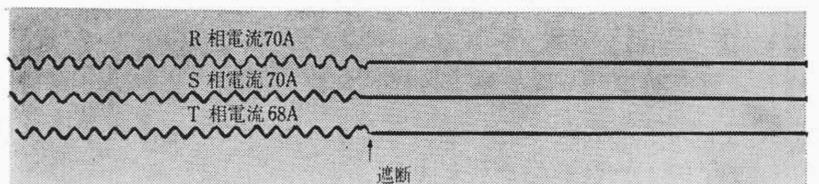
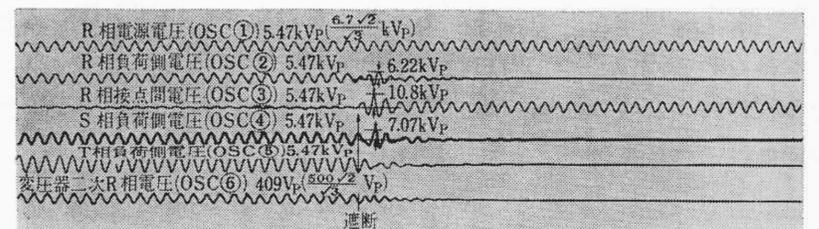


$C_1 \dots 0.0005 [\mu F]$        $BO_{1-8} \dots$  高速度ブラウン管オシログラフ  
 $C_2 \dots 0.1 [\mu F]$        $MO_{1-3} \dots$  電磁オシログラフ  
 $C_3 \dots 0.01 [\mu F]$   
 $C_4 \dots 0.1 [\mu F]$

図15 測定回路



(a) 投入時



(b) 遮断時

図16 低周波誘導炉投入遮断オシログラム

- (3) 独自のくふうにより、HI-VACコンタクタは、高周波コンデンサへの適用を可能にし、高周波回路遮断器としての用途を確立したこと。
- (4) 従来の気中式開閉器や油入開閉器が、その回路条件の複雑さと、開閉ひん度の多さで最も苦手としていた誘導炉に対し、理想的な開閉制御器であることを実証し得たこと。

があげられる。  
 終わりに、快く現地試験、調査を許諾され、協力を惜しまれなかつた顧客各位に対し深く感謝の意を表する。

### 参 考 文 献

- (1) 高橋ほか: 日立評論 48, 1033 (昭41-9)
- (2) 石田ほか: 昭41, 電気学会東京支部大会 No. 155