電源用低損失 Mn-Zn フェライト (BH1) の開発

山田 盛一^{*1)} 大塚 努^{*1)} 庄司 潔^{*2)}
山家 孝志^{*3)} 米倉 淳^{*4)}

1. はじめに

近年急速に進展しつつある電子機器の小型軽量化および省電力化に伴い、それら機器に用いられるスイッチング電源の小型化、軽量化、高効率化が図られてきている。スイッチング電源を構成する部品のなかで、トランスは体積、電力損失のいずれにおいても大きな比率を占めている。そのため、特性改善とくにコア材料に用いられる Mn-Zn フェライトの損失特性改善が精力的になされてきている。我々は Mn-Zn フェライトの渦電流損失が実験的に求められることを初めて明らかにし、損失成分を定量的に求めた。それに基づき焼結体の組織形態に及ぼす製造条件を把握し、従来の電源用トランス材に比べ 100 kHz におけるコアロスを大幅に低減した Mn-Zn フェライトを開発した。

2. 開発の経緯

(1) 電源用 Mn-Zn フェライトのコアロス成分

Mn-Zn フェライトの磁気特性は、主成分組成、微量添加物の種類と添加量、添加物の分布形態および微細組織形態などの種々の因子で決定される。B サイトの Fe^{3+} イオンは、その一部が還元されて Fe^{2+} イオンになりスピネル相の結晶磁気異方性および電気抵抗を決定している。この Fe^{2+} イオンの割合は、焼結過程の温度と酸素分圧、冷却過程の速度などの焼結過程の酸素ポテンシャルによって決定される。

また、Mn-Zn フェライトは、金属不足型酸化物であり、カチオン欠陥などの化学量論組成からのずれは内部応力を増大させることで磁気弾性異方性を増し、磁区構造および透磁

率の温度依存性を変えるなどの影響を与えることが知られている。このように酸素ポテンシャルは、焼結体の磁気特性を大きく左右する。そのため、コアロスを実験的分離が可能なヒステリシス損失 P_h と渦電流損失、誘電損失および残留損失の和である $(P_B - P_h)$ に分け、 Fe^{2+} イオン量、 O^{2-} イオン量などのスピネル相の不定比性に対する各成分の依存性を調べ、コアロス成分を定量的に求めた。 P_B は全コアロスである。ここで Mn-Zn フェライトの主成分組成は、

$$\text{Mn}_\alpha\text{Zn}_\beta\text{Fe}_\gamma^{2+}\text{Fe}_{2+2\delta}^{3+}\text{O}_{4+\delta} \quad (1)$$

$$\gamma = 1 - (\alpha + \beta + 2\delta)$$

で表される。主成分 Mn, Zn, Fe 量 $\alpha, \beta, 2+2\delta+\gamma$ を蛍光 X 線分析で求め、 Fe^{2+} 量はクーロン滴定法で求めた。その結果、組成が $\alpha=0.69\sim 0.72$, $\beta=0.21\sim 0.22$, $\gamma=0.05\sim 0.09$ の範囲で、 Fe^{2+} 量に対する室温での 100 kHz, 200 mT での $(P_B - P_h)$ の依存性は、図 1 に示すように Fe^{2+} 量の増加に伴い減少する傾向を示した。同様に電気抵抗も γ の増加に伴い低下する傾向を示した。 $(P_B - P_h)$ と電気抵抗が γ に対して同じ依存性を示すため、両者には何らかの相関があるものと考えられる。しかし、室温でのコアロスと電気抵抗は明確な相関を示さない。これは、 Fe^{2+} 量の異なる試料では室温での結晶磁気異方性定数 K_1 が異なり磁区構造に違いが生ずる

図1 室温でのコアロス成分 $(P_B - P_h)$ の Fe^{2+} の量依存性。

* 株式会社トーキン電子材料事業本部
商品開発部: 1) 課長 3) 主任
フェライト事業部技術部: 2) 主任 4) 部長
Development of a Low Power Loss Mn-Zn Ferrite (BH1);
Seiichi Yamada, Tsutomu Otsuka, Kiyoshi Shoji, Takashi
Yanbe, Atsushi Yonekura (Tokin Corporation)
1996年1月31日受理

ことに起因すると考えられる。一方、 $K1$ が 0 になる温度では Fe^{2+} 量の違いに関わらず同じ磁区構造を持つと考えられる。また、 $K1$ が 0 になる温度ではヒステリシス損失が最小値をとる。よって、ヒステリシス損失が最小値をとる温度を $T_{\min}$ とすると、 $T_{\min}$ における $(P_B - P_h)$ と電気抵抗は明確な相関をもつと考えられる。その結果を図 2 に示す。同図から、 $(P_B - P_h)$ は電気抵抗に反比例する成分と電気抵抗に依存しない成分から成っていることが分かる。つまりコアロスの電気抵抗依存性は式 (2) で表される。

$$P_B - P_h = k/\rho + b \quad (2)$$

式 (2) において電気抵抗の係数 k の励磁条件依存性を知ることで式 (2) 右辺のコアロス成分を明らかにできるものと考えた。ここで、図 2 に示すデータは、焼結条件を種々変えて得られた電気抵抗の異なる試料を用いて求められたものであるため、相関にばらつきが見られる。このようなばらつきをなくすため、同一の焼結条件で作製し、かつ電気抵抗の異なる試料を得るために、 SiO_2 および CaO の添加量を変えた試料を作製した。

この試料を用いて P_B および P_h を測定し係数 k を求め、 f および B_m 依存性を計算した。その結果を図 3 に示す。 f 依存性においては、 B_m は下線から順に 10, 20, 50, 70, 100 mT、

図 2 $T_{\min}$ での $(P_B - P_h)$ と $1/\rho$ の相関関係 (R は相関係数である.)

図 3 係数 k の周波数および励磁磁束密度依存性。

B_m 依存性においては、周波数は 100, 200, 300, 500, 700, 1000 kHz である。同図から係数 k は周波数と励磁磁束密度のおおの 2 乗に比例することが分かった。よって、式 (2) の右辺第 1 項は、下式で表されることになり、これは渦電流損失を与える式に他ならないことが明らかになった。

$$k/\rho \propto f^2 B_m^2 / \rho \quad (3)$$

よって、式 (2) の電気抵抗に依存する成分は渦電流損失であり、また電気抵抗に依存しない成分は全コアロスからヒステリシス損失と渦電流損失を差し引いた成分であるから残留損失 P_r であると結論することができる。つまり、コアロス P_B は、

$$P_B = P_h + \text{const} \cdot f^2 B_m^2 / \rho + P_r \quad (4)$$

与えられる。以上のように従来は行われていなかったが、ヒステリシス損失が最小となる温度でのコアロスおよび電気抵抗の測定値の相関を取ることで、コアロス成分をヒステリシス損失、渦電流損失および残留損失に定量的に分離することができることを明らかにした⁽¹⁾⁽²⁾。

これによって、実用に供する際の励磁条件における各コアロス成分を定量的に求めることができ、よって改善すべきコアロス成分を明らかにすることができるようになった。

(2) 100 kHz 用電源フェライトのコアロス成分とその改善

Mn-Zn フェライトのコアロス成分の中で主要となる成分は使用条件によって異なるものと考えられる。これを明らかにするため、上述した SiO_2 と CaO の添加量を変えて作製した試料を用いて、電気抵抗とコアロス成分の関係を求めた。その結果を図 4 に示す。

従来から Mn-Zn フェライトのコアロスの低減はその電気抵抗を高めることで達成されてきた。しかし、図 4 から 100 kHz では $T_{\min}$ での直流電気抵抗が $0.1 \Omega\text{m}$ 以上であれば渦電流損失は十分に低減されており、電気抵抗を高めるだけではこれ以上の改善は困難であると結論できる。このとき

図 4 渦電流損失と残留損失の全コアロスに対する割合の直流電気抵抗による変化 ($f=100$ kHz, $B_m=100$ mT, 100°C)。

図5 結晶粒径とポア径の関係。
(○: N₂, △: 1%PO₂, □: 大気)

の主要なコアロス成分はヒステリシス損失であり、全コアロスの70%を占めていることが分かった。したがって100 kHzの周波数帯域で使用するMn-Znフェライトのコアロスは、ヒステリシス損失の改善を必要としていることが明らかである。よって、我々はMn-Znフェライトのヒステリシス損失改善を試みた。ここで、ヒステリシス損失は以下の6種類の因子に支配されている⁽³⁾。

①結晶磁気異方性エネルギー K_1 , ②飽和磁歪定数 λ_s , ③残留応力 σ , ④結晶粒径 D , ⑤ポアの体積 v , ⑥飽和磁化 M_s 。

ヒステリシス損失を低減するには、磁壁を動きやすくするために K_1 , λ_s , σ および v を小さくすることが必要である。これらの因子のなかで、項目④, ⑤に示される焼結体の組織形態がヒステリシス損失に与える影響を考える。結晶粒径は大きくすることが好ましいが、高電気抵抗を有する粒界層の割合が減少するため、渦電流損失を増大させる原因になると考えられ、通常は、平均結晶粒径は10~15 μm の範囲で設計されている。結晶粒内ポアは、その表面に磁極を発生し磁壁をピン止めする作用があるため、相対的に結晶粒径を小さくする働きがある。よって、結晶粒内にポアの無い組織形態を作ることが必要である。以上のことから、ヒステリシス損失の低減には結晶粒内にポアが無く均一な結晶粒径の組織形態をもつ焼結体を作ることが不可欠であることが分かる。このような組織形態を作るために、種々の焼結条件と焼結体組織の関係を調査した。その一例として種々の焼結雰囲気での結晶粒径とポア径の関係を図5に示す。

これらの結果から、比較的低酸素分圧中で焼結することでポアが小さく結晶粒径が大きくなることが分かった。また、昇温速度についても同様に結晶体組織の変化を把握し、酸素分圧との最適な組合せを求めることで、ポアが少なく均一な結晶粒径をもつ焼結体を得る条件を確立した。このような焼結条件の最適化と合わせてFe-Mn-Znの主成分組成を見直すことで、低損失で高磁束密度を有する新しい電源用Mn-Znフェライト材を開発することができた。

以下にその製品特性を示す。

図6 コアロスの温度依存性 ($f=100\text{ kHz}$, $B_m=200\text{ mT}$).

表1 開発材の材質特性。

項	目	BH1	B25
交流初透磁率 μ_i		2,500	2,300
飽和磁束密度 $B_{15}(\text{mT})$		520	510
キュリー温度 ($^{\circ}\text{C}$)		220	220
コアロス (kW/m^3)	25 $^{\circ}\text{C}$	550	600
100 kHz, 200 mT	100 $^{\circ}\text{C}$	250	410

3. 製品特性

図6に従来材(B25)と比較して100 kHz, 200 mTのコアロスの温度依存性を示す。100 $^{\circ}\text{C}$ でのコアロスは250 kW/m^3 で、従来材に比べ40%の低減を達成することができた。表1に開発材BH1の各種電磁気特性を従来材B25と比較して示す。スイッチング電源用フェライトコアBH1材は、コアロスを著しく低減したことと合わせて飽和磁束密度を高めたことでチョークコイルなどに要求されるインダクタンスの直流重畳特性も改善されている。よって、本開発材はスイッチング電源の更なる小型化・高効率化に寄与できるものである。

4. まとめ

Mn-Znフェライトの Fe^{2+} および O^{2-} の不定比性に対するコアロスおよび電気抵抗の依存性を詳細に調べ、全コアロスから各コアロス成分を定量的に求める方法を見出した。この手法を用いて使用条件で支配的となるコアロス成分を明らかにし、均一な焼結体組織となる条件を確立しコアロスを大幅に低減した新材料を開発した。

・出願特許5件

文 献

- (1) E. Otsuki and S. Yamada: Am. Ceram. Soc., **3**(1995), 147.
- (2) 山田盛一, 大槻悦夫: 日本応用磁気学会誌, **19**(1995), 421.
- (3) Th. G. W. Stijntjes: Proc. of ICF5(1989), 587.