限流ヒューズ用動作シミュレーション 手法の開発と実証

正員 岡崎 正 幸 (電中研)

正員 稲葉 次 紀 (電中研)

1. ま え が き

限流ヒューズは、その原理上遮断時に動作過電圧を発生する。この動作過電圧が他の機器にどのような影響を与えるか十分検討することが必要である。

限流ヒューズの動作過電圧は使用するヒューズ形式、事故形態ならびに回路条件などにより異なる。しかし、これらの組合せをすべて実規模試験で検討することは困難なため、コンピュータにより動作状況をシミュレートすることができれば、遮断現象の解明を効果的に進めることが可能となる。

そこで、ノッチ付ヒューズエレメントを用いた限流ヒューズの発弧後のアーク電圧をアークエネルギーと時間の関数で表した、電圧成分と抵抗成分を用いて解析するシミュレーション手法⁽¹⁾を開発し、20 kV 級限流ヒューズを用いた遮断実験により、その有効性を確認した。

2. シミュレーション手法

(2.1) 基本的考え方 図1の回路において、スイッチ S_m , S_i を閉路しておき、通電開始スイッチ S_w を閉路すれば、供試ヒューズに I_f が流れる。電流 I_f のジュール積分が供試ヒューズの溶断ジュール積分を超えれば、ヒューズエレメントは溶断する。この溶断をスイッチ S_m を閉路することにより模擬する。それ以降、アーク電圧の電圧成分 V_{ar} と抵抗成分 R_a で表される特性要素が回路に挿入され、ヒューズの端子電圧 V_f と電流 I_f を回路方程式に適用し、逐次計算を行う。電流 I_f が減少し、零になった時点でヒューズ

が遮断完了したと判断し、スイッチ S_i を開路する。それ以降は再起電圧調整用キャパシタ C_p のインピーダンス Z_{cp} が電源リアクトルのインピーダンス Z_{Ls} より大幅に大きいため、ヒューズ端子には電源電圧 V_s がそのまま印加される。

(2.2) ヒューズエレメントの形状と溶断過程

検討に用いたヒューズエレメント形状を図2に、寸法を表1に示す。同図に示すノッチ付ヒューズエレメントのノッチ部と平たん部(ノッチのない部分)の溶断ジュール積分は異なる。このため、ヒューズエレ

ヒューズ等価回路

V_s : 電源電圧 (V_{rms}) R_p : 再起電圧調整用抵抗 (Ω)
 S_w : 通電開始スイッチ C_p : 再起電圧調整用キャパシタ (F)
 L_s : 電源リアクトル (H) S_i : 遮断模擬スイッチ
 R_s : 電源抵抗 (Ω) S_m : 溶断模擬スイッチ
 I_f : ヒューズ電流 (A) V_{ar} : アークの電圧成分 (V)
 V_f : ヒューズ端子電圧 (V) R_a : アークの抵抗成分 (Ω)
 (注) R_p および C_p は実験時に接続した。

図1 基本回路

Fig. 1. Basic circuit of simulation.

図2 ヒューズエレメント形状

Fig. 2. Form of a fusible element.

Development of a Operating Simulation Method for Current Limiting Fuses and its Actual Proof. By Masayuki Okazaki, Member & Tsuginori Inaba, Member (Yokosuka Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry).

岡崎正幸: 正員, 電力中央研究所 横須賀研究所
 稲葉次紀: 正員, 電力中央研究所 横須賀研究所

表 1 ヒューズエレメント寸法
Table 1. Dimensions of fusible elements.

ヒューズ 種 類	エレメント直径 (mm)	ノッチ部厚さ (mm)	ノッチ部の幅 (mm)	ノッチ間隔 (mm)	ノッチ部個数	エレメント全長 (mm)	エレメント 並列本数
A	0.16	0.11	0.5	3.18	約 790	2,500	1
B	0.23	0.11	0.5	3.18	630	2,000	3
C	0.23	0.11	0.5	3.18	630	2,000	3
D	0.37	0.08	0.5	3.18	590	1,870	8
E	0.45	0.08	0.5	3.18	420	1,330	8
F	0.55	0.08	0.5	3.18	510	1,617	4
G	0.55	0.16	0.5	3.18	330	1,040	4

図 3 ヒューズモデルの分割状況

Fig. 3. Divided condition of fuse model.

ントに電流を流せば、ジュール熱により、初めにノッチ部が、次いで平たん部が溶断する。しかしノッチ部が溶断発弧すれば、その両側の平たん部はアークの電極となるため、平たん部は自分自身のジュール熱に加えてアークにより直接加熱され溶融・発弧する⁽²⁾⁽⁸⁾。

〈2・3〉 ヒューズエレメントの分割 ノッチ部および平たん部における溶断ジュール積分値のばらつきおよび平たん部のアークによる溶融を考慮するためヒューズエレメントを多数の区画に分割し(図3参照)、その最小単位ごとに溶断時間およびアーク電圧を計算した。

供試したヒューズエレメントのノッチ部の実際の数
は300以上(表1参照)である。また平たん部のアークによる溶融は連続的なため、正確に模擬するのに必要な分割数は無限大となる。ノッチ部数および平たん部分割数を多くすることは実際に近くなり、詳細なシ

ミュレーションが可能となるが、他方、計算時間の増大となる。このため、試計算⁽¹⁾からヒューズリンク1本のヒューズエレメント本数を並列数によらず1本とし、そのヒューズエレメントのノッチ部および平たん部をそれぞれ10箇所とし、平たん部は更に各々を10分割した。この最小単位(ノッチ部10、平たん部100)はそれぞれスイッチ S_m 、電圧成分 V_{ar} 、抵抗成分 R_a (抵抗成分 R_a をアーク周辺部の抵抗成分 R_{os} 、アーク中心部の抵抗成分 R_{ac} の二つに分解した。〈2・5〉節2項参照)で構成し、スイッチ S_m を開いてからの時間ならびに、その部分のアークエネルギーにより各値を計算する。

〈2・4〉 溶断ジュール積分 溶断ジュール積分は溶断時間が短い場合には、ほぼ一定値であると報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾されているが、ここでは詳細に模擬するため、ノッチ部で発生した熱が主に平たん部および消弧砂に放熱す

ると考え、溶断時間 t (s) が、 $t=0\sim 5$ ms の範囲において次式で表されるものとした。

$$(I^2t)_m = (I^2t)_{m_0} \times (1 + K_{m_1} \times t^{k_{m_1}}) \dots\dots (1)$$

ここに、 $(I^2t)_m$: 溶断ジュール積分 (A^2s),
 $(I^2t)_{m_0}$: 基準となる溶断ジュール積分 (A^2s),
 K_{m_1} : 溶断ジュール積分の係数, K_{m_2} : 溶断ジュール積分の指数

またノッチ部および平坦部とも、分割した最小単位の基準となる溶断ジュール積分 $(I^2t)_{m_0}$ は、製作上の裕度を考慮するため同一値とせず、 $\pm 10\%$ のばらつき幅で正規分布を模擬した。

〈2.5〉 アーク電圧 ヒューズエレメント溶断後のアーク電圧 (ヒューズの端子電圧 V_f) は、基本的に次式で表した。

$$V_f = V_{ar} + I_f \cdot R_a \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_{ar} : アーク電圧の電圧成分 (V),
 R_a : アーク電圧の抵抗成分 (Ω)

アーク電圧を電圧成分と抵抗成分 (抵抗降下電圧) の直列回路で構成する試みに関しては既に報告^{(1)~(4)}がある。本論文も基本的には同様であるが、アークエネルギーと時間と関数として表すことを試みた。

(1) アークの電圧成分 ヒューズ筒内のアークの物理的状況は、不明な点が多いものの次のように概念的に推定する。ヒューズエレメント溶断直後のアークの状況は自由空間における通常のアークと異なり、充てんしてある消弧砂のすきまにアークが発生する。このため、アークの断面積は小さく単位長さあたりの電圧 (電界) はかなり高いと考えられる。時間が経過し、アークにより消弧砂の熔融・気化が進めば、すきまが広がり、アークの断面積も大きくなりアークの電界は低下すると考えられる。また、アークエネルギーにより温度が上昇すれば、アークの導電率が上昇し、アークの電界は低下する。更に、消弧砂の気化による圧力上昇によってアークの電界は上昇する。

このように、アークの電界は複雑な要因により変化するが、ここではアークエネルギーにより減少するとし、アークの電圧成分 V_{ar} は次式に従うものとした。

$$V_{ar(n)} = V_{aro} \times [\exp\{-W_a(n)/\omega_{ar}\} + \exp\{-W_a(n)/(0.1 \times \omega_{ar})\}] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $V_{ar(n)}$: n 番目の最小単位におけるアークの電圧成分 (V), V_{aro} : アークの電圧成分一定値 (V), $W_a(n)$: n 番目の最小単位におけるアークエネルギー (J), ω_{ar} : アークの電圧成分減少指数 (J)

上式の第2項は消弧砂に含まれる砂のうち、特に直径の小さい砂を考慮したものである。熔融気化する消弧砂の体積がアークエネルギーに比例するものとするれば、直径の小さい消弧砂ほど早く消滅する。直径が約 $1/2$ (体積 $1/10$) の消弧砂が混入していると考え、 ω_{ar} を標準的な砂の場合の $1/10$ とした。この項は W_a の小さいときのみ V_{ar} に関与する。

またノッチ部のみ溶断し、平坦部が未溶断の間は、電極降下電圧 V_L (正極+負極) をノッチ部の電圧成分に加算した。

(2) アークの抵抗成分 アークの抵抗成分 R_a も最小単位についてそれぞれ計算する。アークの断面を考えるとアークの中心部と周辺部では、その温度、消弧砂とのかかわりも異なるため、ここでは周辺部の抵抗成分と中心部の抵抗成分を区分し、それらを並列させて全体の抵抗とした。

アークと消弧砂との関係を次のように推定する。ヒューズエレメントが溶断し発生したアークは、時間の経過に従いアーク半径が大きくなる。アークの周辺部ではアーク半径が大きくなるに従い、アークの周辺長が増大するため、熔融・冷却に費やすエネルギーが周辺長に比例するものとするれば、見掛け上、アーク周辺部の抵抗成分は時間と共に増大する。

またアークの中心部では、アークにより消弧砂の表面が熔融し直径が減少する。このため、アークを冷却する表面積が減少しアーク抵抗は低下する。

(i) アーク周辺部の抵抗成分 $R_{as(n)}$ は次式に従うとした。

$$R_{as(n)} = K_{R_{as}} \times t_{a(n)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $R_{as(n)}$: n 番目の最小単位におけるアーク周辺の抵抗成分 (Ω), $K_{R_{as}}$: アーク周辺の抵抗成分増加速度 (Ω/s), $t_{a(n)}$: n 番目の最小単位の溶断後の時間 (s)

(ii) また、アーク中心部の抵抗成分 $R_{ac(n)}$ は、次式に従うとした。

$$R_{ac(n)} = R_{aco} \times [\exp\{-W_{a(n)}/\omega_{ac}\} + \exp\{-W_{a(n)}/(0.1 \times \omega_{ac})\}] \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $R_{ac(n)}$: n 番目の最小単位におけるアーク中心部の抵抗成分 (Ω), R_{aco} : アーク中心部の抵抗成分一定値 (Ω), ω_{ac} : アーク中心部の抵抗成分減少指数 (J)

(5)式の第2項はアークの電圧成分と同様に、直径の小さい消弧砂の影響を加味したものである。

(3) ノッチ部のアークによる平坦部の熔融 ノッチ部が溶断発弧したのち、そのノッチ部に隣接

表 2 シミュレーション動作定数
Table 2. Constant values for simulation.

ヒューズ 種類	個 所	溶断ジュール積分			平たん部 溶融係数	電極降下 電圧 ΣV_l	アーク電圧成分		アーク周 辺部抵抗 R_{as}	アーク中心部抵抗	
		$(I^2t)m_0$	K_{m1}	K_{m2}			V_{aro}	ω_{ar}		R_{aco}	ω_{ac}
		A_s^2	—	—			V	J		Ω	J
A	ノッチ部	17	5.4	0.32	1.0	12×10^3	350	2.6×10^4	12×10^3	5.2	2.4×10^4
	平たん部	70	0	0			28.2×10^3	2.6×10^4	960×10^3	416	2.4×10^4
B	ノッチ部	400	21	0.55	0.4	10×10^3	2.9×10^3	9×10^4	80×10^3	10	1.1×10^5
	平たん部	680	34	0.9			14.7×10^3	9×10^4	400×10^3	50	1.1×10^5
C	ノッチ部	500	4.8	0.48	0.4	10×10^3	2.2×10^3	2.5×10^5	30×10^3	11.5	8.8×10^4
	平たん部	800	0	0			11.0×10^3	2.5×10^5	150×10^3	57.5	8.8×10^4
D	ノッチ部	14×10^3	8.6×10^6	3.24	2.0	9×10^3	2.7×10^3	1.8×10^6	28×10^3	3	7×10^4
	平たん部	43×10^3	0	0			13.2×10^3	1.8×10^6	140×10^3	15	7×10^4
E	ノッチ部	20×10^3	2.1×10^6	2.52	2.0	7×10^3	1.6×10^3	1.8×10^6	7×10^3	2.4	5.6×10^4
	平たん部	94×10^3	0	0			8.1×10^3	1.8×10^6	35×10^3	12	5.6×10^4
F	ノッチ部	5.5×10^3	6.5×10^6	2.55	1.5	8×10^3	2×10^3	1.4×10^6	21×10^3	7	5.4×10^4
	平たん部	53×10^3	0	0			9×10^3	1.4×10^6	105×10^3	35	5.4×10^4
G	ノッチ部	26×10^3	3.1×10^4	2.6	1.0	5×10^3	1.6×10^3	1.8×10^6	9×10^3	2.2	4.2×10^4
	平たん部	53×10^3	0	0			7.8×10^3	1.8×10^6	45×10^3	11	4.2×10^4

(注) 各定数は、最小単位一つ分の値でなくヒューズ1本分の値である。

表 3 実試験値とシミュレーションの比較
Table 3. Comparison of test results and simulation values.

ヒューズ 種類	試験 種別	回路条件			限流値			動作過電圧			アークエネルギー			動作時間		
		電源 電圧	固有電 流	投入位 相角	実試験	シミュ レーシ ョン	シミュ レーシ ョン 実試験	実試験	シミュ レーシ ョン	シミュ レーシ ョン 実試験	実試験	シミュ レーシ ョン	シミュ レーシ ョン 実試験	実試験	シミュ レーシ ョン	シミュ レーシ ョン 実試験
		kV	kA	deg	kA	kA	—	kV	kV	—	kJ	kJ	—	ms	ms	—
A	小電流	20.9	0.55	46	0.32	0.31	0.97	65.6	67.4	1.03	17.8	16.9	0.95	6.05	6.02	1.00
	大電流	20.9	16	67	0.81	0.95	1.17	62.5	66.1	1.06	5.1	4.2	0.82	3.15	0.34	0.11
B	小電流	20.9	0.94	13	0.92	0.90	0.98	65.4	63.4	0.97	89.1	88.6	0.99	9.80	9.69	0.99
	大電流	20.9	16	72	2.12	2.08	0.98	70.7	71.8	1.02	36.6	36.3	0.99	4.25	4.32	1.02
C	小電流	20.9	0.94	12	0.91	0.90	0.99	54.0	52.4	0.97	95.9	95.0	0.99	9.97	9.65	0.97
	大電流	20.9	16	65	2.19	2.18	0.99	62.0	58.0	0.94	59.5	58.6	0.98	5.16	4.97	0.96
D	小電流	31.3	2	33	3.65	3.49	0.96	76.3	76.8	1.01	500	496	0.99	10.3	9.93	0.96
	大電流	31.3	10	52	5.96	5.75	0.96	91.2	91.1	1.00	606	579	0.96	6.71	6.76	1.00
E	小電流	20.9	2	5	4.25	4.27	1.00	54.2	51.8	0.96	409	424	1.04	12.1	11.8	0.98
	大電流	20.9	10	45	6.69	6.48	0.97	62.0	58.0	0.94	476	455	0.96	7.50	7.10	0.95
F	小電流	31.3	3	0	3.14	3.15	1.00	85.4	87.8	1.03	473	471	1.00	10.5	10.5	1.00
	大電流	31.3	10	59	4.24	4.40	1.04	91.2	90.4	0.99	318	333	1.05	6.38	6.15	0.96
G	小電流	20.9	3	6	4.62	4.64	1.00	55.8	53.9	0.97	471	494	1.05	11.5	11.1	0.97
	大電流	20.9	10	49	6.82	6.98	1.02	58.6	60.8	1.04	507	507	1.00	7.6	7.2	0.95
B	半電圧	10.5	16	11	2.09	2.07	0.99	45.4	52.6	1.16	9.4	7.7	0.82	0.56	0.52	0.93
F	2本直列	24	3	4	4.55	4.55	1.00	109.4	99.9	0.91	441	449	1.02	9.5	8.8	0.93

る平たん部では溶断後の電流時間積分により、平たん部の最小単位が溶融・発弧するが、この値は通電開始からのジュール積分により変化する。ここでは、計算を簡略化するため溶断後の電流時間積分のみを考慮し、最小単位1個が溶融する電流時間積分値を平たん部溶融係数 A_{sm} (A・s/個) とした。

3. シミュレーション結果

シミュレーションに使用した動作特性定数を表2に、計算結果と実験結果の比較を表3に示す。

〈3・1〉 最大値の比較 限流値、動作過電圧、アークエネルギーおよび動作時間の各シミュレーション

図 4 最大アークエネルギー領域における実測波形とシミュレーション波形 (ヒューズ B)

Fig. 4. Comparison of wave-forms of simulation and test result inside the zone of maximum arc energy (type B fuse).

図 5 並列 CR を含む実測波形とシミュレーション波形

Fig. 5. Comparison of simulated results with/without a parallel CR circuit and an actual test result.

図 6 36 kV ヒューズの実測波形とシミュレーション波形 (ヒューズ G)

Fig. 6. Comparison of wave-forms of simulation and test result for a 36 kV fuse link (type G fuse).

値は、ヒューズ A の大電流、ヒューズ B の半電圧およびヒューズ F の 2 本直列動作時 (〈3・3〉節参照) を除けば、実験と比べて +5 ~ 6 % の範囲にあり、実用上十分な精度で良く合っている。ヒューズ A の大電流、ヒューズ B の半電圧およびヒューズ F の 2 本直列動作時については別項で検討する。

〈3・2〉 波形の比較 図 4 にヒューズ B の固有電流が 0.94 kA (小電流域: 最大アークエネルギー領域) における全体波形を示す。図 5 に同種ヒューズの固有電流が 16 kA (大電流域) における通電開始から 1 ms までの波形を示す。更に、図 6 に定格電圧が 36 kV のヒューズ G の波形を示す。

いずれの波形においてもシミュレーション結果と実測値とは良く合っている。図 5 において、ノッチ付エレメントヒューズのノッチ部と平坦部が 2 段階に発弧し、電圧の立上り部が 2 段階になっている状況も、良くシミュレートされていることがわかる。

〈3・3〉 電源電圧 1/2 の場合とヒューズ 2 本直列動作の場合 図 7 に電源電圧が 1/2 の場合 (半電圧) の動作波形を示す。

半電圧の実験における電流波形には、電源電圧を規格値とした実験時に見られる尾を引くような部分がなく、動作時間も 0.56 ms と短い。シミュレーションの結果も同様となり、電源電圧を 1/2 とした場合でも本

図 7 電源電圧を 1/2 とした場合の実測波形とシミュレーション波形 (ヒューズ B)

Fig. 7. Comparison of wave-forms of simulation and test result under the half source voltage (type B fuse).

シミュレーション手法を適用できることがわかった。また、ヒューズ 2 本を直列にした場合でもシミュレーション結果は半電圧の場合と同じく実測値とほぼ一致した。

以上二つの特殊条件では、実測値に対するシミュレーション結果の相対誤差は +16% ~ -9% の範囲にあり、多少精度は低下したものの特性解析を行ううえでは十分使用できる範囲にあると考えられる。

〈3.4〉 再起電圧周波数調整用抵抗およびキャパシタの影響 図 5、図 7 において実験の遮断直後における電流波形の変わりと図 7 における遮断直後の電圧振動波は、ヒューズと並列に接続した再起電圧調整用抵抗 R_p およびキャパシタ C_p (図 1 参照) の影響であり、これは次のように考えられる。遮断直後の電圧急増により、キャパシタ C_p に充電電流が流入するため、ヒューズ電流 I_f は減少する。また、遮断時のヒューズ端子間電圧と電源電圧瞬時値との差電圧により、電源リアクトル L_s とキャパシタ C_p との間に振動を生ずる。ヒューズ B の大電流および半電圧のシミュレーションではこの回路条件を考慮しており、シミュレーション波形にも実験と同様な電流波形の変わりと電圧の振動波形が見られる。図 5 には、再起電圧調整用抵抗 R_p とキャパシタ C_p のない場合のシミュレーション波形も示した。

このように、再起電圧調整用抵抗 R_p およびキャパシタ C_p を考慮することにより、より詳細なシミュレーションの可能なことがわかった。

〈3.5〉 ヒューズ A の大電流域結果について

ヒューズ A の大電流域実験においては、図 8 に示すようにエレメントの溶断状況が実験とシミュレーションとで異なり、そのため特に時間的推移に関して結果が異なると考えられる。以下にその考察を行う。

ヒューズ A の大電流域実験が、他の実験と大幅に条件が異なるのは次の点である。

図 8 ノッチ部および平たん部の溶断状況の違い (ヒューズ A)

Fig. 8. Difference of melting sequences of notch parts and flat parts (type A fuse).

(1) ヒューズ A はエレメント並列本数が 1 本であるため、各ノッチ部の溶断ジュール積分の最小値で溶断時間が定まり、各ノッチ部の溶断ジュール積分のばらつきが、そのまま溶断時間のばらつきとなる。他方、エレメント並列本数が複数本のヒューズでは、1 本のエレメントの一部が溶断すれば他のエレメントに流れる電流が増加し、他のエレメントの溶断を早める。このため、見掛け上の溶断ジュール積分のばらつき幅は小さくなる。

(2) 固有電流と定格電流の比は、このヒューズの場合が今回の実験で一番大きく溶断時間は最小 (約 0.2 ms) であり、エレメントの温度上昇は他のヒューズに比べて、より断熱状態と思われる。このため溶断ジュール積分のばらつきは、そのまま溶断時間のばらつきとなる。一方、溶断時間がこれより長い場合には、ノッチ部の局所的な温度上昇はエレメント軸方向および砂への熱伝導により緩和され、見掛け上各ノッチ部の溶断ジュール積分のばらつきも緩和されられると思われる。

以上の二点により、実験時には各ノッチ部および平たん部は、かなりの時間的ばらつきをもって溶断したと考えられる。一方、シミュレーションはばらつき幅 10% で溶断するものと設定したため、全ノッチ部および平たん部はほとんど同時に溶断し、動作過電圧の上昇率は実験より高く、またアークの電圧成分 V_{ar} が高いため電流波形の尾を引くような部分がなく遮断を完了したと考えられる。このため、このようなヒューズでは、溶断ジュール積分のばらつき幅を大きく設定することと、ノッチ部の分割数を増加させることでシミュレーション精度を更に向上させることができると思われる。

〈3.6〉 シミュレーション定数の決定について

本論文のシミュレーションに使用した定数は、実験結果およびシミュレーション結果より、カット・アン

ド・トライにより決定した。シミュレーション定数を実験を行うことなく、ヒューズエレメント寸法より決定できれば本手法の適用は拡大される。ヒューズエレメント寸法よりシミュレーション定数を決定する方法については文献(6)を参照されたい。

4. ま と め

ノッチ付ヒューズエレメントをもつ限流ヒューズの動作シミュレーション手法を開発した。本手法で考慮した特徴は以下のとおりである。

- (1) 温度上昇の相違を考慮し、ノッチ部と平たん部で異なる溶断ジュール積分を採用した。
- (2) 溶断ジュール積分を時間の関数とした。
- (3) 多数箇所のノッチ部と平たん部の溶断ジュール積分に、正規分布に基づくばらつきをもたせた。
- (4) ノッチ部が溶断すれば、その両側の平たん部はアークによっても溶融・発弧するものとした。
- (5) 溶断後のアーク電圧を電圧成分と抵抗成分(抵抗降下電圧)の直列回路で表した。
- (6) 電圧成分は一定値でなくアークエネルギーの関数とした。
- (7) 抵抗成分はアーク周辺部を想定した溶断からの時間により直線的に増加する抵抗成分とアーク中心部を想定したアークエネルギーの関数とした抵抗成分の並列合成抵抗とした。
- (8) アークの電圧成分とアーク中心部の抵抗成分に消弧砂に含まれる直径の小さい砂を考慮した係数を付加した。
- (9) ヒューズと並列に接続される配電線路の対地

静電容量を考慮した。

以上のことを考慮した結果、20 kV 級限流ヒューズ 7 種類、実験条件 16 (短絡電流: 0.6~16 kA, 印加電圧: 全電圧と半電圧, 直列数: 1 本と 2 本など) のシミュレーション結果と実験結果とは良い一致を示した。本シミュレーション手法は、このように幅広い条件に適用でき、動作過電圧だけでなく限流値、アークエネルギーなどの検討にも使用できることがわかった。

最後に本研究を実施するにあたり、関西電力(株)総合技術研究所、技術開発研究室 藤田武彦 主任研究員には貴重な御指導、御援助を賜わった。また、終始御指導願った当所尾崎勇造 所長、山田重知 副所長、深川裕正 部長ならびに実験に御協力いただいた大電流研究室各位にお礼申し上げます。

(昭和 61 年 6 月 17 日受付)

文 献

- (1) 岡崎・稲葉・藤田:「アークエネルギーとノッチを考慮した限流ヒューズの動作シミュレーション」, 電気学会開閉保護研究, SPD-84-29 (昭 59-11)
- (2) 竹谷・黒田:「富士限流形筒形ヒューズ」, 富士時報, 40, 525 (昭 42)
- (3) 沢村・久保木:「大容量半導体保護用ヒューズの開発とシャ断オシログラムのシミュレーション」, 昭 52 電気学会全大, No. 919 (昭 52)
- (4) 電気学会技術報告第 II 部:「ヒューズの溶断時間と限流ヒューズの最大アークエネルギーについて」, p. 21 (昭 44-5)
- (5) ヒューズハンドブック編集委員会: ヒューズハンドブック p. 31 (昭 55-3) (株)ラティス
- (6) 岡崎・稲葉:「限流ヒューズの動作過電圧予測手法(その1)」, 電力中央研究所報告研究報告, 684012, 21 (昭 60-6)