

*Changes for the Better*

2006年6月

真空遮断器・真空コンタクタ

開閉サージ現象と適用の仕方



三菱電機株式会社

JNEC-DV-2108-E

本資料は真空開閉器の適用に当たってより安全に、より経済的にご使用頂くため、開閉サージ発生メカニズムと各サージ保護適用基準についてわかりやすく解説しております。

— 目 次 —

第1節 開閉サージの発生メカニズム.....	2
1.1 電流遮断現象によるサージ.....	2
1.2 高周波消弧現象に基づく多重再発弧サージ.....	4
(1) 投入時多重再発弧サージ.....	4
(2) 遮断時多重再発弧サージ.....	5
1.3 三相同時遮断現象によるサージ.....	6
第2節 負荷機器の絶縁耐力.....	7
第3節 サージ抑制の方法.....	8
3.1 低サージ真空バルブの適用.....	8
3.2 保護装置の種類と効果.....	9
第4節 サージ保護適用基準.....	11
第5節 具体的なサージ保護の適用例.....	12
5.1 電動機直接開閉の場合（自入及び減電圧起動）.....	12
5.2 発電機開閉の場合.....	12
5.3 電力用サイリスタ整流装置への適用の場合.....	12
5.4 アーク炉変圧器の場合.....	13
5.5 実システムでの適用例.....	13
第6節 サージ保護装置.....	14
第7節 7. 2 k V真空遮断器の異システム突き合わせ回路への適用について.....	15

## 第1節 開閉サージの発生メカニズム

真空遮断器で変圧器、回転機などの遅れ小電流を開閉した際に発生するサージは、その発生メカニズムから見て、電流遮断サージ、再発弧サージ、三相同時遮断サージの3種類に分類できます。

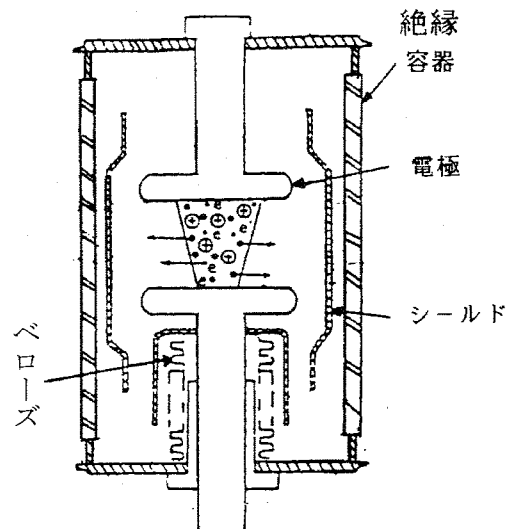
以下に各々の現象と特徴について説明致します。

### 1.1 電流遮断現象によるサージ

真空遮断器のように消弧能力のすぐれた開閉器で小電流を遮断すると、電流の零点を待たずに突然アークが消滅し、電流を遮断するケースがある。これを電流遮断現象と呼び、遅れ電流遮断時に、この現象を起こすと高いサージ電圧を発生する場合がある。

#### (1) 電流遮断現象

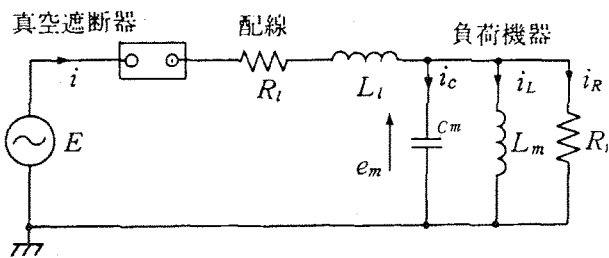
1.1 図に真空バルブの構造と真空アークのモデルを示す。真空アークは陰極より蒸発してくる中性の金属原子、イオンならびに電子から構成されている。これらは陰極から供給される一方、周囲の真空空間へ拡散していき、金属シールドの表面に付着して消滅する。電流が商用周波の電流零点近傍になると金属原子、イオンならびに電子の真空中への拡散量に対して供給量が少なくなり、特に小電流の場合アークを維持することができなくなり、電流零点の前に電流が遮断されることがある。これが電流遮断現象である。



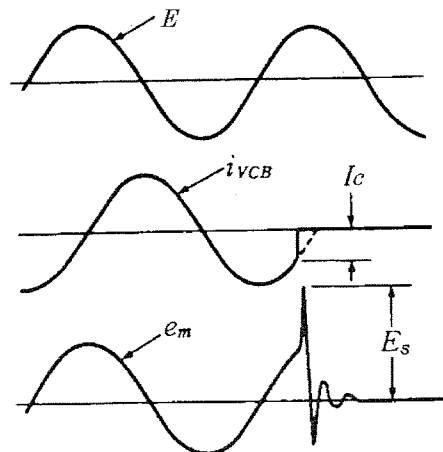
1.1 図 真空バルブにおける電流遮断モデル

#### (2) サージ電圧の計算式

今、1.2 図に示すような誘導性負荷回路において、1.3 図に示す電流レベル  $I_c$  で電流遮断が発生したとすると負荷のリアクトル  $L_m$  には  $\frac{1}{2} L_m I_c^2$  なるエネルギーが残っている為、浮遊静電容量  $C_m$  との間で過渡振動を引き起す。



1.2 図 誘導性負荷の等価回路



1.3 図 電流・電圧波形

すなわち、ここで次の微分方程式が成り立つ。

$$\frac{1}{C_m} \int i_C dt = Ri_R = L_m \frac{di_L}{dt} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

$$i_C + i_R + i_L = 0 \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

過渡振動電圧  $e_m$  は次式で表わされる。

$$e_m = E_s \cos(\omega_m t + \phi') \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

$\omega_m$  = 回路の固有角周波数

$\phi'$  = 電流裁断時の位相

$E_s$  がそのサージの振幅であり、これが大きいときは

$$E_s \cong \eta \cdot Z_m \cdot I_c \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

で概略表わすことができる。 $\eta$  は減衰係数である。

裁断電流  $I_c$  は、主に真空バルブの電極材料で決まるが、遮断電流にも依存し、遮断電流が増えると小さくなる傾向がある。 $Z_m = \sqrt{Lm/Cm}$  はサージインピーダンスと呼ばれるもので、負荷機器の種類、容量、電圧に依存し、容量が大きくなると低下する。減衰係数  $\eta$  も負荷機器によって異なり、変圧器はモータと比べて減衰が大きく、 $\eta$  は小さい。

商用周波の電源電圧を含めたサージ電圧は、(1) 変圧器回路や起動即遮断時のモータ回路のように逆起電圧のない場合と、(2) 定速運転時のモータ回路のように逆起電圧のある場合それぞれ次式で表わされる。

回路の条件	サージ電圧の計算式
(1) 逆起電圧のない場合 (変圧器回路・モータのインチャージ開閉)	$E_s = \sqrt{E^2 + (\eta \cdot \sqrt{Lm/Cm} \cdot I_c)^2}$
(2) 逆起電圧のある場合 (定速運転のモータ開閉)	$E_s = E + \eta \cdot \sqrt{Lm/Cm} \cdot I_c$

$E_s$  : サージ電圧波高値

$E$  : 電源電圧の大地間波高値

$\eta$  : 減衰係数

$\sqrt{Lm/Cm}$  : サージインピーダンス

$I_c$  : 裁断電流

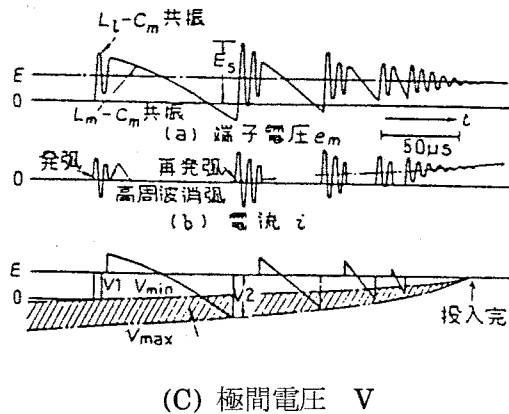
以上、単相回路で説明したが三相回路においても同様となる。

## 1.2 高周波消弧現象に基づく多重再発弧サージ

### (1) 投入時多重再発弧サージ

1.2 図の回路で真空遮断器を投入する場合、接点どうしが接近すると、先行放電が生じ、電流が流れ始める。この電流は配線の  $L_l$  と負荷機器の浮遊静電容量  $C_m$  との共振による数 100kHz～数 MHz の高周波電流が重畳した過渡電流である。真空遮断器は遮断性能が優れているため、この過渡電流を遮断する。

その時、負荷側には負荷固有の  $L_m - C_m$  共振が発生し、接点間に再び電圧が加わり、再発弧が生じる。以下、順次過渡電流の消弧と再発弧繰り返される。これが多重再発弧現象である。



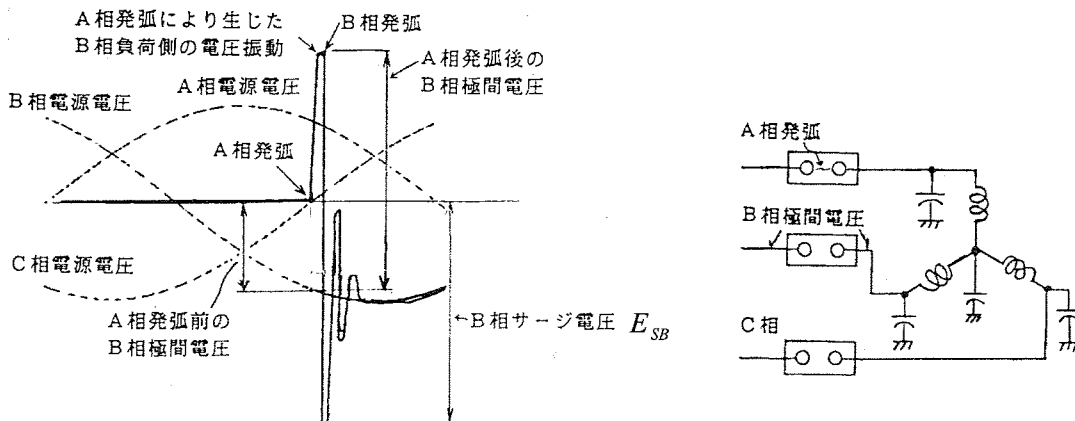
1.4 図 投入時多重再発弧減少(1)

多重再発弧がない場合、投入時のサージ電圧は理論的には  $2E$  となるが、多重再発弧が発生した場合は、1.4図のように極間耐圧のばらつきを考慮すると2倍以上となる場合もある。

しかし、投入時には接点間隙は次第に小さくなり、従って極間耐圧も低くなるのでサージ電圧  $E_s$  も低下していく。

三相の実回路の場合は、三相不揃い投入を避けることができないから、他の開閉器と同様に第2相投入あるいは第3相投入時に第1相投入より大きなサージ電圧を発生することがある。

A相投入によりB相負荷側には1.5図に示すように過渡振動があらわれ、これがB相の接点間電圧を大きなものとし、発生サージ電圧も大きいものになる。



1.5 図 第2相投入サージ

この場合の最大サージとしては、理論的には  $E_{SB} = 3.5$  倍程度になることも有り得る。従って、三相の不揃い投入を極力小さくすることが好ましい事は他の遮断器と同様であるが、一般的に VCB/VMC の三相不揃い時間は、1ms 以下であり、実使用において三相不揃いが問題となることはない。

## (2) 遮断時多重再発弧サージ

電流零点で電流が遮断されると、遮断器の接点間には過渡回復電圧と呼ばれる電圧があらわれる。この過渡回復電圧が電流遮断直後の接点間の絶縁耐力を上回ると再発弧を生じ、遮断器には過渡的な高周波電流が流れる。この高周波電流の零点で回路が遮断されると再び接点間には過渡回復電圧があらわれ、又再発弧が生じるという現象が繰り返される場合がある。

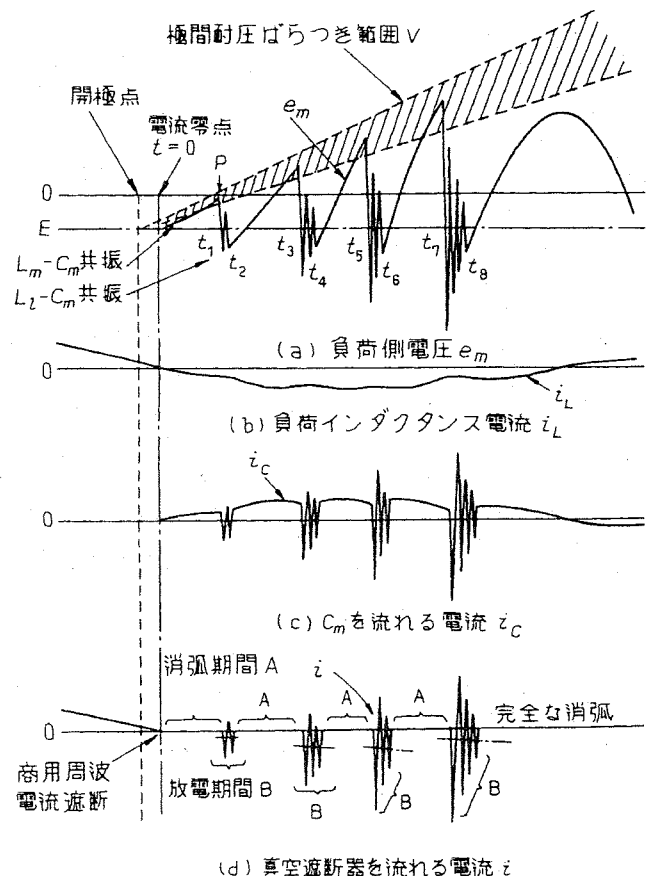
この再発弧の繰り返し過程で過渡回復電圧は拡大し、さらに再発弧時の急峻な電圧変化は、サージ電圧となって負荷機器に進入する恐れがある。

1.6 図は 1.2 図の等価回路で真空遮断器が電流零点の直前で接点開離をし、再発弧が生じ、多重再発弧現象となった場合を示すものである。

投入時と異なるのは、接点間耐電圧が時間と共に増大する点である。

再発弧と高周波消弧が繰り返されている間の、再発弧期間に流れる商用周波の電流により、 $L_m$  にたくわえられたエネルギーは増加し、消弧期間における  $L_m - C_m$  振動による電圧  $e_m$  の振幅は拡大していくが遮断器の極間耐電圧も接点開離によって上昇し、接点間耐電圧が電圧  $e_m$  を上回ったり、又は再発弧時に商用周波電流の零点が形成されず商用周波電流が次の電流零点まで継続したりして、多重再発弧現象は停止する。

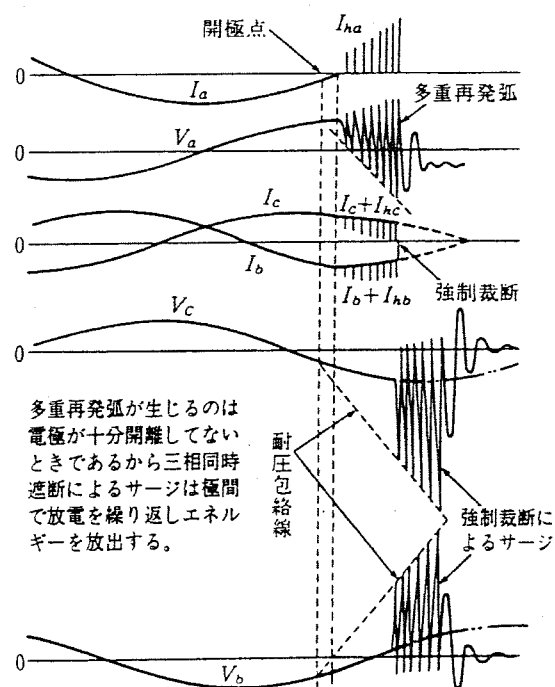
再発弧サージは、電流零点直前に接点が開き始めた場合とか、遮断後の過渡回復電圧が高い場合にしか発生しない。



1.6 図 遮断時多重再発弧サージ

### 1.3 三相同時遮断現象によるサージ

三相回路において多重再発弧現象が発生し、再発弧時の高周波電流が相互誘導により、他相に重畳し、電流零点が形成され、そこで三相とも電流が遮断されてしまう事がある。これが三相同時遮断現象である。電流遮断を行なった相では電流裁断現象と同一の現象となる。ただしこの場合の裁断電流はレベルは真空バルブ管の電極材料で決まる固有の値ではなく、その時の回路電流値に依存する。そのためサージの振幅も大きくほとんどの場合は接点間での再発弧を繰り返し、見かけ上は多重再発弧現象を呈し、この場合の最大サージの大きさは接点間耐電圧で決まる。多重再発弧が生じるのは接点間隙が比較的小さい場合であるから、このサージ電圧は前述の多重再発弧サージより若干高い程度の値になる。



1.7 図 三相同時遮断現象

#### 参考文献

- (1) 電気学会: 電気学会技術報告(Ⅱ部)第197号  
真空遮断器・開閉器の適用について

## 第2節 負荷機器の絶縁耐力

真空開閉機器の負荷として考えられる機器、一般的に、変圧器、回転機、コンデンサなどが有るが、前節で述べた開閉サージの影響を考える場合には、負荷機器の絶縁強度が基準となる。

表-1に変圧器、回転機、コンデンサのJEC、JIS等の規格に基づく耐電圧値を示す。

表-1 負荷機器の耐電圧試験電圧値の比較

種類		商用周波試験電圧 (1分間 kV rms)		衝撃波試験電圧 (kV peak)		備考
		3.3kV	6.6kV	3.3kV	6.6kV	
変圧器 JEC-204	油入	16	22	45	60	( )は低レベル3号 B, 6号 B の場合を示す。
		(10)	(16)	(30)	(45)	
	モールド	16	22	45	60	
		(10)	(16)	(30)	(45)	
	乾式	10	16	(25)	(35)	( )は普通考慮せず特に 指定された時の値。
回転機 JEC-37,114	定格 1kW 以上 10,000kW 未満 2V+1		$\{\sqrt{2}(2V+1) \times 1.25\}$		( )は AIEE 委員会で公 表された推奨値で規格 値ではない。	
	7.6	14.2	13.4	25.1		
コンデンサ JIS C-4902	端子間		—		端子間以外について は、6号 A	
	6.6	13.2				
	端子一括外箱間		端子一括外箱間			
	16	22	45	60		

インパルス耐圧は、油入変圧器については明確に規定されているが、回転機や乾式変圧器、モールド変圧器については明確なインパルス耐圧の規定がなく、開閉サージ保護に当たっては、これら低レベル機器との絶縁強調の考慮が必要となる。

但し、モールド変圧器は、規格上乾式変圧器と同じ扱いとなるが、耐電圧性能は油入変圧器並みの保証をしていることが多いので、油入変圧器と同等に扱う。

### 第3節 サージ抑制の方法

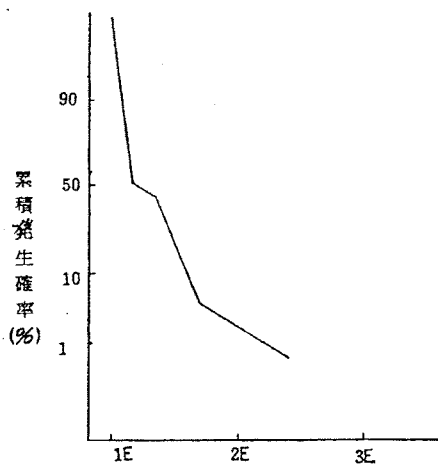
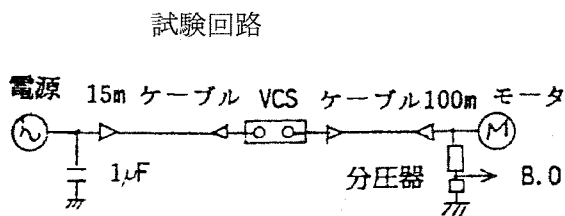
開閉サージの発生は、回路の特性と真空バルブの特性によって大きく影響される。従って、サージの抑制法としては、低サージ真空バルブを使用する方法と、保護装置を設置する方法の2つに大きく分類できる。

#### 3.1 低サージ真空バルブの適用

裁断電流が小さく、又高周波遮断性能も低い電極材料を使用した真空バルブを使用する。短絡遮断性能を要求されない真空コンタクタ及び比較的遮断容量の小さい真空遮断器の場合には、このような電極材料の使用が可能であり、VZ-D形真空コンタクタ及びVF-8DG~VF-40CG形真空遮断器には、このような低サージ真空バルブを使用している。

1.1 図に真空コンタクタによるモータ負荷開閉時の試験結果を示す。

又、3.2 図に低サージ真空遮断器と汎用真空遮断器の遅れ小電流遮断試験結果を比較して示す。

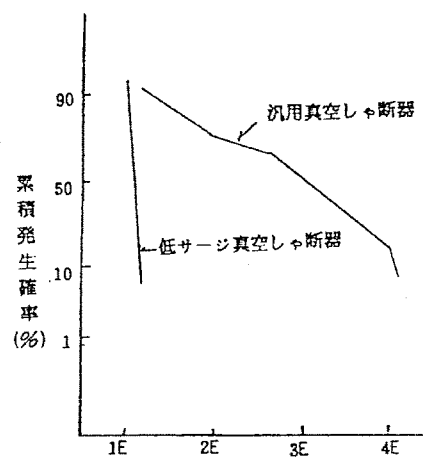
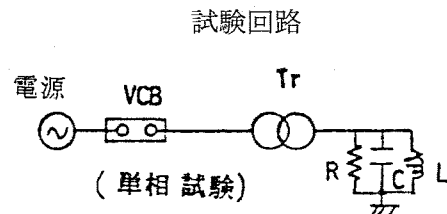


過電圧倍数{ $E=5.4\text{kV}(\sqrt{2}/\sqrt{3}\cdot 6.6\text{kV})$ }

#### 3.1 図

低サージ真空バルブを使った真空コンタクタの開閉過電圧の発生確率  
(6.6kV 100kW のモータの開閉)

備考: 電源ケーブルが長い間を想定して電源側の対地に  $1\mu\text{F}$  のコンデンサを付加して試験を行った。



過電圧倍数{ $E=8.8\text{kV}(1.5\times\sqrt{2}/\sqrt{3}\cdot 7.2\text{kV})$ }

#### 3.2 図

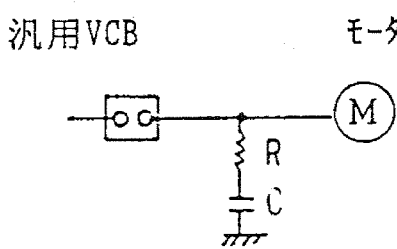
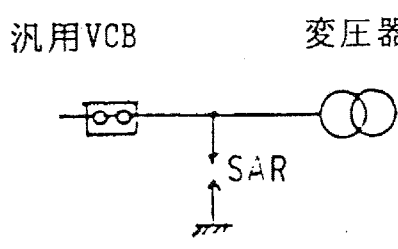
低サージ真空遮断器と汎用真空遮断器の開閉過電圧の発生確率の比較  
(遅れ小電流の開閉)

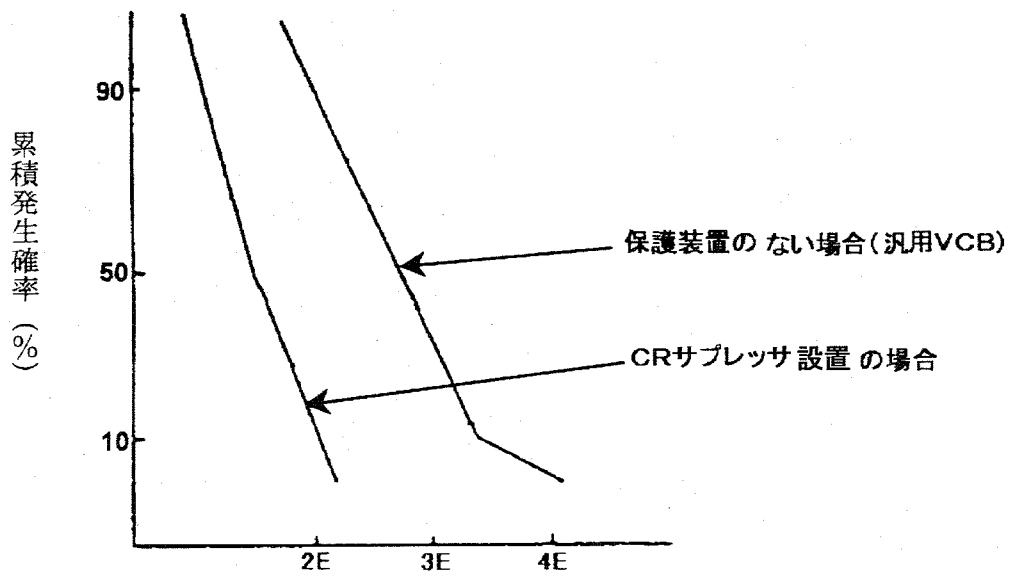
### 3.2 保護装置の種類と効果

大容量の遮断器の場合、裁断電流値が小さく、しかも高周波電流遮断性能も低い電極材料を使用することは難しく、真空遮断器と負荷機器との間に保護装置を設置してサージの抑制を行なっている。

表-2に現在使用されている保護装置の種類を示す。

表-2 保護装置

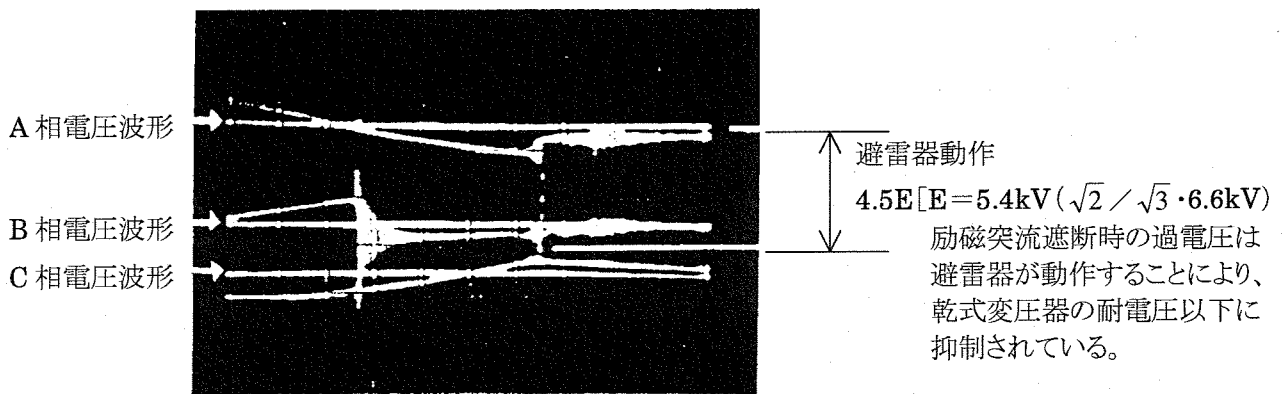
	CRサプレッサ	避雷器
形名	CR-3 (3kV用) CR-6 (6kV用) CR-12(11kV用)	GL形汎用避雷器 (3kV/6kV)
素子	コンデンサと抵抗の直列素子	ZnO非直線抵抗素子とギャップ
設置方法	<p>対地間(各相)</p>  <p>別据付タイプ</p>	<p>対地間(各相)</p>  <p>別据付タイプ</p>
効果	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. サージインピーダンスの低下</li> <li>2. 高周波電流の抑制</li> <li>3. 波頭峻度の緩和 (3.3図参照)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. サージ電圧の波高値制限 (3.4図参照)</li> </ol>
適用	回転機の保護	変圧器の保護



過電圧倍数  $[E=2.7kV(3.3kV \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3})]$

3.3 図 CR サージ・サプレッサの有無による開閉過電圧の発生確率

—3.3kV 100kW,モーター—



3.4 図 乾式変圧器の励磁突流電流の真空遮断器による遮断時の電圧波形一例

—6.6kV 300kVA—

#### 第4節 サージ保護適用基準

真空開閉機器による開閉サージの発生は、第1節で述べたように遅れ小電流の場合、回路のサージインピーダンスの高い場合、過渡回復電圧の高い場合、遮断電流の大きい場合といったような負荷機器の種類、回路条件などに大きく依存している。

又、第2節で述べたように負荷機器の種類によって絶縁強度が異なるため、開閉サージ保護に当たっては、開閉サージが発生する条件と負荷機器の絶縁強度に合わせて決定される。

表-3に開閉サージ保護装置の負荷機器に対する適用基準を示す。

表-3 サージ保護の適用基準

開閉器の種類		負荷機器		乾式変圧器	油入変圧器	三菱モールド変圧器(A号絶縁)	進相コンデンサ
		発電機	電動機				
汎用真空遮断器 (VCB)	3.6/7.2kV VF-8D/13D VF-20C VF-32C/40C	CRサプレッサを使用		汎用避雷器を使用 注(1)	不要 注(1)	不要 注(1)(2)	不要
	12kV VPR	CRサプレッサを使用		同上	同上	汎用避雷器を使用	同上
	24kV/36kV VPR	—		同上	同上	同上	同上
低サージ真空遮断器 (VCB) 注(4)	VF-8DG/13DG VF-20CG VF-32CG/40CG	不要	不要 注(3)	不要	不要	不要	同上
真空コンタクタ (VMC)		適用不可	不要 注(3)				不要

注(1)変圧器二次側に半導体整流装置(例:電力用サイリスタ整流装置)を設けた回路で変圧器を開閉する場合には、変圧器は混触防止板付のものを使用し一次側に汎用避雷器を設け、二次側にフィルタコンデンサ等のサージ保護装置を設けてください。

(2)モールド変圧器の無負荷励磁突入電流の遮断は避けてください。無負荷励磁突入電流の遮断を必要とする場合は汎用避雷器を適用ください。他社製のモールド変圧器を使用する場合には変圧器メーカーに確認してください。但し、低サージ形VCB使用の場合は、汎用避雷器は不要です。

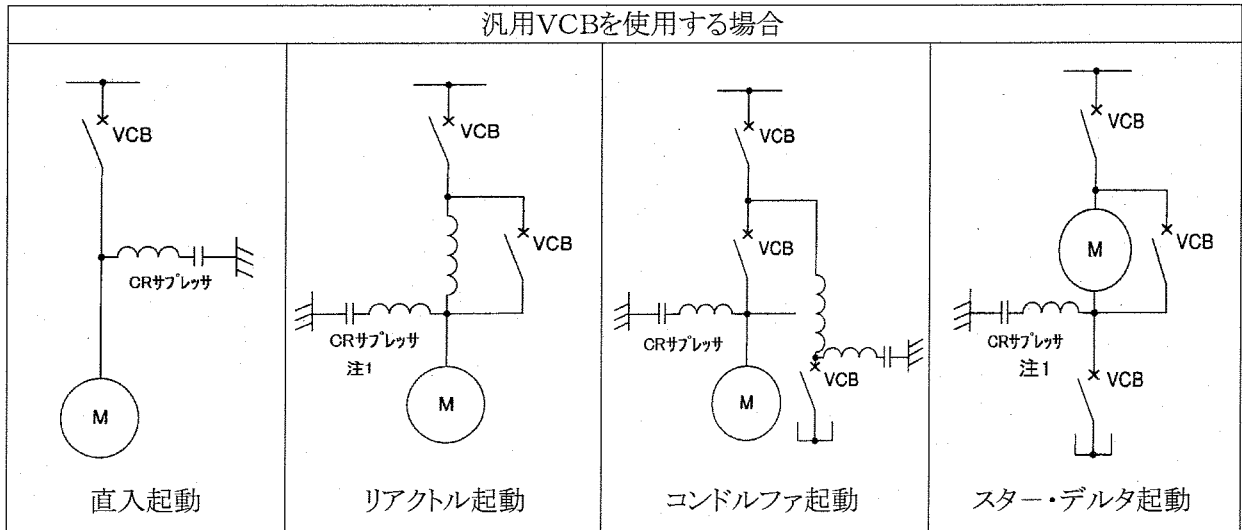
(3)インチング運転を頻繁に行ない、インチング開閉操作を主とする電動機(例:クレーン、コンベア用)の場合は、CRサプレッサを適用してください。

(4)低サージ真空遮断器VF-8DG/13DG/20CG/32CG/40CG形VCBは低サージ真空バルブを採用しています。

## 第5節 具体的なサージ保護の適用例

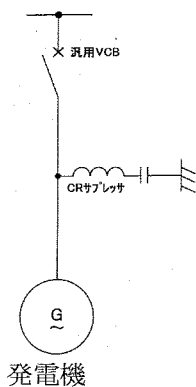
VCB/VMCの実際の適用にあたって、使用負荷回路によりサージ保護が必要な場合の具体的な適用例を示す。

### 5.1 電動機直接開閉の場合(自入及び減電圧起動)



※コンドルファ起動の場合、VCB切換操作は、起動電流が定常電流になった後に行なってください。

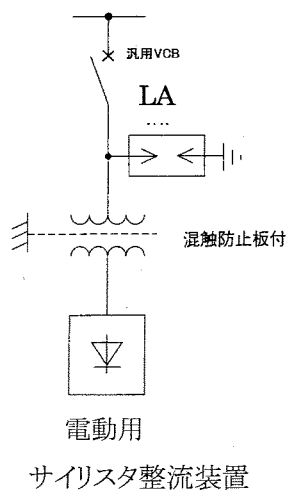
### 5.2 発電機開閉の場合



- ※ 1. VMCは使用出来ません。
- 2. 低サージ形 VF-CG/DG 形 VCB は CR サプレッサなしで適用できます。

### 5.3 電力用サイリスタ整流装置への適用の場合

低圧側に電力用サイリスタ整流装置が接続されている変圧器を、汎用VCBで直接開閉する場合。  
(混触防止板付変圧器の使用を推奨)

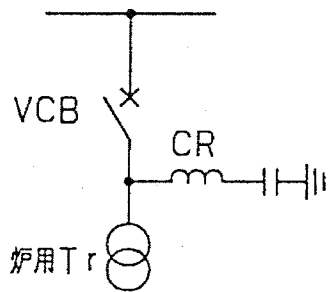


※ 低サージVCBおよびVMCの場合一次側 LA は不要。

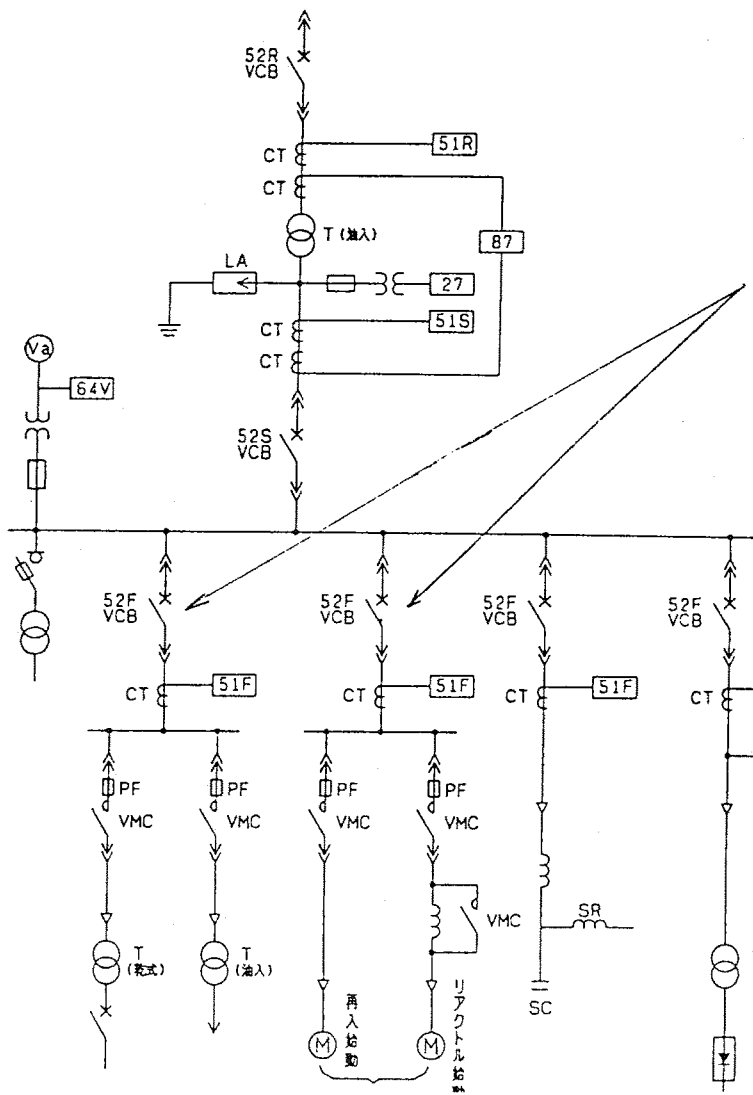
※ フィルタコンデンサ等のサージ保護装置を設置

### 5.4 アーク炉変圧器

汎用VCB, 低サージVCBともCRサプレッサを取り付ける。



### 5.5 実系統での適用例



フィーダ用 VCB の下に負荷開閉用の始動スイッチがあり、上位 VCB で故障遮断以外の直接負荷開閉をしない場合は保護装置が不要。

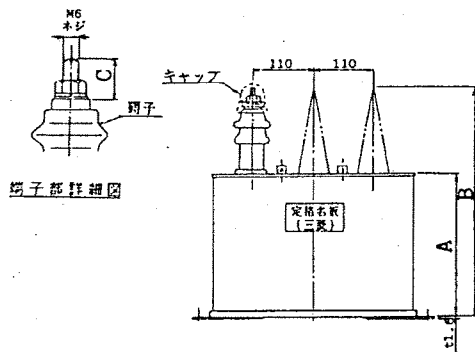
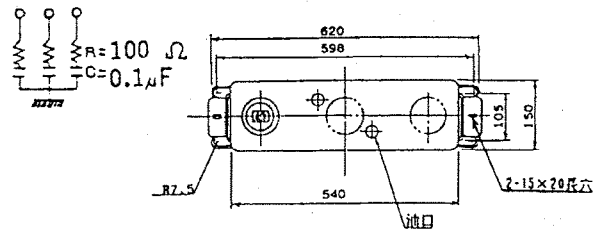
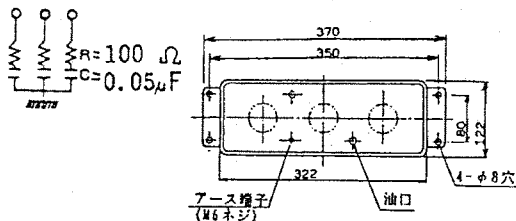
Tr が乾式の時、または Tr の二次側が半導体整流器に接続されている場合は、Tr の一次側に汎用避雷器 (LA) を挿入。

## 第6節 サージ保護装置

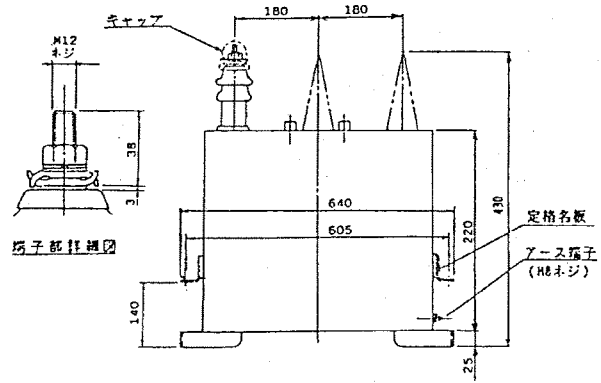
### 6.1 CRサプレッサ

形名	CR-3	CR-6	CR-12
使用電圧	3.3kV	6.6kV	12kV
外形寸法 mm	A	150	200
	B	237	337
	C	16	20
質量(kg)	8.5	10	31

- 注) 1. 盤、遮断器の耐電圧試験時にはCRサプレッサを取外して実施する。
2. CRサプレッサを点検する際は必ず主回路端子を接地して放電させる。



CR-3/CR-6 外形寸法

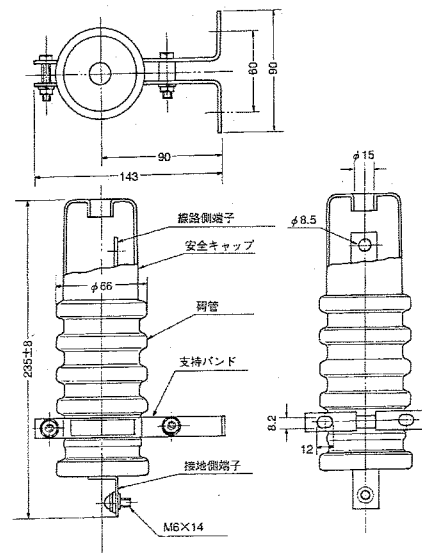


CR-12 外形寸法

### 6.2 汎用避雷器 (GL形)

種別	屋内用	
	GLI-3G	GLI-6G
形式	GLI-3G	GLI-6G
定格電圧	4.2kV	8.4kV
使用電圧	3.3kV	6.6kV
商用周波放電電圧	6.3kV以上	12.6kV以上
衝撃波放電電圧 100%	15kV以下	30kV以下
放電耐量(4×10μs)	30kA	30kA
外形寸法(mm)	A	235
	B	88

注) 盤、遮断器の耐電圧試験時は避雷器の配線を取外す。



第7節 7. 2kV真空遮断器の異系統突き合わせ回路への適用について

遮断器は断路機能を有していないので、電路を完全に切離す必要がある場合は断路器と組み合わせて使用する。

しかし自家用発電機回路用遮断器や二回線受電用遮断器においては、同相極間に系統間の電圧差が加わり、電圧の位相によっては同相極間に常規電圧以上の高い電圧が加わる場合がある。

ここに当社7.2kV真空遮断器の異系統突き合わせ回路への適用について述べる。

《適用基準》

区分	汎用VCB	低サージVCB
		VF-8DG/13DG VF-20CG VF-32CG/40CG
適用可否	適用可 ○	適用可 ○

《適用にあたって》

異系統突き合わせ回路では、VCB極間に加わる電圧が通常の使用条件より高いので清掃などを含む保守点検周期を短くしてください。

特に汚損や高湿度が考えられる環境下では必ず保守点検を短くしてください。

尚、真空コンタクタについては異系統突き合わせ回路への適用は出来ません。