

かご形誘導電動機の電磁振動に及ぼす磁気飽和の影響

廣塚 功*, 坪井 和男*, 森 貞明**

Effects of Magnetic Saturation on Electromagnetic Vibration of Squirrel-cage Induction Motor

Isao HIROTSUKA*, Kazuo TSUBOI*, and Sadaaki MORI**

(Received May 31, 1990)

Although the electromagnetic vibration and noise of a squirrel-cage induction motor have been studied for a long time, the effects of magnetic saturation on the electromagnetic vibration are not clearly shown.

We have investigated the features of the radial electromagnetic vibration at no-load for three-phase motors and the capacitor induction motors with various stator/rotor slot combinations. In these studies, only space harmonic m.m.f. waves and stator/rotor slot permeance were taken into consideration. Consequently, many unknown factors for the dominant electromagnetic vibration are still remained.

In this paper, the electromagnetic vibration caused by the magnetic saturation is discussed in detail. That is,

- (1) General equation of the electromagnetic force waves is derived in consideration of not only space harmonic m.m.f. waves and stator/rotor slot permeance but also magnetic saturation.
- (2) Features of the electromagnetic vibration at no-load caused by the magnetic saturation are clarified.

We hope this paper will promote a better understanding of electromagnetic vibration behavior and noise of the three-phase induction motors and capacitor induction motors.

1. まえがき

かご形誘導電動機はその構造が簡単、堅牢、安価であるため、家電機器用、産業動用などとして幅広く普及し

ている。最近では、小形軽量化、環境の改善からもより低振動、低騒音の電動機が強く望まれており、電磁振動および電磁騒音の問題などが重要視されてきている。かご形誘導電動機においては、その構造上、巻線分布により生じる起磁力高調波およびスロットの存在によるスロット高調波がその大小はあるものの必ず存在する。従っ

*電気工学科(Department of Electrical Engineering)

**株式会社東芝(Toshiba Co. Ltd.)

て、基本波を含めた高調波磁束の相互作用に起因した多角形変形力（以下、電磁力波、場合によっては単に力波と略記する）により電磁振動を発生することとなる。

かご形誘導電動機の電磁振動に関しては古くから多数の研究^{(1)~(4)}が行なわれてきており、この種の問題に対してかなり明確な回答が得られるようになってきている。しかしながら、現在の技術水準に照らすと、例えば、磁気飽和による無負荷時の電磁振動の定性的把握など、なお不明確な部分が多数残存しており、より詳細な考察が望まれている。そこで、筆者らは三相かご形誘導電動機（以下、三相 IM と略記する）およびコンデンサ誘導電動機（以下、CRM と略記する）のスロット数組合せによる電磁振動発生状況についての一連の研究を行なっている。その結果、無負荷時において顕著な電磁振動の発生原因となる高調波は、主としてスロット高調波であり、また供試機の固有振動数近辺においては低次の起磁力高調波によっても顕著な電磁振動を生ずることを明らかにした^{(5)~(8)}。しかしながら、実機においては、起磁力高調波およびスロット高調波のみを考慮してもなおその発生原因が明らかにならない顕著な振動成分を生じている。

本論文においては、文献(5)および文献(8)において明示した電磁力波の一般式の物理的意味を明確にし、更に磁気飽和をも考慮にいたれた電磁力波の一般式を導出している。また、この一般式から求められる電磁力波と文献(5)および文献(8)において図示した電磁振動の実験結果との比較検討を行い、磁気飽和により生じている顕著な電磁振動の発生原因などを明確にしている。

なお、本論文をより明確に理解していただくために、随所で文献(5)および(8)を引用しているの、併せてご参照頂ければ幸いである。

2. 磁気飽和を考慮した場合の電磁力波の一般式

2.1 電磁力波の一般式

ギャップ中のパーミアンスとしては、種々の機械的要因⁽⁹⁾も考えられるが、本論文においては、回転子を磁氣的に平滑と考えた場合に固定子スロットの存在により生じる固定子スロットパーミアンス P_s 、固定子を磁氣的に平滑と考えた場合に回転子スロットの存在により生じる回転子スロットパーミアンス P_r 、並びに固定子もしくは回転子鉄心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の磁気飽和によるパーミアンス（以下、単に飽和パーミアンスと略記する） P_{sa} の3つのパーミアンスを考慮する。飽和パーミアンスを考慮するということは、ギャップ中の磁路に新たな磁気抵抗の存在を考慮することになる。従って、ギャップ中の合成パーミアンス P は、その実効パーミアンス P_o と、前述の P_s 、 P_r および P_{sa} の各パーミアンスを並列に結合したものと

考えられる。ここで、例えば、 P_o と P_s と P_r との合成パーミアンス P_{osr} は(1)式のように考えることができる。

$$P_{osr} = \frac{1}{\frac{1}{P_s} + \frac{1}{P_r} - \frac{1}{P_o}} = \frac{P_o \cdot P_s \cdot P_r}{P_s \cdot P_o + P_r \cdot P_o - P_s \cdot P_r} \quad (1)$$

(1)式の分母には定数成分と可変成分とを含んでいるが、可変成分は定数成分に比べ小さく無視できるので、 P_{osr} は近似的に(2)式のように表せる^{(10),(11)}。

$$P_{osr} \doteq \frac{P_s \cdot P_r}{\alpha} \quad (2)$$

ここでは、 α はパーミアンスの次元を持つ係数である。

(2)式の導出方法と同様に考えると、ギャップ中の合成パーミアンス P は(3)式のように表せる。

$$P \doteq \frac{P_s \cdot P_r \cdot P_{sa}}{\beta^2} \quad (3)$$

(3)式において、 β はパーミアンスの次元を持つ係数である。

固定子磁束密度 b_s は、固定子起磁力 F_s と P との積として表せるので、(3)式より(4)式のように表せる。

$$b_s \propto (F_s \cdot P_s \cdot P_r) \cdot P_{sa} \propto b_{s-no} \cdot P_{sa} \quad (4)$$

なお、(4)式において、磁気飽和を考慮しない場合、 b_s は文献(5)および(8)の固定子磁束密度と一致するので、以降の説明の都合上、磁気飽和を考慮しない場合の固定子磁束密度を b_{s-no} と表している。

回転子起磁力 F_r は(4)式に示した b_s により生じるので、基本波も含めた高調波の相互作用を考慮する場合、 F_r は b_s に比例する形で表せると考えられる。従って、回転子磁束密度 b_r は、 F_r とギャップ中の合成パーミアンスとの積として(5)式のように表せる。

$$b_r \propto F_r \cdot P' \propto (F_s' \cdot P_s' \cdot P_r' \cdot P_{sa}') \cdot (P_s'' \cdot P_r'' \cdot P_{sa}'') \\ \propto b_{r-no} \cdot P_{sa}' \cdot P_{sa}'' \quad (5)$$

但し、(5)式において、電磁力波の発生原因となる高調波次数を考える場合、固定子磁束密度に関与する高調波次数と回転子磁束密度に関与するそれらとの次数が異なる場合も考えられるので、固定子起磁力および各パーミアンスを示す記号に「'」および「''」を付してある。なお、これらは(3)式および(4)式に示したものと物理的には何ら変わらない。また、磁気飽和を考えない場合、文献(5)および(8)に示した回転子磁束密度と一致するので、以降の説明の都合上、これを b_{r-no} と表してある。

さて、電磁振動の発生原因となる電磁力波 f_f は、一般にギャップ中の磁束密度の2乗に比例するが、実機に対する電磁振動を考察していく上で、それらすべてを考慮するのではなく、以下のように限定することとする。すなわち、固定子磁束密度の相互作用により生じる電磁力

波は、正弦波で駆動する場合、振動発生周波数としては低い一般に中・小形の誘導電動機においては問題とはならない⁽¹²⁾ので、本論文においては考慮しない。また、回転子磁束密度の相互作用により生じる電磁力波は、一般に電磁力波のモードが大き⁽¹²⁾ことから、これも無視する。従って、通常問題とされる電磁力波は、(4)式および(5)式より(6)式のようになる。

$$\begin{aligned} f_r &\propto b_s \cdot b_r \\ &\propto (b_{s-n_0} \cdot P_{sa}) \cdot (b_{r-n_0} \cdot P_{sa}' \cdot P_{sa}'') \\ &\propto (b_{s-n_0} \cdot b_{r-n_0}) \cdot P_{sa-sum} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(6)$$

但し、

$$P_{sa-sum} \propto P_{sa} \cdot P_{sa}' \cdot P_{sa}'' \quad \dots\dots\dots(7)$$

(6)式より明らかなように、磁気飽和を考慮した場合の電磁力波の一般式は、磁気飽和を考慮していない場合の電磁力波の一般式に磁気飽和を考慮することにより付加される係数 P_{sa-sum} を乗じた形となる。ここで、電磁力波の発生原因となる高調波の次数関係を示すために、固定子および回転子磁束密度、および飽和パーミアンスを具体的な形で表せば(8)~(10)式のように表せる⁽¹⁰⁾。

$$b_{s-n_0} = \sum_{\nu_s'} B_{s-n_0 \cdot \nu_s'} \cos(\omega t - \nu_s' \phi) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\begin{aligned} b_{r-n_0} &= \sum_{\nu_p'} \sum_{k_r} B_{r-n_0 \cdot \nu_p' \cdot k_r} \\ &\quad \times \cos \left[\left\{ \frac{k_r n}{p'} (1-s) + 2 \right\} \omega t - (\nu_p' + k_r n) \phi \right] \\ &\quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

$$P_{sa} = \sum_h P_{sa \cdot h} \cos(2h\omega t - 2p'h\phi) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$P_{sa-sum} = \sum_{k_{sa}} P_{sa-sum \cdot k_{sa}} \cos(2k_{sa}\omega t - 2p'k_{sa}\phi) \quad \dots\dots(11)$$

(8)式において、 ν_s' は固定子起磁力高調波の次数は、 ω は電源角周波数($\omega = 2\pi f$, f : 電源周波数), t は時間, ϕ は固定子座標上の基準位置からの距離($\phi = \pi x / (p'\tau)$, x : 固定子座標上の基準位置からの距離, p' : 極対数, τ : 極ピッチ), $B_{s-n_0 \cdot \nu_s'}$ は飽和を考慮しない場合の固定子磁束密度の ν_s' 次調波の最大値である。また、(9)式において、 ν_p' は回転子磁束密度を作る固定子磁束密度の高調波次数であり、 ν_s' と同種のもの、 k_r は回転子スロットパーミアンスの次数であり正負の符号を含む整数、 n は回転子スロット数、 $B_{r-n_0 \cdot \nu_p' \cdot k_r}$ は各々の添字で表される磁気飽和を考慮しない場合の回転子磁束密度の最大値、 s は滑りである。(10)式において、 h は飽和パーミアンスの次数であり、正負の符号を含む整数、 $P_{sa \cdot h}$ は h 次の飽和パーミアンスの最大値である。なお、 P_{sa}' および

P_{sa}'' は、(7)式に示した P_{sa-sum} を導出する際に必要であるが、(10)式に示した P_{sa} と同じ形であるので紙面の都合上省略してある。更に、これらの飽和パーミアンスを(3)式に示した近似と同様に合成した、飽和パーミアンスのみの合成パーミアンスとして P_{sa-sum} の具体的な式を(11)式に示した。(11)式において、 k_{sa} は電磁力波を導出する際に飽和パーミアンスを合成した結果生じる次数ではあるが、ギャップ中の飽和パーミアンスを代表する次数であるので、本論文においては「磁気飽和の次数」と称することとする。

さて、無負荷時においては固定子磁束密度の基本波、すなわち $\nu_p' = p'$ により生じる回転子磁束密度は零と考えられるので、顕著な電磁振動の発生原因となる電磁力波を考える場合、 ν_p' は通常、固定子スロット高調波のみを考慮すればよい。しかしながら、文献(5)および文献(8)より明らかなように、固定子の低次の起磁力高調波によっても顕著な電磁振動を生じる場合があるので、これも考慮に入れると ν_p' は(12)式のように表せる。

$$\nu_p' = \nu_f' + k_s n_s \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 ν_f' は回転子磁束密度を作る固定子起磁力高調波の次数、 k_s は固定子スロット高調波の次数であり、正負の符号を含む整数、 n_s は固定子スロット数である。(6)式の電磁力波の一般式に(8)式、(9)式、(11)式および(12)式を代入し、まとめると無負荷時に顕著な電磁振動の発生原因となる電磁力波は(13)式のようになる。

$$\begin{aligned} f_r &\propto \sum_{\nu_s'} \sum_{\nu_f'} \sum_{k_r} \sum_{k_{sa}} \sum_{k_{sa}} f_{r \cdot \nu_s' \cdot \nu_f' \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_{sa}} \\ &\quad \times \left[\cos \left[\left\{ \frac{k_r n}{p'} (1-s) + 2 + 2k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (\nu_s' + \nu_f' + k_s n_s + k_r n + 2p'k_{sa}) \phi \right] \right. \\ &\quad \left. + \cos \left[\left\{ \frac{k_r n}{p'} (1-s) + 2k_{sa} \right\} \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\nu_s' - \nu_f' - k_s n_s - k_r n + 2p'k_{sa}) \phi \right] \right] \\ &\quad \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

この(13)式を理解し易い形でまとめると表1のように表せる。但し、同表において、 $\pm L = k_s$ および $\pm K = k_r$ としており、それぞれ固定子および回転子スロット高調波の次数を表す正の整数、 ν_s' および ν_f' はごく低次の次数としている。また、各電磁力波のモード M を便宜的に M_1 , M_2 , M_3 とし、 M の小さな電磁力波が実際上問題となるので、それぞれの M が著しく大きくならないように L および K の前の符号を定めている。なお、三相IMの場合、 ν_s' および ν_f' はいずれも正相分の次数のみであり、

CRM の場合, ν_s' および ν_f' には正相分の次数のみならず逆相分の次数をも考慮する必要があるが, 表 1 はいずれの電動機の場合であっても共通に用いることができる。

表 1 磁気飽和を考慮した場合の電磁力波の発生周波数およびそのモード

周波数: f_M	モード: M
$ \frac{Kn}{p'}(1-s)-2+2k_{sa} f$	$M_1: \nu_s' + \nu_f + Ln_s - Kn + 2p'k_{sa} $
$ \frac{Kn}{p'}(1-s)+2k_{sa} f$	$M_2: \nu_s' - \nu_f' + Ln_s - Kn + 2p'k_{sa} $ $ \nu_s' - \nu_f' - Ln_s + Kn + 2p'k_{sa} $
$ \frac{Kn}{p'}(1-s)+2+2k_{sa} f$	$M_3: \nu_s' + \nu_f' - Ln_s + Kn + 2p'k_{sa} $

2.2 磁気飽和による電磁力波の発生の特徴

前節においては磁気飽和を考慮した場合の電磁力波の一般式を導出したが, 本節においては, 表 1 に示した電磁力波の一般式より, スロット数組合せによる電磁力波のモード M の特徴を述べる。

整数スロット巻および分数スロット巻三相 IM, および CRM のいずれの場合においても, 磁気飽和を考慮しない場合の固定子磁束密度の高調波次数 ν_s' , ν_p' および固定子起磁力の高調波次数 ν_f' は $(1 \pm \xi)p'$, 固定子ス

ロット数は $n_s = \sigma p'$ (ξ および σ は 0 を含む正の整数) と表せる^{(5),(8)}。表 1 の各 M にこれらを代入し整理すると, 回転子スロット数が極対数の倍数となる $n = lp'$ (l : 正の整数) の場合, $M = mp'$ (m : 0 を含む正の整数) となり, 電磁力波のモードは 0 もしくは極対数の倍数となる。更に l が偶数となる場合は, 回転子スロット数が極数の倍数となる場合であり, $n = 2l'p'$ (l' : 正の整数) と表せるので, $M = 2m'p'$ (m' : 0 を含む正の整数) となり, 電磁力波のモードは 0 もしくは極数の倍数となる。この回転子スロット数においては, $n = lp'$ なる場合に比べ極数の小さな場合においても M が比較的大きく, 顕著な電磁振動を発生しにくいこととなる。

さて, 表 1 の各式に実機に対する具体的な数値, すなわち, 極対数, 固定子および回転子スロット数および影響が大であると考えられる高調波次数などを代入すれば, 各スロット数組合せにおける電磁力波の発生周波数 f_M およびそのモード M が計算できる。ここでは一例として, 4 極 CRM の場合について, 顕著な電磁振動の発生原因となり得る電磁力波を表 2 に示す。但し, 同表においては, 固定子磁束密度の高調波次数 ν_s' および固定子起磁力の高調波次数 ν_f' は正相分および逆相分の基本波, すなわち $\nu_s' = \pm p'$ および $\nu_f' = \pm p'$ (但し, $\nu_s' = -p'$ と $\nu_f' = -p'$ との組合せを除く⁽⁸⁾), 固定子および回転子のスロット高調波の次数 K および L は $K = L = 1$,

表 2 飽和を考慮した場合の顕著な電磁力波のモード (4 極 CRM の場合)

n	$L = K = 1$			$L = K = 1$			$L = K = 1$		
	$ k_{sa} =0$	$ k_{sa} =1$	$ k_{sa} =2$	$ k_{sa} =0$	$ k_{sa} =1$	$ k_{sa} =2$	$ k_{sa} =0$	$ k_{sa} =1$	$ k_{sa} =2$
$27(n_s - 5)$	1[1]	1, 3[1, 3]	3[1]		2[2]	2[2]			{3}
$28(n_s - 4)$									
$29(n_s - 3)$	1, 3[1]	1, 3[1, 3]	[1]	2[2]	2[2]	2[2]		1[1]	1[3]
$30(n_s - 2)$	2[2]	2[2]	[2]				2[2]	2[2]	2[2]
$31(n_s - 1)$	1[1]	1, 3[1, 3]	[3]	2[2]		[2]	1, 3[1, 3]	1, 3[1, 3]	[1]
$32(n_s)$									
$33(n_s + 1)$	1, 3[1, 3]	1, 3[1, 3]		2[2]	2[2]	2[2]	1, 3[1, 3]		1[1]
$34(n_s + 2)$	2[2]	2[2]	2[2]				2[2]	2[2]	2[2]
$35(n_s + 3)$	1, 3[1, 3]	1, 3[1, 3]	1[1]	2[2]	2[2]	2[2]		1[1]	1, 3[1, 3]
$36(n_s + 4)$									
$37(n_s + 5)$	1[1]	1, 3[1, 3]	1, 3[1, 3]		2[2]	2[2]			3[3]
$38(n_s + 6)$	2[2]	2[2]	2[2]						
$39(n_s + 7)$	3[3]	1, 3[1, 3]	1, 3[1]			2[2]			
$40(n_s + 8)$									
$41(n_s + 9)$		1[1]	1, 3[1]						
$42(n_s + 10)$		2[2]	2[2]						
$43(n_s + 11)$		3[3]	1, 3[1, 3]						
$44(n_s + 12)$									
$45(n_s + 13)$			1[1]						

但し, [] 内は $\nu_s' = -p'$, もしくは $\nu_f' = -p'$ とした場合を示している。

2, 3, モード M は $M=1, 2, 3$ となるもののみ示している。また、磁気飽和の次数 k_{sa} は、後述の実験結果より明らかなように、 ± 1 もしくは ± 2 の場合に顕著な電磁振動を生じているので、ここでも、 $k_{sa}=\pm 1, \pm 2$ としている。なお、後述の実験結果は主として6極のかご形誘導電動機の電磁振動を対象としているが、より多くの供試機に対しての検討が行ない易いように、ここでは4極CRMに対して検討する。表2より明らかなように、固定子スロット数 n_s と回転子スロット数 n との差が多くなるとモード M の小さな電磁力波の発生は少なくなる。なお、表2においては示していないが、同一の電磁力波の発生周波数 f_M となる場合であっても、異なった高調波次数関係から同一モードとなる場合もある。例えば、表2の中で、 $n=27, K=1$ の場合に、 $k_{sa}=+1$ および $+2$ において $\nu_s'=\nu_r'=\nu_p'$ の時に $M=3$ の電磁力波が生じる。 $k_{sa}=+1$ で生じる $M=3$ の電磁力波は表1の M_3 より計算されたものであるが、その発生周波数 f_M は $1050 \text{ Hz} (s=0)$ となる。一方、 $k_{sa}=+2$ で生じる $M=3$ の電磁力波は表1の M_2 より計算されたものであるが、その発生周波数もやはり $1050 \text{ Hz} (s=0)$ となる。このように、同一周波数かつ同一モードの電磁力波であっても、その発生原因となる高調波の組合せは異なる。この周波数で生じる顕著な振動成分はこれら2種類の高調波の組合せが主原因となることとなる。従って、磁気飽和を考慮した場合、電磁力波の発生原因となる高調波の次数関係は非常に複雑となり、磁気飽和により生じている顕著な電磁振動の発生原因を検討する場合には充分注意を払う必要がある。

3. 実験結果および検討

文献(5)および文献(8)においては、三相IMおよびCRMの固定子と回転子とのスロット数の組合せによる

顕著な電磁振動の発生状況を明示している。本論文においてははこの実験結果を基に更に再整理して、文献(5)および文献(8)において明確となっていなかった顕著な振動成分の発生原因に対して検討を行う。

表3に供試機の定格および固有振動数、図1に実験装置の構成図を示す。実験は図1の構成で、定電圧装置より定格周波数の定格電圧を印加し、無負荷時の温度平衡状態となった後に供試機のほぼ中央上部に取り付けた加速度ピックアップにより顕著な振動を測定し、FFTで周波数分析を行なう方法とした。図2に、一例として6極三相IMおよび6極CRMの無負荷時における顕著な電磁振動の発生状況を示す。図2においては、磁気飽和を考慮しない場合 ($k_{sa}=0$) に計算される電磁力波の発生周波数を実線で示し、振動の大きさに応じて記号を3種類に区分してある。また、表4には各供試機の各スロット数組合せにおける、磁気飽和により生じていると考えられる 0.1 G 以上の顕著な振動成分の発生状況とその発生原因となる電磁力波のモード M などをまとめて示す。同表より明らかなように、三相IMおよびCRMいずれの場合も、極数が増えると磁気飽和により生じている顕著な振動成分の発生は少なくなっている。これは、例えば4極CRMの場合、表2より明らかなように、極数が増えることによりモードの小さな電磁力波の発生が少なくなっているためであると考えられる。なお、三相IMとCRMとでは、測定した振動加速度の大きさが著しく異なっているため、同図(a)と(b)とでは振動加速度の大きさに対する表示記号の基準を比較し易いように変えている。また、表4より、顕著な電磁振動の発生原因となる電磁力波のモード M はその多くが $M=1, 2, 3$ であり、発生周波数は各供試機の共振周波数近傍である。特に、回転子の固有振動数である 650 Hz 近辺および固定子の固有振動数である近辺においては顕著な振動成

表3 供試機の定格および固有振動数

機 種	三相IM			CRM	
	$p'=2$	$p'=3$	$p'=4$	$p'=2$	$p'=3$
項目					
定格出力 (kW)	1.5	0.75	0.4	0.75	0.7
定格電圧 (V)	200				
定格周波数 (Hz)	60				
運転コンデンサ容量: $C_r (\mu F)$				30	20
固定子巻線形式	分布全節巻		分数スロット巻	同心巻	
固定子スロット数: n_s	36			32	36
回転子スロット数: n	27~45 (半閉スロット, 導体総断面積一定)				
斜めスロット比: σ_r	回転子スロットピッチに対して 0, 0.3, 0.7, 1.0				
固有振動数 (Hz)	625, 1700,	650, 1550,	650, 1720,	650, 1420,	650, 1300,
	3300, 4000	1625, 3150,	3400, 4200	1500, 2900,	1630, 2920,
		3975		3250	3250

分を多数生じており, CRM においては 1 G 以上の特に顕著な振動成分も生じている。これら顕著な振動成分の多くは, 固定子および回転子のスロット高調波の次数 L および K が 3 以下の $L=K$ で, 磁気飽和の次数 k_{sa} が ± 1 および ± 2 となる電磁力波により生じている。しかしながら, 固有振動数近辺においては, スロット高調波と磁気飽和の次数のみを考慮しても, なおそのモードが著しく大きい電磁力波による顕著な電磁振動も生じている。これらは, 低次の固定子磁束密度および固定子起磁力の高調波次数をも考慮して考察する必要がある。例えば, 4 極三相 IM において, 回転子スロット数 $n=42$

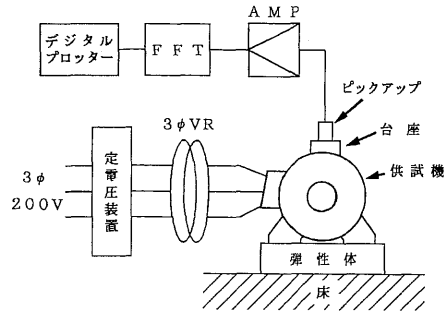
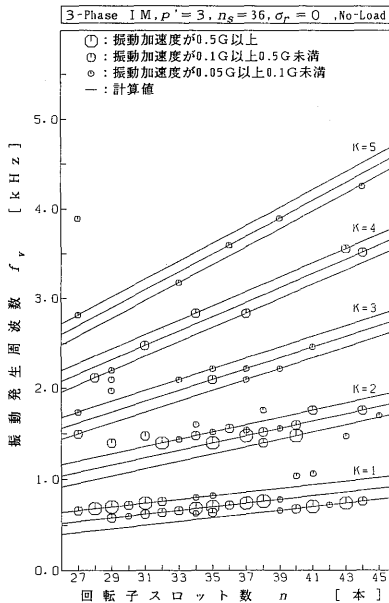
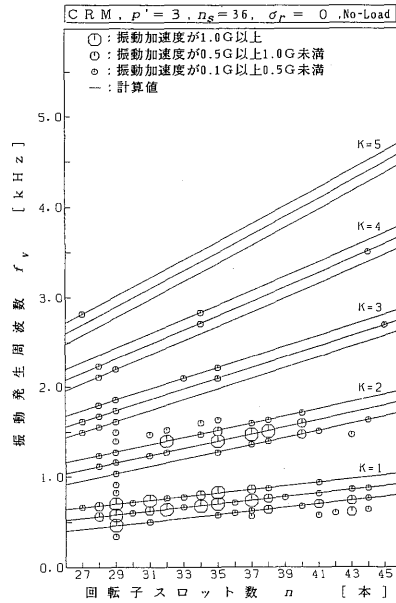


図1 実験装置の構成図



(a)三相 IM ($p'=3$)



(b)CRM ($p'=3$)

図2 顕著な電磁振動の発生状況
($\sigma_r = 0$, 無負荷)

においては 1740 Hz に顕著な振動成分を生じている。この振動成分の発生原因となる電磁力波は表1において固定子磁束密度の高調波次数 ν_s' および固定子起磁力高調波次数 ν_f' に第一次および第二次の固定子起磁力高調波である -10 次, 14 次, -22 次をも考慮してその発生原因を考察する必要がある。

以上は表1および文献(5)および文献(8)で得た固定子と回転子とのスロット数組合せによる顕著な電磁振動発生状況を基に考察したが, 表4に示した顕著な振動成分の磁気飽和による影響を具体的に示した実験結果を図3に示す。同図において, (a)および(b)は6極三相 IM, (c)は6極 CRM の印加電圧に対する振動の変化を示している。

いずれの場合も, 磁気飽和により生じている顕著な振動成分は定格電圧の約 $1/3$ である 70 V 以上となると急激に増大している。これに対して, スロット高調波により生じている顕著な振動成分は低電圧時においてもその発生がはっきり確認でき, 磁気飽和により生じている顕著な振動成分とは印加電圧に対する特徴が明らかに異なることが分かる。

また, 磁気飽和により生じている顕著な振動成分は, それ以外の顕著な振動成分と同様に, 斜めスロットを施すと減少している。一例として, 6 極三相 IM の回転子スロットピッチに対する斜めスロット比 σ_r を 0.7 とした場合の顕著な振動発生状況を図4に示す。図2(a)と図

表 4 飽和により生じている顕著な振動成分

機 種	n	f_v [Hz]	実測 [G]	M	K	ν_s'	k_{sa}
4 極三相IM	31	690	0.104	1	1	2	-2
		2100	0.108	2	2	2	+1
	33	1740	0.349	2	2	2	-2
	35	1740	0.216	2	2	2	-2
	39	2100	0.167	2	2	2	-2
	42	1740	0.161	2	1	14	+3
6 極三相IM	29	1400	0.133	2	2	3	+1
	31	1480	0.159	2	2	3	+1
8 極三相IM	29	1110	0.264	2	2	4	+1
4 極CRM	27	570	0.310	1	1	-2	-1
		1050	0.144	3	1	2	+1
		1170	0.130	3	1	-2	+2
		1380	0.165	2	2	-6	-1
		1860	0.400	2	2	2	+1
	28	600	0.124	0	1	-2	-1
		1440	0.222	0	2	2	-2
	29	630	0.185	3	1	2	-1
		1110	0.122	1	1	-2	+1
		1500	0.151	2	2	-2	-1
	30	660	0.195	2	1	2	-1
		1140	0.225	2	1	2	+1
		1260	0.234	2	1	-2	+2
		1380	0.149	2	1	-14	+3
	31	690	0.263	1	1	2	-1
		1170	0.164	3	1	-2	+1
	32	1200	0.119	4	1	-2	+1
	33	750	0.136	1	1	2	-1
		1350	0.150	3	1	-14	+2
		1740	0.102	2	2	2	-1
	34	1380	0.345	2	1	-14	+2
		1500	0.453	2	1	-14	+3
	35	1410	0.115	1	1	-14	+2
		1860	0.124	2	2	10	-1
		2790	0.174	3	3	2	-3
	36	1320	0.215	4	1	2	+2
		1440	0.199	0	1	-6	+3

機 種	n	f_v [Hz]	実測 [G]	M	K	ν_s'	k_{sa}
4 極CRM	37	1350	0.141	3	1	2	+2
		1980	0.230	2	2	2	-2
	38	900	0.108	2	1	2	-2
		1380	1.61	2	1	2	+1
		1500	0.414	2	1	-6	+2
		1620	0.104	2	1	-6	+3
	39	930	0.188	1	1	2	-2
		1410	0.816	1	1	2	+2
		1530	0.104	5	1	2	+3
		3750	0.119	3	3	2	+2
	40	1440	0.144	0	1	2	+2
	41	990	0.186	1	1	2	-2
		1470	0.138	1	1	2	+2
	42	1020	0.263	2	1	2	-2
		1500	1.17	2	1	2	+2
		1860	0.132	2	1	2	+5
		2760	0.110	4	2	2	+2
	43	2820	0.140	2	2	2	+2
	44	1560	0.145	4	1	-2	+2
	45	1590	0.410	3	1	10	+2
6 極CRM	29	340	0.208	1	1	-3	-1
		460	1.02	1	1	3	-1
		820	0.220	1	1	-3	+1
		940	0.175	1	1	-9	+2
		1400	0.470	2	2	3	+1
		1520	0.244	3	3	15	-1
	31	1480	0.122	2	2	3	+1
	32	1520	0.207	2	2	-3	+1
	34	1600	0.285	2	2	-3	+1
	41	580	0.339	1	1	-3	+1
	42	600	0.223	0	1	15	-1
	43	620	0.636	5	1	3	-2
		1480	0.191	2	2	3	-2
	44	640	0.179	4	1	3	-2

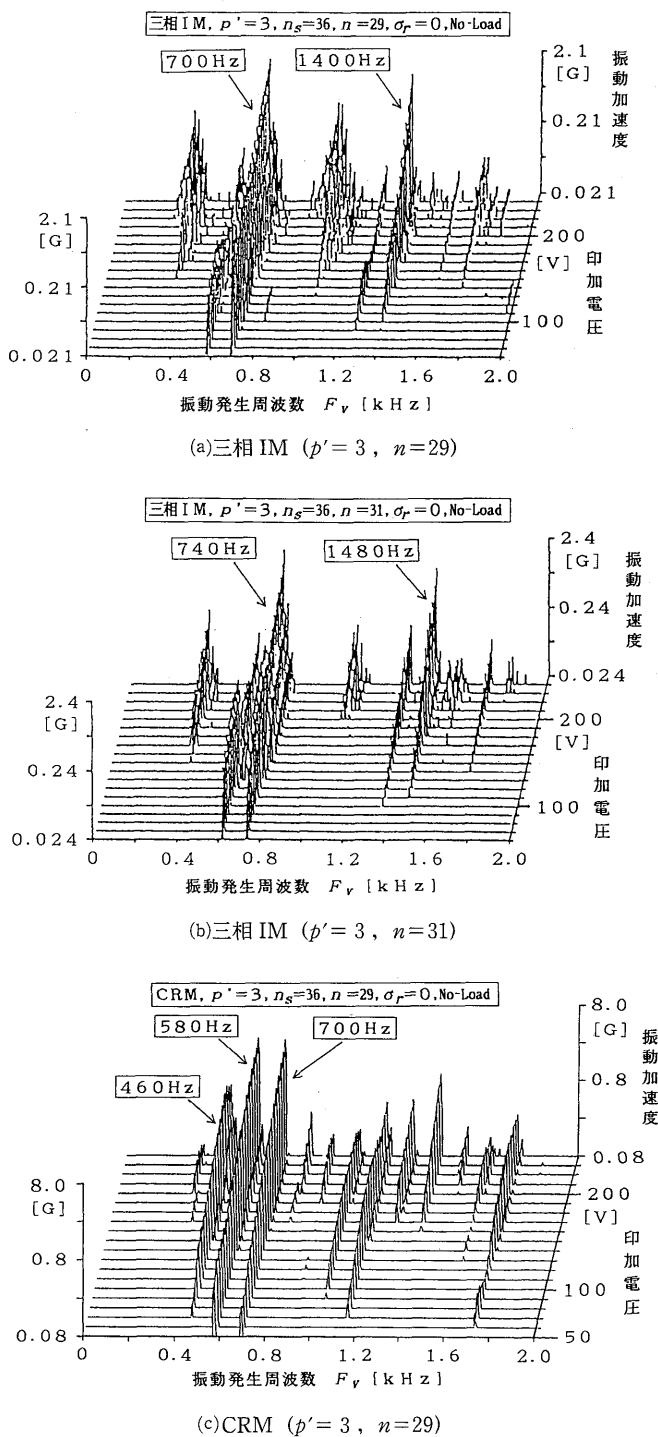


図3 印加電圧に対する顕著な電磁振動の変化

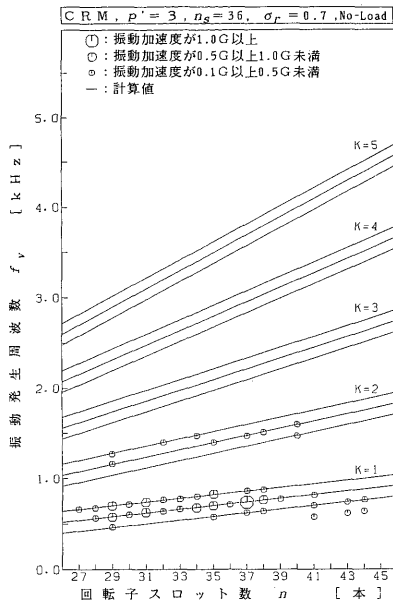


図4 顕著な電磁振動の発生状況
(三相IM, $p'=3$, $\sigma_r=0.7$)

4との比較より明らかなように、磁気飽和により生じているものでもその他の原因により生じている顕著な振動成分でも共通して、明らかに減少している。

なお、これら磁気飽和により生じている顕著な振動成分は供試機の固有振動数近辺に多数生じていることから、供試機の機械系と密接な関係があるものと思われるが詳細は本論文の範囲外としたい。

4. あとがき

以下、本論文において明らかとなった主な事柄をまとめておく。

1. 起磁力高調波およびスロット高調波のみならず磁気飽和をも考慮に入れて、顕著な電磁振動の発生原因となる電磁力波の発生周波数およびモードなどを理論的に理解し易く整理した。
2. 380種類のスロット数組合せに対しての無負荷時の電磁振動発生状況を検討し、磁気飽和により生じている顕著な振動成分を示し、その発生原因となる高調波の次数関係および電磁力波などを明確にした。すなわち、磁気飽和により生じている顕著な振動成分の多くは、電磁力波の発生周波数が起磁力高調波およびスロット高調波のみを考慮した場合とは異なる周波数において生じていること、発生の主原因となる電磁力波のモードが3以下であること、磁気飽和の次数 k_{sa} は±1もしくは±2を考慮すればよいことなどを明らかにした。

3. 定格電圧時に顕著に生じている磁気飽和による振動成分は低電圧時にはっきりとは確認できず、電圧を高くするに従い急激に増加することを実験結果より明らかにした。

4. 磁気飽和によって生じている振動成分は、供試機の固有振動数近辺に多数生じており、この周波数近辺においての検討は、機械系の共振などともに併せて、検討する必要がある。

本論文がこの種の研究の基礎の一助となれば幸いである。なお、本論文の作成に当り、多数のご指導、御鞭撻を頂いた本学電気工学科 加藤邦弘教授 並びに株式会社 東芝 日比野定良氏、同 石橋文徳氏に深く感謝する次第である。また、多数の詳細な実験にご協力して頂いた本学電気工学科卒業研究生並びに関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- (1) P.L.Alger: "The Magnetic Noise of Polyphase Induction Motors", AIEE Trans., Pt. III, 73, No.11, p.118(1954-4).
- (2) 石崎: 「かご形誘導電動機の振動及び騒音について」電学誌, 75(1954)30-5).
- (3) 関野, 白田, 梶谷: 「かご形誘導電動機の溝数組合せとスキューが電磁騒音に及ぼす影響」三菱電機, 31, 4, p.272(1954)32).
- (4) L.W.Magyar: "Sources of Electromagnetic Vibration in Single-Phase Induction Motors", AIEE Trans., Pt. III-A, p.81(1959-4).
- (5) 廣塚, 坪井: 「かご形誘導電動機のスロット数組合せによる電磁振動の実験的考察」電学論D, 109, 5, p.347(1955)5).
- (6) 廣塚, 坪井, 森, 加藤: 「コンデンサ誘導電動機のスロット数組合せおよび斜めスロットによる電磁振動の実験的検討」電気学会回転機研究, RM-89-26(1955)1-7).
- (7) 廣塚, 坪井, 森, 加藤: 「コンデンサ誘導電動機の逆相分磁界を考慮した電磁力波の一般式と電磁振動発生状況の特徴」電気学会回転機研究, RM-89-67(1955)1-11).
- (8) 廣塚, 坪井, 森, 加藤: 「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(1956)2-8).
- (9) 阿部, 丸山: 「小形誘導電動機の振動と騒音」東芝レビュー, 14, 9, p.915(1954)9).
- (10) S.J.Yang: "Low-Noise Electrical motors" (Book), Clarendon Press, Oxford(1981).
- (11) 奥田, 藤本, 吉崎: 「誘導電動機の電磁うなり振動騒音の発生原因」電学論B, 98, 8, p.679(1953)8).
- (12) 例えば, 斎藤, 前田: 「誘導電動機の磁気音の実験的検討」National Tech. Rep., 17, 4, p.341(1954)46-8).
- (13) 石橋, 小林: 「小形かご形誘導電動機の高調波磁束の一考察」電気学会回転機研究, RM-85-62(1955)60-11).