コンデンサ誘導電動機の負荷時電磁振動の発生原因と特徴

正員 廣塚 功* 正員 坪井 和男*

Causes and Characteristics of the Electromagnetic Vibration of a Capacitor Motor under Load Condition

Isao Hirotsuka*, Member, Kazuo Tsuboi*, Member

The capacitor motors (CRMs) are widely used to drive industrial equipment and electric home appliances. Recently, the reduction of the vibration and noise of CRMs has become increasingly important from the standpoint of environmental improvement. However, electromagnetic vibration of CRMs under load has not been analyzed sufficiently. The present paper theoretically and experimentally discusses the causes and characteristics of CRM electromagnetic vibration under load. The primary conclusions are as follows:

(1) The general formula for dominant electromagnetic vibration caused by electromagnetic force wave was derived, including the influences not only of a backward magnetic field but also of magnetic saturation.

(2) The dominant electromagnetic vibration of CRMs was theoretically attributed to three types of electromagnetic force waves. Two types of electromagnetic force wave are generated by the interaction of two forward magnetic fluxes, such as those of a three-phase squirrel-cage induction motor, and the other type of electromagnetic force wave is generated under the influence of a backward magnetic flux.

(3) The characteristics of dominant electromagnetic vibration depending on load and running capacitor were classified theoretically and experimentally into three types based on the characteristics of the electromagnetic force wave and equivalent circuit current.

(4) The influences of magnetic saturation in dominant electromagnetic vibration were verified experimentally and their causes were clarified theoretically in relation to electromagnetic force waves.

キーワード：コンデンサモータ，電磁振動，電磁力波，逆相分磁界

Keywords: capacitor motor, electromagnetic vibration, electromagnetic force wave, backward magnetic field

1. まえがき

コンデンサモータ（以下，CRM と略記）は，産業機器および家庭電化製品の動力用などとして幅広く用いられているが，近年の環境改善の見地から，より低振動・低騒音を強く求められるようになってきている。CRM の電磁振動は，ギャップ中に存在する高調波磁束に起因した電磁力波に起因して生じていることは古くからの多数の研究により明らかにされている⁽¹⁾。しかし，CRM の負荷時電磁振動および電磁騒音についてはなお未解明な部分が多数残存している。CRM の負荷時電磁振動および電磁騒音はその設置条件および接続される負荷装置などの影響を受けるため，極めて複雑であるが，CRM の電磁騒音の原因とな

る電磁振動を解明することが本質的に重要であると考えられる。特に，CRM は三相かご形誘導電動機（以下，三相 IM と略記）と構造上類似しているが，一般に，CRM のギャップ中には逆相分磁界が存在するため，CRM の電磁振動を検討する場合，三相 IM の場合と比べ，より複雑となる。そこで，著者らは CRM の無負荷時単体の電磁振動に関して検討を行い，その発生原因，発生の特徴などを明らかにしてきた⁽²⁾。一方，三相 IM の負荷時電磁振動の発生原因および発生の特徴なども明らかにした⁽³⁾。その結果，三相 IM において，無負荷時では問題とならない振動成分が負荷の増加とともに顕著になるなど，無負荷時単体の電磁振動と負荷時の電磁振動とはその発生の特徴などが異なることが明らかになった。しかし，CRM と三相 IM とは構造上類似しているが，CRM の負荷時電磁振動に及ぼす逆相分磁界の影響などはいまだ明確になっていない。

以上のような背景により，本論文では，CRM の負荷時電磁振動の発生原因を整理するとともに，発生の特徴などを

* 中部大学

〒487-8501 春日井市松本町 1200

Chubu University

1200, Matsumoto, Kasugai 487-8501

実験結果に基づいて詳細に考察している。すなわち、CRMの顕著な電磁振動の発生原因となる顕著な負荷時電磁力波の発生原因を、正相分磁界、逆相分磁界および磁気飽和の影響も考慮し、その一般式を導出している。また、負荷の大きさおよびコンデンサ容量に対する負荷時電磁振動の特徴を実験的に明らかにしている。さらに、筆者の一人がすでに明らかにした CRM の等価回路⁽⁴⁾を用い、等価回路電流の特徴と負荷時電磁振動の特徴との比較により、CRMの負荷時電磁振動の発生の特徴を明らかにしている。

なお、本論文は電気学会回転機研究会などに発表した内容^{(5)~(7)}を更に整理加筆したものである。また、本論文において、CRMの負荷時電磁振動の特徴をより一層明確にするために、三相 IM との比較検討を随所で行っているが、主として文献⁽³⁾と対比させて検討しているのが、ご参照いただければ幸いである。

2. 負荷時における顕著な電磁力波

ここでは、CRMの負荷時に顕著となる振動成分の発生原因となり得る電磁力波の一般式を、逆相分磁界および磁気飽和の影響も含めてまとめておく。

顕著な電磁力波の発生原因となる高調波次数として、正相分および逆相分固定子起磁力の基本波成分 F_s および正相分および逆相分回転子起磁力 F_r 、スロットの存在に起因する固定子および回転子パーミアンス P_s および P_r 、および固定子鉄心、回転子鉄心および歯の磁気飽和現象を等価的にパーミアンスの変化と見なした場合における磁気飽和パーミアンス(以下、単に飽和パーミアンスと略記) P_{sa} を考慮することとした。従って、CRMのギャップ中の磁束密度 b_g は近似的に (1) 式のように表せる⁽⁸⁾。

$$b_g = \alpha(F_s + F_r)P_s \cdot P_r \cdot P_{sa} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α : パーミアンスの逆数の次元を持つ定数。

固定子起磁力の正相分を F_s^P 、逆相分を F_s^N 、および F_s^P に起因する回転子起磁力を F_r^P 、 F_s^N に起因する回転子起磁力を F_r^N とすれば、(1) 式は (2) 式のようにも表せる。

$$\begin{aligned} b_g &= \{(\alpha F_s^P \cdot P_s \cdot P_r + \alpha F_s^N \cdot P_s \cdot P_r) \\ &\quad + (\alpha F_r^P \cdot P_s \cdot P_r + \alpha F_r^N \cdot P_s \cdot P_r)\} P_{sa} \\ &= \{(b_s^P + b_s^N) + (b_r^P + b_r^N)\} P_{sa} \\ &= (b_s + b_r) P_{sa} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} b_s^P &\equiv \alpha F_s^P \cdot P_s \cdot P_r, \quad b_s^N \equiv \alpha F_s^N \cdot P_s \cdot P_r, \\ b_r^P &\equiv \alpha F_r^P \cdot P_s \cdot P_r, \quad b_r^N \equiv \alpha F_r^N \cdot P_s \cdot P_r, \\ b_s &\equiv b_s^P + b_s^N, \quad b_r \equiv b_r^P + b_r^N \end{aligned}$$

なお、 b_s を固定子磁束密度、 b_r を回転子磁束密度と称することとする。

b_s^P および b_r^P は三相 IM において顕著な電磁力波の発生原因となっていた⁽³⁾ ので、構造的に類似している CRM においても顕著な電磁力波の発生原因になると考えることができる。すなわち、 b_s^P の基本波成分およびスロット高調波

成分は無負荷時および負荷時を問わず優勢な成分であるので、これを考慮する。 b_r^P の基本波成分は、無負荷時には回転子のすべり周波数の電流がほぼ零である⁽⁹⁾と考えられるので、顕著な電磁力波の発生原因になるとは考えにくい。しかし、負荷時には正相分の回転子基本波電流の増大に伴い b_r^P の基本波成分が無視できなくなると考えられる。従って、無負荷時には、 b_r^P の基本波成分を除く高調波成分のみ、負荷時には基本波成分および高調波成分を考慮する。 b_s^N は逆相分磁界に起因した固定子磁束密度であり、その基本波成分は無負荷時に一般に b_s^P の 5%以下であり⁽¹⁰⁾、本論文の供試機においても約 2%程度であることを確認している。また、CRMは、一般に定格負荷時に逆相分磁界の影響が最小となるように設計されるので、 b_s^N の基本波成分は負荷の増加とともに減少する。 b_r^N は回転子の逆相分磁界に起因した回転子磁束密度である。後述のように、 b_r^N の基本波成分に対応すると考えた電流はかなり大きいので、本論文ではこれを考慮する。

小形のかご形誘導電動機の場合、一般に固定子磁束密度と回転子磁束密度との相互作用による電磁力波が問題となる。ここで、上述のように逆相分磁束密度より正相分磁束密度の方がかなり優勢であり、逆相分磁束密度同士の相互作用による電磁力波はかなり小さいと考えられる。従って、逆相分磁束密度同士の相互作用により生じる電磁力波を考慮しないこととすれば、顕著な電磁力波 f_r は (3) 式のように表せる。

$$\begin{aligned} f_r &= (b_s + b_r)^2 P_{sa}^2 / (2\mu_0) \\ &= \{b_s^P \cdot b_r^P + (b_s^P \cdot b_r^N + b_s^N \cdot b_r^P)\} P_{sa}^2 / (2\mu_0) \\ &= \sum_{ks} \sum_{kr} \sum_{ks'} \sum_{kr'} f_{r \cdot ks \cdot kr \cdot ks' \cdot kr'}^{PP} \\ &\quad \times \left[\cos \left[\left\{ \frac{k_r - k_r'}{p'} n(1-s) + 2p' k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \{(p' + k_s n_s + k_r n) - (p' + k_s' n_s + k_r' n) + 2p' k_{sa}\} \phi \right] \right. \\ &\quad \left. + \cos \left[\left\{ \frac{k_r - k_r'}{p'} n(1-s) + 2 + 2p' k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \{(p' + k_s n_s + k_r n) - (p' + k_s' n_s + k_r' n) + 2p' k_{sa}\} \phi \right] \right] \\ &\quad + \sum_{ks} \sum_{kr} \sum_{ks'} \sum_{kr'} f_{r \cdot ks \cdot kr \cdot ks' \cdot kr'}^{PN} \\ &\quad \times \left[\cos \left[\left\{ \frac{k_r - k_r'}{p'} n(1-s) + 2p' k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \{(\pm p' + k_s n_s + k_r n) - (\mp p' + k_s' n_s + k_r' n) + 2p' k_{sa}\} \phi \right] \right. \\ &\quad \left. + \cos \left[\left\{ \frac{k_r - k_r'}{p'} n(1-s) + 2 + 2p' k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \{(\pm p' + k_s n_s + k_r n) - (\mp p' + k_s' n_s + k_r' n) + 2p' k_{sa}\} \phi \right] \right] \\ &\quad (\text{各 } \phi \text{ の係数部分内で複合同順}) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 p' : 極対数, s : 滑り, n_s および n : 固定子および回転子スロット数, k_s および k'_s : 固定子スロット高調波の次数, k_r および k'_r : 回転子スロット高調波の次数, k_{sa} : 飽和パーミアンスを合成した結果生じる次数 (以下, 磁気飽和の次数と略記), ω : 電源角周波数, t : 時間, ϕ : 固定子静止座標上の任意の位置。なお, $k_s \neq 0$ および $k_r \neq 0$ ならば $k'_s = k'_r = 0$ であり, $k_s = k_r = 0$ ならば $k'_s \neq 0$ かつ $k'_r \neq 0$ 。

(3) 式より, CRM の顕著な電磁力波は正相分のみの相互作用により生じる 2 種類の電磁力波と逆相分が関与して生じる電磁力波の 2 つに分けて考えることができる。(3) 式の第 1 項は三相 IM の場合⁽³⁾と同様に検討でき, 無負荷時にも顕著な電磁力波 [I] と負荷時にのみ顕著となる電磁力波 [II] を表していることになる。これらの電磁力波は, 正相分磁束密度 b_s^N の基本波成分に依存することとなり, 後述の等価回路電流より, コンデンサ容量 C_r [μ F] による影響はわずかである。第 2 項は正相分磁束密度と逆相分磁束密度との相互作用による電磁力波であり, 通常の三相 IM では生じない電磁力波である。従って, 本論文では便宜的に, この電磁力波を電磁力波 [III] と称することとする。一般に, 逆相分磁界 b_r^N の基本波成分は, 正相分磁界の基本波成分に対して, 無負荷時において 5% 以下⁽¹⁰⁾であり, 負荷の増加とともに減少し, 定格負荷時には小さくなるよう設計されている。従って, 電磁力波 [III] の大きさは, 負荷の増加に伴い減少すると考えられる。また, C_r を変えた場合, b_r^N の基本波成分の大きさが変化し, 電磁力波 [III] の大きさは変化すると考えられる。

以上の電磁力波 [I] ~ [III] の発生周波数 f_M [Hz] およびモード M まとめると, 表 1 のようになる。但し, 同表

表 1 顕著な電磁力波

Table 1. Dominant electrical force waves.

Force frequency f_M	Mode $M =$ (the order of b_s) $\pm$ (the order of b_r)
$\left\{ \frac{Kn}{p'}(1-s) - 2 + 2k_{sa} \right\} f$	[I] : $ (p') + (p' + Ln_s - Kn) + 2p'k_{sa} $
	[II] : $ (p' + Ln_s - Kn) + (p') + 2p'k_{sa} $
	[III] : $\left\{ \begin{array}{l} (\pm p') + (\mp p' + Ln_s - Kn) + 2p'k_{sa} \\ (\pm p' + Ln_s - Kn) + (\mp p') + 2p'k_{sa} \end{array} \right.$
$\left\{ \frac{Kn}{p'}(1-s) + 2k_{sa} \right\} f$	[I] : $ (p') - (p' \pm Ln_s \mp Kn) + 2p'k_{sa} $
	[II] : $ (p' \pm Ln_s \mp Kn) - (p') + 2p'k_{sa} $
	[III] : $\left\{ \begin{array}{l} (\pm p') - (\mp p' \pm Ln_s \mp Kn) + 2p'k_{sa} \\ (\pm p' \pm Ln_s \mp Kn) - (\mp p') + 2p'k_{sa} \end{array} \right.$
$\left\{ \frac{Kn}{p'}(1-s) + 2 + 2k_{sa} \right\} f$	[I] : $ (p') + (p' - Ln_s + Kn) + 2p'k_{sa} $
	[II] : $ (p' - Ln_s + Kn) + (p') + 2p'k_{sa} $
	[III] : $\left\{ \begin{array}{l} (\pm p') + (\mp p' - Ln_s + Kn) + 2p'k_{sa} \\ (\pm p' - Ln_s + Kn) + (\mp p') + 2p'k_{sa} \end{array} \right.$

* Double signs in same order except the sign of p' .

* Does not consider the force by the backward magnetic field ($= -p'$) only.

においては, k_s もしくは $k'_s = \pm L$, k_r および $k'_r = \pm K$ (L および K は正の整数) としている。同表に示したように, 負荷時の CRM においては, 三相 IM の場合と同様に, 無負荷時にも顕著となる電磁力波 [I] および負荷時にのみ顕著となる電磁力波 [II] を生じる。さらに, 逆相分磁界の影響により, 電磁力波 [I] および [II] とは負荷および C_r に対する特徴の異なる, 電磁力波 [III] を生じることとなる。また, 同一の f_M に, 発生原因が異なる磁束密度の相互作用により 3 種類の電磁力波を生じる。このように, 同一周波数に発生原因の異なる 2 種類以上の電磁力波を生じる場合, その周波数における電磁力波は, それらのベクトル和が合成電磁力波となる⁽¹²⁾。すなわち, 負荷の大きさおよび C_r により 3 種類の電磁力波の大きさおよび位相が変化するが, その変化は各電磁力波において異なるため, 合成電磁力波の大きさは必ずしも一樣になるとは限らない。

以上のように, CRM の顕著な負荷時電磁振動の発生原因となる高調波次数関係および電磁力波を理論的に整理した。その結果, コンデンサ容量および負荷に対して特徴の異なる 3 種類の電磁力波を生じることなどを明らかにした。

3. 供試機の仕様および実験方法

表 2 に供試機の仕様を示す。固定子スロット数 n_s を 32, 回転子スロット数 n を 31 および 35 としている。これらのスロット数組合せは電磁振動を検討しやすいものとしており, 一般に市販されている組合せではない。いずれの回転子も斜めスロットは施されていない。コンデンサ容量 C_r は定格負荷時に逆相分磁界がもっとも小さくなる値としている。供試機の固有振動数は, 室温時に静止した状態でインパクトハンマーにより測定した結果の主要なもののみを示しており, 同表に示した以外の固有振動数の影響により, 顕著な電磁振動を生じる場合もあると考えている。また, 実際に CRM の電磁振動を測定する際には温度上昇などもあり, この固有振動数も若干変化しているものと考えられる。

実験装置の構成を図 1 に示す。本実験装置は, 三相 IM の負荷時電磁振動を測定した装置⁽³⁾と同一のものであり, CRM をゴムで弾性支持し強固な共通ベース上に据え, 回転方向に堅牢で軸方向に柔軟なカップリング, 床と共通ベースとの間の防振ゴム, 実験装置が設置されている床と他の

表 2 供試機の仕様

Table 2. Specifications of test machine.

Pole $2p'$	4
Rated output	0.75 kW
Rated voltage V_n	200 V
Rated frequency f_n	60 Hz
Number of stator slot n_s	32
Number of rotor slot n	31, 35
Capacity C_r	30 μ F
Natural frequencies	625, 1700, 3300, 4000 Hz

図 1 実験装置の構成図

Fig. 1. Arrangement of experimental apparatuses.

床との切り離しなど、外部振動の伝達防止と供試機の制振作用を除去している。電源には正弦波可変周波数電源を用いており、供試機の始動時異常現象⁽¹³⁾を避けて始動できるようにするとともに、印加電圧 V と周波数 f との比を任意に変更できるようにしている。半径方向の電磁振動を、CRM のほぼ中央上部に取り付けた加速度ピックアップにて検出している。これを FFT アナライザで解析し、振動加速度 f_a [m/s²]、発生周波数 f_v [Hz] および 5 kHz までの振動加速度の実効値 F_{va} [m/s²] をパソコンに転送してデータ処理を行っている。負荷状態を定格トルクに対する比（以下、負荷率と略記） L_p で記しており、無負荷時には $L_p = 0\%$ であり、全負荷時に $L_p = 100\%$ である。なお、CRM は負荷装置に接続されているので、 $L_p = 0\%$ と表わした場合であっても、CRM の負荷状態は厳密には無負荷ではない。しかし、多数の予備実験の結果、 $L_p = 0\%$ での振動測定値は CRM 単体での測定値とほぼ一致していることから、本論文では $L_p = 0\%$ と表記している。

コンデンサ容量 C_r を変えることにより逆相分磁界も変化するので、各負荷状態において、 $C_r = 10 \sim 50 \mu\text{F}$ ($10 \mu\text{F}$ 毎) における電磁振動も測定した。

振動発生周波数 f_v が L_p に対して変化するので、 f_a は機械系の共振の影響を著しく受ける場合がある。こうした機械系の共振の影響を避けるためには、個々の振動成分に対して f_v を一定とする実験を行う必要がある。負荷時電磁振動の発生の特徴を測定する場合には、個々の振動成分に対して機械系の共振の影響をできるだけ受けまいよう、 f_v を一定に保つように、印加電圧の周波数 f を調整し、かつ、ギャップ磁束をほぼ一定とするため、 V/f の比を定格電圧 V_n と定格周波数 f_n との比 $V_n/f_n = 200 \text{ V}/60 \text{ Hz}$ に保つように V も調整している。従って、本論文では、振動成分をその振動成分が $s = 0$ において生じると仮定した場合の f_v として表わしている。

4. 実験結果および検討

4.1 顕著な電磁振動の発生状況 図 2 に、実験結果

図 2 電磁振動の発生状況 ($n = 31$)

Fig. 2. Measured electromagnetic vibration ($n = 31$).

の一例として、印加電圧を $V = 200 \text{ V}$ 、 $f = 60 \text{ Hz}$ 一定とした場合の $n = 31$ における顕著な電磁振動の発生状況を示す。同図に示したように、 L_p の増加に伴い顕著な振動成分の振動発生周波数 f_v は減少している。しかし、 C_r の変化に対する各振動成分の特徴は様々である。また、 L_p の増加に伴い顕著な振動成分の発生周波数 f_v は減少している。従って、以降は特徴の明確な振動成分に対して、機械系の共振の影響を同一とするように、各振動成分の f_v を一定とした実験結果について検討を行うこととする。

4.2 顕著な電磁振動の特徴 図 3 に、顕著な振動成分に対して f_v を一定とした実験結果を示す。同図には、特徴の明確な振動成分のみの、負荷およびコンデンサ容量に対する特徴を示している。また、表 3 に、これらの振動成分の発生の主要原因を表 1 に基づきまとめた結果を示す。なお、同表には、後述の振動成分に対して発生の主要原因なども示してある。

図 3(a) に示した $n = 31$ における 930 Hz 振動成分は、 $L_p = 0\%$ においても顕著であり、 L_p の増加に伴い著しく増大している。 C_r の変化に対して、後述の $n = 31$ における

2910 Hz 振動成分ほどではないが、若干影響を受け、同一の L_p の場合、 $C_r = 30 \mu\text{F}$ の場合に最も小さくなっている。この振動成分の発生の主原因は、表 3 より、 $L_p = 0\%$ では $M = 1$ の電磁力波 [I]、 $L_p \neq 0\%$ では電磁力波 [I] および [II] であるが、 $M = 3$ の電磁力波 [III] の影響も若干受けている。

図 3(b) に示した $n = 31$ における 1860 Hz 振動成分は、 L_p および C_r を変化した場合であってもほぼ一定となっている。この振動成分の発生の主原因は、表 3 より $M = 2$ の電磁力波 [I] および [II] であり、電磁力波 [I] の影響が大きいので、 L_p および C_r に対してあまり変化しない結

(a) $n = 31$, 930 Hz electromagnetic vibration

(b) $n = 31$, 1860 Hz electromagnetic vibration

(c) $n = 31$, 2910 Hz electromagnetic vibration

図 3 顕著な電磁振動の特徴

Fig. 3. Characteristics of dominant electromagnetic vibration.

果となったものと考えられる。

図 3(c) に示した $n = 31$ における 2910 Hz 振動成分は、 $L_p = 0\%$ の場合に顕著であるが、 L_p の増加とともに減少している。また、 C_r により著しく影響を受け、 $L_p = 100\%$ 、 $C_r = 30 \mu\text{F}$ のとき最も小さくなっている。これらの特徴は電磁力波 [III] の特徴と一致しているため、この振動成分の発生の主原因は、表 3 に示した $M = 3$ の電磁力波 [III] であると考えられる。表 3 では $M = 1$ の電磁力波 [I] および [II] も示してあるが、電磁力波 [I] および [II] より電磁力波 [III] が著しく大きい、もしくはこの周波数における機械系の固有振動数のモードと電磁力波 [III] のモードとが一致しているためなどにより、電磁力波 [III] に依存した発生の特徴となったものと考えられるが、詳細は今後の課題としたい。

以上のように、表 1 の電磁力波の発生周波数およびモードから、顕著な振動成分の負荷およびコンデンサ容量に対する発生の特徴が 3 種類に分類できることを示すことができた。すなわち、CRM の負荷時電磁振動の発生原因は、三相 IM と同様に、正相分磁界による無負荷時に顕著となる電磁力波 [I]、および基本波正相分磁界による回転子基本波電流の増大による負荷時に顕著となる電磁力波 [II]、さらに負荷およびコンデンサ容量により変化する逆相分磁界による顕著な電磁力波 [III] の 3 種類に分類できることを明らかにした。

4.3 励磁回路電流による検討 CRM の負荷時電磁振動の特徴についてさらに詳細に検討するため、ここでは、 C_r に対する顕著な振動成分の特徴と等価回路中の基本波正相分磁界および基本波逆相分磁界の特徴とを比較することとした。

図 4 に、本論文の理解を容易にするために、CRM の等価回路⁽⁴⁾を示す。同図の等価回路は対称軸上で表した等価回路であり、各定数は固定子側に換算している。基本波正相分磁界および基本波逆相分磁界は、この等価回路上の正

表 3 顕著な電磁振動の発生原因

Table 3. Causes of dominant electromagnetic vibration.

Figure	Number of rotor slots n	Frequency f_v [Hz]	Order of rotor slot harmonics K	Classification of electromagnetic force	Mode M
Fig. 3 (a)	31	930	1	[I]	1
				[II]	
				[III]	3
Fig. 3 (b)	31	1860	2	[I]	
				[II]	2
				[III]	
Fig. 3 (c)	31	2910	3	[I]	1
				[II]	
				[III]	3
Fig. 6	35	2790	3	[III]	1 [※]

※ $k_{sa} = -3$

$\dot{V}_{1f}, \dot{V}_{1b}$: Forward voltage, Backward voltage
 R_{ds} : Resistance of main winding
 x_{l1}' : Primary leakage reactance
 x_{l2}' : Secondary leakage reactance scaled to primary circuit
 r_2' : Secondary resistance scaled to primary circuit
 $2R_D = R_{ds} - \beta^2 R_{qs}$, β^2 : Ratio of self-reactance
 R_{qs} : Resistance of auxiliary winding
 r_i' : Resistance of stator iron loss
 x_m' : Mutual reactance
 B : Impedance of capacitor scaled to primary circuit
 $I^P = I_1^{1f} + I_s^{2f'}$, $I^N = I_1^{1b} + I_{2-s}^{2b'}$

図 4 CRM の等価回路

Fig. 4. Equivalent circuit of CRM.

相分励磁回路電流 I^P および逆相分励磁回路電流 I^N の絶対値 I^P および I^N に各々比例する。等価回路電流と高調波磁束とは厳密には対応しないが、本論文においては高調波磁束が等価回路電流の基本波成分に比例すると考えることとする。このように考えた場合、 L_p および C_r に対する電磁力波 [I] の特徴は I^P の特徴と、電磁力波 [II] は正相分二次電流 $I_s^{2f'}$ と、電磁力波 [III] は I^N もしくは逆相分二次電流 $I_{2-s}^{2b'}$ と同様な傾向を有することとなる。

図 5 に、 $C_r = 30 \mu\text{F}$ 時に対する比として、 $L_p = 100\%$ における $n = 31$ の 1860 Hz 振動成分および 2910 Hz 振動成分の f_a を示す。なお、等価回路電流は定格電圧、定格周波数における値を用いており、各振動成分の f_a は、図 3 の値としており、電圧条件が異なるが、特徴を比較するには十分であるものと考えている。図 5 に示すように、 C_r の増加とともに I^P はわずかに減少し、 I^N は $C_r = 30 \mu\text{F}$ 付近で最小となった後に増加している。1860 Hz 振動成分の C_r に対する特徴は I^P の特徴に、2910 Hz 振動成分は I^N の特徴に類似していることが確認できる。このことから、1860 Hz 振動成分の発生の主原因は基本波正相分磁界に起因した電磁力波、2910 Hz 振動成分では基本波逆相分磁界に起因した電磁力波であると考えられる。なお、紙面の都合上割愛したが、 $n = 31$ における 930 Hz 振動成分の負荷

図 5 コンデンサ容量による正相分および逆相分磁界、顕著な振動成分の変化 ($L_p = 100\%$)

Fig. 5. Variation of forward and backward magnetic field and dominant vibration with capacitor ($L_p = 100\%$).

率およびコンデンサ容量に対する特徴は $I_s^{2f'}$ の特徴と非常に類似した特徴を有していることを確認している⁽⁶⁾。このことから、930 Hz 振動成分の発生の主原因は正相分二次電流に起因した電磁力波であると考えられる。

4.4 磁気飽和の影響により顕著となる電磁振動 前節までに示した振動成分の発生原因は、等価回路電流の特徴と比較検討することにより説明できる。しかし、磁気飽和の影響により顕著となっている振動成分も発生しており、これらの振動成分について本節ではより詳細に検討する。

図 6 に、磁気飽和の影響により顕著となっている振動成分の一例として、 $n = 35$ における 2790 Hz 振動成分の負荷およびコンデンサ容量に対する特徴を示す。なお、この振動成分の発生原因は前述の表 3 に示してある。同図と図 3 との比較より、この振動成分の L_p および C_r に対する特徴は、図 3 に示した振動成分の特徴とは異なっている。すなわち、2790 Hz 振動成分の振動加速度 f_a は、 L_p を増加すると減少する傾向にあり、 C_r に著しく影響を受け、 $C_r = 40 \mu\text{F}$ の場合、最も大きくなっている。磁気飽和の影響は印加電圧を変化させた実験により確認できる⁽¹¹⁾ ので、CRM の無負荷時単体の印加電圧および C_r を変化させた実験結果を図 7 に示す。図 7 に示した $n = 31$ における 1860 Hz 振動成分は、磁気飽和の影響をほとんど受けていない振動成分である。この振動成分の振動加速度 f_a は、印加電圧の

2 乗にほぼ比例して増大しており、低電圧時においてもその発生がはっきり確認できる。図 7(b) に示した $n = 35$ における 2790 Hz 振動成分は、低電圧時でははっきりと確認できず、各 C_r で印加電圧が 140 V 以上となると急激に増大している。また、この振動成分の発生周波数 f_v は、磁気飽和を考慮 ($k_{sa} \neq 0$) しなければ理論上生じないこととなる。さらに、その f_a は C_r により著しく影響を受けていることから、この振動成分の発生の主原因は、表 3 に記したように、磁気飽和の影響を考慮 ($k_{sa} = -3$) した場合の $M = 1$ の電磁力波 [III] であると考えられる。なお、 f_v が供試機の固有振動数近辺であるため、機械系の共振の影響も受け顕著な振動成分になったものと考えられる。

図 6 顕著な電磁振動の特徴

Fig.6. Characteristics of dominant electromagnetic vibration.

(a) $n = 31$, 1860 Hz electromagnetic vibration

(b) $n = 35$, 2790 Hz electromagnetic vibration

図 7 印加電圧に対する電磁振動の変化

Fig.7. Variation of the electromagnetic vibration with input voltage.

5. あとがき

本論文においては、CRM の負荷時電磁振動の発生原因となる電磁力波の一般式を導出するとともに、CRM の負荷時電磁振動の発生の特徴および発生原因について理論と実験面とから考察した。本論文で明らかにした事項をまとめると以下ようになる。

(1) 顕著な電磁振動の発生原因となる電磁力波の一般式を逆相分磁界の影響のみならず磁気飽和の影響も含めて導出した。

(2) CRM の顕著な負荷時電磁振動は、三相 IM と同様な正相分磁束密度のみの相互作用による 2 種類の電磁力波と逆相分磁束密度が関与して生じる電磁力波との 3 種類の電磁力波に起因して生じていることを理論的に明らかにした。

(3) CRM の顕著な負荷時電磁振動の負荷およびコンデンサ容量に対する特徴は、電磁力波および等価回路電流の特徴から大別して 3 種類に分類できることを理論的かつ実験的に明らかにした。

(4) 顕著となる負荷時電磁振動における磁気飽和の影響を実験的に確認し、その発生原因を電磁力波との対応により理論的に明らかにした。

本論文がこの種の研究の一助となれば幸いである。なお、CRM の負荷時電磁振動に及ぼす固定子スロット数と回転子スロット数との組合せの影響および斜めスロットの影響については、稿を新たにして報告したいと考えている。

最後に、本論文を作成するに当たり、種々のご援助、ご鞭撻を賜った(株)東芝望月資康氏、また、膨大な実験結果の整理などにご協力いただいた中部大学大学院工学研究科博士前期課程片山晴義氏(現、電気技術株式会社)、同安田英知氏(現、安田電業株式会社)、同奥地一基氏、並びに中部大学工学部電気工学科卒業研究生に深甚なる感謝の意を表します。また、電気学会回転機研究会などの席上にて有益なご討論をいただいた方々に深く感謝します。なお、本研究の遂行に当たり、日本私立学校振興・共済事業団より研究費の支援を受けたことを付記し、深甚なる感謝の意を表する次第であります。

(平成 15 年 6 月 4 日受付、平成 15 年 12 月 11 日再受付)

文 献

- (1) For example, K. Tajima, H. Kouno, and K. Nemoto: "Magnetic Noise of Fan Motor", *Hitachi Reviews*, Vol.51, p.938 (1969-10) (in Japanese)
例えば、田島邦雄・高野久行・根本和夫:「扇風機用モータの磁気音についての検討」, 日立評論, 51, p.938 (1969-10)
- (2) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, S. Mori, and K. Kato: "Experimental Study on the Electromagnetic Vibration of a Capacitor Induction Motor", *T. IEE Japan*, Vol.110D, No.8, p.908 (1990-8) (in Japanese)
廣塚 功・坪井和男・森 貞明・加藤邦弘:「コンデンサ誘導電動機の電磁振動に関する実験的考察」, 電学論 D, 110, 8, p.908 (1990-8)
- (3) K. Tsuboi, I. Hirotsuka, and F. Ishibashi: "Causes and Characteristics of the Electromagnetic Vibration of A Squirrel

- Cage Induction Motor under Loaded Condition”, *T. IEE Japan*, Vol.117D, No.1, p.73 (1997-1) (in Japanese)
- 坪井和男・廣塚 功・石橋文徳：「かご形誘導電動機の負荷時における電磁振動の発生原因と特徴」, *電学論 D*, **117**, 1, p.73 (1997-1)
- (4) K. Tsuboi: “Analysis of Split-phase Induction Motors in consideration of Stator Iron Losses”, *T. IEE Japan*, Vol.94B, No.6, p.287 (1974-6) (in Japanese)
- 坪井和男：「固定子鉄損を考慮した分相形单相誘導電動機の解析」, *電学論 B*, **94**, 6, p.287 (1974-6)
- (5) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, H. Katayama, and M. Mochiduki: “An Experimental Study on the Electromagnetic Vibration of A Capacitor Motor under Load Conditions”, *T. IEE Japan*, The papers of technical meeting on rotating machinery, RM-98-121 (1998-10) (in Japanese)
- 廣塚 功・坪井和男・片山晴義・望月資康：「コンデンサモータの負荷時電磁振動に関する実験的考察」, *電気学会回転機研資*, RM-98-121 (1998-10)
- (6) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, H. Katayama, and M. Mochiduki: “An Experimental Study on the Causes of Electromagnetic Vibration of A Capacitor Motor under Load Conditions”, *T. IEE Japan*, The papers of technical meeting on rotating machinery, RM-99-13 (1999-5) (in Japanese)
- 廣塚 功・坪井和男・片山晴義・望月資康：「コンデンサモータの負荷時電磁振動の発生原因に関する実験的考察」, *電気学会回転機研資*, RM-99-13 (1999-5)
- (7) H. Katayama, I. Hirotsuka, K. Tsuboi, and M. Mochiduki: “An Experimental Study on the Causes of Electromagnetic Vibration of A Capacitor Motor under Load Conditions”, *T. IEE Japan*, The papers of technical meeting on rotating machinery, RM-99-95 (1999-10) (in Japanese)
- 片山晴義・廣塚 功・坪井和男・望月資康：「コンデンサモータの負荷時電磁振動の発生原因に関する実験的考察（続報）」, *電気学会回転機研資*, RM-99-95 (1999-10)
- (8) S.J. Yang: “Low-noise electrical motor”, Clarendon Press, Oxford (1981)
- (9) H. Sekino, C. Usuda, and S. Kajitani: “Effect of Slot Combination and Skew on Magnetic Noise of Squirrel Cage Induction Motors”, *Tech. Rep. of Mitsubishi Elec.*, Vol.31, p.272 (1957) (in Japanese)
- 関野 博・白田長一・梶谷定之：「かご形誘導電動機の溝数組合せとスキューが磁気音に及ぼす影響」, *三菱電機*, **31**, p.272 (1957)
- (10) K. Tsuboi: “Shapes of Rotating Magnetic Field and a Balanced Operating Condition for Condenser Motor”, *Memories College of Engineering, Chubu Institute of Technology*, Vol.12A, p.35 (1976-12) (in Japanese)
- 坪井和男：「コンデンサ電動機の回転磁界の形と平衡運転条件」, 中

部工業大学紀要, **12A**, p.35 (1976-12)

- (11) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, and S. Mori: “Effects of Magnetic Saturation on Electromagnetic Vibration of Squirrel-cage Induction Motor”, *Memories College of Engineering, Chubu University*, Vol.26, p.67 (1990-10)
- 廣塚 功・坪井和男・森 貞明：「かご形誘導電動機の電磁振動に及ぼす磁気飽和の影響」, *中部大学工学部紀要*, **26**, p.67 (1990-10)
- (12) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, K. Nakamura, and F. Ishibashi: “A Study of the Electromagnetic Vibration of a Squirrel-Cage Induction Motor Caused by Time-Harmonic Voltages”, *T. IEE Japan*, Vol.113D, No.3, p.394 (1993-3) (in Japanese)
- 廣塚 功・坪井和男・中村敬就・石橋文徳：「かご形誘導電動機の高調波電圧による電磁振動発生に関する考察」, *電学論 D*, **113**, 3, p.394 (1993-3)
- (13) K. Tsuboi, Y. Akiyama, and S. Ikeda: “Abnormal Starting Torque Characteristics of a Capacitor Motor”, *T. IEE Japan*, Vol.104B, No.7, p.41 (1984-7) (in Japanese)
- 坪井和男・秋山勇治・池田修一郎：「コンデンサ電動機の始動時異常トルク特性」, *電学論 B*, **104**, 7, p.41 (1984-7)

廣 塚 功 (正員) 1961 年 8 月 29 日生。1986 年 3 月中部大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。同年 10 月同社退社。1990 年 3 月中部大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程満期退学。同年 4 月同大学助手, 1996 年 4 月同助教授, 現在に至る。工博。1997 年電気設備学会学術部門論文奨励賞受賞。電気設備学会, IEEE 会員。

坪 井 和 男 (正員) 1944 年 4 月 11 日生。1973 年 3 月中部工業大学(現, 中部大学)大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同大学講師, 助教授を経て, 1984 年 4 月中部大学教授, 現在に至る。主として, 誘導電動機および同期電動機の解析と特性改善に関する研究に従事。工博。1981 年電気学会電気技術振興賞論文賞受賞。電気設備学会, IEEE 会員。