UDC [621.315.014.7:536.48]:621.316.91
621.315.5.011.2

論文

57-B103

極低温送電線における事故電流限流装置の提案

正員 鬼頭 幸生 (名古屋大)

正員 松村 年郎 (名古屋大)

准員 今井 康雅 (名古屋大)

1. はじめに

大規模な電力消費圏への将来の高密度電力輸送技術の一つとして極低温抵抗送電、超電導送電などの新送電方式が考慮されている。それらも含めて系統の拡充連系が強化されてくると、短絡電流が著しく増大する傾向があり、将来 80 kA またはそれ以上のレベルに達すると予想されている。このように大きな短絡電流を確実に遮断するということは、電力の供給の信頼性を高める上で非常に重要な技術である。これに対して、遮断容量の大きい電力用遮断器を開発するという方向とは別に、短絡電流を抑制限流し遮断器の責務を軽くする方式が新しい技術として考えられる。他方、極低温送電のような高度の冷却機能をもつ送電線路においては故障点の損傷をできるだけ小さくおさえるという必要も生じてくる。これに対処するために、限流機能をもつ新しい電流制御技術を開発することが本論文の目的である。

短絡事故時に急速に抵抗を系統に投入して限流効果を与えようとする方式が従来の系統についてはすでに検討されている⁽¹⁾。これは、平常時のバイパス用遮断器に並列に抵抗を接続しておき、短絡事故発生直後にこのバイパス遮断器を急速に開極して電流を抵抗に移行させ限流し、その後事故を除去するのに所要の系統内遮断器で電流を遮断しようとする方式である。この限流用抵抗が高ければ限流効果は良いが、電流を抵抗へ移すために高いアーク電圧が必要となり、これが問題点となっている。

そこで、極低温冷媒が系統に存在するということを前提とした新しいバイパススイッチ付事故電流限流装置を提案する。これは抵抗素子を常時冷却して低抵抗

に保ち、短絡電流の抵抗への移行を容易にしておき、転流後の短絡電流自体による素子の温度上昇を利用して急速に所要の高抵抗を実現しようとするものである。本論文では、いわゆる極低温抵抗送電を想定し、冷媒として液体窒素を用い、抵抗素子の温度を系統周波数の3サイクル程度で約 77 K から常温付近まで上昇させることを目標とし、この可能性を模擬実験で検討した。

以下、各種金属材料の液体窒素冷却時の抵抗率を実測した結果を示し、限流用抵抗素子として純鉄線およびタングステン線を選び、これらによる限流実験を行った。その結果、両金属は極低温を利用した事故電流限流装置の抵抗として十分使用できることが示された。更に限流過程における試料線の抵抗変化を計算で求め、実測との比較を行ない、簡単な方程式で理論的に試料線の限流作用を検討できることを示した。

また、極低温送電では線路のダンピング効果が低いとされており、本論文で提案するように、短絡事故時に急速に抵抗分を直列に挿入することは、単に短絡電流を限流遮断するだけにとどまらず、系統に発生する過渡現象に一時的にダンピング効果を与えるという意味でも好ましいと考えられる。

2. 液体窒素冷却時における金属材料の抵抗率

極低温領域における金属材料の抵抗率の変化は銅やアルミニウムなどの純金属のほかはあまり公表されていない⁽²⁾。そこで純金属 4 種、合金 6 種について、液体窒素温度 (約 77 K) における抵抗率 ρ_{77} および常温 (約 300 K) における抵抗率 ρ_{300} を実測し、結果を表 1 に示す。ここでは単純な電圧、電流法によって抵抗を求め、幾何学的寸法を加味して試料線材料の抵抗率を求めた。ここで得られた銅の実測値は公表されている数値⁽²⁾とよい一致を示したので、この測定結果は十分信頼できるものと言える。

A Cryoresistive Fault Current Limiter. By Yukio Kito, Member, Toshiro Matsumura, Member & Yasumasa Imai, Associate (Faculty of Engineering, Nagoya University).

鬼頭幸生: 正員, 名古屋大学工学部電気学科教授

松村年郎: 正員, 名古屋大学工学部電気学科助手

今井康雅: 准員, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程

表 1 各種金属線の 77 K 付近における抵抗率
(実測)

Table 1. Measured resistivities of several metals at about 77 K and the room temperature.

ρ_{77} : 約 77 K における抵抗率, ρ_{300} : 常温における抵抗率			
試料	ρ_{77} ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	ρ_{300} ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	ρ_{300}/ρ_{77}
純金属	銅	0.213	1.84
	純鉄	1.23	1.04
	タングステン	1.04	5.95
	鉛	5.30	23.2
合金	針金 (番線)	2.25	1.29
	ベリリウム銅	5.07	8.42
	マンガニン	43.4	45.7
	CRA 合金	137	14.1
	コンスタンタン	5.24	5.24
	ニクロム	110	110

表 2 極低温抵抗送電線路

Table 2. A supposed cryoresistive power transmission line.

線間電圧	275 kV
送電電力	3 GVA/ルート
回線数	3 回線
負荷電流	2 kA/回線
冷却媒体	液体窒素
運転温度	77 K (-196°C)
アルミニウム断面積	700 mm ² /回線
線路抵抗	0.0086 Ω /km
短絡点からみた系統インピーダンス	j 2.0 Ω
短絡事故電流	80 kA

実測の結果、一般に純金属の方が抵抗率の変化が大きく、合金は温度を下げて抵抗率はあまり変わらないことがわかった。第 4 章で提案する極低温を利用した事故電流限流装置の限流用抵抗への適用を考えれば、常温での抵抗率は高く、液体窒素温度における抵抗率は低いほど良い。この点から、合金より純金属の方が限流用抵抗に適していると言える。

ここで調査した純金属のうちで ρ_{300}/ρ_{77} が大きく、限流用として最も適当なものは純鉄線である。純鉄線 (99.998%) は $\rho_{300}/\rho_{77}=8.5$ で、しかも常温での抵抗率が高い。しかし、炭素などの含有量の高い俗に「番線」と呼ばれている通常鉄線では $\rho_{300}/\rho_{77}=5.7$ と小さくなる。タングステン線は ρ_{300}/ρ_{77} が純鉄線より小さく 5.7 であるが、 $\rho_{77}=1.04 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ であり純鉄線より低くなる特徴がある。銅は ρ_{300}/ρ_{77} が 8.6 と大きくても抵抗率そのものが低すぎて限流用抵抗に用いるにはあまり適さない。

3. 純鉄線およびタングステン線による限流実験

〈3-1〉 模擬実験回路と実系統との対応 前章で調べた金属線のうち、常温における抵抗率がなるべく高く、比 ρ_{300}/ρ_{77} が比較的大きい純鉄線とタングステ

(a) 実験回路

(b) 等価回路

図 1 模擬実験回路

Fig. 1. Circuit configuration for a scaled down current limiting experiment.

ン線を用いて、液体窒素で冷却しておき、電流を流して限流効果の模擬実験を図 1 の回路で実施した。

まず、対象とする 275 kV 極低温抵抗送電線路を表 2 のように想定した。この線路は非常に大規模な系統から分岐しているとし、短絡電流の大きさを 80 kA と仮定してみる。このとき事故点から系統をみたインピーダンスは約 2 Ω である。この実系統から本模擬回路への換算および実験条件の設定は次のように行なった。

(1) 事故発生直後電流は直ちに抵抗に移行し、系統周波数の 3 サイクル (60 Hz では 50 ms) で遮断されるものとする。

(2) 模擬しようとする限流用抵抗素子の大きさは、短絡電流が流れ始めてから遮断までの間に、約 200 度の温度上昇および実系統で 2 Ω ~ 3 Ω 程度の抵抗値になるように設定する。短絡事故発生後、直列に挿入される抵抗の値を系統のインピーダンス 2 Ω の値に等しくとれば、短絡電流の大きさはおよそ 70% に抑制されるはずである。

(3) 試料線の断面積を電流比で縮小する。これは試料線に流れる電流密度 J を模擬回路と実系統とで同一にするためである。このとき試料線 (抵抗率 ρ) における発熱はどちらの場合も単位体積当たり ρJ^2 で与えられるので、試料線からは熱が逃げないとすれば模擬回路と実系統とで試料線は同じ温度上昇を示す。

ここでは実系統と模擬回路とで試料線断面に一樣に電流が流れているという前提に立っている。極低温下においては、導体の抵抗率が低下し、表皮効果が顕著に現れ、導体の半径が表皮厚さ δ 以上であると電流は導体表面だけを流れる傾向にある⁽²⁾。液体窒素温度における純鉄線およびタングステン線の表皮厚さ δ は、60 Hz の電流に対して、それぞれ約 7.2 mm および

6.6 mm である。従って、実系統においては、試料線を直径 1 mm 程度の素線に十分細く分割し、電流が試料線断面に様に流れるように配慮すべきである。なお、本論文で実験に用いた試料線はいずれも直径 1 mm 以下であるので、試料線断面に様に電流が流れているとみなせる。

(4) 試料線の長さを電圧比で縮小する。これは模擬回路と実系統とにおいて同じ限流効果を与えるようにするためである。実系統における回路インピーダンスを Z 、限流用抵抗の大きさを r とすれば、限流効果は Z と r との比で決まる。電源電圧を $1/a$ にし、短絡電流を $1/b$ にすると、模擬回路のインピーダンス Z' は Z の b/a 倍となる。このとき試料線の抵抗 r' が、

$$\frac{r'}{Z'} = \frac{r}{Z} \dots \dots \dots (1)$$

を満足するためには、

$$r' = \frac{Z'}{Z} r = \frac{b}{a} r \dots \dots \dots (2)$$

でなければならない。(3)において断面積を $1/b$ 倍に縮小しているので、長さを $1/a$ 倍に、すなわち電源電圧比で縮小すれば、試料線の抵抗は(2)式を満足し、模擬回路と実系統とでは同じ限流効果を示すことになる。

以上の換算から表3の上段に示すような対応で、直径 0.5 mmφ の純鉄線および 0.3 mmφ のタングステン線を用いて模擬実験を行なった。なお、模擬実験回路の回路インピーダンスの抵抗成分をできるだけ小さくするために、100 kVA という大容量の変圧器を、また、電源として短絡発電機を用いた。これにより、模擬回路の抵抗成分を図1に示したようにリアクタンス分 87 mΩ の約 1/3 の 27 mΩ にすることができた。

〈3・2〉 限流効果と抵抗変化 模擬実験で得られた代表的な電流波形および試料線端子電圧波形を表3の下段に示す。これらは電源電圧の位相角が 0° のときにスイッチを投入した場合の波形例である。ここで位相角は電源電圧が負から正へ極性を変えるときを基準点とする。また試料線のない場合の電流波形を破線で併記している。電流波形の第6半波において、その波高値は、試料線のない場合に比べて純鉄線で約 50%、タングステン線で約 45% まで抑制限流されている。ここではタングステン線の方が常温での抵抗率が小さいにもかかわらず限流効果が大きいという結果がでている。これはここで用いた試料線の寸法では電流密度が純鉄線の 745 A/mm² に対して、タングステン線では 1,028 A/mm² と大きく、以下に示すように最

表 3 純鉄線、タングステン線による限流実験の概要および実験結果

Table 3. Limited current wave forms associated with the related informations.

	純鉄線		タングステン線	
	実系統 1 相分	実験回路	実系統 1 相分	実験回路
電源電圧	275 V/3 kV	132 V	275 V/3 kV	654 V
短絡電流	80 kA	146 A	80 kA	78 A
断面積	107 mm ² (1mmφ 745) (137本)	0.196mm ² (0.5mmφ) (1本)	78 mm ² (1mmφ 745) (99本)	0.071mm ² (0.3mmφ) (1本)
長さ	3.6 km	30 cm	8.6 km	15 cm
最初の抵抗値	0.413 Ω	182 mΩ	0.481 Ω	22 mΩ
8 秒後の抵抗値 (目標値)	8.51 Ω	159 mΩ	27.4 Ω	126 mΩ
電流波形				
試料線端子電圧				
限流効果	電流第6半波で50%		電流第6半波で45%	
到達温度	280K		360K	

終到達温度がタングステン線の方が高く、抵抗が結果的には大きくなるからである。

試料線端子電圧は電流が小さくなっているにもかかわらず増大している。これは、流れている電流による発熱のために、試料線の温度が上昇し抵抗が増加しているからである。端子電圧と電流との比から求めた試料線抵抗の時間的変化を図2および図3に示す。両図の測定結果のパラッキはスイッチ投入時の電源電圧の位相角の違いによるものである。

図2は純鉄線の場合で、抵抗値は表3に示したように最初 19 mΩ であるが、50 ms 後には約 140 mΩ に達しており、最終目標値 159 mΩ に近い値を示している。この抵抗値から最終到達温度は約 280 K と推定できる。

図3はタングステン線の場合で、最初約 22 mΩ であった抵抗が、短絡電流による発熱、温度上昇によって 50 ms 後には約 165 mΩ まで増加している。これ

図 2 短絡電流による純鉄線の抵抗変化

Fig. 2. The time variation of the resistance of a 0.5 mmφ pure iron wire during a current limiting period.

Fig. 3. The time variation of the resistance of a 0.3 mm ϕ tungsten wire during a current limiting period.

からタングステンの場合約 360 K まで温度上昇していると考えられる。

以上の結果、液体窒素に浸した金属線に流れる短絡電流による温度上昇によって、事故電流を限流できる可能性が十分あることが示された。

ところが、この 2 種類の金属線については、それらを限流線として常時系統に挿入して、負荷電流を流しておくことはできない。それは平常時の通電損失が大きくなるからである。これは純鉄線およびタングステン線区間の 77 K における抵抗値が 1 km 当たり約 0.1 Ω であり、アルミニウムからなる普通線路の抵抗値 0.0036 Ω /km (表 2 参照) に比べて 1 けた以上大きいことから明らかである。しかし、次節に述べる事故電流限流装置の限流用抵抗として使える見込みがついた。なお、本実験において、通電後試料線の温度がもとの約 77 K に再冷却されるに要した時間は約 6 秒であった。

4. 極低温を利用した事故電流限流装置の提案

従来、概念的には図 4 に示すような事故電流限流装置 (以下 FCL と略記) が提案されている⁽¹⁾。本装置の要点としては、短絡電流を極めて高速で検出し、バイパス遮断器 BS を開極して抵抗 r に電流を移行させ限流する方式である。抵抗 r が大きければ限流効果は良いが、電流を抵抗へ移すために高いアーク電圧が必要となり、これが問題点となっている。

そこで、極低温送電方式において、液体窒素をこの抵抗 r の冷却に使うことを提案する。前章の表 3 の純鉄線の例でみれば、77 K において 0.413 Ω の抵抗が 3 サイクル経過後約 3.51 Ω に達する (実系統 1 相分の欄参照)。従って、BS 開極後の電流の抵抗への移行は、単に常温の抵抗へ転流する場合に比べれば、約 1/10 倍のアーク電圧で可能となるはずである。

表 3 の純鉄線の寸法 (断面積 107 mm², 直径 1 mm

図 4 事故電流限流装置 (FCL) の原理図

Fig. 4. Scheme of a fault current limiter.

の素線 137 本、長さ 3.6 km) を直径 2 mm, 5 ターン程度を単位として間隔 1 cm で仮に変圧器巻線のように積み上げるとすれば、高さ約 2~3 m となり、ほぼ OCB 並みの寸法に抵抗をまとめることができそうである。但し、インダクタンス分を少なくする巻線方法をとる必要はある。極低温下において巻線間の絶縁をどう確保するかという具体的問題は残るが、ここで見積った間隔をそれにあてることになる。これによって線路出口に設置できる程度の極低温 FCL が製作できるのではないと思われる。かつての限流リアクトルと異なり、抵抗性であることに大きな特徴がある。

このような実装置において、事故電流によって温度上昇した限流用抵抗を再冷却するのに要する時間および液体窒素の量を表 3 の純鉄線 (断面積 107 mm², 直径 1 mm の素線 137 本、長さ 3.6 km) の場合について概算してみた。

再冷却に要する時間は、試料線の配置や液体窒素の流況によって大きく左右される。冷却効果を高めるために、少なくとも素線一本一本が液体窒素に直接接するように配置するとしても、密集しているため、素線一本のみを冷却するよりは冷却効果が低下し、数倍時間がかかると考えられる。前節において、直径 0.5 mm の純鉄線一本のみの再冷却時間は約 6 秒であった。同一長さ、同一温度において、試料線の保有熱量は体積 (直径の 2 乗) に比例し、そこから単位時間に奪われる熱量は表面積 (直径) に比例すると考えられるから、試料線の冷却時間はその直径に比例して長くなると言える。よって、直径 1 mm の素線一本のみを再冷却するのに要する時間は約 12 秒と考えられる。従って、実装置における再冷却時間は少なくとも数十秒はかかるものと思われる。

試料線の再冷却時には、事故電流のジュール加熱によって試料線に蓄えられた全エネルギーが液体窒素の気化によって奪われ、試料線の温度が低下するものとして、そのときに消費される液体窒素の量を概算する。事故電流が流れている 3 サイクルの間の試料線の平均抵抗値 $\bar{R}$ を 1.96 Ω (初期抵抗 0.413 Ω と常温時の抵抗 3.51 Ω の算術平均)、平均電流 $\bar{I}$ を 60 kA (80 kA の事故電流を 50% まで限流するとし、80 kA と 40 kA の算術平均) として、3 サイクル間に $\bar{R} \bar{I}^2$

$= 3.53 \times 10^8 \text{ J}$ のエネルギーが蓄えられるとする。これがすべて液体窒素（気化熱 204 J/g 、密度 0.83 g/cm^3 ⁽³⁾）の蒸発に使われるとすると、必要な液体窒素は約 2.1 m^3 である。もちろん、この量は液体窒素の状態や循環の方法などによっても大きく違ってくる。また、気化した窒素の排気についても配慮する必要がある。

5. 限流過程の理論的検討

〈5・1〉 試料線の温度上昇に関する方程式 試料線は極低温下における表皮効果（液体窒素温度、 60 Hz の電流で表皮厚さ δ は 7.2 mm （純鉄）、 6.6 mm （タングステン）、 3.0 mm （銅））も考慮して十分細く分割してあるので、電流は試料線断面に一様に流れており、温度は試料線断面および長さ方向に一様であるとみなす。試料線単位長さ当たりのジュール発熱は

$$\rho(T)(i/A)^2 A$$

で与えられる。但し、

$\rho(T)$: 温度 $T(\text{K})$ における試料線の抵抗率

i : 試料線を流れる電流, A : 試料線断面積

試料線に短絡電流が流れ始めてから系統周波数の 3 サイクル程度で電流が遮断されるとすれば、このような短期間では試料線から熱は過渡的には放散されないと考えられる。すなわち上述のジュール熱はすべて試料線に蓄積エネルギーとして蓄えられると言える。また、試料線の体積比熱を C_v とすれば、単位時間当たりの蓄積エネルギーの増加は試料線単位長さ当たり

$$C_v(T)A \frac{dT}{dt}$$

である。よって試料線の温度変化は次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$C_v(T(t))A \frac{dT}{dt} = \rho(T(t)) \frac{i^2}{A} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、電流 i は模擬回路の方程式

$$e = L \frac{di}{dt} + (R + r(T(t)))i \dots\dots\dots (4)$$

から求まる。但し、

e : 電源電圧

R : 回路インピーダンスの抵抗分

L : 回路インピーダンスのインダクタンス

r : 試料線の抵抗で次式で与えられる。

$$r(T(t)) = \rho(T(t)) \frac{l}{A} \dots\dots\dots (5)$$

l : 試料線の長さ

(3)式、(4)式および(5)式を連立させて解くことにより、試料線の温度上昇、抵抗変化および電流の限流

状況を計算することができる。このことを確かめるために、次節では試料線として銅線を用いて、その抵抗変化を実測し、計算結果と比較検討する。ここで銅線を選んだのは、常温から極低温領域における抵抗率および比熱の温度依存性がよくわかっているからである⁽²⁾⁽⁵⁾。

〈5・2〉 銅線の抵抗変化 図1の回路で、電源電圧 200 V （等価回路換算で 13.3 V ）として、直径 0.32 mm 、長さ 300 mm の銅線を液体窒素で冷却し、その端子電圧および電流波形を実測した。その代表的な波形を図5に示す。ここでは銅線の断面積 (0.080 mm^2) を第3章で用いた純鉄線の断面積 (0.196 mm^2) に比べて $1/2$ 以下にし、そこに純鉄線の場合と同一の短絡電流を流して電流密度を2倍以上になるようにした。これによって、抵抗率そのものが低くても電氣的入力を大きくすることができ、温度がある程度上昇して抵抗値の変化が大きくなるようにできた。そのため、ここでは電流は第6半波で約 60% まで抑制されている。また、温度は最終的には 400 K 以上に達している。

実測した端子電圧と電流との比から、銅線の抵抗変化を求め、図6に○印で示す。ここではスイッチ投入時の電源電圧位相角の異なる6例について示した。同図実線および破線は計算結果である。これは次に示す条件の下で(3)式、(4)式および(5)式を数値積分して求めたものである。図1の回路から、

$$A = 0.0804 \text{ mm}^2, l = 300 \text{ mm}$$

$$e = 13.3\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta) \text{ V}$$

$$L = 231 \mu\text{H}, R = 27 \text{ m}\Omega$$

また、初期条件として、 $t = 0$ で

$$i = 0 \text{ A}, T = 77 \text{ K}$$

とした。但し、 θ はスイッチ短絡時の電源電圧の位相

(a) 電流波形

(b) 試料線端子電圧波形

図5 銅線による模擬限流実験結果

Fig. 5. Typical wave forms of current and voltage observed in a $0.32 \text{ mm}\phi$ copper wire.

図 6 限流過程における銅線の抵抗変化

Fig. 6. Measured and calculated resistance change in a 0.32 mm ϕ copper wire during a current limiting period.

角で、 0° と 90° の二つの場合について示した。前章でも述べたように、位相角は電源電圧が負から正へ極性を変えるときを基準点としている。

理論値について、位相角 θ が 0° のときにスイッチを投入した場合と、 90° で投入した場合との抵抗変化を比較すれば、 $\theta = 0^\circ$ のときの方が速く上昇している。これは、 0° の場合、スイッチ投入直後、回路に過渡直流成分を含む非対称な電流が流れ、そのときの試料線でのジュール発熱が大きく、比較的速く温度上昇するためである。また、抵抗が波打ちながら上昇しているのは、電気的入力が脈流であるからである。

実測値と理論値とを比較すれば、図 6 に示したように、実測値は実線と破線との間にあり、理論値と実測値とはよい一致を示している。但し、50 ms 付近において、実測値が理論値より多少低くなる傾向にある。これは、この程度時間が経過すれば、実測では試料線からの熱の放散が生じ始め、試料線の温度上昇が鈍くなるからである。

以上のことから、前節で示した方程式で試料線の限流効果を理論的に考察してよいことが検証できた。言い換えれば、系統周波数の 3 サイクル程度 (50 ms 程度) であれば、試料線からの熱の放散はないという仮定の妥当性が実証できた。

6. 結 論

極低温送電 (液体窒素冷却) によって数百万 kW 以上の大電力が送電されるような時点には、系統の短絡容量も著しく増大し、短絡電流が 50~80 kA に達する地点が多くなると予想される。このため電力用遮断器の責務が過酷になるとともに故障点の損傷も大きくなる。そこで故障電流を抑制することを目的として、限流機能をもつ新しい電流制御技術の可能性を検討した。

極低温冷媒が系統に存在するという前提のもとで、平常時には抵抗線を冷却しておき低抵抗に保っておく。事故時にはそこに流れる短絡電流による抵抗線の温度上昇を利用して急速に高抵抗を実現し、電流を限流する方式について検討した。限流用抵抗に適した材料を決めるために、液体窒素冷却時における金属の抵抗率を実測した。純鉄線およびタングステン線について限流の模擬実験を行なった。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 常温と液体窒素温度との間で純金属の抵抗率は大きく変化するが、合金ではほとんど変化しない。

(2) 純鉄線、タングステン線を用いた模擬実験で、流れた電流による液体窒素温度から常温までの温度上昇により、事故電流の限流が可能であることを実証した。

(3) 純鉄線やタングステン線をバイパススイッチ付事故電流限流装置の抵抗体として用い、常時液体窒素で冷却しておけば、極低温時の抵抗は常温時よりも $1/6 \sim 1/8$ に保たれるので、バイパススイッチ開極後の電流の抵抗体への移行が容易である。

(4) 銅線による模擬実験の結果、短絡電流が試料線に流れ始めてから系統周波数で 3 サイクル程度以内であれば、試料線から熱の放散はほとんどない。

(5) このような限流装置は、それ自体は直接事故電流を遮断する機能をもっているわけではない。大容量の極低温線路の出口、その背後の大容量母線の中間点、そこに入ってくる多回線の線路の入口などに設置して、線路事故に伴う事故電流を限流して、元来の遮断器などの開閉保護装置の責務を軽減しようとするものである。

最後に、本研究は昭和 55 年および 56 年度文部省科学研究費の補助を受けたこと、および、計算は名古屋大学大型計算機センターで行なったことを記して感謝の意を表す。

(昭和 57 年 3 月 25 日受付, 同 57 年 8 月 2 日再受付)

文 献

- (1) IEEE: "Symposium on Current Limiting Devices" IE-EE PES Summer Power Meeting (1975)
- (2) 岡本: 「極低温抵抗ケーブル開発の現状」電学誌 94, 414 (昭 49-5)
- (3) 東京天文台編纂: 「理科年表」p. 434, p. 489 (昭 57 年) 丸善
- (4) 稲葉: 「直流限流ヒューズの基礎特性 (第 2 報)」電中研技術報告 7407 (1975)
- (5) W. F. Giaque & P. F. Meads: "The Heat Capacities and Entropies of Aluminum and Copper from 15 K to 300 K" J. Am. Chem. Soc., 63, 1897 (1941)