かご形誘導電動機の負荷時電磁振動に及ぼす スロット数組合せと斜めスロットの影響

正員 廣 塚 功 (中部大学)

正員 坪 井 和 男 (中部大学)

Effects of Slot-Combination and Skewed Slot on the Electromagnetic Vibration of A Squirrel-Cage Induction Motor under Load Conditions.

Isao Hirotsuka, Member (Chubu University)

Kazuo Tsuboi, Member (Chubu University)

A squirrel-cage induction motor (abbr. IM) produces the electromagnetic vibration and the electromagnetic noise by the interaction between many harmonic fluxes in the air gap. Recently, reduction of such vibration and noise has become important subject from the standpoint of environmental improvement. The electromagnetic vibration caused by IM has been studied for many years and its basic phenomena have been analyzed. However, the electromagnetic vibration under load conditions has not been analyzed sufficiently.

In this paper, the effects of slot-combination and skewed slot on the dominant electromagnetic vibration under load conditions are theoretically and experimentally studied. First, general equations of electromagnetic force waves are derived in order to discuss easily, and the characteristics of the force waves for slot-combination and skewed slot are theoretically clarified. Next, the electromagnetic vibration for the several kinds of poles, rotor slots and skewed angles are measured, taking the effect of natural frequency of the motor into consideration. The effects of slot-combination and skewed slot on these measured vibration are characterized by the proposed theory.

キーワード：誘導電動機，電磁振動，スロット数組合せ，斜めスロット

1. まえがき

三相かご形誘導電動機（以下，IMと略記）は，その構造上，ギャップ中に基本波を含めた高調波磁束が存在するので，その大小の差はあるが，電磁騒音の原因となる電磁振動を発生する。IMの電磁振動については，古くから多数の研究が行われており^{(1)～(5)}，電磁振動は主にギャップ中の基本波を含めた高調波磁束の相互作用による電磁力波が固定子わくを振動させることにより発生することが明らかにされている。しかし，負荷時における電磁振動および電磁騒音は，IMに接続される負荷機構，設置条件の影響を受けるため，極めて難解な問題であり，未解明な部分が多数存在している。

以上のような背景により，本論文では，IM単体の負荷時電磁振動に及ぼすスロット数組合せおよび斜めスロットの影響について理論的かつ実験的に検討している。すなわち，前論文において既に導出した理論⁽⁶⁾に基づき，負荷

時に生じる顕著な電磁力波のスロット数組合せに対する特徴を明確に示している。また，前論文の理論⁽⁶⁾を整理拡張し，斜めスロットが顕著な負荷時電磁力波に及ぼす影響を，無負荷時の場合と対比して理論的に考察している。次に，極数の異なる2種類の固定子にスロット数の異なる19種類の回転子を組み合わせた供試機を用いた詳細なる実験結果に基づき，スロット数組合せに対する顕著な電磁振動の発生状況を明確にしている。また，顕著な電磁振動に対する斜めスロットの効果を実験的に考察している。その結果，スロット数組合せに対する顕著な電磁振動の発生の特徴および斜めスロットによる電磁振動の抑止効果などを明らかにしている。なお，本論文は回転機研究会などに発表した内容^{(7)～(10)}を更に整理加筆したものである。

2. 負荷時に生じる電磁力波

<2・1>顕著な電磁力波 顕著な負荷時電磁振動の発生原因となる電磁力波の一般式の導出については既に文献

(6) にまとめてあるので、ここでは、スロット数組合せに対する電磁力波の発生の特徴および斜めスロットと電磁力波との関係について考察するのに必要な電磁力波の一般式をまとめておく。なお、実機における電磁振動は、磁気飽和、回転子のバー間電流および機械的加工精度に起因する偏心などによって影響を受けるが、ここでは、特に顕著な電磁振動の発生原因となり得る電磁力波のみに対して検討することとしている。

ギャップ中の磁束として、固定子および回転子起磁力、およびギャップパーミアンスに起因する固定子磁束密度 bs および回転子磁束密度 br を考える。電磁振動の発生原因となる顕著な電磁力波 fr は、その発生周波数 f_M が比較的高いこと、そのモード M が比較的小さいこと、および主要な高調波磁束に起因していることなどを勘案すれば、 bs と br との積に比例する。したがって、 fr は(1)式のように表わすことができる⁽⁶⁾。

$$frsr = \sum_{v_e'} \sum_{ks} \sum_{kr} \sum_{ks'} \sum_{kr'} frsr v_e' ks kr ks' kr' \\ \times \left[\cos \left[\left\{ \frac{kr - kr'}{p'} n (1-s) \right\} \omega t \right. \right. \\ \left. \left. - \left\{ (v_e' + ks ns + kr n) - (p' + ks' ns + kr' n) \right\} \phi \right] \right. \\ \left. + \cos \left[\left\{ \frac{kr + kr'}{p'} n (1-s) + 2 \right\} \omega t \right. \right. \\ \left. \left. - \left\{ (v_e' + ks ns + kr n) + (p' + ks' ns + kr' n) \right\} \phi \right] \right] \quad (1)$$

ここに、 p' ：極対数、 s ：すべり、 ns および n ：固定子および回転子スロット数、 v_e' ：基本波を含む固定子起磁力高調波の次数、 ks および ks' ：固定子スロット高調波の次数、 kr および kr' ：回転子スロット高調波の次数、 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、 ks および $kr \neq 0$ ならば $ks' = kr' = 0$ であり、 $ks = kr = 0$ ならば $ks' \neq 0$ かつ $kr' \neq 0$ 。

(1)式において、固定子および回転子スロット高調波の次数を正の整数 L および K で表せば、電磁力波の発生周波数 f_M およびモード M を表1のようにまとめることができる。同表より明らかなように、負荷時においては、同一の

表1 顕著な電磁力波
Table 1. Dominant electromagnetic radial forces.

分類	発生周波数 f_M	モード M (複合同順)
		$(bs$ の次数: $v_s')$ $\pm$ (br の次数: $v_r')$
①	$\left\{ \frac{Kn}{p'} (1-s) - 2 \right\} f$	[I]: $ (v_e' + (p' + Ln_s - Kn) $
		[II]: $ (v_e' + Ln_s - Kn) + (p') $
②	$\left\{ \frac{Kn}{p'} (1-s) \right\} f$	[I]: $ (v_e' - (p' \pm Ln_s \mp Kn) $
		[II]: $ (v_e' \pm Ln_s \mp Kn) - (p') $
③	$\left\{ \frac{Kn}{p'} (1-s) + 2 \right\} f$	[I]: $ (v_e' + (p' - Ln_s + Kn) $
		[II]: $ (v_e' - Ln_s + Kn) + (p') $

f_M に2種類の電磁力波を生じることとなる。すなわち、無負荷時にも顕著となる電磁力波 [I] と負荷時にのみ顕著となる電磁力波 [II] とを生じる。なお、分類番号は後述の検討の便宜上つけた番号である。

<2・2>スロット数組合せに対する特徴 表1の高調波次数に、後述の供試機に対応した数値を代入すると、負荷時に生じる特に顕著な電磁力波を表2のようにまとめることができる。同表においては、 $v_e' = p'$ 、 $L = K = 1, 2$ および3、 $M = 1, 2$ および3となる電磁力波のみを回転子スロット数および極数に対してまとめている。また、表2は、同一周波数に同一のモードの2つの電磁力波 [I] および [II] が発生することをも意味している。同一周波数に原因の異なる2種類の電磁力波を生じる場合、2つの電磁力波のベクトル和がその周波数における合成電磁力波となる⁽¹¹⁾。負荷が変化すれば、2つの電磁力波の大きさのみならず、2つの電磁力波間の位相差も変化するので、合成電磁力波は負荷に対して単調増加もしくは単調減少するとは限らない。

表2より明かなように、極数が少なく、固定子スロット数に近い回転子スロット数の場合、多くの顕著な電磁力波を生じる傾向にある。極数の倍数となる回転子スロット

表2 低次のスロット高調波による顕著な電磁力波
Table 2. Dominant electromagnetic forces caused by lower slot-harmonics.

n	n の例	4極・6極共通	4極IM		6極IM	
		②	①	③	①	③
$ns-9$	27					3(1)
$ns-8$	28					2(1)
$ns-7$	29			3(1)		1(1)
$ns-6$	30			2(1)		
$ns-5$	31			1(1)		1(1)
$ns-4$	32					2(1) 2(2)
$ns-3$	33	3(1)		1(1) 2(2)		3(1) 3(3)
$ns-2$	34	2(1)		2(1) 2(3)		2(2)
$ns-1$	35	1(1) 2(2) 3(3)		3(1) 2(2) 1(3)		3(3)
ns	36					
$ns+1$	37	1(1) 2(2) 3(3)	3(1) 2(2) 1(3)		3(3)	
$ns+2$	38	2(1)	2(1) 2(3)		2(2)	
$ns+3$	39	3(1)	1(1) 2(2)		3(1) 3(3)	
$ns+4$	40				2(1) 2(2)	
$ns+5$	41		1(1)		1(1)	
$ns+6$	42		2(1)			
$ns+7$	43		3(1)		1(1)	
$ns+8$	44				2(1)	
$ns+9$	45				3(1)	

注：例えば、「3(1)」の表記は、表1において、 $L = K = 1$ で求められる $M = 3$ の電磁力波 [I] および [II] が同一周波数に生じることを意味する。

数の場合、 $M=0$ もしくは $2p'$ なる電磁力波しか生じないため、表2においては空白となっている。なお、機械系の共振の影響および固定子起磁力高調波などにより、表2に示した以外の電磁力波に起因して、顕著な電磁振動が発生する場合がある。また、同表は、例えば、文献(3)を参照すれば作成でき、文献(5)の表2と形の上でまったく同一となっている。しかし、無負荷時のみならず負荷時に生じる電磁力波も含めて表していることが異なっており、本論文で初めて明示したものである。

<2・3>斜めスロットによる抑止効果 図1に、電磁力波 [I] および [II] の発生原因となる高調波次数関係などのイメージ図を示す。同図は、これらの電磁力波の発生過程の考え方を示すのみならず、前論文(6)を更に拡張し、斜めスロットがこれらの電磁力波に及ぼす影響を考慮して図式的にまとめたものである。

回転子導体に斜めスロットを施した場合、回転子導体に誘導される基本波を含めた v_p' 次調波の電圧は、(2)式で示される高調波次数の斜めスロット係数に比例して減少する⁽¹²⁾。

$$K_{svp'} = \frac{n \sin(v_p' \sigma_r \pi / n)}{v_p' \sigma_r \pi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $K_{svp'}$ ： v_p' 次調波の斜めスロット係数、
 σ_r ：回転子スロットピッチに対する斜めスロット比。

従って、単位面積当たりの電磁力波は、回転子導体の高調波電流がその高調波次数の斜めスロット係数に比例して減少することから、回転子磁束の高調波次数の斜めスロット係数の絶対値に比例することとなる。

電磁力波 [I] の発生過程および斜めスロットがこの電磁力波に及ぼす影響を図1(a)に示したように考えて考察する。すなわち、無負荷時および負荷時を問わず、固定子起磁力とギャップパーミアンスとの積による固定子磁束の v_p' ($=p' \pm Ln_s$) 次調波により、回転子導体には v_p' 次調波の電流が流れる。電磁力波 [I] のうち、特に顕著となる電磁力波は、この v_p' 次調波の電流に起因した回転子高調波磁束と固定子の基本波磁束との相互作用により生じるので、回転子磁束を作る固定子磁束の高調波次数 v_p' の斜めスロット係数の絶対値に比例すると考えられる⁽⁵⁾。

また、電磁力波 [II] の発生過程および斜めスロットがこの電磁力波に及ぼす影響を図1(b)に示したように考えて考察する。すなわち、負荷時には回転子導体に、前述の v_p' 次調波電流に加え、すべり周波数の基本波電流が流れる。この基本波電流によって v_q' ($=p' \pm Kn$) 次の回転子磁束を生じる。この回転子磁束により固定子巻線には v_q' 次の“はね返り電流”⁽¹³⁾が流れ、はね返り電流による v_s' ($=v_q' \pm Ln_s$) 次の固定子磁束を生じる。この磁束と回転子の基本波磁束との相互作用により電磁力波 [II] を生じる。回転子導体が斜めスロットとなっている場合、回転子導体に流れる基本波電流は基本波に対する斜めスロット係数に比例して減少し、固定子巻線へのはね返り電流も

v_q' の斜めスロット係数に比例して減少する。基本波の斜めスロット係数がほぼ1であることから、電磁力波 [II] は固定子へのはね返り電流の次数 v_q' の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少すると考えられる。なお、電磁力波 [I] は、負荷時においても前述の無負荷の場合と同様であると考えている。

以上をまとめると、回転子に斜めスロットを施すことにより、負荷時において、電磁力波 [I] は回転子磁束を作る固定子高調波磁束の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少する。また、電磁力波 [II] は、固定子へのはね返り電流の次数の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少することとなる。なお、前述のように、負荷時には同一周波数に原因の異なる2種類の電磁力波 [I] および [II] が生じ、その周波数に生じる電磁力波は電磁力波 [I] と [II] との合成電磁力波となる⁽⁸⁾。従って、電磁力波に及ぼす斜めスロットの影響を考察する場合、これら2つの電磁力波の大きさのみならず位相も考慮しなくてはならないので、特定の高調波次数の斜めスロット係数の絶対値に比例して減少するとは限らない。なお、2つの電磁力波の位相が関係する電磁力波についての

図1 顕著な電磁力波の発生過程

Fig. 1. Process of the generation on dominant electromagnetic force under load conditions.

詳細な検討は今後の課題としたい。また、IMの電源側のインピーダンスを変更した場合、IMへの流入電流の高調波成分および電磁振動が変化することを確認しているが、はね返り電流と電磁振動との関係の更に詳細な検討は今後の課題としたい。

3. 供試機の仕様および実験方法

供試機の仕様を表3に示す。スロット数組合せに対する電磁振動の発生状況を測定する場合には、4極および6極の固定子に19種類の異なるスロット数の回転子（いずれも斜めスロットを施していない）を組合せた供試機を用いている。また、電磁振動に及ぼす斜めスロットの影響を調べる場合には、4極の固定子に、スロット数27および35でそれぞれの回転子に対し $\sigma_r=0.0, 0.3, 0.7, 1.0$ なる斜めスロット比の回転子を組合せた供試機を用いて実験を行った。表3においては、各々の供試機の室温時に測定した主な固有振動数も示してある。625Hzおよび650Hzは回転子の1次曲げの固有振動数であり、他の周波数は固定子わくおよび固定子鉄心が多角形変形する固有振動数である。こ

表3 供試機の仕様

Table 3. Specification of the test machine.

相 数	3	
極 数	4	6
定 格 出 力	1.5kW	0.75kW
定 格 周 波 数 f_n	60Hz	
定 格 電 圧 V_n	200V	
巻 線 形 式	分布全節巻	
固定子スロット数 n_s	36	
回転子スロット数 n	27~45	
回転子スロットに対する斜めスロット比 σ_r	0.0, 0.3, 0.7, 1.0	
主な固有振動数 (静止冷温時)	625, 1700, 3300, 4000 Hz	650, 1550, 1625, 3150, 3975 Hz

但し、スロット数組合せに対する検討には $\sigma_r=0.0$ のみの回転子を使用、斜めスロットの影響に対する検討には $n=27$ および35の回転子のみを使用した。

図2 実験装置の構成図

Fig. 2. Arrangement of experimental apparatuses.

の固有振動数は実験時の温度上昇により多少変化することを確認している。

実験装置の構成を図2に示す。IMを弾性ゴム足のついた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床との切り離しなど、多数の防振措置を施している。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を避けて起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、IM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 fa [G]、発生周波数 fv [Hz] および10kHzまでの振動加速度の全実効値 Fva [G] 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） Lp で定義しており、無負荷時には $Lp=0\%$ であり、全負荷時に $Lp=100\%$ である。なお、IMは負荷装置に接続されているので、 $Lp=0\%$ と表した場合であっても、IM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、 $Lp=0\%$ での振動測定値は、IM単体での測定値とほぼ一致していることから、 $Lp=0\%$ と表記している。

fv が Lp に対して変化するので、 fa 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 fv を一定とする実験を行う必要がある。電磁振動に及ぼすスロット数組合せの影響を調べるための実験を行う場合には、IMの実際の使用状態を勘案して、印加電圧を定格電圧、周波数を定格周波数に保って行った。電磁振動に及ぼす斜めスロットの影響を調べるための実験を行う場合には、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、 fv 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 $V_n/f_n=200V/60Hz$ が一定となるように V も調整している。なお、本論文では、振動成分を、その振動成分が $s=0$ において生じるものと仮定した場合の fv を f_n の倍数として表している。

4. 実験結果および検討

図3に、 $p'=2$ 、 $n=29$ における電磁振動の測定結果を示す。図より明らかなように、 $p'=2$ 、 $n=29$ の場合、 $Lp=0\%$ において、 $12.5f_n$ および $29.0f_n$ 振動成分を顕著に生じている。これらの振動成分の発生周波数 fv は、負荷時に顕著となる $70.5f_n$ 振動成分も含め、負荷の増加と共に減少し、その振動加速度 fa も変化している。 $12.5f_n$ 振動成分は、 $Lp=0\%$ において顕著であるが、負荷の増加とともに振動加速度 fa が単調増加する。表2との対応より、 $12.5f_n$ 振動成分の発生の主原因は、 $Lp=0\%$ において、 $M=1$ の電磁力波 [I] である。 Lp を増加すると、この電磁力波 [I] と同一周波数で同一モードの固定子高調波磁束と回

図3 顕著な電磁振動 ($n=29$, $\sigma_r=0.0$)
Fig. 3. Measured dominant electromagnetic vibration. ($n=29$, $\sigma_r=0.0$)

転子基本波磁束との相互作用により生じる電磁力波 [II] により単調に増加している。29.0fn振動成分は、 $Lp=50\%$ まで増加した後、 $Lp=100\%$ とすると減少する。これは、表3に示した本供試機の1700Hzにおける固有振動数の存在により、機械系の共振の影響を受けたものと考えている。70.5fn振動成分は、 $Lp=0\%$ では問題とならないが、負荷の増加とともに顕著となる振動成分である。この振動成分も、29.0fn振動成分と同様に、機械系の共振の影響を受けて顕著に生じたものと考えられる。なお、このスロット数組合せの場合、 Lp を増加すると、多くの振動成分の fa が増大するため、振動加速度の全実効値 Fva も増大している。

＜4.1＞電磁振動に及ぼすスロット数組合せの影響 4極および6極IMにおける n に対する顕著な振動成分の発生状況を図4に示す。同図において、(a)は $p'=2$ 、(b)は $p'=3$ の場合であり、横軸は n 、縦軸は fv および f_M である。図中の「○」印は発生している各振動成分を表し、 fa の大きさにより「○」印の大きさを3段階に変えている。また、これらの図中の斜線は表1に示した f_M を示している。特に顕著な振動成分の発生原因などを表4および表5に示す。 Lp の増加に伴い、これらの図表に示したほとんどの振動成分は増大し、顕著な振動成分が増える傾向にある。これは、前述のように、無負荷時には1種類の電磁力波しか生

じないが、負荷の増大と共に、電磁力波 [II] が増大し、顕著な電磁振動の発生に寄与したためと考えている。なお、同図の $Lp=0\%$ の場合は、文献 (5) の図2 (a) および (b) に対応するが、IMを電力計へ接続した影響および測定時の温度状態などの測定条件の差異により、若干発生状況が異なったものと考えている。

各極数毎にスロット数組合せによる電磁振動の発生の特徴をまとめると以下のようなものである。

(1) 4極 ($p'=2$) IMの場合 (図4 (a) および表4)

回転子スロット数 n が極数 $2p'$ の倍数となる回転子、すなわち $n=28, 32, 36, 40$ および44を組合せた場合、顕著な振動を生じない傾向にある。これは、表2より明らかなように、これらの n ではモードが小さな電磁力波を生じないためであると考えられる。

n が極対数 p' の倍数となる (極数 $2p'$ の倍数となる場合を除く) 回転子を組み合わせた場合、 $K=1$ において顕著な電磁振動を生じる傾向にある。特に、 $n=30, 34, 38$ においては、表2に示したように、モード $M=2$ となる電磁力波により特に顕著な電磁振動を生じている。これは、 n が p' の倍数となる回転子では、 $K=1$ において、 $M=0$ もしくは p' の電磁力波しか生じないためである。 $K=2$ においては、表2に示したように、モードの小さな電磁力波を生じないため、顕著な電磁振動を生じない傾向にあると考えられる。 $K=3$ においては、 $n=34$ および38の場合のみ、 $M=2$ となる電磁力波を生じるため、顕著な電磁振動を生じている。

(2) 6極 ($p'=3$) IMの場合 (図4 (b) および表5)

4極IMの場合とは異なり、ほとんどの回転子スロット数の場合、 $K=1$ において顕著な電磁振動を生じている。これら顕著な電磁振動は、いずれも供試機の固有振動数とほぼ一致した周波数で生じていることから、機械系の共振の影響を著しく受けているものと考えられる。

回転子スロット数 n が極対数 p' の倍数となる回転子を組合せた場合、 $K \geq 2$ において顕著な電磁振動を生じない傾向にある。 $n=32, 34, 38$ および40の場合、表2より、 $K=2$ において $M=2$ となる電磁力波に起因した顕著な電磁振動を生じている。これらの発生周波数は、供試機の固有振動数に近い1400Hz近辺であり、機械系の共振の影響をかなり受けているものと考えられる。このため、負荷の増加と共に振動発生周波数が減少し、共振周波数から遠ざかるため、 $n=38$ の場合を除き、振動加速度が減少していることを確認している。また、 $K=3$ にモードの小さな電磁力波を生じるが、特に顕著な振動成分を生じていない。このように、本論文で用いた6極IMでは、 Lp を増加した場合、モードの小さな電磁力波の発生周波数は機械系の共振周波数から遠ざかるため、0.1G以上の顕著な振動成分が増加しにくい傾向にあることが実験的に明らかとなった。

以上の実験結果より、極数およびスロット数組合せによる電磁振動の発生の特徴は、表2に示したモードの小さな電磁力波の発生状況と類似した傾向であることが明らかと

なった。また、その電磁力波の発生周波数と供試機の固有振動数とが近くなる場合には十分な注意を要することなども明らかとした。なお、実験の結果、電磁振動を生じにくいスロット数組合せが存在することを明らかとしたが、これらのスロット数組合せにおいては始動時の異常トルクが非常に大きくなり⁽¹⁴⁾、場合によっては始動不可能なものもあることに留意されたい。また、図4において、 f_M と一致しない周波数に顕著な電磁振動を生じる場合も見られる。これらは供試機の固有振動数近辺に生じている場合が多く、表2に示した以外の電磁力波により生じているものと考えられるが、詳細については今後の課題としたい。

図5に、回転子スロット数 n に対する振動加速度の全実効値 F_{va} を示す。多くのスロット数組合せにおいて、負荷の増加とともに F_{va} は増大している。これは、各スロット数組合せにおいて生じる振動成分の多くが Lp の増加と共に増大したためである。しかし、例えば、 $p'=2, n=44$ の場合および $p'=3, n=40$ の場合などでは、 Lp の増加に伴い F_{va} は減少している。 $p'=2, n=44$ の場合、 $88fn$ 成分および $110fn$ 成分が顕著に生じている。これらの振動成分が機械系の共振の影響により減少するため、全実効値も減少していることを確認している⁽¹⁵⁾。また、特に顕著な振動成分を生じていない場合、すなわち、4極IMに極数の倍数と

図4 回転子スロット数による電磁振動の特徴

Fig. 4. Features of the electromagnetic vibration vs. rotor slots.

表4 顕著な電磁振動の発生原因と特徴 ($p'=2$)
Table 4. Causes and characteristics of dominant electromagnetic vibration ($p'=2$) .

n	f_v [Hz]	f_a [G]			主原因となる電磁力波							備考
		$Lp=0\%$	50%	100%	力波の分類	L	K	ν_s'	ν_r'	M		
27	11.5 f_n	0.07	0.18	1.41	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} -10 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11 \\ 2 \end{bmatrix}$	1	$\nu_{e'}=-10$	
29	12.5 f_n	0.31	0.67	1.20	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} -10 \\ -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9 \\ 2 \end{bmatrix}$	1	$\nu_{e'}=-10$	
	29.0 f_n	1.01	1.43	1.34	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} -10 \\ 14 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -12 \\ 16 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2	$\begin{matrix} \nu_{e'}=-10 \\ \nu_{e'}=14 \\ \nu_{e'}=-10 \\ \nu_{e'}=14 \end{matrix}$	
30	17.0 f_n	1.19	1.48	2.00	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
31	17.5 f_n	1.07	1.21	1.79	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 \\ 2 \end{bmatrix}$	1		
	29.0 f_n	0.58	0.80	1.01	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} -10 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12 \\ 2 \end{bmatrix}$	2	$\nu_{e'}=-10$	
	31.0 f_n	0.06	0.36	1.24	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} -10 \\ 14 \\ 0 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8 \\ 12 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2	$\begin{matrix} \nu_{e'}=-10 \\ \nu_{e'}=14 \\ \nu_{e'}=-10 \\ \nu_{e'}=14 \end{matrix}$	
33	35.0 f_n	1.97	2.28	2.96	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 2 \\ -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
34	17.0 f_n	0.43	1.23	2.70	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
35	17.5 f_n	0.17	1.06	2.06	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}$	1		
	35.0 f_n	2.09	2.65	3.64	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
37	18.5 f_n	0.78	0.97	1.63	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	1		
	35.0 f_n	0.22	0.60	1.01	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
	55.5 f_n	0.80	1.19	0.59	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	3	3	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ -1 \\ 5 \\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	3		
38	19.0 f_n	1.19	1.20	1.78	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	2		
39	17.5 f_n	0.45	0.60	1.04	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix}$	1		

表5 顕著な電磁振動の発生原因と特徴 ($p'=3$)
Table 5. Causes and characteristics of dominant electromagnetic vibration ($p'=3$) .

n	$f\nu$ [Hz]	f_a [G]			主原因となる電磁力波						
		$Lp=0\%$	50%	100%	力波の分類	L	K	ν_s'	ν_r'	M	
28	11.3 f_n	1.66	1.43	1.70	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ -5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -5 \\ 3 \end{bmatrix}$	2	
29	11.7 f_n	2.86	2.91	3.30	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2 \\ 3 \end{bmatrix}$	1	
31	12.3 f_n	1.41	1.55	1.78	③ $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2 \\ 3 \end{bmatrix}$	1	
32	23.3 f_n	1.30	1.12	0.94	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 3 \\ -5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -5 \\ 3 \end{bmatrix}$	2	
34	11.3 f_n	0.28	0.20	1.00	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix}$	2	
					$\begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}$			$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix}$			
35	11.7 f_n	1.69	2.46	3.27	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix}$	1	
								$\begin{bmatrix} 4 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$		
	23.3 f_n	1.32	1.53	1.76	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix}$	2	
								$\begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix}$		
36	12.0 f_n	0.97	1.08	1.20	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	0	
37	12.3 f_n	2.80	2.94	3.08	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix}$	1	
								$\begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$		
	24.7 f_n	1.91	1.47	1.03	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 5 \end{bmatrix}$	2	
								$\begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$		
38	12.7 f_n	0.87	1.19	1.12	② $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix}$	2	
40	24.7 f_n	1.27	0.74	0.53	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	2	2	$\begin{bmatrix} 3 \\ -5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -5 \\ 3 \end{bmatrix}$	2	
41	11.7 f_n	0.73	0.84	1.36	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2 \\ 3 \end{bmatrix}$	1	
43	12.3 f_n	1.14	1.35	1.65	① $\begin{bmatrix} \text{I} \\ \text{II} \end{bmatrix}$	1	1	$\begin{bmatrix} 3 \\ -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4 \\ 3 \end{bmatrix}$	1

図5 回転子スロット数による全実効値の変化

Fig. 5. Measured overall of the electromagnetic vibration with rotor slot.

なる回転子を組合せた場合、および6極IMに極対数の倍數となる回転子を組合せた場合、 Fva は相対的に小さい傾向にある。しかし、6極IMの場合、 Lp に対する Fva の増大の割合は、各回転子スロット数によりさまざまである。前述のように、6極IMにおいては無負荷時には固有振動数近辺に多數の顕著な電磁振動を生じる。しかし、負荷の増加に伴い、電磁力波の発生周波数が固有振動数から遠ざかるため、振動加速度が減少する振動成分が多い。従って、6極IMの場合、4極IMに比べ、 Lp を増加すると Fva が減少するスロット数組合せが多くなったものと考えている。

＜4.2＞電磁振動に及ぼす斜めスロットの影響 図6に、測定結果の一例として、 $n=35$ 、 $Lp=100\%$ における電磁振動に及ぼす斜めスロットの効果を示す。同図より明らかなように、 $n=35$ では、顕著な振動成分として、 $17.5fn$ 成分、 $35fn$ 成分および $52.5fn$ 成分を生じている。また、これらの振動成分の fa は σ_r の増加に伴い減少している。これらの振動成分発生の主原因は、いずれも表1の分類②の電磁力波であると考えられる。

図7に、 Lp および σ_r に対する、 $n=27$ および 35 における顕著な振動成分の fa の変化を示す。同図より明らかなように、 $n=27$ における $11.5fn$ 成分および $n=35$ における $17.5fn$

図6 顕著な電磁振動に及ぼす斜めスロットの効果
Fig. 6. Effect of skewed slot on the dominant electromagnetic vibration.

(a) $n=27$, $11.5fn$ 成分

(b) $n=35$, $17.5fn$ 成分

(c) $n=35$, $35fn$ 成分

(d) $n=35$, $52.5fn$ 成分

図7 電磁振動に対する斜めスロットの効果
Fig. 7. The effect of skewed slot on the electromagnetic vibration.

成分は Lp の増加とともに著しく増大している。他の2つの振動成分は無負荷時にも顕著であり、 Lp を変えてもその fa はあまり変化しない。このことから、 $n=27$ における $11.5fn$ 成分および $n=35$ における $17.5fn$ 成分の発生原因は主として表1の電磁力波〔Ⅱ〕であり、他の2つの振動成分の発生原因は主として電磁力波〔Ⅰ〕であると考えられる。斜めスロットを施すことにより、いずれの振動成分の fa も負荷状態に関わらず減少しており、 σ_r を大きくすると fa の減少割合も大きい傾向にある。

表6に、図7に示した顕著な振動成分の σ_r に対する減少割合および主原因となる高調波次数の斜めスロット係数などを示す。 $n=27$ における $11.5fn$ 成分および $n=35$ における $17.5fn$ 成分の発生の主原因は電磁力波〔Ⅱ〕と考えられるので、前述の理論より、 $n=27$ の $11.5fn$ 成分では、回転子スロット高調波の次数 $v_q'=25$ 次および29次、 $n=35$ における $17.5fn$ 成分では、 $v_q'=33$ 次および37次の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少しているものとみなせる。これに対して、 $35fn$ 成分および $52.5fn$ 成分の発生の主原因は電磁力波〔Ⅰ〕と考えられるので、発生の主原因となる固定子スロット高調波の次数 $v_p'=70$ 次および74次、および106次および110次の斜めスロット係数の絶対値にそれぞれほぼ比例して減少しているものと見なせる。また、発生原因となる高調波次数が高いほど、 σ_r に対する振動成分の fa の減少割合は大きい。例えば、 $Lp=100\%$ 、 $\sigma_r=0.3$ の場合、 $\sigma_r=0.0$ に対して $n=35$ の $17.5fn$ 成分の fa は97%、 $52.5fn$ 成分の fa は9%に減少しており、主原因となる高調波次数が高いほど小さな斜めスロット角で大きな減少効果を得ている。なお、図7(d)および表6より明らかなように、 $52.5fn$ 成分の fa は、 $\sigma_r=0.3$ の場合と $\sigma_r=0.7$ の場合とでほぼ同じ大きさとなっている。これは106次および110次調波の斜めスロット係数より明らかなように、斜めスロット係数に依存していることが原因と考えられる。

5. あとがき

本論文においては、IMの負荷時に生じる電磁力波および電磁振動発生状況に及ぼす極数、スロット数組合せおよび斜めスロットの影響について、理論的および実験的に考察した。その結果をまとめると、以下のようである。

(1) 4極IMに極数の倍数となる回転子を組合せた場合、負荷を増加した場合においても顕著な電磁振動を生じない傾向にある。また、これらの回転子を除く極対数の倍数となる回転子を組合せた場合、第1次スロット高調波によるモードの小さな電磁力波により顕著な電磁振動を生じる傾向にある。

(2) 6極IMに極対数の倍数となる回転子を組合せた場合、負荷を増加した場合においても特に顕著な電磁振動を生じない傾向にある。しかし、本論文で用いた供試機においては、機械系の共振の影響により顕著な電磁振動を生じる場合もある。

(3) 4極IMの場合、振動加速度の全実効値は、回転子

表 6 斜めスロットによる減少効果と斜めスロット係数との比較 ($p'=2$, $n_s=36$)

Table 6. Relation between measured electromagnetic vibration and skew reduction factor.

n	fv	σ_r	0.0	0.3	0.7	1.0	備考
		Lp					
27	11.5fn	0%	0.09 G (100%)	0.07 G (83%)	0.03 G (35%)	0.01 G (10%)	実測値
		25%	0.19 G (100%)	0.15 G (79%)	0.07 G (38%)	0.01 G (3%)	
		50%	0.412 G (100%)	0.34 G (82%)	0.19 G (46%)	0.04 G (9%)	
		75%	0.81 G (100%)	0.71 G (88%)	0.36 G (45%)	0.09 G (11%)	
		100%	1.32 G (100%)	1.20 G (91%)	0.66 G (50%)	0.13 G (10%)	
		$ K_{s25} $	100%	88%	44%	8%	斜めスロット係数
		$ K_{s29} $	100%	84%	30%	7%	
35	17.5fn	0%	0.24 G (100%)	0.21 G (86%)	0.10 G (40%)	0.02 G (9%)	実測値
		25%	0.51 G (100%)	0.43 G (83%)	0.26 G (50%)	0.08 G (16%)	
		50%	1.06 G (100%)	0.88 G (83%)	0.56 G (53%)	0.13 G (13%)	
		75%	1.50 G (100%)	1.35 G (90%)	0.83 G (55%)	0.30 G (20%)	
		100%	1.92 G (100%)	1.86 G (97%)	1.37 G (71%)	0.33 G (17%)	
		$ K_{s33} $	100%	87%	42%	6%	斜めスロット係数
		$ K_{s37} $	100%	84%	31%	5%	
	35fn	0%	2.48 G (100%)	0.95 G (38%)	0.39 G (16%)	0.07 G (3%)	実測値
		25%	2.54 G (100%)	1.03 G (40%)	0.41 G (16%)	0.09 G (3%)	
		50%	2.85 G (100%)	1.10 G (39%)	0.45 G (16%)	0.11 G (4%)	
		75%	3.11 G (100%)	1.26 G (40%)	0.49 G (16%)	0.13 G (4%)	
		100%	3.15 G (100%)	1.35 G (43%)	0.49 G (15%)	0.17 G (5%)	
		$ K_{s70} $	100%	50%	22%	0%	斜めスロット係数
		$ K_{s74} $	100%	46%	21%	5%	
	52.5fn	0%	3.24 G (100%)	0.30 G (9%)	0.29 G (9%)	0.08 G (2%)	実測値
		25%	2.99 G (100%)	0.33 G (11%)	0.29 G (10%)	0.08 G (3%)	
		50%	3.79 G (100%)	0.41 G (11%)	0.36 G (9%)	0.07 G (2%)	
		75%	5.08 G (100%)	0.55 G (11%)	0.51 G (10%)	0.08 G (2%)	
		100%	6.44 G (100%)	0.56 G (9%)	0.56 G (9%)	0.12 G (2%)	
		$ K_{s106} $	100%	10%	6%	1%	斜めスロット係数
		$ K_{s110} $	100%	6%	9%	4%	

()内は、 $\sigma_r=0.0$ の振動加速度に対する比率

スロット数が極数の倍数となる場合に相対的に小さくなることを明らかにした。また、6極IMに極対数の倍数となる回転子を組合せた場合、 F_{va} は相対的に小さくなることも実験的に明らかにした。

(4) 回転子を斜めスロットとした場合、電磁力波〔I〕が発生の主原因となる電磁振動は、その発生の主原因となる固定子磁束の高調波次数の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少する。電磁力波〔II〕が発生の主原因となる電磁振動は、その発生の主原因となる回転子磁束の高調波次数の斜めスロット係数の絶対値にほぼ比例して減少する。

本論文で明らかにした事柄が、IMの負荷時の電磁振動および電磁騒音を勘案したスロット数組合せ並びに斜めスロット角の決定に有用な基礎的資料になれば望外の幸せである。

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 榊東芝 石橋文徳氏（現、芝浦工業大学）並びに 同 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 室町和弘氏（現、松下精工㈱）、同 片山晴義氏、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。

（平成10年10月26日受付，平成11年4月15日再受付）

文 献

- (1) P. L. Alger : "The Magnetic Noise of Polyphase Induction Motors", AIEE, 73, 451 (1954)
- (2) 石崎彰: 「かご形誘導電動機の振動及び騒音について」電学誌, 75, 800, 451 (昭30-5)
- (3) S. J. Yang : "Low-noise electrical motor", Clarendon Press, Oxford, 1981
- (4) F. Ishibashi, S. Noda : "Frequencies and Modes of Electromagnetic Vibration of a Small Induction Motor", T.IEE Japan, 116D, 11, 1110 (平7-11)
- (5) 廣塚功・坪井和男: 「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, 109D, 5, 347 (平元-5)
- (6) 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, 117D, 1, 73 (平9-1)
- (7) 廣塚功・室町和弘・坪井和男・石橋文徳: 「かご形誘導電動機の負荷時電磁振動に及ぼすスロット数組合せの影響に関する一考察」電気学会回転機研資, RM-97-33 (平9-6)
- (8) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, F. Ishibashi ; "Effect of Slot-Combination on Electromagnetic Vibration of Squirrel-Cage Induction Motor under Loaded Condition", PCC-Nagaoka, 843 (1997-8)
- (9) 廣塚 功・坪井和男・石橋文徳: 「かご形誘導電動機の負荷時電磁振動に及ぼす斜めスロットの影響に関する実験的考察」電気学会回転機研資, RM-97-114 (平9-9)
- (10) I. Hirotsuka, K. Tsuboi, F. Ishibashi ; "Effects of Skewed Slots on the Electromagnetic Vibration of A Squirrel-Cage Induction Motor under Loaded Conditions", PCIM'98, 379, (1998-4)
- (11) 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, 113D, 3, 394 (平5-3)
- (12) 蓮見孝雄: 「籠形誘導電動機に於ける斜溝の影響」電学誌, 58, 604, 944 (昭13-11)
- (13) 坪井和男・秋山勇治・安林幹幹・加藤邦弘: 「誘導電動機の電流特性に及ぼす回転子スロット数の影響」電学誌, 98B, 12, 987 (昭53-12)
- (14) 坪井和男・秋山勇治: 「誘導電動機の始動時異常トルク特性に関する実験的考察」電学論, 106B, 8, 106 (昭58-8)
- (15) 室町和弘・廣塚功・坪井和男・石橋文徳: 「三相かご形誘導電動機の負荷時の電磁振動の全実効値に及ぼす回転子スロット数の影響」1995電気関係学会東海支連大, No.224

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終了。同年4月三菱電機㈱入社。同年10月同社退社。平成2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終了。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（九州大学）。1981年電気学会電気学術振興賞論文賞受賞。IEEE会員。