非対称磁路固定子を用いた平面磁路形パラメトリックモータ

Laminated-core Parametric Motor Using an Asymmetric Stator

小笠原 拓司・大久保 平・坂本 禎智・村上 孝一

八戸工業大学, 青森県八戸市大字妙字大開 88-1 (〒031-8501)

T. Ogasawara, T. Ohkubo, Y. Sakamoto and K. Murakami

Hachinohe Inst. of Tech., 88-1 Obiraki, Myo, Hachinohe 031-8501

(1999 年 10 月 28 日受理, 2000 年 1 月 25 日採録)

We have already proposed a new type of parametric motor using a laminated iron core, and have also shown that the output and efficiency of the trial motor are comparable to conventional single-phase capacitive motors. In this paper, we discuss the performance characteristics and stability of the parametric oscillation of a laminated-core parametric motor using an asymmetric stator.

Key words: parametric motor, parametric oscillation, stability of parametric oscillation, asymmetric stator.

1. はじめに

筆者らは, 低騒音¹⁾, 高信頼性, 過負荷保護機能など, 実用上多くの利点を有し, 市販モータと同程度の特性を有する直交磁路形パラメトリックモータ^{2,3)}の研究を行ってきた。しかしこのモータは立体磁路構造を有するため, 量産には必ずしも適していない。筆者らはこれを解決するために, 平面磁路積層構造のパラメトリックモータの製作を試み, その作製に成功した⁴⁾。本モータは, 市販のモータと同程度の出力, 効率が得られている^{5,6)}。実用化のためには, 低速回転領域の発振不安定性解明と, 設計法の確立が必要である。

本論文では, 低速回転領域における, 発振不安定性の改善を目的として, モータ固定子の磁気回路モデルを構築し, 発振側磁束について検討を行った。その結果, 固定子を非対称形とすることにより, パラメトリック発振を安定化でき, さらに出力-効率特性, トルク特性も向上することが明らかになった。

2. 基本構成

Fig. 1 に, 平面磁路積層形パラメトリックモータの基本構成を示す。回転子は, アルミニウム導体のかご形回転子である。図中, 交流電源 E_1 を接続した脚部を励磁側磁路, 同調用コンデンサ 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。パラメトリック発振を生じさせるためには, 共振側からみた磁気抵抗が励磁周波数の 2 倍で変化する必要がある。そのため, 内側共通磁路の幅を狭くして, 磁気飽和が生じやすい構造としている。対称形のモータは, 内側共通磁路幅が均一($d_1=d_2$)であるが, 非対称形のそれは不均一($d_1 \neq d_2$)な磁路構成としている。

Table.1 Stator and rotor dimensions.

Dimensions (mm)										
Motor		a	c	d ₁	d ₂	g	t	D _s	ℓ	D _r
Symmetric type		20.0	11.5	5.0	5.0	0.3	20.5	100.0	19.0	41.4
Asymmetric type	A	20.0	11.5	5.0	2.0	0.3	20.5	100.0	19.0	41.4
	B	20.0	11.5	5.0	4.0	0.3	20.5	100.0	19.0	41.4

Fig. 1 Motor structure.

Table. 1 に実験に用いたモータの固定子, 回転子寸法を示す。今回は, 対称形を 1 種類, 非対称形を 2 種類製作し実験を行った。対称形の内側共通磁路幅は, $d_1=d_2=5$ mm のとき発振が安定で, 出力効率特性も良いことが既に明らかにされている⁷⁾。そのため実験には, この寸法のものを用いることにした。非対称形モータは対称形モータの寸法を基準として内側共通磁路幅 d_2 を減少させている。また, 非対称形を 2 種類製作したのは, 磁路の不均衡の度合いが, パラメトリック発振, 及びモータ特性に与える影響を検討するためである。

3. 対称形パラメトリックモータの特性

Fig. 2 はパラメトリック発振の動作状態を表す。同図は, 本モータの動作点決定パラメータの励磁電圧 E_1 , 及び同調用コンデンサ C の値とパラメトリック発振の安定性との関係を示したものである。○印はすべての全領域に亘って発振が安定な場合, ●印は低速回転領域で発振が停止する場合である。なお, ▲印は, 回転数によって発振電圧の位相が反転し, 自動的に回転子が正転, 逆転する領域である。通常のモータとして使用する場合は, ●印や▲印のような領域が現れないようにしなければならない。これらの領域は, 励磁電圧が小さく, 同調用コンデンサの大きな領域に現れており, 直交磁路形モータと共通している⁸⁾。同図を見ると, ●印の発振停止領域が, 励磁電圧が高い領域に現れる傾向があるため, 発振を安定させかつ高出力を得ることは困難である。

Fig. 3 は対称形モータの出力最大値 P_{omax} と効率最大値 η_{max} の関係である。図中の曲線は、出力、効率に関して、対称形モータの取り得る最大値を与える曲線であり、出力最大値-効率最大値曲線と称している。同図を見ると最大出力は 18 W であり、出力が 11 W において最大効率 $\eta_{\text{max}}=34\%$ が得られている。本モータで用いた回転子の重量、寸法から推定できる出力、効率値は、出力 20 W、効率 40 %であるため、パラメトリック発振を安定化させることにより、出力、効率の向上が期待される。

Fig. 4 は高出力領域における負荷特性測定例である。負荷特性は、同期速度 3000 rpm 付近から徐々に制動力を加えて測定した。対称形モータは回転数が 1800 rpm 以下で、パラメトリック発振が不安定となり、共振電圧 E_2 が急減していることが分かる。 E_2 が低下すると、回転磁界は楕円形となり、更に回転数が低下すると E_2 は 0 になり回転磁界も消失する。そのため、対称形モータは低回転領域においてトルクが減少し、0 rpm 時の始動トルクは約 0 N・m となっている。また、出力特性も同様に低速回転領域で急減していることが分かる。したがって低速回転時でも発振電圧が急減しないよう、パラメトリック発振を安定化させる必要がある。

以上、対称形平面磁路パラメトリックモータについて実験を行った結果、発振不安定性とモータ特性の関係が明らかとなり、発振を安定化させる必要があることが分かった。発振が不安定になる理由として、モータが高負荷状態になった場合、回転子電流による起磁力が大きくなり、これが発振側磁束を妨げるように働くためと考えられる。そのため、筆者らは高負荷時でも、発振用の磁束が維持されるよう、内側共通磁路幅を左右非対称形状とすることにより、励磁側から磁束供給を行う方法を考案した。

4. 磁気回路モデルによる検討

上述のように、発振安定化の一対策として、非対称形磁路の提案を行った。いま固定子非対称性が、発振にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために、対称形と非対称形磁路について、固定子の磁気回路モデルを用いた簡単な理論的考察を行ってみる。

Fig. 5 は、本モータの固定子だけの磁気回路モデルである。磁極の磁気抵抗を R_m 、外側共通磁路の磁気抵抗を R_o とする。パラメトリック発振に重要なパラメータである内側共通磁路の磁気抵抗は R_{i1} 、 R_{i2} とおく。

いま、 R_{i1} 、 R_{i2} の飽和特性を磁束の 3 次式で以下のように近似する。すなわち、

$$f_1(\phi) = a_1\phi + a_3\phi^3 \quad (1)$$

$$f_2(\phi) = b_1\phi + b_3\phi^3 \quad (2)$$

(1)、(2)式、磁気回路、及び巻線抵抗を無視したパラメトリック発振回路より対称形モータ ($a_1=b_1$ 、 $a_3=b_3$) と、非対称形モータ ($a_1 \neq b_1$ 、 $a_3 \neq b_3$) の共振側磁束 ϕ_2 に関する非線形微分方程式は次式のごとく導かれる⁹⁾。

Fig. 2 Stability of the symmetric stator type of parametric motor.

Fig. 3 P_{omax} vs η_{max}

Fig. 4 Example of the load characteristic curves of the symmetric stator type of parametric motor.

Fig. 5 Magnetic circuit of the motor.

$$d^2 \phi_2 / dt^2 + (1/N_2^2 C) \{ a_1 + 2R_m + R_o + (3/4) a_3 \phi_1^2 \} \phi_2 + (1/N_2^2 C) (a_3/4) \phi_2^3 = 0 \quad (3)$$

$$d^2 \phi_2 / dt^2 + (1/N_2^2 C) \{ (1/2)(a_1 + b_1) + 2R_m + R_o + (3/8)(a_3 + b_3) \phi_1^2 \} \phi_2 + (1/N_2^2 C) \{ (3/8)(b_3 - a_3) \phi_1 \phi_2^2 \} + (1/N_2^2 C) (1/8)(a_3 + b_3) \phi_2^3 = (1/N_2^2 C) \{ (1/2)(a_1 - b_1) \phi_1 + (1/8)(a_3 - b_3) \phi_1^3 \} \quad (4)$$

まず対称形モータに関する方程式(3)について述べる。同式においては、第2項の ϕ_2 の係数が ϕ_1^2 の関数となっていることから、共振側磁束 ϕ_2 は ϕ_1 の周波数の2倍周波数の変調を受けることになり、これがパラメトリック発振を生じさせる源となる。従って、内側共通磁路の材質と寸法で決定される係数 a_3 が小さい場合は、パラメトリック発振は生じない。その具体的な条件は、Mathieu方程式の安定-不安定領域図に従う。

次に非対称形モータに関する方程式(4)について述べる。同式においては、(3)式で($a_1=b_1$, $a_3=b_3$)のためキャンセルされていた、 ϕ_1 , ϕ_1^3 に関する項が右辺に現われている。そのため対称形において、高負荷時に共振電圧が低下し発振が不安定となっていたが、非対称形では共振側に励磁側磁束 ϕ_1 の一部が流入することにより、回転子起磁力による共振側磁束の減少を抑制でき、見かけ上発振が安定になると考えられる。しかし、理想的なパラメトリック発振確立時の位相ずれは90度となるが、それに ϕ_1 の強制的な磁束が流入した場合、大きく位相ずれが生じる。従って、 ϕ_1 , ϕ_1^3 の係数によっては、逆に発振が不安定になることも考えられる。そのため、位相ずれを小さくとどめるよう、強制的な ϕ_1 の磁束量を調整しなければならない。

以上の検討により、本モータのパラメトリック発振確立機構の一部が明らかとなり、また固定子磁路を非対称形状とすることが、発振安定化に有効であることが分かった。

5. 非対称形パラメトリックモータの特性

これまでの実験と考察により、対称形モータでは発振不安定領域が大きく、その改善策として固定子磁路を非対称形状とすることが有効であることが明確になった。本節では、このことを実験的に確認することとする。

まず固定子内磁束分布について実験を行う。Fig. 6, Fig. 7に非対称形モータAの固定子に設置した探りコイルの位置、及び各部磁束密度の励磁電圧依存性を示す。磁束密度Bの添字は、各探りコイルの番号に一致する。内側共通磁路部分の磁束密度を見ると、狭い側の共通磁路が先に飽和点に達し、発振が確立することが分かる。従って、内側共通磁路の片側が狭くなるほど発振確立電圧が低くなると言える。また内側共通磁路部分での鉄損について考えると、発振確立以降では、 B_1 , B_2 共に同様な磁束密度値をとる。 B_2 側は寸法が狭くなっているため B_1 側に比べ鉄損の発生が少ない。このことより非対称性が強いモータAの方が、鉄損低減による効率向上が期待できる。

Fig. 8は対称形、非対称形の出力最大値-効率最大値曲線である。これを見ると、対称形に比べ非対称形モータの効率が良いことが分かる。これは平面磁路パラメトリックモータでは、内側共通磁路を飽和させて発振を起していることから、その部分が狭くなった非対称形モータでは損失が減少し、効率が増加したものと考えられる。そのため内側共通磁路幅が $d_2=2\text{ mm}$ と小さい、非対称形

Fig. 6 Positions of the search coils.

Fig. 7 Relations between the primary voltage and the magnetic flux densities.

Fig. 8 P_{max} vs η_{max} .

Fig. 9 Example of the load characteristic curves of the asymmetric stator type of parametric motor A.

Fig. 10 Example of the load characteristic curves of the asymmetric stator type of parametric motor B.

モータ A が 3 種類の中で最も効率の良い結果が得られている。しかし、最大出力付近では全てのモータが、同様の効率最大値を示す。これは磁極幅や外側共通磁路幅等が関係し、損失を増す原因となっているためと思われる。また、対称形モータでは出力 5 W 以上で低速回転時に発振が停止したが、磁路を非対称形とすることにより、全ての領域で発振が安定となり、発振の不安定性が改善されている。

Fig. 9, Fig. 10 はそれぞれ非対称形モータ A, 非対称形モータ B の負荷特性測定例である。対称形モータでは出力、効率、トルク、共振側電圧 E_2 の各特性が 1800 rpm 付近より急激に減少する結果が得られていたが、2 種類の非対称形モータでは、そのような傾向は見られず、回転数が減少するに従い、緩やかな曲線を描くことが分かる。さらに対称形では、動作点によっては始動トルクが極めて小さく、同期入れ等の始動手段を必要としていたが、非対称形では、静止トルクが発生していることが分かる。

Fig. 11, Fig. 12 に各モータの動作状態を示す。これらの図を見ると、内側共通磁路幅が $d_2=2$ mm である非対称形 A の方が、動作点が低い励磁電圧値まで広がっている。これは内側共通磁路部分が狭いほど、低い励磁電圧で磁気

Fig. 11 Stability of the asymmetric stator type of parametric motor A.

Fig. 12 Stability of the asymmetric stator type of parametric motor B.

飽和し、パラメトリック発振が確立するためである。また対称形では、高い励磁電圧時に発振が不安定となっていたが、非対称形では $d_2=2$ mm, $d_2=4$ mm の各モータにおいて、全動作点で発振が安定となっている。また対称形で正転・反転領域が存在していたが、非対称形にするとその領域は消え、通常回転領域に改善されていることが分かる。

6. あとがき

以上、固定子磁路の非対称性とモータ特性の関係について実験と考察を行い、これまでの対称形モータと比較を行った。今回得られた結果を次にまとめる。

- (1) 非対称形磁路とすることにより、対称形磁路で発振が不安定であった動作点でも安定化し、出力、効率特性も改善される。
- (2) 発振が安定化される理由は、共振側に励磁側の磁束 ϕ_r の項が入るため、発振持続に必要な磁束量を確保できるためである。
- (3) 内側共通磁路幅を一部狭くすることにより発振確立電圧を下げるができるので、動作点の拡大が可能である。
- (4) 内側共通磁路の非対称性がパラメトリック発振に与える影響に関しては、現在のところ非対称にする度合いが大きい Type A の方が良好な特性を示す。

今後は、今回の方程式を基本として、回転子磁気回路を含み、負荷が加えられた時の微分方程式を導出して、発振の確立機構の全容を明らかにする必要がある。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費基盤研究(C)による。

文献

- 1) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 3000 (1992)
- 2) Y. Sakamoto, K. Murakami, and S. Kikuchi: *IEEE Trans. Magn.*, **21**, 1744 (1985)
- 3) 坂本禎智, 村上孝一, 菊地新喜: 電気学会論文誌 B, **106**, 487 (1986)
- 4) 坂本禎智, 夏坂光男, 村上孝一: 日本応用磁気学会誌, **20**, 641 (1996)
- 5) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4185 (1997)
- 6) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *Proc. of 7th European Conference on Power Electronics and Applications*, 3, 552 (1997)
- 7) 小笠原拓司, 夏坂光男, 坂本禎智, 村上孝一: 電気学会回転機研究会資料, RM-98-130 (1998)
- 8) E. S. Tez and I. R. Smith: *IEEE Trans. Education*, **E-27**, 56 (1984)
- 9) W. Z. Fam and R. P. Verma: *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **PAS-91**, 2494 (1972).