宇宙用スイッチングトランス

国見 武伯* 長谷川 育夫**

廣田 洋太郎** 鈴木 雄作***

Switching Transformer for Space Application

Takenori Kunimi*, IKuo Hasegawa**, Yotaro Hirota**, Yusaku Suzuki***

Abstract: 高周波スイッチングトランスはその性質上多様な環境、多目的の性能が要求される。特に宇宙用については小型軽量、耐熱サイクルが要求される。本報告では特に宇宙用の究極の要求仕様に対して解析の例を報告する。報告内容は

1. 階段型ギャップをもつスイッチングトランスの階段状の L-I 特性の問題
2. スwitchングトランスのギャップのスペーサ構造の材料による高・低温における熱応力の問題とその解決策について報告する。

キーワード: スwitchングトランス, 宇宙用

Keywords: Switching Transformer, Space Application

1 前書き

NASA が 1970 年頃に 電源の小型化、軽量化のため、アポロ計画にトランスを小型化した、スswitchング電源を開発して人口衛星に搭載したのが、スswitchング電源 ひいてはスswitchングトランスの最初であったこと良く知られている。

その後、日本では 1975 年頃から、民生用高周波スswitchングトランスが、例えばコンピュータゲームマシンなど、各種の用途に使われるようになった。

さて、今日宇宙用に使われるスswitchングトランスは特に軽量化、高信頼性化、耐環境性能が要求される。その設計の最適化においては高度な磁界解析をはじめとして熱解析、構造解析が必要となる局面が多い。

これらの要求事項として、トランスについては、JAXA-QTS-2110A で部品の要求事項がまとめられている。これらの要求事項を考慮し、本報告では特に究極の要求仕様に対し CAE を用いて解析した例を報告する。

2 異型ギャップのトランス

2-1 従来型のトランスのギャップ構造

特に宇宙用のスswitchング電源については軽量化が求められている。スswitchング電源等に用いられる 2 次側の平滑用チョークコイルは、所定の電流値までインダクタンスを発生させる必要がある。このため、従前から、コアの中足のつきあわせ部分を研磨により、空隙を作成し、磁気抵抗を増

やすことにより磁気飽和がおきないようにしている。磁気

回路全体の磁気抵抗はコアと空隙のそれぞれの磁気抵抗の直列接続である。一方空隙の大きさはインダクタンスに密接な関係があり、空隙が大きくなると電流が小さい時の初期インダクタンスが小さくなる関係がある。

図 1 に通常型のギャップを有したコアの形状を示し、図 2 にこれを使用したインダクタの直流重畳特性を示す。

ギャップ付コア 図 1

図 2 通常インダクタ (EE 42) の L-I 特性

* 田淵電機株式会社 R&D センター R&D 室

** 田淵電機株式会社スswitchング電源事業部デバイス開発部

*** 株式会社日本総研ソリューションズエンジニアリング本部電磁場技術部

〒532-0003 大阪市淀川区宮原 4-2-21

〒334-0013 埼玉県鳩ヶ谷市南 3-23-7

〒104-0053 東京都中央区晴海 2-5-24

2-2 異型ギャップトランスの必要性

通常のインダクタを搭載したスイッチング電源は出力が軽負荷になったときの不連続モードにより、異常発振を防ぐため、2次回路に通常ブリーダ抵抗をいれて、常時電流を流しておくことが多い。しかし、無負荷時に電流を流す事は電源の効率を下げることに繋がる。効率アップの為には、電源の負荷出力が小さいときには高インダクタンスとなり、二次側の電流を下げるができ、電流が大きいときは低インダクタンスとなるようなトランスが望ましい。

図3 異型ギャップコアの例

このような2つの特性をもったチョーク

コイルはPFCの特性向上にも望ましく、また宇宙用トランスにおいてもトランス、コイルの小型化、軽量化にとって必要なものである。

2-3 各種の異型ギャップのコア

図4 各種異型ギャップ

図4は 各種の異型ギャップのコアの提案例である。また 中足の素材を変更した複合コアも提案されている。

しかし、これらのトランスやコイルの設計法が確立していないため、一つの提案として 磁界解析の初めて利用した報告をここに行う。

2-4 磁界解析モデル

各種の異型ギャップのトランスから階段状の異型ギャップをもつコアを選び、チョークコイルの電流、インダクタンス特性を予測するために 図5 に示すモデルを使用した。

図5 解析モデル

図6 コイルモデルと材料 フェライト TDK PC40 材

2-5 材料

コアには 通常に市販されているフェライト材 TDK PC40を使用した。BH カーブから点列を読み取り、その値を磁界解析ソフトウェアの条件とした。

図7 フェライトBH 特性 (25 度)

図8 フェライトBH 特性 (100 度)

2-6 LIギャップのインダクタンス特性

図9 インダクタンス重畳特性 (25度)

図10 インダクタンス重畳特性 (100度)

EE40 のフェライトコアを使い、 0.55Φ のエナメル銅線を2本50ターン、一次二次セクションに巻きまわしたサンプルの実測値と解析の比較結果を図9、図10に示す。双方の特性はよく一致しており、0.7A まででは高インダクタンス1A以上では高インダクタンスの20%程度の低インダクタンスのチョークコイルが実現できることを示している。

2-7 磁束密度分布

図11 磁束密度分布

異型L型ギャップコイルのインダクタンスの2つの動作点の相違を図11の磁束密度分布にてしめす。

2-8 考察

- ・ 階段状の gap の影響で、電流を増やしたときのインダクタンス特性も階段状となる。
- ・ インダクタンスの落ち込むポイント（電流値）は実測と解析でよく一致している
- ・ 電流を増加すると、磁気飽和により、フェライト部の磁束増分が減り、空隙部へ平均化することが磁束密度分布からも分かる
- ・ 異型 gap の切削、研磨は割れやすいため歩留まりが悪く金型作成が必要なこともある。また、計算式なども公開されているが、いくつかの仮定を伴いトライ・アンド・エラーも必要である。このことから磁界解析による仮想試作が非常に有効であることがわかる

3 新型スパーサの応用

3-1 ギャップスパーサ材

前述してきたように、スイッチング電源やリアクトルのコアではインダクタンスの確保のため、ギャップが必要である。ギャップが存在するために、交流磁気吸引力により、振動が問題となる。この振動、うなりに対処するため、ギャップに拘束力を持たせることが行われており、ギャップ中に接着剤などの締結材をいれることが通常である。この接着剤の熱膨張率とコアの熱膨張率の差により、熱サイクル時に破損することがある。特に宇宙空間のように、低温から高温まで使用される電子部品においてはこの収縮、膨張が起きても、トランスには十分な信頼性が保証されねばならない。このため、新しいスパーサ材を開発し、宇宙空間の使用に耐えるトランスを開発したので、その特性の磁界—温度—熱応力の連成解析を行い十分な応力特性が得られたので報告を行う。

スパーサ材に要求される事は

- 1 熱膨張率が少ないこと。
- 2 過酷な環境下でも特性的に安定していること。
- 3 絶縁性能が良好なこと
- 4 コアなどと膨張率が近接していること。

が 条件となる。

3-2 解析モデル

図 1 2

図 1 2 のように EE コアを有したトランスの熱応力を求める。

3-3 トランス材料

部品	材質	線膨張係数
コア	フェライト	1.0×10^{-5}
スパーサ(試料1)	アルミナ	1.0×10^{-5}
スパーサ(試料2)	エポキシワニス	1.7×10^{-4}

表 1 トランス材料表

トランスのギャップに使う試料 1 は新開発のアルミナ系スパーサを使った。ほぼ 線膨張係数はフェライトと同じである。また試料 2 として通常コアの固定に使われるエポキシワニスを使った。 コアは通常のフェライトコアである。

3-4 応力解析結果

試料1 最大応力:5.78e-1(Pa)

試料2 最大応力:5.53e+7(Pa)

図 1 3 150 度での応力解析

特殊アルミナスパーサの場合、応力はエポキシ接着剤の一億分の 1 と非常に小さいものに押さえられている。

試料1 最大応力:2.50e-1(Pa)

試料2 最大応力:2.39e+7(Pa)

図 1 4 -65 度での応力解析

図 1 3, 1 4 に近い大きい変位応力が冷熱繰り返し試験でトランスに加えられる。

3-5 ヒートサイクル試験での検証
当該コアを冷熱試験にかけた。 結果は

試験方法	冷熱サイクル試験
試験条件	-40℃30分→125℃30分
試験サイクル回数	650サイクル

試験結果

新スペーサの場合	合格
通常のエポキシ系接着剤系の場合	NG

表 2 新スペーサ信頼性試験

新スペーサは宇宙用として、十分な対環境性能に達しているといえる。

3-6 考察

フェライトコアと線膨張係数の差が小さい試料1にはほとんど応力が働かないで、相似形で膨張、縮小するフェライトコアとの線膨張係数が大きく異なる試料2には大きな応力が働く

以上の結果から、ギャップ部の材料として試料1が適していることが分かる。

4 全体考察

パワーエレクトロニクスにおいては スイッチングトランスは重要部品の一つである。宇宙用のために 特に開発設計、解析を行ってきたが、これらの成果は今後 広範囲の用途に展開できる知見を提供出来たと思う。民生機器でも待機電力時での振動騒音が話題となり、また薄型軽量化も重要事項である。今後論文の知見が展開出来る事を期待する。

【 質 疑 】

大阪大学・三浦 友史 氏

【 質問 1 】宇宙用トランスの温度条件等の要求仕様は？

【 回答 1 】JAXA の QTS 仕様などで 定められている。動作周囲温度範囲は -55 度 ～ 100 度である。

【 質問 2 】インダクタンスの値が急激に変化する目的は？急激な変化は回路動作に影響ないのか？

【 回答 2 】「スイングチョークコイル」と呼ばれ既知されている磁気特性。この特性を活かして回路のパラメータ切り替えに利用される。最小負荷と最大負荷と割り切った 2 つのモードでの利用が望ましい。インダクタンスが変化している不感帯での動作はさける。

【 質問 3 】「磁界解析をはじめて利用した」とはどのような意味か？それまでは経験ですか？

【 回答 3 】社内的には設計件数も少ないため、実験値から GAP 形状を定めている。解析ツールの利用により、フェライトコア研磨技術に制限されない自由な発想で形状を決めることができる。

【 質問 4 】熱の条件の与え方、拘束条件は？

【 回答 4 】周囲温度の上昇として条件を与えています。また拘束条件はコアの下部を擬似固定して膨張の様子を解析しています。

【 質問 5 】産業応用の具体例は？

【 回答 5 】例えば、電話回線のインターフェイス回路（オンフックオフフックで直流重量電流が切り替わる）や電源フィルタ回路などです。

大阪工業大学・木村 紀之 氏

【 質問 1 】このようなコアは大学関係者でも入手できるか？

【 回答 1 】可能です。JFE フェライト㈱の MBT1 などの温度フラット材などが入手できると思われます。

【 質問 2 】解析に使われたソフトウェアはなんですか？

【 回答 2 】株式会社日本総研ソリューションズの JMAG ソフトウェアの各モジュールです。

ダイキン工業（株）・浅野 能成 氏

【 質問 1 】アルミナスペーサとコアの接合方法は？

【 回答 1 】接合していません。コア全体を両側からクランプして係合しています。

大阪府立大学・白波瀬 真人 氏

【 質問 1 】議論しているインダクタンスは磁束を電流で割ったものか？電流に対する磁束の変化率なのか？

【 回答 1 】解析及び実験値は 1kHz1V 以下または 10mA 以下の入力信号に対するインピーダンスをインダクタンスとして換算した値。

【 質問 2 】B-H カーブはどのような形を描くのか？ヒステリシスが 2 つ重なったような形か？

【 回答 2 】標準的なギャップが無い場合のヒステリシスカーブに対して直流が重量されたカーブ上でのマイクロヒステリシスになる。2 つ重なった形にはならない。

島根大学・中濱 真之 氏

【 質問 1 】JMAG で漏れフラックスをシミュレートできるか

【 回答 1 】JMAG では漏れフラックスを含め、磁場解析の殆ど全ての分野の解析が可能である。

【 質問 2 】トランス脚の片側だけ熱せられる条件で解析できるか

【 回答 2 】解析可能です。