E形カットコアを用いた限流素子の特性解析

Analysis of the Characteristics of a Fault Current Limiter Using an E-type Core

島 昌浩・西ヶ谷一男・S. C. Mukhopadhyay・岩原 正吉・山田 外史

金沢大学工学部附属電磁場制御実験施設, 金沢市小立野2-40-20(〒920-8667)

M. Shima, K. Nishigaya, S. C. Mukhopadhyay, M. Iwahara, and S. Yamada

Laboratory of Magnetic Field Control and Applications, Faculty of Engineering, Kanazawa University,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667

(2000年10月10日受理, 2001年1月24日採録)

Recently, the fault current limiters (FCLs) have become a hot topic in relation to the reliable operation of power supply. Authors reported the characteristics of an FCL using a permanent magnet and a C-type core. In this paper, the characteristics of a FCL using the an E-type core are investigated by the use of numerical analysis, taking account of the eddy current effect. Numerical analysis was performed on the core dimension ratios of the FCL.

The results, clearly showed that the characteristics were strongly influenced by the dimension ratios of the core. The experimental results show a reasonable agreement with the analytical results.

Key word: fault current limiter, permanent magnet, E-type core, dimension ratio, equivalent circuit

1. はじめに

近年, 電力系統の大容量化が進むとともに電気エネルギーの常時安定供給が求められる。一方, 系統の故障を無くすことは困難であり, その際の故障電流が遮断容量を上回ることも予想される。その結果, 系統の機器に及ぶ影響が懸念されこれを避けるため故障電流を瞬時に抑制することが必要となる。

現在, このような状況のもとで限流器(FCL: Fault Current Limiter)の開発が望まれており, 超電導を利用した大容量向け限流器の研究等が進められているが^{1), 2)}, 筆者等は10kVA程度の低圧配電系統等の小電力系への適用を目的とした完全受動形限流素子の開発を目指し, 永久磁石と磁心を用いた単相用限流素子の構成について研究を進めている^{3), 4), 5)}。

本論文では, これまで磁心に用いてきたC形コアに替え, 素子の仕様を比較的容易に変更でき, 永久磁石の小型化に有利なE形コアを使用することとし, 磁心や永久磁石の物理的寸法がその限流特性に及ぼす影響について数値シミュレーションによって明らかにする。またモデル装置を作製し, 限流素子としての動作特性およびコアの形状による特性の相違を調べ, 特性改善を目指す。

2. 限流素子の構成と動作原理

2.1 限流素子の構成

限流素子は, 系統中の電源から電気機器等の負荷への線路中に直列に挿入することにより, 事故時の故障電流を抑

制し電源や系統を保護することができる。素子の電圧-電流特性はFig.1(a)に示すように, 系統中の電流が電流値 I_{linek} に至るまで電圧降下がほとんどなく I_{linek} を超える電流は抑制するという特性が望まれる。

検討する限流素子はFig.1(b)に示す磁心(方向性ケイ素鋼板, Z-8, 板厚 0.3mm)と磁心を十分飽和させることのできる高保磁力を有する永久磁石(Nd-Fe-B)を組み合わせた複合磁心に巻線を施すという簡単な構造でバイアス用電源や冷却設備等の付帯設備が一切不要な構成となっている。

2.2 限流素子の動作原理

限流素子に用いる磁心の磁化特性はヒステリシス曲線を有するが, 磁界の使用範囲を大きくとる本素子の動作を考慮し, 飽和・未飽和領域の二つに分け, 磁化特性を二折れ線で近似する。すなわち, Fig.1(b)のように素子を構成すると磁心の磁化特性は永久磁石によって偏磁され, Fig.1(b)における電流 I_{line} が正の場合はFig.2(a), 負の場合はFig.2(b)の特性を併せ持つこととなり, 素子全体の見かけの磁化特性はFig.2(c)のようになる。すなわち, 本素子は正常動作時には磁心が飽和領域(area2)で動作し, その電圧降下は小さなものとなる。一方, 事故時には過電流により磁心が不飽和領域(area1, 3)に入って動作するのでその電圧降下は大きくなり, その結果として限流動作が実現する。ただし過電流によりarea1, 3を超えて飽和領域に達することが無いように設計する。

Fig. 1 Basic concept of an FCL.

(a) $B-H$ characteristics of an FCL (+side). (b) $B-H$ characteristics of an FCL (-side). (c) $v-i$ characteristics of an FCL.

Fig. 2 Magnetization characteristics of an FCL.

3. 数値シミュレーションによる限流素子の動作解析

3.1 E形コアを用いた限流素子

Fig.3(a)に示すようなC形コアを用いた限流素子の設計において、 d 寸法を大きくすることにより限流特性を向上できるがそれに伴い大きな永久磁石が必要なことはすでに報告している⁵⁾。体積の大きな永久磁石は製造面・コスト面で問題があり、大形の永久磁石を用いずに、特性の改善や素子の遮断容量を増大させる素子構造が望まれる。またFig.3(a)に示すようなC形コアを用いた場合、巻線の実装に問題が生じる。これらの問題点を解決する方法としてFig.3(b)のように永久磁石上下にコア部が張り出している構造を検討する。実際の素子の作製ではE形コアの中央脚部を切除し、かつその箇所に永久磁石を挿入することでこの構造を実現した。

3.2 等価回路

限流素子の設計には、その動作特性を定量的に予測することが必要であり、そのためには高い精度の解析が必要となる。まず動作解析のためFig.4のようなモデル回路を考える。ここでは特性に影響を与えと考えられる磁心の非線形性に加え、塊状となる永久磁石中のうず電流を考慮する。その上で解析精度と計算時間を考慮し、永久磁石をFig.5のようにうず電流路の断面積が等しくなるように3分割して表皮効果を含むうず電流の影響について検討できるようにした。また、漏れ磁束を無視すればFig.4の回路はFig.6のような等価回路に変換できる。等価回路では電気回路に従属電源、磁気回路に従属起磁力源、うず電流回路に従属電源を組み込むことで各回路を連成させる。

3.3 タブロー法⁶⁾を用いた数値シミュレーション

Fig.6の等価回路に対して回路方程式を導き、それらの方程式を表形式に並べひとつの行列方程式に表わして解き、解析を行う。この手法はタブロー法と呼ばれており構造が簡単のため計算機シミュレーションには多用される。得られた行列微分方程式を後退差分法を用いて離散化すると(1)式となる。(1)式に含まれている Z_e はインピーダンス行列、 R_m はリラクタンス行列、 Z_{edo} 、 Z_{edm} 、 Z_{edi} はうず電流インピーダンス行列、 i は枝電流ベクトル、 u_e は節点起磁力ベクトル、 ϕ は枝磁束ベクトル、 i_{edo} 、 i_{edm} 、 i_{edi} は枝うず電流ベクトル、 A_e 、 A_m 、 A_{ed} はそれぞれ電気回路・磁気回路・うず電流回路の

(a) Previous configuration. (b) Investigated configuration.

Fig. 3 Configurations of FCL.

Fig. 4 Test circuit.

Fig. 5 The model included Skin effect of eddy current.

Fig. 6 Electromagnetic equivalent circuit of FCL.

規約接続行列であり、また C_{em} および C_{mdo} 、 C_{mdm} 、 C_{mdi} はそれぞれ電気回路と磁気回路、磁気回路とうず電流回路を結びつける結合行列である。(1)式の解は不動点定理⁷⁾に基づくニュートン・ラプソン法により求められる。計算においては磁心の飽和・未飽和の判定をし、その結果に従い比透磁率等の特性値を変更している。 Δt は離散化幅である。

$$\begin{bmatrix} Z_e & -A_e' & C_{em}' \frac{\Delta}{\Delta t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_{em} & 0 & R_m & -A_m & -C_{mdo} & 0 & -C_{mdm} & 0 & -C_{mdi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{mdo}' & 0 & Z_{edo} & -A_{edo}' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{edo} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{mdm}' & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{edm} & -A_{edm}' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{edm} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{mdi}' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{edi} & -A_{edi}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{edi} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^{n+1} \\ v_c^{n+1} \\ \phi^{n+1} \\ u_c^{n+1} \\ i_{edo}^{n+1} \\ v_{edoc}^{n+1} \\ i_{edm}^{n+1} \\ v_{edmc}^{n+1} \\ i_{edi}^{n+1} \\ v_{edic}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s^{n+1} + \frac{C_e'}{\Delta t} \phi^n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\phi_{mo}^n}{\Delta t} + \frac{\phi_{mm}^n}{\Delta t} + \frac{\phi_{mi}^n}{\Delta t} \\ 0 \\ \frac{\phi_{mm}^n}{\Delta t} + \frac{\phi_{mi}^n}{\Delta t} \\ 0 \\ \frac{\phi_{mi}^n}{\Delta t} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

4. 磁心形状と限流特性

4.1 C形・E形カットコアを用いた限流素子の特性解析

限流素子の動作特性は、素子に用いる材料のパラメータによって大きく変化する。パラメータには、永久磁石および磁心の寸法、磁心の飽和・未飽和時の比透磁率、巻線の巻数等が挙げられる。限流素子の設計に先立ち、各パラメータが限流素子の特性にどのような影響を及ぼすかを把握しておく。そこで、限流素子のパラメータが動作特性に及ぼす影響についてタブロー法を用いた数値解析により検討する。解析に用いる回路と素子の基準パラメータをTable1に示す。また、E形コアにおける寸法を $a \sim f$ で表わし、形状の一般化のため a 寸法を基準とした寸法比 $\alpha \sim \zeta$ をFig.7に示すように定義した。

a) 永久磁石内の磁束・うず電流分布

限流動作時における永久磁石内の磁束分布の解析を行った。Fig.8(a)より永久磁石内では磁束が分布しており磁石の外側ほど大きい。この磁束分布に伴ううず電流はFig.8(b)のようになる。図中の I_{eddyo} , $I_{eddy m}$, $I_{eddy i}$ は永久磁石の外側、中側、内側に流れるうず電流であり、磁石の内側ほどうず電流が小さくなっているのうず電流とその表皮効果を考慮した解析となっていることが分かる。また、うず電流の有無による特性の差異を算定したところ、Fig.8(c)に示すようにうず電流による限流特性への影響は微小なものであった。ただし、永久磁石に発生するうず電流による温度上昇は無視できないため、温度上昇による永久磁石の特性の劣化が予想される。

b) 負荷特性

同一容量のC形コア・E形コアを用いた場合の負荷特性の比

Table 1 Parameters.

Source voltage, V_s	100.0 V
Frequency, f	60 Hz
Coercive force of permanent magnet, H_c	9×10^5 A/m
Saturated relative permeability of the core, μ_s	5.0
Unsaturated relative permeability of the core, μ_u	1000.0
Conductivity of permanent magnet, σ_m	1×10^{-7} Ω m
Conductivity of permanent magnet, σ_s	1×10^{-7} Ω m
Number of turns of the coil, N	200 turns

Fig. 7 Geometry of an FCL using an E-type core.

(a) Waveforms of the flux.

(b) Waveforms of the eddy current.

(c) V-I characteristics.

Fig. 8 Calculated characteristics of a FCL using an E-type core.

較を行った。Fig.9はその結果を示し、通常時の特性では両者に相違は無く、負荷が小さくなるにつれE形コアを用いた場合の方が電流の抑制の大きいことが示される。また、系統短絡時の電流は素子を用いない場合に比べ、C形コアを用いた場合で約1/7、E形コアを用いた場合で約1/8に抑制されている。その原因は限流動作時での永久磁石上下のコア部の磁気抵抗により、永久磁石を通る磁束が減少し、その他のコア部を通る磁束が増加したためである。ここでは示さないが解析結果により永久磁石を通る交流分の磁束はE形コアを用いた場合の方が10%程度小さいことが明らかとなった。

4.2 E形コアを用いた限流素子の寸法比特性

寸法比が動作特性に及ぼす影響を検討した。特性値からその変化を算定した結果をFig.10(a)~(d)に示す。ここで図中の I_{line} , I_{linep} は折れ点の電流値および回路短絡時の電流値である。

a) 寸法比 α

Fig.10(a)から α が小さいほど短絡時の電流を抑制することができるが、 α による特性の変化はあまり大きくない。したがって設計に際して α の自由度は大きくなる。

b) 寸法比 β

寸法比 β については、 $\zeta = 0.5$ (一定)として解析を行った。Fig.10(b)から β が小さいほど短絡時の電流の抑制は大きく、 β の変化に伴う特性への影響も大きいことが分かる。しかし、 β は巻線を巻くための窓面積と永久磁石による起磁力との兼ね合いがあり、自由度は大きくない。

c) 寸法比 γ

Fig.10(c)から γ が大きいほど短絡時の電流の抑制大きいことが分かる。ただし、C形コアを用いた場合と同様に γ を大きくすると永久磁石の体積を増大させることとなる。

Fig. 9 Calculated load characteristics of FCLs.

Fig. 10 Calculated characteristics of the core dimension ratios (for a FCL using an E-type core).

d) $\zeta = f/c$

Fig.10(d)から ζ が小さい方が短絡時の電流をより抑制できて、折れ点の電流は小さくなり素子の仕様を大きく変更できるパラメータであることが分かる。ただしこれは永久磁石の着磁方向の長さに関係するので磁心を飽和させるのに十分な起磁力を持たせた上での設計となる。

4.3 限流素子の動作特性の測定結果

解析結果をもとに、実際に限流素子の設計および作製を行いその動作特性を測定した。E形カットコアを用いて動作波形および負荷特性の測定を行った。

a) 限流動作

寸法は $a=10\text{mm}$ として、 $\alpha=8.0$ 、 $\beta=8.5$ 、 $\gamma=5.0$ 、 $\zeta=0.48$ のE形コアを用い、巻数 N は200とした。動作波形はFig.4において通常動作範囲内の電流を流しているところで、SWの投入によって模擬的な短絡事故を発生させた時の各部の電圧・電流波形である。Fig.11から、SW投入時において瞬時に限流素子に大きな電圧がかかり、短絡時の電流は実効値で23.8A(ピーク値30.6A)となっている。素子に非線形性を持たせない場合、そのインピーダンスが 1.7Ω 、電源電圧100Vであることから58.8A(同82.9A)と算出できるので短絡電流を約2/5に抑制できた。

b) ζ の特性への影響

永久磁石の着磁方向と関連する寸法比 ζ をそれぞれ0.12、0.24、0.48と異なる限流素子を作製し電圧-電流特性を測定した。Fig.12(a)から寸法比 ζ が小さいほど限流動作時におけるインピーダンスが大きく、短絡時の電流は小さくなるが通常動作時では ζ が大きいほどインピーダンスが小さい。また、永久磁石の着磁方向の寸法を小さくすることで寸法比 ζ を小さくすると磁心を十分に飽和させるほどの起磁力を得ることができなくなる。Fig.12(b)に示すように ζ の減少に伴い a 寸法も小さくしなければならなくなり、 ζ によって a 寸法はある範囲に制限される。

Fig. 11 Measured waveforms of an FCL using a E-type core.

(a) V-I characteristics.

(b) a - ζ characteristics.

Fig. 12 Measured characteristics of a FCL

using an E-type core.

5. まとめ

本論文では、永久磁石とE形コアを用いた磁気式限流素子の構成についての検討を行った。素子の解析にあたり、磁心の非線形性と永久磁石内のうず電流およびその表皮効果を考慮したタブロー法を用いた数値シミュレーションを行い、素子のパラメータが動作特性に及ぼす影響を明らかにした。また実際にE形コアを用いて素子を作製し、素子の動作を確認した。素子の限流特性から、寸法比 ζ が特性に大きく影響することが示され、実験上からも同様な結果が得られた。今後は、実用化に向けた取り組みと三相用限流素子への応用も視野に入れ研究を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は金沢大学産学連携等研究(株式会社日立製作所)の「非線形磁気応用限流装置の基礎研究」の一環として実施した。

文 献

- 1) 仁田旦三, 白井康之, 藤川一洋, 西川武雄: 平成9年電気学会全国大会 No 1310(1997)
- 2) T.Hoshino, I.Muta: IEEE Transaction on Magnetics **30**, N.4 pp.2018-2021(1994)
- 3) 岩原正吉, 山田外史, Dawson: 日本応用磁気学会 **21**, 907-910(1997)
- 4) 藤原憲明, 岩原正吉, 山田外史: 第22回日本応用磁気学会講演概要集 2193-1(1998)
- 5) 島昌浩, S.C.Mukhopadhyay, 岩原正吉, 山田外史: 日本応用磁気学会 **24**, 811-814(2000)
- 6) M.Iwahara: IEEE Transaction on Magnetics Mag-19, No.6 (1983)
- 7) 有本 卓: 数値解析(1) (コロナ社, 東京, 1981)