Numerical Analysis of the Core Dimensions of a Magnetic Fault Current Limiter Assuming a Practical Design and Trial Production

H. Nakamichi, K. Yotsutsuji, S. Yamada, and M. Iwahara

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, *Kakuma machi, Kanazawa 920-1192, Japan*

Recently, current suppression devices such as fault current limiters (FCLs) have been required to reduce excessive currents in power distribution lines when the short-circuits occur in the expanding electric power systems, which have high impedance in the fault condition and the low impedance in the normal condition. To realize the required operation, the dc magnetization point of magnetic fault current limiters must be designed to lie in the saturation region under normal conditions. Since a the magnetic FCL is characterized by a dc magnetization point, which depends on the shape of the magnetic core and the magnetic properties, numerical analysis was performed and experimental discussions were held to establish a design procedure for FCLs.

Key words: magnetic FCL, magnetic circuit, dc magnetization point, equivalent permeability

実用設計を想定した磁気式限流器磁心寸法の数値解析とその試作

中道 勇人・四辻 和也・山田 外史・岩原 正吉

金沢大学自然科学研究科, 石川県金沢市角間町 (〒920-1192)

1. はじめに

現代技術の電気への依存性はますます高まっており、電力需要は今後も高まることが予想される。その結果、万一電力系統に故障が発生すると、大きな短絡、地絡電流が流れ、甚大な被害を系統にもたらしかねない。これに対し、電力系統ではこのような故障電流から電力系統を保護し、かつ事故の広範囲な拡大を防止する方法として各種の保護機能が準備されている^{1),2)}。故障電流を極力小さくすることができれば、各種の被害を低減できるばかりでなく、系統運用の面において系統安定度の向上や瞬時電圧低下の抑制効果にも役立つなど大きな利点を有する。また、故障対策だけではなく老朽機器の延命や遮断器の短絡容量低減の点で有効であり、電力自由化による本格的な価格競争や設備投資の低下によるコスト削減方法としても有用である。そこで、電力用各種故障電流抑制用限流器(FCL: Fault Current Limiter)の開発・実用化が望まれており研究されている^{3),4)}。

これまで磁気式限流器についてE型巻鉄心を想定し、限流率に基づきその最適形状が検討されている⁵⁾。本文では数kVA程度の配電向け磁気式限流器を実用化するに当たり、その設計手順確立のために必要な直流偏磁点と磁心寸法の関係を調べ、更に等価インダクタンスを用いた数値計算による検討を行い、実際に装置を試作し検討をする。

2. 磁気式限流器の動作原理と直流偏磁点

限流器は Fig.1 のように回路に挿入され Fig.2 のような特性を持つことが求められる。すなわち、Fig.2 中の限流開始電流 I_{linek} 以下では低インピーダンスで電圧降下は小さく、電流の抑制はほとんどなく、限流開始電流以上では高インピーダンスで電圧降下が大きくなり電流が抑制される。磁気式限流器では、通常動作時は磁心の磁気特性の飽和域

が低インピーダンスであることを利用し、故障時(大電流時)は不飽和域が高インピーダンスであることを利用して動作させる⁵⁾。

対象とする磁気式限流器は Fig.3 に示す形状の磁心中央脚に永久磁石を挿入し構成される複合型磁心の左右脚に巻線を巻いた構造をしており、この複合型磁心の動作点⁵⁾は Fig.4 のように永久磁石の磁気特性(線形近似)と磁心の全体的な磁気特性(折れ線近似)の交点となるが、磁気式限流器は巻線下で動作することを考慮すると動作点である直流偏磁点は Fig.4 で示されるP点となる。然るに、装置はこの直流偏磁点Pを中心に動作することから、磁気式限流器の設計に強く影響する。そこで、限流器の設計仕様を念頭においた磁心と永久磁石の形状及び直流偏磁点との関係を明らかにしておく必要がある。

Fig. 1 FCL in a power distribution circuit.

Fig. 2 Required characteristics of a FCL.

Fig. 3 Shape of a FCL

Fig. 4 DC magnetization point.

3. 数値解析と磁心形状の検討

3.1 磁心寸法比と直流偏磁点

磁気式限流器の左右脚は Fig.3 のように左右対称で同一構造であり、中央脚に磁束 ϕ_c が流れるとする時の各部の回路方程式は次のようになる。

[永久磁石]

$$U_{im} = U_m - R_m \phi_c \quad (1)$$

U_m : 永久磁石起磁力, R_m : 永久磁石の磁気抵抗

[磁心中央脚]

$$\left. \begin{aligned} U_{ic} &= R_{cs}(\phi_c - \phi_k) - R_{cu}\phi_k; \phi_k \leq \phi_c \\ U_{ic} &= R_{cu}\phi_c; \phi_c \leq |\phi_k| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

R_{cs} : 飽和時中央脚磁気抵抗,

R_{cu} : 不飽和時中央脚磁気抵抗, ϕ_k : 磁心の飽和磁束

[磁心左右脚]

$$\left. \begin{aligned} U_{ip} &= R_{ps}(\phi_y - \phi_k) + R_{pu}\phi_k; \phi_k \leq \phi_y \\ U_{ip} &= R_{pu}\phi_y; \phi_y \leq |\phi_k| \\ U_{ip} &= R_{ps}(\phi_y + \phi_k) - R_{pu}\phi_k; \phi_y \leq -\phi_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

R_{ps} : 不飽和時左右脚磁気抵抗,

R_{pu} : 不飽和時左右脚磁気抵抗, ϕ_k : 左右脚の磁束

と表され、これらの式から得られる直流偏磁点の検討を行う。また、検討に当たり、直流偏磁点の適否を判断する必要がある。Fig.4 中の $\Delta \phi$ と最大限流器電圧 V_{fclm} は

$$V_{fclm} = N\omega\Delta\phi / \sqrt{2} \quad (4)$$

である。ただし、 N は巻数、 ω は角周波数である。(4)式より $\Delta \phi$ が大きくなると限流器電圧が大きくなることから限流効果も向上する。また ΔU と限流器を含む回路の回路電流 I_{line} は

$$NI_{line} = \Delta U / \sqrt{2} \quad (5)$$

となる。その上で、(1)~(3)式より直流偏磁点を求め、限流器の端子電圧、電流を求める。一方、解析時には、Table 1 に定義する Fig.3 に対応した磁心寸法比を用いる。数値解析で実際に用いた基準値は Table2 の値を使用し、永久磁石及び磁心の材料パラメータは Table3 の値を使用した。

Table 1 Definition of core dimension ratios.

τ	α	β	γ	ζ	χ
e/a	b/e	c/e	d/e	f/c	g/c

Table 2 Example of core dimension ratios.

a(mm)	τ	α	β	γ	ζ	χ
7.63	4	1	2.67	1.64	0.24	0.82

Table 3 Material parameters.

(a) Permanent magnet

Hc(kA/m)	955
Br(T)	1.28

(b) Magnetic core

Bk(T)	1.8
μ_{ru}	8500
μ_{rs}	85

a) 寸法比 τ

寸法比 τ を変化させ、断面積比を検討した結果より Fig.5 に示されるように $\tau=2.5$ 程度が必要である。また τ を大きくすることで $\Delta \phi$ 、 ΔU とともに大きくなる。

b) 寸法 a

磁心の大きさに直接関係する寸法 a が大きくなると、磁心が大きくなるため $\Delta \phi$ 、 ΔU とともに大きくなる。

c) 寸法比 α

寸法比 α は磁心の窓幅の寸法比であり、窓幅が影響する磁心部の磁心幅は中央脚と同じことから飽和状態になることはなく、特性に与える影響は極めて小さい。

d) 寸法比 β

寸法比 β は磁心の窓高さに関する寸法比であり、Fig.6 より、 β を大きくすることで ΔU のみが大きくなることがわかる。すなわち、設計の際に直流偏磁点の ΔU の値を調整するには、寸法比 β を変化させる（磁心の左右脚の磁路長を大きくすること）ことが有効である。

e) 寸法比 γ

寸法比 γ は磁心の厚さに関する寸法比であり、Fig.7 より、 γ を大きくすると $\Delta \phi$ のみが大きくなることがわかる。すなわち、設計の際に直流偏磁点の $\Delta \phi$ の値を調整するには、寸法比 γ を変化させる（磁心の断面積を大きくすること）ことが有効である。

f) 寸法比 ζ

寸法比 ζ は磁石幅に関する寸法比であり、(1)式の永久磁石の特性と(2)式の中央脚の特性に影響するが、(1)式の U および R_m ともに関係してくるので影響は小さく、また中央脚特性も α の時と同様断面積の関係から飽和領域に達せず影響は小さい。

g) 寸法比 χ

寸法比 χ は左右脚の削り高さに関する寸法比であり、(3)式が左右脚の特性に影響するため、 χ を大きくすることで ΔU が大きくなる。

Fig. 5 DC magnetization points for varying τ .

Fig. 6 DC magnetization points for varying β .

Fig. 7 DC magnetization points for varying γ .

3.2 設計に要する等価インダクタンス

限流器の見かけの透磁率である等価透磁率の検討を行う。限流器の等価インダクタンスを次のように定義する。

$$L_{eq} = V_{fcl} / \omega I_{line} \quad (6)$$

ここで、式(6)中の限流器における限流器電圧 V_{fcl} と回路電流 I_{line} の波形を近似的に検討する。回路電流 I_{line} の予想波形は Fig. 8 のように限流特性に合わせて限流開始電流 I_{linek} 以下(破線)では電流波形に変化は無く、 I_{linek} を超える(実線)と超えた領域が抑制される。次に限流器電圧 V_{fcl} の予想波形は、Fig. 9 のように限流領域 ($\theta_k < \theta < \pi - \theta_k$) では高インピーダンス時の電圧降下 (V_{fclf}) となり、非限流領域 ($\theta < \theta_k$, $\pi - \theta_k < \theta$) では低インピーダンス時の電圧降下 (V_{fcln}) となる。これらの予想波形を用いて(6)式の等価インダクタンス L_{eq} を導出すると次のようになる。

$$L_{eqs} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \{ \pi - 2\theta_k + \sin(2\theta_k) \} (L_u - L_s)} \quad (7)$$

L_s : 不飽和時インダクタンス, L_u : 飽和時インダクタンス

この式を用いることで等価インダクタンスと限流開始電流から得られる θ_k から L_s , L_u が求まり、さらに断面積、磁路長及び巻数から飽和時透磁率 μ_s , 不飽和時透磁率 μ_u が求まる。これらの値と磁心材料の磁気特性を合わせることで磁心材料を決定できる。

また限流器がどのように動作するかを知る上で(7)式を用いて計算を行った結果を Fig. 10 に示す。縦軸には等価透磁率 L_{eq} を不飽和時透磁率 L_u で割ったもの、横軸には κ として最大値電流 I_m を限流開始電流 I_{linek} で割ったものを用いた。この結果を用いることでインダクタンスがどの程度になるかをそれぞれの値から予測できる。

Fig. 8 Waveforms of the circuit current.

Fig. 9 Waveforms of the FCL terminal voltage.

Fig. 10 Characteristic of equivalent permeability.

4. 装置の試作と測定結果

得られた数値解析の結果に基づき、数 A で動作するような Fig. 11 に示す形状の磁心を作成し(左右脚を内側から 3/4 削ったもので数値解析の基準パラメータと同じ)、これを用いて限流器を試作し、Fig. 12 に示す回路で測定を行った。また、限流器のインダクタンスを考慮して電源電圧 $V_s = 30V$, 周波数 $f = 60Hz$ とした。限流器は磁心の飽和領域で動作するため負担すべき電圧及び巻線抵抗を考慮し巻数 N は片側 150 ターンとした。これらの数値から直流偏磁点を計算すると、Fig. 13 のようになり $\Delta U = 480$, $\Delta \phi = 0.0019$ となる。ここで巻数は 300 ターンであるため限流開始電流は 1.4A 程度と予測される。

次に限流特性の測定結果を Fig. 14 に示す。得られた限流特性は想定した通りとなった。

また、限流器の限流率 λ を

$$\lambda = I_{nonfcl} / I_{withfcl} \quad (8)$$

と定義する。ここで、 I_{nonfcl} は限流器無しの場合の回路電流、 $I_{withfcl}$ は限流器有りの場合の回路電流である。

その結果を Fig. 15 に示す。得られた結果より、5A 程度で λ が 2 近くまで達していることから限流器として動作していることがわかる。ここで、数値解析の開始電流より上が限流領域であり、限流器がスロースタート型であることから、限流特性上では数値解析の値より少し後で特性の折れ点が見られる。また、限流率特性上では 1.5A 程度増加傾向が見られ、数値解析の結果とも一致する。

通常時の各部の波形、故障時の波形を Fig. 16, Fig. 17 に示した。通常時の場合限流器の有無に関わらず電流の値がほぼ等しく、限流器電圧も大きくない。一方、故障時になると限流器を挿入することで電流の最大値が約半分となっており、更に限流器電圧も予測通りの波形でかつ振幅も大きいことから望ましい動作をしていることがわかる。

Fig. 11 FCL core for the experiment.

Fig. 12 Measurement circuit.

Fig. 13 DC magnetization points.

Fig. 14 Characteristics of the FCL.

Fig. 15 Characteristics of the FCL rate.

Fig. 16 Waveforms of the FCL in the normal condition.

Fig. 17 Waveforms of the FCL in the fault condition.

5. まとめ

数値解析により磁気式限流器の磁心寸法比及び各種磁気特性パラメータが直流偏磁点に与える影響を調べ、どの寸法比を変化させることで設計仕様を満足する直流偏磁点を得られるかを明らかにした。また、等価透磁率が各パラメータとどのように関係するかを調べ、等価透磁率を用いることで材料の選定及び限流器がどのような動作となるかを明らかにした。その後、数値解析の結果を利用して試作限流器を作成し評価を行った。その結果、限流特性は予測通りの限流特性が得られることが明らかになり、限流率として使用可能な現実的値まで達しているものが実現できた。加えて、数値解析の結果から予測した値と作成した装置から得られた実験値がほぼ等しく数値解析の有効性が示された。

現在限流器としての容量が小さく、所要電圧より低い電圧でしか動作しないので、今後は、所要の限流特性を実現するにあたり限流器自体のインダクタンスを大きくするため磁心の左右脚の断面積を確保することが最も重要であり、そのためには直流偏磁点と寸法比の検討からもわか

るように磁心の脚幅と奥行き寸法を大きくとることが課題となる。

謝辞 終わりに、本研究は(株)日立製作所にご協力戴きました。ここに記して深謝致します。

References

- 1) Standstill device technology committee of IEEJ Trans. Power and Energy: Present Conditions and Prospects of Fault Current Limiting Technology, *Technology report of IEEJ*, No.850 (2001)
- 2) H.Shimizu: Current State and Trends of Fault Current Limiting Technology, *IEEJ Trans. Power and Energy*, No.125 (2005)
- 3) Michael Steurer, Klaus Frohlich : CURRENT LIMITERS STATE OF THE ART, Conference on EHV Tech(1998).
- 4) N.Engelman,E.Seherurs,and B.Drugge: Field Test Result for a Multishort 12.47kV Fault Current Limiter, *IEEE Trans.PowerDelivety. VII.6 No.3*, pp.1081-1086 (1991)
- 5) M.Shima,S.C.Mukhopadhyay,M.Iwahara,S.Yamada: Analysis about Characteristics of Fault Current Limiter Using E type core, *Trans.Magn.Soc.Jpn*, Vol. 24,No.4-2, pp.811-814(2000)

2005年10月19日受理, 2006年1月16日採録