3次元磁気回路と電気回路の直接結合による 直交磁心形電力変換器の動作解析

正員 田島 克文 (秋田大学)

正員 加賀 昭夫 (秋田大学)

正員 一ノ倉 理 (東北大学)

Performance analysis of the orthogonal-core type converters based on a circuit system combined with the reluctance network model of the orthogonal-core and the outer electric circuits.

Katsubumi Tajima, Member, Akio Kaga, Member (Akita University), Osamu Ichinokura, Member (Tohoku University)

In this paper, the performance analysis of the orthogonal-core type power converters have been developed by the use of a new network analysis, in which the reluctance network of an orthogonal-core and the outer electric circuits coupled with each other. According to the method, the performance analysis of the converter is carried out easily and speedy under the consideration of the orthogonal-core flux distributions. The results are possibly applied to the circuit analysis included semiconductor elements and transient phenomena. Therefore the method in this paper is very useful for the analysis and design of the orthogonal-core type power converters.

キーワード：直交磁心，非線形磁気応用，reluctance network，パラメトリック変圧器

1. まえがき

直交磁心は立体的な磁心構造を有する磁気素子であり、磁心の飽和特性を利用することにより一種の変圧インダクタンスとして動作する⁽¹⁾。この直交磁心の変圧インダクタンス特性を利用すれば、パラメトリック変圧器⁽¹⁾、 $dc-ac$ 連系電力変換器⁽²⁾等、種々の電力変換機器を構成できる。これらの直交磁心形電力変換器は構成簡単、保守容易であり、かつ原理的に雑音ろ波機能を有しているため⁽¹⁾、その特長を生かした応用が検討されてきた。

最近では、ダイオードと直交磁心とを組み合わせた新しい回路方式（プッシュプル方式）の提案など、半導体素子を構成要素とすることによる本変換器の高機能・高性能化が報告されており、太陽光発電システム用 $dc-ac$ 変換器、高調波障害対策用電源装置等としての実用化が期待されている^{(3)~(5)}。

しかし、半導体素子と直交磁心を組み合わせた回路構成は一方で、直交磁心の磁心動作の複雑化をもたらす。直交磁心の特性が変換器の特性に与える影響は大きく⁽⁶⁾、過渡現象解析等の詳細な動作解析を行う場合には、磁束密度分布の変化など直交磁心の磁心動作を考慮した解析手法が必要となる。

一般にこのような問題は、磁気-電気回路の連成問題として解析される場合が多い。しかし直交磁心の解析は、そ

の立体的な磁心構造、磁心の磁気飽和を考慮する必要からいわゆる3次元非線形問題となり、かつ変換器回路には半導体素子が含まれることから、通常行われる有限要素法の適用は計算時間、使用メモリ量の点から実用的ではない。他の非線形磁気応用機器においても、解析例は磁心構造及び回路構成が簡単なものに限られ⁽⁷⁾、直交磁心形電力変換器の詳細な動作解析法は未だ提案されていないのが現状である。

これに対し、先に筆者らが提案した、3次元磁気回路モデルに基づく直交磁心の特性推定法^{(8),(9)}は磁心動作を考慮した解析が可能であり、高速で算定精度も高く、その計算にはSPICE, SABER等の市販の回路シミュレータを適用できる。このため、変換器の電気回路と結合した解析が可能であれば、半導体素子を使用することによる直交磁心の複雑な磁心動作を考慮した、変換器の詳細な動作解析を簡単かつ高速に行うことが期待できる。

本論文では、以上の考えに基づく動作解析法の詳細について述べるとともに、本手法を用いてプッシュプルパラメトリック変圧器の定常解析及びプッシュプル $dc-ac$ 変換器の過渡現象解析を行い、その妥当性について検証を行う。

2. 直交磁心の基本特性

実験及び考察に用いた直交磁心は、図1に示すように、同

図1 磁心形状及び巻線配置

Fig. 1. Core and winding configurations of an orthogonal-core.

図2 磁化特性測定例

Fig. 2. Flux-MMF relationships.

一形状のカットコア2個を空間的に90°転移接続して構成される。図中の a , k , d は磁心寸法を示す。磁心材質には0.35mm厚の方向性ケイ素鋼を用いた。 N_1, N_2 は1次及び2次巻線であり、各々磁心脚部に施している。 i_1, i_2 は1次及び2次巻線電流を示す。このときの1次及び2次磁心磁束 ϕ_1, ϕ_2 の流れを破線により概略的に示した。図中の R_1, R_2 は1次及び2次巻線抵抗である。

直交磁心は、1次巻線と2次巻線の磁氣的結合は小さく通常の変圧器としては動作しない。しかしながら、1次と2次の磁路が磁心接合部で一部共有されているため、この部分で磁気飽和を生じた場合、1次と2次との間で相互作用を生じるようになる⁽¹⁰⁾。

図2に、ヒステリシスを無視した場合の直交磁心の2次側磁化特性の測定例を示す。図をみると、1次側からの励磁により2次側からみた実効的なインダクタンスが低下し、直交磁心が一種の変可変インダクタンスとして動作していることが了解される。

この直交磁心の特性を計算するには、1次と2次の共通磁路である磁心接合部分の磁気飽和、及びそれに伴う漏れ磁束の発生・磁心磁束分布の粗密を考慮する必要がある、いわゆる3次元非線形問題を解析可能な手法が必要となる。このような問題に対し、有限要素法の適用は計算時間、使用メモリ量の点から実用的ではない。

筆者らは以上の理由から、直交磁心の3次元磁気回路モデルに基づく特性推定法を提案している^{(8),(9)}。次章において本モデルの詳細について述べる。

図3 3次元磁気回路モデルの導出

Fig. 3. Model of 3D magnetic circuit for an orthogonal-core.

3. 直交磁心の3次元磁気回路モデル

本磁気回路モデルは任意磁心形状の直交磁心に対し、複雑な磁束分布を考慮した特性算定が可能となるよう、以下の過程より導かれている。

解析領域には漏れ磁束を考慮するために磁心外空間も考慮し、それを磁心部分と非磁心部分に分けて図3(a)に示すように磁心寸法を考慮していくつかの要素に分割する。各々の要素を同図(b)に示すような磁束の3次元の流れに対応した簡単な磁気回路で表現することにより磁束分布をある程度考慮した直交磁心の3次元磁気回路モデルを導くことができる^{(8),(9)}。

図中の磁気抵抗、インダクタンスは各々その部位の磁化特性、ヒステリシスを表現するものであり、その特性 F, F' は各要素の寸法より導かれる磁路長 L 、断面積 S 及びその部分の材質の磁気特性を非線形性を考慮して関数近似し、次式で与えている^{(8),(9)}。

$$F = L \cdot \left\{ \alpha_1 \frac{\phi}{S} + \alpha_m \left(\frac{\phi}{S} \right)^m \right\}, F' = L \cdot \left\{ \beta_1 \frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} + \beta_n \left(\frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} \right)^n \right\} \quad (1)$$

式中の $\alpha_1, \alpha_m, \beta_1, \beta_n$ は定数であり、 m, n は3以上の奇数としている。

本論文では磁心材質に方向性ケイ素鋼帯を使用していることから、材質の磁気特性の異方性も考慮し、鋼帯の圧延方向、圧延と直角方向、積層方向の各々に対し、異なる $\alpha_1, \alpha_m, \beta_1, \beta_n$ を与えている⁽⁹⁾。積層方向の特性には占積率、交流励磁時のうず電流の影響も考慮した⁽⁹⁾。

また、巻線による起磁力は空間的な分布は無視し、図4に示すように磁心脚部を2分してその間に集中しておくものとした⁽⁹⁾。これより、任意の巻線電流 i_1, i_2 に対する磁束分布及び磁心磁束 ϕ_1, ϕ_2 を求めることができる。計算には市販の回路シミュレータを使用可能であるため、解析は容易である。

図5に本モデルより算定された直交磁心の磁化特性を示す。計算値は実験値と良好な対応を示し、本モデルの妥当

図4 巻線起磁力の配置

Fig. 4. Arrangements of MMF.

図5 磁化特性の算定例

Fig. 5. Estimations of flux-MMF relationships.

性が了解される。これより、本モデルを用いた直交磁心の磁束分布の推定もある程度可能と考えられる。

本モデルに基づく特性推定法は、有限要素法による磁界解析が困難な、直交磁心等の非線形磁気応用素子の動作解析に有用と考えられる。

4. 解析方法

従来、筆者らは図6のAに示すように、前章で得られた磁気回路モデルより計算される直交磁心の磁化特性から直交磁心の簡単な等価電気回路を導き、これより回路シミュレータを用いて直交磁心形電力変換器の動作解析を行ってきた^{(9),(11)}。この場合、定常状態における本変換器の定量的

図6 計算の流れ図

Fig. 6. Flow chart of the calculation.

な特性算定は可能となるが、この方法では変換器運転時の直交磁心の磁心動作までは十分に考慮できないため、過渡状態での定量的解析等の複雑な動作解析には適用できない。これに対し、破線で囲まれたBに示すように直交磁心の磁気回路モデルと外部電気回路を結合して解析できれば、解析時間は長くなるものの直交磁心の磁束分布計算と変換器の動作解析を同時に行うことが可能であり、直交磁心形電力変換器の詳細な動作解析を行うことができるものと考えられる。

図6に示すように直交磁心の磁気回路モデル、半導体素子を含む変換器の電気回路はともに回路シミュレータによる解析が可能である。このため、直交磁心の巻線電流及び励磁電圧と、磁気回路モデルにおける磁心磁束及び起磁力の

図7 解析に使用した直交磁心の等価回路

Fig. 7. Equivalent Circuit of an orthogonal-core used for the analysis.

図8 プッシュプルパラメトリック変圧器回路構成

Fig. 8. Circuit of push-pull parametric transformer.

変換が可能であれば、両者を結合させた解析が可能になる。

このような考えに基づいて導いた直交磁心の解析モデルの一例を図7に示す⁽¹²⁾。本回路は、直交磁心の1次及び2次巻線電流 i_1, i_2 より、磁気回路モデルの1次及び2次起磁力を与え、そこから計算される1次及び2次磁束 ϕ_1, ϕ_2 をインダクタンス L_1, L_2 に流れる電流に変換することにより、直交磁心の励磁電圧 e'_1, e'_2 を得るものである。

本解析モデルを用いて直交磁心形電力変換器の回路を記述すれば、直交磁心の磁心動作を考慮した変換器のシミュレーションが可能となるものと考えられる。

5. 解析結果

ここでは前章で述べた解析手法に基づき、半導体素子を含む直交磁心形電力変換器としてプッシュプルパラメトリック変圧器、プッシュプル $dc-ac$ 変換器に着目し、その定常解析、過渡解析を試み、本解析手法の妥当性を検証した。

図8にプッシュプルパラメトリック変圧器⁽⁴⁾の回路構成を示す。本変圧器は、同一構成の直交磁心2台をダイオードを介して並列接続した回路（プッシュプル回路）に対し、1次側に入力正弦波交番電圧 e_p を印加し、2次側には同調用コンデンサ C と負荷抵抗 R を接続したものである。本装置の2次側回路においてパラメトリック発振が生じれば、確立した出力電圧 e_o により負荷に電力を供給できる。 i_p は入力電流、 i_L は負荷電流である。

解析には回路シミュレータSPICE3f5を用いた。このときのSPICEプログラムの一例を図9に示す。

図10は負荷抵抗値を変えた場合の各部の電圧電流波形を示す。図11は負荷抵抗値を変えた場合の出力電圧実効値 E_o 、負荷への供給電力 P_o の変化を示したものである。図において I_L は負荷電流実効値、 E_p は入力電圧実効値である。計算値は実験値と良好な対応を示し、本解析法により半導体素子を含む直交磁心形電力変換器の動作解析が可能であることがわかった。

また、このときの直交磁心の磁束密度分布は図12に示すようになっている。同図は直交磁心#1において、磁気回路の各枝の磁束密度を矢印の長さにより表現したものである。図より、直交磁心では磁束密度分布に粗密を生じていることを確認できる他、本動作解析法により磁束分布の経時変化を考察することが可能であることがわかる。

Push-pull Parametric Transformer

options nocho

* 電源電圧

VA1 1 0 SIN(0 35.355 50 -0.015)

VA2 0 12 SIN(0 35.355 50 -0.015)

* ダイオード

D1 22 100 DMOD

D3 12 21 DMOD

D5 24 200 DMOD

D6 14 23 DMOD

* 同調用コンデンサ

C0 3 14 350u IC=100

* 負荷抵抗

RL1 3 0 8.0

RL2 0 14 8.0

VC1 1 22 0

VC2 3 24 0

VC11 100 11 0

VC21 200 13 0

* 直交磁心 #1

xo1 11 12 13 14 orcore

* 直交磁心 #2

xo2 21 22 23 24 orcore

* ここから直交磁心の等価回路の記述

subckt orcore 1 2 3 4

* 巻線抵抗

R1 1 1000 0.3762

R2 3 2000 0.3762

* 諸量の変換部

E1 1000 1001 1002 0 1.0

E2 2000 2001 2002 0 1.0

VE1 1001 2 0

VE2 2001 4 0

L1 1002 0 200

L2 2002 0 200

Fflux1 0 1002 VH1 1

Fflux2 0 2002 VH2 1

Hx11 11 1003 VE1 100

VH1 12 1003 0

Hx12 13 14 VE1 100

Hx21 21 2003 VE2 100

VH2 22 2003 0

Hx22 23 24 VE2 100

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

図9 SPICEプログラム例

Fig. 9. An example of the SPICE program.

無負荷

$R = 16\Omega$

(a) 観測波形

$R = 10000\Omega$

$R = 16\Omega$

(b) シミュレーション波形

($C = 350\mu F$, $E_p = 50V$)

図10 観測及びシミュレーション波形

Fig. 10. Observed and Calculated waveforms.

図11 負荷特性

Fig. 11. Load characteristics.

図 12 磁心磁束密度分布

Fig. 12. Flux density distribution for the orthogonal-core.

図 13 プッシュプル dc-ac 変換器回路構成
Fig. 13. Circuit of push-pull dc-ac converter.

図 14 系統短絡時の過渡特性 ($\theta = 270^\circ$)

Fig. 14. Simulation result of the transient characteristics at S_1 closing.

次に過渡解析への適用について検証する。図 13 に解析に使用したプッシュプル dc-ac 変換器⁽³⁾の回路構成を示す。本変換器は、プッシュプル回路の 2 次側をスイッチ S_2 を介して商用系統に接続し、1 次側はチョップ回路により直流源 E_d に接続したものである。本回路は直交磁心 #1, #2 の 1 次印加電圧 e_{11}, e_{12} を互いに 180° の位相差を保つように励磁しつつ、 e_{11} と 2 次電圧 e_a との位相差 θ を変化させることにより、直流源から交流系統へ電力伝送を行うことができる。図中の $i_{11} \sim i_{22}$ は直交磁心 #1, #2 の 1 次及び 2 次巻線電流である。

ここでは図 13 においてスイッチ S_1 を変換器が定常運転時に閉じる、いわゆるプッシュプル dc-ac 変換器の系統短絡事故発生時における過渡解析⁽¹³⁾、ならびに定常運転時にスイッチ S_2 を開く、いわゆる系統遮断時の過渡解析⁽¹³⁾を試みた。図 14, 15 にこのときの各部の電圧電流波形を示す。図中の矢印で示す時間において事故が発生している。同図より、本動作解析法はこのような過渡解析も基本的には可能であることが了解される。

以上の解析に要する時間は NEC 製 UP4800/680 上において、cpu 使用時間で数時間以内と比較的短時間での解析が可能であった。

図 15 システム遮断時の過渡特性 ($\theta = 270^\circ$)

Fig. 15. Simulation result of the transient characteristics at S_2 opening.

6. むすび

以上、直交磁心形電力変換器において直交磁心の磁心動作を考慮した詳細な動作解析法として、直交磁心の3次元磁気回路モデルと外部電気回路を結合させた手法を提案するとともにその妥当性を示した。本動作解析法の特長をまとめると以下ようになる。

(1) 直交磁心の磁束分布を変換器動作と同時に算定可能であり、変換器特性の算定精度は半導体素子を回路構成要素として含む場合にも高い。

(2) プッシュプル dc-ac 変換器における短絡事故発生時、システム遮断時など、シミュレーションによる解析が必要とされる複雑な過渡現象に対しても対応できる。

(3) 解析には回路シミュレータを用いることができるため、取扱いが容易である。

(4) 解析に要する時間は比較的短い。

これらの特長より本手法は、直交磁心形電力変換器の解析・設計並びに高性能化に関する検討に適用可能であり、本変換器の実用化に有用と考えられる。また、本手法を他の非線形磁気応用機器に対しても適用できる可能性があるため、その検証が今後の課題となる。

(平成8年5月27日受付, 平成8年10月11日再受付)

文 献

- (1) S. D. Wanlass, et al.: "The paraformer", *IEEE Wescon Tech. Papers*, Vol. 12, Part 2(1968).
- (2) Osamu Ichinokura, Sinki Kikuchi and Koichi Murakami: "Operating Characteristics of Coupling-Decoupling Transformer", *IEEE Trans. Magn.*, MAG-19, 2103(1983).
- (3) 一ノ倉理・前田満・三田村紘一・高橋宏郎・村上孝一: 「プッシュプル方式の直交磁心形 DC-AC 変換器の太陽光発電システムへの適用について」, 電気学会論文誌, D-108-2, 151(1988).

- (4) 田島克文・一ノ倉理・穴澤義久・加賀昭夫: 「鉄損及び銅損を考慮した直交磁心形プッシュプルパラメトリック変圧器の動作解析」, 日本応用磁気学会誌, 15, 507(1991).
- (5) 一ノ倉理・田島克文・斎藤寛礼・秦泉寺敏正: 「プッシュプル方式による直交磁心形可変インダクタンスに関する一考察」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-259(1992).
- (6) 田島克文・一ノ倉理・村上孝一: 「プッシュプル接続された直交磁心の電力変換特性の一算定法」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-88-168(1988).
- (7) 山田外史・岩原正吉: 「回路-磁界」, 平成6年電気学会全国大会講演論文集, S.19-3-1(1994).
- (8) 田島克文・一ノ倉理・加賀昭夫・穴澤義久: 「漏れ磁束を考慮した直交磁心の磁化特性の算定」, 日本応用磁気学会誌, 16, 407(1992).
- (9) 田島克文・一ノ倉理・加賀昭夫: 「ケイ素鋼板の積層方向の磁化特性を考慮した直交磁心の鉄損算定」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-23(1995).
- (10) W. Z. Fam and G. K. Bahl: "Two Related Types of Parametric Transformers", *IEEE Trans. Magn.*, MAG-10, 690(1974).
- (11) 田島克文・一ノ倉理・加賀昭夫・穴澤義久: 「鉄損を考慮した3次元磁気回路モデルによるプッシュプルパラメトリック変圧器の最適設計」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-94-138(1994).
- (12) 田島克文・加賀昭夫・一ノ倉理: 「Reluctance Network と電気回路の結合による直交磁心形電力変換器の動作解析」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-54(1996).
- (13) O. Ichinokura et al.: "Transient operation of orthogonal-core type DC-AC converter for photovoltaic power system", *IEEE Trans. Magn.*, MAG-28, 2184(1992).

田 島 克 文

(正員) 1965年1月6日生。1989年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士前期課程修了。同年4月秋田大学鉱山学部助手、現在に至る。主として非線形磁気応用に関する研究に従事。日本応用磁気学会、IEEE 会員

加 賀 昭 夫

(正員) 1940年5月17日生。1963年3月秋田大学鉱山学部鉱山電機学科卒業、同年4月同大学鉱山学部助手、講師、助教授を経て、1988年7月教授、現在に至る。主として電気機器工学、電気応用工学を担当。工学博士。応用物理学会、電気設備学会、日本応用磁気学会、IEEE 会員。1996年10月25日急逝。

一ノ倉 理

(正員) 1951年8月28日生。1980年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士後期課程修了、工学博士。同年4月東北大学工学部電気工学科助手。助教授を経て、1995年10月教授、現在に至る。主として、非線形磁気応用、パワーエレクトロニクス、太陽光発電システムなどの研究に従事。日本応用磁気学会、計測自動制御学会、電気設備学会、IEEE 会員。