Considerations on the Mechanism of Establishment of Parametric Oscillation Voltage in a Single-phase Input Three-phase Parametric Motor

Hiroshi Kawamorita, Masaaki Yoshida, Mitsuo Natsusaka, and Yoshinori Sakamoto

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

The practical use of a single-phase motor having a three-phase rotating field is very useful for energy conservation. We have been studying a single-phase input three-phase parametric motor and have succeeded in generating a three-phase rotating magnetic field in the stator. However, the mechanism for generating three-phase voltage has not yet been clarified. This paper discusses the factors that cause three-phase voltage based on the excitation voltage dependence of state of parametric oscillation and the change of the frequency of parametric oscillation voltage.

Key words: parametric motor, parametric oscillation, three-phase induction motor, three-phase rotating field, rotational direction, resonance side frequency

単相励磁入力三相パラメトリックモータの パラメトリック発振電圧確立機構に関する考察

川守田 大志・吉田 雅昭・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)

1. はじめに

近年, エアコンやクーラーなどの家電製品, 工業用機械等, モータを使用している多種多様な製品の利便性の向上に伴い, それらの需要が増加している. モータの需要が増え続けることに比例してその消費電力も増えてきており, 電力需要の概要を調べてみると, 消費電力量は全発電電力量の約半分以上を占めている. そのため, モータを高出力・高効率化させることによる消費電力を抑える技術の確立が急がれている.

誘導モータは構造が簡単, 長寿命, 安価, 保守が容易といった特徴を有し, 未だに多くの分野で使用されている. 一般の市販誘導モータとして単相誘導モータと三相誘導モータが挙げられるが, 三相誘導モータの方が空隙部分における起磁力の空間高調波成分が少ないことから, 同一出力時において効率が良いことが知られている. 従って, 三相誘導モータを一般家庭やオフィス等で使用することが出来れば, 省エネルギー対策としても有効である. しかし, 三相誘導モータを一般家庭等で使用するとなると, 単相配線を三相配線に敷設しなおさなければならない, また, 単相配線を利用するにしても単相-三相変換インバータなどの変換機が必要であるという問題が生じ, コスト面や手間が負担となってしまう. このような背景から, 筆者等は, 単相電源を用いて三相誘導モータと同等の回転磁界を生成できるモータの実現・実用化は極めて有効であると考えている.

本研究に用いられる単相励磁入力・三相パラメトリックモータ^{1)~4)}は, パラメトリック発振回路を 2 系統に設けることで三相回転磁界の実現に成功している⁵⁾. これまでの研究では, 固定子材質に磁化容易軸を設けた磁気異方性材料を用いてモータの試作を行い, 固定子内磁束密度分布を不平衡にすることで

発振の安定化を目指した結果, 振幅や位相差において三相類似波形を得ることができた^{6)~8)}.

本モータを使用するためには, モータの動作点を定めたとき, スイッチの投入後に動作しなければならない. しかし本モータの場合は, 設計法が確立されておらず, まだ, 動作点を定めることができない. その理由は, パラメトリックモータの場合, 励磁電圧 E_1 , 励磁周波数 f , 回転数 N の増減によってパラメトリック発振現象に履歴特性が存在し, 現時点では決まった動作点を定めることができないからである. そこで本論文では, 出力, 効率の改善に関することには言及せず, 三相パラメトリックモータとして動作する点に移行する発振電圧確立機構を明確にするために, 励磁電圧 E_1 の増減による共振側電圧確立状況, そして, 励磁周波数 f に対する共振側周波数の変化に着目して検討を行った. その結果, 三相電圧確立の要因として, 2 系統ある共振側の電圧確立状況と回転方向の関係, また, 共振側電圧の倍周波発振が関係していることが明確となった. 本論文では, これらの検討結果について報告する.

2. 基本構成

Fig. 1 に本モータの基本構成を示す. Table 1 に実験に用いたモータの固定子および回転子寸法を示す. 固定子の磁極を 60° ごとに配置し, パラメトリック発振回路 2 系統を空間的に 120° および 240° となるように設計を施すことで, 回転子部に生成される磁界方向を定めている. 交流電源 E_1 を接続している脚部を励磁側磁路, 同調用コンデンサを励磁側磁路に対し 120° 方向に接続している脚部を共振側 A, 同様に 240° 方向に接続している脚部を共振側 B, 回転子付近の環状部を内側共通磁路, 外側の環状部を外側

共通磁路と称している。内側共通磁路はパラメトリック発振に必要な磁気飽和を生じ易くするため、外側共通磁路よりも細く設計している。

今回、検討に用いられるモータとして、内側共通磁路幅 4 mm、外側共通磁路幅 10 mm とした 4 つのモータ、 $\#1L60^\circ$ 、 $\#1L(-60)^\circ$ 、 $\#2/3L60^\circ\text{Cross}$ 、 $\#1/2L60^\circ\text{Cross}$ を用いた。各部の寸法は Table 1 に示した通りであり、それぞれのモータの寸法には違いがないが、 $\#1L60^\circ$ と $\#1L(-60)^\circ$ は励磁側磁極と共振側磁極が同じ断面積になるように積層している。また、 $\#2/3L60^\circ\text{Cross}$ は共振側磁極の断面積が $\#1L$ の $2/3$ になるように、同様に $\#1/2L60^\circ\text{Cross}$ は $1/2$ になるように積層をしている。Fig. 2 に固定子形状の違いを示す。磁化容易軸方向は、 $\#1L60^\circ$ が共振側 A の方向である 60° に、 $\#1L(-60)^\circ$ が共振側 B の方向である $(-60)^\circ$ に設けられている。また、共振側磁極が分割された $\#2/3L60^\circ\text{Cross}$ 及び $\#1/2L60^\circ\text{Cross}$ は、それぞれ分割された共振側磁極の方向である 60° 、 $(-60)^\circ$ に磁化容易軸を揃え、交差するような形で作られている。Fig. 3 に各モータ固定子の磁化容易軸方向を示す。これらのモータを用いて検討を行う意義は二つある。固定子に磁気異方性を設けることでパラメトリック発振の確立に重要なインダクタンス L の変化による影響を知ることができること、そして、共振側磁極の断面積に違いを設けることにより、お互いの共振側磁極が果たす発振確立への役割を明確にすることができることである。これらのモータで三相電圧確立の共通要因を見出すことができれば、それらの要因は三相電圧確立にとって極めて重要であることを示している。比較検討時のコンデンサ容量は、巻線の許容電流の関係上 $20\ \mu\text{F}$ を上限とし、基本的に $C_a=10\ \mu\text{F}$ 、 $C_b=20\ \mu\text{F}$ を使用している。各モータの固定子には、共に厚さ 0.35 mm の方向性ケイ素鋼板を用い 55 枚あるいは 56 枚積層した。巻き線数は $N_1=N_{2a}=N_{2b}=1000$ turns である。

Fig. 1 Outline of structure.

Table 1 Stator and rotor dimensions. (Unit : mm)

Motor	Stator						Rotor		Direction
	a	c	d	g	t	Ds	l	Dr	
$\#1L60^\circ$	15	10	4	0.25	20.0	100	19	41.5	60°
$\#1L(-60)^\circ$	15	10	4	0.25	20.0	100	19	41.5	$(-60)^\circ$
$\#2/3L60^\circ\text{Cross}$	15	10	4	0.25	20.0	100	19	41.5	$60^\circ, (-60)^\circ$
$\#1/2L60^\circ\text{Cross}$	15	10	4	0.25	20.0	100	19	41.5	$60^\circ, (-60)^\circ$

Fig. 2 Difference of stator shape of each motor.

Fig. 3 Direction of the easy axis of each trial motor.

3. 各モータの実験結果

3.1 回転方向と発振の確立状況についての考察 (CCW 始動時)

Fig. 4 に無負荷 Counter clockwise(以下 CCW)始動時の入出力電圧特性を示す。測定は、励磁電圧を徐々に増加し、最大電流値まで上昇させた後、励磁電圧を降下させて行った。また、励磁電圧を増加したとき、あるポイントから発振が生じる。このときに CCW 方向に回転が始まるため、CCW 始動時と称している。 $C_a=10\ \mu\text{F}$ 、 $C_b=20\ \mu\text{F}$ 動作時の回転方向を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 より、励磁電圧を増加すると、どのモータとも 40 V 付近で発振が生じ、Fig. 5(a)に示すとおり CCW 方向に回転が始まる。しかし、このときはまだ、コンデンサ容量の大きい側である共振側 B の発振条件は整っていないと考えられる。このことは、三相パラメトリックモータを単相駆動させることにより考察が出来る。Fig. 6 に単相駆動時の入出力電圧特性を示す。例として、 $\#1L60^\circ$ と $\#1/2L60^\circ\text{Cross}$ の特性を用いる。また、同図(a)は、共振側 A にのみコンデンサを設け、共振側 B を開放して動作をさせた場合であり、同図(b)は共振側 B にのみコンデンサを設け、共振側 A を開放して動作をさせた場合の入出力電圧特性を表している。(A)のモータ $\#1L60^\circ$ について見ると、コンデンサ容量の小さい共振側 A の発振条件は 40~50 V 付近で整っているのに対して、コンデンサ容量の

大きい共振側 B の発振条件は、40 V 付近ではまだ整っていないことがわかる。これは、(B)のモータ#1/2L60°Crossでも、共振側磁極がお互い独立しているにもかかわらず、同じことが言える。これにより、共振側 B の発振条件はまだ整っていないと考えられる。また、単相駆動時の回転方向を Fig. 7 に示す。単相駆動時では、共振側 A にのみコンデンサを設け動作をさせた場合 CCW 方向に回転をする。逆に、共振側 B のみの場合では Clockwise(以下 CW)方向に回転をするという結果が各モータで得られた。このことから、Fig. 5(a)に示すように CCW 方向に回転が始まるのは、先に発振条件の整った共振側 A が生成する回転磁界によるものだと考えられる。

Fig. 4 より、 E_{2a} の発振確立後に続けて励磁電圧を増加し続けると、各モータとも 80~90 V 付近から同相となり、回転数が減少する。このとき、先に発振条件が整っていた共振側 A の生成する回転磁界と、励磁側および共振側 A の電圧の影響により、発振条件が整い始める共振側 B の生成する回転磁界の、お互いの回転磁界が Fig. 5(b)に示すように相殺するような形で影響しあっていると考えられる。このことにより、同相領域での回転数の減少が見られたと思われる。その後、再び励磁電圧を増加すると、100~110 V 付近で共振側 B の発振条件が整うことで、共振側 B が生成する回転磁界が勝り、自発的に Fig. 5(c)に示すように、CW 方向に回転し始める。以降は、このまま CW 方向に回転し続け、この後に励磁電圧を降下させていく過程において、#2/3L60°Cross 以外のモータでは 60~80 V 付近で三相電圧が出力された。

Fig. 4 Primary voltage vs. resonance voltages at no-load. (Counter clockwise)

Fig. 5 Rotational direction at $C_a=10 \mu\text{F}$, $C_b=20 \mu\text{F}$.

Fig. 6 Primary voltage vs. resonance voltages.

Fig. 7 Rotational direction in case driven by single-phase voltage.

3.2 回転方向と発振の確立状況についての考察 (CW 始動時)

前項の考察より、三相電圧が出力された回転方向は CW 方向であったことから、次に、強制的に CW 方向から始動をさせた場合にどのような結果が得られるのか実験を行った。前項より、励磁電圧 40 V 付近で発振が生じた際の回転方向は CCW 方向であるが、そこに手回しで回転方向とは逆方向に回転力を加えると CW 方向のまま動作をし始める。Fig. 8 に無負荷 CW 始動時の入出力電圧特性を示す。同図より、各モータとも 40 V 付近で発振が生じ、CW 方向に動作をさせたあと、再び励磁電圧を増加し続ける過程において、#1L(-60)°以外のモータでは 60~70 V 付近で共振側 B の発振条件が整い、このときに三相電圧が出力された。この後、励磁電圧を増加すると #1L(-60)°でも 100 V 付近で共振側 B の発振条件が整い、このまま回転方向は変わらずに最大電流値に達し、励磁電圧を降下させていく過程において、#2/3L60°Cross 以外のモータでは 60~80 V 付近で三相電圧が出力された。

Fig. 9 に出力された各モータの三相類似波形を示す。これらの考察から、三相電圧確立のための回転方向としては、同図より、励磁側波形に対して共振側 A の波形が進み位相、そして共振側 B の波形が遅れ位相になることで三相類似波形が出力されたことから、CW 方向に回転をすることが望ましいといえる。

3.3 倍周波発振と三相電圧確立状況についての考察

前項より、三相電圧確立のための回転方向は CW 方向であると考察を行ったが、その回転方向という要因のみでは、CW 方向に回転したあとの励磁電圧降下時の #2/3L60°Cross や CW 始動時での励磁電圧増加過程の #1L(-60)°など、条件を満たしていても三相電圧が出力されなかったモータがある。そこで、回転方向という要因のみではなく、そこに共振側電圧の倍周波発振という要因も加えて考察を行った。

まず、CCW 始動時の場合、励磁電圧を増加し続け、コンデンサ容量の大きい側の発振条件が整った際に CW 方向に回転をし始めるが、このとき、コンデンサ容量の小さい側の共振側電圧の周波数が #1/2L60°Cross では 100 Hz、そのほかのモータでは 150 Hz に増加をした。Fig. 10 に各

Fig. 8 Primary voltage vs. resonance voltages at no-load. (clockwise)

Fig. 9 Three-phase voltage waveforms of each motor.

モータの周波数増加後の波形を示す。この周波数の増加後、励磁電圧を降下していく過程において三相電圧が出力された。また、CW 始動時の場合、 $\#1L(-60)^\circ$ 以外のモータでは、励磁電圧を増加していく過程において共振側 B の発振条件が整い、三相電圧が出力されたが、その後、再び励磁電圧を増加すると、コンデンサ容量の小さい側の共振側周波数が増加した状態に移行する。このとき周波数が増加した状態が崩れると、 $\#2/3L60^\circ\text{Cross}$ のように励磁電圧を降下していく過程において三相電圧は出力されなくなる。よって、これらのことから、このコンデンサ容量の小さい側の共振側周波数の増加が、三相電圧確立に関係していると考えられる。

しかし、 $\#1L60^\circ$ では、CCW 始動時において励磁電圧を増加していく過程でコンデンサ容量の小さい側の共振側周波数が増加したが、その後に三相電圧は出力されなかった。これは、コンデンサ容量の大きい側の発振条件が整っておらず、また、CW 方向に回転をするという要因を満たしていなかったためと考えられる。よって、このようにただ周波数が増加をするということだけでは三相電圧は出力されない。Fig. 11 に文献[9]で解析された励磁電圧 E_1 と同調用コンデンサ C に対するパラメトリック発振の確立領域図を示す⁹⁾。同図の黒く塗られた領域 I が基本周波を表しており、続けて、倍周波、3 倍周波の領域ということを表している。同図より、コンデンサ容量が小さく電圧が大きくなった場合、周波数が基本周波から倍周波、もしくは 3 倍周波に移行しやすいということが見て取れる。このことから、コンデンサ容量の小さい側の共振側電圧が、励磁電圧と発振条件の整ったコンデンサ容量の大きい側の共振側電圧の影響を受けて、周波数が増加したと考えられる。よって、ただ周波数が増加するのではなく、上記の条件を満たした周波数の増加が三相電圧確立の要因といえる。

4. おわりに

パラメトリック発振電圧確立機構について検討を行った結果、三相電圧が出力されるために必要な要因を明らかにすることができた。以下にこれを述べる。

まず、回転方向に着目すると、 $C_a=10\ \mu\text{F}$ 、 $C_b=20\ \mu\text{F}$ を使用した場合、CCW 方向に動作をした状態では三相電圧は出力されることがなかった。しかし、励磁側波形に対して共振側 A の波形が進み位相、共振側 B の波形が遅れ位相となることにより三相類似波形が出力されたことから、CW 方向に回転をすることが望ましいといえる。

また、倍周波発振に関しては、コンデンサ容量の大きい側の発振条件が整い CW 方向に回転をし始めた際、コンデンサ容量の小さい側の周波数が 100 Hz、150 Hz に増加をした。その後、励磁電圧を降下していく過程において三相電圧が出力された。また、CW 始動時の場合、励磁電圧を増加していく過程において三相電圧が出力されるモータもあり、それらのモータでは、励磁電圧を増加し続け三相波形が崩れた際、コンデンサ容量の小さい側の周波数が増加した状態に移行する。この状態が崩れると、励磁電圧を増減させても三相電圧は出力されなかった。よって、コンデンサ容量の小さい側の倍周波、3 倍周波発振が三相電圧出力の要因の一つとして明確となった。

しかし、これらの要因はどちらか片方の条件が満たされていても三相電圧が出力されなかったことから、三相電圧確立のためには、この二つの要因が同時に行われる必要があるといえる。

Fig. 10 Occurrence of multiple frequency oscillation.

Fig. 11 Nonlinear Oscillations in Physical Systems.

また、これらの要因は、磁気異方性を設けたことによる影響、および、共振側磁極の断面積に違いによる影響があるモータでも三相電圧確立の要因として同じ事が明確となったことから、この二つの要因は三相パラメトリックモータを研究していく上で重要なものであるといえる。

今後は、今回検討を行った二つの要因が、どちらともコンデンサ容量が大きい側の発振条件が整うことにより起きた現象であることから、その発振条件が整う要因を追及する必要がある。

References

- 1) T. Yashima, M. Ohta, T. Ohkubo, T. Hiwatashi, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **26**, 673 (2002).
- 2) T. Yashima, S. Oikawa, M. Natsusaka, Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 526 (2003).
- 3) T. Yashima, M. Natsusaka, Y. Sakamoto: *I.E.E Japan Mag-02-149* (2002).
- 4) T. Yashima, M. Natsusaka, M. Ohta, Y. Sakamoto: *I.E.E, Japan MAG-01-156, LD-01-84* (2001).
- 5) Y. Satomi, T. Yashima, M. Natsusaka, Y. Sakamoto: *J. Magn* 146-16PS-27 (2003).
- 6) T. Ibata, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 246 (2007).
- 7) Y. Tosa, M. Ohkubo, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn*, **27**, 522 (2003).
- 8) J. Ishikawa, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto: *J. Magn*, 14pB-2(2007)
- 9) C. Hayashi, "Nonlinear Oscillations in Physical Systems", McGraw-Hill, 1964.

2009年10月15日受理, 2010年1月6日再受理, 2010年3月17日採録