

ヒューズフリー遮断器の消弧装置効果

Arc Shut Effect of Fuse Free Breaker

伊 藤 隆 清* 飯 島 栄 一*
Takakiyo Itô Eiichi Iijima

内 容 梗 概

ヒューズフリー遮断器(配線用遮断器)の消弧装置はU字形消弧磁性板を12枚ほど、間隔を置いて積み重ねた簡単な構造ではあるが、遮断アーク現象が複雑なために、その効果を定量的に判定することはむずかしい。

本稿では、まず、遮断時のアーク電圧が、上昇することを Cassie 氏のアーク模型を用いて説明した後、アーク電圧上昇を直線と放物線に近似し、遮断現象を回路理論的に考察した。さらに、小電流において消弧装置効果の優劣比較方法を確立して、その結果の妥当性を大電流試験で確認したことについて述べた。

1. 緒 言

ヒューズフリー遮断器(配線用遮断器)の消弧方式は、接点開離にともない、12枚程度のU字形消弧磁性板の積み重ねからなる消弧装置により、アークを磁気吸引してわん曲させ、アーク抵抗を増大せしめると同時に、その細げきを利用して、冷却、消イオンすることによるものである。

U字形磁性板を用いた、この簡単な消弧装置は古くから知られているものではあるが⁽¹⁾、ヒューズフリー遮断器において、遮断性能を左右するキー・ポイントの一つである。

消弧装置の効果については、遮断アーク現象が複雑なため、定量的判定はむずかしく、実際の機器に組み込んで、限界遮断試験結果から検証している例が多い⁽¹⁾。したがって、定量的判定はともかくとして、比較的小電流で消弧装置効果の優劣比較が可能であれば、試験設備も小規模でよく、機種改良に役だつことが多い。

本稿では、接点開離とともに、アーク電圧が上昇することを Cassie 氏のアーク模型から考察した後、アーク電圧上昇を直線と放物線に近似し、気中アーク遮断現象を回路理論的に考察した。さらに、その考察結果をもとにして、小電流において、消弧装置効果の優劣比較方法を確立し、その結果の妥当性を大電流試験で確認したので、ここに報告する。

2. アーク電圧上昇の考察

ヒューズフリー遮断器の遮断機構は次の二つの作用が重なり合っている。

- (1) 可動接点の開離とともに、アーク長は引き伸ばされる。
- (2) U字形消弧磁性板はアーク電流の作る磁界によって、磁化され、アークを磁気吸引して、弓形にわん曲させると同時に、U字形消弧磁性板の板間細げきにアークを押し込み、冷却、消イオンさせて、アーク抵抗を増加させる。

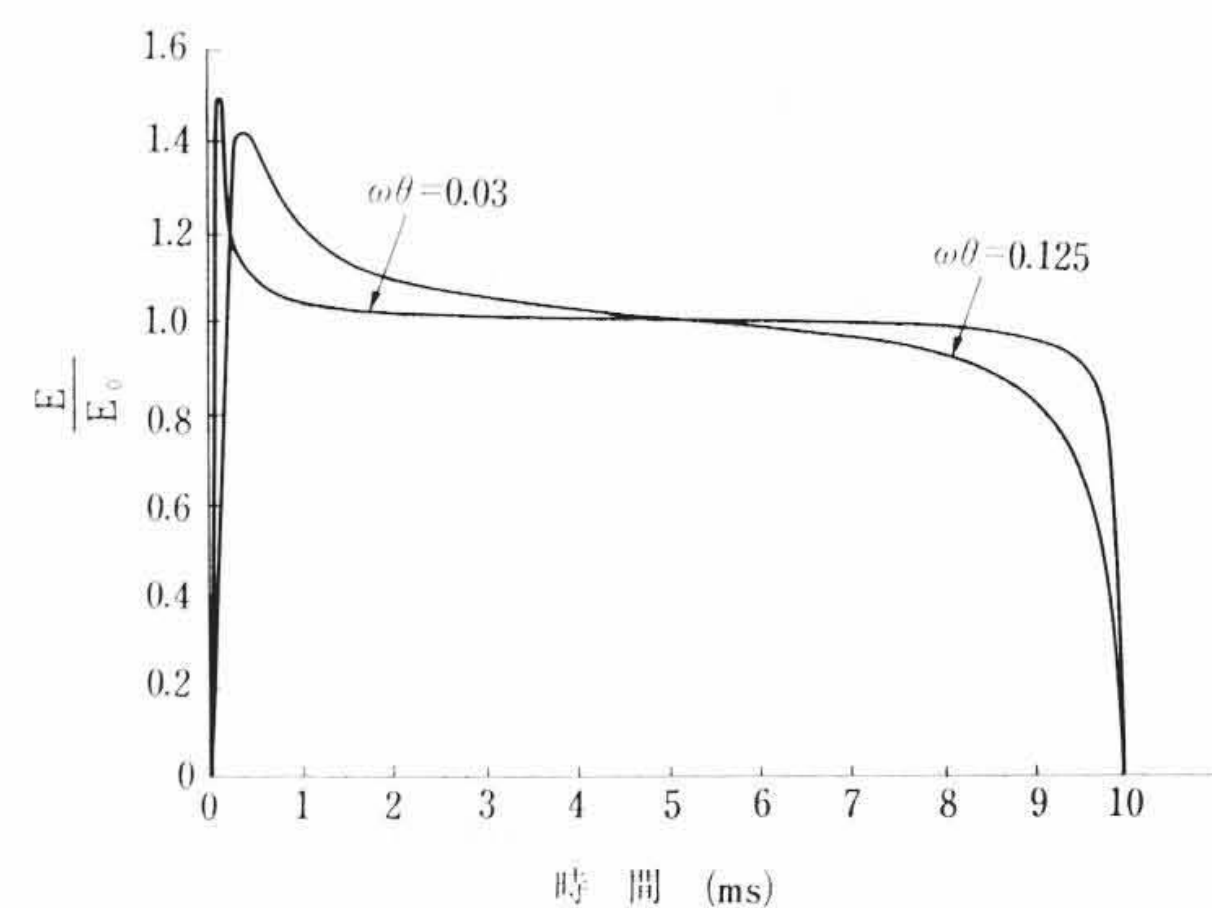
以上のように、遮断機構はすべて過渡的に行なわれるものであり、上記二つの作用によってアーク電圧は上昇する。

一方、定常状態において安定に点弧している交流アーク電圧は、電流零値の過渡期を除いて、ほぼ平坦なアーク電圧特性を持つ。すなわち、よく知られている Cassie 氏⁽²⁾⁽³⁾のアーク模型を用いて、アーク電圧波形を示す式を導くと次のようになる。Cassie 氏のアーク模型は

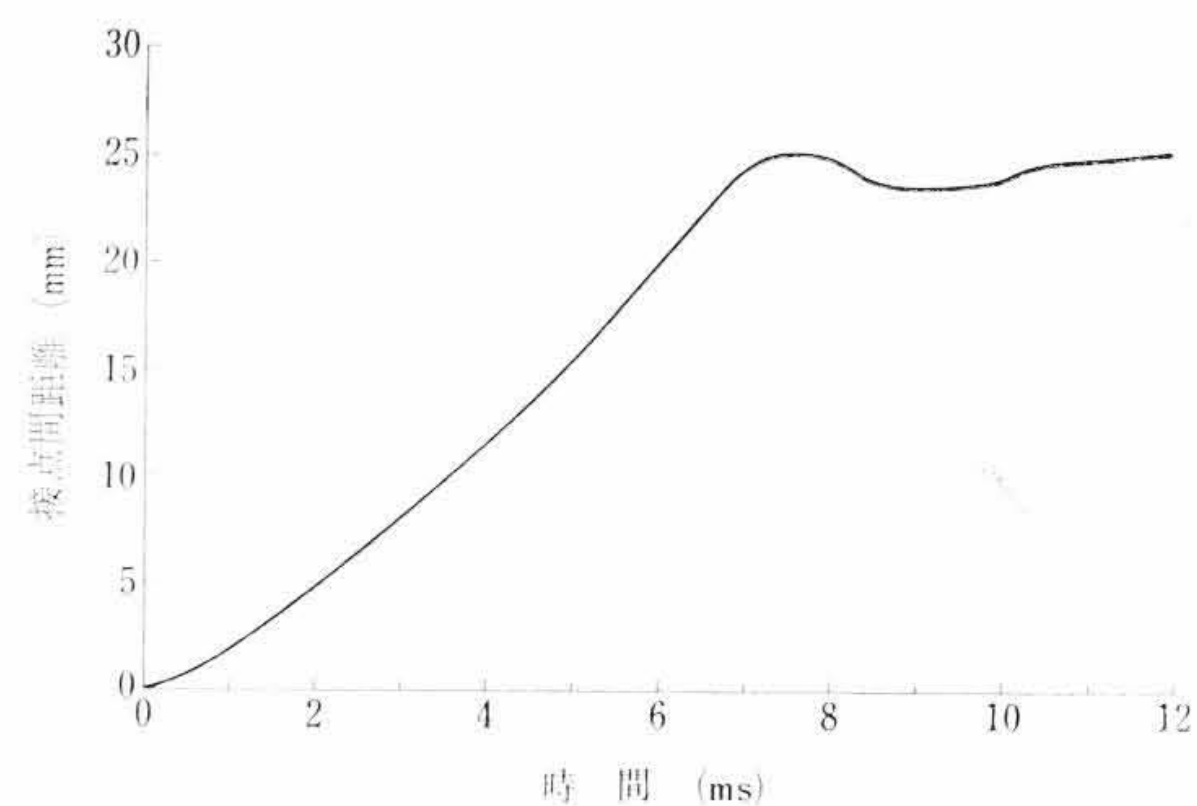
$$R \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{E^2/\mu - \lambda}{C} \quad (1)$$

ここに、 R はアーク抵抗瞬時値、 E はアーク電位の傾き、 μ は一定な固有抵抗、 λ は一定な単位体積当たりの電力損、 c は一定な単

* 日立製作所亀戸工場



第1図 Cassie 氏のアーク模型による定常交流アーク電圧波形



第2図 接点開離特性 (A 形 100A 定格)

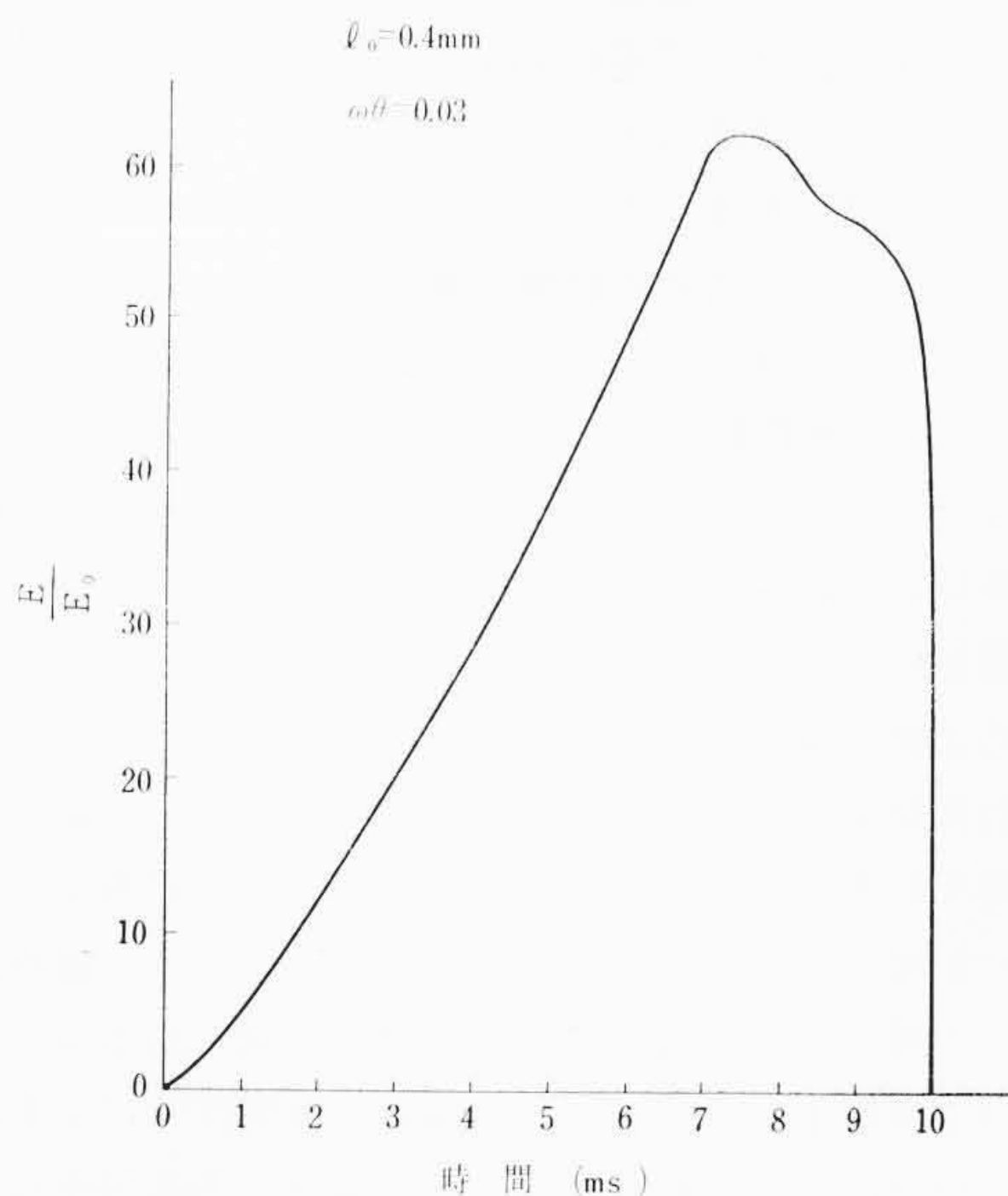
位体積当たりのエネルギー量である。いま、電流を $i(t) = I_1 \sin \omega t$ として(1)式と組み合わせ、 R に関する解を求めた後、その解に含まれる指数関数で減衰する過渡項を零としたとき、アークが動的安定状態であると考え、さらにそれを電圧の形で表わすと

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\sqrt{2} \sin \omega t}{\sqrt{1 - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{\sqrt{1 + (\omega\theta)^2}}}} \quad (2)$$

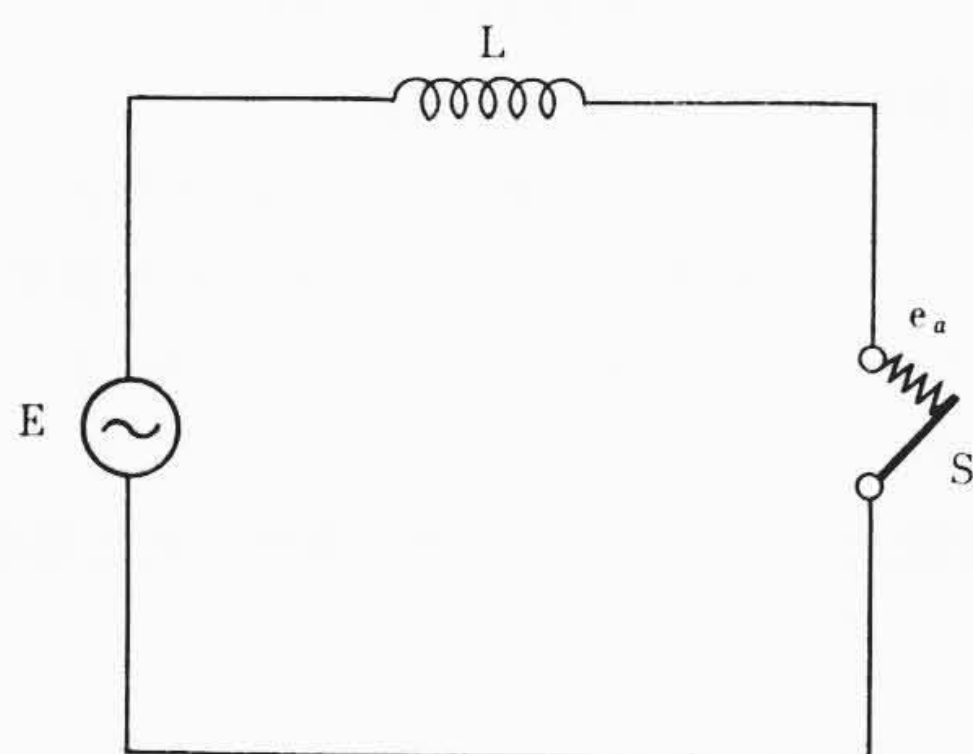
ただし、 $\varphi = \cot^{-1}(\omega\theta)$, $\theta = c/\lambda$, $E_0 = \sqrt{\mu\lambda}$

得られた(2)式はアークの動的安定状態における半サイクル間のアーク電圧波形を示すものである。 $\omega\theta$ をパラメータにして、 $\omega\theta = 0.03, 0.125$ の値について数値計算して示すと、第1図のようになる。実際に得られる定常交流アーク電圧のオシログラムとよく似ている。そこで、この定常交流アーク電圧波形をもとにして、次のように遮断アーク電圧波形を考察した。

A形 100A 定格ヒューズフリー遮断器の接点開離特性は第2図のようになる。接点開離中のアークはすべて過渡状態にあるが、いま、かりに、接点開離後 0.4 mm の間げきを、前述の定常状態のアーク電圧波形を維持できる最小間げき l_0 と仮定する(l_0 についての理論



第3図 接点開離特性で定常アーク電圧波形を引き伸ばした波形



第4図 インダクタンス回路

的根拠はない)。そして、開離距離 l 対 l_0 の比 (l/l_0) で、Cassie 氏の定常状態のアーク電圧を引き伸ばしてみると第3図のようになる⁽⁴⁾。すなわち、第3図より接点の開離が進むにつれて、アーク電圧が上昇する様子をアーク模型を通して納得することができる。

3. アーク電圧上昇と回路の理論的考察

3.1 インダクタンス回路

本節では、まずアーク電圧上昇を直線上昇と仮定して、それが瞬時回復電圧およびアークエネルギーへ、どのように影響するかについて考察する。

3.1.1 アーク電圧上昇と瞬時回復電圧

第4図に示すインダクタンス回路で電流が遮断される状態を考える⁽⁵⁾。電流零値通過と同時に接点が開離すると考え、電源電圧を $e = E_m \cos \omega t$ とすると、アークが発生した後の回路方程式は

$$e = E_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + e_a \quad (3)$$

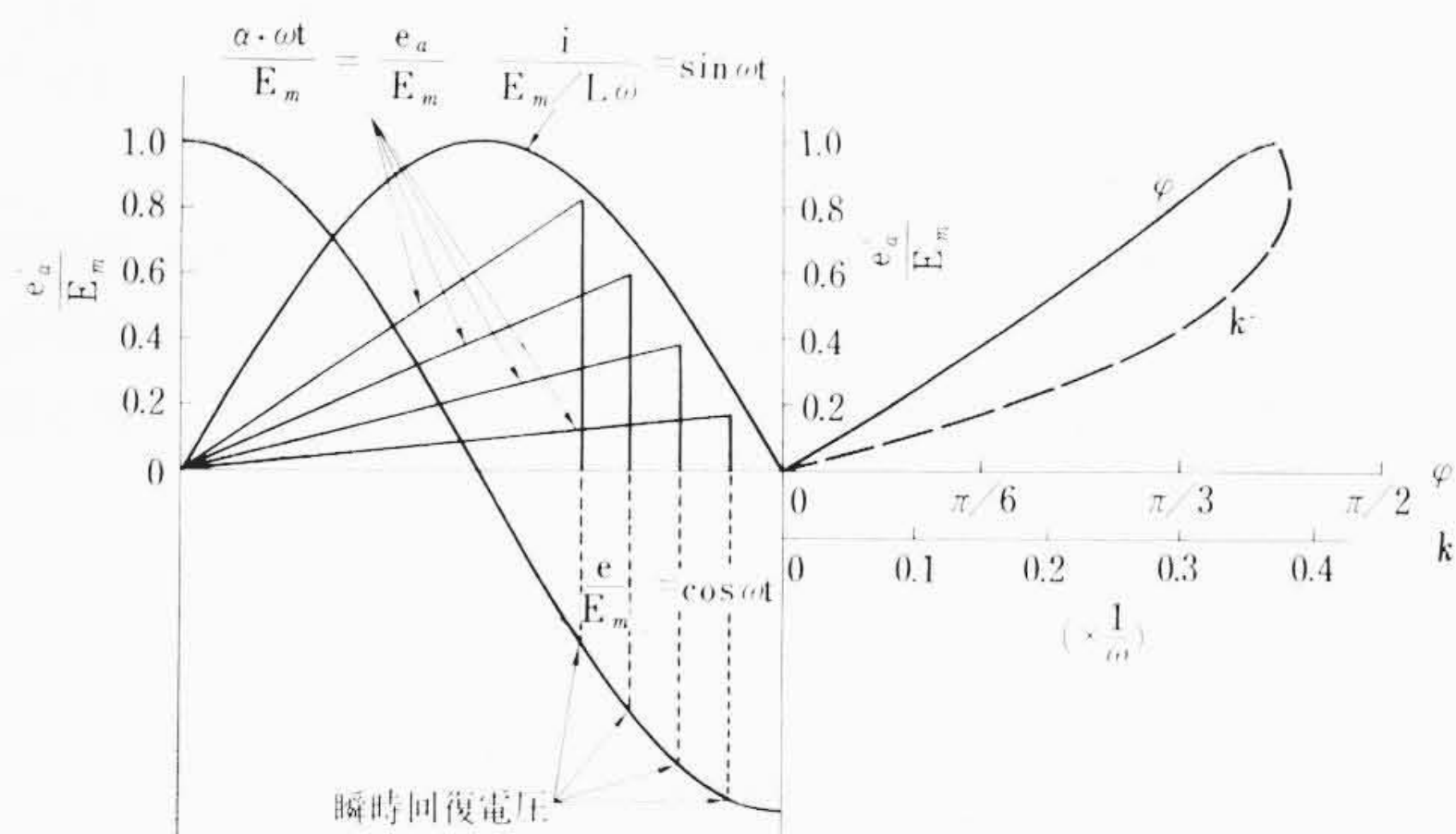
(3)式より

$$i = \frac{E_m}{L\omega} \sin \omega t - \frac{E_m}{L\omega} \int_0^{\omega t} \frac{e_a}{E_m} d(\omega t) \quad (4)$$

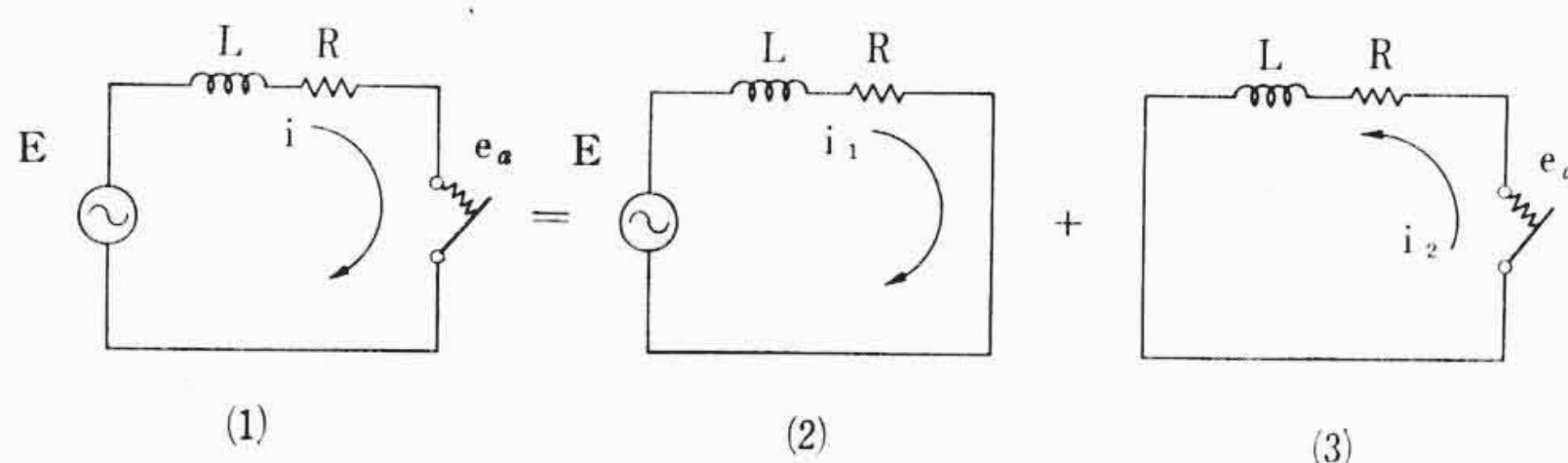
ここで、アーク電圧を $e_a = \alpha \cdot \omega t$ (α : 定数) として、(4)式を解くと

$$i = \frac{E_m}{L\omega} \sin \omega t - \frac{E_m}{L\omega} \times \frac{\alpha \cdot \omega t}{E_m} \times \frac{1}{2} \omega t \quad (5)$$

いま、アーク電圧の上昇によって、遮断電流が限流され、その自然零点より、実際の遮断点が進んだ角を φ (以下、本稿ではこれ



第5図 アーク電圧上昇と瞬時回復電圧およびアークエネルギーの関係



第6図 L-R 直列回路

をズレ角と呼ぶことにする)として、(5)式に $\pi - \varphi$ を代入し、 $i=0$ と置くと

$$\sin(\pi - \varphi) = \frac{\alpha \times (\pi - \varphi)}{E_m} \times \frac{1}{2} \times (\pi - \varphi) \quad (6)$$

ここで、 $\alpha \times (\pi - \varphi)$ は、遮断瞬時のアーク電圧であるから、これを e_a' とする。すなわち、(6)式に φ を与えて、 e_a'/E_m を求め、図に表わすと第5図のようになる。この図より、アーク電圧の上昇が大になれば、瞬時回復電圧が低下し、遮断点への電圧過酷さは小さくなることがわかる。

3.1.2 アーク電圧上昇とアークエネルギー

任意の e_a'/E_m に対するアークエネルギーの大きさ k は

$$k = \int_0^{t_a} \frac{e_a}{E_m} \times \frac{i}{E_m/L\omega} dt \quad (7)$$

ここに、 t_a : アーク時間

前述と同様、 $e_a = \alpha \cdot \omega t$ とし、(5)式を代入して解くと

$$\frac{k}{1/\omega} = \frac{\alpha \times \omega t_a}{E_m} \left(\frac{\sin \omega t_a}{\omega t_a} - \cos \omega t_a \right) - \frac{1}{8} \left(\frac{\alpha \times \omega t_a}{E_m} \right)^2 \times (\omega t_a)^2 \quad (8)$$

ここに、 $\alpha \times \omega t_a$ は遮断瞬時のアーク電圧であるから、 e_a' とする。任意の e_a'/E_m に対するアーク時間 t_a を代入して、数値計算すると、第5図の右側のカーブ k が得られる。すなわち、アーク電圧の上昇が大になれば、アークエネルギーも増大し、 $e_a'/E_m \approx 0.82$ で最大になることがわかる。

3.2 L-R 直列回路

本節ではアーク電圧上昇を直線と放物線の二つに仮定して、回路力率および瞬時回復電圧の関係を考察する。遮断時のアーク電圧を直線および放物線あるいは平坦形に近似した回路理論的考察は古くからなされ、文献も多いが^{(4)~(6)}、そのなかで V. Zajic⁽⁷⁾ 氏が説明した重畳の理にもとづく解析方法が最も簡単で、L, R回路についても考察しやすいので、本節ではこの方法を用いた。

3.2.1 解析方法

第6図(1)に示すL-R直列回路において、アーク電圧を e_a とし、それを直線と放物線に仮定して、それぞれ次式とする。

直線上昇と仮定したアーク電圧: $e_a = E_b \cdot t \dots\dots (9)$

放物線上昇と仮定したアーク電圧: $e_a = E_c \cdot t^2 \dots\dots (10)$

ここに, E_b, E_c : 定 数

いま第6図(1)の回路を同図(2), (3)の二つの回路に分離できると仮定する。(2)と(3)を流れる回路電流 i_1, i_2 は逆向きの電流と考え, (1)の回路電流は $i_1 + i_2$ になると考える。第6図(2), (3)の回路方程式はそれぞれ

$$E = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} \dots\dots (11)$$

$$e_a = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} \dots\dots (12)$$

となり

$$i = i_1 + i_2 \dots\dots (13)$$

である。回路電圧を

$$E = E_m \sin (\omega t + \varphi) \dots\dots (14)$$

とすれば, (11), (14) 式より

$$i_1 = I_m \cdot \sin \omega t \dots\dots (15)$$

ただし, 直流分はないものとする。

アーク電圧が直線上昇の場合は(9)と(12)式から解を求め

$$i_2 = \frac{I_m \cdot E_b \cdot \tan \varphi}{E_m \cdot \omega \cdot \cos \varphi} \times \left[\frac{t}{T} - (1 - e^{-t/T}) \right] \dots\dots (16)$$

ここに, E_m : 回路電圧最大値

I_m : 回路電流最大値

ω : 角 周 波 数

t : 時 間

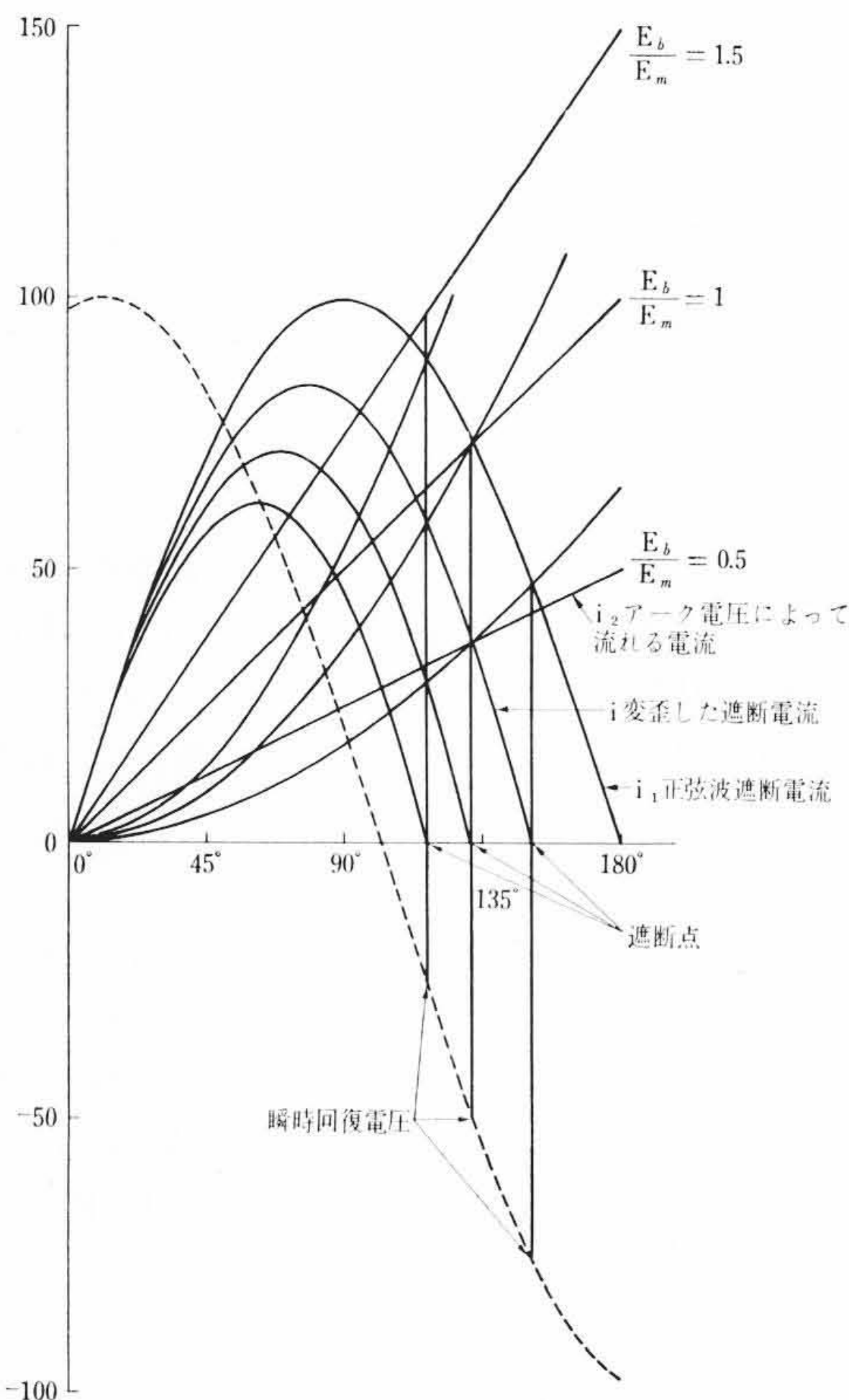
$$\frac{E_m}{I_m} = Z, \quad \frac{R}{Z} = \cos \varphi, \quad T = \frac{L}{R}$$

とする。

アーク電圧が放物線上昇の場合は(10)と(12)式から解を求め

$$i_2 = \frac{I_m \cdot E_c \cdot 2 \cdot \tan^2 \varphi}{E_m \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi} \times \left[1 - \frac{t}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} \right)^2 - e^{-t/T} \right] \dots\dots (17)$$

ここに, 記号は(16)式にしたがう。



第7図 アーク電圧が $E_b \cdot t$ で増大するとき ($\cos \varphi = 0.2$)

以上の結果から, 正弦波電流のある点で接点が開離し, アークが発生した場合には, 任意の $\cos \varphi$ に対し(16)と(17)式から i_2 を計算して, 正弦波電流 i_1 からその差を求め, アーク発生後, 限流された実際の遮断電流を得ることができる。

3.2.2 $\cos \varphi = 0.2$ と 0.8 の計算結果

前項より, $f = 50 \text{ c/s}$, アーク電圧上昇傾斜を $E_b/E_m, E_c/E_m$ (E_b, E_c は接点开離 10 ms 後のアーク電圧値)の比で表わし, その値 0.5, 1, 1.5 の三つについて計算した結果を第7図~第10図に示す。また, 回路力率およびアーク電圧上昇によって, 変化した瞬時回復電圧の値, ズレ角, 限流された遮断電流の最大値などを表にすると第1表のようになる。

以上の計算結果から回路力率およびアーク電圧上昇傾斜の大小は瞬時回復電圧の大小を誘起して, 再発弧に大きな影響を与えることが数値的に理解される。したがって, ヒューズフリー遮断器の消弧装置はアーク電圧をより高めて遮断させる方式であるから, そのアーク電圧の上昇波形およびズレ角, 瞬時回復電圧などを実際のオシログラムから求めて, 比較すれば, 消弧装置の消弧効果優劣比較が可能であると考える。

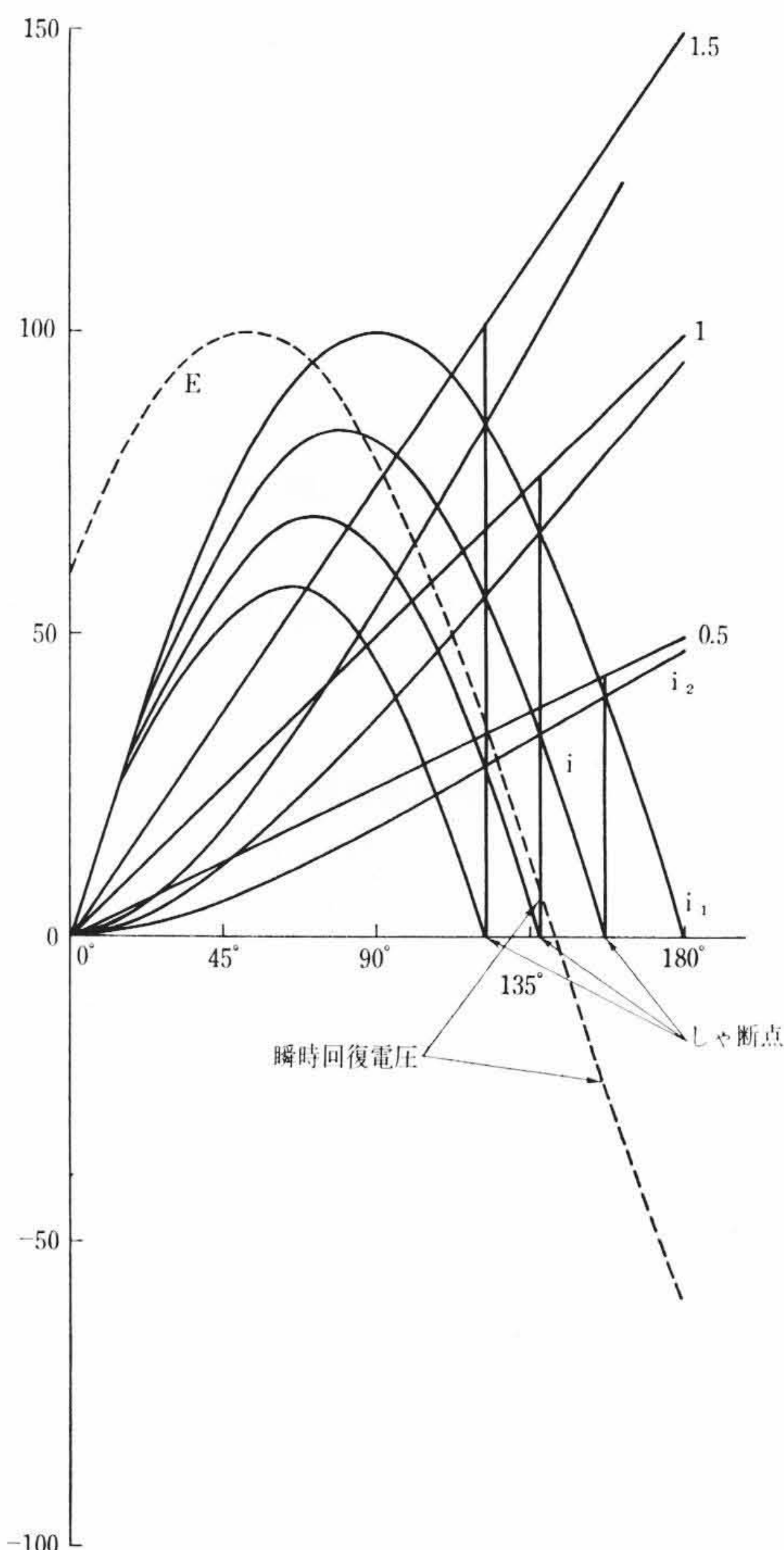
4. 実験結果と検討

4.1 小電流試験オシログラムの検討

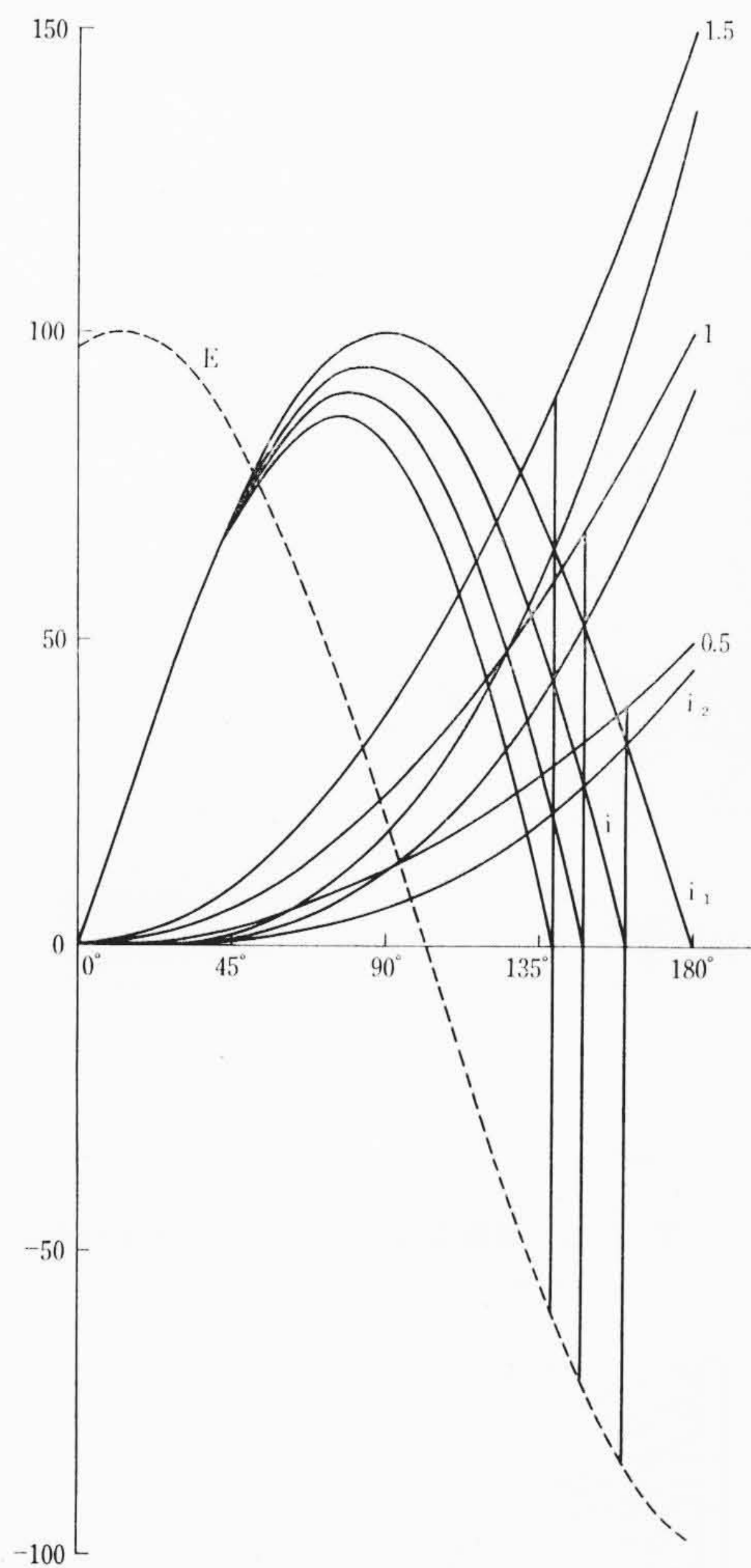
ヒューズフリー遮断器で消弧装置の強弱によりアーク電圧の上昇傾斜が変化しやすい遮断条件は, 遮断電流 300 A 程度のむしろ小電流である。そこで, 遮断電流 300 A 程度の二つのオシログラムについて, 計算結果との比較を述べる。

4.1.1 遮断電流の半サイクル以内で遮断された場合

第11図に小電流試験のオシログラムを示した。試験電圧 377



第8図 アーク電圧が $E_b \cdot t$ で増大するとき ($\cos \varphi = 0.8$)

第9図 アーク電圧が $E_c \cdot t^2$ で増大するとき ($\cos \varphi = 0.2$)第1表 回路力率およびアーク電圧上昇傾斜によって変化した
瞬時回復電圧, ズレ角, 限流された遮断電流の最高値(1) アーク電圧が $E_0 t$ で増大するとき

$\cos \varphi$	E_0/E_m	瞬時回復電圧	ズレ角 (度)	限流された遮断電流の最大値	アークなしで遮断したと仮定した瞬時回復電圧
0.2	0.5	-86	27.9	84	-97
	1.0	-50	48.6	71	
	1.5	-25	64.8	62	
0.8	0.5	-24	21.6	84	-60
	1.0	+7 (アーク電圧と同極性)	42.3	69	
	1.5	+35 (アーク電圧と同極性)	57.6	58	

(2) アーク電圧が $E_c t^2$ で増大するとき

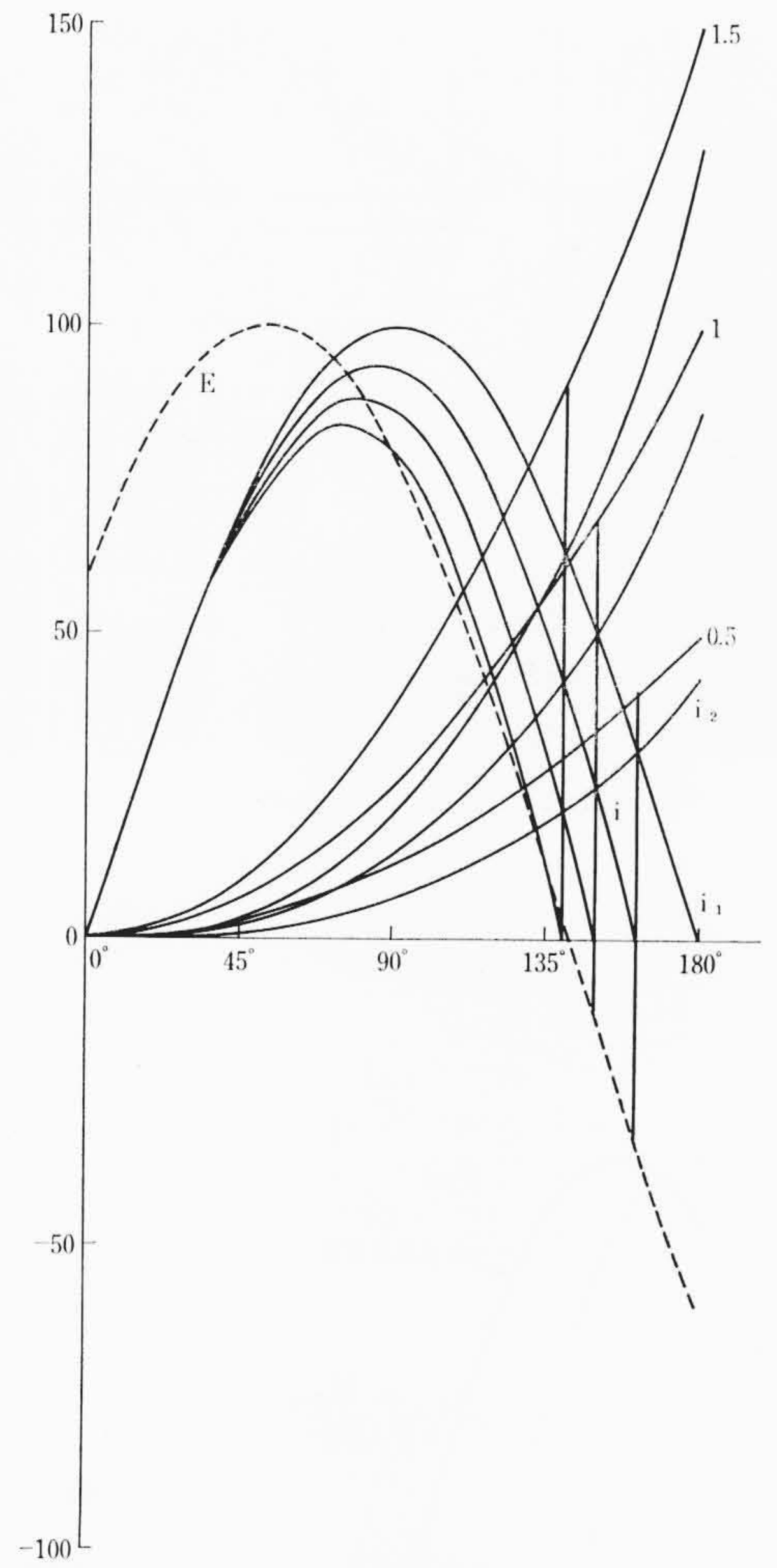
$\cos \varphi$	E_c/E_m	瞬時回復電圧	ズレ角 (度)	限流された遮断電流の最大値	アークなしで遮断したと仮定した瞬時回復電圧
0.2	0.5	-84	19.8	94	-97
	1.0	-71	32.4	90	
	1.5	-59	43.2	86	
0.8	0.5	-33	19.0	93.5	-60
	1.5	-12	30.6	88	
	1.5	+3 (アーク電圧と同極性)	39.6	84	

備考 各値は第7図～第10図の目盛で示した。

第2表 計算結果とオシログラムの比較

	瞬時回復電圧	ズレ角 (度)	限流された遮断電流の最大値
計算結果	-25	17	95
オシログラム	-18	18	92

備考 電圧, 電流の最大値を100として表わしている。

第10図 アーク電圧が $E_c \cdot t^2$ で増大するとき ($\cos \varphi = 0.8$)

V, 50 c/s, 遮断電流 320 A, 力率 0.85 である。

第11図(a)のオシログラムから下記の条件を得た。

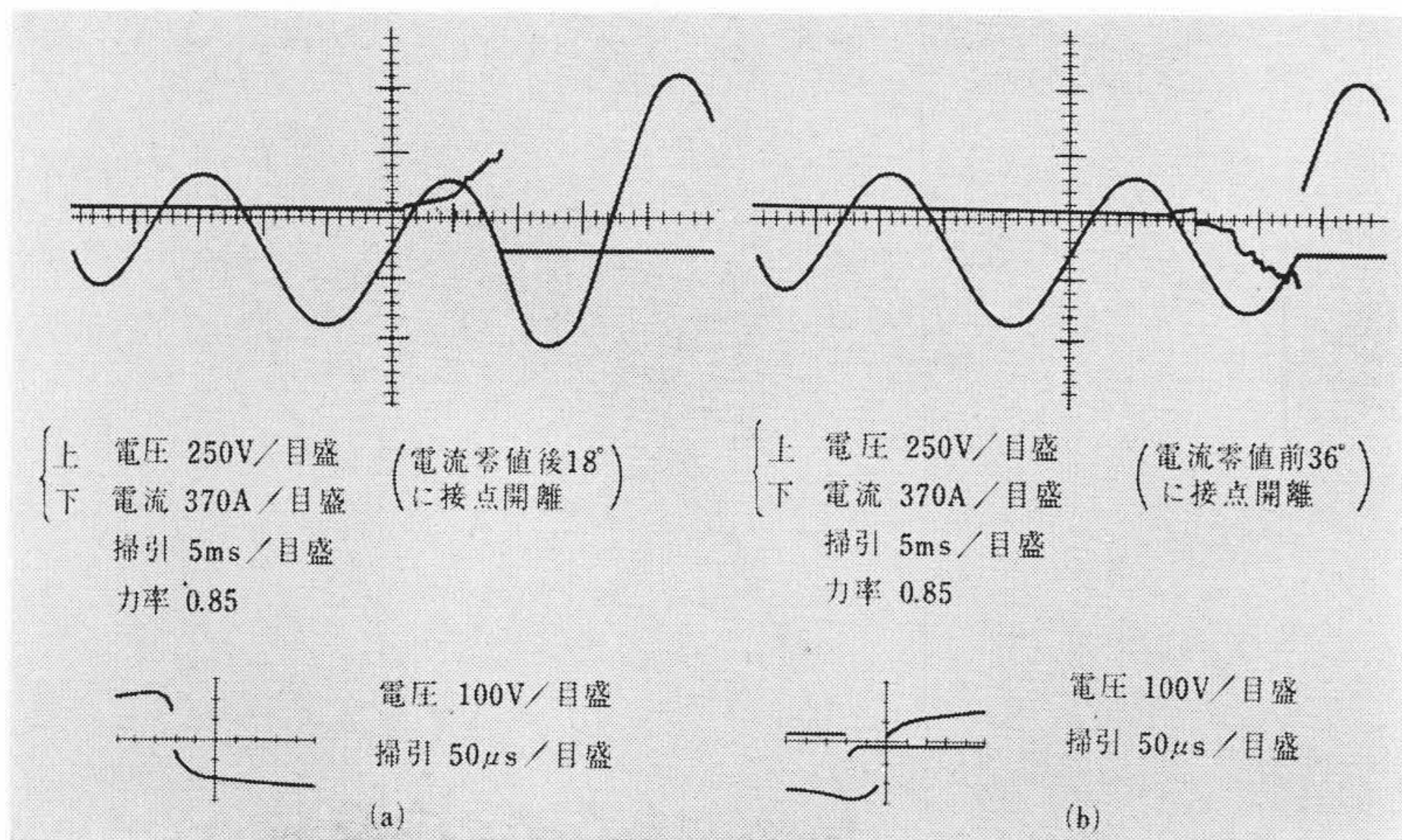
- (1) 接点开離位置は電流零値通過後 18°
- (2) アーク電圧上昇曲線を放物線と仮定し, オシログラムから $\frac{E_c}{E_m} = 0.6$

計算結果第12図とオシログラムを比較すると第2表のように, ほぼ, 同程度の値になることがわかる。

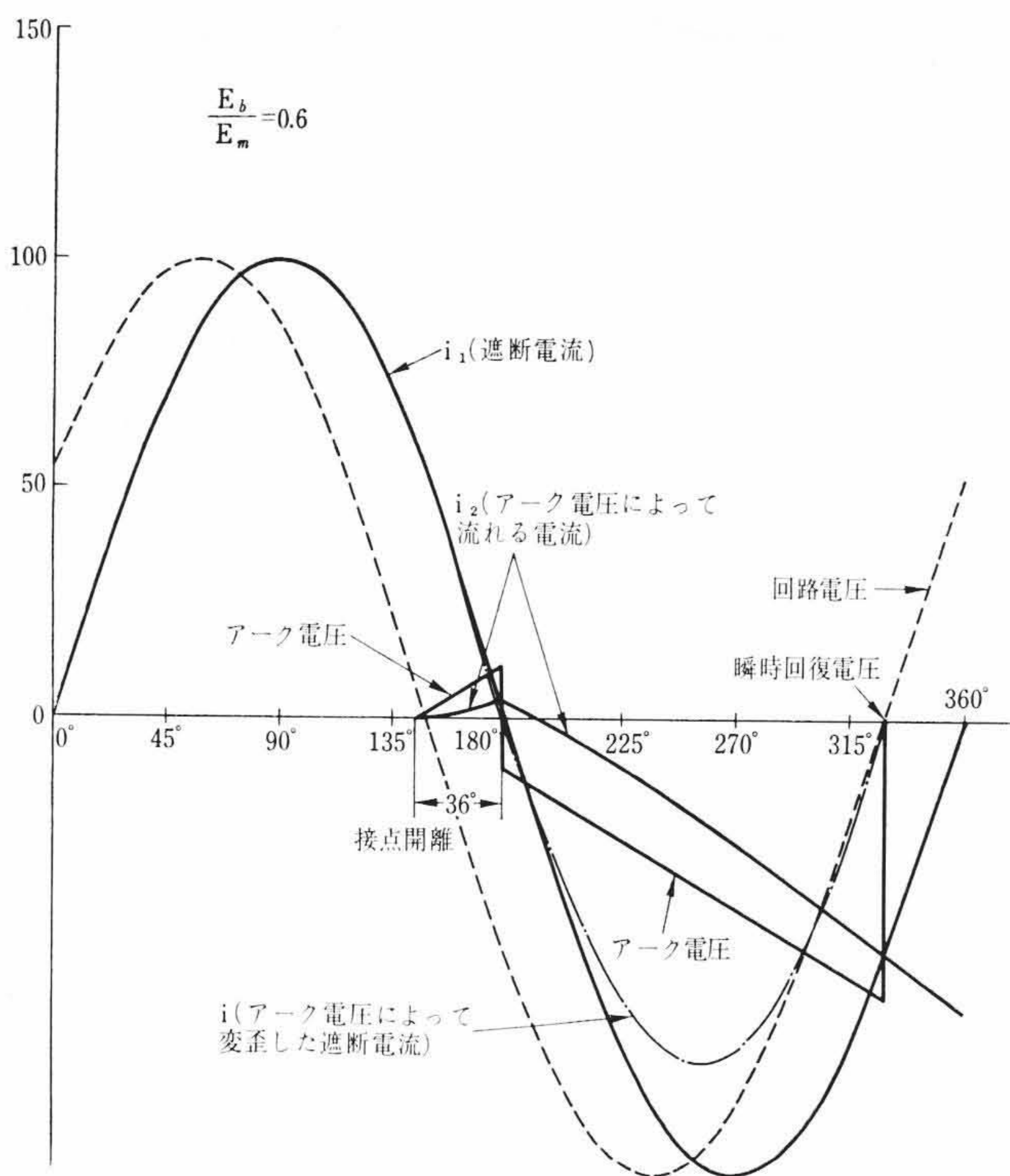
4.1.2 遮断電流波形の前の半サイクルで接点が開離し, 続弧して次の半サイクルで遮断された場合

前の半サイクルで接点が開離し, 続弧して次の半サイクルで遮断される場合の解析例として, E. W. Boehen⁽⁶⁾, S. Gerszonowicz 氏⁽⁵⁾などのものが見られるが, いずれも, アーク電圧を一定にした平坦なアーク電圧の場合に限っており, 接点开離から直線的に上昇するアーク電圧は取り扱っていない。また, S. Domonkos 氏⁽⁴⁾は直線的に上昇するアーク電圧を検討しているが, インダクタンスのみの回路で行なっている。本項では, これらの文献を参考に L-R 直列回路で次のように検討を試みた。

- (1) 接点开離位置は電流零値前約 36°
- (2) アーク電圧上昇を直線と仮定し, オシログラムからアーク電圧上昇傾斜 E_b/E_m を前の半サイクルでも, 後の半サイクルでも同じ 0.6 とする (実際には, 前の半サイクルにおけるアーク電圧上昇傾斜は $E_b/E_m = 0.6$ より小さい)。
- (3) アーク電圧反転時において, 反転前と反転後の値を等しいと仮定する。



第11図 小電流試験時オシログラムの例



第13図 遮断電流波形の前の半サイクルで接点が開離し、続弧して次の半サイクルで遮断された場合の計算

第3表 計算結果とオシログラムの比較

	瞬時回復電圧の値	ズレ角(度)	後の半サイクルでの限流された遮断電流の最大値
計算結果	+1.0	30.6	75
オシログラム	+1.9	32.4	79

備考 電圧、電流の最大値を100として表わしている。

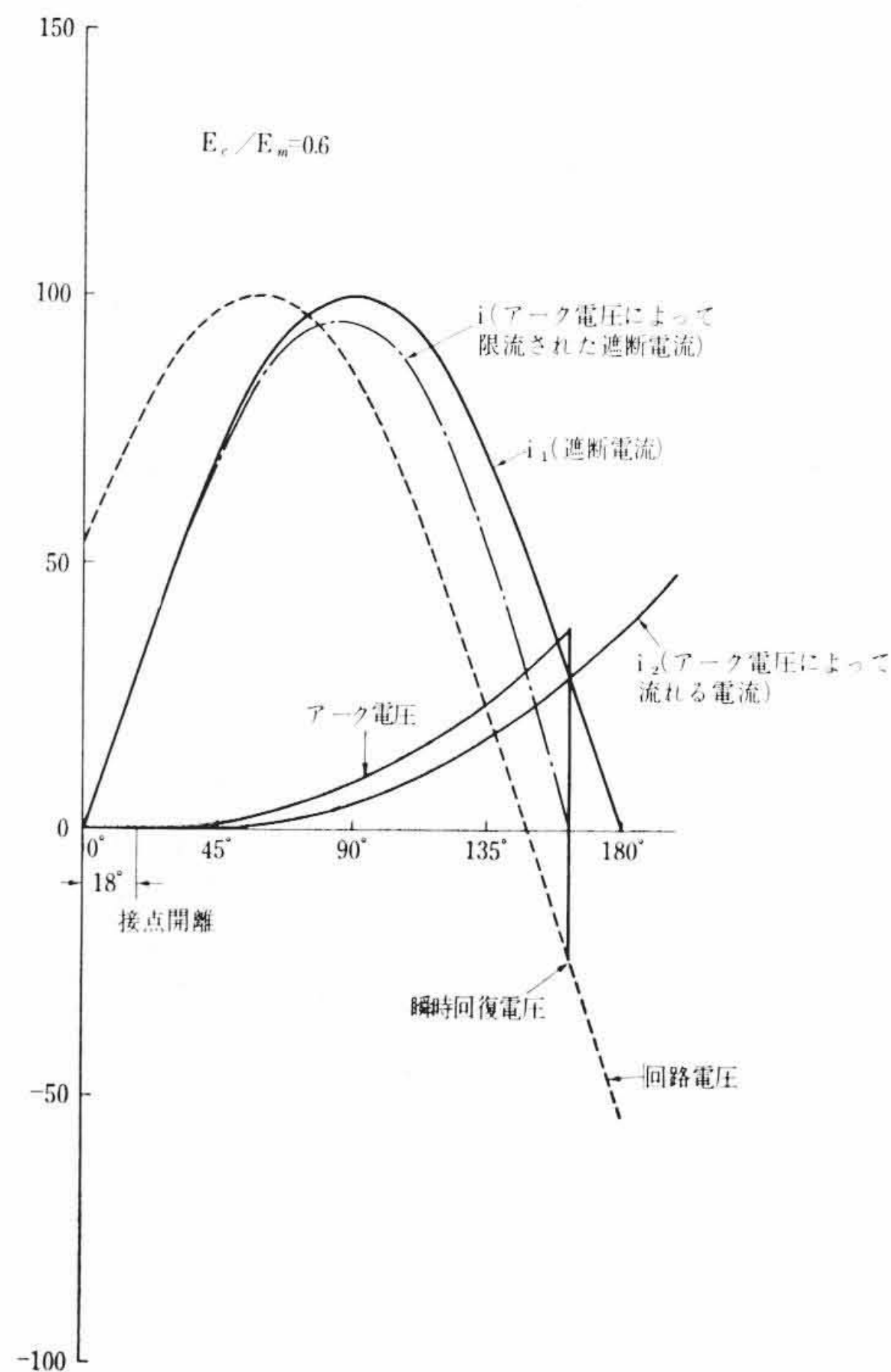
計算結果第13図とオシログラムを比較すると第3表のようにかなりよく一致することがわかる。

4.2 消弧装置効果の優劣比較

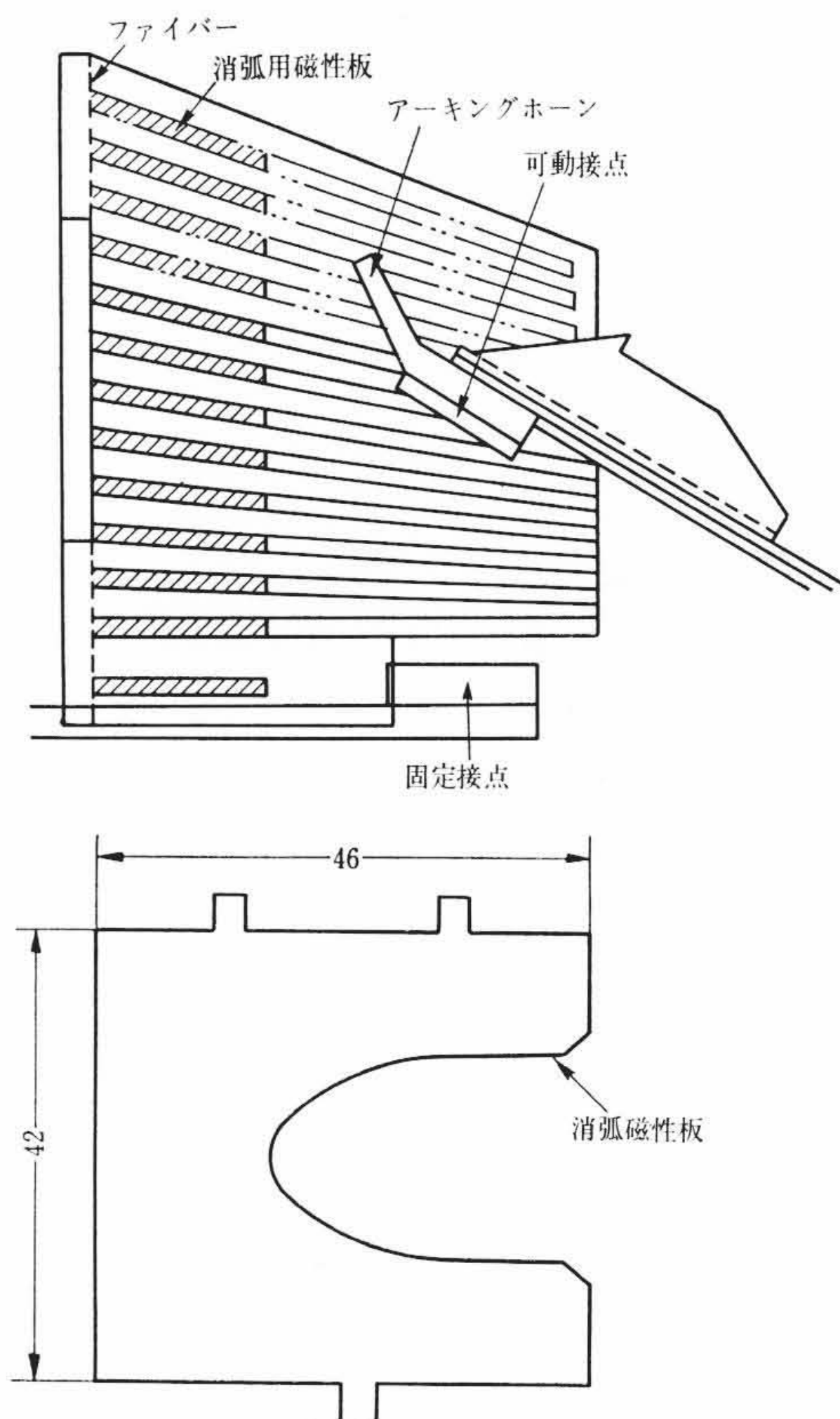
試験したA形100A定格ヒューズフリー遮断器の消弧装置および接点との位置関係の一例を第14図に示す。

4.2.1 小電流試験の結果

試験条件は電圧390V、50c/s、電流316A、力率0.8、単相試験とし、アーク電圧の上昇波形とズレ角、瞬時回復電圧から優劣比較を行なった。その結果を第4表に示す。すなわち、アーク電圧



第12図 遮断電流波形の半サイクル以内に遮断された場合の計算



第14図 消弧装置の一例

をより早く上昇させるためには、接点にできるだけ消弧装置を接近させて配置すべきこと、また、対数的配置、枚数を14枚にしたもの、磁性板の幅を30%減じたものは、すべて消弧効果に大差のないことがわかる。なお、当然なことではあるが、消弧板の枚数を減らした場合は消弧効果が低下する。

4.2.2 大電流試験の結果

電圧220V、60c/s、電流約12,000A、力率0.2という試験条件

第4表 小電流試験による消弧装置効果の
優劣比較結果(A形100A 定格用)

消弧装置の種類	優劣比較結果
(1) 磁性板 12 枚	優
(2) (1)を接点より遠ざけた	良
(3) (1)を対数的配置にした(下部密)	優
(4) (1)の磁性板の幅を 30% 減じた	優
(5) 磁性板 14 枚	優
(6) (1)の上部 4 枚の磁性板を除いた	良
(7) (1)の下部 4 枚の磁性板を除いた	可

で単相遮断試験をした結果は第5表に示すとおりである。これから大電流試験の場合も小電流試験と同じ結果であることが確認された。消弧磁性板の上部4枚を除いたものは接点およびその周辺の絶縁物の損傷がほかのものより激しく、消弧効果が低下していたことを示している。

5. 結 言

本稿で得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 接点開離とともに、アーク電圧が上昇する理由をアーク模型を用いて説明した。
- (2) 遮断アーク電圧の上昇傾斜を直線および放物線で近似し、回路を理論的に解析して、アーク電圧上昇により瞬時回復電圧が低下すること、ズレ角(アーク電圧上昇のため、遮断点で、電流自然零点より進んだ角)が大になること、アークエネルギーが増大すること、および回路力率の影響を数值的に明らかにした。
- (3) さらに、上記結果を消弧装置効果の優劣比較に利用できることを説明し、試験方法を確立した。
- (4) 小電流遮断試験時のオシログラムと上記解析法に基づく計

第5表 消弧装置の大電流試験結果
試験条件 電圧 220V, 電流 12,000A, 60 c/s, 力率 0.2
供試遮断器 A形 100A 定格

消弧装置の種類	接点材質	試験番号	遮断電流 (Ap)	遮断瞬時のアーク電圧(V)	アーク時間 (ms)
(3) 対数的配置	Ag-W (可動) (40) (60)	1	17,200	164	6.2
(5) 14 枚	対 Ag-WC (60) (40)	1	18,500	151	7.7
(4) 幅 30% 減	対 Ag-WC (60) (40)	1	16,800	176	5.8
(4) 幅 30% 減	Ag-WC (可動) (60) (40) 対 Ag-WC (60) (40)	1	17,500	211	10.0
		2	18,500	164	5.3
(6) 上部 4 枚除き	Ag-WC (60) (40)	1	18,400	240	11.7
		2	18,300	213	12.5

算結果を比較し、ほぼ、一致することを確認した。

- (5) 小電流遮断試験結果が大電流遮断試験結果とかなりよく符合することを実験的に確かめた。

終わりにのぞみ、本研究に終始ご指導を賜わっている東工大中野義映博士に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) W. K. Roots: T. A. I. E. E., 81, p. 200 (1962)
- (2) H. Trencham: Circuit Breaking, London, Butterworthe Scientific Publication, p. 54~75 (1953)
- (3) T. E. Browne: T. A. I. E. E., 67, p. 141 (1948)
- (4) S. Domonkos: Periodica Polytech Elec. Eng., 6, p. 125 (1962)
- (5) S. Gerszonowicz: High Voltage A. C Circuit Breakers (a book), p. 55 (1953)
- (6) E. W. Boehne: T. A. I. E. E., 60, p. 524 (1941)
- (7) V. Zajic: High Voltage Circuit Breakers (a book), p. 207 (1957)



特 許 の 紹 介



特許 第426229号

一 海 俊 景

潜 弧 溶 接 用 溶 接 剤

従来の潜弧溶接用溶接剤には、原料をまず溶融するかまたは焼結するかした後、所定の粒度に粉碎して使用する溶融式または焼結式溶接剤などがあるが、この種のものは原料を溶融または焼結させるために、製作に当たり多くの工程を必要とし原価高となる。また鉄合金や金属粉末を含有する溶接剤を作る場合には、高温で処理するため製作過程でその一部または全部が酸化するので、このような場合にはさらに多くの処理工程が必要となる欠点がある。

この発明はこれらの欠点を除去したもので、珪灰石 30~80% とジルコン砂 15~40% とを主原料とし、螢石 5~15%, 炭酸カルシウム 5~15%, 酸化マンガンまたは珪酸マンガン 3~15%, 鎮静剤 3~15% を含有せしめ、必要に応じて加里長石、酸化チタン、氷晶

石などの粉末状原料および合金化学成分を配合し、珪酸ソーダまたは珪酸カリあるいはこれらを混合したものを用いて混練し、水分を除去し得る程度の低温度で乾燥固着し、しかる後粉碎して粒度を整えるか、あるいは水分を少なくして混練したものを粒状化して乾燥し粒度を整えた潜弧溶接用溶接剤である。

この溶接剤によれば、低温度で処理するため鉄合金あるいは金属粉末をそのままの状態に添加することができて容易に溶着金属に入り、脱酸の働きが強く、作業性は向上し、溶着金属部の機械的性質は優秀でしかも溶接時に亀裂の発生は認められず、たとえばステンレス鋼に適用して耐食性、耐熱性ともにすぐれた溶接部を得ることができる。

(武居)