

真空開閉器によるサージ発生機構と電動機巻線のサージ耐力

Switching Surge Phenomenon in Induction Motor Windings and their Endurance

真空開閉器は小形・軽量、低騒音などの長所をもっているが、その開閉時に真空開閉器特有の多重再発弧サージを発生し、まれではあるが電動機巻線の損傷が懸念された。従って、電動機巻線の信頼性を確保するためには、電動機に印加されるサージ電圧とこれに対する電動機の耐力とを定量的に把握することが必要であった。そこで真空開閉器によるサージ発生機構を理論と実験で究明するとともに、発生サージ電圧のシミュレーション計算による予測を可能にした。また、サージの電動機内での分担率の計算による予測を可能とし、これを数多くの電動機巻線のサージ分担電圧の実測で確認した。更に巻線の耐力データによりその実力を把握し、製造過程での品質管理法を確立した。これらの生産技術によって信頼性の高い、品質の安定した電動機を製作している。

狩野育志* Ikushi Kano
袴田武司* Takeshi Hakamada
黒沢幸夫** Yukio Kurosawa
菅原宏之** Hiroyuki Sugawara

1 緒言

真空開閉器は小形・軽量、無炎、低騒音、アーク時間一定という数々の利点をもっており、これらの長を生かして電動機回路の開閉に広く使用されるようになってきている。しかし、真空開閉器はさい断電流が大きいことが問題であり、電流さい断による過電圧に対しては特別の注意を払う必要がある。最近低さい断レベルの真空開閉器が開発され、十分安全なものとなっているとはいうものの、電流さい断によるサージが小さくなると、あまり注意が払われていなかった再発弧性の高周波サージが問題となってきた。電動機に高周波のサージが印加されると電動機巻線の電圧分担が一樣とならず、電源側巻線のサージ分担率が高くなり、ターン間絶縁の損傷が懸念された。そこで、筆者らは真空開閉器のサージ発生機構と発生サージ、電動機巻線のサージ分担、及び電動機巻線のサージ耐力について研究し、それらを明らかにするとともに信頼性の高い電動機の製作に成功した。以下にそれらの内容を紹介する。

2 真空開閉器によるサージ発生機構と発生サージ

開閉器は通常商用周波の電流零点でしゃ断するものである。ところが、投入時の先行放電期間や、しゃ断後再発弧が生じたときなどは、開閉器を流れる電流が過渡高周波振動電流になり、幾度か電流零点を通る。高周波電流のしゃ断の条件は、それが電流零点を通り、且つ電流零点における電流の変化率 $\frac{di_s}{dt}$ が開閉器の高周波消弧能力の電流変化率 $\left(\frac{di_s}{dt}\right)_{vs}$ 以下となることであるが、真空開閉器は強力な高周波消弧能力をもっているため、高周波振動電流を数サイクルでしゃ断してしまう。高周波消弧後、真空開閉器の極間に印加される電圧で開閉器が放電すると、再び過渡的な振動電流が流れ、条件によっては高周波消弧と放電が多数回繰り返される。これを多重再発弧現象と呼ぶ。以下、その発生機構と発生電圧とについて述べる。

2.1 多重再発弧現象の発生機構

図1(a)に真空開閉器を適用した一般回路を示す。負荷とし

ては主に電動機が考えられるが、通常のしゃ断時は逆起電力があるから再発弧は生じないので、起動即しゃ断やインテング状態でのしゃ断のように負荷に逆起電力のない場合について考える。図1(b)にその第一相しゃ断時の等価回路を示す。多重再発弧現象は1ms以内の極めて短時間の現象なので、その間の電源電圧の変化を無視して直流で考える。

商用周波電流零点直前で真空開閉器を開極すると、負荷の端子電圧 e'_m は図2(a)に示すように他相の電圧 $e_{B.C} = -\frac{E}{2}$ を振動中心とする負荷機の $L'_m - C_m - R'_m$ 共振により変化していく。この固有振動数は、数百ヘルツ～数十キロヘルツであり商用周波数より高い。一方、真空開閉器の極間耐圧は図2(a)の V_{max} と V_{min} の間の領域のばらつき範囲をもって増大していく。しかし、真空開閉器の極間には $|E - e'_m|$ が印加されるので、 e'_m が極間耐圧 V の領域に入ると ($t = t_1$ 時点) 再発弧が生ずる。再発弧が生ずると e'_m は $L'_m - C_m - R'_m$ 共振に従って変化する。この固有振動数は数百ヘルツ～数メガヘルツのオーダーである。このとき、真空開閉器には図2(c)の電流 i_s が流れる。真空開閉器は高周波消弧能力が優れているため、この高周波電流を数サイクルでしゃ断してしまうので、 $t = t_2$ 時刻より再び e'_m は $L'_m - C_m - R'_m$ 共振により変化し、 $t = t_3$ でまた再発弧する。以下、図2(c)に示すように高周波消弧と再発弧が何度も繰り返される。ここで注目しなければならないのは、 L'_m を流れる電流 i_L (図2(b)) である。放電期間の負荷電圧は E を中心とする振動電圧のため、平均して $E' = (1 + \frac{1}{2})e$ の電圧が L'_m に印加されるので、 i_L は増加し、一方、消弧期間では $e'_m > -\frac{E}{2}$ のとき i_L は増加し、 $e'_m < -\frac{E}{2}$ のとき i_L は減少する。従って、 i_L はだんだん増加する傾向を示すが、これにより多重再発弧現象の停止に次に述べる二つの形態が生ずる。

(1) 消弧期間の $L'_m - C_m - R'_m$ 共振における e_m の振幅は、消弧した瞬間の i_L をさい断したことにより、 $\eta_m \sqrt{E'^2 + \left(i_L \sqrt{\frac{L'_m}{C_m}}\right)^2}$ となり、 i_L が増加するにつれて同様増加する。そのため、接点の開極運動に伴う極間耐圧の上昇と、端子電圧 e'_m の上昇との競合が生ずる。しかし、この競合は無限に続くことはない。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

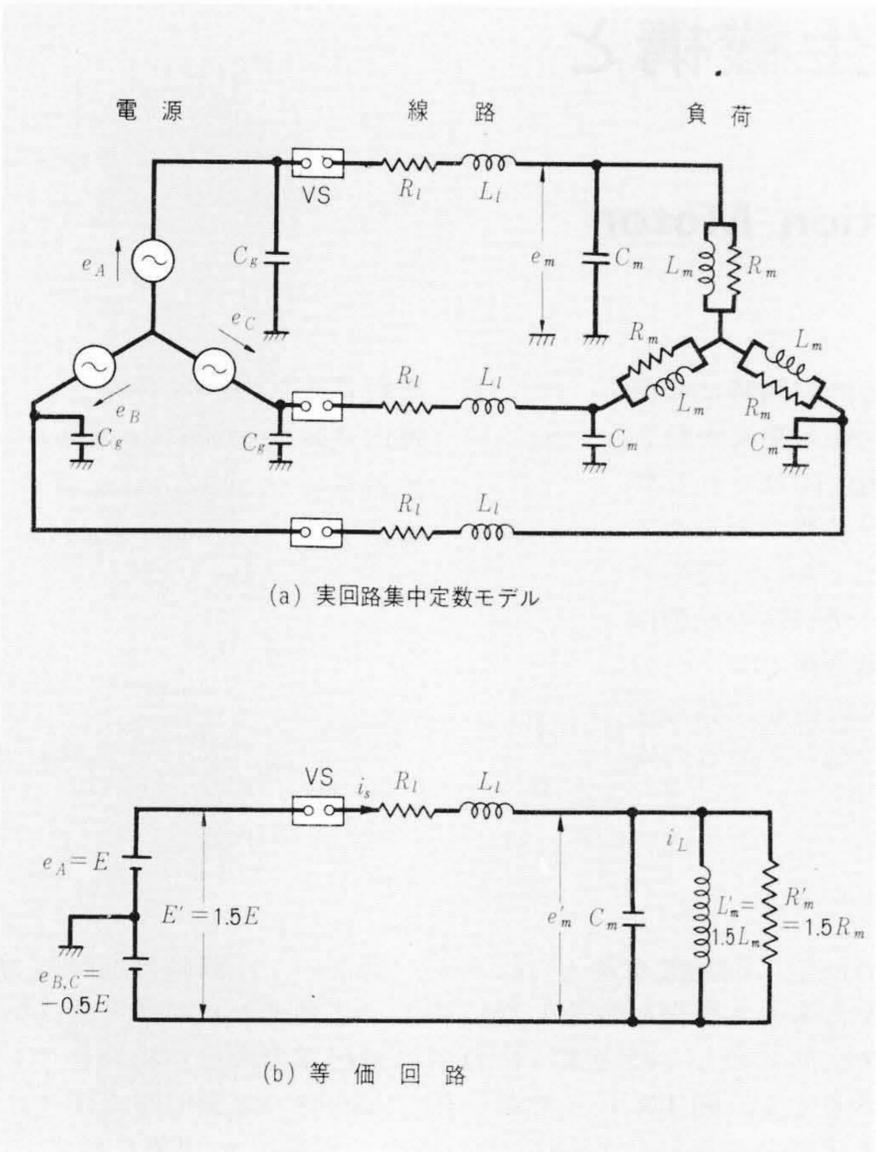


図1 真空開閉器適用回路 多重再発弧現象を考える場合の基本回路である。電源電圧は交流であるが、多重再発弧現象は極めて短時間なので直流で考える。

すなわち、極間耐圧が大きくなると e_m が逆極性に大きく振れるため、 i_L は減少するようになり、極間耐圧が $L'_m-C_m-R'_m$ 共振を上まわり、多重再発弧は停止する。

(2) 多重再発弧現象の過程で i_L が増してくると、放電期間における商用周波の電流零点直前の電流変化率 $\frac{di_s}{dt}$ が真空開閉器の消弧限界 $(\frac{di_s}{dt})_{vs}$ まで減衰しないうちに、図3に示すように高周波電流による電流零点の生成がなくなり、そのまま商用波電流の半サイクル続弧となり、 $L'_m-C_m-R'_m$ 共振が大きくなる前に多重再発弧現象は停止する。

すなわち、多重再発弧現象による過電圧には、おのずから限界があり真空開閉器のフルストローク極間耐圧まで上昇することはあり得ない。過電圧の観点からは最後の再発弧当たりの電圧が最も大きく重要である。ここで $L'_m-C_m-R'_m$ 共振による過電圧 E_s を励振サージ、再発弧で生ずる過電圧の最大 E_j を発弧サージと呼ぶことにする。

2.2 シミュレーションによるサージ予測と予測値との比較

多重再発弧現象の各消弧期間、及び放電期間の電圧・電流波形は各期間の初期値が分かれば解析的に求まる。そこで放電期間と消弧期間において、それぞれ任意の初期条件を与えて電圧・電流波形を解析した結果を表1に示す。表1の解析結果を用いて、初期条件を実際の場合に合わせて設定しながら順次波形を計算していけば、多重再発弧現象のシミュレーションが可能であり、これによって発生サージの予測ができる。

図4にシミュレーション波形と実測波形とを示す。シミュレーション波形は実測波形によく一致し、現象をよく再現できることが分かる。以下、実測値との比較、及びシミュレー

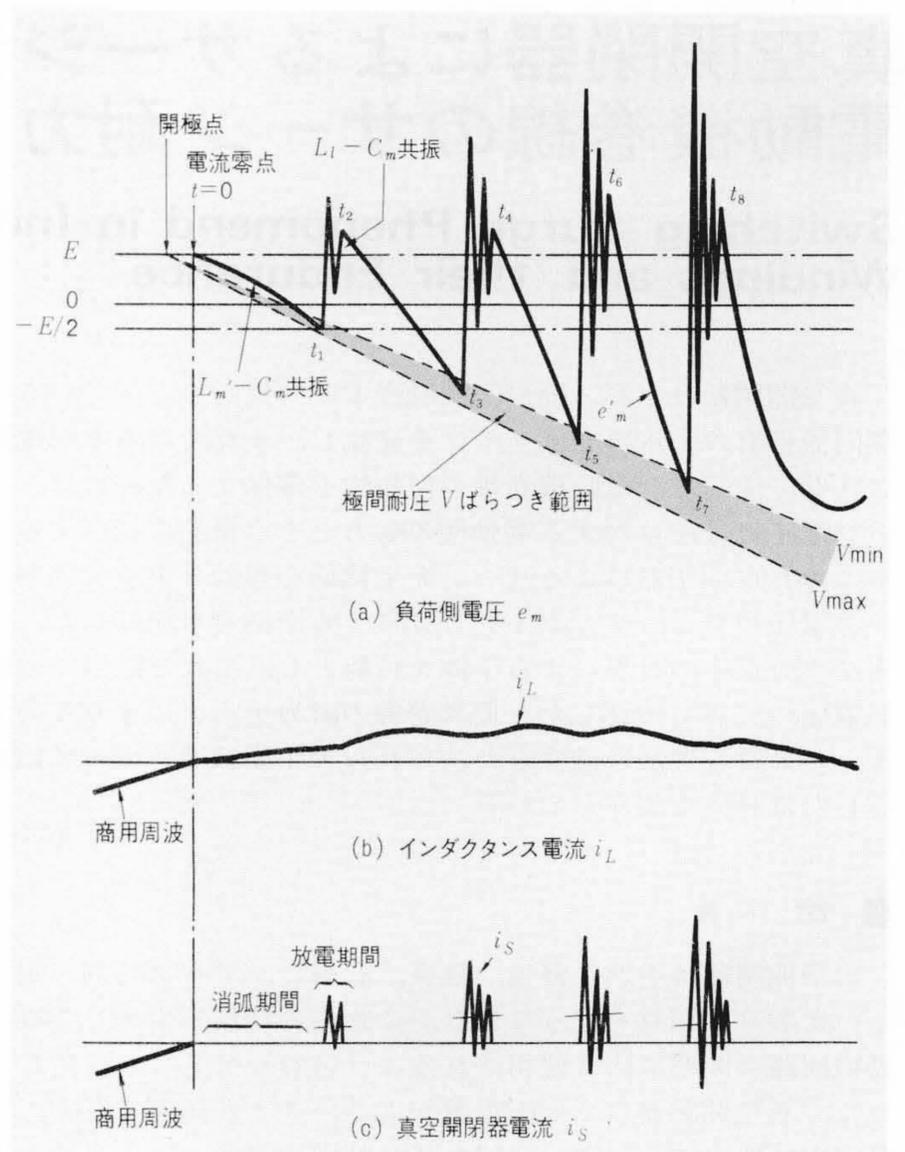


図2 多重再発弧現象の説明図 しゃ断時の多重再発弧現象の説明図を示す。真空開閉器は高周波消弧性能が優れているため、大きな過電圧が発生する。

ションによる発生サージの予測結果について述べる。

(1) 実測値と計算値との比較

図5は75kW 4極3.3kV誘導電動機において実測値と計算値との比較を示したものである。発生電圧は計算値が実測値より若干高くなるが、サージ抑制用コンデンサの容量によるサージ電圧の低下傾向などはよく一致している。また、表2は同様に110kW 4極6kV誘導電動機の比較例を示すものであるが、最大サージ電圧、及び波頭長が極めてよく一致しており、シミュレーションにより発生サージの予測が可能であることが確認できた。

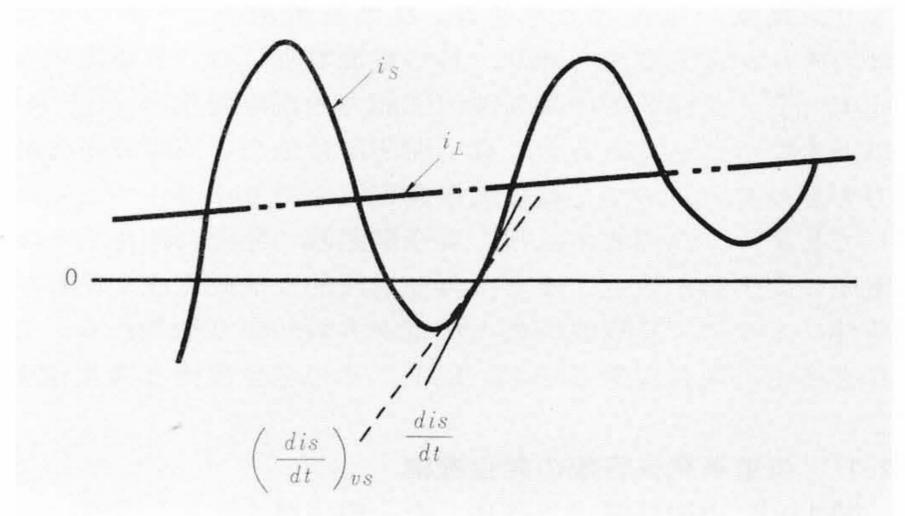


図3 続弧の説明図 図2で i_L が増加してくると、放電期間における i_s の電流零点直前の変化率 $\frac{di_s}{dt}$ が真空開閉器の消弧限界 $(\frac{di_s}{dt})_{vs}$ まで減衰しないうちに i_s が電流零点を通らず、商用周波半サイクル続弧し多重再発弧が停止する。

表1 放電期間及び消弧期間における電圧、電流の解析結果 多重再発弧現象期間中の電圧、電流を任意の初期条件を与えて解析したものである。各数式中の記号は図1、図2による。

	放 電 期 間	消 弧 期 間
初 期 条 件	$i_L(0) = I_{0N}, e_m(0) = E_{0N}$	$i_L(0) = I_{AN}, e_m(0) = E_{AN}$
真 空 開 閉 器 電 流 i_s	$i_s = I_{0N} + \frac{E'}{L_m} t + I_{cp} \exp(-\alpha t) \sin(\beta t - \varphi_c)$	
インダクタンス電流 i_L	$i_L = I_{0N} + \frac{E'}{L_m} t$	$i_L = I_{LP} \exp(-\alpha' t) \sin(\omega_m t + \varphi_L)$
負 荷 端 子 電 圧 e_m	$e_m = E' - (E' - E_{0N}) A \exp(-\alpha t) \cos(\beta t - \phi)$	$e_m = E_{PN} \exp(-\alpha' t) \cos(\omega_m t + \phi')$
定 数	$\alpha = \frac{R_L}{2L_L}, Z_1 = \sqrt{\frac{L_L}{C_m}}, \delta = \frac{R_L}{2Z_1}$ $\beta = \sqrt{\frac{1}{L_L C_m} - \left(\frac{R_L}{2L_L}\right)^2}$ $\varphi_c = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\delta^2} \cdot I_{0N}}{\frac{E' - E_{0N}}{Z_1} + \delta I_{0N}} \right)$ $I_{cp} = \sqrt{\left(\frac{E' - E_{0N}}{Z_1} + \delta I_{0N} \right)^2 + I_{0N}^2}$ $A = \sqrt{1 + \left(\frac{\delta + \frac{Z_1 I_{0N}}{E' - E_{0N}}}{\sqrt{1-\delta^2}} \right)^2}$ $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\delta + \frac{E_1 I_{0N}}{E' - E_{0N}}}{\sqrt{1-\delta^2}} \right)$	$\alpha' = \frac{1}{2R_m' C_m}, Z_2 = \sqrt{\frac{L_m'}{C_m}}, \delta' = \frac{Z_2}{2R_m'}$ $\omega_m = \sqrt{\frac{1}{L_m' C_m} - \left(\frac{1}{2R_m' C_m}\right)^2}$ $\varphi_L = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\delta'^2} I_{AN}}{\frac{E_{AN}}{Z_2} + \delta' I_{AN}} \right)$ $I_{LP} = \sqrt{I_{AN}^2 + \left(\frac{E_{AN}}{Z_2} + \delta' I_{AN} \right)^2}$ $E_{PN} = \sqrt{E_{AN}^2 + \left(\frac{\delta' E_{AN} + Z_2 I_{AN}}{\sqrt{1-\delta'^2}} \right)^2}$ $\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\delta' E_{AN} + Z_2 I_{AN}}{\sqrt{1-\delta'^2} E_{AN}} \right)$

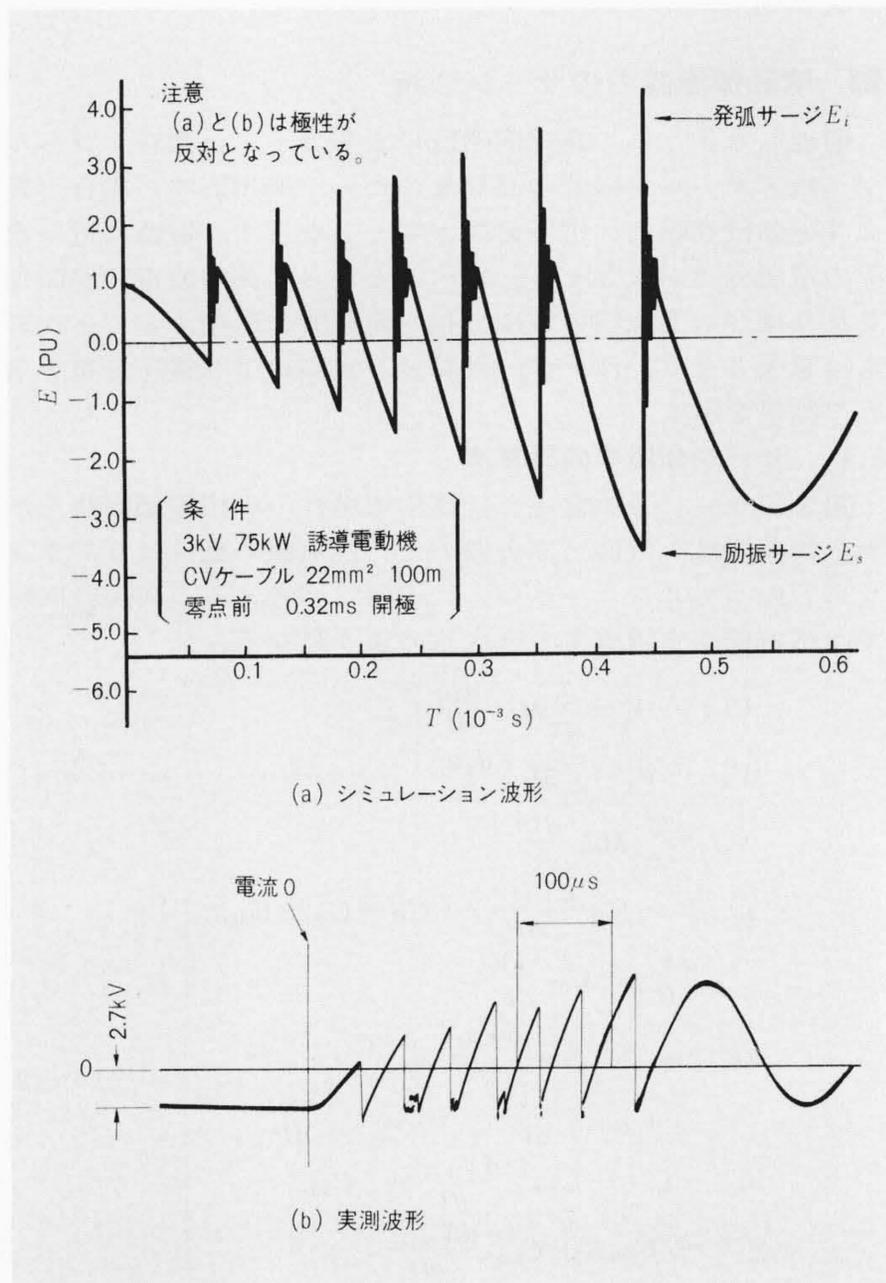


図4 実測波形とシミュレーション波形との比較 シミュレーション波形は、実測波形と極めてよく一致し現象をよく再現している。

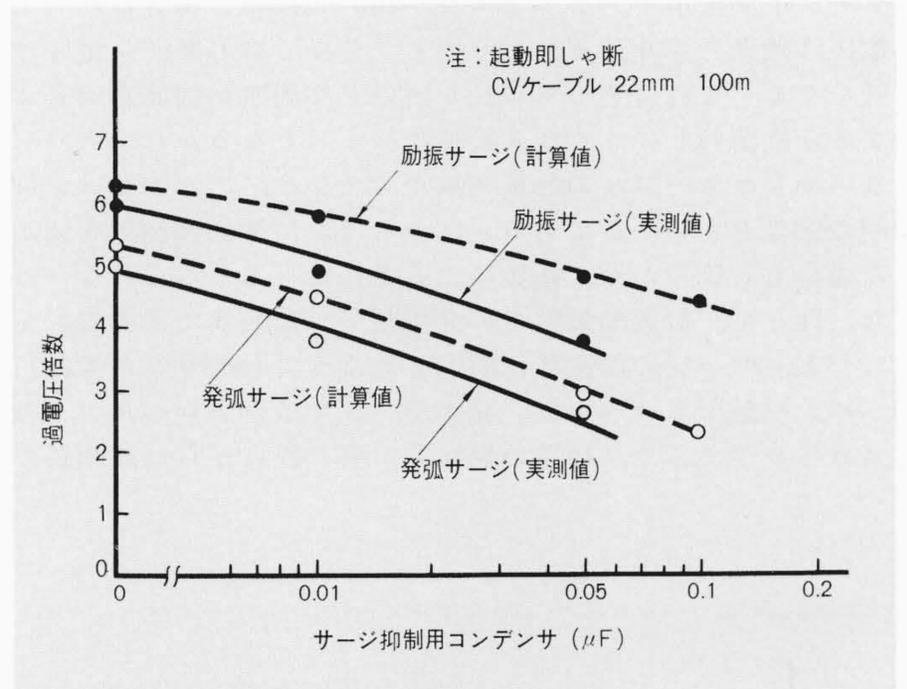


図5 発生サージ実測値と計算値との比較(1) 75kW 4P 3.3kV誘導電動機での比較例を示す。計算値が実測値より若干高い値となるが、サージ抑制用コンデンサの容量増加による低下傾向はよく一致した。

表2 発生サージ実測値と計算値の比較(2) 110kW 4P 6kV誘導電動機での比較結果を示す。最大サージ電圧、及びサージ波頭長が極めてよく一致した。

サージ種類	区分	実 測 値			計 算 値	
		測定数(回)	最大サージ電圧(倍)	波頭数(µs)	最大サージ電圧(倍)	波頭長(µs)
投入サージ	発弧サージ	33	2.86	0.8~1.0	3.06	0.7
しゃ断サージ(投入即しゃ断)	"	10	5.10	"	5.10	"
	励振サージ	"	4.90	100	4.82	107

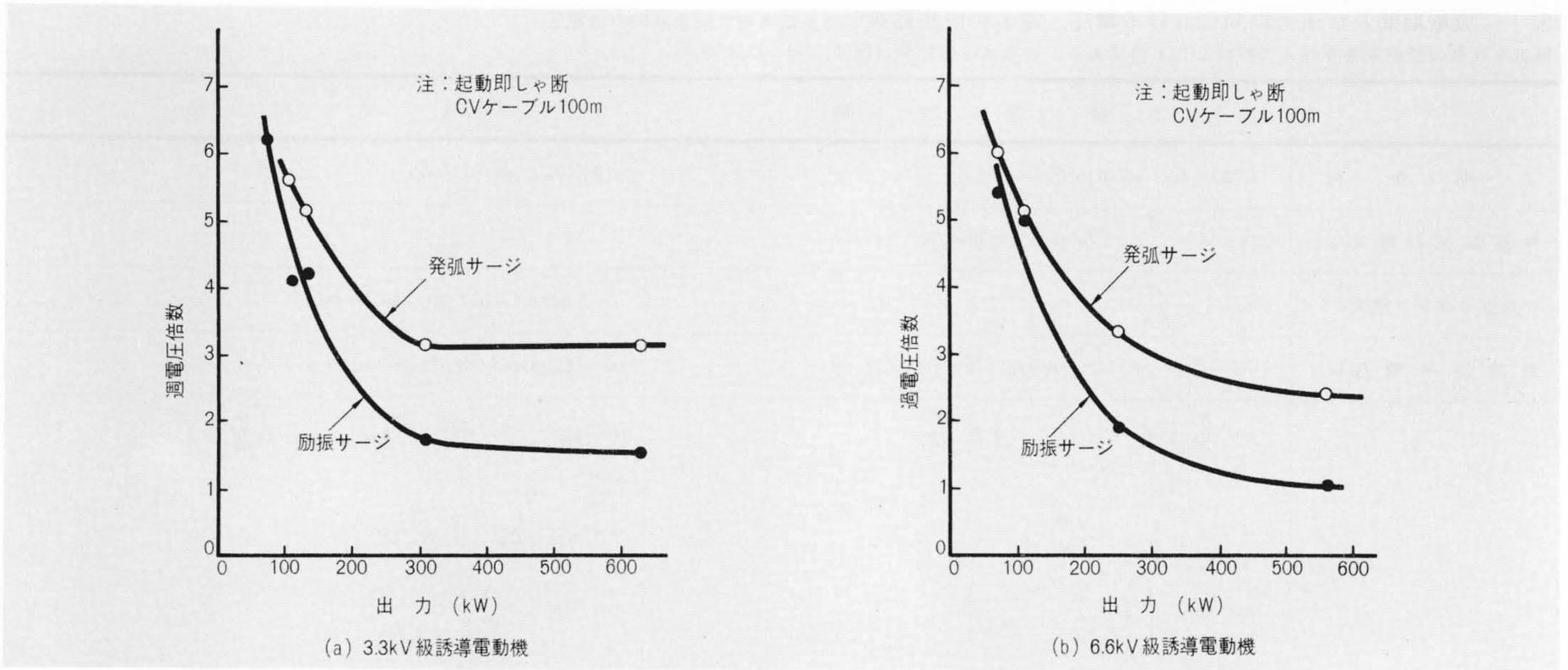


図6 電動機出力定格と発生サージ シミュレーションにより、出力定格と最大発生サージとの関係を予測した。3.3kV級、6.6kV級とも200kW以下の小容量機がサージ電圧が高くなる。

(2) シミュレーション計算による発生サージ予測

図6は誘導電動機出力定格と発生サージ電圧との関係を示す。サージ電圧は200kW以下の小容量機が過酷となり、大容量機はサージ電圧が低い。図7にケーブル長を変えた場合のサージ予測を示す。ケーブル長が100~200mの場合にサージ電圧は最大となり、それより短くても長くてもサージ電圧は低くなる。これはケーブル長が短いと高周波の周波数が高くなるので消弧しにくくなり続弧のケースとなるからであり、長い場合はケーブルの静電容量が大となり、これがサージ抑制の働きをするからである。以上のほかに電動機極数を変えた場合も計算したが、極数による差はほとんどみられなかった。従って、最過酷条件での発生サージは図6で代表できる。

一方、サージの周波数は前述したように励振サージで数百ヘルツ~数十キロヘルツ、発弧サージで数百キロヘルツ~数メガヘルツであり、後述の巻線分担率の観点からは波頭長の

短い、すなわち周波数の高い発弧サージが厳しくなり、数々の計算結果によると最過酷条件で $0.3\mu s$ となる。図5に示すようにサージ抑制用のコンデンサを回路に並列に接続すると、サージ電圧が低下するうえ波頭長が長くなり、電動機巻線の保護に効果大きい。

3 電動機巻線内のサージ分担

前述したように、真空開閉器によるサージは数百キロヘルツ~数メガヘルツ程度の高周波のため、商用周波の場合と異なり電動機巻線内の電圧分担が均一とならず、電源に近い巻線の電圧分担が大となる。このことから、高周波電圧が印加された場合の巻線内の電圧分担を定量的に把握することが非常に重要となる。以下に、計算及び実測により電圧分担を求めた結果を示す。

3.1 サージ分担率の計算法

図8にサージ分担電圧を計算する場合の単相等価回路を示す。対象回路の電源は高周波のため、巻線の抵抗はリアクタンスと比べて非常に小さいので省略して考える。同図の回路で回路方程式を誘導すると次式のようなになる。

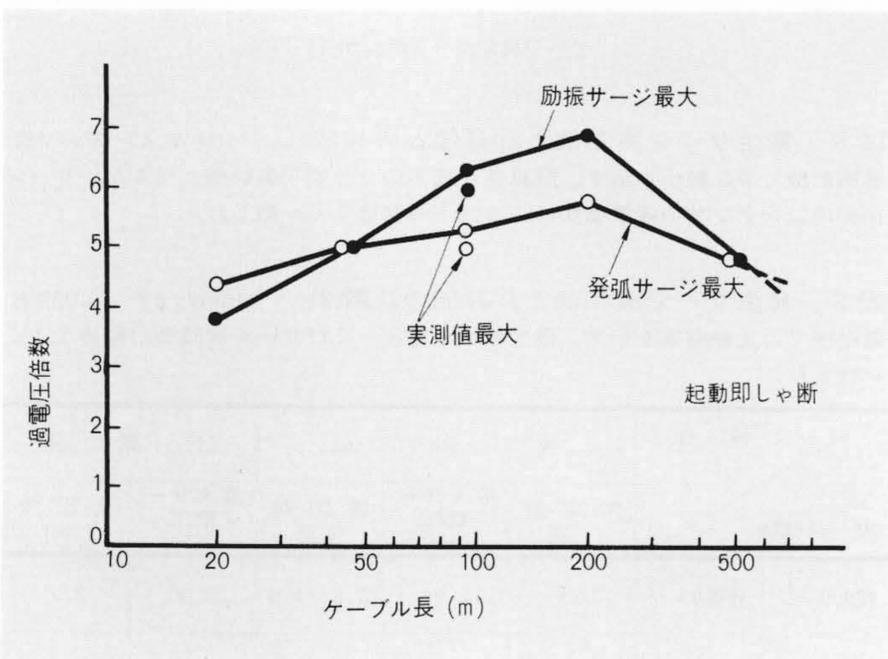


図7 ケーブル長と発生サージ 75kW 4P 3.3kV誘導電動機でケーブル長を変えた場合のシミュレーションによる予測結果を示す。ケーブル長100~200mで最大値となる。

$$\left. \begin{aligned}
 V(t) - V_1 &= \sum_{q=1}^n M_{1q} \frac{diq}{dt} \\
 V_{k-1} - V_k &= \sum_{q=1}^n M_{kq} \frac{diq}{dt} \\
 V_{n-1} &= \sum_{q=1}^n M_{nq} \frac{diq}{dt}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 i_1 - i_2 &= -C_{s1} \frac{dV(t)}{dt} + (C_{s1} + C_{m1} + C_{s2}) \frac{dV_1}{dt} - C_{s2} \frac{dV_2}{dt} \\
 i_k - i_{k+1} &= -C_{sk} \frac{dV_{k-1}}{dt} + (C_{sk} + C_{mk} + C_{sk+1}) \frac{dV_k}{dt} - C_{sk+1} \frac{dV_{k+1}}{dt} \\
 i_{n-1} - i_n &= -C_{sn-1} \frac{dV_{n-1}}{dt} + (C_{sn-1} + C_{mn-1} + C_{sn}) \frac{dV_{n-1}}{dt}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

(1),(2)の方程式において印加サージ電圧 $V(t)$ と初期条件を与え各節点の電圧 $V_1, V_2, \dots, V_k, \dots, V_{n-1}$ を求めることにより、

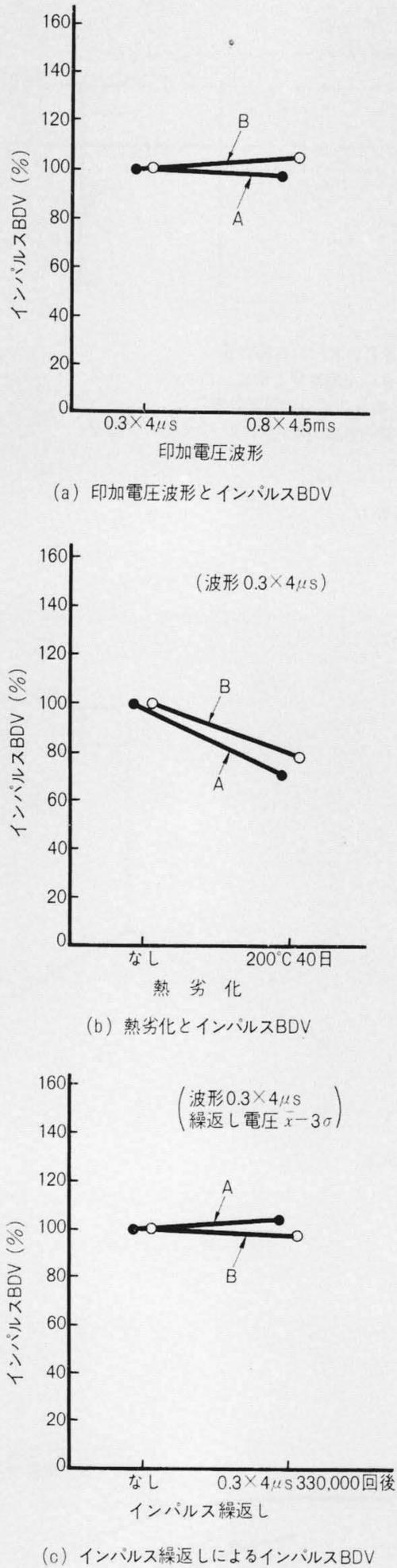


図11 電動機巻線のサージ耐力 電動機巻線のターン間絶縁のサージ耐力を各種条件で測定した結果を示す。

4 電動機巻線のサージ耐力と品質管理

2.3で巻線に加わるサージ電圧を解明したが、これに対する巻線絶縁のサージ耐力について種々検討した結果、及びサージに対する巻線絶縁の品質管理法について述べる。なお以下では、対地絶縁については割愛し、ターン間絶縁についてだけを説明する。

4.1 電動機巻線のターン間絶縁耐力

ターン間絶縁はワニス処理法によっても異なるが、以下はすべて、巻線と鉄心とを一体含浸するF種“HIPACT”絶縁の測定結果であり、ターン間絶縁としては、二重ガラス線(以下、Aと略す)、エナメルガラス二重被覆線(以下、Bと略す)の2種について行なった。

(1) 印加電圧波形とインパルス絶縁破壊電圧(BDV)の関係

図11(a)は印加電圧波形を、μsオーダの0.3×4μs矩形波とmsオーダの0.8×4.5ms開閉インパルス波とし、インパルスBDVを測定した結果を示す。波形による差はほとんどなく、波頭長の異なるものでサージ耐力を測定しても問題がない。

(2) 熱劣化によるインパルスBDVの変化

図11(b)は耐熱寿命の観点から200°C40日のF種相当熱劣化前後におけるインパルスBDVの比較を示す。劣化率はA:30%、B:22%となる。

(3) インパルス繰返しによるインパルスBDVの変化

図11(c)はインパルス繰返し寿命をみるため、初期インパルスBDVの $\bar{x} - 3\sigma$ の値を330,000回印加前後のインパルスBDVを測定した結果について示す。 $\bar{x} - 3\sigma$ のインパルス電圧繰返し印加によっては、サージ耐力は全く低下しないことがこの結果より明らかとなった。

4.2 サージに対する品質管理

ターン間インパルス耐力の実測結果より、ターン間絶縁のサージ耐力が明らかとなったが、製品ごとにそれぞれ真空開閉器による発生サージ電圧、及び巻線の電圧分担率が異なるので、要求されるサージ耐力も異なる。この点を考慮し、品質管理法を確立した。

F種“HIPACT”絶縁は、巻線と鉄心が一体ワニス含浸されるので、ワニス含浸後の巻線の交換が困難なため、製造過程のワニス含浸前に全製品に対し、インパルス電圧印加によりデバッグを実施している。印加電圧は次式により決定する。

$$V_q = \frac{V \times \delta}{(1-d) \times \lambda} \times S_f \dots\dots\dots(4)$$

ここに、V:真空開閉器の発生サージ(シミュレーション計算による)

δ:最大電圧分担率

d:劣化率(熱劣化など)

λ:ワニス処理によるインパルスBDV改善率

S_f:安全率

以上のQC試験により、非常に信頼性の高い電動機となっている。

5 結 言

以上、真空開閉器を電動機回路に適用した場合のサージ発生機構と電動機巻線のサージ耐力について述べたが、これらを要約すると、

- (1) サージの発生機構を明らかにし、シミュレーションによる発生サージの予測を可能とした。
- (2) 電動機巻線内のサージ分担率の計算を可能にした。
- (3) 電動機巻線のサージ耐力を明らかにし、シミュレーションによる発生サージとサージ分担率との計算に基づく品質管理法を実施し、信頼性の高い電動機を製作している。

参考文献

- (1) 黒沢、菅原:「真空スイッチの多重再発弧サージの予測」電気学会開閉保護装置研究会資料 PD-74-6(昭49-6)