磁化容易軸不平衡固定子を用いた平面形パラメトリックモータの内側共通磁路幅と特性の関係

Relation between Width of Inner Ring Core and Characteristics of Laminated Core Parametric Motor Using Asymmetric Stator

土佐 祐貴・大久保 将克・夏坂 光男・坂本 禎智

八戸工業大学, 青森県八戸市大字妙字大開 88-1(〒031-8501)

Y. Tosa, M. Ohkubo, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto

Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinohe 031-8501

We earlier investigated a new type of parametric motor using a laminated iron core, and we showed that the output and efficiency of a prototype motor are comparable to those of conventional single-phase capacitor motors. This paper discusses the relationship between the width of the inner ring core and the characteristics of a laminated core parametric motor using an asymmetric stator. Parametric oscillation was stabilized, and output and efficiency were significantly improved, by using an asymmetric stator shape.

Key words: parametric motor, parametric oscillation, characteristics of laminated core.

1. はじめに

筆者らはこれまでに、市販モータと同程度の出力、効率を有する直交磁路形パラメトリックモータ^{1), 2)}について研究を行ってきた。しかし、このモータは構造上立体形状であるため、量産時に生産ラインを新設しなければならない問題があった。これを解決するために、筆者らは平面型パラメトリックモータを考案し、その動作に成功した³⁾。現在は、固定子直径を100mmとした平面型パラメトリックモータを主として研究を行っている。今までに検討されてきたモータの中で、固定子材質に方向性ケイ素鋼板を適用し、磁化容易軸を磁極の回転子半径方向に対して45°ずつ交互に積層した多くのモータではパラメトリック発振が不安定となった⁴⁾。しかし、磁化容易軸方向を45°の一方方向に揃えて積層してモータを作製したところ、パラメトリック発振が安定となった⁴⁾。このように、方向性ケイ素鋼板を用いたモータにおける磁化容易軸方向の選定は、パラメトリック発振の安定化に大変重要である。また、固定子材質に無方向性ケイ素鋼板を用いたモータについても検討がなされており、内側共通磁路幅を太くすることで、出力が向上する結果が得られている⁵⁾。このことより、パラメトリックモータの出力向上には内側共通磁路幅が大きく関与していると思われる。以上の観点から、パラメトリック発振が安定となった方向性ケイ素鋼板を用いたモータに対して、出力向上の可能性を握る内側共通磁路幅について検討を行うことは、今後本モータの設計法を確立するためにも極めて重要である。

本論文では、発振安定化実現方法として方向性ケイ素鋼板を用い、内側共通磁路幅を広げることによるモータ特性の改善を目的として、実験及び検討した結果を報告するものである。

2. 基本構成

Fig.1は、平面磁路積層形パラメトリックモータの基本構成である。交流電源 E_1 を接続した脚部を励磁側磁路、同調コンデンサ C を接続した脚部を共振側磁路、及び回転子付近の環状部を内側共通磁路、外側環状部を外側共通磁路と称する。ここで、パラメトリック発振に必要な磁気飽和を容易にするために、内側共通磁路の半径方向幅を狭くしている。固定子材質は、0.35mm 厚の方向性ケイ素鋼板を55枚積層しており、巻線数は、励磁側磁路、共振側磁路共に650turnsとしている。回転子は、アルミニウム導体のかご形回転子を使用した。まず、コイル N_1 に励磁電圧を加えると、内側共通磁路の一部に磁気飽和が生じる。この時、共振側からみた見かけ上の磁気抵抗が共振周波数の2倍で変化し、パラメトリック発振が生じることでコイル N_2 に電圧が発生し、コイル N_1 との電圧が90°の位相差となり回転現象が生じる。

Table 1に実験に用いたモータ固定子寸法を示す。Fig.2は固定子の積層状況である。磁極の回転子半径方向に対して磁化容易軸を斜め45°の一方方向に揃えて積層し、内側共通磁路幅を3mmとしたモータと、4mmとしたモータを作製した。前者を#ORI-A、後者を#ORI-Bと称する。

Fig. 1 Outline of a structure.

Table 1 Stator dimensions. (Unit: mm)

Motor	Stator					
	a	b	c	g	t	Ds
#ORI-A	20	3	12	0.3	20	100
#ORI-B	20	4	12	0.3	20	100

Fig. 2 Stator lamination.

3. 無方向性ケイ素鋼板を用いたモータの特性

まず、本論文の趣旨である方向性ケイ素鋼板を用いたモータについて論ずる前に、モータ特性の比較として無方向性ケイ素鋼板を用いたモータの各種特性について明らかにする。固定子寸法は Table1 に示すものと全て同一であり、内側共通磁路幅を 3mm, 4mm, 5mm とした 3つのモータについて検討を行っている。それぞれをモータ#7A, モータ#7B, モータ#7C と称する。

Fig.3 に動作状態図を示す。これは、励磁電圧 E_1 および同調コンデンサ容量 C 各点におけるモータの動作状態を示したものであり、(a)は#7A, (b)は#7B, (c)は#7C の動作状態である。各図を見ると、#7A では全ての領域で発振が不安定となっているが、#7B, #7C と内側共通磁路幅が広くなるに従って不安定領域が改善されている。しかし、内側共通磁路幅が広くなると、パラメトリック発振に必要な

Fig. 3 Stability of symmetric-stator parametric motor (non-oriented).

Fig. 4 P_{omax} versus η_{max} .

磁気飽和を生じさせるためにより多くの起磁力が必要となるため、パラメトリック発振の確立電圧が高くなることが分かる。

Fig.4 に最大出力と最大効率の関係⁶⁾を示す。図を見ると、#7A, #7B, #7C の順に出力が向上している事が分かる。パラメトリック発振が生じるためには共振側に対するインダクタンスの変化と、励磁側から共振側に流れ込む微小なエネルギーが必要となる。従って、内側共通磁路幅を広げたことによって、エネルギーとなる共振側に流れ込む磁束量が増えたことで、出力が向上したと思われる。

このように、無方向性ケイ素鋼板を用いたモータでは、内側共通磁路幅を広げることによって出力特性を向上させることが出来たが、発振が不安定な領域があるため、この領域を改善しなければならない。そこで、固定子材質に方向性ケイ素鋼板を用いたモータを作製し、実験及び検討を行った。

4. 磁化容易軸不平衡固定子を用いたモータの特性

本モータの発振安定化を図る方法として、方向性ケイ素鋼板を用い、磁化容易軸を不平衡とすることが有効である事が明らかとなっている。そこで、Fig.2 に示した積層方法を用いたモータ#ORI-A 及び#ORI-B について実験を行った。

Fig.5 に動作状態図を示す。同図において、(a)は#ORI-A, (b)は#ORI-B である。両図を見ると、測定可能な全ての領域で動作が安定となっており、方向性ケイ素鋼板による発振の安定化が顕著に現れている。しかし、無方向性モータと同様に、#ORI-A, #ORI-B と内側共通磁路幅が大きくなるに従ってパラメトリック発振の確立電圧が高くなる特性を引き継いでいることが分かる。

Fig.6 に回転子拘束時における入出力電圧特性を示す。測定は、励磁電圧 E_1 を電流の許容値まで昇圧し、その後 0V まで降圧し測定を行った。従って、本モータはパラメトリック変圧器を応用していることから、履歴特性にはヒステリシスが存在するため、実線が 2 本になる。同図は、同調コンデンサ容量 C が 20μF の場合であるが、容量を変化させても同様の傾向となる。#ORI-A に比べ#ORI-B の共振電圧 E_2 が高くなっていることが分かる。また、励磁電圧 E_1 が大きい場合でも#ORI-B の共振電圧 E_2 が高いことから、内側共通磁路幅を太くすることによる始動トルクの増大が期待出来る。

Fig. 5 Stability of symmetric-stator parametric motor(oriented).

Fig. 6 Relationship between primary voltage (E_1) and resonance voltage (E_2).

Fig. 7 P_{max} versus η_{max} .

Fig. 8 Torque speed curves.

Fig.7に最大出力と最大効率 η の関係を示す。同図において、低出力時は#ORI-A が高効率となり、高出力時では#ORI-Bが高効率となることが分かった。

Fig.8に励磁電圧 $E_1=86.0\text{V}$ 、同調用コンデンサ容量 C が $40\mu\text{F}$ 時の同一条件でのトルク特性例を示す。#ORI-Aに比べ#ORI-Bのトルクが大きくなっている。また、始動トルクについても#ORI-Bの方が大きくなっていることが分かる。

5. 磁束密度の励磁電圧依存性

以上、方向性ケイ素鋼板を用いたモータについて種々の実験を行ってきたが、これらのモータは無方向性ケイ素鋼板を用いたモータに比べ不安定領域が改善され、また、内側共通磁路幅増大によって出力を向上し得ることが明らかとなった。その主な要因として、パラメトリック発振を生じさせるために必要である、励磁側より共振側に流れ込む微小な磁束が、内側共通磁路幅を広げたことによって多くなり、更に磁気異方性を利用することによって、共振側へ回り込む磁束の量を多くすることが出来たためと考えられる。そこで、これらのことを確認するために、モータの固定子内磁束の動きを把握することとした⁴⁾。Fig.9に各固定子磁路に設置した探りコイルの位置を示す。ここで内側共通磁路部分の磁束密度を B_1 , B_2 , 外側共通磁路部分の磁束密度を B_5 , B_6 , 磁極部分の磁束密度を B_3 , B_4 とした。本モータの固定子材質には斜め 45° 方向に磁化容易軸のある方向性ケイ素鋼板を用いていることから、励磁側磁束から見ると、Fig.9に表示される B_1 及び B_6 が容易軸となり、 B_2 及び B_5 が困難軸となる。

Fig. 9 Positions of search coils.

Fig. 10 Relationship between primary voltage and magnetic flux densities (inside-outside).

Fig. 11 Relationship between primary voltage and magnetic flux densities (magnetic pole).

Fig.10 に回転子拘束時における内側及び外側共通磁路部分の磁束密度分布を示す。(a)は#ORI-A, (b)は#ORI-Bであるが、双方とも磁化容易軸となる B_1 及び B_5 の磁束密度が B_2 , B_6 に比べて大きくなっている。このように、磁束密度が不平衡になっていることから、パラメトリック発振が安定であることが分かる⁴⁾。Fig.11 に磁極部分の磁束密度分布を示す。#ORI-A に比べ#ORI-B の共振側磁極磁束密度 B_4 が大きくなっていることが分かる。すなわち、内側共通磁路幅を広げたことによって、共振側に流れ込む磁束の量が増え、更に、磁気異方性を利用することによって、共振側へ回り込む磁束の量が増加し、これが発振安定化及び出力の向上に結びついたものと考えられる。また、#ORI-B の B_2 の磁束密度が 1.4T を下回っている。これまでの研究より、磁束密度 B が 1.4T 以下は線形領域で、発振確立に必要なインダクタンスの変化が得られ難いため、同図は今後、内側共通磁路幅を 4mm 以上に広げても、パラメトリック発振が確立し難い可能性を示している。

6. あとがき

以上、磁化容易軸不平衡固定子を用いた平面形パラメトリックモータの内側共通磁路幅とモータ特性について、検討及び考察を行った。今回得られた結果を以下にまとめる。(1) 内側共通磁路幅を広げることで、出力、効率及びトルクを向上させることが出来るが、動作領域が減少する。(2) 方向性ケイ素鋼板を用いたモータは、無方向性ケイ素鋼板を用いたモータのモータ特性と類似した傾向になっていることから、同じ設計法を適用できると思われる。(3) 無方向性ケイ素鋼板を用いたモータに対し、方向性ケイ素鋼板を用いたモータは、出力、効率が増大し測定可能な全ての領域で動作が安定となる。

参考文献

- 1) Y. Sakamoto, K. Murakami, and S. Kikuchi: *T. IEE Japan*, Vol. 106-B, No. 6, pp. 487-494 (1986)
- 2) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, K. Murakami, and N. Abe: *J. Magn. Soc. Japan*, 17, No. 2, pp. 473-478 (1993)
- 3) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *J. Magn. Soc. Japan*, Vol. 20, No. 2, pp. 641-644 (1996)
- 4) M. Ohkubo, Y. Tosa, M. Natsusaka, Y. Sakamoto: *T. IEE Japan* MAG-01-234 (2001)
- 5) T. Ogasawara, M. Natsusaka, Y. Sakamoto, and M. Murakami: *T. IEE Japan* RM-98-130 (1998)
- 6) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *T. IEE Japan*, MAG-91-175 (1991)
- 7) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, 33, pp. 4185-4187 (1997)

2002年10月7日受理, 2003年1月17日採録