パラメトリック電動機の異常回転動作機構に関する考察

Some Considerations on the Anomalous Rotating Phenomena of Parametric Induction Motors

坂本禎智・*村上孝一

八戸工業大学, 八戸市大字妙字大開 88-1 (☎031)

*東北大学工学部, 仙台市荒巻字青葉 (☎980)

Y. Sakamoto and K. Murakami*

Hachinohe Inst. of Tech., 88-1, Oobiraki, Ooaza Myo, Hachinohe, 031

*Dept. of Elect. Engng., Tohoku Univ., Aramaki Aza Aoba, Sendai, 980

The parametric induction motor has many excellent features compared with the ordinary single-phase capacitor motor. Since the parametric induction motor utilizes parametric oscillation, anomalous rotating phenomena may occur due to the parametric oscillation of an inappropriate resonance capacitor, machine size and excitation voltage. In this paper, to make clear the instability phenomena, the operating mechanism of the anomalous rotating phenomena of parametric motors was investigated. The results clarified a main cause of the anomalous phenomena. It was also shown that hysteresis of parametric oscillation of voltage changing corresponds qualitatively to hysteresis of rotating speed changing.

1. ま え が き

筆者らの開発したパラメトリック電動機^{1)~15)}は、構造が簡単であり、製作費が安価になるなどの他に、これまでの電動機にはない数多くの長所、特長を有しており、その開発動向が注目され、現在、小形のものでも最大効率¹⁾は 60% 程度と実用化の一手手前まで到達している。

しかし、非線形振動を利用した電動機のため、同調用コンデンサ容量、励磁電圧、回転数、磁心材料、寸法などの諸因子により、種々のパラメトリック発振不安定現象が生じ、例えば、電動機として特定の回路を付することなく、自動的に間欠運転あるいは正転・逆転を行うなど、これまでの電動機に見られない特異の動作を示す場合もある⁴⁾。

この異常回転現象は、通常の電動機として利用する場合は避けなければならない現象であるが、これを積極的に利用すれば、新形式アクチュエータとして有用な用途が考えられる。このためには、いずれの場合もその異常回転の生ずる原因、動作機構、異常現象の回避方法など

を明確にしておくことが必要となる。

筆者らはこれまでに、発振の安定性について、非線形磁気回路に従って求めた非線形微分方程式を、等価線形化法を用いて解き、種々の条件を変えた場合の発振安定性について詳細な検討を行っており、その結果、異常回転現象の生ずる概略の傾向、及び発振不安定性の回避の方法などある程度明確にすることができた^{1), 3)}。しかしながら、異常回転現象の生ずる原因、動作機構の完全な解明には至っていない。

本論文は、これらの事項を明らかにする目的をもって、回転数に対する発振安定性の関係、及び回転数と固定子漏れ磁束密度分布との関係などについて詳細な検討を行い、発振の不安定性の諸要因を明らかにするとともに、電圧の増減による発振の停止、確立という動作が、回転数の増減による発振の停止、確立という動作と定性的に一致することを見だし、電動機設計上極めて有用な成果を得た。

本論文は、これらの検討結果について報告するものである。

Fig. 1 Outline of parametric motor.

Fig. 2 Example of stable-unstable regions obtained by experiments.

2. パラメトリック電動機の動作状態

まず、パラメトリック電動機の動作状態について述べる。

Fig. 1 は本電動機の基本構成である。励磁用磁路 A_1 , A_2 及び共通磁路 B で固定子を形成している。 D は回転子である。

Fig. 2 は回転子に負荷を接続しない時（以下、自由状態時と称する）の電動機動作状態を表す。動作状態の判定は、共振側電圧波形及び回転数の変化に応じて行った。電動機は不安定現象解明のために、パラメトリック発振が不安定となるように設計されており、通常の設計法に従えば安定領域は広くなる。図より、動作は多くの複雑な領域に分類されることが分かる⁴⁾。パラメトリック発振の確立と停止が平衡状態の $[C]$ 領域と、概周期振動領域 $[B]$ に接する領域の境界は、測定精度によりある程度の幅を有するが、他の領域間は明確に分類される。

一般に、パラメトリック電動機の動作は、Fig. 2 に示すように、基本的には電動機として最も安定に動作する基本周波数発振安定領域 $[E]$ が存在し、電動機として負荷を取ることのできない第2調波発振安定領域 $[F_2]$ 、第3調波発振安定領域 $[F_3]$ などは、励磁電圧 E_1 が高く、同調用コンデンサ容量 C が小さい領域に生ずる。これらの各調波発振の安定領域の間に、パラメトリック発振が生じない $[A]$ 領域や、 $[F_2]$, $[F_3]$ 領域と同様に負荷を取ることのできない $[C]$ 領域が存在する。特に $[B]$ 領域の間欠運転領域¹⁾、 $[D]$ 領域の正転・逆転動作領域¹⁾は、基本周波数発振安定領域 $[E]$ の上部領域に生じることが明らかとなっている。

このように複雑に分類された $[B]$, $[D]$ 領域などの異常回転領域が、いかなる要因、理由で生ずるかを明らかに

するために、回転数と発振安定性との関係について詳細な検討を行う必要がある。

3. 実験方法

測定において主となるパラメータは、回転数 N 、励磁電圧 E_1 、同調用コンデンサ C である。回転数の変化に対する発振の安定性について検討を行うためには、励磁電圧 E_1 及び同調用コンデンサ C の値を固定し、発振の履歴特性を考慮して回転数 N を単調に増加、減少させて測定を行う必要がある。しかしこの場合は、回転数の設定が困難であることから、上記の方法では実験ができない。したがってここでは、次に述べる仮定に従って、同調用コンデンサ C 及び回転数 N の値を固定し、励磁電圧 E_1 を単調に増加、減少させて安定・不安定領域の測定を行うものとする。

仮定：回転数の増減による発振の確立、停止という動作は、電圧の増減による発振の確立、停止という動作と定性的に一致する。

なお、回転数の値は、パラメトリック電動機に直結した外部駆動用電動機により設定するものとする。

4. 実験結果及び考察

Fig. 3 は、励磁電圧を単調に増加させて測定した、種々の回転数の値と発振安定領域との関係である。各動作領域の判定は共振側電圧波形に応じて行った。 $[L]$ は励磁電圧に対して 90° 進み位相の、 $[R]$ は 90° 遅れ位相の基本周波数発振電圧が生ずる領域を表す。 $[S]$ は分数調波発振領域である。

回転数の増加とともに安定・不安定動作領域は徐々に変化する。特に、回転数 N が 2200 rpm から 2300 rpm 付近で、動作領域の傾向が急激に変化し、回転数の高い領域で概周期振動が現れていることが分かる。このような領域では、外部駆動用電動機を切り離した場合にも発振は不安定で、回転数は減少し、最も近い安定領域に推移する。

また、回転数の増加とともに $[R]$ 領域が生成拡大し、2500 rpm 付近から減少し、同図 (h) のように小さくなる。動作点が $[R]$ 領域に移ると、発振波形の位相が反転し、回転磁界の回転方向が反転するため、間欠運転、正逆回転などの異常回転現象の生ずる可能性がでてくる。しかし、回転数が変化した場合に、回転数変化前の発振状態が不安定であったか、また進み位相発振が安定であったか、遅れ位相発振が安定であったかによって、回転数変化後の発振安定状態は異なったものとなる。このため異常現象が生ずるか否かの正確な判定には、これら

Fig. 3 Measurement of stable-unstable regions when the voltage E_1 was increased monotonously.

の履歴特性を考慮する必要がある。

Fig. 4 は、励磁電圧を $E_1=90$ V より単調に減少させて測定した、種々の回転数の値と発振安定領域との関係である。Fig. 3(b) と Fig. 4(a), Fig. 3(e) と Fig. 4(b), Fig. 3(g) と Fig. 4(c) の同一回転数同士を比較すると、発振の確立と停止が平衡状態の領域 C には電圧の増減による

履歴がなく、安定発振領域 R と L 、概周期振動領域 G には履歴が存在することが分かる。

ここで安定発振領域 R 、 L について詳細な検討を行う。Fig. 4(a), Fig. 3(b) の L 領域に着目すると、電圧上昇時の L 領域上部が、電圧減少時に R 領域に変化していることが分かる。この部分は、電圧減少時に最初に生

Fig. 4 Measurement of stable-unstable regions when the voltage E_1 was decreased monotonously.

じたのが[R]領域であり、通常は履歴が存在するため、電圧増加時に[L]領域であっても[R]領域に変化するものである。この[R]と[L]の関係が反対の場合も存在するが、Fig. 4(b), (c)に示すように、同一コンデンサ容量に対して電圧を減少させた時に、[L]領域が[R]領域に変化する

場合もある。このように、同一コンデンサ容量Cに対して、[L]領域から[R]領域または[R]領域から[L]領域へと変化した場合は、変化後に生じている位相の安定発振状態しかあり得ないことを示している。

次にこのような事実を考慮して、Fig. 2に示した電動機動作状態を推察してみよう。作図法は次のとおりである。

拘束時0 rpmから回転数の小さい順に、電圧の増減によって測定した安定・不安定動作状態図を重ね、Fig. 2に示す[A], [B], [C], [D], [E]などを判定する。この時、すべての回転数の値に対して[L]である領域は、回転子を拘束しない自由状態時に、安定領域[E]と判定する。また、拘束時に発振未確立領域[A]であれば、自由状態時にも[A]と判定する。さらに、一度[L]領域から[R]領域に変化したと判定された領域は自由状態時に[B], [D]領域と判定する。

ただし、以上の判定においては、各回転数時の安定・不安定動作状態図に対して、次の事項を適用することとする。

(1) 電圧の増減に応じて、動作が[R]領域から[L]領域、あるいは[L]領域から[R]領域へ変化した場合、その変化後の領域は、その時に生じている位相の発振のみが安定であり、それぞれ[L], [R]領域と判定する。ただし、Fig. 3(b)に示すような[L]領域の下部[R]領域は、振幅が極小で、回転磁界が生成しないため、これを適用しない。

(2) 電圧の増減時に応じて、[L]領域から[C]領域あるいは[R]領域から[C]領域へと変化した場合は、[C]領域に履歴が存在しないため[C]領域と判定する。

(3) 電圧の増加時に、[C]領域から[L]領域または[R]領域へと変化した場合は、その境界以上の電圧値における領域はそれぞれ[L], [R]領域となる。ただし、これはトルク最大値を与える回転数の値（本電動機の場合は2300 rpm程度）まで適用される。これは、自由状態時の[C]領域ではトルク最大値まで回転数が上昇しないからである。

(4) 電圧減少時に安定領域の[L], [R]であったものは、電圧増加時に[A]領域であっても、回転数変化前の状態が安定領域の[L], [R]であったならば、回転数変化後の動作はそれぞれ[L], [R]と判定する。これはその動作点が電圧による発振安定性の履歴を有している点であることを考慮しているものである。

Fig. 5は、以上に従って求めた本電動機の動作状態図である。Fig. 2の実験結果と比較すると、良好な一致を示していることが了解される。[B], [D]領域は、以上の結果だけでは分類することができないので、同一の領域に

Fig. 5 Stable-unstable regions obtained by analysis.

示した。また、安定領域[E]の下部に、実測値と理論値とが一致していない部分があるが、この領域は、本電動機が拘束時に発振不確立で、単相電動機として動作し、回転数上昇によって高速の安定領域に入ってしまったために安定と判断されている領域である。

以上の結果より、電圧の増減による発振の履歴特性は、回転数の増減による発振の履歴特性と定性的な一致を示すことが明らかになり、3. で述べた仮定が妥当であることが確認できた。

ここで、不安定領域[B], [D]なる領域を作図によって見いだすことができたが、これらの領域は作図過程において、次の実験事実が要因となって生じたものである。

(a) 同調用コンデンサ容量Cの大きい領域に[R]領域のみが安定な領域があること。

(b) 同一コンデンサ容量値に対して励磁電圧を減少させた時、[L]領域が[R]領域に変化したこと。

この現象を解明することにより、異常回転現象の生ずる原因、機構などが、明らかになるものと思われる。次に、磁束の分布と回転数との関係について検討し、上記の項目について考察を行う。

Fig. 6 は、安定に動作するパラメトリック電動機の共通磁路外周部の表面漏れ磁束密度分布測定例である。測定は、Fig. 7 に示すように、回転子軸方向に10箇所、円周方向に50箇所の計500箇所で行った。Fig. 6の軸方向測定位置10が励磁側であり、1が共振側である。横軸の太い実線部分は共通磁心と励磁用磁心との接合部分を表す。図において漏れ磁束が大きいということはその部分の鉄心内部が飽和状態にあり、磁束が集中していることを表す。円周方向測定位置c d eの共振側の磁束密度分布に注目すると、低速時にe側に多く分布していた磁束密度が、1500 rpm 時と2200 rpm 時の間で大幅に変

Fig. 6 Distribution of leakage flux density on a common magnetic circuit for various values of rotating speed N .

Fig. 7 Measured position of leakage flux density B_l .

化し、c側に多く分布するようになっていることが了解される。すなわち、一方向回転磁界を形成する鉄心内部の磁束分布が、1500 rpm 時から 2200 rpm 時の間で逆方向回転磁界を形成し得る分布状態になったことを示している。これは、回転子反作用磁束の影響によるものと思われる。前述 Fig. 3 の 2200 rpm から 2300 rpm の間で動作状態が大幅に変化した現象は、この場合と同様に、回転子反作用磁束の影響を受けた磁束分布の変化が原因で生じたものと思われる。一方、励磁側の磁束密度分布は回転数の値に対して、ほとんど変化しないことが了解される。Fig. 6 の結果は、安定な電動機においても、条件によっては回転数の変化に対して発振が反転し得る状態となることを示している。したがって、不安定に設計した電動機において、同調用コンデンサ容量 C が大きい場合には、共振側電圧が大となり回転子反作用磁束が増大するため、磁束分布は回転子反作用磁束の影響を受けやすくなり、発振が反転するものと思われる。その結果、同調用コンデンサ容量 C の大きい領域に $\square$ 領域のみが安定な領域が存在することになる。また、発振が反転しやすい状態にある時、励磁電圧を減少させた場合は、発振を持続させるためのエネルギーが減少し、また共振側電圧がやや増加し、励磁電圧の減少分ほど反作用磁束が減少しないことから、磁束分布は回転子反作用磁束の影響を大きく受けやすくなる。その結果、発振が反転し、 $\square$ 領域が $\square$ 領域に変化するものと思われる。

以上述べたように、異常回転現象の生ずる要因となった前記 (a), (b) の現象には、回転子反作用磁束が大きく関係しているものと思われる。

5. あとがき

以上、パラメトリック電動機異常回転時の動作機構について詳細な検討を行った。その結果、次の事項を明確にすることができた。

(1) 電圧の増減による発振の停止、確立という動作が、回転数の増減による発振の停止、確立という動作と定性的に一致すること。

(2) 異常回転現象を引き起こす主たる要因は、回転子反作用磁束にあること。

以上の結果は、異常回転現象解明に役立つ有用な成果である。これらの結果を基に、励磁電圧及び共振側電圧と回転子反作用磁束の振幅及び位相の関係を明らかにすれば、異常現象の全貌が明らかになり、本電動機は実用化へ向けて一層進展するものと思われる。

最後に、実験に協力していただいた昭和 62 年度卒業生、野内 勉君、菊地隆至君に感謝する。

文 献

- 1) 坂本, 村上, 菊地: 電気学会論文誌 B, **106**, 487 (1986).
- 2) Y. Sakamoto, K. Murakami and S. Kikuchi: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21**, 1744 (1985).
- 3) 坂本, 三浦, 井出, 一ノ倉, 渡辺, 村上: 日本応用磁気学会誌, **11**, 395 (1987).
- 4) 坂本, 村上, 菊地: 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-83-107 (1983).
- 5) 村上, 渡辺: 電気学会磁気応用研究会資料 AM-79-57 (1979).
- 6) K. Murakami, S. Kikuchi and T. Watanabe: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-16**, 931 (1980).
- 7) S. Kikuchi, Y. Sakamoto, O. Ichinokura and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 1746 (1982).
- 8) 菊地, 坂本, 宮崎, 渡辺, 村上: 日本応用磁気学会誌, **7**, 147 (1983).
- 9) K. Murakami, S. Kikuchi, K. Murakami and T. Watanabe: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19**, 2085 (1983).
- 10) Y. Sakamoto, S. Kikuchi and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 1789 (1984).
- 11) S. Kikuchi, Y. Sakamoto and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, 1792 (1984).
- 12) 坂本, 村上, 菊地: 電子通信学会技術研究報告 CAS-84-149 (1984).
- 13) 坂本, 村上, 菊地: 電気学会論文誌 B, **105**, 339 (1985).
- 14) 坂本, 三浦, 渡辺, 村上, 菊地: 日本応用磁気学会誌, **10**, 367 (1986).
- 15) 村上, 菊地, 坂本: 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-82-172 (1982).

1987 年 12 月 7 日受理, 1988 年 2 月 12 日採録