

S.9-6 誘導電動機の電磁異常現象について

坪井和男 秋山勇治 加藤邦弘
(中部工大) (東芝) (中部工大)

(Tsuboi Kazuo)

1. まえがき

誘導電動機(以下、IMと略記する)の電磁異常現象はエアギャップに存在する種々の空間高調波磁束の作用で生じる現象を總称しており、この現象によって遊磁方向の力あるいは半径方向の力を生じるが、前者は電動機の円滑な始動を妨げる異常トルクとして、後者は振動及び騒音の原因となる電磁力波として知られている。

1896年Görge氏がかご形IMのクロージング現象について発表したのがこの現象に対する研究の端緒となり、以後H. Möller, R. Richter, 石崎, P. L. Alger氏らによって更に多くの研究がなされてきたのも周知のようである。現在においては、これらの異常現象の定量的解析をいかに正確に、かつ簡明な方法で行うかが重要な研究テーマとなっており、特に回歸網解析手法を用いた異常トルク特性等の解析(1)、回転子導体の飽和を考慮した解析(2)、負荷時の振動及び騒音問題を含めた解析(3)等が盛んに行われていることは注目すべき動向であろう。

筆者らもこれらの異常現象を定性的及び定量的に更に明確にすべく一連の研究を行っており、既に始動時における異常トルク現象などの解析の一方法を提案した(4)-(6)。即ち、固定子及び回転子巻線に固定した座標軸をとり、それらを連立させた基礎微分方程式より出発し、テンソル法を用いて多相絶対変換対称軸(4)に変換した後、電流及びトルクの一様式を導出する手法である。以下においてはこの解析手法について一般的に述べるとともに、それから得られた結果及び今後の課題等についても述べる。なお、以下において今後論文として発表予定の部分もかなり含まれている。

2. テンソル法を用いた2P'極三相IMの空間高調波解析

【2-1】解析上の仮定と起磁力高調波次数 以下の解析に次の仮定を置く。

- (I) 固定子是对称三相巻線であり、整数巻巻である。
- (II) 回転子はn本の導体棒からなる対称n相巻線である。
- (III) 回転子は適当に斜めスロットとしてあり、ギャップの磁気パーミアンスは一様と見なし得る。
- (IV) 磁気飽和現象、鉄損及び回転子導体間の漏れ電流等による操過負荷損は考慮しない。

これらの仮定のうち、(III)は半閉又は全閉スロット回転子に対し、始動期間中において起磁力波が断然優勢である実験的事実に基づいている。また、解析の都合上、固定子及び回転子巻線は等星形結線とし、それらの中性点は接地されていないものとする。

さて、以上の仮定に従えば考慮すべき起磁力高調波次数は基本波を含め、 ν が正の整数であらして

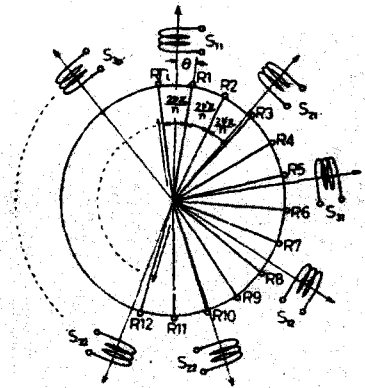
$$\nu = 6k \pm 1 \quad (k = 0, 1, 2, \dots, \infty) \quad \text{--- (1)}$$

となる。但し、(1)式の ν のうち

$$\nu = (6\lambda \pm 1) \pi \quad (\lambda = 0, 1, 2, \dots, \infty) \quad \text{--- (2)}$$

なる次数を除く。

【2-2】相軸上における過渡インピーダンステンソル 2P'極三相IMの巻線配置図は第1図のようになり、固定子巻線は3P'個、回転子巻線はn個である。いま、第1図のような各巻線に固定した座標軸上で過渡インピーダンステンソルを求め、固定子巻線について変換行列を用い、固定子三相(S1, S2及びS3)、回転子n相(R1, R2, R3, ..., Rn)巻線に対する相軸上の過渡インピーダンステンソルを求めれば(3)式のようなる形となる。但し、(3)式において $\{Z_{ssp'}\}$ は3行3列で固定子巻線自身に関するもの、 $\{Z_{srp'}\}$



第1図 2P'極三相IMの巻線配置図

$$\{Z_p\} = \begin{Bmatrix} \{Z_{ssp'}\} \\ \{Z_{srp'}\}_t \end{Bmatrix} \quad \text{--- (3)}$$

は3行n列で固定子巻線と回転子巻線との相互間に関するもの、 $[Z_{rrp}']$ はn行n列で回転子自身に関するものを表わし、 i は転位を示している。このうち、 $[Z_{ssp}']$ 及び $[Z_{rrp}']$ の対角要素は1相当りの抵抗と空間高調波自己インダクタンスとの和で表わされ、その他の要素はそれぞれ各巻線間の空間高調波相互インダクタンスの和で表わされる。このような扱いは筆者の1人が既に同期機の解析に導入している⁽⁹⁾。なお、(3)式的具体例については文献(5)を参照されたい。

[2.3] 対称軸上における過渡インピーダンステンソル 電流及びトルクの瞬時値を導出し物理的性質を明確にするためには対称軸に変換するのが解析上都合がよい⁽⁹⁾。いま、固定子及び回転子巻線に対する電流の変換が(4)式で表わされる対称軸⁽⁴⁾に(3)式をテンソル変換する。

$$[C_{psp}'] \begin{matrix} I_0 & I_1 & I_2 & I_0 & I_1 & I_2 & \dots & I_{b2} & I_{b1} \\ S1 & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & & & & & \\ S2 & 1/\sqrt{3} & \alpha^2/\sqrt{3} & \alpha/\sqrt{3} & & & & & \\ S3 & 1/\sqrt{3} & \alpha/\sqrt{3} & \alpha^2/\sqrt{3} & & & & & \\ R1 & & & & 1/\sqrt{n} & 1/\sqrt{n} & 1/\sqrt{n} & \dots & 1/\sqrt{n} & 1/\sqrt{n} \\ =R2 & & & & 1/\sqrt{n} & \beta^2/\sqrt{n} & \beta^4/\sqrt{n} & \dots & \beta^{2p}/\sqrt{n} & \beta^2/\sqrt{n} \\ R3 & & & & 1/\sqrt{n} & \beta^4/\sqrt{n} & \beta^8/\sqrt{n} & \dots & \beta^{4p}/\sqrt{n} & \beta^4/\sqrt{n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Rl & & & & 1/\sqrt{n} & \beta^{2l}/\sqrt{n} & \beta^{4l}/\sqrt{n} & \dots & \beta^{2lp}/\sqrt{n} & \beta^{2l}/\sqrt{n} \\ Rn & & & & 1/\sqrt{n} & \beta^{2n}/\sqrt{n} & \beta^{4n}/\sqrt{n} & \dots & \beta^{2np}/\sqrt{n} & \beta^{2n}/\sqrt{n} \end{matrix} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= e^{j2\pi/3} \\ \beta &= e^{j2p\pi/n} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

但し、
である。(4)式において、 I_0 、 I_1 及び I_2 は固定子巻線に対する対称軸でそれぞれ零相、正相及び逆相軸を意味する。また、 I_{b0} 、 I_{b1} 、 I_{b2} 、 \dots 、 I_{b2} 、 I_{b1} は回転子巻線に対する対称軸で文献(4)の反

称に従えばそれぞれ零相、(単一角)正相、二倍角正相、 \dots 、二倍角逆相、(単一角)逆相軸を意味する。もちろん、空間の基本波のみの場合は I_{b0} 軸、 I_{b1} 軸及び I_{b1} 軸以外は意味を持たないが、空間の高調波を考慮した場合、以下において明白になるように重要な物理的意味を有する。

さて、(4)式で変換した後の2p'極三相IMの過渡インピーダンステンソルの一般式は(6)式のようになる。但し、このうち $[Z_{sss}]$ は p' 及び n の値に拘わらず同じ形の式となるが、 $[Z_{rrsp}']$ 及び $[Z_{rrrp}']$ は p' と n とで定義される np' に対して最終的に6ケースに分類される。即ち、 $[Z_{rrsp}']$ 及び $[Z_{rrrp}']$ は2極IMの $[Z_{rrs}]$ 及び $[Z_{rrr}]$ の一般式中の次数を示す n を $np' = 1n/p'$ で置き換えた式を

$$[Z_{sp}'] = \begin{Bmatrix} [Z_{sss}] & [Z_{rrsp}'] \\ [Z_{rrsp}']^t & [Z_{rrrp}'] \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$p'/1$ 回反復した式になる。従って、(6)式の $[Z_{sp}']$ も p' 及び n に関して第1表に示すように6ケースに分類される。もちろん、2極後では $p' = 1 = 1$ であり $np' = n$ である。また、第1表で

第1表 (6)式の $[Z_{sp}']$ の分類と n の具体例($n=15\sim 38$)

[Z _{sp} ']の分類	n _{p'} の分類	nの具体例 (n=15~38)				
		2極(p'=1)	4極(p'=2)	6極(p'=3)	8極(p'=4)	...
[Z _{sp} '] _{6p-3}	n _{p'} = 6p-3	15, 21, 27, 33, ...	15, 21, 27, 33, ...	15, 21, 27, 33, ...	15, 21, 27, 33, ...	...
[Z _{sp} '] _{6p-2}	n _{p'} = 6p-2	16, 22, 28, 34, ...	16, 22, 28, 34, ...	16, 22, 28, 34, ...	16, 22, 28, 34, ...	...
[Z _{sp} '] _{6p-1}	n _{p'} = 6p-1	17, 23, 29, 35, ...	17, 23, 29, 35, ...	17, 23, 29, 35, ...	17, 23, 29, 35, ...	...
[Z _{sp} '] _{6p}	n _{p'} = 6p	18, 24, 30, 36, ...	18, 24, 30, 36, ...	18, 36, ...	24, ...	...
[Z _{sp} '] _{6p+1}	n _{p'} = 6p+1	19, 25, 31, 37, ...	19, 25, 31, 37, ...	19, 25, 31, 37, ...	19, 25, 31, 37, ...	...
[Z _{sp} '] _{6p+2}	n _{p'} = 6p+2	20, 26, 32, 38, ...	20, 26, 32, 38, ...	20, 26, 32, 38, ...	20, 26, 32, 38, ...	...
備考	p=1, 2, 3, ..., ∞, n _{p'} = ln/p' (n: 回転子巻線数, p': 対極数, l: p'以下の整数で, n _{p'} が整数となる最小の値)					

明らかなように、例えば4極IMで $n=30$ の場合、2極IMの $n=15$ に対する $[Z_{rrs}]$ 及び $[Z_{rrr}]$ の式を2回反復することになり、定性的には2極IMの $n=15$ の場合と同様な物理的性質を有することになる。なお、(6)式の $[Z_{rrsp}']$ の反復式の例を(7)式に示すが $np' = n$ とあれば2極IMの $n=6p-2$ の式⁽⁷⁾と一致する。但し、(7)式の記号の約束は文献(7)を参照されたい。

Zsrsp) 6p-2の反復式

	I_0	I_{f1}	I_{f2}	I_{f3}	...	I_{b3}	I_{b2}	I_{b1}
I_0								
I_f		$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+1)n_p+3}{pe^{j(3k+1)n_p+1\theta}} + M_{sf}(3k+2)n_p-1 \right\}$	$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+1)n_p+3}{pe^{j(3k+1)n_p+3\theta}} + M_{sf}(3k+2)n_p-3 \right\}$	...		$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+1)n_p-3}{pe^{j(3k+1)n_p-3\theta}} + M_{sf}(3k+2)n_p+3 \right\}$	$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+2)n_p-1}{pe^{j(3k+2)n_p-1\theta}} + M_{sf}(3k+1)n_p+1 \right\}$	
I_b		$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+1)n_p+1}{pe^{j(3k+1)n_p+1\theta}} + M_{sf}(3k+2)n_p-1 \right\}$	$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+2)n_p+3}{pe^{j(3k+2)n_p+3\theta}} + M_{sf}(3k+1)n_p-3 \right\}$	...		$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+2)n_p-3}{pe^{j(3k+2)n_p-3\theta}} + M_{sf}(3k+1)n_p+3 \right\}$	$\frac{\sqrt{3}n}{2} \sum_{k=0}^{p-1} \left\{ \frac{M_{sf}(3k+3)n_p-1}{pe^{j(3k+3)n_p-1\theta}} + M_{sf}(3k+2)n_p+1 \right\}$	

(7)

以上のように対称軸上の過渡インピーダンステンソルは p' と n とで定義される np' に従って最終的に6ケースに分類され、それによって以下の物理的性質も決定づけられる。

(2.4) 定常状態における電流の一般式 固定子巻線に平衡三相電圧が加わった場合、これを瞬時値対称分表示で表わせば(8)式のようにになる。但し、(8)式において $V_{if-m} = \sqrt{3} V_m$ (V_m :各相電圧の最大値)、4:電圧の位相角である。

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_f \\ I_b \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} V_{if-m} e^{j(\omega t + \varphi)} \\ V_{if-m} e^{-j(\omega t + \varphi)} \\ V_{if-m} e^{-j(\omega t + \varphi)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} I_{sp'} \\ I_{fb} \\ I_{bf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{ifp'} + I_{ibp'}^* \\ I_{ibp'} + I_{ifp'}^* \\ (I_{if(fb)p'} + I_{ib(bf)p'}^*) \\ (I_{ib(bf)p'} + I_{if(fb)p'}^*) \end{pmatrix} \quad (9)$$

電流の一般式は(8)式の電圧を(6)式に加えることによって求まり、(9)式のようになるが、具体的には np' に対して6ケースに分類される。但し、(9)式において I_0 及び I_0 軸は省いてあり、 $IF(fb)$ 軸系は I_f 軸と結合している全ての回転子座標軸を代表するものとし、 $IB(bf)$ 軸系は I_b 軸と結合している全ての回転子座標軸を代表するものとする。また、各座標軸又は座標軸系の電流の最初の項は I_f 軸に電圧を加えたとき流れる電流を示し、次の共役の記号*の付いている電流は I_b 軸に電圧を加えたとき流れる電流を示している。

例えば(7)式のように、一般に $IF(fb)$ 軸系と $IB(bf)$ 軸系には同じ座標軸が含まれる。なお、電圧方程式の行列表示による具体例は文献(5)を参照されたい。

(2.5) 定常状態におけるトルクの一般式 振動性トルクを含むトルクの一般式は基本波の同期速度に対する同期ワットトルクテンソルを $(\omega G_p')$ とすれば周知のように

$$T_{sp'} = \frac{1}{2} [I_{sp'}]_t^* (\omega G_p') [I_{sp'}] \quad (10)$$

第2表 np' に対するトルク特性の特長

である。但し、 $[I_{sp'}]$ は(9)式で表わされる電流の一般式であり、 $(\omega G_p')$ は(6)式の $(Z_{srsp'})$ より求まり

$$(\omega G_p') = \begin{pmatrix} I_f & I_b & IF(fb) & IB(bf) \\ I_f & & ((\omega G_p')_f) & \\ I_b & & & ((\omega G_p')_b)^* \\ IF(fb) & & ((\omega G_p')_f)^* & \\ IB(bf) & & & ((\omega G_p')_b) \end{pmatrix} \quad (11)$$

のようになる。但し、 $[(\omega G_p')_f]$ は I_f 軸と $IF(fb)$ 軸系とに關係する全てのトルクテンソル要素を代表するもので、具体的には6ケースに分類される。

np' 相数	トルクの振動周波数 f_T	同期性トルクとなる S
6P-3	$2knp'(1-S)f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
6P-2	$(3k-1)n_p(1-S)-2f$	$S=(3k-1)n_p-2/(3k-1)n_p$ ④
	$3knp'(1-S)+2f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
6P-1	$(3k+1)n_p(1-S)+2f$	$S=(3k+1)n_p+2/(3k+1)n_p$ ⑥
	$(6k-2)n_p(1-S)-2f$	$S=(6k-2)n_p-2/(6k-2)n_p$ ④
6P	$6knp'(1-S)f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
	$(6k+2)n_p(1-S)+2f$	$S=(6k+2)n_p+2/(6k+2)n_p$ ⑥
6P+1	$kn_p(1-S)f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
	$(6k-4)n_p(1-S)-2f$	$S=(6k-4)n_p-2/(6k-4)n_p$ ④
6P+2	$6knp'(1-S)f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
	$(6k+4)n_p(1-S)+2f$	$S=(6k+4)n_p+2/(6k+4)n_p$ ⑥
6P+3	$(3k-2)n_p(1-S)-2f$	$S=(3k-2)n_p-2/(3k-2)n_p$ ④
	$3knp'(1-S)f$ [$k=0$ のとき非振動性]	$S=1$ ⑤
6P+4	$(3k+2)n_p(1-S)+2f$	$S=(3k+2)n_p+2/(3k+2)n_p$ ⑥
備考	$k=0, 1, 2, \dots, \infty$ 、⑤、⑥及び④: 静止時、制動領域及び電動機領域における同期性トルクを示す。	

従って、トルク的一般式は統一的に表示すれば

$$T_{sp} = \dot{T}_{sp} + \dot{T}_{sp}^* \quad (12) \quad \text{但し、} \quad \dot{T}_{sp} = [i_{sp}^* + i_{sp}] \{ (w_{gp})_p \} [[i_{sp}(fb)_p] + [i_{sp}(bf)_p]^*] \quad (13)$$

となり、具体的に6ケースに分類される。第2表は np' に対する異常トルク発生の特徴を示したものであり、従来の実験結果等種と極めて良好な一致が見られている。

なお、詳細は省くが、対称軸上の過渡相互インピーダンステンソル $[Z_{asp}']$ の要素中に高調波成分が存在する限り非同周期性トルクを生じ、同一要素中に高調波成分が2個以上配列される場合にそれらの相互作用で静止時間周期性トルクを生じ、また固定子の正相と逆相軸とが高調波成分を介して同一回転子座標軸と結合されている場合それらの相互作用で回転時間周期性トルクを生じることにも明確になっている(6)。

第3表 固定子スロット数24の2極三相IMの異常同周期性トルク発生状況

$\frac{p}{2}$	LLL	LL	L	L'
18		⑤ $\begin{pmatrix} 1 < 11 \\ 7 < 13 \\ 5 < 13 \end{pmatrix}$ ⑦ $\begin{pmatrix} 11 < 25 \\ 7 < 41 \end{pmatrix}$	⑧ $\begin{pmatrix} 1 < 17 & 13 < 25 \\ 11 < 25 & 17 < 25 \\ 17 < 25 & 17 < 25 \end{pmatrix}$	⑥ $\begin{pmatrix} 1 < 35 \\ 1 < 31 \end{pmatrix}$
19		⑥ $\begin{pmatrix} 5-11 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 11-49 \\ 13-25 \end{pmatrix}$	⑧ $\begin{pmatrix} 1-37 \end{pmatrix}$
20		⑧ $\begin{pmatrix} 5-25 \\ 7 < 13 \end{pmatrix}$ ⑨ $\begin{pmatrix} 7-47 \end{pmatrix}$	⑫ $\begin{pmatrix} 1-17 \\ 17-25 \end{pmatrix}$ ⑪ $\begin{pmatrix} 11 < 41 \\ 13 < 47 \end{pmatrix}$	⑨ $\begin{pmatrix} 1-41 \\ 1-44 \end{pmatrix}$
21		⑤ $\begin{pmatrix} 5-47 \\ 7-47 \end{pmatrix}$	⑥ $\begin{pmatrix} 11-73 & 19-25 \\ 13-71 & 17-25 \end{pmatrix}$	③ $\begin{pmatrix} 1 < 41 \\ 1 < 45 \end{pmatrix}$
22	① $\begin{pmatrix} 1-23 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 5-47 \end{pmatrix}$ ⑤ $\begin{pmatrix} 5-71 \end{pmatrix}$ ⑧ $\begin{pmatrix} 11-11 \end{pmatrix}$ ⑦ $\begin{pmatrix} 7-73 \end{pmatrix}$	⑥ $\begin{pmatrix} 5-17 & 11-47 \\ 17-47 & 11-47 \end{pmatrix}$ ② $\begin{pmatrix} 25-47 \\ 47-71 \end{pmatrix}$ ⑧ $\begin{pmatrix} 19-25 \end{pmatrix}$	① $\begin{pmatrix} 1-43 \end{pmatrix}$
23	① $\begin{pmatrix} 1-47 \end{pmatrix}$		⑨ $\begin{pmatrix} 19-73 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 25-71 \end{pmatrix}$	② $\begin{pmatrix} 1-91 \end{pmatrix}$
24	⑤ $\begin{pmatrix} 1 < 25 \\ 25 < 47 \\ 47 < 49 \end{pmatrix}$	⑤ $\begin{pmatrix} 1 < 71 \\ 7 < 73 \\ 11-13 \end{pmatrix}$	⑤ $\begin{pmatrix} 5-19 & 23 & 47 \\ 7-17 & 47 & 73 \end{pmatrix}$	③ $\begin{pmatrix} 1 < 95 \\ 1 < 47 \end{pmatrix}$
25	⑧ $\begin{pmatrix} 1-47 \end{pmatrix}$		⑩ $\begin{pmatrix} 23-73 \end{pmatrix}$	③ $\begin{pmatrix} 1-101 \end{pmatrix}$
26	⑩ $\begin{pmatrix} 1-25 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 5-47 \end{pmatrix}$ ⑤ $\begin{pmatrix} 5-73 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 13-13 \end{pmatrix}$ ⑦ $\begin{pmatrix} 7-71 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 7-17 & 11 \\ 23-49 & 11-71 \\ 47-73 & 11-71 \end{pmatrix}$ ⑧ $\begin{pmatrix} 19-71 \end{pmatrix}$	⑧ $\begin{pmatrix} 1-53 \end{pmatrix}$
27		⑤ $\begin{pmatrix} 5-47 \\ 7-47 \end{pmatrix}$	③ $\begin{pmatrix} 17-71 \\ 17-73 \end{pmatrix}$	⑤ $\begin{pmatrix} 1 < 25 \\ 1 < 25 \end{pmatrix}$
28		⑩ $\begin{pmatrix} 5-25 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 7-47 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 11-17 & 11-73 \\ 11-47 & 11-73 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 17-73 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 1-27 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 1-57 \end{pmatrix}$
29			⑩ $\begin{pmatrix} 11-47 \\ 13-71 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 1-77 \end{pmatrix}$
30		③ $\begin{pmatrix} 5-25 \\ 7-25 \end{pmatrix}$	⑤ $\begin{pmatrix} 11 & 47 & 13 & 47 \\ 11 & 47 & 17 & 73 \end{pmatrix}$	⑤ $\begin{pmatrix} 1 < 27 \\ 1 < 31 \end{pmatrix}$
31			⑩ $\begin{pmatrix} 11-73 \\ 13-47 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 1-61 \end{pmatrix}$
32		⑩ $\begin{pmatrix} 7-25 \end{pmatrix}$ ⑩ $\begin{pmatrix} 7-71 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 13-17 & 23-73 \\ 17-47 & 25-71 \\ 47-47 & 47-47 \end{pmatrix}$	⑩ $\begin{pmatrix} 1-31 \end{pmatrix}$
備考	⑤、⑥及び⑩：静止時、制動域及び電動機領域における同周期性トルクを示し、縦て括弧されている調波間の作用で生じる。			

3. 異常トルク抑止対策への応用例

さて、一般にかご形IMの固定子及び回転子スロット数は数十程度であり、それらの数倍にも及ぶ起磁力高調波次数(例えば、100次調波以上)であっても定量的に大きく、実用上問題となる次数も多く存在するので、本理論のようにかなり高次の調波まで考慮して検討する必要がある。

第2表は一例として、固定子スロット数24の2極三相IMについて特に影響が大と考えられる低次調波と固定子スロット高調波等を考慮し、同周期性異常トルクの発生状況を示したもので、従来の文献等で述べられている特徴を更に明確に示している。

このように各高調波成分のトルク特性に及ぼす影響等の詳細な検討も十分可能であるので、異常トルクの問題からみたスロット数組合せ、固定子巻線法及び斜めスロット角の決定などを容易に行うことができる。

4. あとがき

以上、本稿においてはテンソル法を用いて、始動時における異常トルク現象などの解析を簡明に行い得ることを示すとともに百千の応用例も述べた。今後は定数決定法、具体的算定法等の確立が必要であるが、電磁力波の解析との関連等も明確にし、より高度な技術水準に照らした設計の基準を明らかにする必要がある。

引用文献

- (1) 例えば、J. H. Davis: Ph. D. Thesis at the univ. of Wisconsin (1970)
- (2) 例えば、K. Wepler: Siemens Forsch-u. Entwickl. Bd. 4, Nr. 2, S. 84 (1975)
- (3) 例えば、誘導機常電専門委員会: 電気学会技術報告(I部), 第120号 (1977)
- (4) 坪井: 電気学会全国大会, Ⅲ 607 (1977)
- (5) 坪井、秋山、安林、加藤: 電気学会回転機研究会資料, Ⅲ RM-77-15 (1977)
- (6) 坪井、秋山、安林、加藤: 電気学会回転機研究会資料, Ⅲ RM-77-16 (1977)
- (7) 坪井、秋山、安林、加藤: 電気学会論文誌, vol. 98-B Ⅲ 12 (1978)
- (8) 坪井、秋山、加藤: 電気学会東海支部連大, Ⅲ 176 (1978)
- (9) 加藤: 電工論, vol. 4, Ⅲ 3, P. 151 (1952)
- (10) 例えば執行: 電気機械設計論(本), 丸善出版, P. 402 (1951)