

真空スイッチの開閉サージと
その抑制に関する研究

昭和53年8月

村井裕

内 容 梗 概

真空スイッチは小形、軽量、無火花、省力化に適しているなどの特長を備え、近代的設備の要請にマッチしたスイッチとして、ビル、工場の配電系統に多数使用されるようになった。しかし真空スイッチの開発段階では、誘導性負荷回路における電流さい断現象に伴う開閉異常電圧が問題となり、接点材料に関する研究が進められた結果、電流さい断現象に伴う異常電圧は低減されつつあった。ところがその後も高圧誘導電動機回路において真空スイッチの開閉に伴う異常電圧で電動機の焼損事故が発生しているため、その原因を解明することが必要となってきた。

本論文は、このような背景をもとに電動機回路の真空スイッチの開閉に伴う異常電圧の発生機構とその電圧の抑制について究明した研究の成果をまとめたものである。

第1章では、真空スイッチを適用した回路において、電動機の事故率が比較的高いことを明らかにし、事故が発生した電動機の巻線を分解して検討した結果、急しゅんな波頭を有するサージが電動機巻線に進入してきたことを明らかにしている。つぎに真空スイッチの電流さい断に関する実験および実回路による実験を通じて、異常電圧の発生は電流さい断現象によるのではなく、従来全く考えられなかった多重再発弧現象によるものであることを明らかにした。

第2章では、第1章で得られた結果をもとに基礎的な実験回路を構成し、単相回路における多重再発弧現象に伴う異常電圧の発生を確認するとともに、この現象を解析して異常電圧の発生が真空スイッチの高周波電流しゃ断による強制電流さい断現象によることをはじめて明らかにしている。また三相回路における強制電流さい断現象を考察し、三相同時しゃ断現象の存在を明らかにしている。さらにこれらの現象の発生条件を考察し、最悪の場合 3.3 kV 回路で 30 ~ 40 kV の異常電圧が発生しうることを明らかにしている。

第3章では、第2章で明らかにされた異常電圧発生機構に含包される真空スイッチの特性および回路の特性を詳細に解析し、種々の回路条件における多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象のシミュレーションを行なって異常電圧発生の様相を明らかにしている。その結果通常のケーブル系統では多重再発弧現象によって約60%の回路で危険性が高いこと、および三相同時しゃ断現象によって 3.3 kV 50 kW 以下の負荷では危険性が高いことを明らかにしている。

第4章では、サージが電動機巻線に進入した場合のターン間分担電圧に注目し、実機による実測結果をもとにターン間分担電圧をサージの波頭長の関数として与えた。この結果と第3章で得られた結果から、通常の電動機巻線の絶縁強度では真空スイッチが発生するサージ電圧に耐えられず、何らかの保護装置が必要であることを明らかにしている。

第5章では、保護装置として従来から使用されてきた機器の効果について検討を加え、必ずしも十分な性能を備えていないことを明らかにし、新しく可飽和リアクトルによる保護方式を提案している。この保護装置によって、はじめて高周波電流の抑制による異常電圧の抑制とサージの波頭緩和の両機能を具備させることが可能となり、優れた保護効果を発揮できることを明らかにしている。最後にこの保護装置を使用した場合の効果を定量的に解析し、真空スイッチの安全な適用に対する指針を与えた。

DOC
1978
15
電気系

目 次

第1章	序 論	1
1.1	概 説	1
1.2	真空スイッチの適用と電動機事故との関連について	2
1.3	真空スイッチの電流さい断と異常電圧発生に対する考察	7
1.4	実回路における異常電圧の発生と考察	16
1.4.1	実験および結果	16
1.4.2	実験結果による電動機絶縁損傷事故の考察	21
1.5	真空スイッチによる電動機絶縁損傷事故に対する考察結果と今後の研究課題	21
1.5.1	考察結果	21
1.5.2	今後の課題	22
第2章	多重再発弧に伴う開閉サージ発生機構の研究	23
2.1	緒 言	23
2.2	多重再発弧現象による異常電圧の発生	23
2.2.1	実 験	23
2.2.2	波形の解析	27
2.2.3	電圧拡大の条件と異常電圧	32
2.3	三相同時しゃ断現象による異常電圧の発生	33
2.3.1	三相回路における誘導電流に関する実験	34
2.3.2	誘導電流による強制さい断実験	40
2.3.3	三相同時しゃ断の条件と異常電圧	43
2.4	結 言	44
第3章	開閉サージ現象の解析的研究	46
3.1	緒 言	46
3.2	真空スイッチの特性	48
3.2.1	耐圧特性	52
3.2.2	高周波しゃ断特性	56
3.3	回路条件	60

3.3.1	再起電圧	60
3.3.2	高周波電流	61
3.4	再発弧現象のシミュレーション	64
3.5	結 言	73
第4章	真空スイッチの開閉サージに対する電動機巻線の特性	74
4.1	緒 言	74
4.2	電動機巻線内のサージ電圧分布	74
4.2.1	ターン分担率	75
4.2.2	コイル分担率	78
4.3	電動機巻線の絶縁強度	81
4.4	結 言	82
第5章	保護方式に関する研究	83
5.1	緒 言	83
5.2	従来の保護方式に対する考察	83
5.3	サージ抑制リアクトル	87
5.3.1	サージ抑制リアクトルの機能	89
5.3.2	高周波電流抑制の再発弧現象に及ぼす効果	91
5.4	保護システムとその理論	93
5.4.1	保護システムにおけるサージの発生	94
5.4.2	サージに対する電動機の寿命	97
5.4.3	電動機の寿命の数値計算例	99
5.5	結 言	104
第6章	本研究成果の要点	107
謝 辞		110
参考文献		111
付 録		114

記 号 表

C	電動機等価回路の漂遊容量
C_0	電源コンデンサ
C_c	三相ケーブルの一相当りの静電容量
C_m	電動機巻線の一相当りの漂遊容量
C_p	ケーブルを含めた電動機等価回路の漂遊容量
C_s	ケーブルを含めた電動機の一相当りの漂遊容量
c_c	ケーブルの一相当り単位長さ当りの静電容量
d	真空スイッチの極間距離
E	真空スイッチ極間の平均電界強度
E_0	ワイブル分布の最低絶縁破壊電界強度
E_g	電源の対地電圧波高値
E_m	真空スイッチ絶縁破壊電界の最頻値
E_p	ワイブル分布の尺度パラメータ
E_r	回復電圧
E_s	標準電圧
E_{DC}	直流電圧
$F(E)$	真空スイッチの絶縁破壊の累積確率関数
$f(V)$	再発弧電圧の確率密度関数
f	再起電圧周波数
f_0	商用周波数
G	再起電圧振巾の拡大率
$g(V, V_1)$	三相同時しゃ断における第2相真空スイッチの絶縁破壊電圧の確率密度関数
g	電動機巻線中の進行波速度
I	しゃ断電流 (実効値)
I_0	直流電流
I_c	さい断電流 (L_0 中を流れる電流とも解されることがある)
\bar{I}_c	平均のさい断電流
I_e	三相同時しゃ断のときの第2相負荷電流瞬時値
i	真空スイッチを流れる電流

i_h	高周波電流
i_L	電動機等価回路のインダクタンスを流れる電流
K	電動機のサージインピーダンスに及ぼす極数の効果に対する係数
k	真空スイッチの開極に伴う平均耐圧上昇速度
L	ケーブルを含めた高周波回路の一相当りの漂遊インダクタンス
L_o	電動機等価回路のインダクタンス
L_m	電動機巻線の一相当りの漏れインダクタンス
L_s	真空スイッチ近傍の一相当りの漂遊インダクタンス
l	ケーブル長
m	ワイブル分布の形状パラメータ
N_o	基準ターン間電圧 v_o における絶縁破壊までの許容印加回数
n	再発弧継続回数
\bar{n}	平均再発弧継続回数
n_c	真空スイッチの電源側ケーブル本数
P	電動機の事故率
P_j	j 回目まで再発弧が継続する確率
p_j	j 回目の再発弧の発生確率
Q	電動機の kVA
R	再起電圧調整用抵抗
R_s	標準抵抗
S	サージ抑制用可飽和リアクトルのコア断面積
St	真空スイッチの開極速度
s	電動機のスベリ
t_f	サージの波頭長
V	真空スイッチの再発弧電圧
V_o	電源コンデンサ充電電圧
V_1	三相同時しゃ断のときの第 1 相の再発弧電圧
V_a	電動機巻線に印加されるサージ電圧波高値
V_{arr}	避雷器の放電開始電圧
V_{bn}	くり返し再発弧の各再発弧電圧
V_{pn}	くり返し再発弧のときの第 2.1 図(P)点の電圧
V_c	三相同時しゃ断を誘発させる第 1 相の最低再発弧電圧

V_D	真空スイッチの再起電圧に対する耐圧
V_{Dh}	真空スイッチの高周波再起電圧に対する耐圧
V_i	ケーブルに進入する進行波の波高値
V_{l-l}	線間電圧(実効値)
V_m	再起電圧波高値
v	真空スイッチ極間電圧
v_0	ターン絶縁破壊に対する基準ターン間電圧
v_L	負荷端子間電圧
v_s	電動機巻線の絶縁劣化を起す最小ターン間電圧
v_t	電動機巻線のターン間に印加される電圧
W	再起電圧振動数および周波数に対するケーブル長の効果を表現する重み関数
Z_0	ケーブルを含めた電動機回路のサージインピーダンス
Z_c	ケーブルのサージインピーダンス
Z_m	電動機のサージインピーダンス
Z_s	真空スイッチの電源側サージインピーダンス
z	高周波回路のサージインピーダンス
α	再起電圧の減衰定数
β	高周波電流の減衰定数
r	電動機の負荷率
δ	高周波電流の半波減衰率
η	三相ケーブルの相間結合係数
λ	再起電圧半波減衰率
ξ_c	サージ電圧のコイル分担率
ξ_t	サージ電圧のターン間分担率
σ_c	さい断電流の分布に対する標準偏差
σ_v	三相真空スイッチの耐圧の分布に対する標準偏差
τ	サージの等価波頭長
$\varphi(I_c)$	さい断電流の確率密度関数
ψ	再起電圧の振巾率
ω	再起電圧角周波数
ω_0	商用角周波数

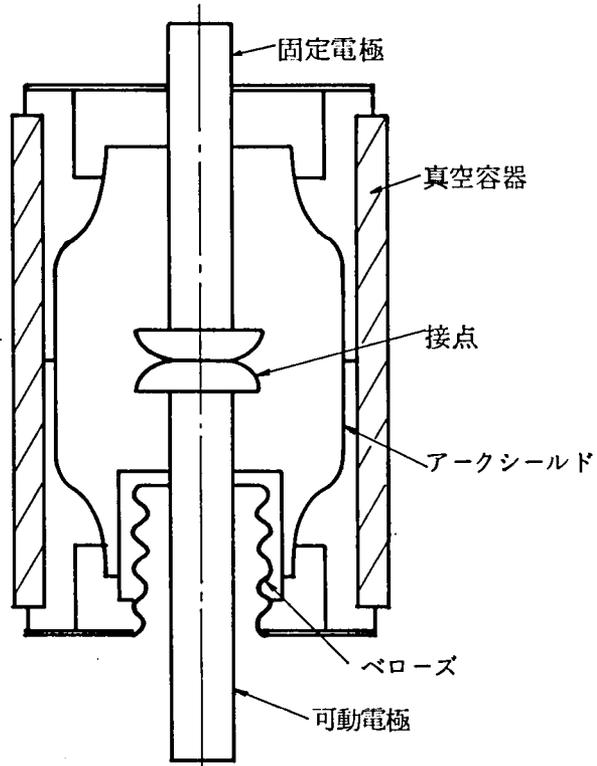
第1章 序 論

1.1 概 説

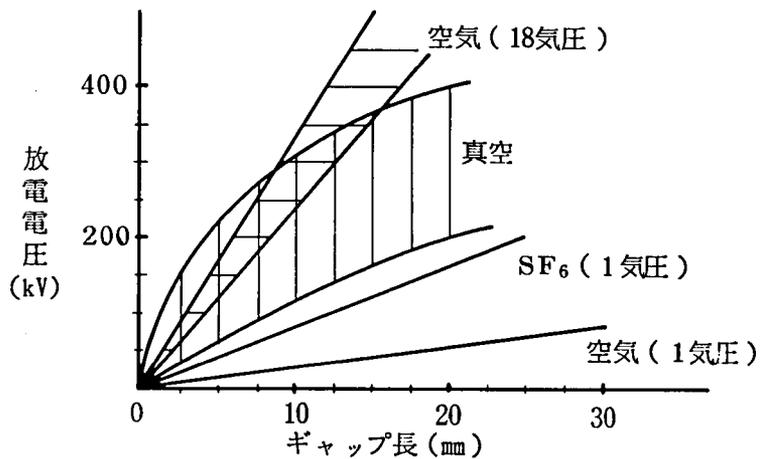
真空スイッチとは第1.1図に示すように、ガラスまたはセラミックスなどの絶縁物からなる真空容器中に、対向した一对の電極を配置し、その一方を金属製のベローズを介し可動にするという簡単な構造を有するスイッチ

である。ここで真空とは、真空容器内部に残留する気体分子の平均自由行程が容器の代表的寸法（一般に電極間距離、電極とアークシールドの距離のオーダーをいう）と比較して十分大きい状態を意味しており、例えば、電極間距離が1 cmの電極間距離に対しては 10^{-3} mmHg以上の真空度となる。実際の真空スイッチでは 10^{-6} ~ 10^{-7} mmHgまで真空度が高められている。真空スイッチのもう一つの方式として、対向電極を固定とし第3電極によって放電をトリガする方式のものがあるが、特殊な用途にのみ使用されているので、本論文では第1.1図に示す構造の真空スイッチが研究の対象である。

さて第1.1図に示す真空スイッチで交流をしゃ断すると、まずアークが接点間に発生し、接点間の空間には接点から金属蒸気が放出される。電流が零点にくると、発生した金属蒸気は急速に拡散し、接点およびアークシールドに吸着される結果、接点間の空間は急速に真空度を回復し、



第1.1図 真空スイッチの構造



第1.2図 各種媒体中の耐圧

それに伴って極間の耐圧が回復する。高真空に回復した接点間隙は第 1.2 図に示すように、他の媒体中の間隙と比較しても高い耐圧を有する⁽¹⁾ので、真空スイッチは比較的短い接点間距離でも大電流をしゃ断することができ、アーク時間も 1 サイクル以下という特徴を有している。したがって真空スイッチは、

- (1) しゃ断に必要な間隙長が小さく、かつ拡散能力がすぐれているので、消弧室を小形化でき、したがって操作機構も小形軽量化できる。また多頻度開閉性能も優れ、操作時の騒音が低い。
- (2) アーク時間が短かく接点消耗が少ない。したがって多数回の開閉が無保守に近い状態で可能となる。
- (3) アーク空間が真空容器内であり、火災の心配がない。

などの長所を有している。

かかるしゃ断性能の優秀さが開閉時の異常電圧発生の原因となり、真空スイッチの適用上の問題点を残してきた。まず真空スイッチの適用の初期において、変圧器回路の開閉時に異常電圧を発生することが明らかとなり、その原因が真空スイッチの電流さい断現象であることが指摘された⁽²⁾⁽³⁾。さらに真空スイッチのさい断電流と、接点材料の物理的特性との関係が明らかにされ⁽⁴⁾、さい断電流が低い接点材料の開発に対して方向が示された。その後の接点材料改良に対する多大の努力の結果、負荷開閉に使用される真空コンタクタ用真空スイッチでは、さい断電流は 1 A 以下に低下され、系統故障時の短絡電流しゃ断責務を負うしゃ断器用真空スイッチでもさい断電流は 2～4 A に低下された。この値は真空コンタクタ用真空スイッチと比較してまだ若干高いが、これは大電流しゃ断能力が要求されるために、接点材料の選択範囲が制限を受けるためである。

しかし、さい断電流が低い真空スイッチが開発されても、なお異常電圧発生に対して危惧の念がもたれた。すなわち高圧誘導電動機回路に比較的さい断電流の低い真空スイッチを適用しても、なお電動機の焼損事故が発生したからである。

そこで本章では、まず高圧誘導電動機回路における焼損事故と真空スイッチの関連について述べ、真空スイッチが電動機の事故と無関係でないことを明らかにする。つぎに真空スイッチの開発段階から問題となっていた電流さい断現象に関して行なった実験の結果について述べ、異常電圧の発生について検討を加える。最後に実回路での実測結果について考察を加え、本論文でとり上げるべき研究課題と研究方針を述べる。

1.2 真空スイッチの適用と電動機事故との関連について

従来高圧誘導電動機回路の開閉には、気中開閉器、油入しゃ断器が使用されていた。開閉性

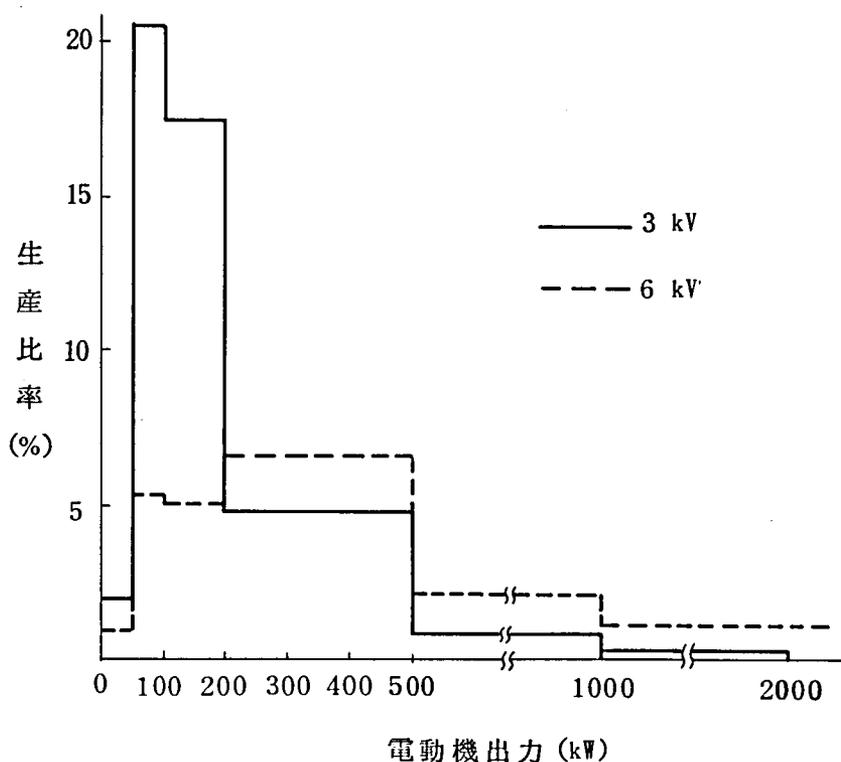
能が優れ、保守の容易な真空スイッチの出現によって、このスイッチが従来の開閉器にかわって電動機回路の開閉用として多数使用されるようになったが、真空スイッチの電動機回路への適用台数の増加とともに電動機の焼損事故件数が増加する傾向があらわれた。そこで真空スイッチが適用された回路と他の種類の開閉器が適用された回路とにおいて、事故の発生状態を比較するために焼損事故件数を詳細に調べた。その結果第 1.1 表に示すように、真空スイッチを適用した回路での事故発生率は、他の開閉器の場合と比較して明らかに大きく、真空スイッチの適用上の問題が明らかにされた。すなわち後述する真空スイッチの開閉現象がこの事故発生と深く関係していることが予想された。

さらに電動機の事故発生状態を知るために、電動機の電圧および出力別に生産台数と真空スイッチを使用した場合の事故発生との関連を調査した。第 1.3 図は電動機の出力別の生産台数

第 1.1 表 開閉器による電動機事故率(%)

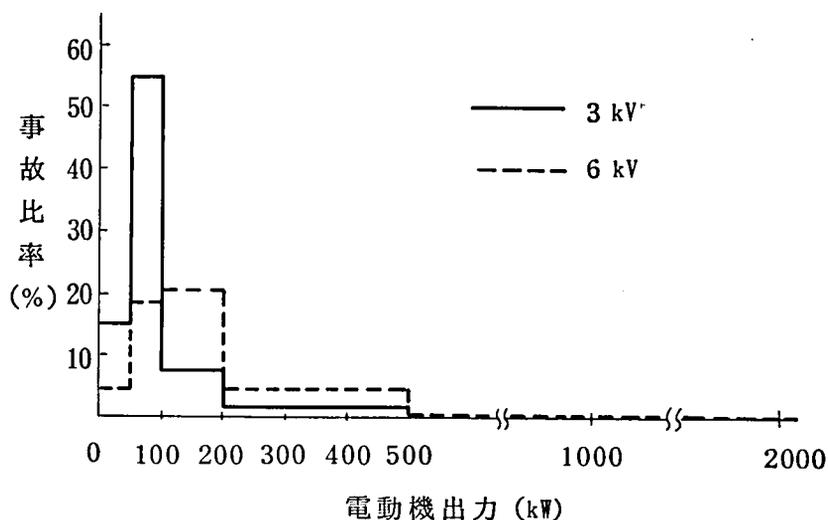
開閉器の種類 回路電圧 (kV)	(A) 真空スイッチ	(B) その他の開閉器
3	0.526	0.174
6	5.8	0.975

〔注〕 事故率 = $\frac{(A) \text{または} (B) \text{の電動機事故発生件数}}{(A) \text{または} (B) \text{の電動機回路に適用された全台数}}$

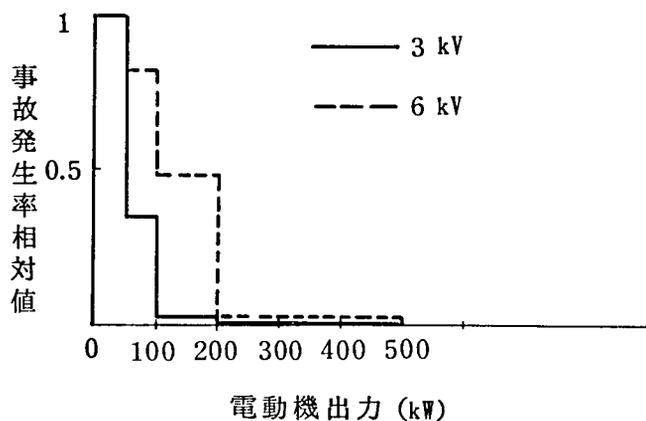


第 1.3 図 高圧誘導電動機生産比率

の比率を示すグラフであり、第 1.4 図は真空スイッチを使用した場合の事故電動機について、電動機の電圧および出力の関数として事故発生の相対比率を示したものである。これらの図から電動機出力の関数として生産台数に対する事故発生率の相対値を求めることができる。第 1.5 図はこの事故発生率の最大値を 1 として電動機出力の関数として相対値を示したものである。第 1.5 図から事故発生率は電動機出力が小さい程大きくなる傾向にあることがわかる。定格電圧が同一でも、電動機出力が小さくなると事故



第 1.4 図 事故発生比率と電動機出力

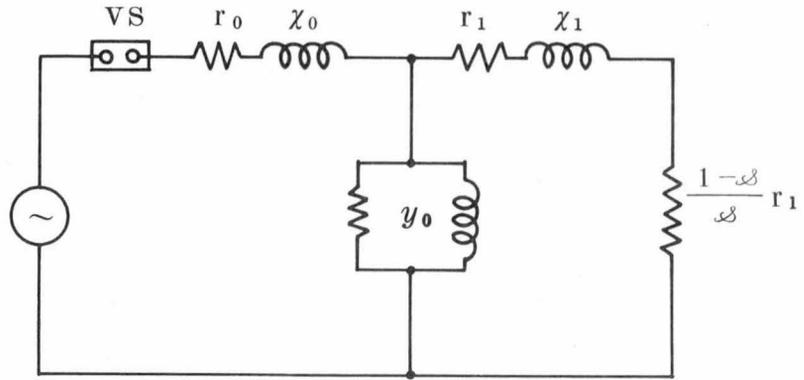


第 1.5 図 生産台数に対する事故発生率と電動機出力

発生率が増加することは、次のように考えられる。すなわち一般的に電動機などの回転機の巻線のサージインピーダンスは、定格電圧が等しい場合容量の増加とともに低下する傾向にある⁽⁵⁾。したがって真空スイッチの開閉時の異常電圧発生に関して電動機巻線のサージインピーダンスが関与していることが予想された。

また電動機事故が発生した回路の条件として、多くの分岐をもつ比較的大きな系統での事故が多く、電動機の使用条件としては起動停止が頻繁であり、かつ起動電流が減衰するまでにしゃ断するような使用条件での事故が多いという傾向がみられた。後者の条件については次のように考えられる。すなわち第 1.6 図に示す電動機の等価回路において、起動時にはスベリ s が 1 に近く、力率が低いと同時に電源電圧の殆んどが X_0 および X_1 に分担される。この状態で真空スイッチ VS をしゃ断すると、 X_0 および X_1 が分担した電圧、すなわち電源電圧を波高値とした振動が巻線の漂遊容量を通して負荷側に発生する。これに対して回転子の回転数が充分上

昇し定格運転状態になると、スベリ率は5%程度になるので、力率が高く χ_0 および χ_1 が分担する電圧は小さくなる。したがってこの状態でVSをしゃ断しても負荷側に発生する振動電圧の波高値は小さい。



- VS : 真空スイッチ
- χ_0, r_0 : 一次漏れリアクタンス, 抵抗
- χ_1, r_1 : 二次漏れリアクタンス, 抵抗
- y_0 : 励磁アドミッタンス

第1.6図 電動機の等価回路

このように電動機の運転状態によって、電動機端子にあらわれる電圧は変化するが、もししゃ断時に電流さい断が発生すると、上記の振動電圧

に電流さい断による電圧が加算されるので、起動時の突入電流のしゃ断の方が定格運転時のしゃ断と比べて、より高い電圧が発生することが予想される。

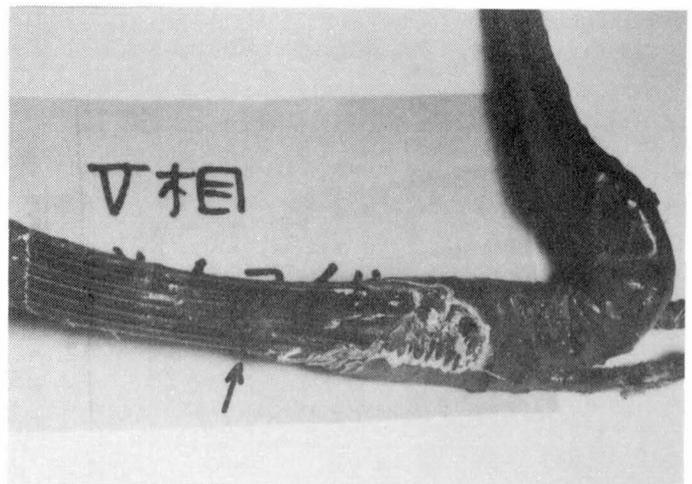
以下では起動時の突入電流のしゃ断を突流しゃ断、起動完了後の定速運転時のしゃ断を定速しゃ断、さらに定速しゃ断のうち定格負荷電流のしゃ断を定格電流しゃ断ということにする。

つぎに事故が発生した電動機の巻線を分解し、絶縁破壊の位置を調査した。その結果を第1.2表に示したが、絶縁破壊にはコイルの対地絶縁の破壊とコイルのターン間絶縁の破壊の二種類がみられる。ターン間絶縁破壊は対地絶縁破壊の3倍の率で発生しているが、ターン間絶縁破壊から対地絶縁破壊に至る場合も考えられるので、

第1.2表 絶縁破壊の種類と比率、発生位置

種類	比率	発生位置
ターン間絶縁	75%	端子近傍コイル
対地絶縁	25%	端子近傍コイル

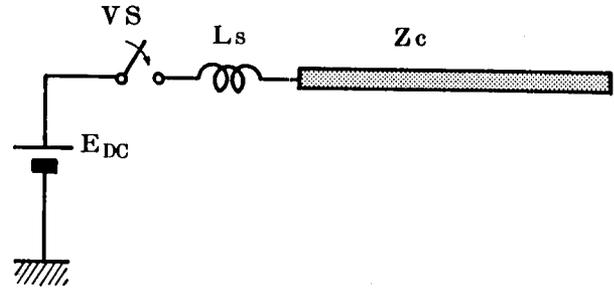
実際にはターン間絶縁破壊が事故原因の75%以上になるものと推定される。そこでターン間絶縁破壊に注目し、コイルを分解してターン間絶縁破壊の位置を調査した。第1.7図はターン間絶縁破壊が発生したコイルを分解した写真の一例であるが、このような絶縁破壊が発生した点のコイル内の位置を調査すると、一例ではあるが第1.8図の



第1.7図 ターン間絶縁破壊の拡大写真

1	2
4	3
5	6
8	7
9	10
12	11
13	14
16	15
17	18
20	19

第 1.8 図 コイルのターン間絶縁破壊の位置



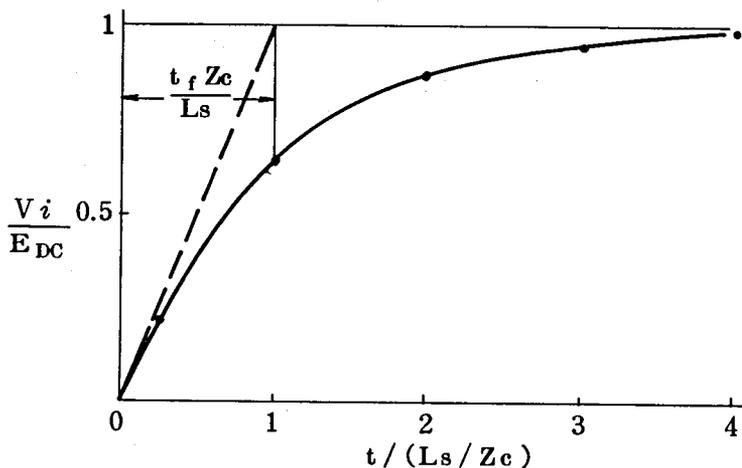
VS : 真空スイッチ
 Ls : 配線の漂遊インダクタンス
 Zc : ケーブルのサージインピーダンス

第 1.9 図 投入サージの計算モデル

コイルの断面図で・印のターン間で絶縁破壊が発生している。図中の番号は素線の巻順を示しており、絶縁破壊の位置は通常の運転状態で負担電圧が高い部分に集中している。

以上の絶縁破壊事故の様相、とくに巻線の端子近傍のコイルに絶縁破壊が集中していることから、何らかの理由で急しゅんな波頭を有するサージが巻線に進入し、そのために電圧分布が端子側コイルに集中した結果と推測された。

波頭の急しゅんなサージの発生については次のように考えられる。すなわち、もし真空スイッチが電流のしゃ断時に電流さい断現象が発生し、異常電圧が発生したものとすると、真空スイッチの極間耐圧が十分高くない場合には真空スイッチの極間が再発弧し、波頭の急しゅんな電圧進行波（以下サージとよぶ）が発生する可能性がある。もし真空スイッチが再発弧すると、どの程度の急しゅんな波頭を有するサージが発生するかを第 1.9 図で検討してみる。第 1.9 図において真空スイッチ VS を閉じ、サージインピーダンスが Z_c のケーブルに直流電圧 E_{DC} を印加する場合を考える。 L_s はスイッチ近傍の漂遊インダクタンスである。VS を閉じたときの



第 1.10 図 投入サージ電圧波形

ケーブル入力端の電圧 V_i は次式で与えられる。

$$V_i = E_{DC} \left(1 - \epsilon^{-\frac{Z_c}{L_s} t} \right) \quad (1.1)$$

したがって

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{Z_c E_{DC}}{L_s} \epsilon^{-\frac{Z_c}{L_s} t}$$

簡単のために第 1.10 図に示すように立上りの電圧上昇率で E_{DC}

まで上昇するまでの時間を考え、その間の時間 t_f を波頭長と考えると、 t_f は

$$t_f = E_{DC} / \left(\frac{dV_i}{dt} \right)_{t=0} = \frac{L_s}{Z_c} \quad (1.2)$$

となる。一般に L_s は数 μH 、 Z_c は 3 相ケーブルの場合後述するように数十 Ω であるから

$L_s = 4 \mu H$ 、 $Z_c = 40 \Omega$ として (1.2 式) に代入すると

$$t_f = 0.1 \mu s \quad (1.3)$$

となり、真空スイッチが再発弧した場合には、かなり急しゅんな波頭を有するサージが発生することが予想される。 t_f については実際のフィールドで最も急しゅんなもので $0.2 \mu s$ のサージが存在することが報告されている⁽⁶⁾。この値は周波数成分では約 1 MHz に相当する。

以上の結果から明らかなように、真空スイッチの電流さい断によって高い異常電圧が発生すると、真空スイッチが再発弧し、波高値が高く、波頭の急しゅんなサージが巻線に進入するので、真空スイッチの電流さい断が実際にどの程度であるかを詳細に求めることが重要となった。

一方対地絶縁の破壊は、先に述べたようにターン間絶縁の破壊から進展したことも考えられるが、電流さい断による異常電圧も原因になり得るので、この点からも電流さい断現象を追求する必要が生じた。

以上の考察から真空スイッチの電流さい断現象が問題であり、この現象による異常電圧発生の実態のは握とその対策が依然として重要であると考えられた。

1.3 真空スイッチの電流さい断と異常電圧発生に対する考察

電流さい断現象とは、しゃ断器で交流電流をしゃ断したとき、交流の自然零点を迎えるまでに突然アークが消滅し、電流が急速に零になる現象である。この現象は真空スイッチに限らず消弧能力の優れたしゃ断器、たとえば少油量形油入しゃ断器、空気しゃ断器などでも見られる現象で、モータ回路をこれらのしゃ断器で開放したときに発生する異常電圧については古くから注目されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

真空スイッチの電流さい断現象に関しては、その開発途上において真空しゃ断器でトランスの励磁電流しゃ断を行なった場合の異常電圧が注目され、真空しゃ断器適用の問題点としてトランスのサージインピーダンスおよびその絶縁耐力について検討が加えられた⁽²⁾⁽³⁾。一方電流さい断現象に関して陰極点のエネルギー平衡理論が立てられた⁽¹⁰⁾。この理論によって、さい断電流が接点材料の蒸気圧 / 熱伝導率の値に依存し、この値が高い程さい断電流が小さいことが予測された⁽¹¹⁾。そこでさい断電流の小さい接点材料の開発が進められたが、大電流しゃ断の責務を負う真空しゃ断器用真空スイッチの場合には、接点材料の選択が容易ではなく、結局電動機および

変圧器に対してアレスタとコンデンサで保護する方法が示された。⁽¹²⁾

これに対して真空コンタクタ用真空スイッチの場合には、大電流しゃ断責務がないために接点材料の選択が比較的容易なこと、および開閉回数が多く異常電圧発生確率が高いために、真空コンタクタ用接点材料のさい断電流低下に主として努力が払われた。

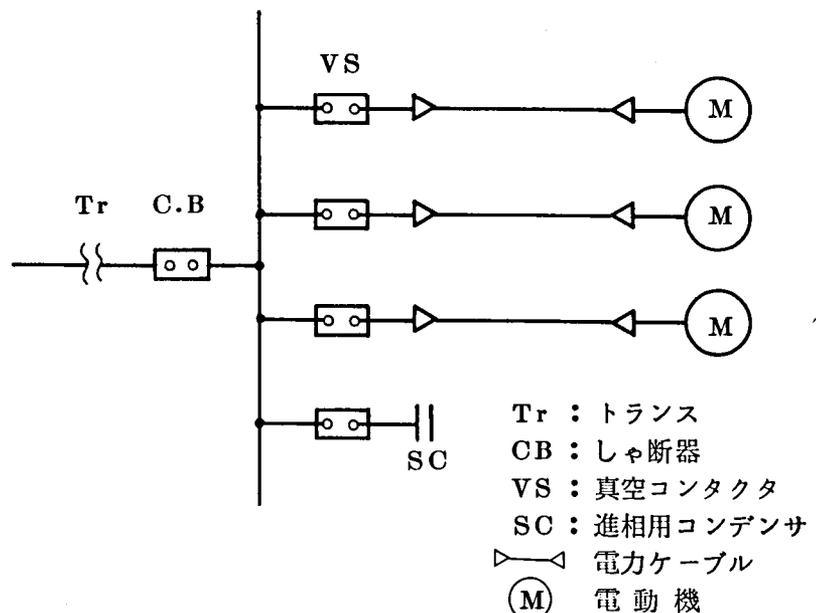
真空スイッチのさい断電流値を測定すると、同一接点、同一回路条件でも必ずしも同じ電流値でさい断が発生するのではなく、ある電流値を中心として分布することが明らかとなった。そこで各種回路条件に対して、さい断電流の分布を求め、高いさい断電流がどの程度の確率で発生するかを明らかにする必要が生じた。

1.3.1 実験および結果

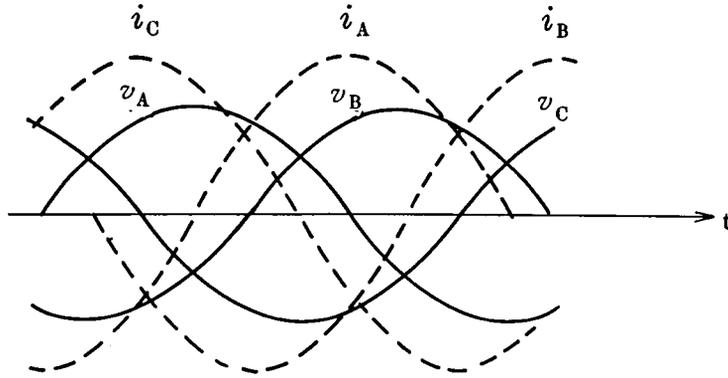
電動機が使用される高圧配電システムの代表的な構成を第 1.11 図に示す。我が国では 3/6 kV 回路は一般に非接地方式が採用されている。第 1.11 図の 1 つの電動機回路をしゃ断する場合を想定すると、三相回路であるから 3 相の電流は 120° の位相差をもっており、真空スイッチ VS の開極が同時であっても 3 相のどれか 1 つの相が、まず電流零を迎えてしゃ断される。この相をしゃ断の第 1 相とよぶ。つぎに 90° おくれて他の 2 相が電流零を迎え、この時点で 3 相が全てしゃ断される。この残りの 2 相をしゃ断の第 2, 3 相と便宜上呼ぶことにする。

さて、前節で述べたように、実験結果から突流しゃ断の条件と異常電圧の発生とが深く関係していると考えられるので、第 1.11 図の一つの電動機について突流しゃ断の第 1 相を対象に考えることにする。突流しゃ断の場合、負荷の力率は 0 に近いので力率 = 0 と考えると各相の電圧電流波形は第 1.12 図に示す

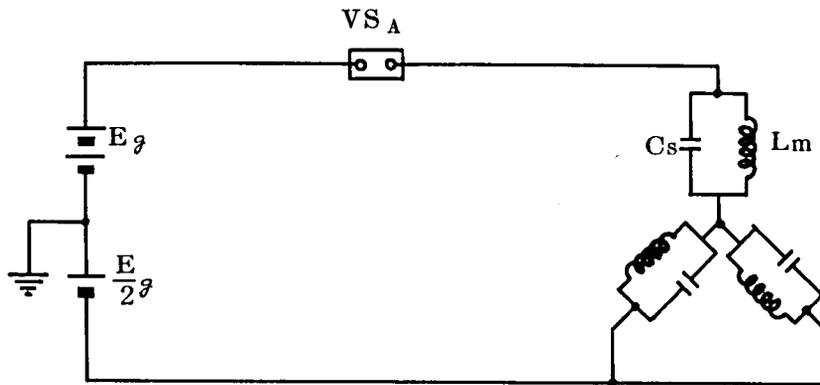
ような位相関係にある。すなわち i_A をしゃ断の第 1 相と考えると、 i_A の電流零点では v_A は最大電圧であり、 v_B, v_C は同電位となっている。また電源には多数の分岐回路があり対地漂遊容量も大きいので、電源の中性点電位は変化しないものと仮定することができる。したがって、第 1 相しゃ断時の短時間の現象を考える場合には、第 1.11 図の回路を



第 1.11 図 配電系統構成図

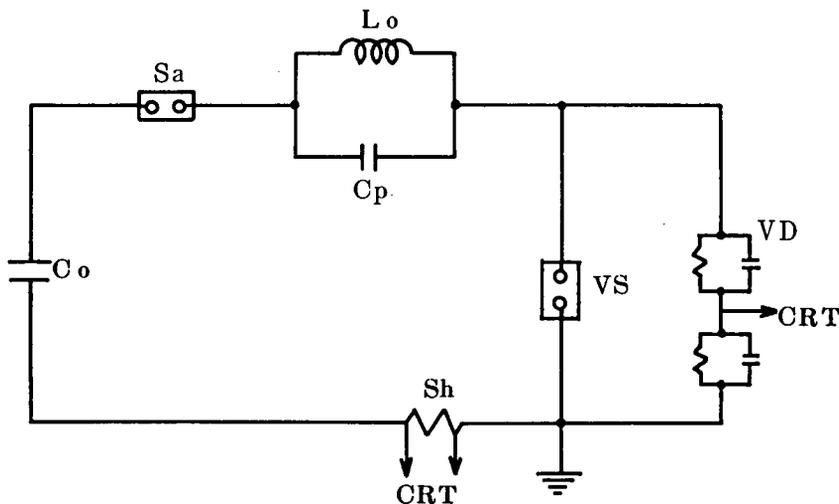


第 1.12 図 各相の電圧電流波形



- E_g : 電源の対地電圧波高値
- VS_A : A相スイッチ(第1相)
- L_m : 電動機の漏れインダクタンス
- C_s : ケーブルを含めた回路の漂遊容量

第 1.13 図 第 1 相しゃ断の等価回路



- | | |
|-----------------|-----------------|
| C_o : 電源コンデンサ | L_o : インダクタンス |
| C_p : 並列容量 | VS : 真空スイッチ |
| VD : 分圧器 | Sh : 分流器 |
| Sa : 補助スイッチ | |

第 1.14 図 実験回路

第 1.13 図のように考えることができる。第 1.13 図で電動機回路は 1 つのタンク回路で表現することができるので、測定の便宜も考えて接地点を移動し、第 1.14 図に示す回路を実験回路として採用した。

第 1.14 図の回路構成で実験する場合、まず電源コンデンサ C_o を V_o に充電し、 VS を閉じた状態で Sa を閉じると電流 i が流れる。最初の半波で VS を開いて電流 i をしゃ断し、その時の電圧および電流波形を観測する方法をとった。回路定数としては $C_o = 100 \sim 5 \mu F$, $L_o = 23.4 \sim 115 \text{ mH}$ とし、 V_o を変化させてしゃ断電流 I を交流 60 Hz 実効値表示で 40 A, 100 A, 260 A, 420 A に選んだ。また C_p を変化させてサージインピーダンス $Z_o = \sqrt{L_o/C_p}$ を電動機回路のサージインピーダンスと同程度の 0.7 k Ω , 1.44 k Ω , 2.86 k Ω , 5.07 k Ω と

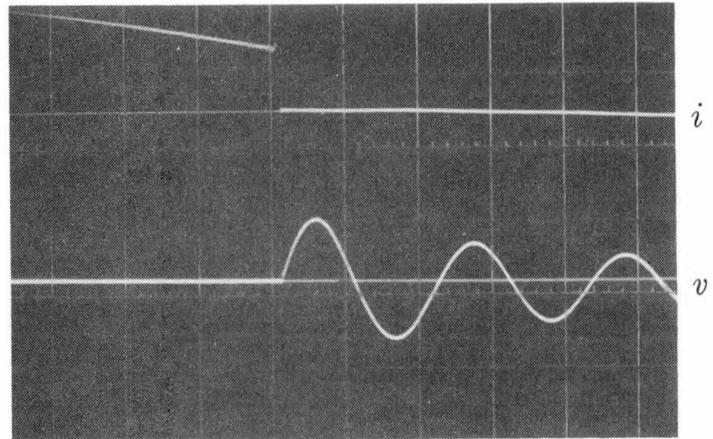
した。この場合 $L_o - C_p$ 回路の振動周波数は $1 \sim 20 \text{ kHz}$ となり、ほぼ電動機回路の振動周波数と一致している。実験としては、電流とサージインピーダンスの組合せの各ケースにつき、それぞれ 100 回のしゃ断を行ない波形を観測した。測定に使用した C-R 分圧器および同軸分流器は、それぞれ 1 MHz 、および 3 MHz の周波数応答をもっている。

なお接点材料には、しゃ断器用接点材料(B)とコンタクタ用接点材料(C)を選んだ。以下では B 接点および C 接点と呼ぶことにする。

第 1.15 図および第 1.16 図は、それぞれ B 接点および C 接点について得られた電流電圧波形を示すオシログラムの例である。これらの図から C 接点のさい断電流は明らかに低いことが示されている。真空スイッチの開極後、電流が零点に近づくときアークが不安定になり、第 1.15 図に見られるように高周波振動が重畳し、やがて電流さい断が発生する。

このような場合、電流波形から直接さい断電流を正確に求めることが困難となるので、さい断後に発生する電圧波形からさい断電流を求めることにし、次の計算によってこれを実行した。

電流がさい断される瞬時の回復電圧(この場合にはコンデンサの端子間電圧)を E_r とし、さい断電流値を I_c 、



$$C_o = 100 \mu F, L_o = 23.4 \text{ mH}, C_p = 0.04 \mu F$$

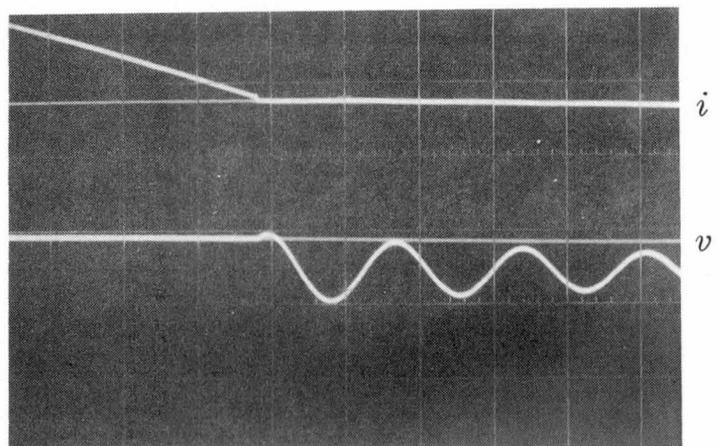
$$V_o = 400 \text{ V}$$

$$i = 10 \text{ A/div}$$

$$v = 5 \text{ kV/div}$$

$$T = 100 \mu \text{ s/div}$$

第 1.15 図 電流さい断と電圧波形 (B 接点)



$$C_o = 100 \mu F, L_o = 51 \text{ mH}, C_p = 0.04 \mu F$$

$$V_o = 4 \text{ kV}$$

$$i = 12.5 \text{ A/div}$$

$$v = 5 \text{ kV/div}$$

$$T = 200 \mu \text{ s/div}$$

第 1.16 図 電流さい断と電圧波形 (C 接点)

L_o-C_p 回路のサージインピーダンスを Z_o とすると、極間にあらわれる電圧波形は次式で与えられる。

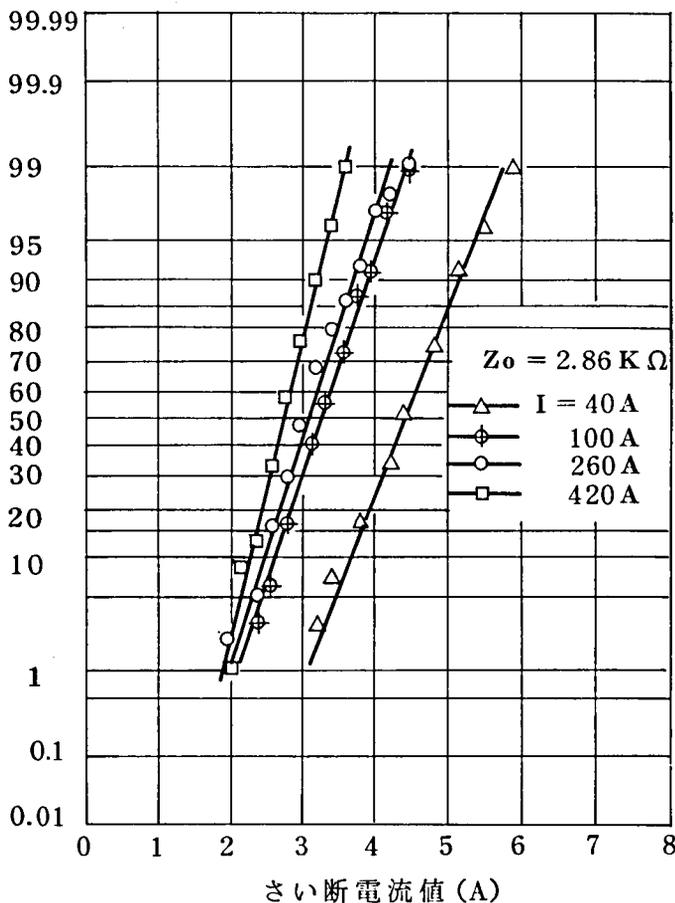
$$v = E_r - \sqrt{E_r^2 + (Z_o I_c)^2} \varepsilon^{-\alpha t} \cos(\omega t + \phi) \quad (1.4)$$

ここに

$$\phi = \tan^{-1} Z_o I_c / E_r \quad (1.5)$$

また α および ω は L_o-C_p 回路の減衰定数および振動の角周波数である。したがって Z_o , α および ω が既知であればオシログラムから v を求めることによって (1.4) 式 (1.5) 式を利用して I_c を求めることができる。 Z_o , α および ω の求め方については付録 A に示した。

なおアーク時間によってさい断電流がどの程度変化するかを確認するため、真空スイッチの開極位相を制御してアーク時間を変化させたが、アーク時間によるさい断電流の有意差は認められなかった。また C_o の充電電圧に関しては電流のしゃ断零点における傾斜が一定であれば、さい断電流に有意差がないことも確認した。



第 1.17 図 さい断電流値の分布 (B 接点)

以上に述べた方法により、各ケースのさい断電流値を求めた。まず B 接点について得られた結果を述べる。第 1.17 図は一例として $Z_o = 2.86$ $k\Omega$ の場合について、しゃ断電流 I を変化させた場合の分布を正規確率紙にプロットしたものである。この図からさい断電流の分布はほぼ正規分布で表現できることが明らかにされている。第 1.3 表には各ケースについて、B 接点のさい断電流平均値 \bar{I}_c および標準偏差 σ_c をまとめて示した。第 1.18 図(a)および(b)には第 1.3 表の平均さい断電流 \bar{I}_c をしゃ断電流 I およびサージインピーダンス Z_o の関数として示した。これらの図から中間のしゃ断電流値 I 、またはサージインピーダンス Z_o に対す

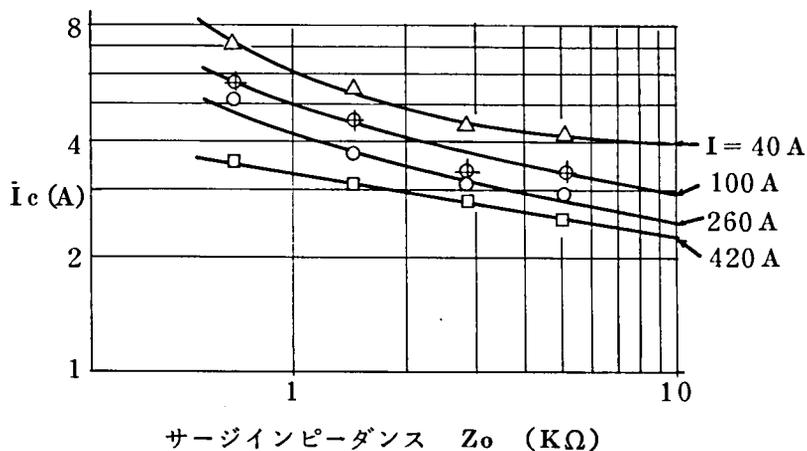
る平均さい断電流 \bar{I}_c を内挿によって求められる。またこれらの図表から、平均さい断電流はサージインピーダンスおよびしゃ断電流の増加とともに減少すること、標準偏差もほぼその傾向を有することがわかる。

第 1.3 表 さい断電流平均値 \bar{I}_c および標準偏差 σ_c (B 接点)

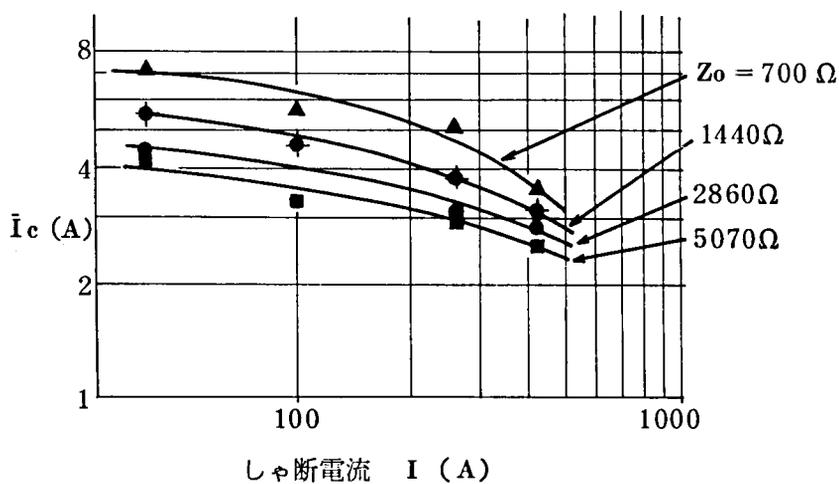
単位 (A)

$Z_o(k\Omega) \backslash I(A)$	40	100	260	420
0.7	7.2 0.6	5.7 0.7	5.1 0.6	3.5 0.5
1.44	5.5 0.7	4.6 0.6	3.7 0.5	3.1 0.5
2.86	4.4 0.6	3.3 0.5	3.1 0.5	2.8 0.4
5.07	4.2 0.4	3.3 0.4	2.9 0.4	2.5 0.4

上段... \bar{I}_c 下段... σ_c



(a)



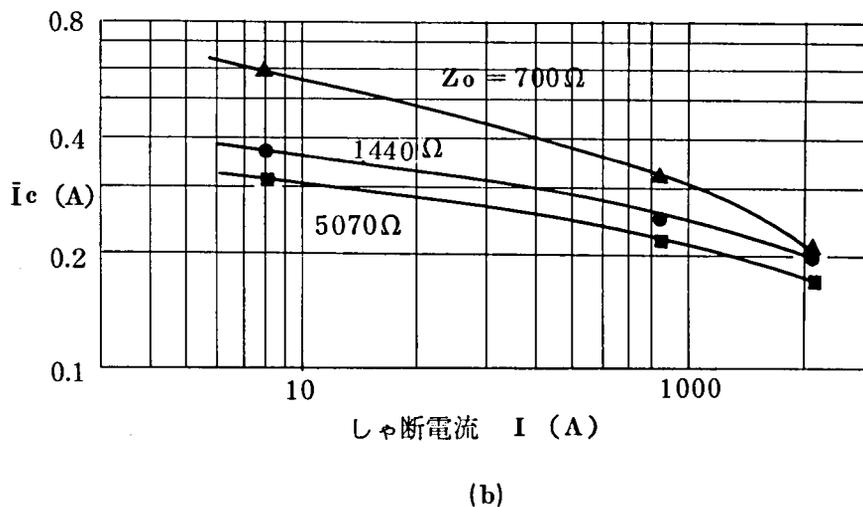
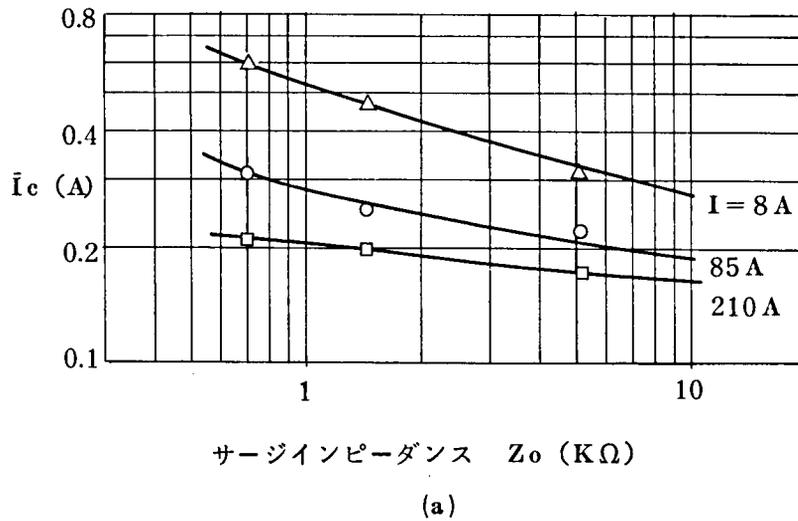
(b)

第 1.18 図 平均さい断電流 \bar{I}_c とサージインピーダンス Z_o およびしゃ断電流 I との関係 (B 接点)

さい断電流の分布については、30,000回以上の実験結果を分析して対数正規分布になっているという報告がある⁽¹³⁾。実際これを通常の正規確率紙で表現しても殆んど直線であらわされることを確認している。

つぎにC接点についても同様な手法で特性を求めると、この場合も正規分布となった。第1.19図(a)および(b)には平均さい断電流 \bar{I}_c をサージインピーダンス Z_0 およびしゃ断電流 I の関数として与えた。標準偏差は0.05~0.15 Aであった。第1.18図と第1.19図とを比較することにより、接点材料のさい断電流に及ぼす影響が大きいことがわかる。

以上に述べたような真空スイッチの電流さい断特性については、いくつかの報告があるが⁽⁴⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾、まだその理論的な説明は十分されていないのが現状である。



第1.19図 平均さい断電流 \bar{I}_c とサージインピーダンス Z_0 およびしゃ断電流 I との関係(C接点)

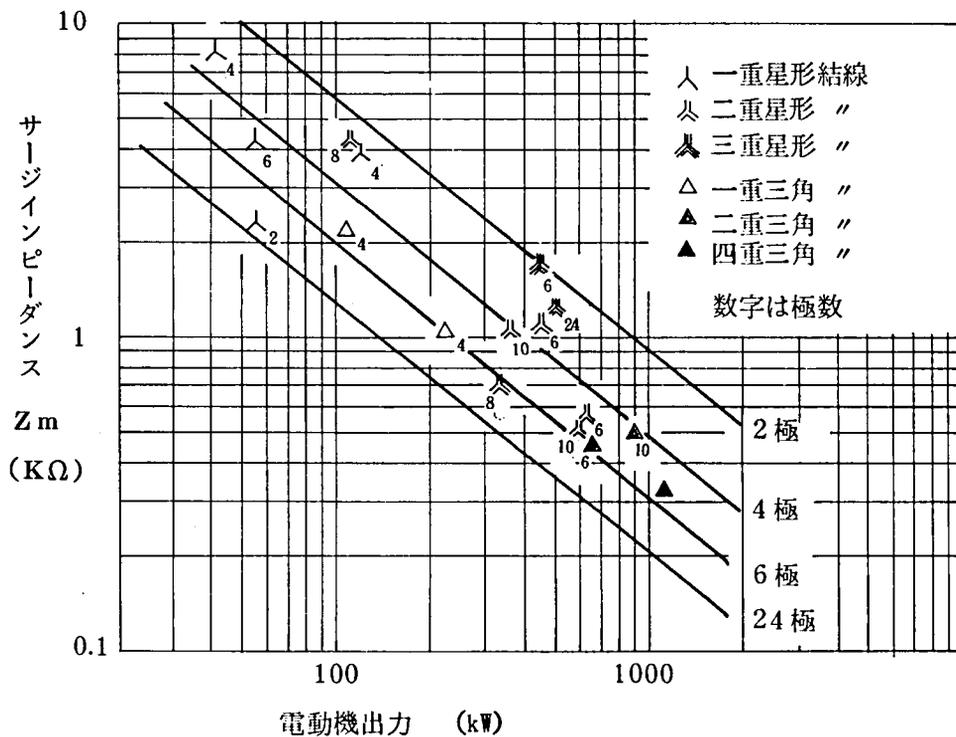
1.3.2 電流さい断による異常電圧の検討

電流さい断によって負荷の端子間に発生する電圧は、突流しさい断の第1相に対して(1.4)式から次式で与えられる。

$$v_L = \sqrt{E_r^2 + (Z_o I_c)^2} \varepsilon^{-\alpha t} \cos(\omega t + \phi) \quad (1.6)$$

したがって回復電圧 E_r 、電動機回路のサージインピーダンス Z_o およびさい断電流が与えられると、端子間に発生する電圧を計算で求めることができる。

電動機単独のサージインピーダンス Z_m に関しては、いくつかの報告があり、⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾ 文献(5)では Z_m が電動機の $\text{kVA}/\sqrt{\text{kV}}$ の関数として与えられている。そこで約20台の3 kVおよび6 kVの電動機について、 Z_m を京大第二法および付録Aに示した直流さい断法によって求めた。3.3 kV電動機についての測定結果を第1.20図に示した。図中には文献(5)で与えられた関数関係を3.3 kV回路について示した。⁽¹⁶⁾ kVAとkWの変換には力率を0.85、効率を0.9とした。第1.20図では、実測値はかなり広く分布し、必ずしも直線の値とは一致していないが傾向は比較的よく一致している。そこで今後の議論では Z_m として第1.20図の直線を使用することにする。なお、一般に電動機にケーブルが接続された場合のサージインピーダンス Z_o は、電動機単独のサージインピーダンス Z_m より小さいが、以下では Z_m を用いて考察する。



第1.20図 3.3 kV電動機のサージインピーダンス

第 1.4 表 電流さい断時の発生電圧波高値

(a) \bar{I}_c を用いたとき (kV)

接点	回路電圧	50 kW	100 kW	200 kW	500 kW
B	3 kV	19.6	13.5	8.6	4.9
	6 kV	26.4	19.7	13.9	9.5
C	3 kV	4.2	4.1	4.0	4.0
	6 kV	8.2	8.1	8.0	8.0

(b) $\bar{I}_c + 3\sigma_c$ を用いたとき (kV)

接点	回路電圧	50 kW	100 kW	200 kW	500 kW
B	3 kV	30.8	18.8	11.5	5.9
	6 kV	45.7	26.2	16.5	9.8
C	3 kV	4.6	4.2	4.1	4.0
	6 kV	8.7	8.2	8.1	8.0

さて電動機のサージインピーダンス Z_m を第 1.20 図で与えるものとする、kVA または kW を与えることにより、しゃ断すべき電流が求められる。突流しゃ断時の電流としては、カゴ形誘導電動機では定格電流の 6 倍程度をとればよい⁽¹⁶⁾。したがってこの電流とサージインピーダンスから第 1.3.2 項で述べたさい断電流の平均値 \bar{I}_c および標準偏差 σ_c を求めることができる。これらの値を使用して (1.6) 式から電流さい断によって発生する電圧 v_L の波高値を求めることができる。第 1.4 表には、平均のさい断電流 I_c を用いた場合および $\bar{I}_c + 3\sigma_c$ を用いた場合について発生する電圧の波高値を計算して示した。さい断電流が零のときの波高値は、3 kV 回路で 4 kV、6 kV 回路で 8 kV であり、C 接点では殆んど問題がないことが示されている。しかし B 接点では 100 kW 以下の場合とくに大きい電圧がかなりの確率で負荷端子間にあらわれ、真空スイッチが再発弧すると電圧はそれ以上上昇しないが、もし再発弧しないと電動機巻線にそのまま印加されることになる。

電動機巻線の絶縁強度については、JEC-37 に規定があり、絶縁耐力の試験電圧として次の値が示されている。

$$2 \times \text{定格電圧} + 1 \text{ kV}$$

すなわち試験電圧波高値は、3.3 kV に対しては 10.7 kV また 6.6 kV に対しては 20.1 kV となる。これらの値と第 1.4 表の値とを比較すれば、B 接点の場合には 200 kW 程度以下の電動機は絶縁破壊の可能性があることになる。この結論は第 1.5 図の調査結果とかなりよく一致し

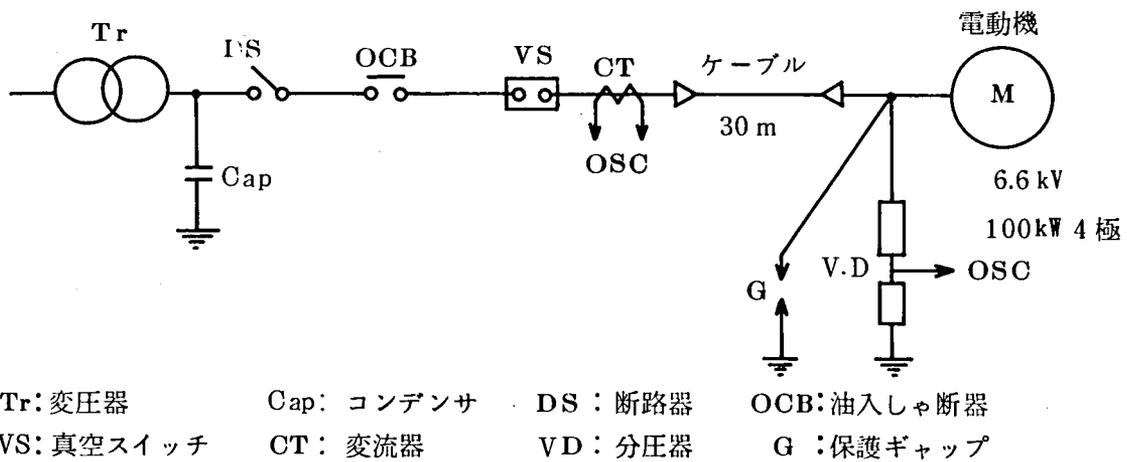
ているといえる。

さてC接点については、上の計算では電流さい断に関してはほとんど問題がないことが示されたが、実際の電動機回路でも問題がないかどうかを確認するために、実回路の実験を行なった。次に実回路における実験について述べる。

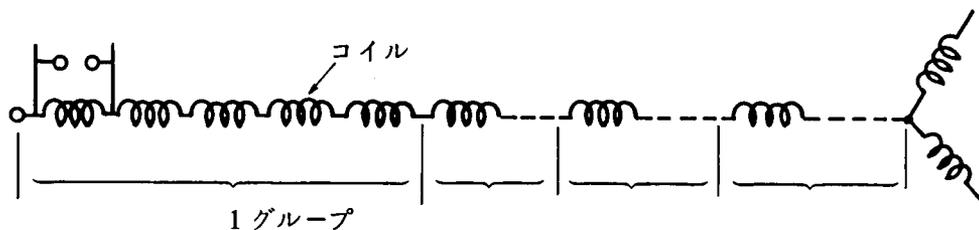
1.4. 実回路における異常電圧の発生と考察

1.4.1 実験および考察

真空スイッチのさい断電流が十分小さい場合に、実回路において異常電圧発生の危険性がな
いかどうかを調査するために第 1.21 図に示す回路を構成して実験を行なった。供試電動機とし
ては、サージインピーダンスが高く、サージが発生しやすいと考えられる小容量電動機(6.6
kV, 100 kW, 4 極)を選び30mの三相電力ケーブルで真空スイッチと接続した。また電源側には
多数本のケーブルが接続されていることを想定して1 μF のコンデンサを電源トランスの各
相と対地間に接続した。供試電動機の巻線は第 1.22 図に示すように、巻線の1相分は4グルー



第 1.21 図 試 験 回 路



第 1.22 図 1 相分巻線の構成

プからなり、1グループは5コイルから構成されている。また供試スイッチには、さい断電流の小さい真空スイッチを使用した真空コンタクタの他に、現象を比較するために気中コンタクタおよび油入しゃ断器を用意し、第1.21図のVSの位置に接続して開閉試験を行なった。

実験では、位相制御を行なって真空コンタクタの投入、開極位相を変化させるとともに、投入ならびにしゃ断条件として回転子固定および無負荷定速回転の3ケースについて電動機端子電圧の測定を試みた。使用したC-R分圧器は直列抵抗50 MΩ，直列容量200 pFのもので1 MHzまでの周波数応答を有している。

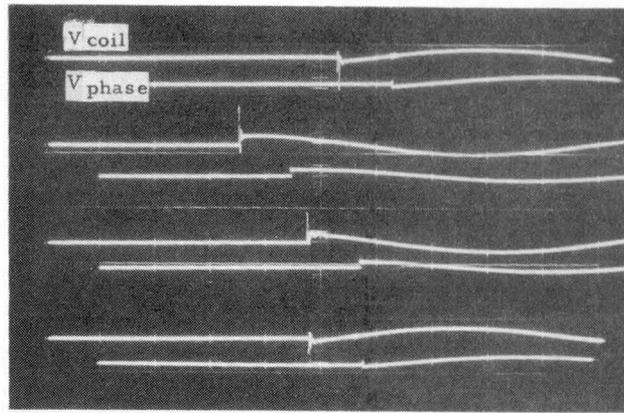
まず通常の測定系に対する注意、すなわち一点接地にし、静電結合、電磁結合を避けるために、電力回路と測定回路との距離を十分とることなどの配慮をして測定を開始したが、真空開閉器では、開極位相を電流零点の直前にすると、得られたオシログラムは不明瞭になり(例えば第1.24図(C)にみられる)、波高値の測定ができなかった。そこで第1.22図に示すように、1コイルの電圧を測定すべく、ダストフィギア法を応用して、最高電圧を測定することを試みた⁽¹⁷⁾。第1.5表は各ケース500回行った実験の結果を示すものである。この結果から真空コンタクタの場合に1コイルに印加される電圧が最も高いこと、次に油入しゃ断器の場合が高く、気中コンタクタが一番低い電圧を示すことが明らかになった。すなわち真空コンタクタの場合には、さい断電流が低い真空スイッチを使用したにもかかわらず、なお気中コンタクタおよび油入しゃ断器の場合と比較して高い電圧を発生していることが明らかになった。しかも高い電圧が観測されるのは、電流零点でオシログラムの波形が不明瞭になる場合と一致していることも明らかになった。

第1.5表 開閉器の種類と1コイル電圧(kV)

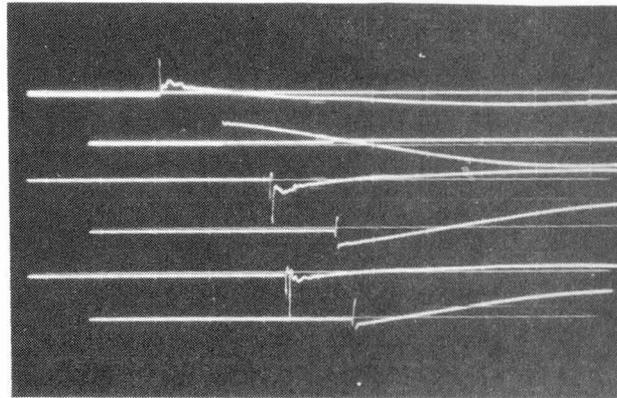
開閉器 \ 条件	投入	突流しゃ断	定速しゃ断
気中	4	1	1
油入	5	4	3
真空	8	10	8

そこで再び波形観測に重点を置き、測定ケーブルを2重シールドにするとともに、分圧器の中、低圧部もシールド筒で包囲し、一点接地の接地点を種々変更して測定を行なった。第1.23図は上記の対策を行って得られた各種開

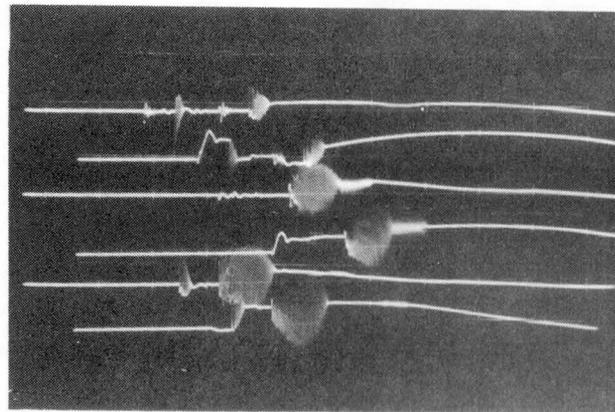
閉器の投入時の波形である。各オシログラムとも1コイル電圧 V_{coil} とその相の端子-大地間電圧 V_{phase} を対とし、数回の実験について結像位置をずらせて撮影したものである。これらのオシログラムから気中コンタクタの場合と油入しゃ断器の場合とは比較的よく似た波形であるが、真空開閉器の場合は全く異なった波形となることが示されている。すなわち真空スイッチは投入時に多重再発弧を伴うが油入しゃ断器の場合には再発弧回数が極端に少なくなり、さらに気中コンタクタの場合には一度発弧すると、そのまま電極の金属接触までアークが持続する様子が明らかにされている。さらに真空コンタクタの場合には、投入時に接点のバウンシング



(a) 気中コンタクタ $V_{coil} = 7.4 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 21 \text{ kV/div}$
 $T = 2 \text{ ms/div}$

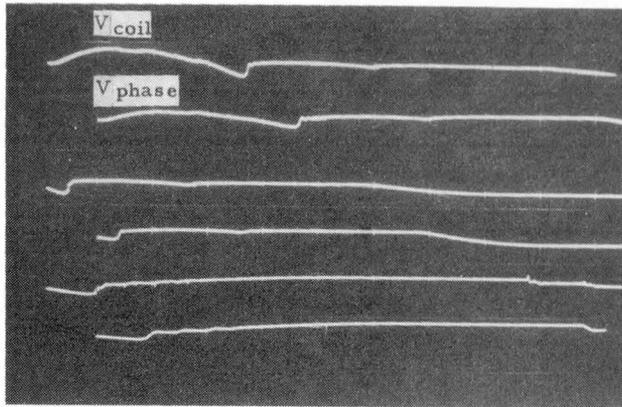


(b) 油入しゃ断器 $V_{coil} = 7.4 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 10.5 \text{ kV/div}$
 $T = 1 \text{ ms/div}$

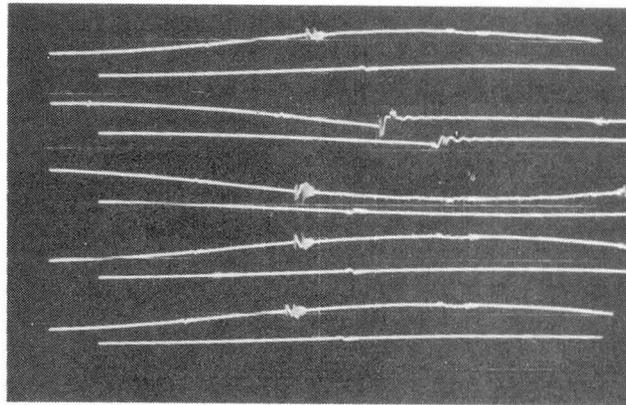


(c) 真空コンタクタ $V_{coil} = 7.4 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 10.5 \text{ kV/div}$
 $T = 1 \text{ ms/div}$

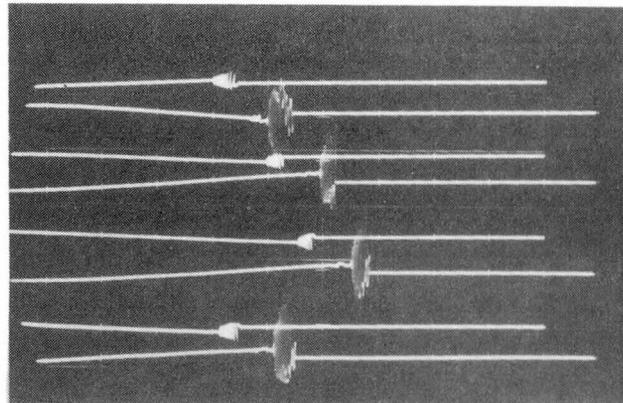
第 1.23 図 投入時電圧波形
 (V_{coil} : 1 コイル電圧、 V_{phase} : 相-大地間電圧)



(a) 気中コンタクタ $V_{coil} = 3.7 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 21 \text{ kV/div}$
 $T = 2 \text{ ms/div}$



(b) 油入しゃ断器 $V_{coil} = 3.7 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 21 \text{ kV/div}$
 $T = 1 \text{ ms/div}$



(c) 真空コンタクタ $V_{coil} = 7.4 \text{ kV/div}$
 $V_{phase} = 21 \text{ kV/div}$
 $T = 1 \text{ ms/div}$

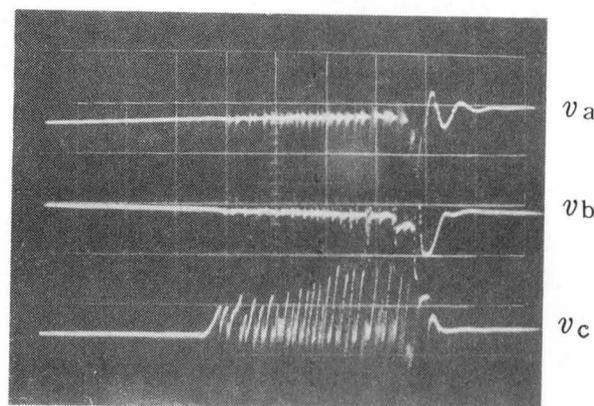
第 1.24 図 しゃ断時電圧波形
 (V_{coil} : 1 コイル電圧、 V_{phase} : 相-大地間電圧)

があると、その間も多重再発弧が発生し、その間に発生する電圧が大きいことが示されている。第 1.5 表で真空開閉器の投入時に観測される高い電圧は、このバウンシングによるものと考えられる。

第 1.24 図には、突流しゃ断時に発生する電圧が大きい場合の電圧波形を示した。各オシログラムには第 1.23 図の場合と同様に、数回の実験結果が記録されており、 V_{coil} 、 V_{phase} は 1 コイル電圧およびその相の端子-大地間電圧である。投入時のバウンシングが一種のしゃ断であることから推測されることではあるが、しゃ断の場合も真空コンタクタでは多重再発弧が発生すると、高い電圧が出現した。油入しゃ断器の場合も多重再発弧が少し見られるが、殆んどの場合高い電圧が出現するまでに、極間が再びアークで接続され、続弧状態となった。これに対して気中コンタクタの場合には多重再発弧はほとんど観測されなかった。

定速しゃ断の場合にも異常電圧が観測された。第 1.25 図は代表的なオシログラムを示している。図から多重再発弧が $800 \mu s$ 続いた後、三相が同時にしゃ断されている様子が明らかにされている。今後この現象を三相同時しゃ断と呼ぶことにする。三相同時しゃ断が発生した場合には、多重再発弧を発生した相および他の相のいずれの相にも、1 コイル電圧として高い電圧が観測された。

以上の観測結果から真空コンタクタの場合には、投入、しゃ断のいずれにおいても多重再発弧が発生すると、高い電圧が出現し、これに対応して 1 コイルにも高い電圧が印加されることが明らかとなった。この多重再発弧現象は油入しゃ断器の場合にも多少観測されるが、気中コンタクタの場合は全く観測されず、真空スイッチの消弧現象と密接な関係にあることが予想された。



$$v_a, v_b, v_c = 10 \text{ kV/div}$$

$$T = 200 \mu s/div$$

第 1.25 図 三相同時しゃ断の発生

1.4.2 実験結果による電動機絶縁損傷事故の考察

実回路を構成して真空スイッチの開閉試験を実施した結果、電動機巻線の1コイルに8～10 kVという高い電圧が印加される場合があることが明らかになった。この電圧は通常の運転で1コイルに印加される数百V～1 kVという電圧と比較すると約1桁高い。しかも高い電圧が発生する場合には、真空スイッチの多重再発弧が観測されている。このことは即ち多数回の投入、しゃ断が短時間にくり返されていることを意味している。すでに(1.3)式で示したように、投入時には0.1 μ s程度の波頭長を有するサージが発生する。したがって多重再発弧が発生して高い電圧があらわれると、波頭が極めて急しゅんで波高値が高いサージがくり返し電動機巻線に進入することになる。

波頭が急しゅんなサージが巻線に進入すると、サージ電圧の大部分が巻線の印加端に分担されることは容易に予想され、端子に近いコイルが最も危険性が高いことになる。このことは第1.2節で述べた電動機絶縁損傷位置をよく説明しており、真空スイッチの場合には多数のサージが進入するので、他の開閉器の場合と比較してより危険性が高く、真空スイッチの場合に相対的に事故率が高いことと一致している。

したがって真空スイッチの多重再発弧が原因と考えた場合、どのような機構によって高い電圧があらわれ、どの程度まで上昇し得るかが問題となる。この問題を解決するために、さらに詳細な実験を計画し、現象の究明を行なった。次章ではその実験および結果について述べる。

1.5 真空スイッチによる電動機絶縁損傷事故に対する考察結果と今後の研究課題

1.5.1 考察結果

真空スイッチを電動機回路の開閉に使用した場合の開閉サージ問題に関する調査、実験を通じて次のことが明らかになった。

- (1) 真空スイッチを使用した場合には、他の開閉器を使用した場合と比較して巻線の絶縁破壊事故の確率が高いことが判明した。また絶縁破壊の大部分は巻線の端子に近いコイルのターン間で発生していることが確認され、波頭の急しゅんな電圧進行波(サージ)が巻線に進入してくるものと予想された。
- (2) 電流さい断による異常電圧は、真空しゃ断器用真空スイッチを使用し、かつ電動機の容量が100～200 kW以下の場合には問題となり、電動機の交流試験耐圧を越える場合があること、もしこの電圧で真空スイッチが発弧すると、0.1 μ s程度の急しゅんな波頭を有するサージが発生することを明らかにした。しかし真空コンタクタ用真空スイッチの場合には、電流さい断による異常電圧は低いことを明らかにした。

- (3) 実回路での実験を行ない、真空スイッチは突流しゃ断における多重再発弧現象および定速しゃ断における多重再発弧後の三相同時しゃ断現象に伴って高い電圧を発生することを明らかにした。多重再発弧現象は油入開閉器においても見られるが、気中開閉器では観測されず、真空開閉器の消弧現象と深く関係していることが明らかになった。
- (4) 多重再発弧現象に伴って多数の波高値が高く波頭の急しゅんなサージが電動機巻線に進入する。このことは巻線の絶縁損傷事故の位置、真空開閉器で事故率が高いことをよく説明している。したがって多重再発弧現象が電動機事故の原因と考えられる。

1.5.2 今後の課題

以上のことから今後解明しなければならない点は、

- (1) 多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象に伴う異常電圧発生機構の究明ならびにこれらの現象と真空スイッチの電流さい断特性を含めた消弧特性および回路条件との関連性の解明。
- (2) 種々の回路条件における多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象によるサージ発生の予測。
- (3) 電動機巻線にサージが進入した場合のサージ電圧の分布と電動機絶縁の評価。
- (4) サージ抑制方法の検討と具体的対策の確立

である。以下の章において、これらの課題の究明を行なう。

第2章 多重再発弧に伴う開閉異常電圧とその発生機構の研究

2.1 緒 言

第1章で述べたように、真空スイッチで電動機回路を開閉した場合、波高値の大きいサージが発生することがあり、その場合には真空スイッチの多重再発弧現象が観測された。この多重再発弧現象の出現する割合は電動機の起動直後の突流しゃ断の場合に多く、開閉回数の25%程度であり、定速しゃ断の場合には、多重再発弧の出現率は4%程度であった。しかもこの多重再発弧時には、発弧のたびに急しゅんな波頭を有するサージ電圧が発生し、ケーブルを通過して電動機巻線に進入するので、巻線のターン間絶縁が破壊される可能性があり、電動機事故の大半がターン間絶縁の破壊に原因していることと考え合せると、この多重再発弧現象に伴うサージの発生は、問題の中心課題である。

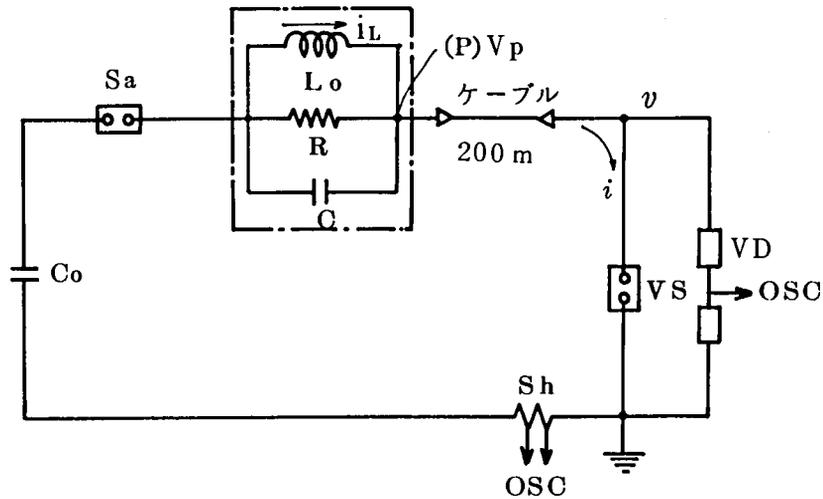
そこで多重再発弧現象に伴うサージの発生機構を明らかにするために実験を行ない、全く新しい異常電圧の発生機構を理論的に明らかにした。本章では多重再発弧による異常電圧発生機構について論じるとともに、三相同時しゃ断現象による異常電圧発生機構についても検討を加えた。

2.2 多重再発弧現象による異常電圧の発生^{(1) (2) (3) (4)}

2.2.1 実 験

多重再発弧現象の究明のために、異常電圧発生確率が高い突流しゃ断を対象とし、しゃ断の第1相を考える。これは他の2相の電流零点では、真空スイッチが十分開極して再発弧しないためである。したがって第1章の第1.14図に示す回路を等価回路として考えてよい。ただし、高周波現象が関与しているため、第1.14図の回路に電力ケーブルを用いて、第2.1図に示す回路を構成した。

実験では3 kV回路を考え、電源コンデンサ C_0 (100 μF)の充電電圧 V_0 を3 kV回路のしゃ断第1相の回復電圧である4 kV ($=\sqrt{2} \times 3.3 / \sqrt{3} \times 1.5$ 、第1.13図参照)とした。電動機等価回路のインダクタンス L_0 としては回路投入時の電流が、200 kVA相当の電動機の突流を与える47 mHの空心リアクトルを使用し、並列容量 C を0.005 μF として電動機回路のサージインピーダンスおよび振動周波数を3 k Ω および10 kHzとした。また振動の減衰を与えるために5 k Ω の抵抗 R を付加した。ケーブルには200 m, 22 mm²の3相ケーブルの一相を使用し、他の相は開放とした。分圧器および分流器はそれぞれ1 MHzおよび3 MHzの周波数応答を有している。



- Co : 電源コンデンサ
- Sa : 補助スイッチ
- Lo-R-C : 電動機の等価回路
- VS : 供試真空スイッチ
- Sh : 分流器
- VD : 分圧器

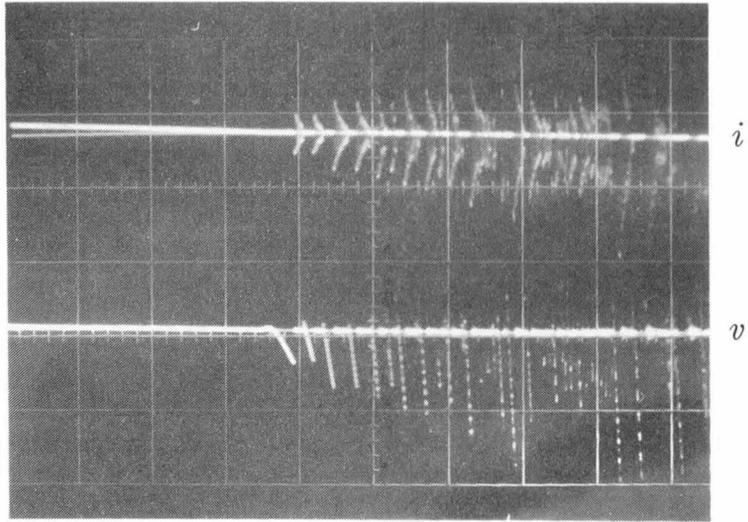
第 2.1 図 実 験 回 路

実験の過程は、第 1 章の電流さい断に関する実験と同様で、まず Co を充電し、Sa を投入して回路に商用周波の負荷電流 i を流し、つぎに供試真空スイッチ VS をしゃ断して電流および極間電圧波形を観察した。すでに第 1 章の第 1.24 図(c)に示したように、開極位相を i の零点直前にすれば再発弧することが明らかになっているので、位相制御を行なって、再発弧しやすい開極位相を選んで実験した。

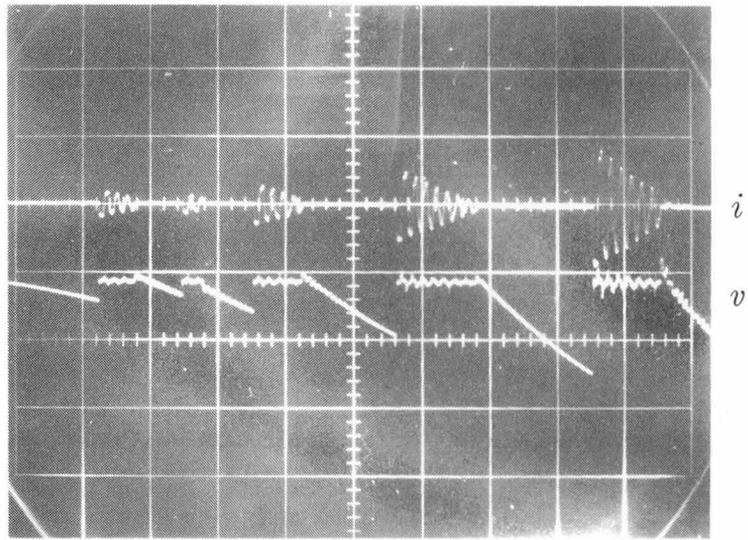
第 2.2 図は実験で得られたオシログラムの代表例で、再発弧時に VS を流れる電流および極間電圧波形を示している。図から再発弧がくり返されると異常に高い電圧が出現することが明らかになっている。なお、この現象はケーブルの代りに小さい集中インダクタンスを接続しても、全く同様に発生した。

波形についてさらに詳細に調べると、以下のことがわかる。

- (1) 真空スイッチが再起電圧で再発弧すると、真空スイッチには高周波電流が流れ、この電流が減衰すると再びしゃ断される。電流がしゃ断されると再び再起電圧が上昇し、再発弧が発生するという現象のくり返しである。



$i = 250 \text{ A / div}$
 (a) $v = 5 \text{ kV / div}$
 $T = 200 \mu\text{s / div}$



$i = 100 \text{ A / div}$
 (b) $v = 5 \text{ kV / div}$
 $T = 20 \mu\text{s / div}$

第 2.2 図 再発弧時のスイッチ電流と極間電圧波形

(2) 極間電圧波形に関しては、再発弧のくり返しとともに再起電圧上昇率が增大していくことが示されている。すなわち再発弧のくり返しとともに電動機回路の振動電圧波高値が増大している。再発弧電圧の包絡線は時間に対して直線的でなく、1乗以上の関数関係にあるが、極めて低い再発弧電圧がくり返しの途中であらわれている。一方再起電圧の立上り時点の電圧は、1 kV～4 kVの範囲に分布しているが、平均的には時間の経過とともに上昇している。

(3) 真空スイッチを流れる電流波形に関しては、再発弧後に流れる高周波電流の振動中心が再発弧のくり返しとともに零線からシフトしていることが明らかにされている。高周波電流の波高値は再発弧電圧に比例しており、比例定数としての抵抗値は約35Ωとなる。

以上の波形観測から次のことが推測される。すなわち

(1) 再発弧のくり返しとともに電動機回路の振動電圧波高値が増大していくのは、再発弧のくり返しによって電動機回路の有するエネルギーが増大していくからである。しかも振動の立上りは電圧零に近く静電的なエネルギーとは考え難い。したがって電磁エネルギーが増大したものとするのが合理的である。

(2) 高周波電流の振動中心が次第にシフトしていくことから低周波の交流電流が重畳して流れている可能性がある。

ことである。これらを総合して、再発弧時に電動機回路の L_0 にどのような電流が流れているかを明らかにすることが重要であることを見出した。

そこで次に L_0 のリード線に高周波CTを接続し L_0 に流れる電流波形を観測した。第2.3図は L_0 中の電流 i_L と極間電圧 v の波形の観測結果である。このオシログラムの示す波形から、

実に真空スイッチが一度負荷電流を

しゃ断しても、多重再発弧をくり返

す場合には、 L_0 中の電流はしゃ断

前と殆んど同様な電流傾斜で増大し

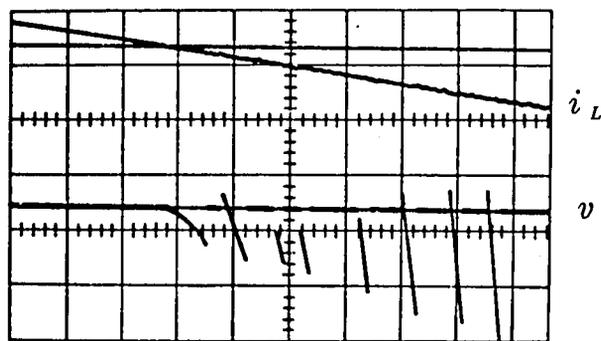
ていくことが明らかにされた。すな

わちインダクタンス L_0 の有するエ

ネルギーは次第に増加しており、こ

れが異常電圧発生と密接な関係にあ

ることが明らかになった。



$$i_L = 50 \text{ A/div}$$

$$v = 5 \text{ kV/div}$$

$$T = 50 \text{ } \mu\text{s/div}$$

第2.3図 L_0 中の電流 i_L および極間電圧 v の波形

2.2.2 波形の解析

交流電流しゃ断後のスイッチ極間の放電に伴う異常電圧の発生については、古くから充電々流しゃ断後の再点弧現象が注目されてきた。再点弧とは、通常極間の放電が再起電圧の振動の $\frac{1}{4}$ サイクルの時点を経として、それ以前の場合を再発弧、それ以後を再点弧と称している。

真空スイッチの多重再発弧に伴う異常電圧の発生に対しても、充電々流しゃ断後の再点弧現象と同様な考え方を適用し、異常電圧の発生メカニズムを説明した論文も発表されている。^{(5) (6)}しかし再点弧に伴う異常電圧は、静電的なエネルギーの蓄積によるものであって、第2.2.1項で明らかにされた電磁エネルギーの蓄積によるものとは本質的に異なっている。そこで観測波形をもとに波形の解析を行ない、現象をより詳細に追求した。

第2.4図は考察の便宜のために第2.2図および第2.3図の波形を合成し、さらに第2.1図(P)点の電圧波形を追加したものである。極間電圧波形とともに回復電圧および極間耐圧特性も示した。時間の原点としては、真空スイッチの電流さい断はないものと仮定して、負荷電流のしゃ断零点をとった。以上の図形を記号を用いて各期間ごとに波形の数式的表現を求める。

(1) $t = 0 \sim t_{b1}$ の期間

極間にあらわれる再起電圧 v および L_0 の電流 i_L は、真空スイッチのさい断電流およびアーク電圧を無視すると、次式で与えられる。

$$v = Er (1 - \varepsilon^{-\alpha t} \cos \omega t) \quad (2.1)$$

$$i_L = \frac{Er}{Z_0} \varepsilon^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (2.2)$$

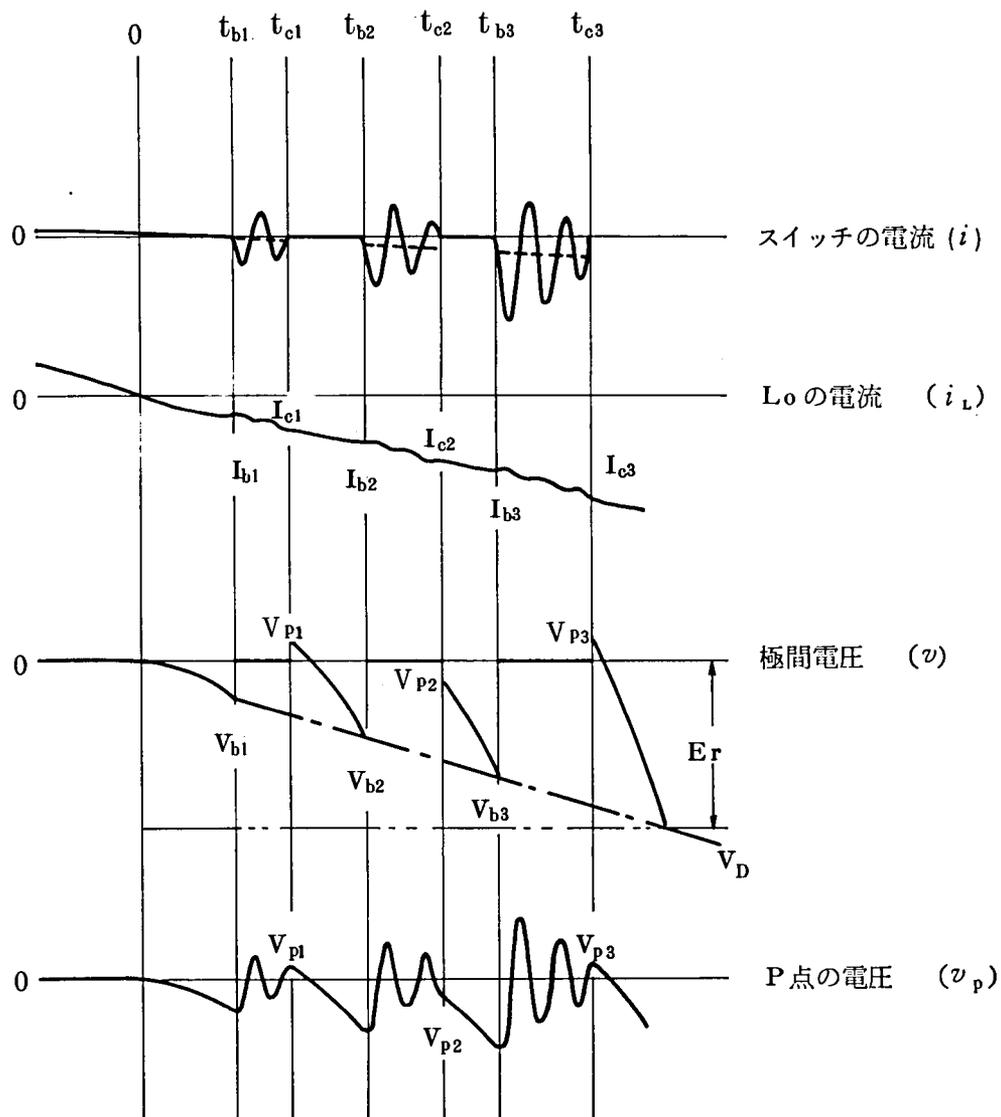
ここに Er は回復電圧、 α および ω はそれぞれ再起電圧の減衰定数および振動角周波数である。また Z_0 はケーブルを含めた電動機回路のサージインピーダンスである。

再起電圧が(2.1)式に従って上昇していくが、極間耐圧が再起電圧の波高値以下である場合には、再発弧時間を t_{b1} とすると、回路は t_{b1} を境とし、 $v = V_{b1}$ 、 $i_L = I_{b1}$ を初期値として次の導通期間に入る。

(2) $t = t_{b1} \sim t_{c1}$ の期間

スイッチが再び導通した状態における波形を求めるために、高周波回路のインダクタンスを L とし解析を進める。この導通期間における回復電圧 Er は変化しないものと仮定すると、スイッチを流れる電流 i 、 L_0 を流れる電流 i_L および第2.1図の(P)点の電圧 v_p は、(1)で与えられた初期値を用いて以下の式で表現される。

$$i = I_{b1} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{V_{b1}}{Z I_{b1}} \right)^2} \varepsilon^{-\beta(t-t_{b1})} \cos \{ \omega_h (t-t_{b1}) + \phi_h \} \right] + \frac{Er}{L_0} (t - t_{b1}) \quad (2.3)$$



- t_{bj} 再発弧時間
- t_{cj} 消弧時間
- I_{bj} 再発弧瞬時の L_o 中の電流
- I_{cj} 消弧瞬時の L_o 中の電流
- V_{bj} 再発弧電圧

第 2.4 図 図式化された電流電圧波形

$$i_L = I_{b1} \left[1 + \frac{L}{L_o} \sqrt{1 + \left(\frac{V_{b1}}{Z I_{b1}} \right)^2} \varepsilon^{-\beta(t-t_{b1})} \sin \{ \omega_h (t-t_{b1}) + \phi_h \} \right] + \frac{Er}{L_o} (t-t_{b1}) \quad (2.4)$$

$$v_p = -Z I_{b1} \sqrt{1 + \left(\frac{V_{b1}}{Z I_{b1}} \right)^2} \varepsilon^{-\beta(t-t_{b1})} \sin \{ \omega_h (t-t_{b1}) + \phi_h \} \quad (2.5)$$

$$\phi_h = \tan^{-1} \frac{V_{b1}}{Z I_{b1}} \quad (2.6)$$

ここに Z , β および ω_h はケーブルを含めた高周波回路のサージインピーダンス、減衰定数および振動の角周波数である。

真空スイッチに流れる電流には Er/L_0 なる傾斜をもって上昇する電流成分と高周波振動成分が重畳している。前者は $t=0$ における負荷電流の電流傾斜と等しく、負荷電流が再発弧によって流れ始めたことを意味している。この高周波電流は、第 2.2 図に示されているように、真空スイッチがしゃ断可能になるまで減衰し、しゃ断される。再発弧からしゃ断に至るまでの時間は、 $10 \mu s$ のオーダーであることが第 2.2 図からわかる。したがってこの数十 μs の間電源から L_0 に流れ込む負荷電流は増加し続けているわけである。

この負荷電流成分は、第 2.4 図に破線で示したが、当然のことながら i_L のこの期間における増加分と一致していることが (2.4) 式で示されている。 i_L の高周波振動成分はスイッチを流れる高周波電流の L/L_0 倍の波高値であり、第 2.3 図のオシログラムに示されているように、無視できるほど小さい。

さて回路が再び $t = t_{c1}$ でしゃ断されたとすると、再び再起電圧が上昇する。その初期条件を与えるのが $t = t_{c1}$ における L_0 中の電流瞬時値 I_{c1} および (P) 点の電圧瞬時値 V_{p1} である。

(3) $t = t_{c1} \sim t_{b2}$ の期間

再び回路がしゃ断されると、上の初期値を用いて、次式で表現される再起電圧が上昇する。

$$v = Er \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{V_{p1}}{Er}\right)^2 + \left(\frac{Z_0 I_{c1}}{Er}\right)^2} \varepsilon^{-\alpha(t-t_{c1})} \times \cos \{ \omega (t - t_{c1}) + \phi' \} \right] \quad (2.7)$$

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{Z_0 I_{c1}}{Er - V_{p1}} \quad (2.8)$$

これに対応する L_0 中の電流は次のようになる。

$$i_L = \frac{Er}{Z_0} \sqrt{\left(1 - \frac{V_{p1}}{Er}\right)^2 + \left(\frac{Z_0 I_{c1}}{Er}\right)^2} \varepsilon^{-\alpha(t-t_{c1})} \times \sin \{ \omega (t - t_{c1}) + \phi' \} \quad (2.9)$$

以下、 t_{b2} における V_{b2} , I_{b2} を (2.3) ~ (2.6) 式の初期条件として与えることにより $t_{b2} \sim t_{c2}$ の期間の波形が求められ、 t_{c2} における I_{c2} , V_{p2} を (2.7) ~ (2.9) 式の初期条件として与えることにより $t_{c2} \sim t_{b3}$ の期間の波形が求められる。このようにして第 2.4 図に示された波形を順次求めることができる。

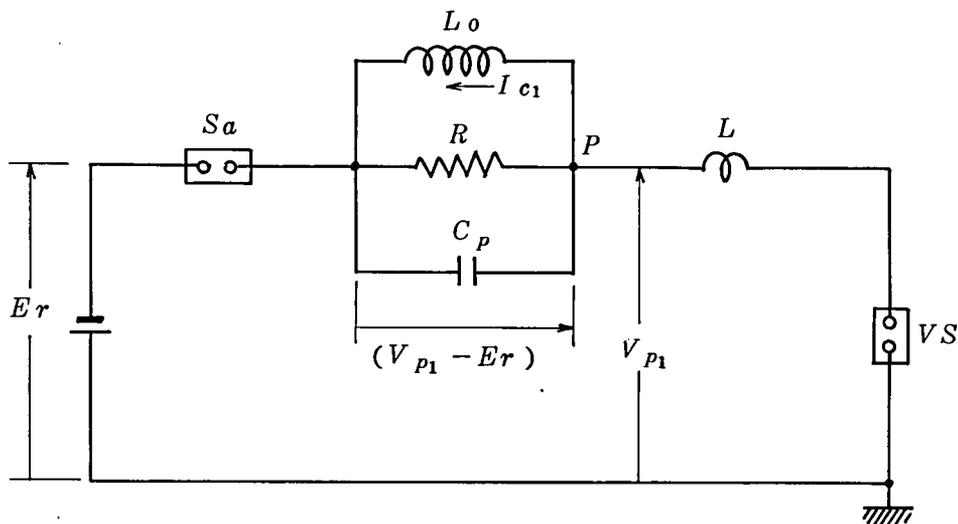
ここで最初の再起電圧を表現する (2.1) 式と 2 回目の再起電圧を与える (2.7) 式の振動

項の振巾を比較し、振巾の拡大率 G の表現式を求めると次のようになる。

$$G = \sqrt{\left(1 - \frac{V_{P1}}{Er}\right)^2 + \left(\frac{Z_0 I_{c1}}{Er}\right)^2} \quad (2.10)$$

この表現式において、根号内の第1項と第2項の意味を考えてみよう。第2.5図は第2.4図において $t = t_{c1}$ で高周波電流が VS によってしゃ断された瞬時の回路の状態をあらわしたものである。まず根号内の第1項目について考察しよう。第2.5図の(P)点の電位 V_{P1} は大地に対して正であり、回復電圧 Er は図示したように大地に対して負である。この状態では並列容量 C_P は第2.5図の極性で $(V_{P1} - Er)$ まで充電されている。 VS はすでにしゃ断の状態にあるので次の瞬間から C_P に充電された電荷は $L_0 - R - C_P$ 回路内で放電する。この場合、 R の値は比較的大きいので、放電は減衰振動となる。振動の振巾は $|V_{P1} - Er|$ で与えられ、最初の再起電圧に対する振動項の振巾 $|Er|$ と比較すると、 V_{P1} と Er が異符号の場合には、 $|V_{P1} - Er| > |Er|$ となり、振動の振巾の拡大が起る。

次に根号内の第2項について考察する。第2.5図に示したように、 VS が高周波的に電流零点を迎えて電流をしゃ断した瞬間には、 L_0 中には I_{c1} なる電流が流れている。この電流 I_{c1}



- VS : 真空スイッチ
- L_0 : 電動機等価回路のインダクタンス
- L : 高周波回路のインダクタンス
- R : 減衰抵抗
- C_P : ケーブルを含めた電動機回路の漂遊容量
- S_a : 補助スイッチ
- Er : 回復電圧
- I_{c1} : L_0 中の電流
- V_{P1} : P点の電圧

第2.5図 高周波しゃ断瞬時の回路状態

は、 VS がしゃ断の状態にあるので、次の瞬間から L_0-R-C_p 回路内の減衰振動電流となる。したがってその過程において L_0 を流れる電流 I_{c1} が C_p を充電することを考えると、 C_p の両端に発生する電圧は L_0-R-C_p 回路のサージインピーダンスを Z_0 として $Z_0 I_{c1}$ となる。この電圧は VS が直接 I_{c1} をさい断した場合に発生する電圧に等しいが、この場合には L_0 中に電流を残して、真空スイッチが高周波の電流零点で回路をしゃ断しているのであって、従来の電流さい断と異なっていることに注目したい。

根号中の第1項は、 V_{p1} が負の場合には1以上の値となるので、この場合には第2項がなくても電圧の拡大が起りうる。この現象は、まさに充電々流しゃ断時の再点弧による電圧拡大現象に対応するものである。第2項は L_0 に I_{c1} だけの電流を残して真空スイッチが電流 i をしゃ断してしまうことに起因する項で、真空スイッチが直接 I_{c1} をさい断した場合と発生する電圧が等しい。

以上は第1回目の再発弧に伴う振巾の拡大について述べたが、真空スイッチの極間耐圧が (2.7) 式で与えられる電圧以上に回復しない場合には、続いて再発弧としゃ断がくり返される。

そこで多数回の再発弧が生じた後の振巾の拡大について考察する。(2.10) 式に含まれる V_{p1} の一般形を V_{pn} と表現し、第2.2図に示されているように第1回目の発弧においても高周波電流がかなり減衰してはじめてしゃ断されるような場合には、第2.4図の V_{pn} に対応する第2.2図の V_{pn} は、時間の経過とともに平均的には上昇するが、ほとんどの場合数 kV 以下の低い電圧で分布する。しかも V_{pn} は正負両方の値をとり得るので、 V_{pn} が電圧の拡大に効果的な寄与をしていないことは明らかである。これに対して、(2.10) 式の I_{c1} の一般形を I_{cn} としたとき、 I_{cn} は第2.3図に示すように発弧のくり返しとともに確実に増大している。すなわち電圧の拡大に支配的な役割を果しているのは、(2.10) 式の第2項であることは明らかである。

従来真空スイッチの再発弧に伴う電圧の拡大現象は、高周波電流が半サイクルでしゃ断される場合を考え、 $V_{pn} < 0$ として (2.10) 式の第1項による電圧の拡大現象であると考えられていた。⁽⁴⁾⁽⁵⁾ しかし電圧の拡大に支配的な役割を果すのは第2項であり、この重要性を本研究によってはじめて明らかにすることができた。⁽²⁾

(2.10) 式の第2項は、真空スイッチが高周波電流の零点で電流をしゃ断しているにもかかわらず、しゃ断後にあらわれる電圧が L_0 中の電流を直接さい断した場合と等しいことを表わしているので、以下ではこの現象を「強制さい断による再起電圧拡大現象」と呼ぶ。

なお、再起電圧拡大率 G は、ケーブルによって与えられる高周波回路のサージインピーダンス Z と電動機回路のサージインピーダンス Z_0 との比 $A = Z/Z_0$ を用いて

$$G = 2\pi\sqrt{A} \sum_j N_j \quad (2.10')$$

で与えることもできる。(付録B参照) ここに N_j は j 回目の再発弧後に流れる高周波電流のしゃ断までのサイクル数である。一般に A の値は 1 と比較すると小さいが、 n 回目の再発弧までの高周波電流通電サイクル数の総和が $(n+1)$ 回目の再起電圧の拡大率に影響を与えるので、(2.10') 式の G は大きい値となり得る。

2.2.3 電圧拡大の条件と異常電圧

前項で述べたように多重再発弧に伴う再起電圧の拡大は、負荷のインダクタンス中に電流を残して、真空スイッチが高周波的電流零点で回路をしゃ断するという現象、すなわち強制さい断によることが明らかとなった。

この強制さい断による電圧拡大現象が生じるためには、まず真空スイッチが再発弧する必要がある。すなわち(2.7)式を n 回目の再発弧まで一般化したときの再起電圧波高値 V_m が、真空スイッチの極間耐圧 V_D より大きい場合に再発弧するので、(2.7)式で $\cos\{\omega(t-t_c)+\phi'\} = -1$ とおいて、再発弧発生条件は次式で与えられる。

$$\frac{V_D}{E_r} < 1 + \lambda^{1-\frac{\phi'}{\pi}} \sqrt{\left(1 - \frac{V_p}{E_r}\right)^2 + \left(\frac{Z_o I_c}{E_r}\right)^2} \quad (2.11)$$

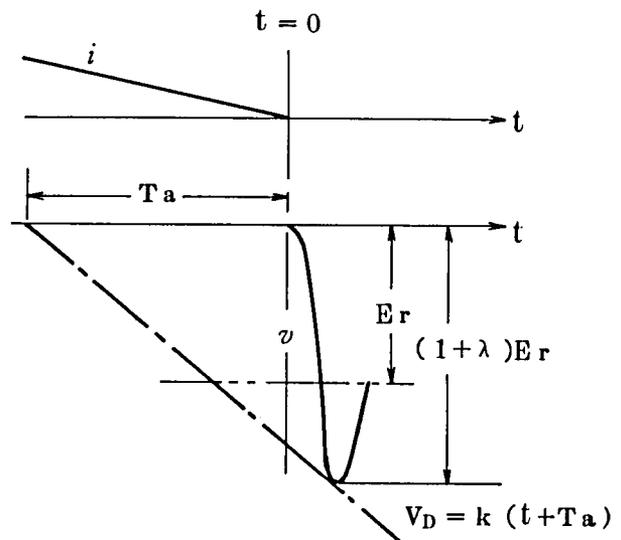
ここに λ は(2.7)式の α と $\lambda = \exp(-\alpha\pi/\omega)$ の関係がある。

まず最初の再起電圧による再発弧については、再起電圧をあらわす(2.11)式の右辺において $V_p = 0$, $I_c = 0$ であり、再起電圧の振動数は高いので、その上昇期間を無視するものとし極間耐圧 V_D が開極後の時間に比例するとして比例定数を k とすると、第2.6図を参照してアーク時間 T_a が

$$T_a \leq \frac{1+\lambda}{k} E_r \quad (2.12)$$

の場合に再発弧する。(2.12)式は通常の真空スイッチの k がオシログラムから 10 kV/ms のオーダーであり、 λ は 0.6 程度であるから⁽²⁾、 $T_a \leq 0.6$ ms (3 kV回路)となる。三相回路の場合には、商用周波数を f_o として電流零点は $1/6 f_o$ (秒)ごとになるので再発弧の発生確率 P_{ig} は

$$P_{ig} = \frac{T_a}{1/6 f_o} = \frac{6 f_o (1+\lambda)}{k} E_r \quad (2.13)$$



第2.6図 アーク時間と再発弧の発生

で与えられる。上の例では $f_0 = 60\text{Hz}$ の場合 $P_{ig} = 0.23$ となり 高い確率で再発弧することになる。

つぎに一度再発弧してこれが多数回の再発弧につながり、電圧拡大現象が生じるための条件を考察する。多数回の再発弧が生じるためには次の二つの条件が必要となる。

- (1) 数回の再発弧後でもなお (2.11) 式が成立すること。
- (2) 再発弧後に真空スイッチを流れる電流が高周波的に電流零点を通過すること。

である。いま第 2.2 図に示すように、高周波電流の通電時間がしゃ断時間と比較して長い場合を考えると、上の条件は近似的に次の不等式で表現される。(付録 C 参照)

$$\frac{\sqrt{1-\delta^4}}{\delta^2} \sqrt{2} \omega_0 \approx I < k < \lambda \omega E_r \quad (2.14)$$

ここに ω_0 は商用角周波数、 I は負荷電流実効値である。 δ は (2.3) 式の β と $\delta = \exp(-\beta\pi/\omega_h)$ で関係づけられている高周波電流の半サイクル減衰率を与える量である。

(2.14) 式の左辺は通常数 $V/\mu\text{s}$ であり、右辺は数百 $V/\mu\text{s}$ であって、 k は通常数十 $V/\mu\text{s}$ であるので、ほとんどの電動機に対して突流しゃ断の場合には (2.14) 式が成り立つ。多重再発弧が電流の半サイクル (4ms) 続くと、 $k = 10 V/\mu\text{s}$ として異常電圧は 40kV にも達することになる。ただし電源のインピーダンスが高い回路または電動機が定速回転している回路のしゃ断では、 δ が高くなるか、または E_r が小さくなって (2.14) 式が成立せず、再発弧しても数回で終了する結果、高い異常電圧は出現しなくなることも (2.14) 式から推論できる。

上の推論では k は一定値であって、不等式の左辺および右辺の値によって再発弧現象が停止することを考えたが、真空スイッチの k の値が現象の途中で変化しても (2.14) 式が成立しなくなり、再起電圧拡大現象の停止が起りうるということが十分予測される。この場合については第 3 章で回路条件の変化とともに詳細に論じる。

最後に多重再発弧によって異常電圧が発生すると、極間の再発弧時に波頭の急しゅんなサージが発生し、ケーブルを通過して電動機に進入するので電動機巻線のターン間絶縁を脅かす危険性があることに注意しなければならない。

2.3 三相同時しゃ断現象による異常電圧の発生

前節ではしゃ断の第 1 相について多重再発弧現象による異常電圧の発生機構について論じたが、第 1 章の第 1.25 図に示したように、第 1 相の多重再発弧によって他の 2 相もほとんど同時にしゃ断される、三相同時しゃ断現象が存在することが実験によって明らかになっている。そこで本節では三相回路を対象に、三相同時しゃ断現象の発生機構および発生の条件について検討を加える。

2.3.1 三相回路における誘導電流に関する実験

一般にしゃ断の第1相の電流零点では、他の2相は負荷電流 I の $\sqrt{3/2}$ 倍の瞬時値を有しており、第1相のしゃ断後電気角で 90° おくれて零点を迎え、そこでしゃ断される。したがってもし第1相のしゃ断後 1ms 程度以下の短時間で他の2相がしゃ断されることがあれば、何らかの理由で強制的に電流零点が形成されたものと考えられる。

そこで第1.25図にみられるように、第1相の多重再発弧時に他の2相にどのような電流が流れるかを明らかにするため、三相ケーブルを用いて第1相の再発弧時に他の2相に誘導される電流を求める実験を実施した。以下では他の2相のことを他相と呼ぶことにする。

前節で考察した回路と同様にここでも真空スイッチの電源側のサージインピーダンスは十分低いものとする。またケーブルのサージインピーダンスは数十 Ω であり、電動機のサージインピーダンスは数百 Ω 以上であるので、ケーブルでの現象を考察する場合には、ケーブルの電動機端側は開放端と考えることができる。

そこで実験回路としては第2.7図に示す回路を構成した。図でA相の電動機側は充電用高抵抗を介して高圧電源に接続されているので、すべての相の電動機端は、高周波現象に対しては開放とみなされる。一方ケーブルの電源側は、芯線の電流を測定するために数 $\text{m}\Omega$ の低抵抗で接地されている。まず、A相をしゃ断の第1相と仮定して任意の電圧 V_0 まで充電し、気中ギャップ G を放電して回路に高周波電流を流し、その時の各相の波形を観測した。第2.8図は 200m のケーブルのA相を 5kV まで充電してギャップ G を放電した場合のA相 A' 点およびB相 B' 点の各電流波形である。第2.9図はA相の充電電圧と A' 点の電流波高値との関係を示している。この図からケーブルのサージインピーダンスとして

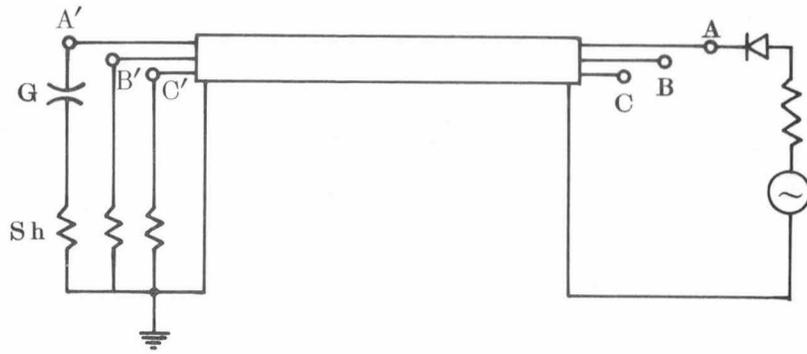
$$Z_c = 30 \sim 40 \Omega \quad (2.15)$$

であることがわかる。さらに A' 点電流波高値と B' 点電流波高値とを比較すると第2.10図のようになった。この図から結合係数 η として

$$\eta = \frac{i_{B'}}{i_{A'}} = 0.4 \sim 0.6 \quad (2.16)$$

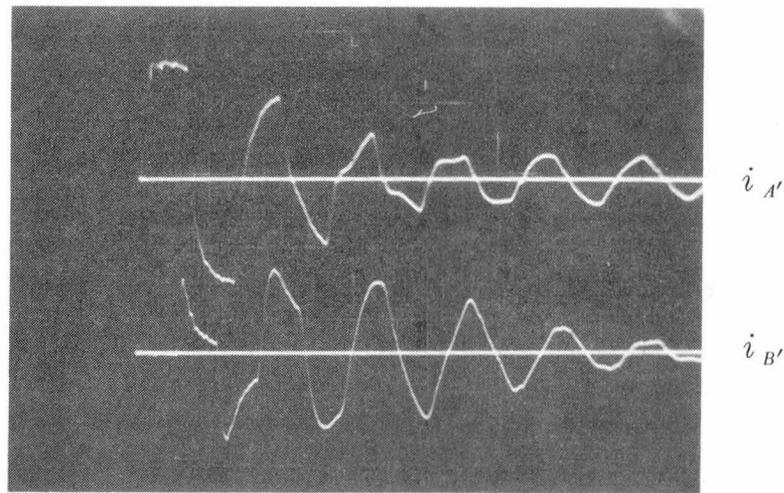
であることがわかる。

さらにケーブルの特性をよく把握するために、発電機巻線のサージ特性の解析⁽⁷⁾に利用されている第二京大法を用いて実験した。



G : 気中ギャップ
Sh : 分流器

第 2.7 図 高周波誘導電流の実験回路

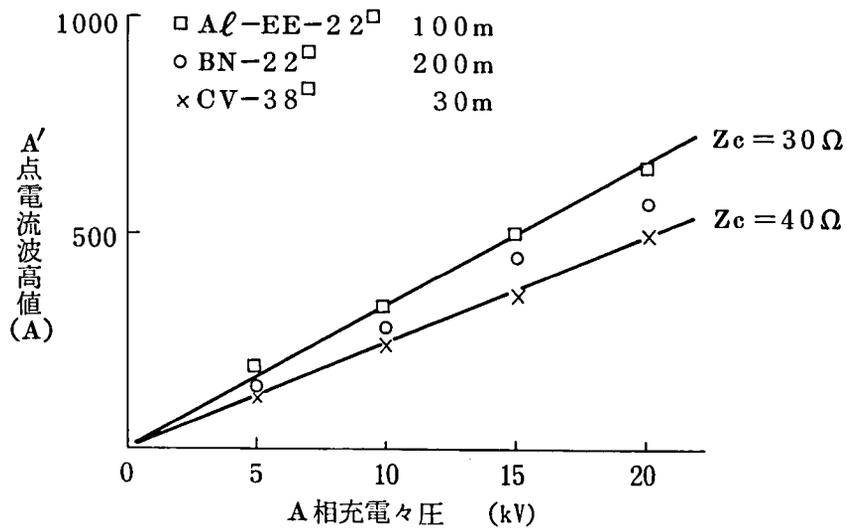


$$i_{A'} = 85.2 \text{ A/div}$$

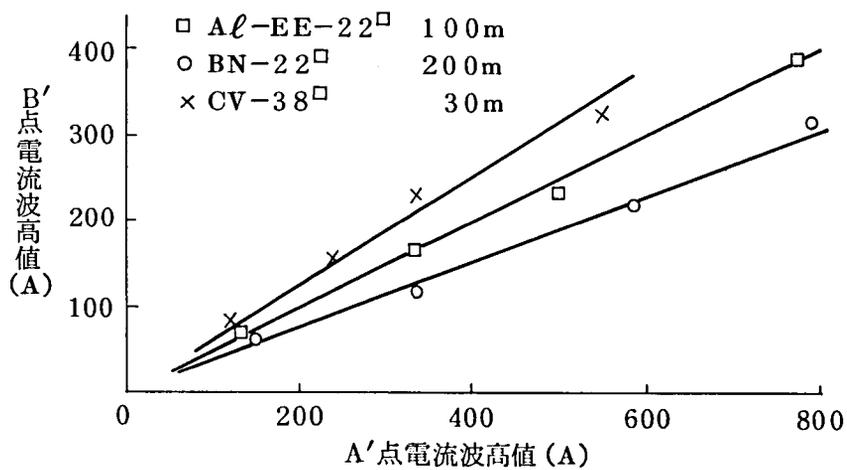
$$i_{B'} = 56 \text{ A/div}$$

$$T = 5 \mu\text{s/div}$$

第 2.8 図 A' 点 B' 点の高周波電流波形 (充電電圧 5 kV)



第 2.9 図 A 相充電々圧と A' 点電流波高値の関係



第 2.10 図 A' 点, B' 点電流波高値の関係

第 2.11 図は第二京大法を実行するための回路構成を示している。図の回路で一般的に内部インピーダンスが $Z_i(p)$ の衝撃波電圧発生装置に標準インピーダンス関数 $Z_s(p)$ を接続した場合の出力電圧を $E_s(p)$ とし、未知のインピーダンス関数 $Z_x(p)$ を接続したときの出力電圧を $E_x(p)$ とすると、 $Z_x(p)$ は次式で得られる。

$$Z_x(p) = \frac{E_x(p)}{E_s(p) + \frac{Z_s(p)}{Z_i(p)} [E_s(p) - E_x(p)]} Z_s(p) \quad (2.17)$$

ここで短時間の現象に着目し、直描法が採用できるようにするために

$$Z_i(p) \gg Z_s(p)$$

とし、 $Z_i(p)$ 、 $Z_s(p)$ を純抵抗 R_i 、 R_s とした。⁽⁷⁾

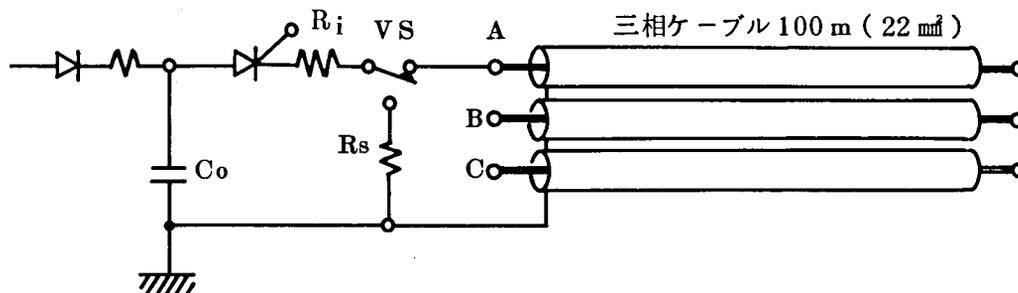
この場合には (2.17) 式は

$$Z_x(p) = \frac{E_x(p)}{E_s(p)} R_s \quad (2.18)$$

となり、 $E_s(p)$ の波形が矩形波 E_s である場合には (2.18) 式は (2.19) 式となり、実測波形からサージインピーダンスを直接求めることができる。

$$Z_x(t) = \frac{e(t)}{E_s} R_s \quad (2.19)$$

したがって実測に当っては、(2.19) 式が満足されるように、測定回路のインピーダンスを選定した。すなわち $Z_i = R_i = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $C_o = 1 \mu\text{F}$ に選定した。また R_s としてはケーブルのサージインピーダンスに近い 50Ω に選定した。

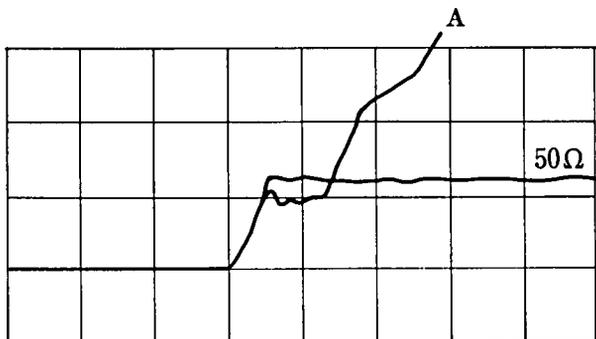


R_s : 標準抵抗 R_i : 制限抵抗 V_S : スイッチ C_o : 電源コンデンサ

第 2.11 図 第二京大法による測定回路

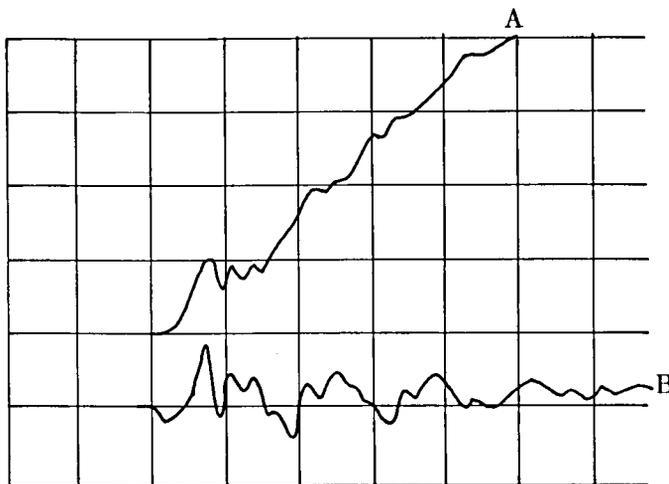
第 2.12 図および第 2.13 図は両端開放の条件で試験をして得られたオシログラムの例である。 V_o は電源コンデンサ C_o の充電電圧である。第 2.12 図には A 相に電圧を印加したときの A 点電

圧と、スイッチ S をケーブルから純抵抗 R_s に切りかえた場合の波形を示している。第 2.13 図は A 相に電圧を印加したときの A 点電圧と B 点電圧の波形を示している。C 点についても同様な結果が得られたが、ケーブルの幾何学的構成から当然である。



$V = 20\text{V/div}$
 $T = 1\mu\text{s/div}$
 $V_o = 538\text{V}$

第 2.12 図 両端開放時の A 相電圧波形と標準電圧波形



$V = 20\text{V/div(A)} \quad 10\text{V/div(B)}$
 $T = 1\mu\text{s/div}$
 $V_o = 419\text{V}$

第 2.13 図 両端開放時の A, B 点電圧波形

さて A 相に電圧を印加したときの各相の電圧電流は次式によってあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} e_A &= Z_{AA} i_A + Z_{AB} i_B + Z_{Ac} i_c \\ e_B &= Z_{BA} i_A + Z_{BB} i_B + Z_{Bc} i_c \\ e_C &= Z_{CA} i_A + Z_{CB} i_B + Z_{Cc} i_c \\ i_B &= 0 \\ i_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

ここに Z_{AA} , Z_{BB} , Z_{CC} は各相の自己サージインピーダンス、 Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} は相互サージインピーダンスであり、 $Z_{AB} = Z_{BA}$, $Z_{BC} = Z_{CB}$, $Z_{CA} = Z_{AC}$ である。

以上の関係式から Z_{AA} は

$$Z_{AA} = \frac{e_A}{i_A} \quad (2.21)$$

で与えられるが、 $R_i \gg R_s$, Z_{AA} の条件で実験しているから i_A は電流源であり、(2.19)式の関係から

$$Z_{AA} = \frac{e(t)}{E_s} R_s \quad (2.22)$$

となり第 2.12 図から

$$Z_{AA} = 38 (\Omega)$$

を得る。 Z_{BB} , Z_{CC} についても三相ケーブルの幾可形状から Z_{AA} と等しいと考えられる。したがって

$$Z_{AA} = Z_{BB} = Z_{CC} = 38 \Omega \quad (2.23)$$

となる。

つぎに相互サージインピーダンスについて検討する。(2.20)式から e_B , e_C を求めると

$$\left. \begin{aligned} e_B &= \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}} e_A \\ e_C &= \frac{Z_{AC}}{Z_{AA}} e_A \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

となり、(2.24)式の Z_{AB}/Z_{AA} , Z_{AC}/Z_{AA} は B 相、C 相の A 相に対する結合係数である。

(2.24)式から、この結合係数はそれぞれの相の誘導進行波電圧の印加相電圧に対する比から求められる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}} &= \frac{e_B}{e_A} \\ \frac{Z_{AC}}{Z_{AA}} &= \frac{e_C}{e_A} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

この関係式を用いて第 2.13 図から結合係数 η を求めると初期において

$$\eta = \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}} = \frac{Z_{AC}}{Z_{AA}} \doteq 0.5 \quad (2.26)$$

となる。

以上の結果から実験に使用した 22 mm² 程度の三相ケーブルでは代表的な値として

$$\left. \begin{array}{l} \text{ケーブルのサージインピーダンス } Z_c = 35 \Omega \\ \text{相間の結合係数 } \eta = 0.5 \end{array} \right\} \quad (2.27)$$

を採用できることが明らかになった。すなわち第1相の再発弧電圧を V_1 とすると

$$\left. \begin{array}{l} \text{第1相の電流 } i_A = \frac{V_1}{Z_c} \\ \text{他相の誘導電流 } i_B = i_C = 0.5 i_A \end{array} \right\} \quad (2.28)$$

と表現できる。

2.3.2 誘導電流による強制さい断実験

しゃ断の第1相に対する他相の真空スイッチに前項で述べた高周波誘導電流が流れた場合、負荷電流と重畳して電流零点を形成すると、真空スイッチは電流をしゃ断してしまう可能性がある。この現象を前節にならって誘導電流による強制さい断と呼ぶことにする。さて、他相のさい断される電流を I_e 、電動機回路のサージインピーダンスを Z_0 とすると、(2.7)式から再起電圧は次式で与えられる。

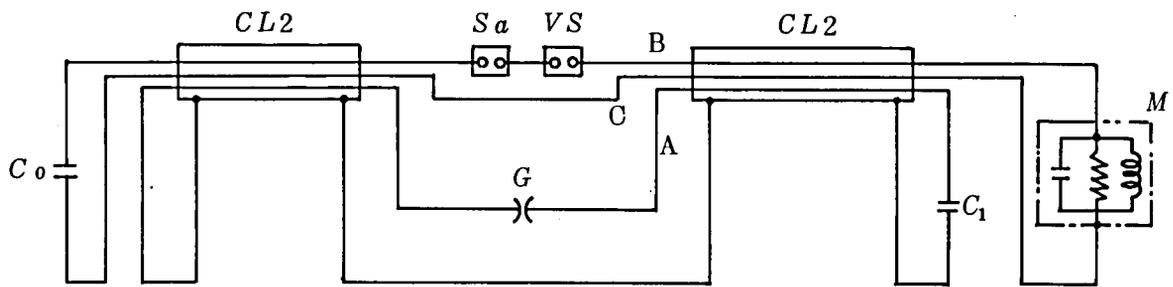
$$v = E_r \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{Z_0 I_e}{E_r} \right)^2} \varepsilon^{-\alpha t} \cos(\omega t + \phi'') \right] \quad (2.29)$$

$$\phi'' = \tan^{-1} \frac{Z_0 I_e}{E_r}$$

一般に $Z_0 I_e$ はかなり大きい値となり得るので、もし強制さい断が発生すると、高い電圧が発生するものと考えられる。

そこで第2.14図に示す回路を構成し、誘導電流を負荷電流に重畳する実験を行なった。実験では C_0 および C_1 を充電しておき VS は投入状態にしておく。次に S_a を投入してB相の VS に負荷電流を流し、電流が上昇した時点で VS をしゃ断してアークを発生させる。そこで G を放電させ C_1 からケーブルのA相に高周波電流を供給し、 VS が挿入されたB相にケーブル相間の結合によって高周波電流を流して負荷電流に重畳させる方法をとった。

第2.15図は約60Aの負荷電流に高周波電流を重畳させた場合の VS 極間電圧と電流波形を、オシログラフの掃引を変化させて観測した例である。 C_1 の充電電圧は約10kVであった。第2.15図の場合には、高周波電流の重畳によって形成されたB相の電流零点で真空スイッチ VS が負荷電流をしゃ断すると、再起電圧が上昇して VS が再発弧する様相をよくあらわしている。多数回の再発弧後電流は続弧状態となっているが、これについては次章で詳細に論じる。この現象の過程では、誘導された高周波電流によってB相に電流零点が形成され、そこで VS がしゃ断すると電動機回路のインダクタンス中には60Aという大きい電流が残されている。したがっ



- CL1, CL2 : ケーブル
- C₀ : 電源コンデンサ
- C₁ : 高周波電源コンデンサ
- M : 電動機等価回路
- VS : 真空スイッチ
- S_a : 補助スイッチ
- G : 空中ギャップ

第 2.14 図 高周波電流重畳実験回路

て、電動機回路のサージインピーダンスを $3\text{ k}\Omega$ としても発生する再起電圧波高値は 200 kV に達することが計算され、極間が再発弧するのは当然と考えられる。

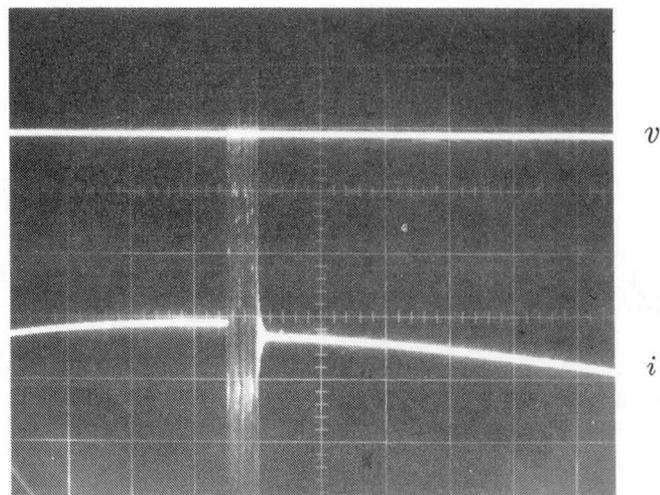
第 2.15 図で B 相の VS が負荷電流を強制さい断したときの VS の極間電圧に注目すると、多重再発弧継続期間中の極間耐圧は分布しているが、時間的には大きな変化がみられない。これは $0.2 \sim 0.3\text{ ms}$ という短時間の現象であり、VS のギャップ長の変化が 0.1 mm 程度の変化しかしないためと考えられる。図の場合には最大で 25 kV 程度の電圧が観測されているが、ギャップ長がさらに大きい時点で高周波電流を重畳すると、観測される電圧も上昇した。

第 2.16 図は負荷電流が 10 A の場合の実測例である。この場合には、次章で詳細に述べる理由により極間耐圧がこの再起電圧に耐えて負荷電流をしゃ断した例である。ここで観測された電圧の波高値は 6 kV であるが、電動機回路のサージインピーダンスが高くなると、発生する電圧も高くなり、第 2.15 図の現象があらわれることは容易に推測される。

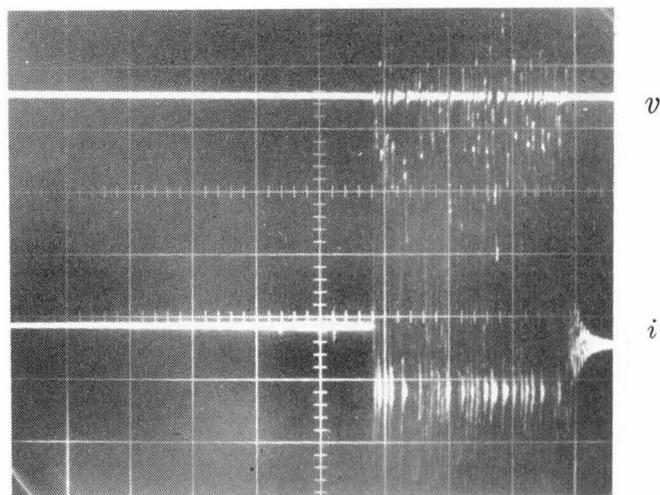
以上の実験から、第 1 相の再発弧により他の 2 相に高周波電流が誘導される結果、高周波誘導電流によって他相に電流零点が形成され、そこで強制さい断が発生すると、他相に異常に大きい再起電圧が発生し得ること、またその電圧で真空スイッチ極間が再発弧すること、その後は第 2.2 節で述べた第 1 相の多重再発弧現象と同様な取扱いが可能であることが判明した。ただし実験では第 1 相 (A 相) の高周波電流の発生が 1 回だけであるのに対して、実際の回路では多数回繰り返し印加されるので、たとえ他相で強制さい断による再発弧後に続弧しても、多

数回同様な過程のくり返しが起ることが予想される。

三相同時しゃ断現象は、負荷電流と高周波電流に関係する回路条件および真空スイッチの耐圧と電流しゃ断特性に密接に関係している。その詳細な取扱いは次章で述べることとし、次に三相同時しゃ断発生 の条件について議論する。

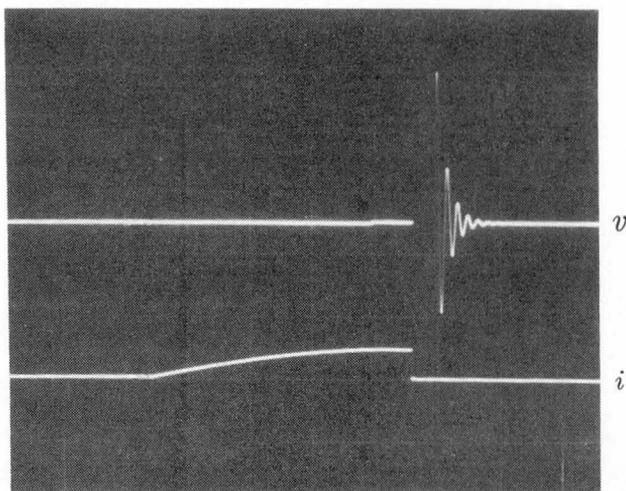


(a) $v = 10 \text{ kV} / \text{div}$
 $i = 60 \text{ A} / \text{div}$
 $T = 500 \mu\text{s} / \text{div}$



(b) $v = 10 \text{ kV} / \text{div}$
 $i = 60 \text{ A} / \text{div}$
 $T = 100 \mu\text{s} / \text{div}$

第 2.15 図 誘導電流による強制さい断と多重再発弧現象の誘発



$$v = 500 \text{ V / div}$$

$$i = 20 \text{ A / div}$$

$$T = 1 \text{ ms / div}$$

第 2.16 図 誘導電流による強制さい断

2.3.3 三相同時しゃ断の条件と異常電圧⁽⁸⁾⁽⁹⁾

三相同時しゃ断が発生するための条件としては、次の 2 つが成立する必要がある。

- (1) 第 1 相の再発弧に伴って誘導される他相の高周波電流が負荷電流と重畳して電流零点を形成すること。
- (2) 他相の真空スイッチは高周波の零点で電流をしゃ断すること。

(1) の条件に対しては、負荷電流を I とすると、第 1 相の再発弧時の他相の電流 I_e は $\sqrt{3/2} I$ であり、誘導された高周波電流の波高値を I_{h2} とすれば

$$I_{h2} > I_e = \sqrt{3/2} I \quad (2.30)$$

となればよい。電動機の kVA を Q 、回路の線間電圧を $V_{\ell-\ell}$ とすると I_e は次式で与えられる。

$$I_e = \frac{rQ}{\sqrt{2} V_{\ell-\ell}} \quad (2.31)$$

ここに r は電流のしゃ断条件によって定まり、突流しゃ断では 5、定格電流しゃ断では 1 となり、軽負荷では 1 より小さい定数である。(2.30) 式と (2.31) 式および (2.28) 式から、他相が電流零を形成するための第 1 相の発弧電圧 V_1 は

$$V_1 > \frac{\sqrt{2} r Q Z_c}{V_{\ell-\ell}} \quad (2.32)$$

となる。(2.32) 式からわかることは、電動機容量が小さく、負荷が小さい程、第 1 相の再発弧電圧が低くても電流零点を形成しうるということである。即ち定格電流以下のしゃ断では、

再発弧すると電流零を形成しやすいわけである。

次に(2)の条件については、第1相の高周波電流が減衰すると同時に他相の高周波電流も減衰するので、第1相の高周波電流がしゃ断可能な領域にあり多重再発弧する限り、波高値にして約50%の他相の高周波電流もしゃ断されるものと考えなければならない。

一例として突流しゃ断の条件で3.3 kVの電動機を考え、 V_1 を第2.2.3項で示した40 kVと考えると、 $Z_c = 35 \Omega$ として三相同時しゃ断を発生する電動機容量は、(2.32)式から

$$Q < 270 \text{ (kVA)}$$

となり、約200 kW以下の小容量電動機の場合問題となる。200 kWの4極電動機のサージインピーダンスは第1章の第1.20図から約2 k Ω であり、強制さい断される電流 I_e は(2.30)式から214 Aであるから、 $Z_o I_e \doteq 400 \text{ kV}$ となる。勿論この場合は真空スイッチの極間耐圧で電圧が制限され、第2.15図に示すように再発弧するが、極間耐圧の分布があれば異常に高い電圧が出現することは十分予測される。

真空スイッチの極間が再発弧すると、この場合にも波頭の急しゅんなサージが発生し、ケーブルを通して電動機巻線に進入するので、巻線のターン間絶縁にとって危険なことはいうまでもない。

なお、三相同時しゃ断現象については、その後いくつかの報告がなされており、⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾異常電圧の発生原因として重要であることが指摘された。

2.4 結 言

真空スイッチのしゃ断時の多重再発弧に伴う異常電圧の出現に関し、基礎的な実験回路を構成して実験的並びに現論的考察を加え、異常電圧発生機構を明らかにした。本章で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 多重再発弧現象は、通常しゃ断の第1相で真空スイッチが電流零点の直前で開極すると真空スイッチの極間耐圧が再起電圧に耐えられず再発弧し、再発弧後に流れる高周波電流の零点で電流がしゃ断され、再起電圧が上昇すると再発弧するという過程のくり返しであることを明らかにした。
- (2) 多重再発弧による異常電圧の出現は、真空スイッチの高周波電流しゃ断能力に起因している。すなわち再発弧によって流れる高周波電流と負荷電流の合成電流が電流零点を形成すると、真空スイッチは電流をしゃ断するが、電動機巻線中には負荷電流が残された状態となる。したがってしゃ断後にあらわれる電圧は、負荷電流を直接さい断した場合と等しく、この現象が異常電圧発生の原因となっていることを明らかにした。この現象を「強制さい断による再起電圧拡大現象」と名づけた。

- (3) 真空スイッチの本来の電流さい断特性は、最初の再起電圧の振巾を増大させ、多重再発弧現象の発生確率を高める効果がある。(2.11) 式参照。
- (4) 多重再発弧現象による異常電圧は、電源のサージインピーダンスが多数本のケーブルの接続によって低下した回路で、電動機の突流をしゃ断する場合に発生し、異常電圧の波高値は 40 kV にも達する可能性がある。しかし定格定速運転の場合あるいは電源のインピーダンスが高い場合には再発弧してもあまり継続せず電圧もそれほど上昇しない。
- (5) 三相同時しゃ断現象は、しゃ断の第 1 相の再発弧によって他相に誘導された高周波電流と負荷電流が重畳して電流零点を形成したときに発生する他相の強制さい断現象である。
- (6) 三相ケーブルに流れる再発弧時の第 1 相の高周波電流の波高値は再発弧電圧をケーブルのサージインピーダンスで除した値を有しており、他相には第 1 相の 50 % の波高値を有する電流が誘導される。
- (7) 三相同時しゃ断が発生すると、他相に現われる再起電圧の波高値は数 100 kV にも達し真空スイッチは再発弧して他相単独で多重再発弧する場合がある。
- (8) 再発弧によって再起電圧の波高値が抑制されても、発弧時の極間耐圧と等しい波高値を有し、波頭の急しゅんなサージがケーブルを通過して電動機巻線に印加され、巻線のターン間絶縁破壊の危険性がある。

以上にのべたように、多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象によって、異常電圧が出現することが明らかになった。しかしこれらの現象は真空スイッチの特性および回路条件によって変化するので、次章でより詳細に取扱う。

第3章 開閉サージ現象の解析的研究

3.1 緒 言

開閉サージの発生原因として、

- (1) 第1相しゃ断における多重再発弧現象
- (2) 第1相しゃ断時における他相の三相同時しゃ断現象

があり、いずれも高い波高値を有する異常電圧を発生する可能性があることを第2章で明らかにした。

しかし第2章では、考察の便宜のために現象の本質を失わない程度に真空スイッチの特性および回路条件の簡素化を行なって議論を進めた。実際のフィールドにおける真空スイッチの適用を考える場合には、これらの現象に関与する因子の効果をさらに究明して、危険性の高い条件をより明らかにしておく必要がある。現象に関与する因子としては、

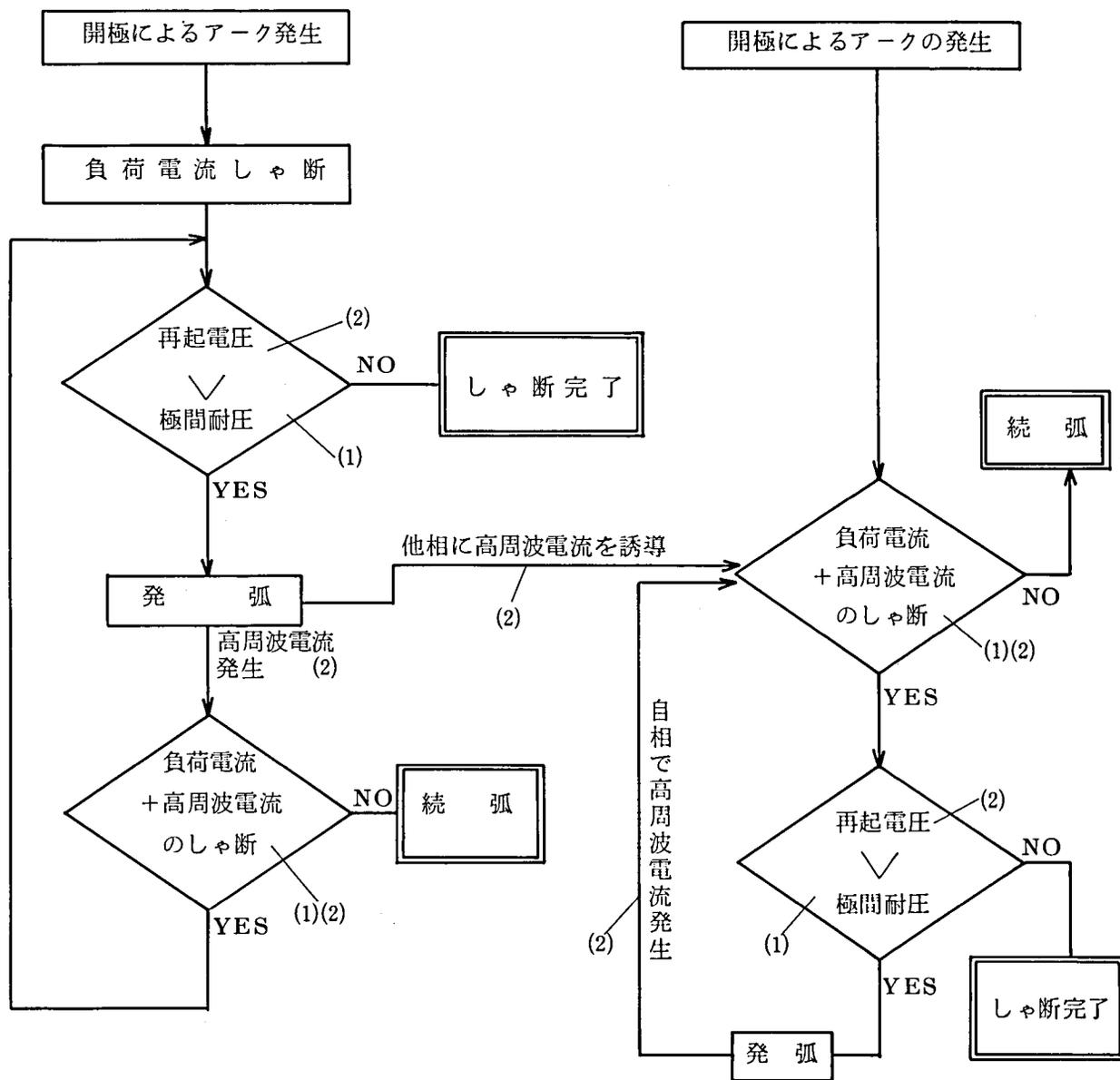
- (1) 真空スイッチの特性
 - a. 耐圧特性
 - b. 高周波しゃ断特性
 - c. 電流さい断特性
- (2) 回路条件
 - a. 再起電圧
 - b. 高周波電流

がある。

第3.1図は第2章で明らかになった現象の過程を図にして示し、各過程において関与する因子を番号で示した。この図から明らかなように、真空スイッチの特性と回路条件が明確になれば、再発弧現象のシミュレーションが可能となり、したがって発生する異常電圧を予測することが可能となる。これまでにこの種の計算を行なった例があるが⁽¹⁾、真空スイッチの特性の統計的性質を考慮していない。また実験的に異常電圧の発生に対して検討を加えた例もあるが⁽²⁾⁽³⁾、あらゆる回路条件について実験的に異常電圧の発生を明らかにすることは困難である。本章では、真空スイッチの特性を統計的には握し、各種の回路条件およびしゃ断条件について現象のシミュレーションを行なって、真空スイッチの適用上注意すべき領域を明らかにする。なお本章ではさい断電流の小さいC接点(第1章第1.3節参照)を用いた真空スイッチを対象とする。

第1相 多重再発弧現象

他相 三相同時しゃ断現象

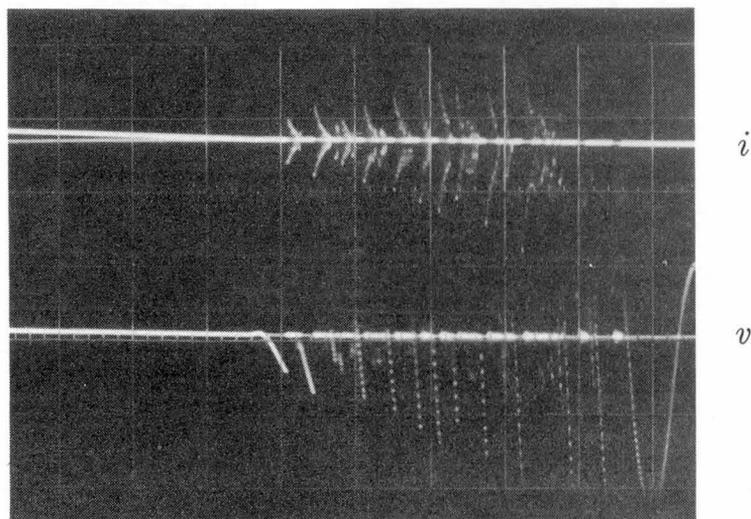


- (1) 真空スイッチの特性
- (2) 回路条件

第3.1図 現象のフロー図

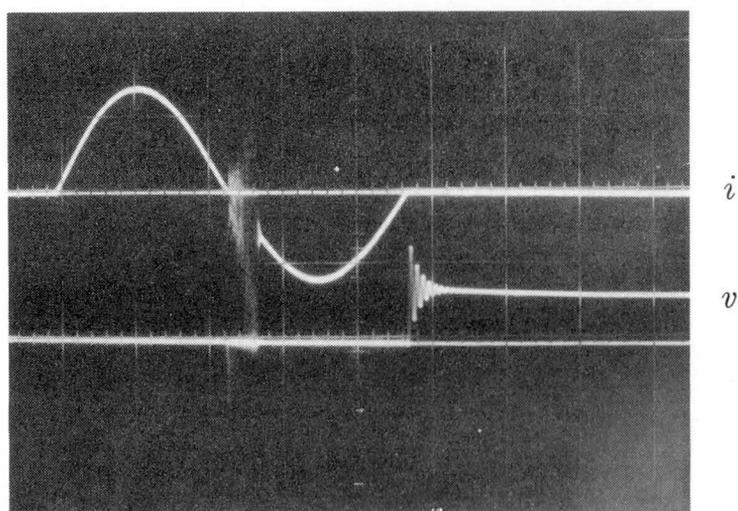
3.2 真空スイッチの特性

第2章で述べたように、強制さい断による再起電圧拡大現象および三相同時しゃ断現象は、回路条件とともに真空スイッチの開極に伴う耐圧の上昇速度によっても規制され、また高周波しゃ断能力によっても影響を受ける。実際第2章第2.1図に示した回路で実験を行なうと、高い異常電圧が発生する場合もあるが、第3.2図および第3.3図に示すように、多重再発弧中に



$$\begin{aligned}i &= 250 \text{ A/div} \\v &= 5 \text{ kV/div} \\T &= 200 \text{ } \mu\text{s/div}\end{aligned}$$

第3.2図 しゃ断による再起電圧拡大現象の停止

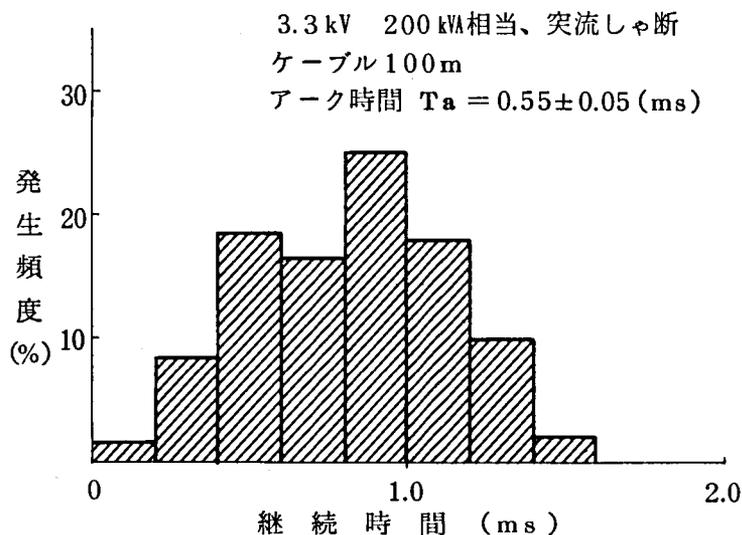


$$\begin{aligned}i &= 250 \text{ A/div} \\v &= 5 \text{ kV/div} \\T &= 2 \text{ ms/div}\end{aligned}$$

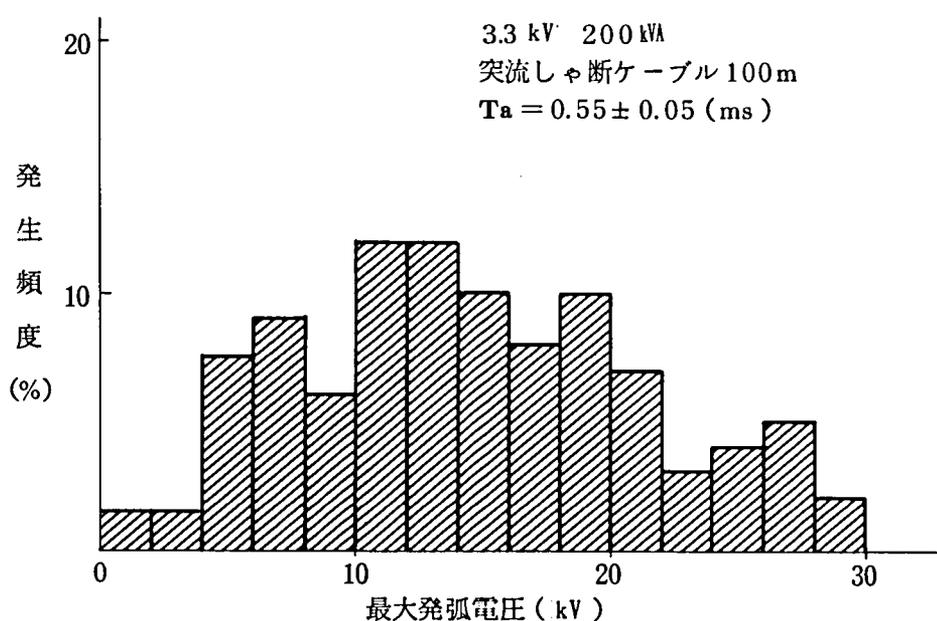
第3.3図 続弧による再起電圧拡大現象の停止

しゃ断または続弧することにより、再起電圧拡大現象が停止する場合は観測される。これは真空スイッチの特性に統計的性質があるためである。

そこでさい断電流の小さいC接点を有する真空スイッチで約2,000回のしゃ断実験を行なって電圧、電流をデジタル計測システム⁽⁴⁾を利用して測定し、蓄積された多数のデータを解析した。第3.4図は3.3 kV、200 kVAの電動機の突流しゃ断を想定し、ケーブル長を100 mとしたときの多重再発弧継続時間の分布を示しており、第3.5図は多重再発弧現象における最大再発

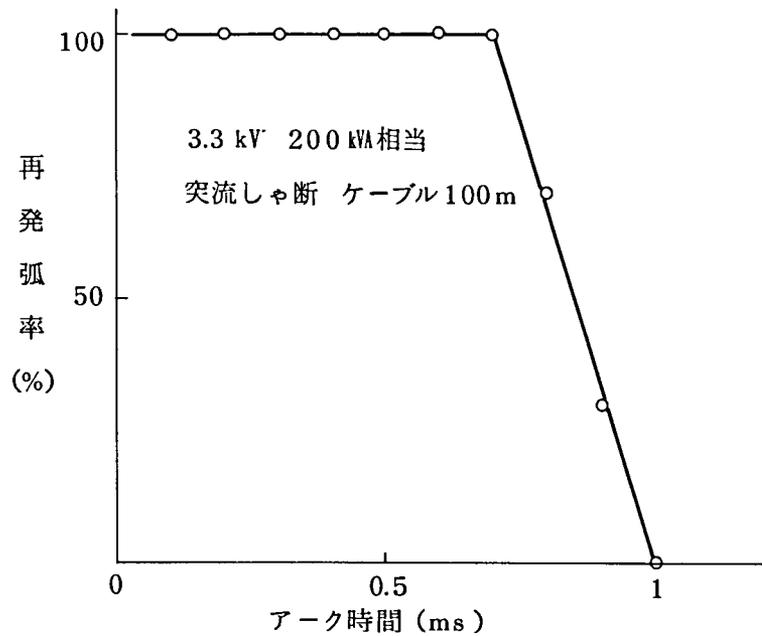


第3.4図 多重再発弧継続時間の分布

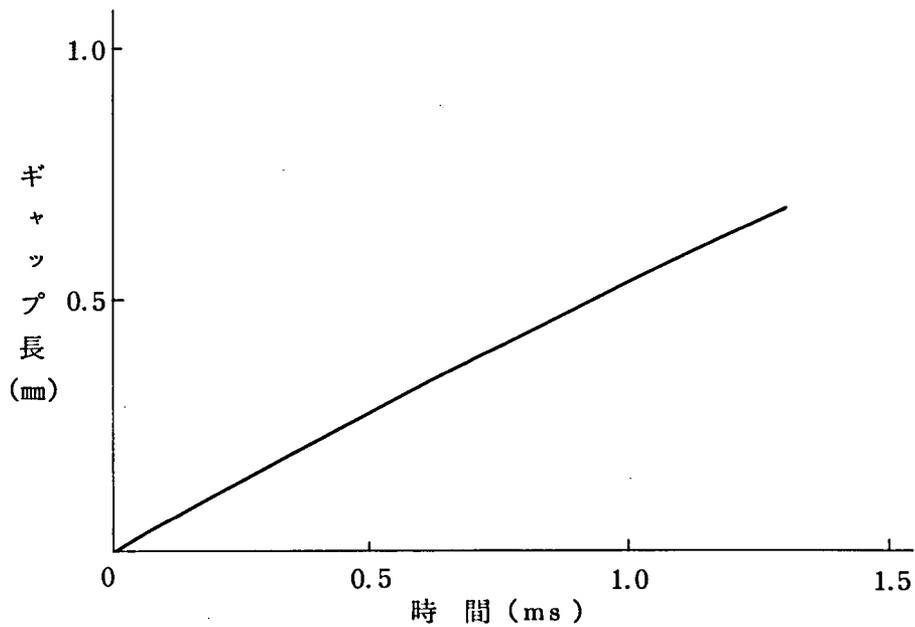


第3.5図 再発弧電圧最大値の分布

弧電圧の分布を示している。これらの図から、平均的な極間耐圧の上昇を仮定すると耐圧上昇速度 k は $10 \sim 20 \text{ V}/\mu\text{s}$ となり、第 2 章で仮定した値は妥当であることが示された。第 3.6 図は再起電圧上昇時のギャップ長に関するアーク時間 T_a の関数として再発弧の発生確率を示すグラフである。第 3.7 図に示す供試スイッチの開極ストローク曲線から、ギャップ長が 0.46



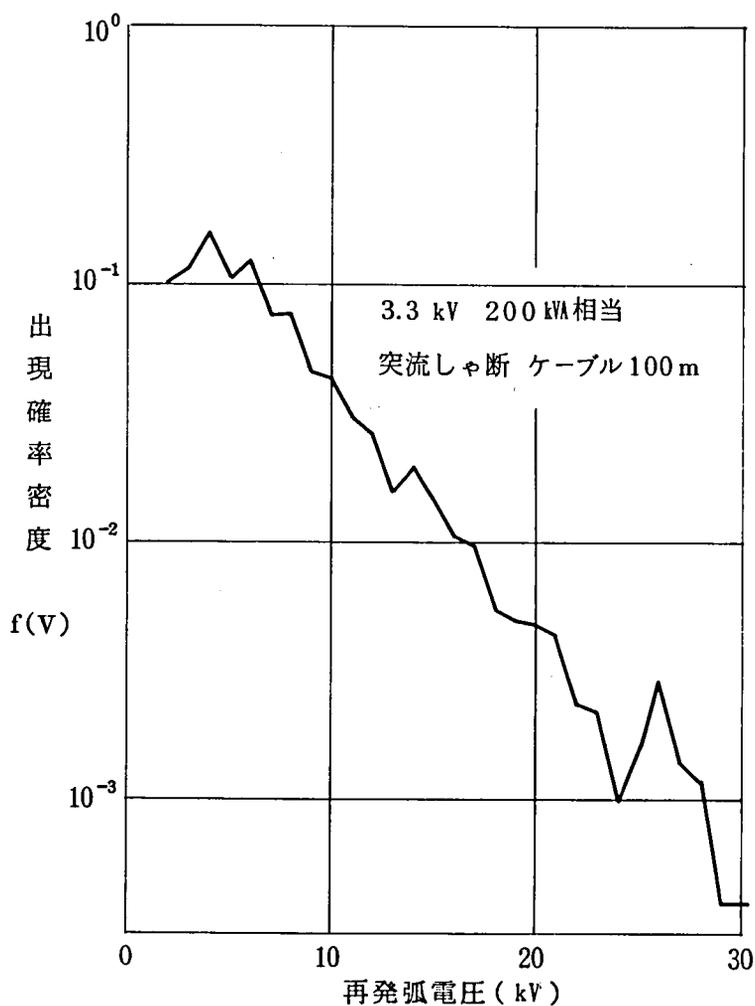
第 3.6 図 供試真空スイッチの再発弧率とアーク時間との関係
(3.3 kV 回路、再起電圧周波数 5 KHz 振巾率 1.6)



第 3.7 図 供試真空スイッチのストローク曲線

mmであれば6.4 kVの再起電圧波高値で100%再発弧することがわかる。逆にこの電圧で再発弧しないギャップ長は0.57 mmである。

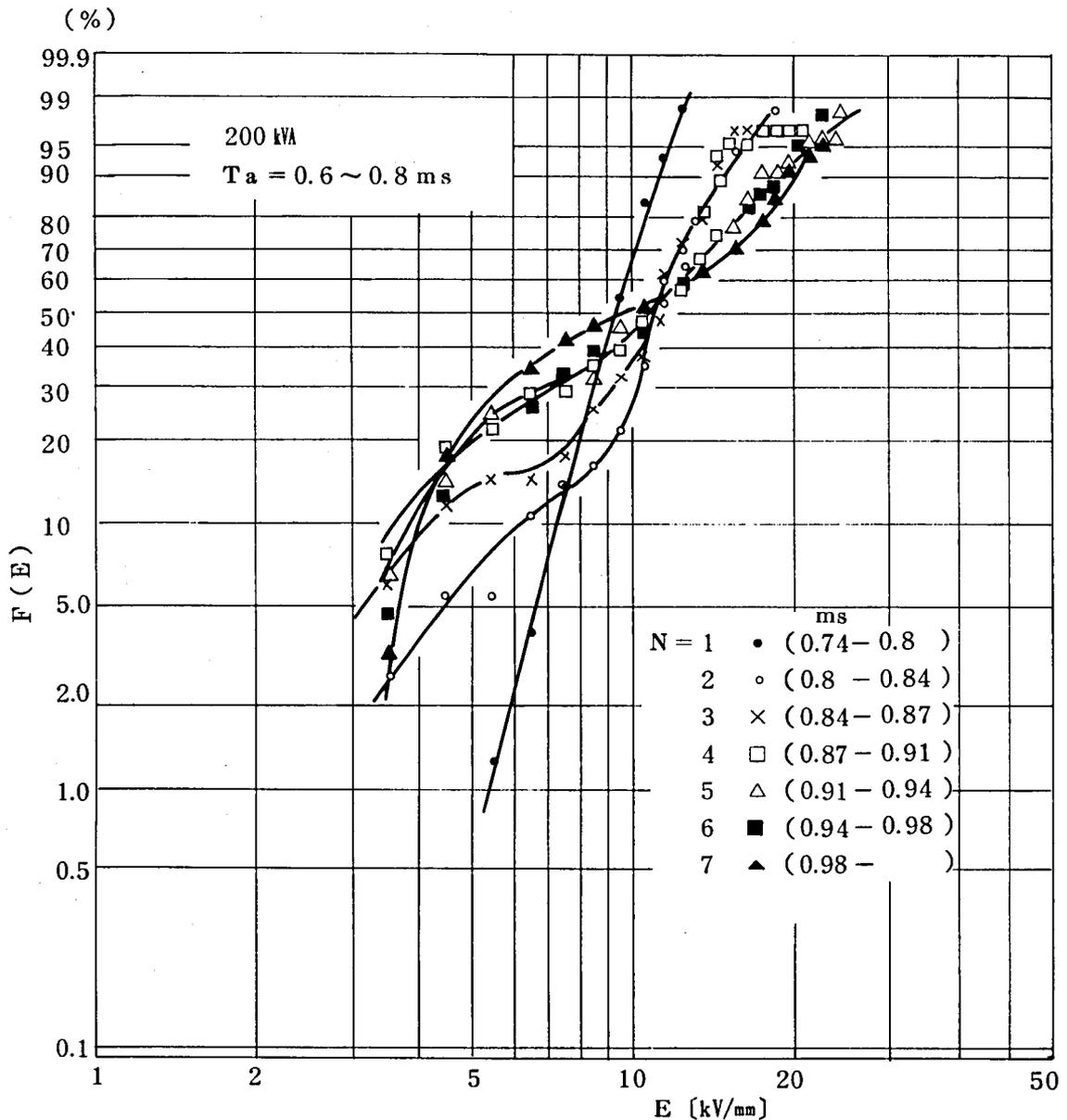
さて Ta が1 ms以下で再発弧する場合について、すべてのアーク時間を含めて多重再発弧の各再発弧電圧を集積し、1 kVごとに発生度数分布を求めてこれを規格化すると、第3.8図に示すグラフが得られる。これは多数回の再発弧を伴うしゃ断に対して、1回の再発弧に対する電圧の確率密度を与えている。このグラフから電圧が高くなる程出現する確率が一様に低下していることがわかる。このような傾向を示すことは、第3.2図および第3.3図に示したしゃ断または続弧現象が関与しているためである。以下では、再起電圧拡大現象の停止と関係する真空スイッチの耐圧特性および高周波電流しゃ断特性の統計的性質について述べる。



第3.8図 再発弧電圧と出現確率密度

3.2.1 耐 圧 特 性

第 3.9 図は一例として、アーク時間 $T_a = 0.6 \sim 0.8$ ms の場合について再発弧時の電界 E を計算し、再発弧の順に累積確率をワイブル確率紙にプロットしたものを示した。図の N は再発弧の番号、()内は開極時からの時間を示している。ここで電界は、再発弧電圧および開極後再発弧までの時間と第 3.6 図のストローク曲線とから求めたギャップ長を用いて計算した。図に示された分布形状から、第 1 回目の再発弧電界は一つの分布形で表現されるが、再発弧の回数が進むと次第に混合ワイブル分布の特性を示してくる。そこで 3 回目以後の再発弧に対する分布曲線を変曲点で 2 つの分布に分離した。第 3.10 図は分離後の分布形状を示している。第 3.10 図では分離された各群の曲線は相互に類似しており、再発弧のくり返しとともに、高電界の

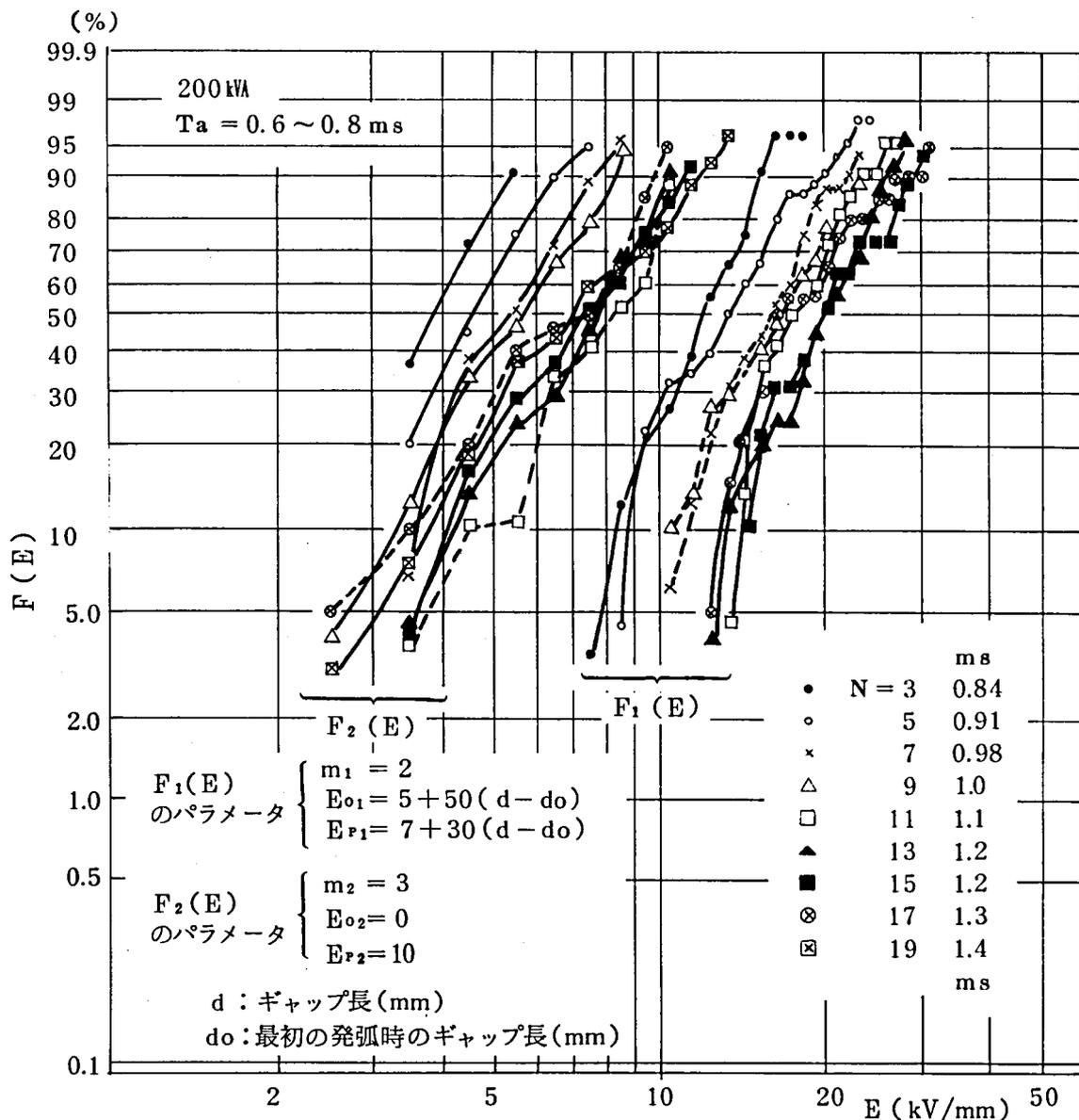


第 3.9 図 破壊電界の分布の一例

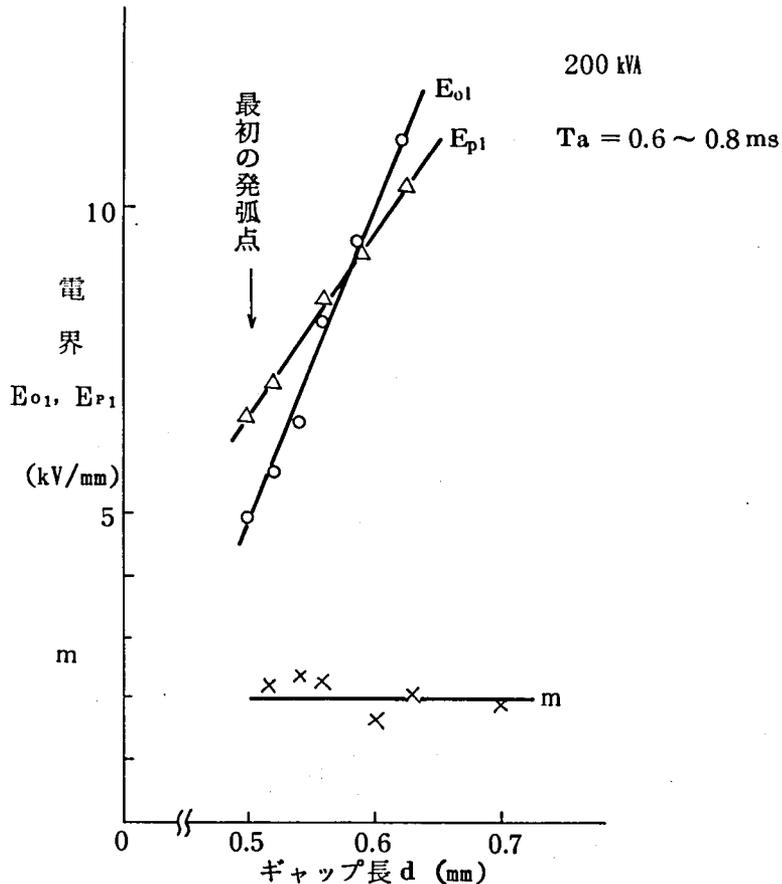
方向に平行移動した形態を有しており、ワイブル分布でとり扱いうことが予想された。⁽⁵⁾⁽⁶⁾
 さてワイブル分布の累積確率は次式で与えられる。⁽⁷⁾

$$F(E) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{E - E_0}{E_p} \right)^m \right\} \quad (3.1)$$

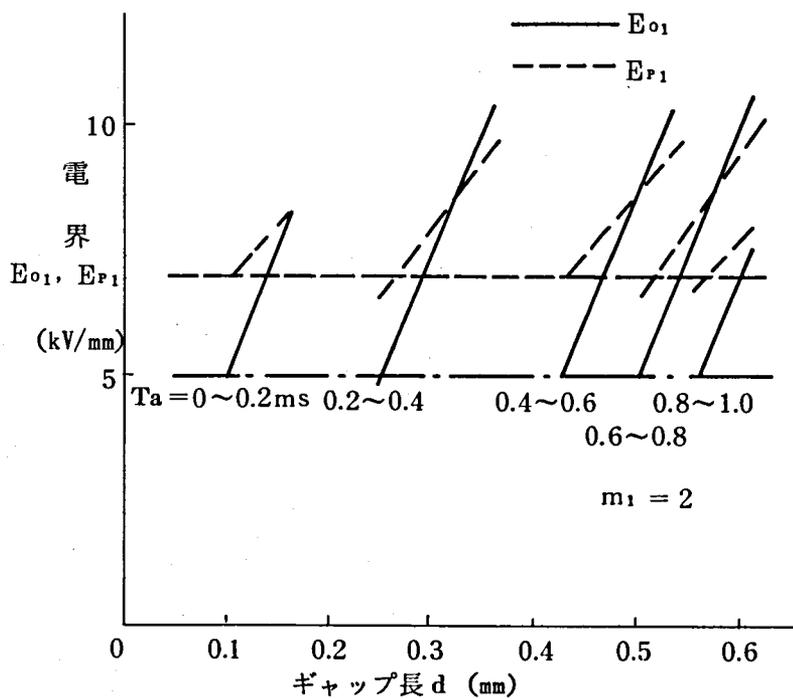
ここに E_0 は最低破壊電界、 E_p は分布の尺度を与えるパラメータ、 m は形状のパラメータである。これらのパラメータを決定することを試みる。いまワイブル確率紙上に第 3.10 図に示すような一つの曲線が与えられたとき、適当な E_0 を仮定して $(E - E_0)$ を変数としてプロットしたとき、そのプロットが直線になるように E_0 を選定すれば、これが最低破壊電界となる。この直線を回帰直線というが、 m は回帰直線の傾斜から求められる。また E_p は回帰直線において、 $\ln(E - E_0) = 0$ となるとき $\ln \ln \{ 1 / (1 - F(E)) \}$ の値 $= \rho'$ を求め、



第 3.10 図 分離された破壊電界の分布



第3.11図 ギャップ長と E_{o1}, m, E_{p1} の関係



第3.12図 アーク時間と E_{o1} および E_{p1} の関係

$$E_p = \exp\left(\left|\frac{m}{\rho'}\right|\right)$$

$$(3.2)$$

から求められる。

第3.10図について上記の手順で E_o, m, E_p を求めるが、2つの曲線群の E が高い方の分布を $F_1(E)$ 、低い方の分布を $F_2(E)$ とする。

まず $F_1(E)$ について第3.10図で回帰直線を求め、 $F_1(E)$ に対する最低破壊電界、形状パラメータ、尺度パラメータ E_{o1}, m_1, E_{p1} を決定して、第3.7図のストローク曲線と組み合わせると第3.11

図のようにギャップ長 d の関数として E_{o1}, m_1, E_{p1} が与えられる。図から E_{o1} は開極に伴って上昇しているが、これは多重再発弧時の放電によって電極表面がコンディショニングされ、放電電圧の低下の原因となる鋭な突起が消滅していくためであると考えられる。

E_{p1} の変化についても同じ原因と考えられる。

同様な統計的処理を他のアーク時間についても行ない、 E_{o1} および E_{p1} の変化を示したものが第3.12図で

ある。この図から最初の再発弧に関しては E_{o1} および E_{p1} はそれぞれ一点鎖線および破線で示した値の近傍に存在し、アーク時間すなわちギャップ長に関係なく殆んど同じ電界強度で再発弧していることがわかる。一度再発弧すると、その時点から破壊電界がギャップ長の変化に伴って直線的に上昇し、アーク時間によらずその上昇率はほぼ一定である。

この実験結果から各パラメータは、

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 2 \\ E_{o1}(\text{kV/mm}) &= 5 + 50(d - d_o) \\ E_{p1}(\text{kV/mm}) &= 7 + 30(d - d_o) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ただし d_o = 最初の再発弧におけるギャップ長 (mm)

となる。これから分布の最頻値 Em_1 を求めると、

$$Em_1 = E_{o1} + E_{p1} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.4)$$

で与えられるから、最初の再発弧に対する最頻値は、(3.3)式で $d = d_o$ とおき m_1 , E_{o1} , E_{p1} を(3.4)式に代入すると、

$$Em_1 = 10 \text{ kV/mm} \quad (3.5)$$

となる。第3.10図に示すように、最初の再発弧に対しては分布の傾斜が大きいことから $Em \approx E_o$ と考えると、6.4 kVの再起電圧波高値に対しては0.64 mmが再発弧のほぼ限界であると考えられる。このギャップ長に達するには、第3.7図からアーク時間は約1.2 msとなる。このことは、第3.6図とかなりよく一致しているといえる。

一方 $F_2(E)$ に関しては、第3.10図において、比較的再発弧がくり返された条件で実験データが多く信頼性が高いと思われる曲線を選ぶと、これらの曲線は比較的直線に近いので、 $F_2(E)$ に対する最低破壊電界 E_{o2} は $E_{o2} \approx 0$ とすることができる。したがって、他の形状パラメータおよび尺度パラメータ m_2 および E_{p2} は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= 3 \\ E_{o2} &= 0 \\ E_{p2}(\text{kV/mm}) &= 10 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

以上で2種類の分布について、数式表現ができたが、これらの分布がどのように使用されるべきかについては次のように考える。まず第3.9図に示したように $F_1(E)$ で再発弧が始まり、再発弧電圧が上昇すると $F_2(E)$ が出現する。 $F_2(E)$ があらわれる時点は第3.2図の第3回目

の再発弧電圧が低下しているように、その前の再発弧すなわち第 3.2 図では第 2 回目の再発弧に伴う高周波電流の波高値がほぼ 100 A を越える点であることが多くの実験結果によって示されている。そしてその時点以降は、 $F_1(E)$ と $F_2(E)$ が混在してくるが、第 3.2 図のオシログラムの再発弧電圧の変化を順次調べるとわかるように、高い電圧で再発弧すればほとんどの場合次の再発弧電圧は低い値となっている。これは一度 $F_1(E)$ の高い電圧で放電すると突起ができて $F_2(E)$ の分布に移り、 $F_2(E)$ の低い電圧で放電すると、表面の突起が消滅し $F_1(E)$ の分布にもどるものと理解できる。すなわち $F_2(E)$ があらわれるのは、 $F_1(E)$ のコンディショニング効果に対して 100 A 以上の高周波電流が流れることによる電極表面のダイコンディショニング効果によるものと考えられる。

なお 75 kVA でも同様な統計処理を行なった結果、 $F_2(E)$ は (3.5) 式とほとんど変化なく、 $F_1(E)$ に関しては、

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 2 \\ E_{o_1}(\text{kV/mm}) &= 10 + 50(d - d_0) \\ E_{p_1}(\text{kV/mm}) &= 14 + 50(d - d_0) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

となった。これは最初の負荷電流による電極表面の荒れ方が 200 kVA の場合と異なるものと考えられる。全く同様に 500 kVA の場合について求めたところ、 $F_2(E)$ は (3.6) 式に従い $F_1(E)$ は、

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 2 \\ E_{o_1}(\text{kV/mm}) &= 2.5 + 50(d - d_0) \\ E_{p_1}(\text{kV/mm}) &= 3.5 + 50(d - d_0) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

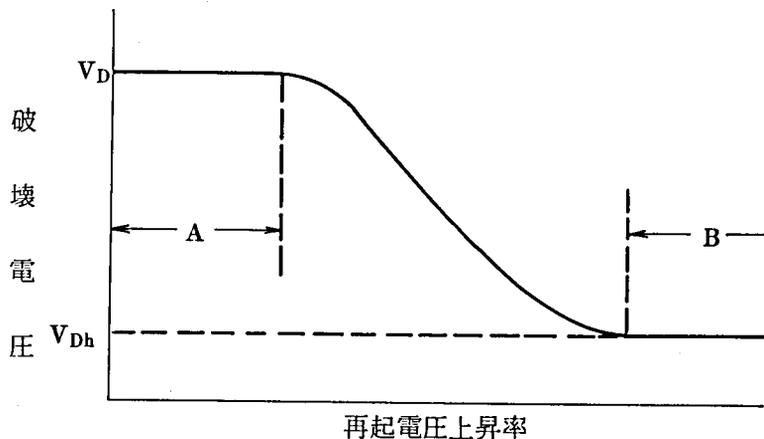
となった。後の第 3.4 節の計算では (3.6) ~ (3.8) 式を耐電圧特性として用いる。

3.2.2 高周波しゃ断特性⁽⁸⁾

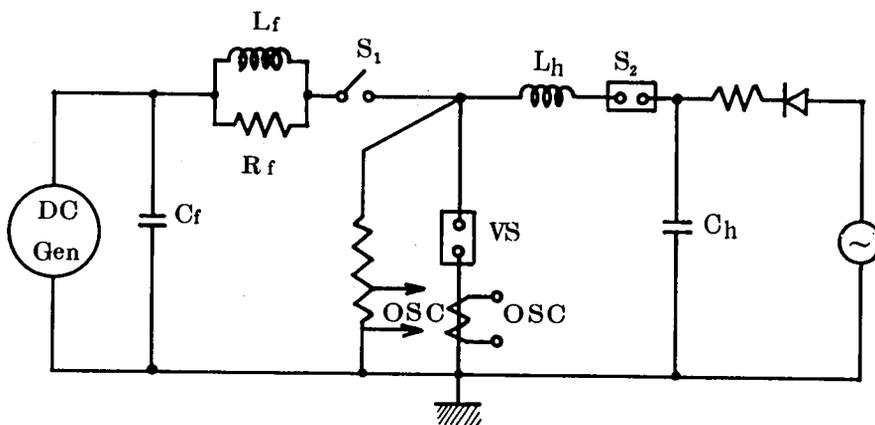
真空スイッチがしゃ断する電流の零点前の傾斜 di/dt を一定にしたとき、極間の耐圧回復速度はギャップ長一定のとき数 $\text{kV}/\mu\text{s}$ の値を有しているが、⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 再起電圧の上昇率が高くなると、次第に低い値で放電するようになる。その関係を第 3.13 図に示す。数 kHz 程度の再起電圧に対しては破壊電圧は V_D であるが、高周波しゃ断特性を考えると高周波回路の再起電圧上昇率は第 3.13 図の B の領域に含まれるので、高周波電流しゃ断時の耐圧が第 3.2 図の再起電圧の立上り点の電圧で与えられるように、低い値を示している。この値を V_{Dh} であらわす。

そこでまず di/dt と V_{Dh} との関係を調べるために、回路を構成し実験を行なった。回路図は

第 3.14 図のとおりである。実験方法は、まず S_2 を開放して C_h を充電し、 S_1 および VS はそれぞれ開放および投入された状態にしておく。つぎに S_1 を投入すると直流電流が VS を流れるので、 VS をしゃ断すると接点間に直流アークが形成される。極間が所定の位置まで開離した後 S_2 を投入して $L-C$ 回路で決定される高周波電流を直流アークに重畳すると、零点で電流がしゃ断される。直流電流は高周波電流を重畳するまで極間を導通状態に維持するためのもので、大電流の必要はなく 20 A 程度とした。なお高周波回路の電圧が直接低圧直流発電機に印加され



第 3.13 図 di/dt を一定にしたときの破壊電圧と再起電圧上昇率との関係

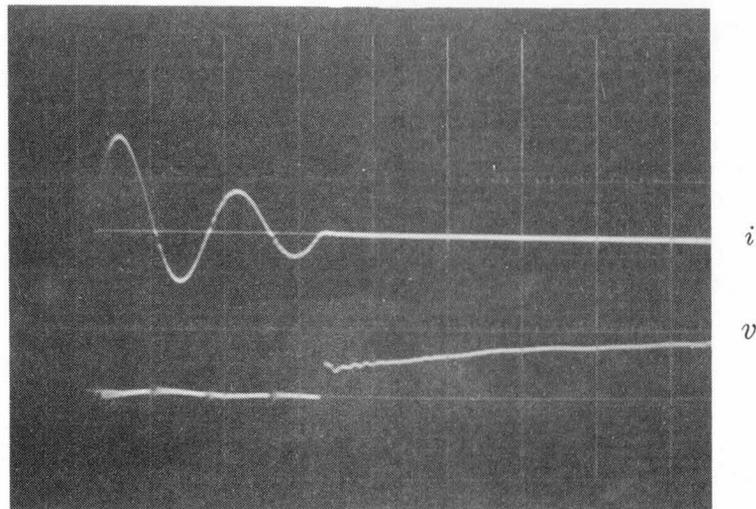


- DC Gen : 直流発電機
- L_f R_f C_f : フィルタ
- S_1 : 直流コンタクタ
- L_h : 高周波用リアクトル
- C_h : 高周波用コンデンサ
- S_2 : 投入スイッチ
- VS : 真空スイッチ

第 3.14 図 高周波しゃ断実験回路

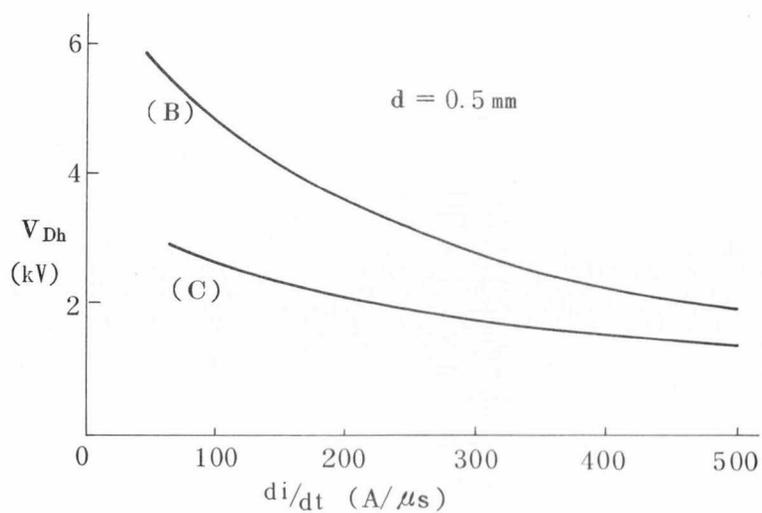
ないようにフィルタが供試スイッチの直流側に接続されている。

第 3.15 図は実験で得られたオシログラムの代表的なものである。高周波電流は何回か零点を通過し減衰した後しゃ断されている。第 3.16 図は B 接点および C 接点についてギャップ長 $d = 0.5 \text{ mm}$ としたときの V_{Dh} の 50% 破壊電圧を示している。実験では回路の L_h, C_h および C_h の充電



$$\begin{aligned}
 V_o &= 18 \text{ kV} & L_h &= 54 \mu\text{H} & C_h &= 0.02 \mu\text{F} \\
 i &= 250 \text{ A/div} \\
 v &= 10 \text{ kV/div} \\
 T &= 5 \mu\text{s/div}
 \end{aligned}$$

第 3.15 図 高周波電流しゃ断波形 (B 接点)



第 3.16 図 V_{Dh} の di/dt との関係

電圧を変化させて di/dt および高周波再起電圧を変化させた。

次に多数回の多重再発弧実験の測定結果を用いて、高周波再起電圧による絶縁破壊の分布状態を統計的に調査した。対象とした実験結果の範囲では $di/dt = 50 \sim 100 \text{ A}/\mu\text{s}$ であった。

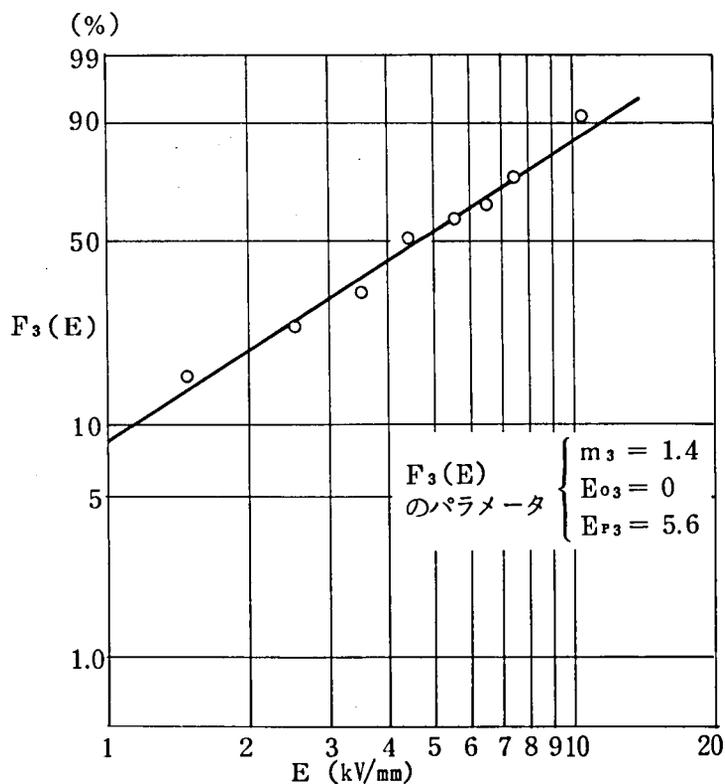
第 3.17 図は絶縁破壊電圧とギャップ長とから求めた電界を、多数回のデータを用いてワイブル確率紙にプロットしたものである。絶縁破壊の累積確率 $F_3(E)$ は (3.1) 式を参照して、次の各パラメータで表現できる。

$$\left. \begin{aligned} m_3 &= 1.4 \\ E_{o3} &= 0 \\ E_{p3} \text{ (kV/mm)} &= 5.6 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

したがって最頻値 Em_3 は、

$$Em_3 = 2.3 \text{ (kV/mm)} \quad (3.10)$$

となる。なお 50% 破壊電界は 4.3 kV となり、第 3.16 図とほぼ一致している。



第 3.17 図 高周波再起電圧に対する極間絶縁破壊の累積確率

高周波電流のしゃ断能力には第 3.17 図に示すように統計的な性質があるが、第 2 章の (2.10) 式に示したように多数回の再発弧がくり返される場合には、高周波電流の通電サイクル数が積算されてくるので、多数回の再発弧に対しては分布が平均化された形で再起電圧の拡大に寄与する。したがって第 3.4 節の解析においては、高周波電流のしゃ断可否については (3.10) 式の最頻値 E_{m_3} を用いて判断する。

3.2.3 電流さい断特性

電流さい断については、第 1 章で検討している。今後の検討では、C 接点に対して第 1.19 図から必要に応じて 0.4 A のさい断電流を考える。

3.3 回路条件

回路条件として真空スイッチの特性と関連して再起電圧拡大現象を規制するのは再起電圧と高周波電流である。これらの量は電動機および電源に接続されるケーブルによって大きく変化する。再起電圧に関しては、ケーブルが接続されることにより、電動機回路のサージインピーダンス、振動の周波数および減衰定数が変化する。また高周波電流に関しては、ケーブルがその供給源となっている。したがって以下ではケーブルの効果について検討を加える。

3.3.1 再起電圧

電動機回路の数 kHz 程度の振動に対して、一般に 1 km 以内のケーブルは集中定数 C_c と考えられる。したがって電動機巻線の漏れインダクタンスを L_m 、漂遊容量を C_m としたとき、サージインピーダンス Z_o および振動の周波数 f は、

$$\left. \begin{aligned} Z_o &= \sqrt{L_m / (C_c + C_m)} \\ f &= 1/2 \pi \sqrt{L_m (C_c + C_m)} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

で与えられる。

ここで L_m は、いくつかの電動機について調査したところ、%インピーダンス表示で約 10% 程度であった。この事実と第 1 章第 1.20 図から結局次式が得られる。(付録 D 参照)

$$\left. \begin{aligned} Z_o &= KW / (kVA)^{0.81} \\ f &= KW (kVA)^{0.19} / 9 \pi \\ W &= \left[1 + \frac{2 \times 10^{10} K^2 l}{9.8 \times (kVA)^{0.62}} \right]^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

K = 電動機の極数によって定まる定数

l = ケーブル長 (m)

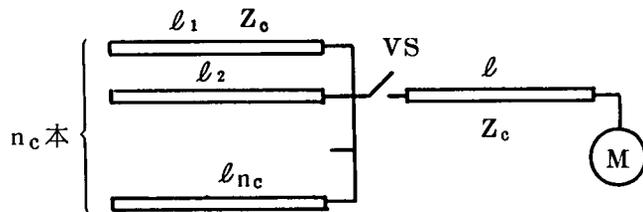
なお、電動機回路の再起電圧振巾率 ψ についても調査し、ケーブル長の増加とともに $\psi = 1.5 \sim 1.8$ に変化することがわかった。そこで、減衰定数を $\frac{1}{2(C+C_m)R}$ と考えると、 $2C_mR$ が電動機単体の場合の減衰の時定数であるから、これを 1.5 とおき付録 D の値を用いると、ケーブルを接続したときの振巾率は次式となる。

$$\begin{aligned} \psi &= 1 + \exp(-3.67 \times 10^{-5} / \sqrt{C_m + C_c}) \\ C_c(F) &= 2 \times 10^{-10} l(m) \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここに l はケーブルの長さである。

3.3.2 高周波電流

真空スイッチの電源側に n_c 本のケーブルが接続された第 3.18 図に示す回路を考え、しゃ断の第 1 相について考察する。スイッチ VS が発弧すると、第 1 章 (1.3) 式に示したように、VS の部分のイン



第 3.18 図 ケーブル回路の構成

ダクタンスは数 μH 程度であり、ケーブルのサージインピーダンスは 40Ω 程度であるから、サージの立上りの時定数は $0.1 \mu\text{s}$ のオーダーとなる。一方ケーブル内のサージの伝播速度は後に示すように 150 m/s 程度であり、ケーブル長が 10 m 近くになると、反射波の周期は $0.1 \mu\text{s}$ のオーダーとなり VS 近傍のインダクタンスの影響は無視できなくなるが、一般には数十 m から数百 m のケーブルが多く使用されているので以下ではケーブル長が数十 m 以上の比較的長い場合について論じ、VS の近傍のインダクタンスは無視して考察する。

まず高周波電流の波高値については、VS の発弧電圧を V_1 とすると、テブナンの定理から

$$I_{h1} = \frac{V_1}{Z_c + \frac{Z_c}{n_c}} \quad (3.14)$$

で与えられる。つぎに周期については、スイッチの負荷側のケーブルの両端で反射するから、負荷側ケーブル長 l によって定まる。いまケーブル内の進行波の速度を U_g とすると、周波数 f_h は、

$$f_h = \frac{U_g}{4l}$$

となる。さらに U_g はケーブルの単位長さのインダクタンス、およびキャパシタンスを l_c, C_c とすれば $U_g = 1/\sqrt{l_c C_c}$ で与えられ、サージインピーダンス $Z_c = \sqrt{l_c/C_c}$ とは、

$$U_g = Z_c/l_c$$

の関係がある。通常の電力ケーブルでは $Z_c \approx 35 \Omega$, $l_c \approx 0.25 \mu\text{H}/\text{m}$ であるから

$$U_g \approx 140 \text{ m}/\mu\text{s}$$

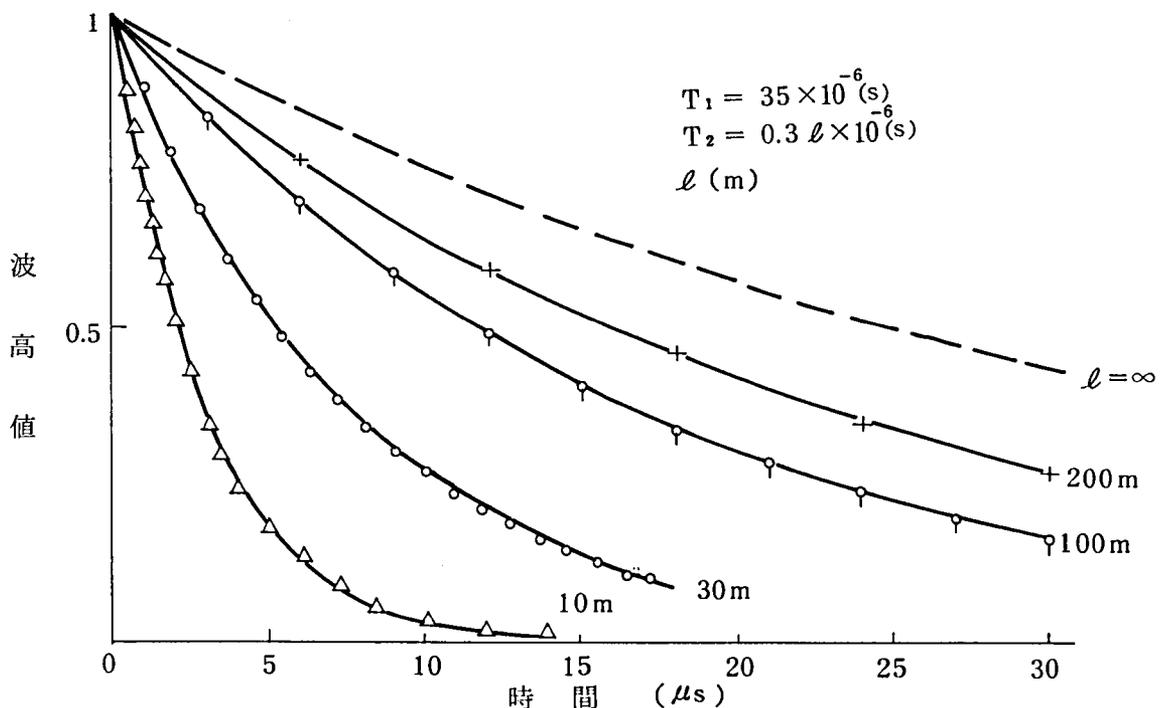
となる。したがって

$$fh (\text{MHz}) = 35/l (\text{m}) \quad (3.15)$$

となる。

最後に高周波電流の減衰に関して検討する。第 3.19 図は各種の長さのケーブルについて、一端に $3 \text{ k}\Omega$ のサージインピーダンスを有するコイルを接続し、他端よりコンデンサに充電した電荷を注入して高周波電流の減衰を調べた結果である。この結果から減衰はケーブル長に依存していることがわかる。これは進行波がケーブルを進行すると、導体部分での損失が発生するとともに、ケーブル端部で反射する際に損失が発生するからであると推定される。

すなわち、導体部分での損失による減衰の時定数を T_1 、端部での反射に伴う損失による減衰



第 3.19 図 ケーブル長と高周波電流の減衰

の時定数を T_2 とすると、総合の減衰時定数 T は次式で与えられると考えられる。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \quad (3.16)$$

導体部分の減衰の時定数 T_1 は導体のインダクタンスを lc 、抵抗を r_c とすると、

$$T_1 = \frac{lc}{r_c} \quad (3.17)$$

となる。ただし r_c 、 lc は高周波領域での値が必要となる。いま代表的に 22 mm² のケーブルを考えると、直流に対しては $r_c \sim 0.85 \text{ m}\Omega/\text{m}$ であり、 $lc \sim 0.25 \mu\text{H}/\text{m}$ であるが、1 MHz 程度の高周波振動を考えると表皮効果によって r_c が 10 倍になったと仮定すると、

$$T_1 = \frac{0.25 \times 10^{-6}}{8.5 \times 10^{-3}} = 29 \mu\text{s}$$

となる。単導体ケーブルに関して、周波数と減衰率との関係が検討されているが⁽¹²⁾、その結果では 6.6 kV CV ケーブルについては 1 MHz で $0.97/\mu\text{s}$ の減衰があり、時定数 T_1 は $32 \mu\text{s}$ となっている。

一方端部で反射する際の損失による減衰の時定数 T_2 は、単位時間での反射回数と比例関係にあり、ケーブル長 l が直接影響してくる。電動機端での反射係数 r_m は、電動機のサージインピーダンスを Z_m とすると、

$$r_m = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c}$$

となり、またスイッチの電源側での反射係数 r_s は電源側ケーブルの本数を n_c として、

$$r_s = \frac{\frac{Z_c}{n_c} - Z_c}{\frac{Z_c}{n_c} + Z_c} = \frac{1 - n_c}{1 + n_c}$$

となる。

以上の関係式を用いて進行波がケーブルを 1 往復する間の減衰は $|r_m \cdot r_s|$ で表現される。したがって反射回数が十分多い場合について考察すると、反射に伴う進行波の減衰の時定数 T_2 は、波高値が $1/\varepsilon$ となる時間で与えられるから、

$$T_2 = \frac{2l}{U_g} / \ln \frac{1}{|r_m \cdot r_s|} \quad (3.18)$$

となる。

第 3.19 図に示した実験の条件について、 r_m を求めると、 $Z_m = 3 \text{ k}\Omega$ 、 $Z_c = 35 \text{ k}\Omega$ として $r_m = 0.977$ となるので、 $|r_s| = 1$ 、 $U_g = 140 \text{ m}/\mu\text{s}$ とすれば

$$T_2 (\mu s) = 0.6 l (m)$$

となる。

一方第 3.19 図から T_1 , T_2 の値を推定すると、

$$\begin{cases} T_1 = 35 (\mu s) \\ T_2 = 0.3 l (\mu s) \end{cases}$$

となり、上の計算によって求めた値は、比較的よく一致している。

以上の結果から高周波電流の波形は、次式で計算できる。

$$i_h = \frac{V}{Z_c} \epsilon^{-\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)t} \quad (3.19)$$

ここに V は真空スイッチの再発弧電圧である。

3.4 再発弧現象のシミュレーション

まず最初の再起電圧で再発弧する確率を p_1 とし、2 回目、3 回目と順次再発弧する確率を p_2 , p_3 …… とする。いま n 回再発弧が継続し、 $(n+1)$ 回目に再発弧しなかったとすれば、 n 回目まで継続する確率は $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ となり $(n+1)$ 回目に再発弧しない確率は $(1 - p_{n+1})$ であるから結局 n 回だけ継続する確率は次式で与えられる。

$$P_n = p_1 p_2 \dots p_n (1 - p_{n+1}) \quad (3.20)$$

したがって継続する再発弧の回数が 1 回だけの場合から順次 P_n を加算したものは、どこかで再発弧が停止することを意味し、もし $n=0$ から $n=\infty$ まで加算すれば当然 1 になる。すなわち

$$\sum_0^{\infty} P_n = 1 \quad (3.21)$$

ただし $P_0 = 1 - p_1$ は再発弧が全く起らない確率である。

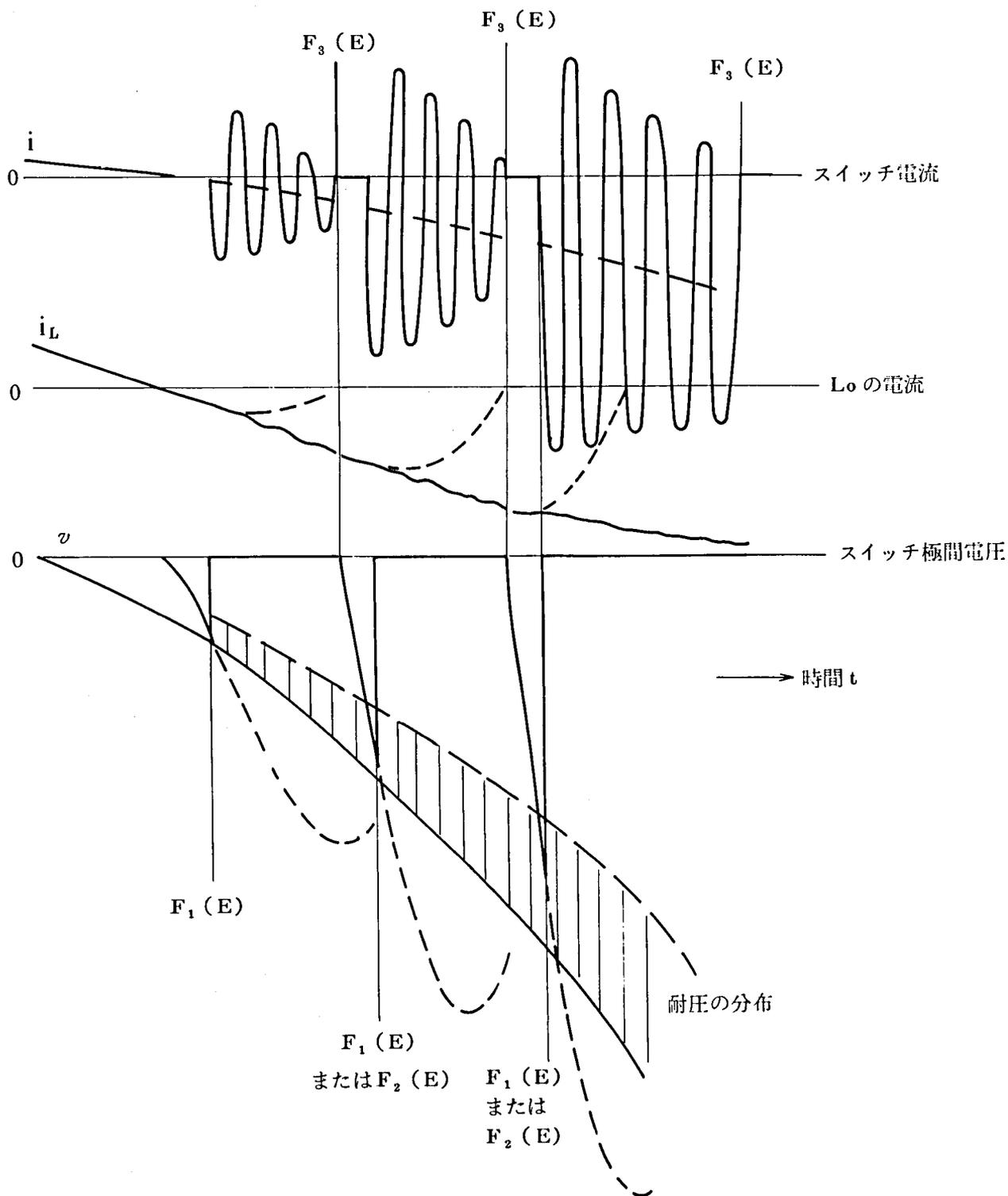
(3.20) 式を用いると、

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} P_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - p_1 \cdot p_2 \dots p_n), \quad 0 < p_j \leq 1 \\ &= 1 \end{aligned}$$

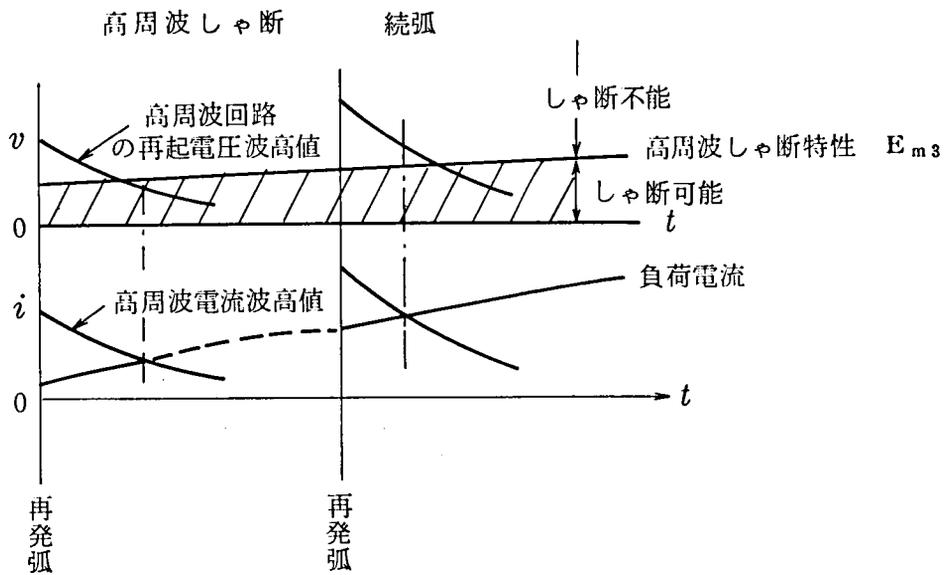
となり、(3.21) 式は満足されている。

さて、 p_1 , p_2 , …… を求めるには、次の諸量を与える。

- (i) 再起電圧 (2.7) 式より計算する。
- (ii) ギャップ長 アーク時間 T_a に (3.12) 式から $1/2 f$ を求めて加算し、 $T_a + (1/2 f)$ の時間に対して、第 3.7 図から計算する。



第 3.20 図 発弧現象計算のモデル図



第 3.21 図 高周波しゃ断と続弧

(iii) 再発弧確率 p_j (i)および(ii)から電界を求め、(3.3)式の $F_1(E)$ または(3.6)式の $F_2(E)$ から計算する。

(iv) 続弧確率 再発弧が続く場合には最頻値で再発弧したものとして、(3.10)式の Em_3 で判定する。

以上の計算過程を第 3.20 図に示した。なお(iv)の続弧確率は第 3.21 図に示すように、高周波電流が減衰して負荷電流に等しくなる時点の真空スイッチの耐圧が、高周波回路の再起電圧より高くなるか、低くなるかで定まり、その判定に Em_3 を用いた。

以上のプロセスを順次追うことにより $p_1 \cdots p_n$ を求めることができる。

以上の議論では、再発弧が発生する電圧は最頻値と仮定してきたが、実際には分布を有している。このことを考慮して、実際に観測される電圧の分布を表現するために次のような処理を行なう。即ち第 1 回目の再発弧に関して再発弧電圧 V が $(V, V + dV)$ に入る確率密度 $f_1(V)$ は第 3.2.1 項に述べた $F_1(E)$ を用いて次のようにあらわされる。

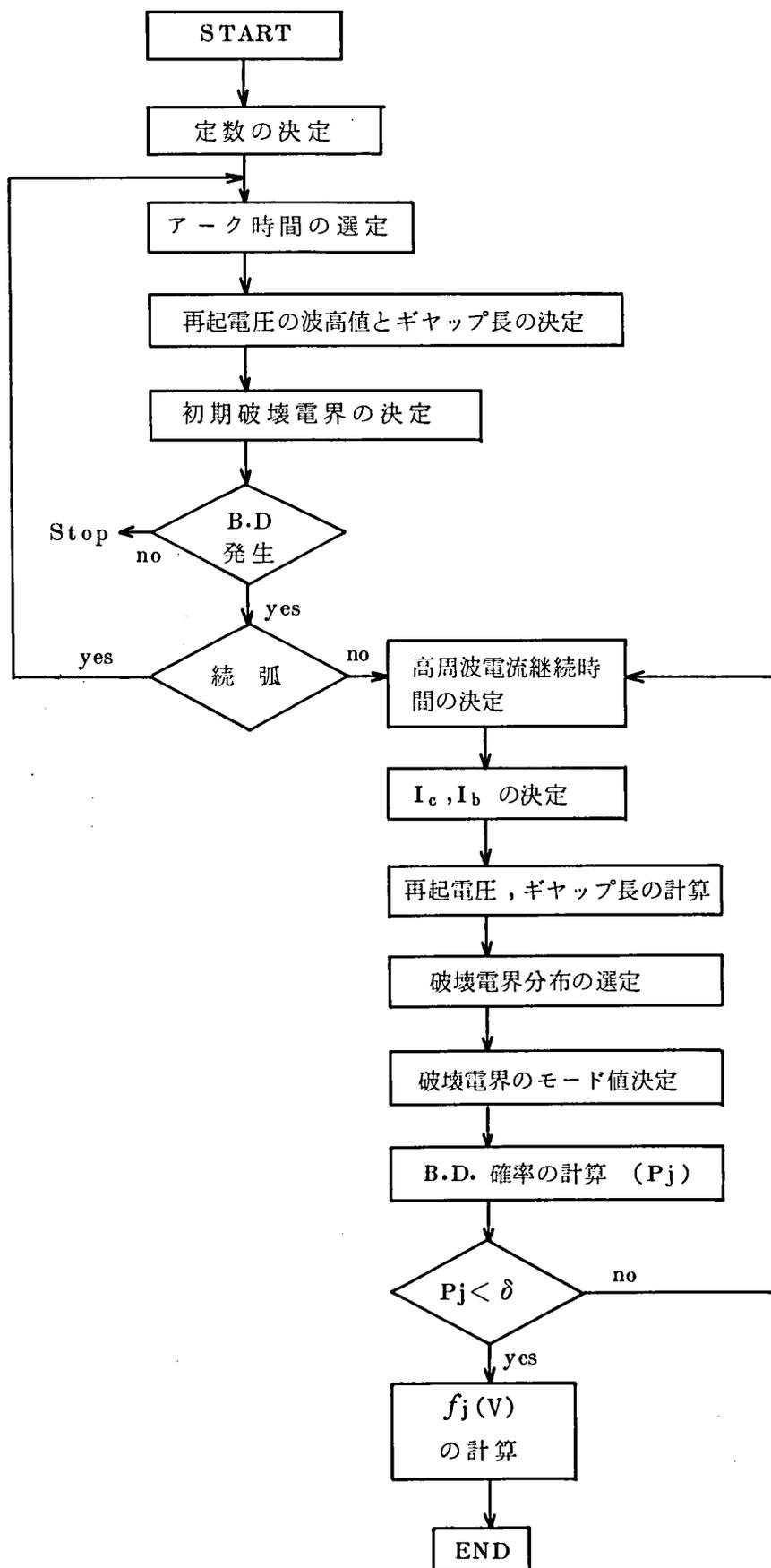
$$f_1(V) = F_1'(E), E = V/d_1$$

$$\text{ただし } F_1'(E) = \frac{dF_1(E)}{dE}$$

d_1 は第 1 回目の再発弧時の極間距離

第 2 回目の再発弧については第 1 回目の再発弧確率 p_1 を乗じて次のように求められる。

$$f_2(V) = F_1'(E) p_1 \text{ または } F_2'(E) p_1, E = V/d_2$$



第 3.22 図 解析のフローチャート

d_2 は第2回目の再発弧時の極間距離

以下同様に j 回目の再発弧に対しては、

$$P_j(V) = \{ F_1'(E) \text{ または } F_2'(E) \} \times p_1 p_2 \cdots p_{j-1}, \quad E = V/d_j$$

d_j は j 回目の再発弧時の極間距離

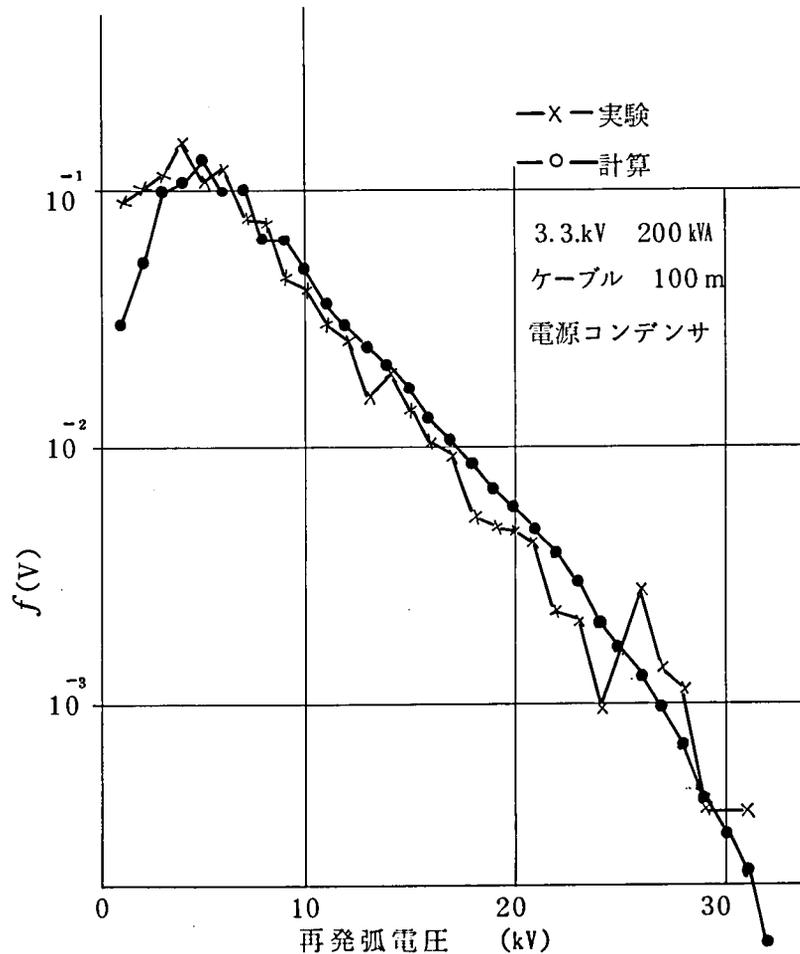
で与えられ、各電圧に対して発生確率密度が求められる。したがって、くり返されるすべての再発弧について再発弧電圧 V が $(V, V + dV)$ に入る全確率密度 $f(V)$ は次式で与えられる。

$$f(V) = \sum_j f_j(V) \quad (3.22)$$

以上の計算のフローチャートを第 3.22 図に示した。

三相同時しゃ断に対しては、最初の高周波電流が誘導される点が異なるだけで、その後は第 2.3.3 項で述べたように多重再発弧現象と全く同様な計算過程となるので、第 3.22 図のフローチャートを用いて計算できる。

つぎに 3.3 kV 回路を対象として行なった計算の結果について述べる。第 3.23 図は実験回路

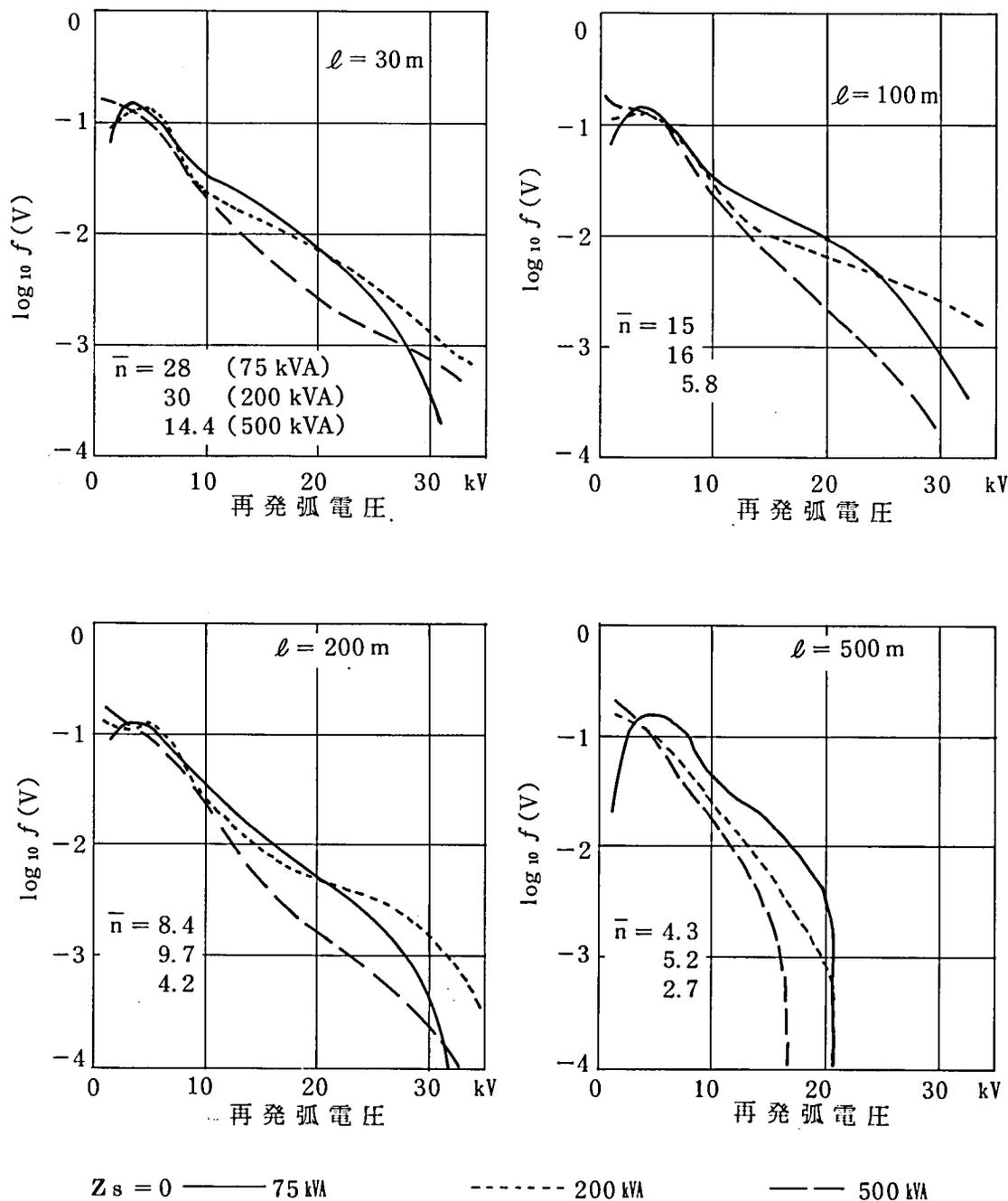


第 3.23 図 再発弧電圧出現確率密度の計算値と実験値の比較

について行なった確率密度 $f(V)$ の計算結果と実験結果とを対比して示したものである。この結果から上述の計算によりかなり精度よく異常電圧の出現確率を求めうることがわかった。そこで電源として交流電源を考え、3.3 kV 4極の電動機について電源側ケーブル本数、負荷側ケーブル長を変化させて計算を実行した。

(a) 突流しゃ断の場合

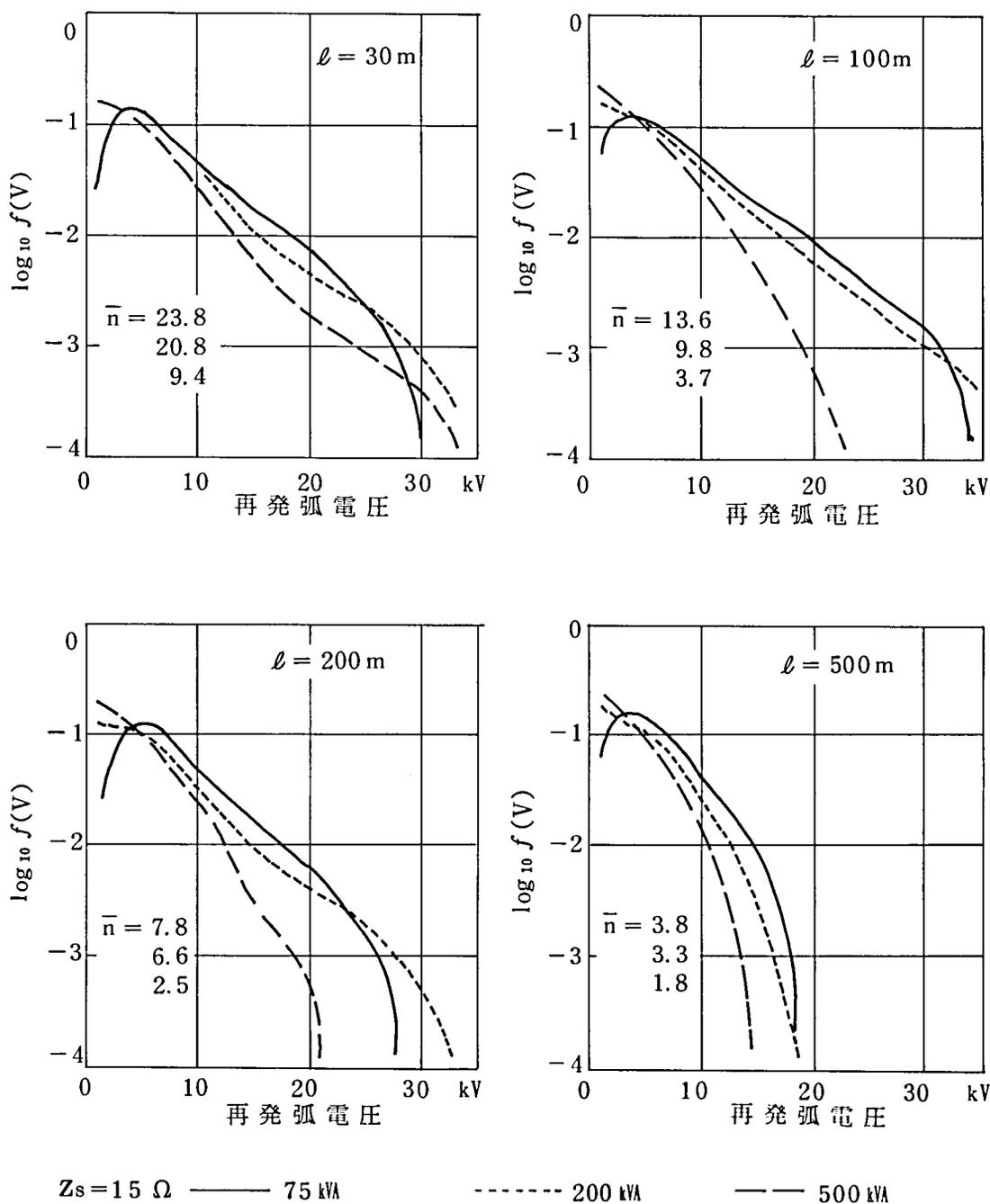
第 3.24 図に再発弧した場合の再発弧電圧とその出現確率との関係を示した。パラメータとし



第 3.24 図 突流しゃ断における第 1 相の多重再発弧電圧発生確率密度 (1)

て電動機容量を 75 kVA, 200 kVA, 500 kVA, 負荷側ケーブル長 l を 30 m, 100 m, 200 m, 500 m, 電源側サージインピーダンス Z_s を 0, 15 Ω , 35 Ω に選んだ。 Z_s は電源側ケーブルの本数 n_c により $Z_s = 35/n_c$ で与えられるものとしている。計算は 1 kV 単位で行なった。なお図中の \bar{n} は再発弧をした場合の平均の再発弧継続回数を示しており、上から順次 75kVA, 200 kVA, 500 kVA に対応している。

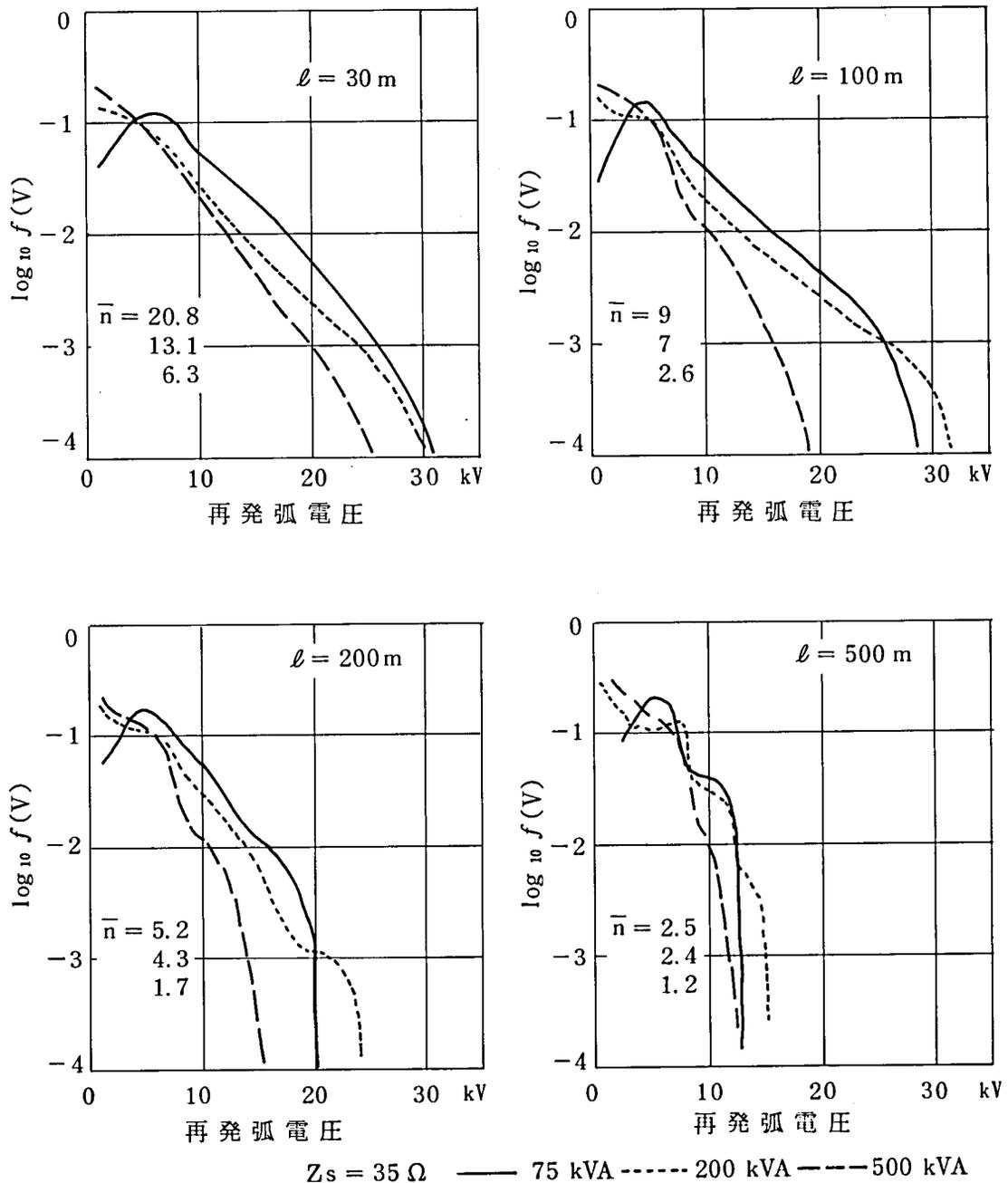
第 3.24 図から一度再発弧するとケーブル長が 200 m 以下、電動機容量が 200 kVA 以下の場合



第 3.24 図 突流しゃ断における第 1 相の多重再発弧電圧発生確率密度 (2)

に、過酷な電圧を発生する確率が高いことがわかる。実際のケーブル系統が殆んど 200 m 以下であることを考えると、第 1 章の第 1.3 図の電動機生産比率から約 60% の回路が危険にさらされることになる。

一方三相同時しゃ断については、一例として $l = 100 \text{ m}$, $Z_s = 0$ の場合の計算結果を第 3.25 図に示したが、一度三相同時しゃ断を発生すると、電動機容量が 200 kVA 程度までは多重再発弧の場合と同程度の危険性がある。しかし多重再発弧の確率を考えると実際には 1 桁程度低下する。

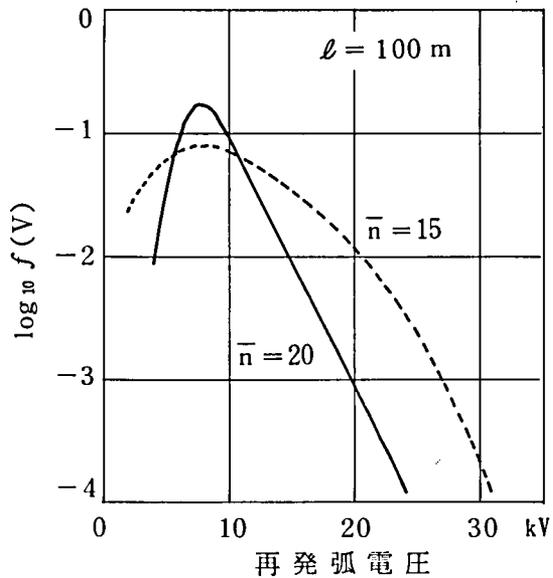


第 3.24 図 突流しゃ断における第 1 相の多重再発弧電圧発生確率密度 (3)

(b) 定速しゃ断

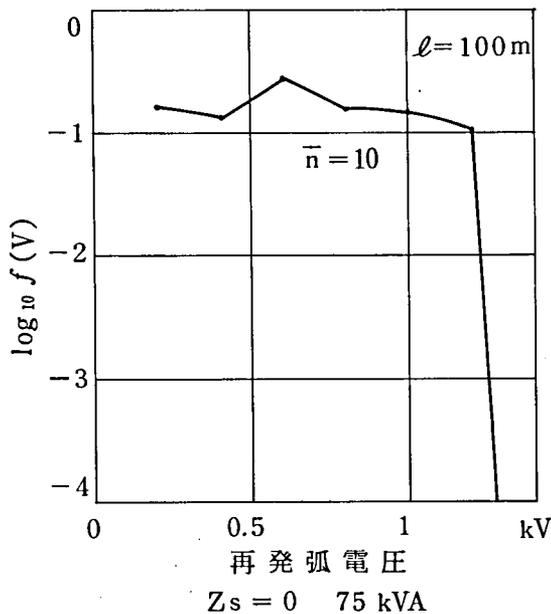
第3.26図は $Z_s = 0$ $l = 100$ m の場合の多重再発弧に関する結果である。ただし $E_r = 500$ V, $I_c = 0.4$ A と仮定している。この結果から定速しゃ断時には多重再発弧だけによる電圧は無視しても問題はない。しかし一方三相同時しゃ断については、負荷が定格の場合は全く問題がないが、第3.27図に示すように負荷率が低下して50%程度になると、三相同時しゃ断によって異常電圧を発生するようになる。しかしこの現象は第2.3.3項で述べたように、第1相の再発弧によって第2,3相に誘導される高周波電流と負荷電流とによって支配される。したがって電動機容量が増大していくと、

高周波電流と負荷電流の合成電流が零点を通過する確率が減少するので、三相同時しゃ断現象の発生は減少する。負荷電流が100%負荷で10Aになるのは、3.3kVの場合44kW程度となる。即ち3.3kV 50kW以下では三相同時しゃ断による異常電圧が大きな事故原因になるものと考

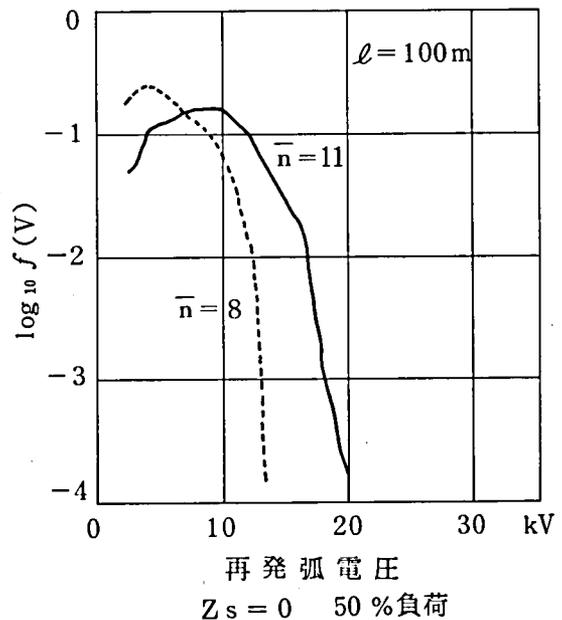


$Z_s = 0$ — 75 kVA ----- 200 kVA

第3.25図 突流しゃ断における三相同時しゃ断による再発弧電圧発生確率密度



第3.26図 定速しゃ断における第1相の多重再発弧電圧発生確率密度



第3.27図 定速しゃ断における三相同時しゃ断による再発弧電圧発生確率密度

えられ、第1章の第1.5図の事故率を説明するものと考えられる。なおケーブル長が短くなると、電動機回路のサージインピーダンスが上昇する（付録D参照）ので、三相同時しゃ断による異常電圧は更に過酷となる。

3.5 結 言

真空スイッチの耐圧特性、高周波しゃ断特性を統計的に処理し、電動機回路のケーブル長、電源に接続されるケーブルの本数をかえて、3.3 kVの電動機回路における多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象のシミュレーションを行ない、回路条件によって出現する異常電圧がどのように変化するかを検討した。本章で得られた成果は次の通りである。

- (1) 多重再発弧現象はケーブル長が200 m以下の系統において500 kVA以下の電動機の突流をしゃ断するとき、波高値が30 kVにも達する高い異常電圧を発生する。一般の工場、ビルなどにおいて使用される電動機回路の60%はこの範囲に入っているので、危険性が高いものと判断できる。一方定速しゃ断においては、高い電圧は殆んどあられず2～3 kV以下の電圧である。ただし電流さい断は0.4 Aとしている。
- (2) 多重再発弧によって誘発される三相同時しゃ断については、突流しゃ断の場合電動機容量が200 kVA以下の場合に30 kV程度まで出現する確率がある。一方定速しゃ断の場合の三相同時しゃ断については、50 kVA以上の電動機の定格負荷では全く問題はないが、負荷電流を10 Aまで低下させると、電動機容量が増大しても三相同時しゃ断による異常電圧が発生する危険性があり、三相同時しゃ断によって20 kV程度の電圧が発生する。
- (3) いずれの場合も電動機容量が低下すると、高い異常電圧が発生する可能性があり、第1章で述べた小容量電動機において事故率が高いという結果をよく説明している。
- (4) したがって、多重再発弧現象を防止する何らかの対策が必要とされる。

以上の結論から保護の必要性がほぼ明らかにされたので、次章ではどの程度の電圧が電動機巻線のターン間に印加されるかを検討し、第5章ではその電圧がどの程度抑制できるかを検討する。

第4章 真空スイッチの開閉サージに対する電動機巻線の特性

4.1 緒言

真空スイッチで電動機回路をしゃ断した場合に発生するサージは波頭が急しゅんで波高値も高く、電動機巻線のターン間絶縁をおびやかす危険性のあることを第2章および第3章でのべた。しかしこのサージが実際に実害を及ぼすかどうかという点については、電動機巻線の強度との比較によって検討されなければならない。本章ではこのようなサージ電圧がどの程度危険であるかを判断するために、電動機巻線内のサージ電圧分布および絶縁強度について論じ、保護の必要性について検討する。

4.2 電動機巻線内のサージ電圧分布

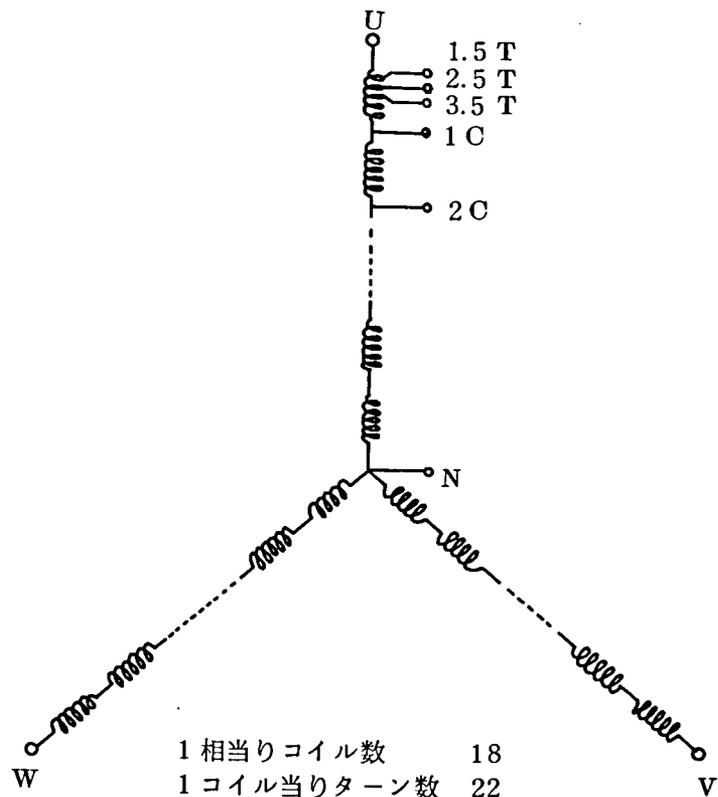
電動機巻線は数ターンから数十ターンの導体で構成されたコイルが、多数固定子鉄心内に配列され、各相ごとに直列に接続されて構成されている。容量の大きい電動機の場合には、直並列に接続される。第4.1図は巻線の電圧分布を測定するために、測定用リード線を接続した

100kW巻線形誘導電動機の巻線構成図である。ターン間分担率を測定するために、端子に近いコイルの端子から1.5ターン、2.5ターン、3.5ターンの位置にリード線が接続されている。また、コイル間の分担率を測定するために、コイルの接続点にリード線が接続されている。

さて、巻線内の電圧分布は、1相の巻線内のコイルに対する電圧分布と1コイル内のターンに対する電圧分布で表現すると便利である。そこでつぎのように、ターン間電圧 v_t を表現する⁽¹⁾。

$$v_t = \xi_t v_c = \xi_t \xi_c V_a$$

(4.1)



第4.1図 100kW誘導電動機の固定子巻線と測定用リード線

ここに

v_c : 1 コイルにかかる最大電圧

ξ_t : ターン分担率

ξ_c : コイル分担率

V_a : 電動機端子に印加されるサージ電圧波高値

である。以下に ξ_t および ξ_c について、実験結果をもとに、考察を加える。

4.2.1 ターン分担率 ξ_t

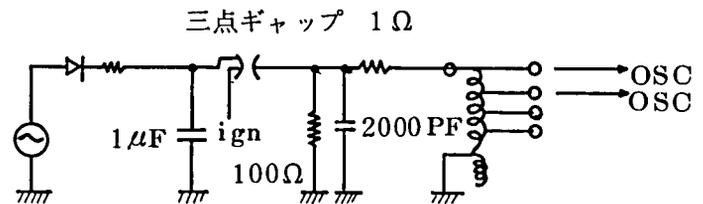
ターン分担率は1コイルの一端を接地し、他端に波高値 V_a のサージ電圧を印加したときに、ターン間にあらわれる電圧の最大値 v_{max} から

$$\xi_t = v_{max} / V_a \quad (4.2)$$

で与えられる。

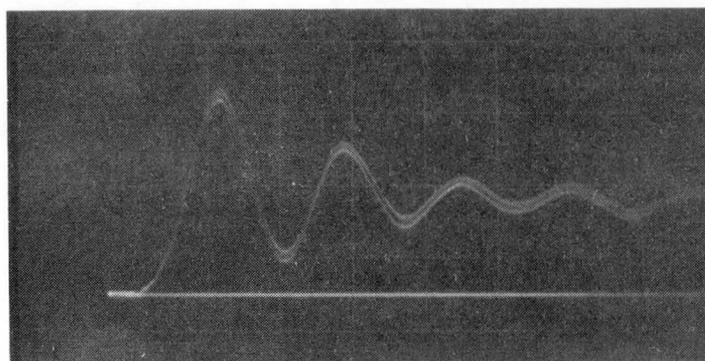
そこで、 ξ_t を実験的に求めるため、第4.1図の端子側の1コイルに注目し、リード線1Cを接地して端子にサージ電圧を印加して1.5 T, 2.5 T, 3.5 Tの各リード線の電圧を測定した。第4.2図は測定回路の構成図である。第4.3図に測定で得られたオシログラムの例を示す。図に示すように、端子と測定点との間のターン数が増加するとともに、入力電圧と測定点の電圧との差は増加している。1コイルのターン数が22ターンであることを考慮して、第4.3図の第1波高点における端子と測定点間の分担電圧と入力電圧との比を、端子から測定点までのターン数と1コイルの全ターン数との比の関数として表現すると、第4.4図に示す関係が得られる。図から分担電圧は、端子から測定点までのターン数にほぼ比例している。すなわち第4.3図に示すような立上り0.2 μ sの急峻なサージ電圧でも、ターン間に均等に分布する。

またこの特性は、1コイルのターンに対する周波数特性からも求められる⁽¹⁾⁽²⁾。第4.5図は一つのコイルの一端を接地し、端子から0.5ターンの点に交番電圧を印加して、0.5ターンと1.5ターン間の1ターン間に分担される電圧と印加電圧との比を交番電圧の周波数の関数として示したものである。図の実線は実機のコイルについて測定した結果であり、破線は同形状の空心モデルコイルについて測定した結果である。供試コイルは10ターンから構成されている。図から明らかなように、空心コイルの場合でも、Qの高い共振点は3MHz近傍であり、実機のコイルではQの高い共振点が8MHzと大きく高周波側に移動してい

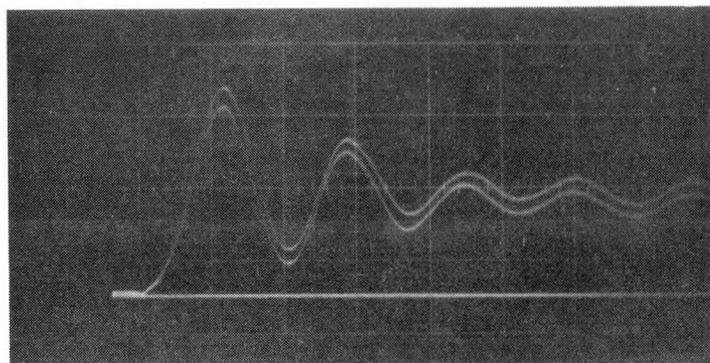


第4.2図 ターン/コイル分担電圧の測定

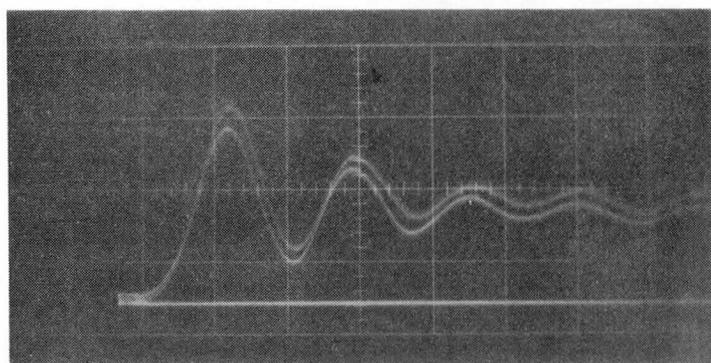
る。この現象は実機の鉄心中に誘起される渦電流によって磁束がうち消され、等価的に磁束が減少するためである。



(a) $v_i = 2 \text{ kV/cm}$
 $v_{1.5} = 2 \text{ kV/cm}$
 $T = 0.2 \mu\text{s/cm}$



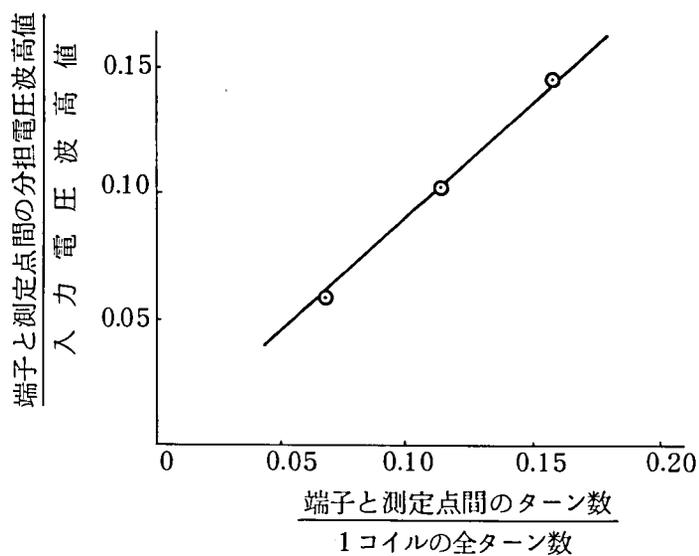
(b) $v_i = 2 \text{ kV/cm}$
 $v_{2.5} = 2 \text{ kV/cm}$
 $T = 0.2 \mu\text{s/cm}$



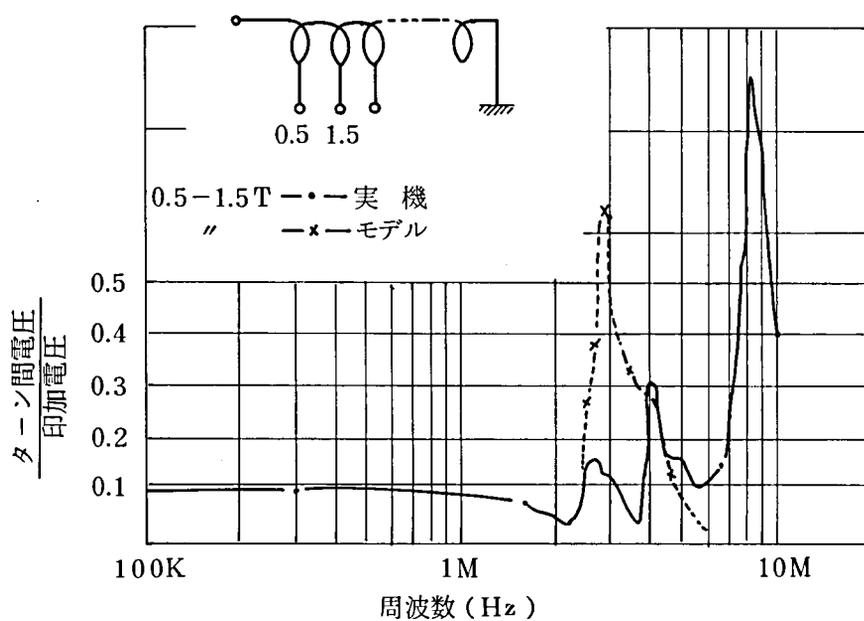
(c) $v_i = 2 \text{ kV/cm}$
 $v_{3.5} = 2 \text{ kV/cm}$
 $T = 0.2 \mu\text{s/cm}$

第 4.3 図 入力波形と各測定点の電圧波形

v_i	モーター端子印加電圧
$v_{1.5}$	1.5 ターン目電圧
$v_{2.5}$	2.5 ターン目電圧
$v_{3.5}$	3.5 ターン目電圧



第4.4図 1コイル内の電圧分布

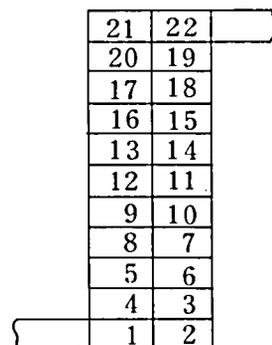


第4.5図 ターン/コイルの周波数特性

空心モデルでも Q の高い共振点が 2.5 MHz 以上であることは、サージの立上り時間を $0.2 \mu\text{s}$ としてもこれが約 1 MHz 程度に相当し、共振周波数より低いことから、ターン間に印加される電圧はコイルにわたってほぼ均等であることを示している。実機では、この共振点がさらに高周波側に移動するので、ターン間に印加される電圧は均等であるといえる。他の数種の空心モデルコイルについても、同様の測定を実施したが、 Q の高い共振点はいずれも 3 MHz 以上に存在している。

以上のことから1コイルに立上りが0.2 μ s以上の波頭を有するサージが印加された場合には各ターン間電圧は平等分布であると結論できる。

ここで注意しておきたいことは、ターン間の意味についてである。第4.3図の測定に用いられたコイルは、ターンが第4.6図の配列となっている。図では隣接する導体間に、最大3ターン含まれているが、上の議論で使用したターン間とは、第4.6図のターン番号の順に、隣接する導体間のことであって、必ずしも物理的に隣接する、たとえばターン番号1と4の導体間のことではない。従ってサージ電圧の分布は、ターン番号に対して、均等なのである。第4.4図はこのことを明らかに示している。



第4.6図 コイルのターン配列

上に述べたことは、隣接する導体間に含まれるターン数に比例して、導体間の電圧が上昇することを意味している。そこで隣接する導体間に含まれるターン数を N_a 、1コイルの全ターン数を N_c とすると、隣接する導体間にあらわれる最大の電圧 v_{max} は、

$$v_{max} = \frac{N_a}{N_c} V_a \quad (4.3)$$

と表現される。

したがってターン分担率 ξ_t は(4.2)式、(4.3)式からつぎのようになる。

$$\xi_t = \frac{N_a}{N_c} \quad (4.4)$$

ξ_t の値はコイルの構成のみによって決定され、一般に1/6以下の値である。

4.2.2 コイル分担率 ξ_c

1コイルのしゃ断周波数は、第4.5図からわかるように、3MHz以上であり、これより低い周波数成分を有するサージが侵入する場合には、進行波理論を適用することができる⁽²⁾。

通常のケーブル回路では、漂遊インダクタンスのために最悪の場合でも、サージの波頭長は0.2 μ s程度であると考えられる。この波頭長は約1MHzに相当することはすでに述べたが、この値はしゃ断周波数と比較して十分低く、したがって進行波理論の適用が可能である。

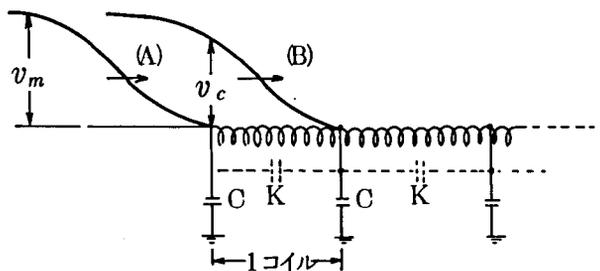
第4.7図は、電動機巻線に侵入するサージのモデルを示すものでCはコイルの対地漂遊容量、Kはコイル内の漂遊容量をあらわしている。図から1コイルにかかる電圧は、進入した進行波

(A) がちょうど1コイルを通過した時点(B)で、最大となる。したがって1コイルにかかる電圧の過酷さ、すなわちコイル分担率 ξ_c は、進行波の波頭長 τ と進行波が1コイルを通過するに要する時間 t_0 とから求めることができる。いま理論的に ξ_c を求めるために、進入する進行波の波高値を V_a として、進行波の波頭部分を実測波頭長と対比しやすいように(4.5)式の形であると仮定する⁽³⁾。

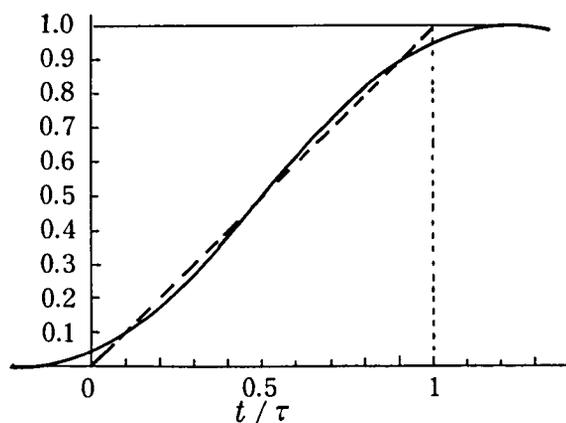
$$y = \frac{\text{電圧瞬時値}}{V_a} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}\sigma \left\{ 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2} \right) \right\} \quad (4.5)$$

$$\text{Si}\sigma \left\{ 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2} \right) \right\} = \int_0^{\frac{2\pi}{\tau} \left(t - \frac{\tau}{2} \right)} \frac{\sin \omega \left(t - \frac{\tau}{2} \right)}{\omega} \frac{\sin(\omega \tau / 2)}{(\omega \tau / 2)} d\omega \quad (4.6)$$

ここに τ はサージの波頭長である。(4.6)式は標準 σ 因子を導入してGibbs振動を抑制した積分正弦関数で、第4.8図の実線で示すような形状を有している。同図を用いて以下の手法により ξ_c を求めることができる。すなわちサージが1コイルを通過する時間 t_0 が与えられると、第4.8図において、 t_0/τ だけ右へ移動した曲線が得られる。この2本の曲線の差を求めれば、その最高値がコイル分担率 ξ_c を与える。



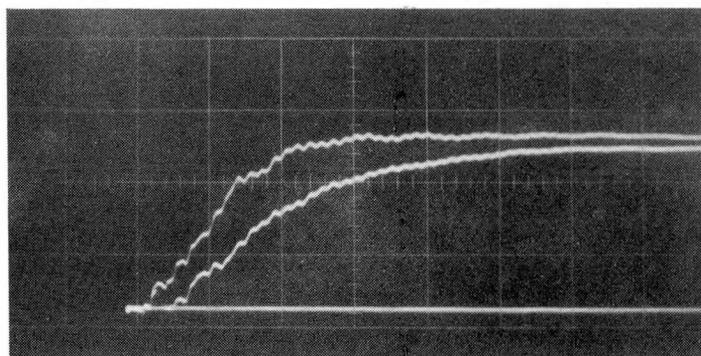
第4.7図 コイルに侵入するサージ



$$y = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{Si}\sigma \left\{ 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2} \right) \right\}$$

第4.8図 進入サージ波形

1 コイルをサージが通過する時間 t_0 を実験的に求める方法としては、電動機の端子にサージ電圧を印加し、各コイルの接続点における電圧波形の時間遅れから求める方法と、1 相中の 1 コイルの周波数特性から求める方法（付録 E 参照）とがある。第 4.9 図は第 4.1 図に示した実機の巻線にサージ電圧を印加して、リード線 1 C の点の電圧波形を求めたもので、波頭部分に関しては、中性点の接地、非接地には関係しない。図の場合には、1 コイルを通過する時間 t_0 は約 $0.3 \mu\text{s}$ である。いづれにしても各種の実験から t_0 は $0.2 \mu\text{s} \sim 0.4 \mu\text{s}$ 程度であることが確かめられている。



上 印加電圧	2 kV / cm
下 1 コイル目電圧	2 kV / cm
掃引	0.5 μs / cm

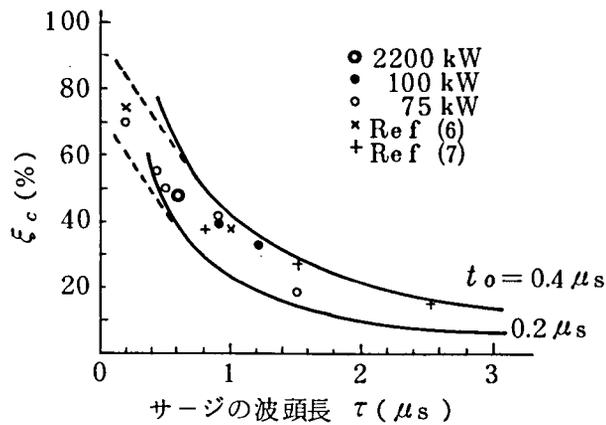
第 4.9 図 1 コイル目の電圧波形

第 4.10 図は侵入サージの波頭長 τ と 1 コイル分担率 ξ_c との関係を示すもので、図の実線は (4.5 式) で表現できるものとして、既述の方法で計算した結果である。ただし波頭長が短くなると、第 4.7 図に示した漂遊容量 K による静電移行のために、分担率 ξ_c は第 4.10 図の破線で示されるように、実線の計算値より低下する。第 4.10 図の各点は、各種の実験結果をプロットしたもので、2 本の曲線内にすべての実測値が含まれることが明らかにされている。同図から、侵入サージの波頭長が最も過酷な $0.2 \mu\text{s}$ の場合には、コイル分担率は約 80% に達するが、波頭長が $1 \mu\text{s}$ まで緩和されると、分担率が少くとも 40% 以下に低下することが明らかであり、侵入サージの波頭の緩和がいかに重要であるかが示されている。

結局ターン間電圧は (4.1) (4.4) 式から

$$v_t = \xi_c V_a N_a / N_c \quad (4.7)$$

と表現される。



第 4.10 図 コイル分担率 ξ_c とサージの波頭長 τ との関係

4.3 電動機巻線の絶縁強度

前節で電動機端子にサージ電圧が印加された場合の巻線内電圧分布が明らかにされ、真空スイッチが発生する波頭長の短いサージに対しては、巻線の 1 コイルに電圧が集中し、ターン間絶縁が問題となることが判明した。

電動機巻線の絶縁強度については、規格上は巻線の対地絶縁を対象として、商用周波試験電圧が JIS, JEC-37, 114, 146 など規定されているのみで、ターン間絶縁に対しては、何ら規定されていない。商用周波試験電圧は、つぎのように規定されている。

$$V_{ac} = 2V_{\ell-\ell} + 1 \text{ kV (r.m.s)} \quad (4.8)$$

ここに $V_{\ell-\ell}$ は回路の線間電圧 (r.m.s) である。

さて、(4.8) 式で与えられる試験電圧に対して耐圧を有する絶縁は、次式で与えられる標準衝撃波電圧に対しても耐圧を有するものと仮定する。

$$V_{imp} = 1.25 \times \sqrt{2} (2V_{\ell-\ell} + 1 \text{ kV}) \quad (4.9)$$

ここで係数 1.25 は、巻線の絶縁が固体絶縁であり、その破壊が絶縁層中に包含された微小な気泡の絶縁破壊によるものとして、気中の破壊に対する衝撃比を採用している。(4.9) 式から $V_{\ell-\ell}$ が 3.3 kV および 6.6 kV に対して、 V_{imp} を求めると、それぞれ 13.4 kV および 25.1 kV となる。この値と 4.1 節の 1 コイル分担率 ξ_c が波頭長 $\tau = 1 \mu\text{s}$ のとき 40% であることから 1 コイルの電圧が 3.3 kV 回路で 5.36 kV および 6.6 kV 回路で 10.04 kV の耐圧は有するものと推定することができる。1 コイルのターン分担率を最大の 1/6 とした場合、隣接するターン間の耐圧は、3.3 kV 回路で約 900 V、6.6 kV 回路で約 1670 V となる。

一方第 2 章で論じたように、真空スイッチのしゃ断時に再起電圧拡大現象が発生すると、40 kV にも達する急峻波頭サージが発生し、また三相同時しゃ断が発生しても、同程度の波高値を有する急峻波頭サージが発生して、ケーブルを介して電動機に侵入する可能性があることを

指摘した。

さて、真空スイッチが発生する、このようなサージが電動機端に達した場合、波高値は反射によってほぼ2倍になり、しかも波頭長は $0.2 \mu\text{s}$ 程度の極めて急峻なサージ電圧が印加されることになる。いま第4.10図から波頭長が $0.2 \mu\text{s}$ の場合の1コイル分担率を求めると、約80%でありターン分担率を $1/6$ として40 kVのサージの場合には、ターン間には10 kV以上の電圧が印加されることになる。この電圧がターン間に印加されると、数kV以下の耐圧が保証されているだけの電動機巻線のターン間絶縁が危険にさらされるのは明らかであり、何らかの保護装置が必要であることを意味している。

なお、サージ電圧がくり返し印加される場合の絶縁物の劣化に対しては、各種の形態が報告されているが、ここでは次の表現式⁽⁴⁾⁽⁵⁾を採用することにし、今後の検討で使用する。

$$v_t - v_s = c_1 n^{-c_2} \quad (4.10)$$

ここに v_t = ターン間に印加される電圧

v_s = 絶縁劣化を起さないターン間電圧の上限

c_1, c_2 = ターン絶縁の材料、構成法によって定まる定数

n = 印加回数

4.4 結 言

電動機巻線に多重再発弧現象および三相同時しゃ断によって発生する波頭の急峻なサージが進入した場合の巻線内サージ電圧分布および巻線の絶縁強度について検討した。本章で得られた成果は次の通りである。

- (1) 電動機巻線にサージが進入した場合の巻線内電圧分布を、1コイル分担率とターン分担率とに分けて検討した結果、ターン分担率は、通常の回路であらわれる波頭長が $0.2 \mu\text{s}$ 以上の緩波頭サージに対しては、平均に分担される。ただし、隣接する導体間には、その導体間にあるターン数倍だけ分担電圧が大きくなる。一方コイル分担率は第4.10図のように波頭長の関数となり、 $0.2 \mu\text{s}$ の波頭長では約80%、 $1 \mu\text{s}$ の波頭長では約40%となる。
- (2) 真空スイッチのしゃ断時に発生する40 kVのサージが、電動機巻線に侵入すると、ターン間に10 kV以上の電圧が印加される。一方巻線のサージに対する耐圧は数kV以下と推定されるので、ターン間絶縁が破壊される危険性があり、何らかの保護装置が必要である。

第5章 保護方式に関する研究

5.1 緒 言

前章までに真空スイッチで電動機への電流をしゃ断したときに発生するサージ電圧と電動機の絶縁強度について論じたが、これらをもとにして電動機の絶縁協調を考えると、電動機の絶縁を保護する必要があることが明らかとなった。まず2章、3章の研究でどの程度の電圧がどの確率で発生するかを予測することが可能となり、かつ4章で電動機の絶縁強度がわかったので、これらをもとに、保護方式を考察し、具体的な保護装置の具備すべき条件を検討した。さらに可飽和リアクトルによる保護方式を提案した。これが第2章で述べた現象からみてどの点で優れているかを実験的理論的に検討した。最後に可飽和リアクトルによる保護方式が実際のフィールドにおいて、事故率をどこまで低減することが可能であるかを検討した。

5.2 従来の保護方式に対する考察

まず開閉サージによる電動機事故を防止するためには

- (1) サージを発生しない。
- (2) サージが発生しても、電動機に無害であるようにする。
- (3) サージが電動機に進入しても絶縁が破壊しないまで絶縁強度を高める。

の3通りが考えられる。(1)については、再発弧しないことが必要であり、このためには十分早い開極速度を得るのが一つの方法と考えられる。真空スイッチの初期の破壊電界が10 kV/mmとし、振動周波数3 kHz 振巾率1.8の3.3 kV回路を考えると、ストローク速度は4.3 m/sとなり、この値は超々高圧しゃ断器では実現されているが、一般配電系統用では経済性に問題があると同時に、真空スイッチのベローズおよび操作機構の寿命の点でも問題が起る値である。したがって(1)の方法は現状では困難と考えられる。(3)の方法は、電動機の小型化が益々進められる中で、絶縁厚さを増大させることは困難であり、進入するサージの波高値も高いので実現性に乏しい。したがって(2)の方法によらざるを得ない。

従来電動機の保護に使用される方法には

- (1) コンデンサを電動機の端子近傍に接続して、進入サージの波頭を緩和する方法⁽¹⁾⁽²⁾
- (2) アレスタを接続して波高値を制限する方法⁽³⁾
- (3) (1)と(2)の併用⁽⁴⁾⁽⁵⁾

があり、これらはいずれも各相と大地間に接続される。以上の各種の保護方式が保護のない場合と比較した場合、どのような効果が得られるかを検討するために、第3章で述べたシミュレ

ーション結果を用いて電動機の事故率を計算した。

電動機の事故率を求めるには、電動機のターン間に印加されるサージ電圧およびターン間絶縁強度が必要となる。まずターン間に印加される電圧については、第3章において再発弧電圧の分布および回数を求めたが、いま第1相しゃ断の多重再発弧における1回の再発弧をとりあげ、その再発弧電圧を V とすると、電源側のサージインピーダンスが十分低い回路では、波高値 V のサージがケーブルに進入する。第1章第1.20図から明らかなように電動機巻線のサージインピーダンスは数 $k\Omega$ のオーダーでありケーブルのサージインピーダンス 35Ω と比較して十分高いので、電動機端子に印加される電圧 V_a は、ケーブルの電動機におけるサージの反射で2倍になるものと考えることができる。すなわち

$$V_a = 2V \quad (5.1)$$

ところで、このサージの波頭長 t_f が与えられると、第4章第4.10図の1コイルの分担率 ξ_c および第4章(4.3)式からターン間分担電圧 v_t は次式で与えられる。

$$v_t = \xi_c V_a N_a / N_c \quad (5.2)$$

(5.1)式の V がシミュレーションによって与えられると、その各々について(5.1)式および(5.2)式からターン間電圧が求められる。

つぎに、(5.2)式の v_t が、くり返し印加される場合のターン間絶縁の劣化については、第4章(4.10)式によって与えられる。ただし(4.10)式の劣化特性は、同一の波高値を有するサージを巻線の絶縁が破壊するまでくり返し印加するという実験的な方法で求められている。したがって絶縁の寿命は印加電圧の関数として、絶縁破壊が発生するまでのくり返し印加回数を与えるという形で表現されている。

しかしながら、本章で取扱うサージは上記の同一波高値の標準波形サージと異なり、たとえば第3章第3.23図に示すように、波高値が統計的に分布しているサージである。したがって、すでに求められている実験データを適用するためには、つぎの重み関数 $w(v_t)$ を導入する必要がある。ただし絶縁物が進入サージによって受ける損傷は、ある電圧に注目すれば、その電圧におけるサージの数に比例するものと仮定する。

$$w(v_t) = N / N_0 \quad (5.3)$$

ここに N_0 および N は、ある基準のターン間電圧 v_0 および任意のターン間電圧 v_t における絶縁破壊までの回数である。(5.3)式を用いることによって、任意の電圧 v_t に対する印加回数 n は、電圧 v_0 の波高値を有するサージの等価な印加回数 n_0 に変換できる。すなわち

$$n_0 = w(v_t) \cdot n \quad (5.4)$$

第4章(4.10)式で劣化特性が与えられる場合には、 $w(v_t)$ は次式のようになる。

$$w(v_t) = \begin{cases} \left(\frac{v_t - v_s}{v_0 - v_s}\right)^{1/c_2} & , v_t > v_s \\ 0 & v_t \leq v_s \end{cases} \quad (5.5)$$

(5.1)式および(5.2)式を(5.3)式に代入すれば、 $w(v_t)$ は次式のように再発弧電圧 V の関数として表現できる。

$$w(v_t) = w(2\xi_c V Na / Nc) \quad (5.6)$$

事故率の計算の際に考慮すべき量として、真空スイッチの開極は通常ランダムであることから、しゃ断時の再発弧の発生確率があげられる。これは、真空スイッチの開極がしゃ断零点の直前である場合にのみ、真空スイッチが再発弧するからである。すなわちアーク時間 Ta が第3章第3.7図のストローク曲線から求められる開極速度 St および(3.4)式の Em_1 を用いて

$$Ta \leq \frac{\psi Er}{Em_1 St} \quad (5.7)$$

を満足している場合である。したがって3相回路における各相の再発弧の確率 Pig は

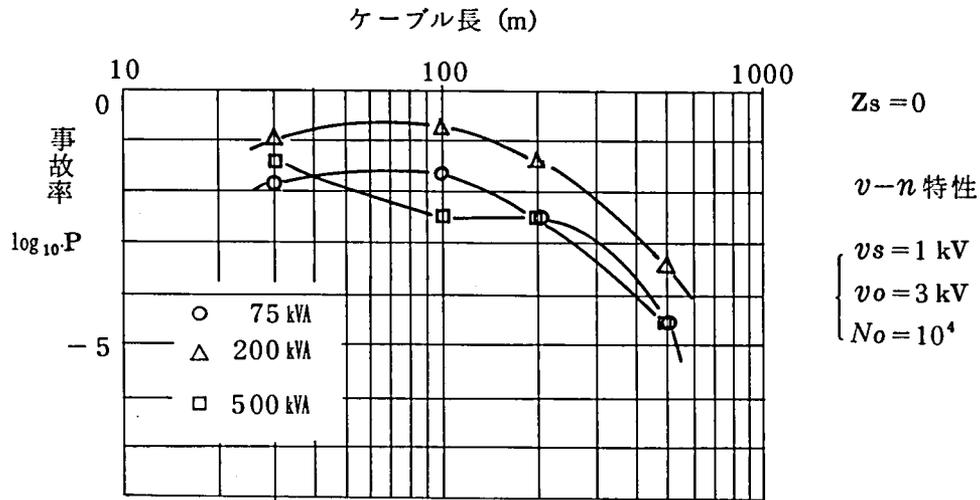
$$Pig = \frac{\frac{\psi Er}{Em_1 St}}{\frac{1}{2f_0}} = \frac{2f_0 \psi Er}{Em_1 St} \quad (5.8)$$

となる。

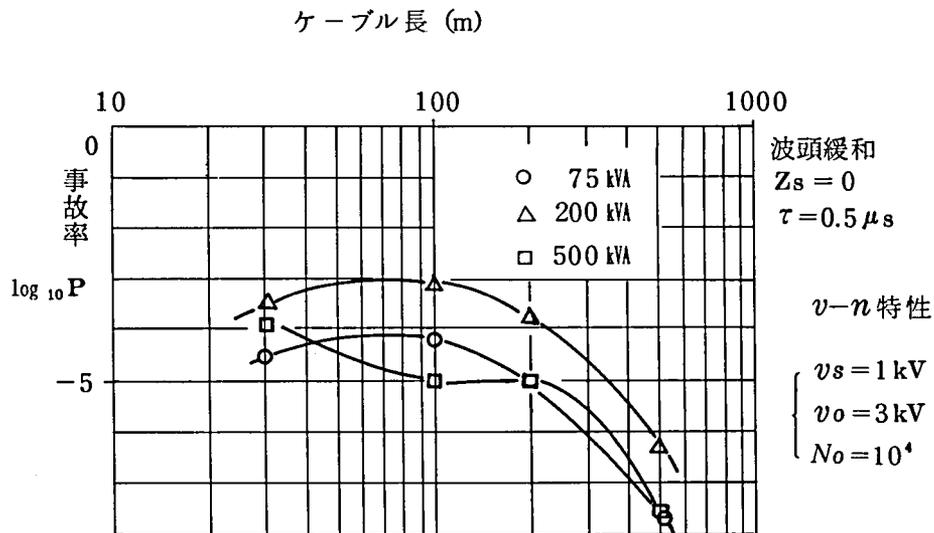
以上の(5.3)式、(5.4)式および(5.8)式を用い第3章第3.4節で求めた再発弧電圧の出現確率密度 $f(V)$ および平均再発弧継続回数 \bar{n} から、電動機の事故率 P を求めることができる。

$$P = \frac{2f_0 \psi Er}{Em_1 St} \cdot \frac{\bar{n}}{N_0} \int f(V) \cdot w(2\xi_c V Na / Nc) dV \quad (5.9)$$

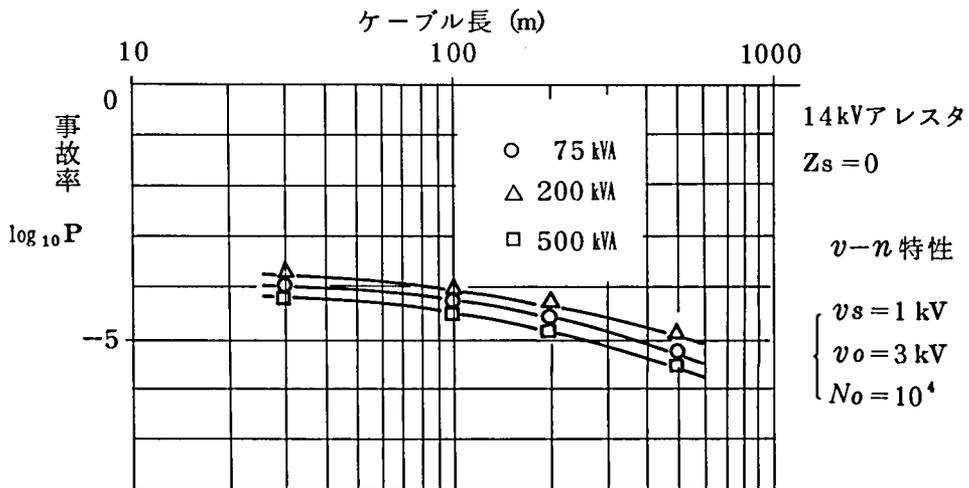
第5.1図、第5.2図、第5.3図、第5.4図は、それぞれ無保護の場合、コンデンサによってサージの波頭を緩和した場合、アレスタによってサージの波高値を制限した場合およびコンデンサとアレスタを併用した場合について、突流しゃ断の条件で(5.9)式を計算した結果である。



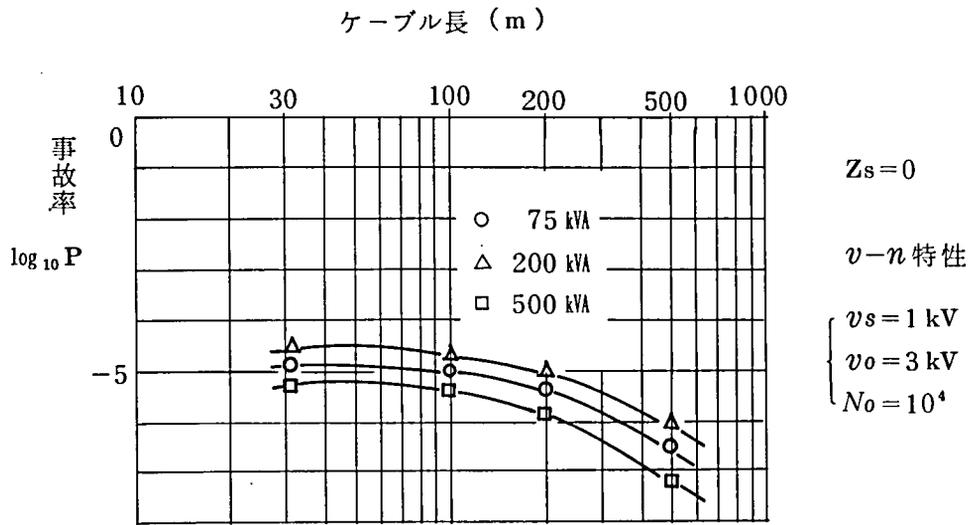
第 5.1 図 無保護の場合の事故率



第 5.2 図 コンデンサの波頭緩和効果と事故率



第 5.3 図 アRESTAの波高値制限効果と事故率



ただし電動機巻線の $v-n$ 特性の定数として (5.5) 式で $C_2=0.15$, $v_s=1\text{ kV}$, $v_o=3\text{ kV}$, $N_o=10^4$ と仮定し、無保護の場合およびアレスタによる保護の場合についてはサージの波頭長を第 1 章で述べたように $0.2\ \mu\text{s}$ としている。

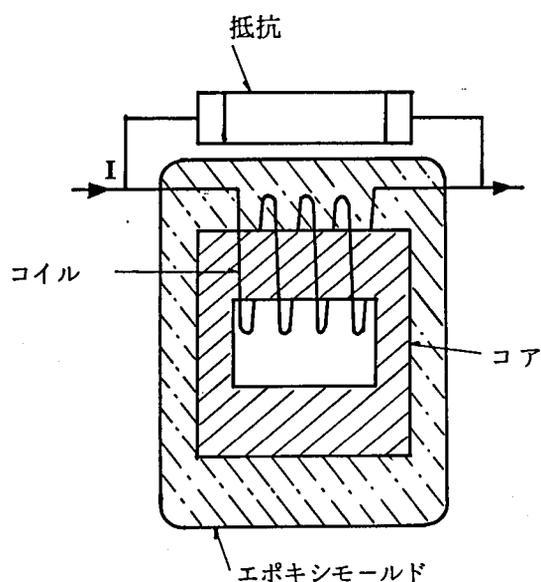
これらの結果からコンデンサあるいはアレスタによる保護の場合には、事故率は無保護と比較して 10^2 程度の減少しか望めず、約 1 万回の開閉で絶縁破壊が発生することになる。さらに以上の方法はいずれも相と大地間に保護装置を挿入するので、次の点で問題である。すなわちアレスタの方式では、保護装置が動作すると、大地に電流が流れる。コンデンサ方式では、常時大地に電流が流れるので、多数の電動機が接続されている系統では大地に流れる電流が大きくなる。したがってこのような電流による継電器の誤動作を防止するために、継電器の感度を下げる必要が生じ、系統保護の信頼性を下げることになってしまう。なお、コンデンサによる方法は取付のスペース、価格の点で問題がある。従って保護機器は、より経済的でサージ抑制能力が高く、直列機器であることが望ましい条件となる。

そこで経済的な保護装置として真空スイッチの再発弧後に流れる高周波電流を抑制して再起電圧拡大現象を抑制するための特殊なサージ抑制用可飽和リアクトルを開発した。この可飽和リアクトルは、発生するサージの波高値を低下させることができると同時に、サージの波頭しゅん度を緩和する機能も有している。

以下に可飽和リアクトルの構造および特性について述べる。

5.3 サージ抑制リアクトル⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

以下ではサージ抑制用可飽和リアクトルを、サージ抑制リアクトルまたはリアクトルとい



第 5.5 図 サージ抑制リアクトルの構造

う。このリアクトルは可飽和のコアとコアに巻かれた数ターンのコイルから構成されている。第 5.5 図はこのリアクトルの概略図であって、真空コンタクト用である。コアおよびコイルはエポキシレジンでモールドされ、電流端子のみが充電部として露出した構造を有しているので真空コンタクトに直接接続できる形態となっている。コアは通常の負荷電流に対しては、飽和した状態にあるため、リアクトルによる電圧降下は無視できる。コイルの導体に関しては、真空コンタクトの短時間通電容量と協調をとるために、

十分な断面積を有しており、コイル層間はリアクトルに印加される電圧に耐えうるよう絶縁設計されている。

このリアクトルのコアには高周波特性のよいフェライトが使用されているので、真空スイッチで発生する 1 MHz までの周波数成分に対してリアクトルはインダクタンスとして作用する。フェライトコアの場合には、コアにおける損失が小さいために、第 5.5 図に示すように、ケーブルのサージインピーダンスと同程度の抵抗がコイルと並列に接続される。

真空しゃ断器の場合には、定格電流が大きいので、コイルを数ターン巻くことは、熱的な面から制約をうける。したがって、この場合にはターン数を 1 ターンとし、コアとして極薄（～ 0.05 mm 厚）のケイ素鋼板を積層したものを使用している。ケイ素鋼板の場合には、コアにおける損失が大きいので並列抵抗を省略することができる。

さてコアに必要な断面積は、リアクトルの入力端子にサージが進入した場合に、飽和することなく高いインダクタンスを保持するものと仮定して、次式によって与えられる。

$$S = \frac{V}{\omega_s N t B_s} \quad (5.10)$$

ここに V は進入サージの波高値、 B_s はコアの飽和磁束密度、 Nt はコイルの巻数である。 ω_s はサージの波頭長に相当する角周波数である。

リアクトルの設計に当っては B_s としてフェライトの場合 0.5 Web/m²、ケイ素鋼帯の場合 1.5 Web/m² をとっている。

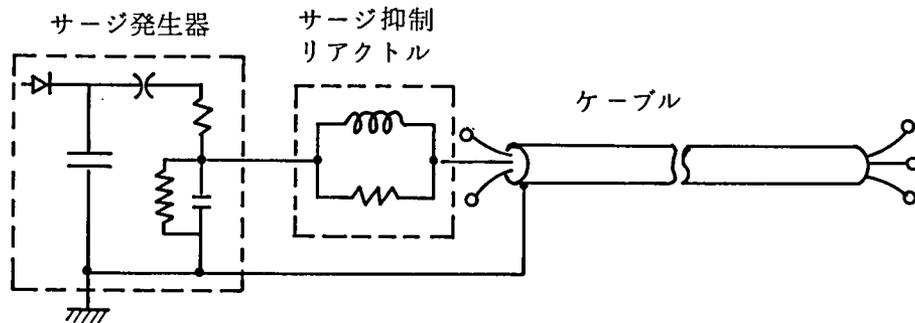
大きい ω_s に対してコアが飽和しなければ、リアクトルはサージの波頭峻度を十分低減するこ

とが可能である。

5.3.1 リアクトルの機能⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

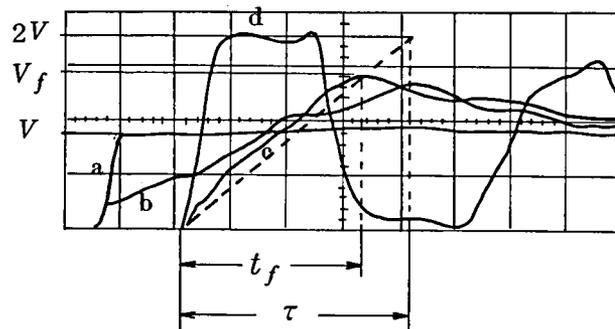
(a) 波頭峻度の緩和

コアの非直線性および周波数特性のために、この効果を理論的に求めることは複雑になるので主として実験的に求めている。実験では、第 5.6 図に示すように、ケーブルとリアクトルと



第 5.6 図 波頭緩和効果の実験回路

を直列に接続し、リアクトルに波頭長が約 $0.2\mu\text{s}$ のサージ電圧を印加して各点の電圧を測定した。ケーブル長を 30 m ~ 200 m まで変化させて行ない、ケーブルの他端は開放状態で測定した。これは、電動機のサージインピーダンスがケーブルのサージインピーダンスと比較して十分高いためである。第 5.7 図は 200 m のケーブルを用いて行なった実験結果をまとめたものである。



- (a) サージ抑制リアクトル電源側の電圧
 - (b) サージ抑制リアクトル負荷側の電圧
 - (c) ケーブル開放端の電圧
 - (d) ケーブル開放端(リアクトルなし)の電圧
- $V = 5 \text{ kV/div}$ $T = 1 \mu\text{s/div}$

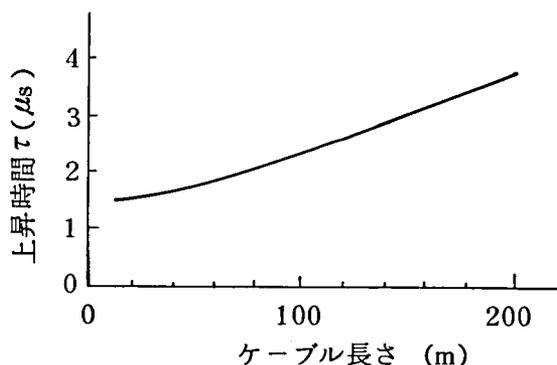
第 5.7 図 サージ抑制リアクトルによる急しゅん波頭の緩和

図から急峻な波頭が有効に抑制されていることがわかる。

ケーブルの他端におけるサージの波頭峻度は、第 5.7 図の V_f および t_f を用いてつぎのように定義された上昇時間 τ で表わすことができる。

$$\tau = \frac{2V}{V_f} t_f \quad (5.11)$$

第 5.8 図はケーブル長の関数として τ の値を示したものである。

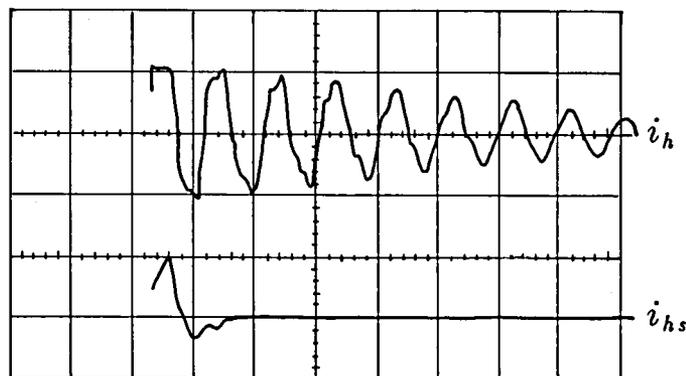


第 5.8 図 | リアクトルによるケーブル開放端の等価サージ波頭長 τ とケーブル長との関係

(b) 高周波電流の抑制

サージ抑制リアクトルは、コアの非線形特性とコア中の損失および並列抵抗による損失によって、発弧後真空スイッチを流れる高周波電流を有効に抑制することができる。

この特性は、ケーブル端における反射を考慮して進行波理論を用いて計算によっても求められるが、コアの非線形特性のために、かなり複雑になる。そこで、実験的にこの特性を求めた。



$i_h, i_{hs} = 250 \text{ A/div} \quad T = 5 \mu\text{s/div}$

i_h : サージ抑制リアクトルなし

i_{hs} : サージ抑制リアクトルつき

第 5.9 図 高周波電流波形

第 5.9 図は、200 m ケーブルの单相を 10 kV に充電し、これを放電させた場合の電流波形を示すもので、同図の上の波形はリアクトルを短絡して放電した場合に得られたものであり、下の波形はリアクトルを介して放電した場合に得られたものである。ここで興味のあることは、リアクトルを挿入すると、最初の電流零点における電流傾向が極めて高いにもかかわらず、高周波振動がほぼ 1 サイクルで終了していることである。

リアクトルのコアがケイ素鋼帯で構成される場合、0.05 mm 厚のものを積層して使用しているが、変圧器などに使用される 0.35 mm 厚のコア材料で構成した場合には、周波数特性が劣るために、上記の特性をうることができない。

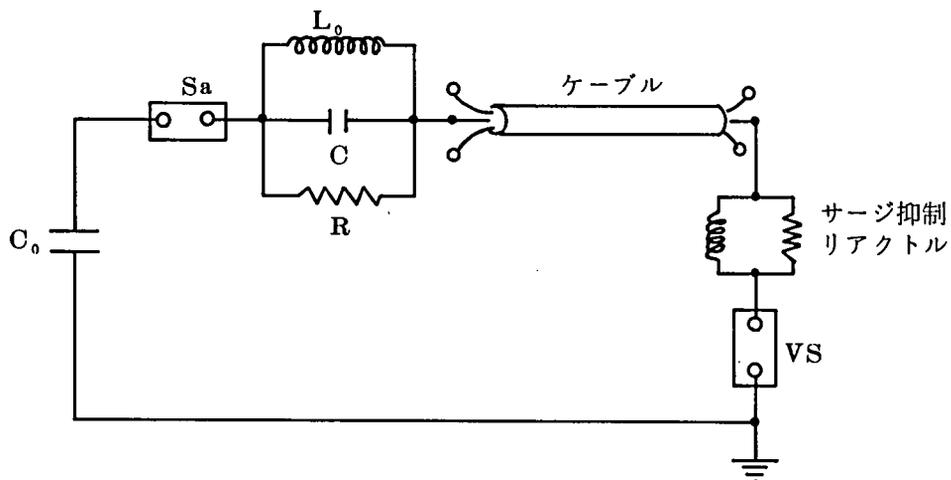
つぎに、上に述べた高周波電流抑制機能がサージの抑制にどの程度の効果を有するかを検討する。

5.3.2 高周波電流抑制の再発弧現象に及ぼす効果

(a) 再起電圧拡大現象の抑制⁽⁹⁾

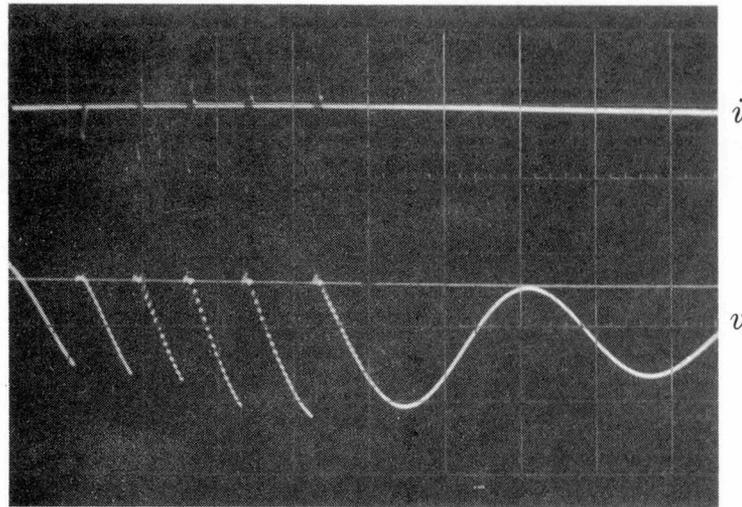
第 2 章で述べたように、真空スイッチのしゃ断時に再発弧が生起し、再発弧後に流れる高周波電流がかなりの電流零点を通過してはじめてしゃ断される場合には、負荷電流の強制さい断によって再起電圧が拡大される。

しかしながらこの高周波電流が 1 サイクルで減衰してしまう場合には、高周波電流の通電期間中に上昇する負荷電流も極端に小さい値となって、拡大現象は抑制されることが予想される。そこでサージ抑制リアクトルを真空スイッチと結合して、第 5.10 図の回路で現象を観測した。



第 5.10 図 サージ抑制リアクトルの高周波電流抑制実験

この回路は第 2.1 図の回路とはリアクトルの接続を除けば同一である。第 5.11 図は実験で得られた代表的なオシログラムの例である。第 5.11 図とサージ抑制リアクトルが挿入されていな



$$i = 250 \text{ A/div}$$

$$v = 5 \text{ kV/div}$$

$$T = 50 \mu\text{s/div}$$

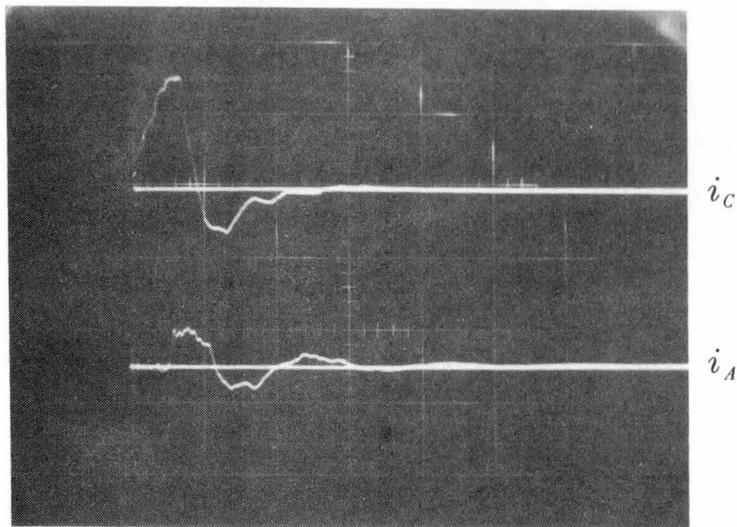
第 5.11 図 サージ抑制リアクトルにより抑制された
高周波電流波形と再起電圧波形

い場合の第 2.2 図とを比較すれば明らかであるが、高周波電流は 1 サイクルでしゃ断されると同時に、再起電圧の波高値も抑制されている。このことは第 2 章 (2.10') 式から次のように説明される。すなわち、(2.10') 式において j 回目の再発弧後の高周波電流の通電サイクル数 N_j がすべて 1 になれば、 $\sum_j N_j$ は再発弧の回数と一致し、無保護の場合と比較して 1 桁以上の低下が望めるからである。

(b) 三相同時しゃ断の抑制⁽⁹⁾⁽¹²⁾

三相同時しゃ断現象は第 2.2 節で述べたように、しゃ断の第 1 相の発弧に続いて流れる高周波電流が、第 2, 3 相にも高周波電流を誘起させ、これが負荷電流に重畳して電流零を形成することによって、三相がほとんど同時にしゃ断されてしまう現象である。したがって三相同時しゃ断を防止するためには、この誘起される高周波電流を減衰させ波高値を抑える必要がある。

サージ抑制リアクトルはこの点に関しても優れた特性を有している。第 5.12 図は第 2.6 図に示した実験回路で、同軸分流器のケーブル側の各相にサージ抑制リアクトルを挿入した場合の高周波電流波形である。図の場合には、リアクトルの挿入によって誘起される高周波電流の波高値が、リアクトルがない場合の約 20% に低下している。このことは第 2 章 (2.32) 式の Z_c がみかけ上 5 倍になることを意味しており、三相同時しゃ断の発生確率が大巾に低下する。



$$i_c = 85.2 \text{ A /div}$$

$$i_A = 25 \text{ A /div}$$

$$T = 5 \text{ } \mu\text{s /div}$$

第 5.12 図 高周波電流波形 (i_c : C 相電流 i_A : A 相電流)

以上のようにリアクトルの高周波電流抑制機能によって、再起電圧拡大現象および三相同時しゃ断現象が抑制され、危険なサージの発生が防止されることが明らかとなった。このリアクトルの高周波電流抑制機能は、さらに重要な効果を提供している。すなわち(a)で述べたように再発弧後の高周波電流が 1 サイクル以内に抑制されるため、第 3 章で取扱ったような真空スイッチの高周波電流しゃ断特性における統計的特性が完全に除去されるとともに、耐圧の統計的バラツキが減少することを期待できる。このことは回路条件と真空スイッチの開極速度を与えることにより、再発弧現象を順次明確に計算できることを意味している。この詳細は次節で述べるが、リアクトルの高周波電流抑制機能は再発弧現象を明確にし、保護の効果に対する的確な推定を可能にする点で特徴的である。

5.4 保護システムとその理論⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾

真空スイッチで電動機回路をしゃ断する場合、真空スイッチの消弧特性から電流さい断現象を全く除去することは不可能であり、とくにしゃ断容量が大きい真空しゃ断器の場合には使用できる接点材料の選択の自由度が小さいので、数 A のさい断電流値は容認せざるを得ないのが現状である。この電流さい断現象は、真空スイッチのしゃ断時に発生する多重再発弧現象、三相同時しゃ断現象の発生確率を増大させる原因となることは第 2 章において指摘した。

多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象が発生すると、波頭の急しゅんなサージが電動

機に進入するが、進入サージの電動機巻線内の分布を検討して、このサージの危険性を第4章で指摘した。

このサージから電動機を保護するために開発されたサージ抑制リアクトルは、サージの波頭しゅん度を緩和する。さらには発弧後に流れる高周波電流を抑制して多重再発弧現象および三相同時しゃ断現象の抑制に顕著な効果を発揮するとともに、発弧現象を明確なものにすることを前節で述べた。

本節では、このリアクトルが有する波頭緩和機能および高周波電流抑制機能、真空スイッチの電流さい断特性、開閉特性および電動機巻線の絶縁物のサージによる劣化特性をすべて考慮し電動機の事故と真空スイッチの開閉操作との関連性を統計的に解析する。したがって本章ではリアクトルが必ず回路に挿入されていることが前提となっている。

本節では、真空スイッチのさい断電流の分布を考慮に入れるため、第3章で述べた現象のシミュレーションを行なうと相当な回数の計算を行なう必要がある。しかしリアクトルの高周波電流の抑制効果にもとずいて、現象が単純化される点に注目し、新たに再発弧電圧、回数を求める近似式を考案して計算を実施した。

5.4.1 保護システムにおけるサージの発生

真空スイッチと直列にリアクトルが挿入されている回路で、電動機の負荷電流をしゃ断したときに、電流が I_c でさい断されたものと仮定する。そのときに発生する再起電圧の波高値 V_m は(1.4)式から次のようになる。

$$V_m = Er + \lambda \sqrt{Er^2 + (Z_0 I_c)^2} \quad (5.12)$$

ここで、 Er は突入電流のしゃ断では3.3 kV回路では4 kVとなる。 λ は再起電圧の最初のピークまでの減衰率であり、振巾率 ψ とは $\lambda = \psi - 1$ で関係づけられている。

さて、この再起電圧の波高値が、その瞬時のスイッチの極間耐圧を越えると発弧し、波頭の急峻なサージがケーブルを介して電動機に進入する。この最初の再発弧が発生する確率については、電流さい断を考慮に入れて(5.8)式は次のように書くことができる。

$$P_{ig} = \frac{2f_0 V_m}{E_{m1} S t} \quad (5.13)$$

つぎに一度再発弧した後どの程度再発弧が継続するかを検討する。ここでリアクトルの高周波電流の抑制機能によって、高周波電流が1サイクルで抑制されるものと考え、多重再発弧現象が比較的短時間で終了するものと考え、この間は近似値にギャップ長は一定として取り扱うことができる。そこで最初の再発弧に対して再発弧電圧を V とすると、ギャップ長を一定と仮定している、ある回数くり返される再発弧はすべて等しい再発弧電圧 V で発生するも

のと考えることができる。したがって、第2章の議論から近似的に次のように再発弧回数を求めることができる。

くり返し発弧が発生した場合の n 回目の再起電圧およびインダクタンス L_0 の電流を表現する数式は、第2章の(2.7)式、(2.9)式からつぎのようになる。

$$v = Er - \sqrt{(Er - V_{pn-1})^2 + (Z_0 I_{cn-1})^2} \varepsilon^{-\alpha(t - t_{cn-1})} \times \cos \{ \omega(t - t_{cn-1}) + \phi' \} \quad (5.14)$$

$$i_L = \frac{1}{Z_0} \sqrt{(Er - V_{pn-1})^2 + (Z_0 I_{cn-1})^2} \varepsilon^{-\alpha(t - t_{cn-1})} \times \sin \{ \omega(t - t_{cn-1}) + \phi' \} \quad (5.15)$$

$$\phi' = \tan^{-1} Z_0 I_{cn-1} / (Er - V_{pn-1}) \quad (5.16)$$

ここでサージ抑制リアクトルの高周波電流抑制機能がどのような効果を有するかを考察する。第一の効果は第5.11図に示すように、高周波電流がしゃ断された後の瞬時回復電圧 V_{pn-1} が、 Er と比較して十分無視できる程度の低い値に抑制されることである。したがって、上の各式で V_{pn-1} を除去することにより式の単純化が可能となり、根号内の第1項による再起電圧の拡大が防止される。

さらに重要な第二の効果は I_{cn-1} に関係している。 I_{cn-1} は $(n-1)$ 回目の発弧後に流れる高周波電流が流れる瞬時における L_0 中の電流の波高値であり、(2.4)式から、振動項は小さいので無視して、つぎのように与える。

$$I_{cn-1} = I_{bn-1} + Er(t_{cn-1}) / L_0 \quad (5.17)$$

ここに、 I_{bn-1} は $(n-1)$ 回目の発弧瞬間、 t_{bn-1} 、における L_0 中の電流の瞬時値である。ここで重要なことは、発弧後のスイッチの導通期間を表現する $(t_{cn-1} - t_{bn-1})$ の値が、第5.9図に示されているようにリアクトルによって高周波の1サイクル以下に制限されてしまうことである。いま3.3kV, 200kVA, サージインピーダンス3kΩの電動機が100mのケーブルでスイッチと接続されている場合を例にとると、 I_{bn-1} は1Aのオーダーであるのに対して $Er(t_{cn-1} - t_{bn-1}) / L_0$ は0.1Aのオーダーである。これから(5.17)式はつぎのように単純化される。

$$I_{cn-1} = I_{bn-1} \quad (5.18)$$

以上のような単純化を行なえば、(5.14)～(5.16)式はつぎのような漸化式に変形される。

$$U_n = 1 - \sqrt{1 + J^2 c_{n-1}} \varepsilon^{-\alpha \theta_n / \omega} \cos(\theta_n + \phi_n) \quad (5.19)$$

$$J_n = \sqrt{1 + J^2 c_{n-1}} \varepsilon^{-\alpha \theta_n / \omega} \sin(\theta_n + \phi_n) \quad (5.20)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} J_{c_{n-1}} \quad (5.21)$$

ここに θ_n は $(n-1)$ 回目の発弧から n 回目の発弧までの無次元化された時間をあらわしている。また U_n , J_{cn} は n 回目の発弧後の無次元化された電圧電流をあらわしており、次式によって、 t , V , I と関係づけられる。

$$\theta_n = \omega t, \quad U = V / E_r, \quad J = I Z_0 / E_r$$

しゃ断後の時間の関数としてスイッチの極間耐圧を与えると、(5.19)～(5.21)を用いて順次再起電圧および絶縁破壊電圧を求めることができる。なお J_{c0} は、最初のしゃ断時のさい断電流であり、負荷電流が I_c でさい断されたとき $J_{c0} = I_c Z_0 / E_r$ で与えられる。

いま簡単のため、発弧のくり返し期間内では、極間耐圧の変化は小さいので、一定値 U で絶縁破壊するものと仮定し、さらに θ_n も一定値 θ であるとする、(5.19)式および(5.20)式から次式が導かれる。

$$T^2 + J_{cn}^2 = (1 + J^2 c_{n-1}) \lambda^2 \quad (5.22)$$

ここに $T = 1 - U$, $\lambda = \exp(-\alpha \theta / \omega)$ である。

(5.22)式はさらに、つぎの微分方程式に変形される。

$$\lambda^2 \frac{dJ_c^2}{dn} + (1 - \lambda^2) J_c^2 = \lambda^2 - T^2 \quad (5.23)$$

(5.23)式の一般解は

$$n = -\frac{1}{q} \ln(a - qy) + C \quad (5.24)$$

ここに、 $y = J_c^2$, $q = (1 - \lambda^2) / \lambda^2$, $a = 1 - (T / \lambda)^2$, C は積分定数である。 C の値は $y = y_0 = J_{c0}^2 = (I_c Z_0 / E_r)^2$ のとき $n = 0$ として求められるので、結局(5.24)式は

$$n = \frac{1}{q} \ln \frac{a - qy}{a - qy_0} \quad (5.25)$$

(5.25)式から n の最大値は近似的に y の値が零、すなわち L_0 中の電流が零となった時点で与えられるから

$$n = \frac{1}{q} \ln \left(1 - \frac{q}{a} y_0 \right)$$

したがってこの n を $n(V, I_c)$ と表現すると

$$n(V, I_c) = \frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} \ln \left(1 + \frac{(1-\lambda^2)(Z_0 I_c)^2}{(E_r - V)^2 - \lambda^2 E_r^2} \right) \quad (5.26)$$

となる。(5.26)式から、回路の振巾率 $\psi = 1 + \lambda$ 、サージインピーダンス Z_0 、さい断電流値 I_c および回復電圧 E_r が与えられるとき、最初の再発弧電圧 V を与えることによってくり返し発弧の回数 n を計算することが可能となる。

このように、リアクトルの高周波電流抑制機能によって、不明確なくり返し発弧の様相が明確になり発弧サージが電動機巻線の絶縁に及ぼす効果を定量的に検討することが可能になるという点で、きわめて重要な機能であるといえる。

以上で再発弧電圧を与えた場合の再発弧の回数を求めたので、次にこの再発弧によって発生したサージによる電動機巻線の劣化について述べる。

5.4.2 サージに対する電動機の寿命

まず再発弧することにより発生するサージの数についてさい断電流の効果も含めて検討する。

(5.13)式から再発弧電圧 V の増分 dV に対する再発弧確率の増分について $dPig$ を求めると

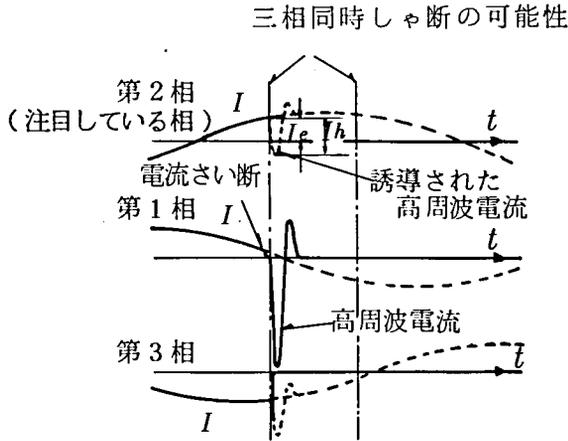
$$dPig = \frac{2f_0}{EmSt} dV \quad (5.27)$$

をうる。ここで V のとりうる値の範囲は(5.12)式に示すように、真空スイッチのさい断電流 I_c に依存する。真空スイッチの電流さい断特性は第1章で述べたように分布を有するので、さい断電流の確率密度関数 $\varphi(I_c)$ を導入して、毎相毎しゃ断当りのサージの発生数を求める。さい断電流値が I_c と $(I_c + dI_c)$ の間である確率は $\varphi(I_c) dI_c$ であるから、さい断電流値が I_c と $(I_c + dI_c)$ の間にあるとき、波高値が V と $(V + dV)$ の間であるサージの発生数 dn_1 は(5.26)式および(5.27)式を用いて、三相回路に対して次のように表現される。開極に伴う真空スイッチの極間耐圧上昇速度 $k = Em_1 St$ とおくと

$$dn_1 = \frac{2f_0}{k} n(V, I_c) \varphi(I_c) dV dI_c \quad (5.28)$$

さて、第3章で述べたように、サージは三相同時しゃ断によっても発生する。第1相の再発弧電圧を V_1 とし、その再発弧によって誘起された他相の三相同時しゃ断によってあらわれる異常電圧で、他相が電圧 V で再発弧するものとする。ここで V_1 と V は、三相の開極動作が一般に制御されていないことから、等しいとは限らない。しかしながら同時開極するように開閉器の製造工程において、調整されるので、 V は V_1 を中心として一般に分布を有するものと判断することができる。この分布の確率密度関数を $g(V, V_1)$ としたとき、三相同時しゃ断の他相で発生するサージ発生数の増分 dn_2 は毎相毎しゃ断当り、次式で与えられる。

$$dn_2 = 2 \times \frac{2f_0}{k} n(V, I_e) g(V, V_1) \varphi(I_c) dV dV_1 dI_c \quad (5.29)$$



第 5.13 図 三相同時しゃ断の発生

ここに $n(V, I_e)$ は、(5.28) 式においてさい断電流 I_c が、三相同時しゃ断における負荷電流 I_e に置換されたものである。また係数の 2 は、第 5.13 図から明らかなように、問題の相に対して三相同時しゃ断の発生可能な時点が商用周波半サイクルに 2 回あるからである。

結局、毎相毎しゃ断当りに発生するサージ数 dn_t は (5.28) 式および (5.29) 式から

$$dn_t = dn_1 + dn_2 \quad (5.30)$$

となる。

以上で任意のさい断電流に対して波高値が V のサージの発生数が求められたので、以下ではそのサージが電動機巻線に進入したことによる巻線の劣化を検討する。

真空スイッチの極間が電圧 V で再発弧したとすると、ケーブルに進入した波高値 V のサージがケーブルの電動機端で反射して 2 倍になることは (5.1) 式に示した通りである。

電動機端子には、(5.1) 式の V_a になる波高値を有するサージが、毎相毎しゃ断当り、(5.30) 式で与えられる数だけ印加されることが明らかになった。これらのサージの波頭は、リアクトルによって緩和され、電動機巻線内の電圧集中が軽減されることは第 4 章で述べたとおりである。

そこで第 5.2 節で述べたように、発弧電圧が分布を有する場合の取り扱い方として (5.6) 式に示した重み関数 $w(v_t)$ を導入する。(5.6) 式を利用するとサージ電圧 V の印加回数 dn_1 、 dn_2 は、次のように基準ターン間電圧 v_0 を有するサージの等価な印加回数 dn'_1 および dn'_2 に変換される。

$$dn'_1 = \frac{2f_0}{k} n(V, I_c) \varphi(I_c) w(2\xi_c V N_a / N_c) dV dI_c \quad (5.31)$$

$$dn'_2 = \frac{4f_0}{k} n(V, I_e) g(V, V_1) \varphi(I_c) w(2\xi_c V N_a / N_c) dV dV_1 dI_c \quad (5.32)$$

(5.31) 式および (5.32) 式を積分すれば、毎相毎しゃ断当りに、電動機端子に近いコイルの

ターン間に印加される電圧 v_o のサージの等価な回数が求められる。すなわち

$$\begin{aligned} n' = & \frac{2f_0}{k} \int_0^\infty \int_0^{V_{lim}} n(V, I_c) \varphi(I_c) w(2\xi_c V N_a / N_c) dV dI_c \\ & + \frac{4f_0}{k} \int_0^\infty \int_{V_c}^{V_{lim}} \int_0^{V_{lim}} n(V, I_e) g(V, V_1) \varphi(I_c) w(2\xi_c V N_a / N_c) dV dV_1 dI_c \end{aligned} \quad (5.33)$$

ここで V および V_1 の積分範囲の上限は、スイッチに近接して接続された避雷器の保護レベルによって決定される。保護装置のない回路でも、スイッチの耐圧によって制限される。また V_1 の下限 V_c は、三相同時しゃ断を起す最低の電圧で決定される。この V_c は (2.28) 式 (2.30) 式から次式で与えられる。

$$V_c = Z_c I_e / \eta \quad (5.34)$$

さて、 n' が求められると、真空スイッチの許容動作回数は N_o / n' で与えられる。この逆数 n' / N_o は毎動作当りの電動機の事故確率を意味しているので

$$P = n' / N_o \quad (5.35)$$

を真空スイッチで電動機を制御する場合の危険率と考えることができる。次の第 5.4.3 項では P の具体的な計算について述べる。

5.4.3 電動機の寿命の数値的計算例

前節で求めた (5.33) 式の計算を実行するために、以下の仮定をした。

(1) 電流さい断に対する確率密度関数 $\varphi(I_c)$

$\varphi(I_c)$ は正規分布であって、平均値 \bar{I}_c 、標準偏差 σ_i で与えられる。すなわち

$$\varphi(I_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(I_c - \bar{I}_c)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (5.36)$$

さい断電流がこの分布形状を有することは、2.3 の接点材料について実験的に求めており、その一部については第 1 章で示したとおりである。

(2) 第 2 相の極間耐圧に対する確率密度関数 $g(V, V_1)$

第 2 相の極間耐圧 V は、第 1 相の極間耐圧 V_1 を平均値として、標準偏差 σ_v を有する正規分布であることが推測される。すなわち

$$g(V, V_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} e^{-\frac{(V - V_1)^2}{2\sigma_v^2}} \quad (5.37)$$

この仮定は、三相間の開極時点が、同時になるよう開閉装置の製造工程で調整されることから妥当であると考えられる。

(3) 電動機のターン間絶縁の劣化特性

劣化特性は次式で与えられるものと仮定する。(第4章(4.10)式参照)

$$v_t - v_s = c_1 n^{-c_2} \quad (5.38)$$

ここに v_s は絶縁劣化を起す電圧の下限である。したがって v_s 以下の電圧を印加しても絶縁物は劣化しない。右辺の c_1 および c_2 は電動機の固体絶縁の構成および材料によって定まる定数である。絶縁物の劣化特性が(5.38)式で与えられた場合の重みの関数 $w(v_t)$ は

$$w(v_t) = \begin{cases} \left(\frac{v_t - v_s}{v_0 - v_s} \right)^{1/c_2}, & v_t \geq v_s \\ 0, & v_t < v_s \end{cases} \quad (5.39)$$

となる。第5.1表に代表的な v_0, N_0, v_s, c_2 の値を示した。

第5.1表 v_0, N_0, v_s, C_2 の値

回路電圧	絶 縁	v_0	N_0	v_s	C_2
3.3 kV	D G C	3 kV	10^4	1 kV	0.1 ~ 0.15
6.6 kV	PEW-DGC	5 kV	10^4	2 kV	0.1 ~ 0.15

(4) 電動機のサージインピーダンス

電動機のサージインピーダンスは、第3章の(3.12)式に示したように、電動機の定格電圧、kVA、極数の関数として与えられる。

(5) 再起電圧振巾率

電動機の実回路について調査すると振巾率は1.6~1.8の間にあり、ケーブル長の増大とともに大きくなる。この数式表現は(3.13)式で与えた。再記すれば

$$\lambda = \psi - 1 = \exp(-3.67 \times 10^5 / \sqrt{Cm + Cc})$$

$$Cc(F) = 2 \times 10^{-10} \times l(m) \quad (5.40)$$

ここに l はケーブル長である。

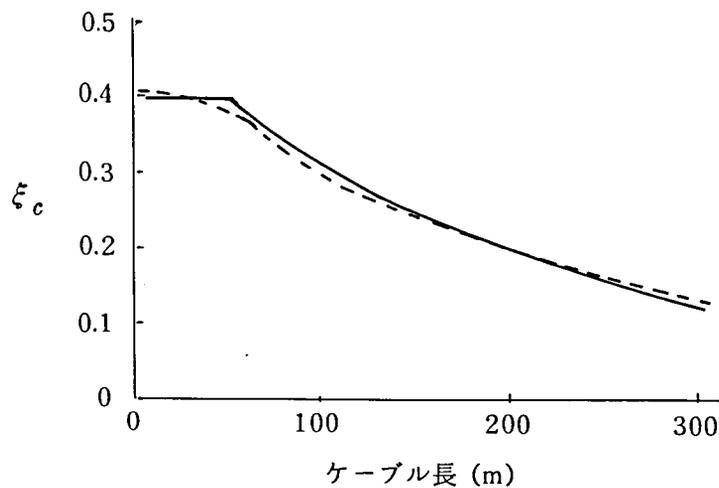
λ は再起電圧の半波減衰率を与えているが、電動機の定格負荷電流のしゃ断および突流しゃ断では、発弧する時点が異なりそれぞれ $1/4$ サイクル、および $3/4$ サイクル近傍となるので、計算では発弧時点の減衰率として

$$\lambda' = \begin{cases} \lambda^{1/2} & : \text{定格電流しゃ断} \\ \lambda^{3/2} & : \text{突流しゃ断} \end{cases} \quad (5.41)$$

としている。

(6) リアクトルによるサージの波頭緩和

第4章の第4.10図と前節の第5.8図とを結合することにより、リアクトルによって低下された1コイルのサージ電圧分担率 ξ_c とケーブル長との関係を求めることができる。第5.13図の破



第5.14図 ケーブル長とコイル分担率 ξ_c との関係

線で示された曲線が求められた特性である。実際の計算では図の実線のように近似し、つぎの式を用いている。

$$\xi_c = \begin{cases} \exp(-lc/220) & : lc \geq 49 \text{ m} \\ 0.8 & : lc < 49 \text{ m} \end{cases} \quad (5.42)$$

ここに lc はケーブル長である。

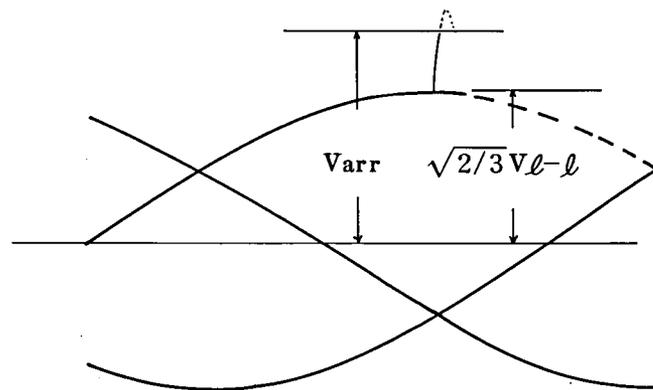
(7) 電動機巻線の構造

巻線構造のうち、とくに重要なことは、(4.4)式における N_a/N_c の値である。各種の構造について調査した結果 $N_a/N_c \geq 6$ となっているので、 $N_a/N_c=6$ を採用している。

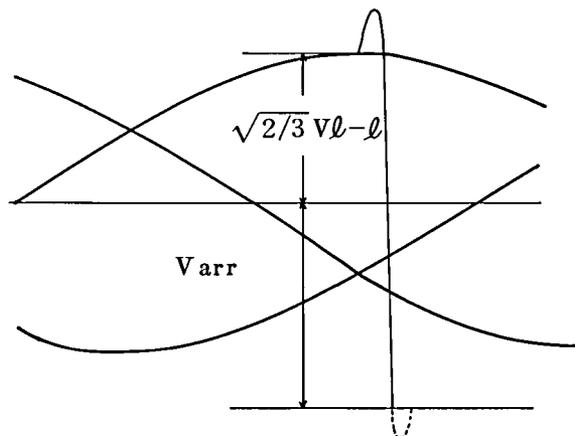
(8) 避雷器の特性

第 5.2 表 避雷器の諸特性

	LV - GL		SV - VS	
	3 kV 用	6 kV 用	3 kV 用	6 kV 用
定 格 電 圧 (許容端子電圧) kV RMS	4.2	8.4	4.2	8.4
使用回路電圧 (非有効接地) V	3,300	6,600	3,300	6,600
商用周波放電開始電圧 kV RMS 以上	6.9	13.9	6.3	12.6
衝撃放電開始電圧 (100%) kV crest 以下	17	33	13	26
制 限 電 圧 (50Aで) kV crest 以下	12	24	12	24



(a) 定格電流しゃ断



(b) 突流しゃ断

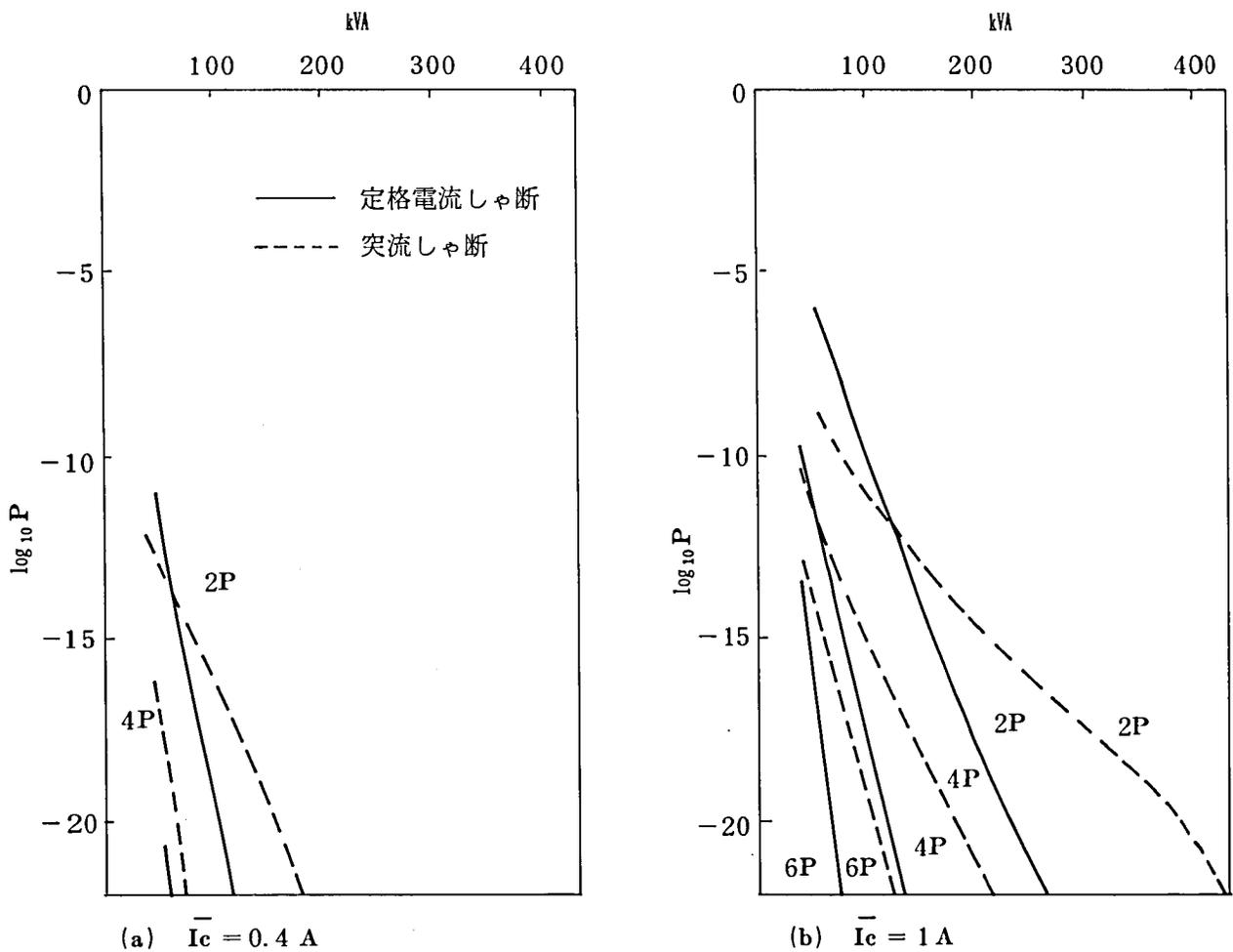
第 5.15 図 避雷器による発弧電圧の制限

避雷器の保護レベルは、(5.33)式を計算するために重要である。代表的な避雷器(LV-G L)およびサージアブソーバ(SV-VS)の特性を第5.2表に示す。いま真空スイッチの電動機側に避雷器が接続されている場合、第1相しゃ断後の極間最大発弧電圧を求めると、第5.14図(a)および(b)を参照して、各しゃ断条件に対して、つぎのように表現できる。

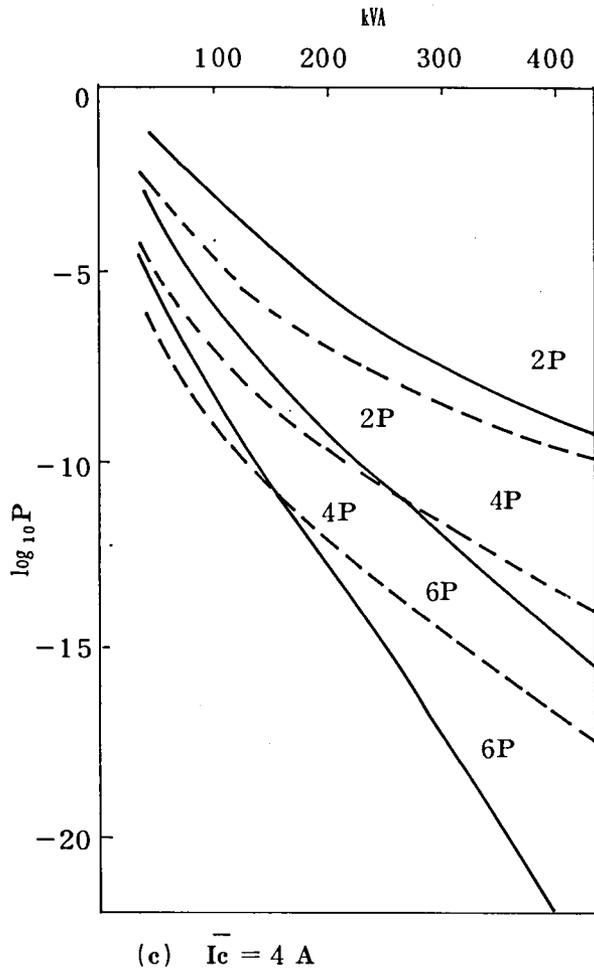
$$V_{lim} = \begin{cases} V_{arr} - \sqrt{2/3} V_{l-l} & : \text{定格電流しゃ断} \\ V_{arr} + \sqrt{2/3} V_{l-l} & : \text{突流しゃ断} \end{cases} \quad (5.43)$$

ここに V_{l-l} は線間電圧(r.m.s)である。

以上のようにして、(5.33)式で与えられる \dot{n} の計算の関数形が定まったので、電子計算機によって計算を実行することができる。計算では電動機の容量、極数の関数として(5.35)式の P を求めている。



第5.16図 サージ抑制リアクトルで保護した場合の事故率



第 5.16 図に 3.3 kV 電動機についての計算結果を示した。これらの図から P は真空スイッチのさい断電流平均値に大きく依存している。

したがって平均のさい断電流を低下させることが如何に重要であるかが示されている。

真空コンタクタの例を第 5.16 図(a)とすると、平均のさい断電流が 0.4 A まで低下されることにより、リアクトルで十分保護されることがわかる。一方第 5.16 図(c)を真空しゃ断器の例とすると、平均さい断電流が 4 A の場合、2 極の電動機で 350 kVA 以下、4 極の電動機で 150 kVA 以下では P は 10^{-8} より大となる。 10^{-8} は 10^4 台の電動機を 10^4 回しゃ断した場合に 1 台の電動機が事故を起すことを意味している。この 10^{-8} という値が許容されうるものかどうかは、電動機回路

の開閉頻度を含めた設計方針によって定まる。もしこの値が許容できない場合には、さらに保護装置が必要である。C-R サージアブソーバは回路のサージインピーダンス Z_0 を低下させ、かつ再起電圧の周波数を低下させるので、有効である。

以上のようにして求められた P をもとにして保護システムを最適に選ぶことにより、電動機の安全な運転が確保される。

5.5 結 言

(1) 真空スイッチの再発弧によって発生するサージから、電動機を保護するために、サージの波高値を低減し、波頭を緩和する機能を有するサージ抑制用可飽和リアクトルを開発した。

(2) 可飽和リアクトルは高周波特性のよいフェライトまたは極薄ケイ素鋼帯から構成されたコアと、コアに巻かれたコイルとから構成され、コアがフェライトの場合には、損失が少ないためコイルと並列に抵抗を接続する。このリアクトルは負荷電流では飽和状態にあるため電圧

降下は極めて小さく無視できる。

(3) リアクトルは真空スイッチと直接接続され、ケーブルに進入するサージの波頭を緩和する。緩和されたサージの波頭長は、ケーブル長の関数であって、ケーブルが極めて短い場合でも、 $0.2\mu s$ 程度の波頭長を有するサージを $1\mu s$ の波頭長まで緩和することができる。

(4) リアクトルは、並列抵抗による損失によって、再発弧後の高周波電流をほぼ1サイクルに抑制する。この機能によって再起電圧拡大現象を防止し、数回再発弧を経験するだけで回路がしゃ断される。このため、発生するサージの波高値およびその個数が制限され、前記の波頭緩和機能による電動機巻線内の電圧分布の平均化とあいまって、電動機の保護を行なうことができる。

(5) リアクトルの高周波電流抑制機能によって、回路の高周波抵抗が増大する。このことは三相同時しゃ断現象を誘起する他相の高周波電流が抑制されることを意味し、したがって三相同時しゃ断の発生確率が大幅に低下する。

(6) サージ抑制リアクトルを真空スイッチと直列に接続して回路に挿入すると、しゃ断後にあらわれる再起電圧で真空スイッチが発弧しても、リアクトルの高周波電流抑制機能によって発弧の様相が明瞭となり、電動機巻線に侵入するサージを定量的には握できるようになる。したがって電動機巻線の絶縁のサージによる劣化との関係も定量的には握できる。

(7) 真空スイッチが発生するサージは、真空スイッチのさい断電流の分布、開極位相の分布にともなうしゃ断後耐圧の分布によって、その波高値およびサージの個数に分布を有している。この分布は真空スイッチの特性によって大きく支配される。この他電動機のサージインピーダンス、ケーブル長によって定まる再起電圧の振巾率も関与する。

(8) 電動機巻線の絶縁劣化特性は、一般に同一波高値の標準インパルス波形を印加して、破壊まで印加できるサージの個数と電圧の関係によって与えられる。このデータを分布を有するサージの場合に適用するために、重み関数 $w(v_i)$ を導入し、基準電圧 v_0 における等価なサージ印加回数を求める方法を考案した。

(9) 重み関数 $w(v_i)$ を用いると、サージ抑制リアクトルが挿入されている回路の1相当り1しゃ断当りに発生するサージの等価回数が求められる。この等価回数と基準電圧における破壊までの回数とから、1相1しゃ断当りの電動機の事故確率を求めることができる。この計算を電子計算機を用いて行なうためのプログラムを開発した。

(10) 真空スイッチのさい断電流の分布および三相間のしゃ断位相が正規分布をしている場合について、絶縁の劣化特性が $v_i - v_s = c_1 \bar{n}^{c_2}$ で表現されるものとして計算を実行した。電動機の事故確率が 10^{-8} を基準として採用した場合、さい断電流の平均値 \bar{I}_c および標準偏差 σ_i がそ

れぞれ 0.4 A および 0.15A のコンタクタでは、回路にリアクトルが挿入されていると、事故の確率は実質的に問題とならない。一方 $\bar{I}_c = 4 \text{ A}$, $\sigma_i = 1 \text{ A}$ のしゃ断器の場合には小容量の電動機の場合 10^{-8} を上まわる確率で事故が発生する。しかし、この 10^{-8} という値が適当であるか否かについては、別途電動機制御回路の設計方針とも関連して決定されるべきものである。もしあらかじめ設定された事故確率を上まわり、これが許容されない場合には C-R サージアブソーバの併用が推奨される。

(11) 以上のように、サージ抑制リアクトルの接続によって、サージの波高値、波頭峻度が低下され、真空スイッチが発生するサージによる電動機巻線の寿命が延長される。同時に発弧現象を定量的には握でき、保護装置としてのリアクトルの効果を予め定量的に推定できることから、電動機制御回路の保護システムを確立することができた。

本研究の成果として開発されたサージ抑制用リアクトルをフィールドに適用して以来 8 年以上経過しているが、電動機事故は皆無となり、保護装置としての性能を十分有することが実証されていることを付記する。

第 6 章 本研究成果の要点

- (1) 第 1 章では真空スイッチの使用と電動機事故との関連について調査および実験を通じて次のことを明らかにした。
- (i) 真空スイッチと他の開閉器との対比において電動機事故発生確率を計算した結果、真空スイッチを使用した場合に事故発生率が高いことを明らかにした。また電動機の生産台数と事故発生件数を容量別に統計をとり、事故の大部分が 3.3 kV では 100 kW 以下、6.6 kV では 200 kW 以下の小容量電動機に集中していることが明らかとなった。
 - (ii) 事故を発生した電動機巻線を分解し調査した結果、巻線のターン間絶縁の破壊事故が 75 % という高い率を占め、しかも巻線の端子近傍コイルでの事故件数が多いことを明らかにした。この結果から急しゅんな波頭を有するサージが進入してくることが明らかになった。
 - (iii) 従来から考えていた真空スイッチの電流さい断による異常電圧で真空スイッチが再発弧すると、0.1 μ s 程度の波頭長を有する急しゅんなサージが発生するものと考えられる。そこで電流さい断実験を行ない、発生する異常電圧を検討した。その結果しゃ断器用接点材料ではさい断電流が比較的高く、さい断による異常電圧を発生することがあるが、真空コンタクタ用接点材料ではさい断による異常電圧は問題にならないことを明らかにした。
 - (iv) 実回路におけるしゃ断現象を観測した結果、さい断電流が小さい真空スイッチを使用した場合でも、なお波高値が高い異常電圧が発生することがわかった。異常電圧の発生が真空スイッチの消弧現象と関係があることを明らかにした。
 - (v) 真空スイッチで電動機の突流をしゃ断すると、アーク時間が短い場合にしゃ断の第 1 相で多重再発弧現象が観測され、この現象と異常電圧の発生とが深く関係していることを明らかにした。
 - (iv) また真空スイッチで定速回転状態の電動機回路をしゃ断すると、しゃ断の第 1 相における多重再発弧によって、他の相が同時にしゃ断される、三相同時しゃ断現象が観測された。この場合も高い波高値の異常電圧が発生し、多重再発弧現象を追求する必要性があることを明らかにした。
- (2) 第 2 章では第 1 章の結果をもとに、基礎実験回路を構成し、開閉異常電圧の発生機構を明らかにするための実験を実施した。その結果以下の事実を明らかにした。
- (i) 多重再発弧現象は、再起電圧による真空スイッチ極間の絶縁破壊と絶縁破壊後に流れる高周波電流のしゃ断のくり返し現象であり、第 1 相しゃ断に発生する。極間の絶縁破壊時には波頭の急しゅんなサージを発生する。

- (ii) 多重再発弧現象による異常電圧の発生原因は、真空スイッチの高周波電流のしゃ断に伴う負荷電流の強制さい断であることをはじめて明らかにした。強制さい断によって、負荷電流を直接さい断した場合と全く等しい異常電圧が発生し、再起電圧が拡大される。
- (iii) この強制さい断による再起電圧拡大現象は、電源のサージインピーダンスが低く、突流しゃ断の場合には、最悪の場合40 kVにも達する異常電圧を発生する可能性を有する。
- (iv) 真空スイッチ本来の電流さい断は多重再発弧現象の発生確率を増大させる危険性を有する。
- (v) しゃ断の第1相における多重再発弧によって、他相における強制さい断が発生する可能性がある。この現象の存在をはじめて明らかにし、三相同時しゃ断現象と名づけた。
- (vi) 第1相の再発弧によって誘導される他相の高周波電流を実測し、第1相の高周波電流の波高値は再発弧電圧をケーブルのサージインピーダンスで除した値を有し、他相ではその50%であることを明らかにした。
- (vii) 三相同時しゃ断の発生条件を検討し、電動機の容量が小さく、負荷率が小さい程発生する可能性が高いことを示した。また、定速回転状態のしゃ断でも三相同時しゃ断の可能性のあることを指摘した。
- (viii) 三相同時しゃ断によって発生する電圧は、真空スイッチの再発弧がなければ、100 kVのオーダーに達することを明らかにした。
- (3) 第3章では、真空スイッチの耐圧特性、高周波電流しゃ断特性を統計的に処理し、種々の回路条件について多重再発弧現象、三相同時しゃ断現象のシミュレーションを行なった。その結果
- (i) 多重再発弧現象は、ケーブル長が200 m以下、電動機容量が3.3 kVで500 kVA以下で突流しゃ断の場合に高い電圧を発生する可能性があり、通常の配電システムの60%がこの範囲に包含される。しかし定速回転状態のしゃ断の場合には異常電圧は問題とならないことを明らかにした。
- (ii) 三相同時しゃ断現象については、突流しゃ断の場合電動機容量が200 kVA以下では30 kVの電圧が発生する危険性がある。定速回転状態のしゃ断ではケーブル長が50 m以下で3.3 kV 50 kVA以下、電動機の定格電流しゃ断の場合および電動機容量が大きくても軽負荷の場合に20 kV程度の電圧が発生することを明らかにした。
- (4) 第4章では電動機の保護について考察するための準備として電動機巻線内サージ電圧分布および絶縁強度について検討を加えた。得られた成果は次の通りである。
- (i) 巻線の1コイルに印加されるサージ電圧は、端子に印加されるサージの波頭長によって変化し、0.2 μ sの波頭長では80%、1 μ sの波頭長では40%である。

- (ii) 1 コイルのターン間に分担される電圧は平等である。したがって通常の運転時に分担電圧が高い位置のターン間分担電圧が高くなる。
 - (iii) 多重再発弧、三相同時しゃ断によって異常電圧が発生した場合に電動機巻線に進入するサージは、ターン間絶縁にとって極めて苛酷であることを明らかにし、保護装置の必要性を確認した。
- (5) 第5章では保護装置について検討を加え、リアクトルによる保護方法を提唱している。第5章の成果を示すと次の通りである。
- (i) 従来から保護装置として使用されてきたコンデンサおよびアレスタについて検討を加えこれらが必ずしも十分な特性を有しないことを指摘し、また各相と大地間に接続されるために大地電流を流す点から保護継電器にとって好ましくないことを指摘した。
 - (ii) 回路に直列に挿入できる保護装置としてサージ抑制用可飽和リアクトルによる保護方法を提唱し、これが強制さい断による再起電圧拡大現象および三相同時しゃ断現象の抑制に効果があることを明らかにした。
 - (iii) さらに上記リアクトルは、発生するサージの波頭を緩和する機能を有するので、サージが電動機巻線に進入しても、ターン間電圧を低下させる効果があることを明らかにした。
 - (iv) 上記リアクトルを用いて保護を実施した場合について、真空スイッチの特性、回路条件を変更し、電動機の事故率を計算によって求めた。この結果、さい断電流が1 A以下の真空スイッチの場合には、十分安全に真空スイッチを適用できることを明らかにした。またさい断電流が比較的高い場合にも、電動機の容量、開閉頻度を勘案して、保護方法を選択できる。

以上の保護システムを実行することにより、現在では電動機の焼損事故は完全に防止され真空スイッチの本来の長所を発揮できる適用が可能となった。

謝

辞

本研究をまとめるに当り、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜った京都大学工学部上之園親佐教授に深謝の意を表します。また本研究を進める上で極めて有益な御助言、御激励と同時に御指導を賜った三菱電機中央研究所研究主幹伊藤利朗博士に深く感謝致します。また有益な討論をして頂いた生産技術研究所平林庄二部長、本社重電計画部岡田昌二専門部長に心からお礼を申し上げます。さらに熱心な御協力を頂いた三菱電機通信機製作所、制御製作所、長崎製作所の関係各位に感謝いたします。

最後に、実験にあたって御協力を頂き、熱心な討論をして頂いた制御製作所高見主任、上野技師、通信機製作所寄田技師に感謝致しますとともにお礼を申し上げます。

第 1 章 の 参 考 文 献

- (1) C. C. Erven, R. G. Van Hoeswijk, K. D. Srivastava : IEEE Trans. Vol. PAS-91, No. 4, p1589(1972)
- (2) T. H. Lee : AIEE Trans. Vol. 29, p535(1960)
- (3) A. Greenwood : AIEE Trans. Vol. 29, p545(1960)
- (4) T. H. Lee, A. Greenwood, G. Polinko : AIEE Trans. Vol. PAS-81, p376(1962)
- (5) F. X. Forstmaier : IEEE Trans. Vol. IGA-1, No. 5, p349(1965)
- (6) D. E. Shankle, R. F. Edwards, G. L. Moses : IEEE Trans. Vol. IGA-4, p171(1968)
- (7) P. Baltensperger : B. B. Review, Vol. 40, No. 9, p342(1953)
- (8) K. Norbäck J. K. Jacobsen, E. Thorstensson, W. Pucher : CIGRE Rep. 116(1964)
- (9) H. K. Amchin, R. T. Curto : AIEE Trans. Vol. 78, p1442(1959)
- (10) T. H. Lee, A. Greenwood : J. A. P. Vol. 32, p916(1959)
- (11) G. A. Farral, J. M. Laffsrt, J. D. Cobine : AIEE CP62-138(1962)
- (12) A. N. Greenwood, D. R. Kurtz, J. C. Sofianek : IEEE Trans. Vol. PAS-90, p1589(1971)
- (13) F. A. Holmes : IEEE CPC 74088-1
- (14) 伊藤・大倉 : 三菱電機技報 Vol. 36, No. 11, p1347(1962)
- (15) J. N. N. M. Legats, W. G. Brooks : J. Science & Tech. Vol. 37, No. 4, (1970)
- (16) JEC 37(1961) 誘導機
- (17) 大倉・村井 : 昭46電気全国大会 No. 755

第 2 章 の 参 考 文 献

- (1) 岡田・伊藤・村井・勝田・竹内・足立・河野 : 三菱電機技報 Vol. 45, No. 12, p1650(1971)
- (2) 高見・大倉 : 昭46 電気関係学会関西支部連大 G3-57
- (3) T. Itoh, Y. Murai, T. Ohkura, T. Takami : IEEE Trans. Vol. PAS-91, No. 5, p1897(1972)
- (4) 村井・高見・伊藤 : 開閉保護装置研究会 PD-74-5
- (5) A. N. Greenwood, D. R. Kurtz, J. C. Sofianek : IEEE Trans., Vol. PAS-90, No. 4, p1589(1971)
- (6) M. Murano et al : IEEE Trans. Vol. PAS-93, No. 1, p264(1974)
- (7) 上之園 : 学位論文集第 6 卷電力中央研究所 (昭和 37 年)

- (8) 村井他：電気学会全国大会 No. 1126 (昭和48年)
- (9) Y. Murai et al : IEEE Trans. Vol. PAS-93, No. 4, p1472(1974)
- (10) M. Murano et al : IEEE Trans. Vol. PAS-93, No. 4, p274(1974)
- (11) J. Panek, K. G. Fehrle : IEEE Trans. Vol. PAS-94, No. 4, p1317(1975)
- (12) H. O. Stoolting, E. F. Veverka : IEEE Paper A75553-8

第 3 章 の 参 考 文 献

- (1) 黒沢・菅原：開閉保護装置研究会資料 PD-74-6
- (2) 梅谷他：明電舎時報 Vol. 92, No. 3, p65(1970)
- (3) M. Murano et al : IEEE Trans. Vol. PAS-93, No. 1, p272(1974)
- (4) T. Miyamoto et al : IEEE Trans. U. I. IM-24, No. 4, p379(1975)
- (5) 上野・村井・久世・高見：放電研究会資料 ED-74-23
- (6) 上野・村井・高見：昭49 電気関係学会関西支部連大 G3-41
- (7) 日科技連ライブラリー 12, 日本科学技術連盟 (1969)
- (8) T. Itoh, Y. Murai, T. Ohkura, T. Takami : IEEE Trans. Vol. PAS-91, No. 5, p1897 (1972)
- (9) 伊藤・大倉：三菱電機技報 Vol. 36, No. 11, p1347(1962)
- (10) C. W. Kimblim : IEEE Trans. Vol. PAS-90, No. 3, p1261(1971)
- (11) 上野・村井・久世：昭49 電気学会全国大会
- (12) R. L. Witoke, T. J. Blies : AIEE T. P. 50-83

第 4 章 の 参 考 文 献

- (1) 岡田・伊藤・大倉・村井・勝田・竹内・足立・河野：三菱電機技報 Vol. 45, No. 12, p1650 (1971)
- (2) 村井：昭46 電気関係学会関西支部連大 G3-55
- (3) H. Meyer : B. B. Review, Sept / Oct, p279(1943)
- (4) S. Zoiedziowski, S. Soar : IEEE Trans. Vol. EI-1, No. 2, p84(1972)
- (5) B. R. Hayaorth : IEEE Trans. Vol. EI-3, No. 2, p47(1968)
- (6) K. A. Christiancen, A. Pedersen : IEEE 68C6-EI-87(1968)
- (7) AIEE Committee Report : AIEE Trans. Vol. 79, p5III, p182(1960)

第 5 章 の 参 考 文 献

- (1) D. F. Shankle, R. F. Edwards, G. L. Moses : IEEE Trans. Vol. IGA-4, No. 2, p171 (1968)
- (2) 黒沢・菅原 : 開閉保護装置研究会資料 PD-74-6(1974)
- (3) M. Murano et al : IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 4, p274(1974)
- (4) 尾崎 : 電力 Vol. 46, No. 9, p62(1962)
- (5) A. N. Greenwood, D. R. Kurtz, J. C. Sofianek : IEEE Trans., Vol. PAS-90, No. 4, p1589(1971)
- (6) 大倉・村井 : 昭 46 電気関係学会関西支部連大 G3-56
- (7) 大倉・村井 : 昭 46 電気学会全国大会 722
- (8) 岡田 : 昭 47 電気学会全国大会 907
- (9) 村井・高見・大倉 : 昭 47 電気学会全国大会 908
- (10) Y. Murai, T. Takami, T. Nitta, T. Itoh : IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 4, p1472 (1974)
- (11) 岡田他 : 三菱電機技報 Vol. 45, No. 12, p1650(1971)
- (12) 村井・高見 : 三菱電機技報
- (13) 高見・村井 : 昭 47 電気関係学会関西支部連大 G3-39

付録A Z_0 , α および ω の求め方

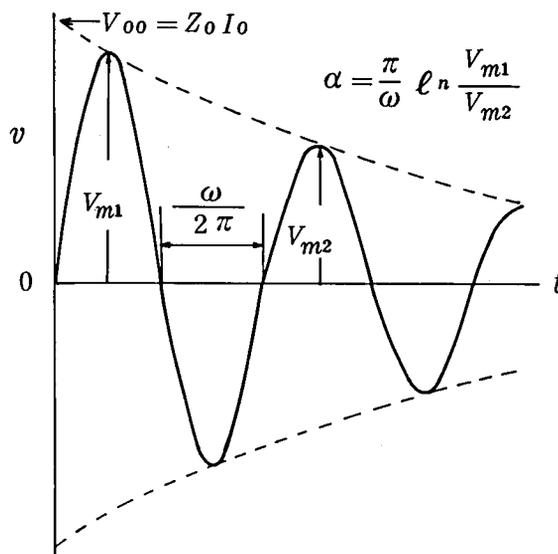
第1.14図の回路で VS を閉じ、コンデンサ C_0 の代りに数 V の直流電源から高抵抗を介して数mAの微小電流 I_0 を巻線に流し、電流が一定になった後 S を開いて電流をさい断させると、A-1図に示すような波形が得られる。この波形は(1.5)式で $Er=0$ とした場合に相当するから

$$v = Z_0 I_0 \varepsilon^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (\text{A-1})$$

で与えられる。すなわち I_0 を正確に測定しておけば、(A-1)式から波形の包絡線の $t=0$ における値を V_{00} として

$$Z_0 = \frac{V_{00}}{I_0} \quad (\text{A-2})$$

から Z_0 を求めることができる。また α , ω についてはA-1図に示した数式を利用して波形から求めることができる。



A-1図 直流電流さい断時の電圧波形

付録B 高周波電流サイクル数と再起電圧拡大比率 $G^{(2)}$

いま j 回目の再発弧を考え、高周波電流の導通時間 T_j の間のインダクタンス L_0 中の電流の増加分 ΔI_j は(2.4)式から

$$\Delta I_j = \frac{Er}{L_0} T_j \quad (\text{B-1})$$

となる。再起電圧上昇期間が高周波電流の導通期間と比較して十分短い場合には、 j 回目の高周波電流さい断時のインダクタンス L_0 中の電流 i_L は

$$i_L = \sum_j \Delta I_j = \frac{Er}{L_0} \sum_j T_j \quad (\text{B-2})$$

であらわされる。

高周波電流の角周波数を ω_h とすると、高周波の1サイクルは $2\pi/\omega_h$ であるから、 j 回目の再発弧後の高周波電流サイクル数を N_j とすると T_j は次式で与えられる。

$$T_j = \frac{2\pi}{\omega_h} N_j \quad (\text{B-3})$$

(B-2)式と(B-3)式から

$$i_L = \frac{Er 2\pi}{L_0 \omega_h} \sum_j N_j$$

$\omega_h = 1/\sqrt{LC}$, $Z_0 = \sqrt{L_0/C}$, $z = \sqrt{L/C}$, ただし L_0 は電動機回路の等価インダクタンス, L はケーブルの漂遊インダクタンス, C はケーブルを含めた回路の漂遊容量, とおくと次式を得る。

$$G = \frac{Z_0 i_L}{Er} = 2\pi \sqrt{\frac{z}{Z_0}} \sum_j N_j \quad (\text{B-4})$$

付録 C

再発弧が継続するための条件としては、2つの条件式が必要である。

- (1) 発弧すること。
- (2) 高周波電流が零点を切ってしゃ断されること。

である。まず(1)については、(2.11)式から $V_p \sim 0$ として

$$\frac{V_0}{E_r} < 1 + \lambda^{1 - \frac{\phi_r}{\pi}} \frac{Z_0 I_c}{E_r}$$

さらに $\lambda^{1 - \frac{\phi_r}{\pi}}$ を λ とおけば

$$\frac{V_p}{E_r} < 1 + \lambda \frac{Z_0 I_c}{E_r} \quad (\text{C-1})$$

また、再発弧が E_r で発生し kt で上昇するような極間耐圧とすると

$$V_D = E_r + kt \quad (\text{C-2})$$

(C-1), (C-2)式から

$$Z_0 I_c \lambda > kt \quad (\text{C-3})$$

ここに I_c は高周波しゃ断瞬時の i_L の値である。

一方、高周波電流の通電期間が十分長い場合には、

$$i_L \approx \frac{E_r}{L_0} t$$

と表現できるので、これを (C-3) 式に代入すると、

$$k < \lambda \omega E_r \quad (\text{C-4})$$

となる。ここで高周波電流の通電期間が十分長いと、最初の発弧電圧 E はあまり結果にきいてこないことを (C-4) 式があらわしている。

(2)の条件については、高周波電流の最初の最少値が零点を切ることである。すなわち、(2-3)式から

$$0 > 1 - \sqrt{1 + (V_b/zI_b)^2} \exp\left(-\beta \frac{2\pi - \phi_h}{\omega_h}\right) \quad (\text{C-5})$$

しかるに $\phi_h = \tan^{-1}(V_b/zI_b) \pi/2 > \phi > 0$ であるから、

$$\exp\left(-\beta \frac{2\pi - \phi_h}{\omega_h}\right) > \exp\left(-\beta \frac{2\pi}{\omega_h}\right) \quad (\text{C-6})$$

(C-5)(C-6)式から高周波電流が零点を形成するためには、

$$\frac{V_b}{zI_b} > \frac{\sqrt{1 - \delta^4}}{\delta^2}, \quad \delta = \exp(-\beta\pi/\omega_h)$$

ここで V_b に kt を代入し、 I_b として $\sqrt{2} \omega_0 I t$ を代入すると、

$$k > \sqrt{2} \omega_0 I z \frac{\sqrt{1 - \delta^4}}{\delta^2} \quad (\text{C-7})$$

をうる。

したがって (C-4) 式および (C-7) 式から

$$\sqrt{2} \omega_0 I z \frac{\sqrt{1 - \delta^4}}{\delta^2} < k < \lambda \omega E_r \quad (\text{C-8})$$

をうる。

付録 D ケーブルによる電動機回路のサージインピーダンスおよび振動周波数の変化

電動機単体のサージインピーダンス Z_m が第 1.21 図の直線で与えられると仮定すると、3.3 kV の電動機については、

$$Z_m = K (\text{kVA})^{-0.81} \quad (\text{D-1})$$

で与えられる。ここに K は極数によって変化する定数で 3.3 kV 電動機に対して、

$$K = \begin{cases} 2 \text{ 極} & 3.0 \times 10^5 \\ 4 \text{ 極} & 1.6 \times 10^5 \\ 6 \text{ 極} & 1.05 \times 10^5 \\ 24 \text{ 極} & 0.70 \times 10^5 \end{cases}$$

となっている。

さて電動機にケーブルを接続することを考え、電動機をD-1図に示す $L_m - C_m$ タンク回路で表わす。

このタンク回路において、電動機単体のサージインピーダンス Z_m および振動周波数 f_m は次式で与えられる。

$$Z_m = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}} \quad (\text{D-2})$$

$$f_m = 1 / 2 \pi \sqrt{L_m C_m} \quad (\text{D-3})$$

一方、ケーブルを集中定数のコンデンサ C_c で置換し、これをD-1図の端子 $T_1 - T_2$ 間に接続した場合を考えると、サージインピーダンス Z_0 および振動の周波数 f は

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_m}{C_m + C_c}} \quad (\text{D-4})$$

$$f = 1 / 2 \pi \sqrt{L_m (C_m + C_c)} \quad (\text{D-5})$$

となる。

(D-4)式、(D-5)式を計算するためには、 L_m 、 C_m の値が必要となるが、(D-2)式から Z_m が与えられた場合に L_m 又は C_m が求められると、 L_m 、 C_m の値を決定することができる。そこで第1.21図に示した実験結果と、これに伴って得られた振動周波数から L_m 、 C_m の値を求めた。D-2図およびD-3図に L_m 、 C_m の値を示した。

3.3 kVの電動機で、力率を85%、効率を90%として電動機出力をkVAで表現すると L_m は平均的に次のように表現できる。

$$L_m = 9.8 \times (\text{kVA})^{-1} \quad (\text{D-6})$$

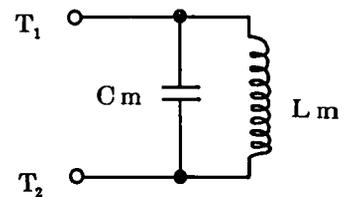
したがって(D-1)式から

$$C_m = 9.8 \times K^{-2} (\text{kVA})^{0.62} \quad (\text{D-7})$$

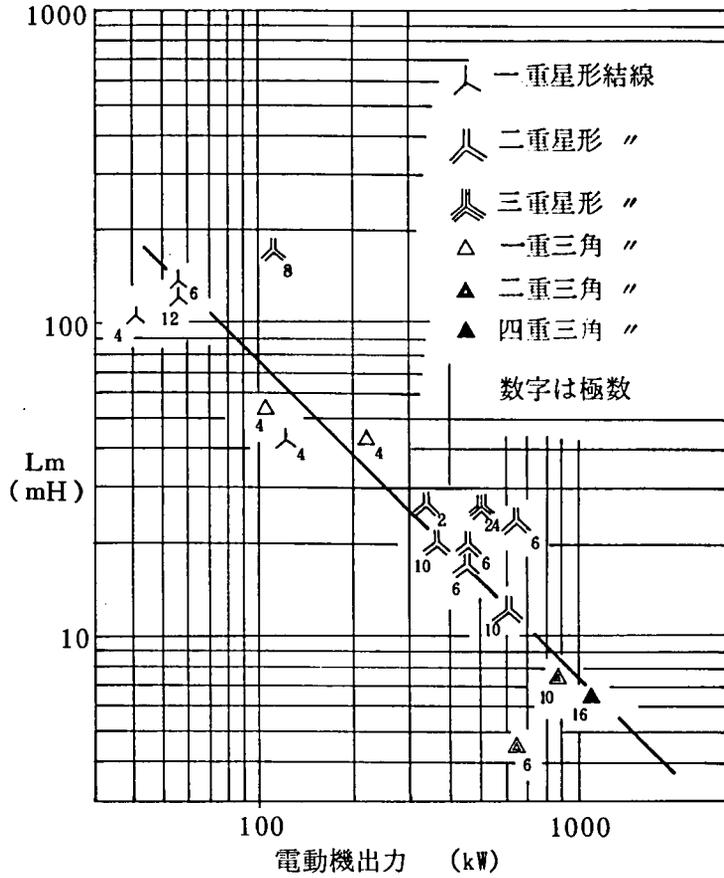
この結果はD-3図と比較的よく一致している。

つぎにケーブルの容量 C_c については22^号程度のケーブルでは200 pF/mの静電容量をもっている。そこで C_c を次のようにあらわす。

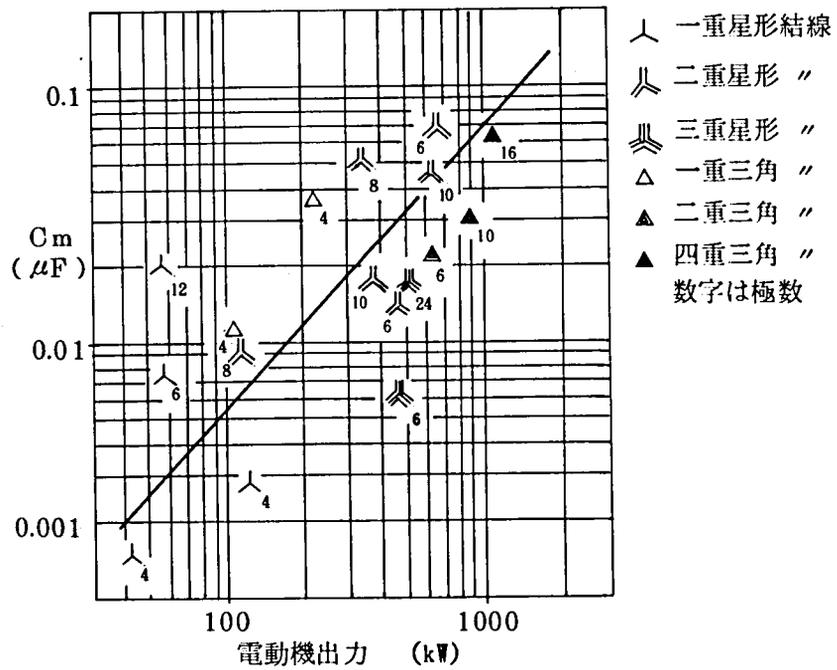
$$C_c = 2 \times 10^{-10} \ell \quad \ell (\text{m}) : \text{ケーブル長} \quad (\text{D-8})$$



D-1図 電動機巻線の等価回路



D-2 図 電動機出力と Lm の関係



D-3 図 電動機出力と Cm の関係

したがって (D-4) 式, (D-5) 式から Z_0 , f は次のようになる。

$$Z_0 = KW(kVA)^{-0.81}$$

$$f = \frac{KW(kVA)^{0.19}}{9\pi}$$

$$\text{ここに } W = \left[1 + \frac{2 \times 10^{-10} K^2 \ell}{9.8 \times (kVA)^{0.62}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

付録 E コイルの周波数特性と分担率

ターン / コイルの周波数特性を得た方法と全く同様に、巻線の 1 コイルについても周波数特性を求めることができる。E-1 図はその一例であって、ターン電圧の場合と異なり比較的低い 100KHz 程度の点に第一の共振点がある。

電動機巻線にサージが進入した場合、コイルの接続点で連続反射があるために、1 相分の巻線および 1 コイルの実効的な長さを L_p , L_c とし、進行波の速度を g とすると、比較的低周波の領域における 1 コイルの分担率 ξ_c および基本振動周波数 f_ℓ は次のようにあらわされる。

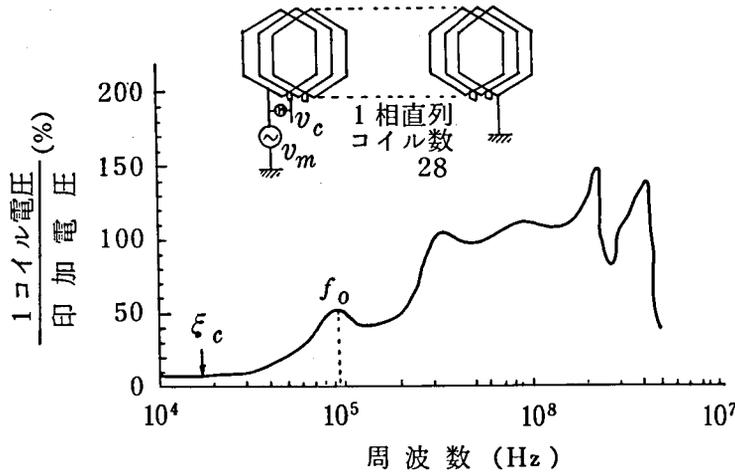
$$\xi_c = L_c / L_p \quad (E-1)$$

$$f_\ell = g / 2L_p \quad (E-2)$$

(E-1) 式および (E-2) 式から 1 コイルをサージが通過するに要する時間 t_0 は

$$t_0 = L_c / g = \xi_c / 2f_\ell \quad (E-3)$$

となる。E-1 図の例では $\xi_c = 0.07$, $f_\ell = 95\text{KHz}$ であるから (E-3) 式から $t_0 = 0.37 \mu\text{s}$ となる。



E-1 図 1 コイル / 相分担電圧の周波数特性