UDC 621.316.573.064.3 : 621.3.042/.043

論文

56-B43

整磁鋼を用いた過電流限時しゃ断器の動作解析

非会員 片 根 保 (千葉大)
 非会員 羽 山 俊 光 (山洋電気)
 正 員 榊 陽 (千葉大)
 正 員 笠 原 保 雄 (ミヤコ電機)

1. ま え が き

磁性体の磁気特性の温度による変化は、通常好ましくないものと考えられ各種の磁気応用にさいし、使用温度範囲内での磁気的特性はできるだけ変化しないことが望ましいとされている。これに対して磁気特性の温度変化に敏感な低キュリー温度をもつ感温フェライトが開発され、各種の保護装置に応用され始めたことに触発され、熱磁気特性全般に関心が注がれその応用は磁気工学の中に一分野を形成しつつある^{(1)~(4)}。

本文は可動コイル形計器の空げき磁界の温度補償用に古くから用いられている整磁鋼 (31% Ni-69% Fe 合金) を可動片兼接極子片 (以下簡単のため可動片と呼ぶ) とする、過電流しゃ断器⁽⁵⁾⁽⁶⁾の動作解析に関するものである。その限時特性は、過電流の Joule 損失による可動片の熱的、磁気的な両特性によって決定されており典型的な熱磁気特性の応用ということが出来る。ここで取り上げたしゃ断器は既に市販され一部で使用されているものであるが、その動作機構がまだはつきり分かっておらず設計は経験的要素が多く取り入れられていた。その動作機構について定量的に検討を行なった結果、限時特性および瞬時しゃ断特性の動作の詳細を明らかにすることができ、設計に際しての有用な資料を得、改良すべき問題点を指摘することができた。

2. しゃ断器の構造と動作の概要

本研究に使用したしゃ断器の構造を第1図に示す。整磁鋼の可動片⑥を押下げると、異方性 B_s フェライト製の永久磁石②によって保持され接点⑦⑦が閉じる。この状態で過電流が①-④⑤-⑥-⑦⑦-⑧⑨-⑩に流れると、整磁鋼製の可動片は過大な Joule 損失のため温度が上昇し磁化が減少する。このため永久磁石の吸引力が、ばね④の復元力より小さくなると可動片は開放され接点が開く。開路するまでの時間は可動片の形状、寸法、材質で定まる熱的時定数で与えられるのでこれによって限時特性が決定される。また、第2図に示すように、可動片を流れる電流 I の作る磁界 H が磁石の極性と反対方向の場合 (減極性と呼びこの逆の場合を加極性と呼ぶ) には、電磁力 F_m が矢印の方向に働きこれが (磁石の吸引力-ばねの力) を上回るとしゃ断する。電磁力には時間遅れがないので、短絡電流が流れた場合瞬時しゃ断する。

①⑩ 端子, ② 永久磁石, ③ 磁極片, ④ ばね, ⑤ 編線, ⑥ 可動片, ⑦⑦' 主接点, ⑧ ばね, ⑨ 編線, ⑪⑪' 補助端子, ⑫ 警報接点, ⑬ 取付台

第1図 過電流限時しゃ断器

Fig. 1. Configuration of over current delayed circuit breaker.

An Analysis on The Mechanism of Over Current Delayed Circuit Breaker Using Combined Armature and Contactor Made of Compensating Magnetic Material. By Tamotsu Katane, Non member (Chiba Univ.), Toshimitsu Hayama, Non member (Sanyo Electric Co. Ltd.), Yo Sakaki, Member, (Chiba Univ.), Yasuo Kasahara, Member (Miyako Electric Co. Ltd.)

片根 保: 非会員, 千葉大学工学部電気工学科
 羽山俊光: 非会員, 山洋電気株式会社
 榊 陽: 正員, 千葉大学工学部電気工学科
 笠原保雄: 正員, ミヤコ電機(株)設計技術部

第 2 図 減極性、加極性の説明、第 1 図の A-A' 断面を示す。

Fig. 2. Illustration of subtractive polarity and additive polarity.

以上のことから直流回路では減極性で使うことが原則であるが、本文では減極性、加極性の両者について解析を行なっている。

3. シャ断特性の測定結果

初期電流零の状態では直流におけるシャ断特性を測定した。電源には 1,800 AH の鉛蓄電池 13 個を直列に接続したものを浮動充電しながら使用した。

測定結果を第 3 図に実線で示す。定格電流の 5 倍程度までは、いずれの極性においても同じようなシャ断特性を示すがこの値を越えると、減極性のほうが加極性よりも短い時間でシャ断されている。減極性においては、定格電流の 40 倍を越えると瞬時シャ断が行なわれている。この場合にはシャ断直後に再投入が可能なので、整磁鋼は温度上昇しておらず熱的原因よりも電磁力で動作していると想像される。シャ断時間の最小値(約 3 ms)は、電流の立ち上がり時間や接点開放時の火花時間によって決る。これらは配線のインダクタンスや漂遊容量によるものである。

4. 考 察

〈4.1〉可動片に働く力関係 第 4 図には可動片に作用する磁石の保持力 F_m 、ばねの復元力 F_s 、およびそこを流れる電流による電磁力 F_e (図中の F_e の右肩の +, - はそれぞれ加極性、減極性を示す。)の関係を示してある。これらの力の間に

$$F_m - F_s \mp F_e < 0 \quad (1)$$

の関係が成立つときシャ断器は動作し開路する。但し $-F_e$: 減極性, $+F_e$: 加極性。このシャ断器では、ばねが電路の一部をなしているため復元力は、通電電流による温度上昇の影響をうけるはずであるがここで

第 3 図 シャ断特性

Fig. Clearing characteristics of the breaker.

第 4 図 可動片に働く力関係

Fig. 4. Relationships among forces acting on the contactor.

はそれを無視し F_s は一定と仮定する。

磁石の保持力は

$$F_m = \frac{SB^2}{\mu_0} (N) \quad (2)$$

と表わされる。(2)式で B は可動片内の磁束密度, S は電流の通電方向と直角に幅 l で可動片の横断方向にとった磁路の断面積で Fringing は無視している。但し, l は第 4 図に示したように、磁極片の長さと同じと仮定している。可動片が開磁路のため、残留磁化は極めて小さいと考えられるので、これを無視すると電磁力は

$$F_e = BIl (N) \quad (3)$$

で表わされる。(2), (3)式を(1)式に代入して求めた B が

$$B < \frac{\mu_0 I l + \sqrt{(\mu_0 I l)^2 + 4 S \mu_0 F_s}}{2 S} \quad (T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

のときしゃ断する。

第5図は、可動片と同一素材から切り出した環状磁心（スタンプコアの積層）の磁束密度 B 対温度 θ との関係を保最大印加磁界 $H_m=2(\text{Oe})$ で測定した結果である。可動片に用いた整磁鋼内でも B と θ との関係は、第5図と同じような変化をするものと仮定して以下の論議を進める。可動片内の磁束密度は温度に対して第5図のように変化するので、 B の関数である F_m 、 F_s はいずれも温度によって影響を受けることがわかる。従ってこのしゃ断器に過電流を流した場合、可動片の Joule 損による温度変化の模様を知ることがこの動作機構を定量的に理解する決め手になる。

〈4.2〉可動片の熱的特性 整磁鋼で形成されている可動片の磁気特性は、それ自身に流れる電流による発熱で変化するので、まず可動片部分を第6図に示す単純なモデルに置きかえ熱伝導方程式を解いて発熱量と温度変化の模様を求めてみる。可動片の断面積は小さいので、その断面内における温度は一樣と仮定すると初期電流零の場合の熱伝導方程式は次のようになる⁽⁷⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\kappa A_0}{K} - \nu \theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

初期条件 $t=0$ $\theta=0$

境界条件 $x=0$ (端子側) $\theta=0$

$x=L$ (接点側) $\theta=\theta(1-e^{-t/\tau})$

接点側の境界条件は、接点における発熱が動作に影響していることが予備的実験で分り設けたもので、回路がしゃ断しない程度の電流を流して測定を行ないその結果を外そうして各パラメータ θ と τ とを実験的に定めた (第1表参照)。(5)式を解くと

$$\begin{aligned} \theta = & \frac{\sinh \sqrt{\frac{\nu}{\kappa}} x}{\nu \sinh \sqrt{\frac{\nu}{\kappa}} L} \left\{ \frac{\kappa A_0}{K} (e^{-\sqrt{\frac{\nu}{\kappa}} L} - 1) + \nu \theta \right\} \\ & + \frac{\kappa A_0}{K} \left(1 - e^{-\sqrt{\frac{\nu}{\kappa}} x} \right) \frac{1}{\nu} + \frac{2 \kappa \pi}{L^2} \times \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(-1)^n \sin \frac{n \pi x}{L} \left\{ \frac{\kappa A_0}{K} \left(\frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} + \nu - \frac{1}{\tau} \right) \right\}}{\left(\frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} \right) \left(\frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} + \nu \right)} \\ & \times \left(1 - (-1)^n - \frac{\theta}{\tau} \frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} \right) e^{-\left(\frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} + \nu \right) t} \\ & \times \left(\frac{\kappa n^2 \pi^2}{L^2} + \nu - \frac{1}{\tau} \right) \end{aligned}$$

第5図 整磁鋼の磁束密度と温度の関係

Fig. 5. Temperature dependence of flux density of magnetic compensating material.

第6図 可動片部分の解析モデル

Fig. 6. Armature model for analysis.

第1表 諸定数表

Table 1. Constants used for calculation.

$\kappa = \frac{K}{\rho c}$	
K : 熱伝導率	0.19 (Cal/s·m·°C) ⁽⁸⁾
ρ : 密度	8.2×10^3 (kg/m ³)
c : 比熱	1.2×10^2 (Cal/kg·°C)
$\nu = \frac{Hp}{\rho c \omega}$	
H : 熱伝達率	1.43 (Cal/s·m ² ·°C)(注)
p : 整磁鋼周長	1.1×10^{-2} (m)
ω : 整磁鋼断面積	5.16×10^{-6} (m ²)
$A_0 = \frac{0.239 I^2 r}{\omega^2}$: 整磁鋼の発熱量 (Cal/s·m ³)	
r : 低抗率	9.0×10^{-7} (Ω·m)
θ : 接点の飽和温度	$0.45 \cdot I^2$
τ : 時定数	45 (s)
x : 磁石による保持力の中心	8.3×10^{-3} (m)
L : 全長	1.88×10^{-2} (m)
F_s : ばねの復元力	1.08 (N)
l : 磁極片の幅	7.1×10^{-3} (m)

(注): 静止機器の設計で用いられるふく射による熱放散係数 6 W/m^2 ・°C を換算した値である。対流による分は無視した。

$$- \theta e^{-t/\tau} \frac{\sinh \sqrt{\frac{1}{\kappa} \left(\nu - \frac{1}{\tau} \right) x}}{\sinh \sqrt{\frac{1}{\kappa} \left(\nu - \frac{1}{\tau} \right) L}} \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6)式の第1項、2項は定常解、第3項は整磁鋼自身の発熱による過渡解、第4項は接点発熱による過渡解である。式中の諸定数、単位を第1表に示す。(6)式は任意の x における θ を与えるものであるが、解析に際しては以下磁石の中心 ($x=8.3 \times 10^{-3}$ m) における解を使っている。

しゃ断条件を与える(4)式の解を第1象限に、第5図の磁束密度と温度との関係を第2象限にまた種々の電流に対する(6)式の解を第3象限に描くと第7図が得られ、これを基にするとしゃ断時間を図式的に求めることができる。但ししゃ断時間を考える場合には、 $t \approx 0$ の近傍のみを考慮すればよいので、(6)式の解の $t \approx 0$ の立ち上がり部分のみ必要となる。ここで第7図の第3象限の各曲線は計算を簡単にするため(6)式の代わりに $[\partial \theta / \partial t]_{t=0} \cdot t$ の値を描いてある。なお(6)式の各項に A_0 または θ がかかっているが、両者はいずれも I^2 に比例するので電流が1けた増すと $\partial \theta / \partial t$ は2けた増加する。従って電流が10倍になると時間軸の目盛は $1/100$ となる。つまり時間軸①は、電流が20~70 A のとき②は電流が200~700 A のとき用いる。例えば減極性において電流が300 A のときには、まずその電流において回路がしゃ断するための磁束密度が第1象限より求め、次にその磁束密度に対する温度が第2象限により決まる。次にその温度に達するまでの時間を、第3象限の②の時間軸より求める。つまりこの時間が300 A のときのしゃ断時間となる。以上の手順を第7図に破線で示した。加極性においても同様である。

計算結果を第3図に破線で示す。得られた結果は、かなり測定結果と一致しており解析が妥当であることがわかる。なお、瞬時しゃ断領域における実測値が、3 ms より早くならないのは回路に漂遊インダクタンスや静電容量が存在し電流の立ち上がり時間や火花時間があるためである。これらは解析に際し考慮することは困難なので無視した。

5. ま と め

整磁鋼の磁気特性の温度変化を積極的に利用した過電流限時しゃ断器の動作を検討した結果、動作機構の詳細が明らかになりそのしゃ断特性を定量的に算出することが明らかになった。得られた結果を挙げると次の通りである。

- (1) 可動片の熱的特性を、熱伝導の方程式を解くことにより明らかにし、しゃ断器の限時特性に及ぼす効果を定量的に明らかにした。
- (2) 可動片に働く力(磁石の保持力、ばねの復元

第7図 しゃ断時間の図式解法

Fig. 7. Graphical solution of clearing time.

力、電磁力)の関係を明らかにし、可動片の熱磁気特性と熱伝導方程式の解とを用いしゃ断器のしゃ断時間を、実量的に予測することが可能となった。今後、ばねや永久磁石、諸定数を変えることにより、自由なしゃ断特性をもつしゃ断器の設計も可能になった。

今後の改良すべき問題点として、接点部分における発熱量が整磁鋼を伝わって永久磁石に影響を及ぼしていることが挙げられる。接点部分の発熱量というのは、接点の形状や材質、接触抵抗などに左右され、ばらつきも大きいものである。そこでこの部分の発熱が永久磁石に影響を与えないような構造に改めることによって、より安定したしゃ断特性を得ることが可能になるう。

瞬時しゃ断時間3 msは他のしゃ断器⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に比べ非常に早いといえる。従って10 ms以内でのしゃ断が要求されている電力用半導体素子の保護装置⁽¹¹⁾として、有望である。特に整流回路では電圧が高くても電流が断続しているのでかなりのしゃ断能力があると思われるので、この方面での検討も行なってみたいと考えている。

終りにあたって実験用蓄電池供与の便を計って下さった電電公社技術局 山田雅朗調査役(現山洋電気(株)常務取締役)に深謝します。また本論文は、電気学会電子計測、磁性材料、磁気応用合同研究会資料⁽¹²⁾に加筆修正を施したもので、席上有益な御意見を賜った方々に感謝申し上げます。

(昭和55年5月2日受付, 同55年12月8日再受付)

文 献

- (1) K. Murakami: "The Characteristics of Ferrite Cores

- with Low Curie Temperature and their Application" *IEEE Trans. Magnetics* MAG-1, No. 2, June p. 96 (1965)
- (2) K. Murakami & K. Moizumi: "On New Control Devices Constructed Using Magnetic Materials with Low Curie Temperature" *ibid.*, MAG-4, No. 3, p. 335, (Sept., 1968)
- (3) K. Murakami & M. Nemoto: "Some Experiments and Considerations on the Behavior of Thermomagnetic Motors" *ibid.* MAG-8, No. 3, p. 387 (Sept., 1972)
- (4) U. Kato & M. Endo, "The Thermal Reedswitch" *Proc. of the 3rd International Relay Conference*, No. 13 (May 1974)
- (5) 笠原:「高速度回路しゃ断器」特公, 昭 54-24108 (昭 54-8)
- (6) 榊・片根・大熊・本・笠原:「整磁鋼の自己発熱を利用した小型過電流限時しゃ断器」電学論B, 98, p. 875 (昭 53)
- (7) H. S. Carslaw, et al: "Conduction of Heat in Solid" 2nd Ed., Oxford at the Clarendon Press, p. 130 (1947)
- (8) 鉄鋼材料便覧: p. 32 (昭 42) 丸善
- (9) 日幸 FM サーキットブレーカーカタログ No. 6803, サンケン Protector カタログ; No. 953 G
- (10) 渋谷・此本・沢村:「サーキットプロテクタ」サンケン技報 11, 3, No. 1, p. 41 (1968)
- (11) SCR manual p. 310 (昭 44) オーム社
- (12) 片根・羽山・榊・笠原:「整磁鋼を用いた過電流限時しゃ断器の解析」電気学会, 電子計測・磁気応用・磁性材料合同研究 資 AM-79-52 (昭 54-11)