PAM 方式極数切換誘導電動機のインダクタンス行列

正員 穴澤 義久 (秋田大)

正員 加賀 昭夫 (秋田大)

正員 赤上 陽出男 (秋田大)

正員 藤原 一 (北海道大)

1. ま え が き

今日、ポンプ・ブローなどの風水力機械の省エネルギー駆動が大きな課題となっており、その手段としては速度を制御する方法が最も効果があり、サイリスタモータやかご形誘導電動機の一次周波数制御方式が適用されている。

一方、用途によっては連続的な速度制御を必要としないものも少なくなく、これらに対しては PAM 方式極数切換誘導電動機⁽¹⁾⁽²⁾の適用が、低価格で省エネルギー効果の大きい方法として見直されてきている。

PAM 方式極数切換誘導電動機は、単一巻線によって 1:2 以外の任意の速度比が得られ、二重巻線方式に比べて電動機寸法を小さくすることができる。電動機内部の接続が簡単である。Y, Δ のいずれの結線も選べるので負荷の特性を考慮した設計が容易である。三段速度以上の極数切換も可能である、という優れた特徴をもっている⁽¹⁾。

しかし、PAM 方式極数切換誘導電動機は高調波起磁力の影響が大きく、高調波トルクを発生しやすいという欠点があり⁽¹⁾、その対策が問題となっているが、PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析法について論じた文献は、ほとんど見当たらない。

筆者らは、かご形誘導電動機の高調波トルクを電気機械の統一理論に基づき解析し、既に発表した⁽³⁾⁽⁴⁾。

Inductance Matrix of Pole-Change Induction Motor with Pole-Amplitude Modulation. By Yoshihisa Anazawa, Member, Akio Kaga, Member, Hideo Akagami, Member (Faculty of Mining University of Akita) & Hajime Fujiwara, Member (Faculty of Engineering, University of Hokkaido)

穴澤 義久: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

加賀 昭夫: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

赤上陽出男: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

藤原 一: 正員, 北海道大学工学部電気工学科

PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析法を検討した結果、既に発表したかご形誘導電動機の高調波トルクの解析法へ接続行列を導入することによって解析することができることが明らかになった⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

すなわち、 $2p$ 極機の一相の固定子巻線は、 $2p$ 個のコイル群が直列に接続されている。PAM 方式極数切換誘導電動機においては、各相の直列コイル群を二つに分けて、その一方の極性を反転することによって極数を切換える。この $2p$ 個の直列コイル群を個々に切りはなし、独立したコイルのインダクタンス行列を求め、接続行列によって変換することにより各コイル接続におけるインダクタンス行列を求めることができる⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

本解析法は、高調波起磁力とスロットの存在によるギャップパーミアンス分布の脈動の両者を考慮しているので、PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの防止法、すなわち、スロット数の選定法、固定子巻線の巻線法、斜めスロットの定量的な検討が可能である。

また、接続行列の導入によって、二極当りの回転子スロット数が分数となる場合を含む、任意極数のかご形誘導電動機のインダクタンス行列を求めることができる。従って、二極当りの回転子スロット数が分数となる場合も含む、かご形誘導電動機の高調波トルクの一般解析が可能となる。

本報告においては、PAM 方式によって誘導電動機の極数を切換えた場合のインダクタンス行列の計算法と巻線係数について論じている。PAM 方式によって極数を切換えた場合の高調波トルクの解析および高調波トルクの防止法の詳細については、次の報告におい

て検討する。

2. PAM 方式の原理とインダクタンス行列の計算法

PAM 方式極数切替誘導電動機の原理⁽¹⁾⁽²⁾を、極数を8極から10極へ切替える場合を例にして示すと次のようになる。図1(a)のような8極の起磁力分布を、(b)の変調波で磁極を変調すると(c)の起磁力分布となる。また、(d)の変調波で磁極を変調すると(e)のような起磁力分布となる。これらの起磁力成分には6極および10極成分が含まれるが、各相の変調波の位相を適切に選ぶことによって6極または10極の成分が得られる。

変調の方法としては、各相の直列コイル群を二つに分けて、その一方の極性を反転する方法が用いられる。そのために、負荷のトルク特性に応じて(Y-2//Y)または(Δ -2//Y)の接続法が用いられるが⁽¹⁾⁽²⁾、ここでは、図1(b)の変調を行なうためには図2(c)の巻線の接続、図1(d)の変調を行なうためには図2(d)の巻線の接続を用いることとする⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

PAM 方式極数切替誘導電動機において、図2(b)~(d)のコイル接続を行なったときのインダクタンス行列は、図2(a)の $a_1 \sim a_8$ の個々のコイルのインダクタンス行列を求め、図2(b)~(d)への接続の変更を行なう接続行列 (Connection Matrix) によって変換することによって求まる。

PAM 方式によって極数を切替えた場合の起磁力分布をフーリエ級数に展開すると、例えば図1(c)においては、起磁力の振幅を F とすると、

図1 PAM 方式の原理

Fig. 1. Principle of pole-amplitude modulation.

図2 PAM 方式のコイル接続

Fig. 2. Coil connection of pole-amplitude modulation.

$$F_a = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \frac{4F}{\pi} \sin l \frac{\pi}{2} \cdot \left(2 \cos l \frac{\pi}{4} - 1 \right) \cos l \theta$$

となる。高調波次数 l は、1, 3, 5... の奇数次成分となる。従って、図2(c)および(d)の接続によって10極へ極数を切替えた場合は、二極機として解析すればよい。10極へ極数を切替えた場合のインダクタンス行列の計算法は次のようになる。

〈2・1〉 起磁力分布およびパーミアンス分布

図3のように、 a_1 コイルの巻線軸と1番目の回転子歯とのなす角度を θ' 、エアギャップ内の一点0を通る半径方向に引いた直線と a_1 コイル巻線軸とのなす角度を θ 、0を通る直線と1番目の回転子歯のなす角度を φ とする。

a_1 コイルによる起磁力分布は図4のようなになる。

図3 PAM 方式極数切替誘導電動機の座標

Fig. 3. Co-ordinates of pole-change motor with pole-amplitude modulation.

図 4 単一コイルの起磁力分布

Fig. 4. M. M. F. distribuion of a single coil.

a_k コイルの起磁力分布は、コイルに流れる電流を I としてフーリエ級数に展開すると(1)式となる。

$$F_{1ak}(\theta) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \frac{2wI}{\pi} k_d(l) \cdot k_s(l) \times \cos l \left\{ \theta - \frac{\pi}{p} (k-1) \right\} \dots (1)$$

ここで、

$$k_d(l) = \frac{\sin ql \frac{\pi}{S}}{q \sin l \frac{\pi}{S}}$$

$$k_s(l) = \sin l \theta_1$$

S は固定子スロット数、 w はコイルの巻数、 $2\theta_1$ は機械角で表わしたコイルピッチ、 p および q は磁極を変調する前の極対数および毎極毎相のスロット数である。また、 $k_d(l)$ 、 $k_s(l)$ は、各々 l 次高調波起磁力に対する分布巻および短節巻係数である。

かご形巻線は、二次導体数と等しい相数の星形対称多相巻線とみなすことができ、その巻数は $1/2$ になる。 k 番目導体による起磁力分布は(2)式となる。

$$F_{2k}(\varphi) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} \frac{I}{\pi} \cos l \{ \varphi - \beta - (k-1)\gamma \} \dots (2)$$

但し、 $\gamma = 2\pi/R$ 、 $\beta = (-\pi + \gamma)/2$ 、 R は回転子スロット数である。

ギャップパーミアンス分布は(3)式で表わされる⁽³⁾。

$$P(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} P_{mS nR} \cos(mS\theta \pm nR\varphi) \dots (3)$$

〈2・2〉 インダクタンス行列 エアギャップの磁束密度分布は、起磁力分布とギャップパーミアンス分布の積として求まる。固定子巻線の a_k コイルを励磁した場合の a_g コイルの磁束鎖交数は(4)式となる。

$$\phi_{a_g a_k} = wu \int_{(\pi/p)(g-1)-\theta_1}^{(\pi/p)(g-1)+\theta_1} F_{1ak}(\theta) P(\theta, \theta') r d\theta \dots (4)$$

ここで、 u は鉄心長、 r は回転子半径である。同様にして、 a_k と b_g 、 b_k と c_g 間コイルの鎖交数が求まる。固定子の a_k コイルを励磁したときの回転子 g 番目導体の磁束鎖交数は、(5)式となる。

$$\phi_{ga k} = \frac{1}{2} u \int_{\beta+(g-1)\gamma-(\pi/2)}^{\beta+(g-1)\gamma+(\pi/2)} F_{1ak}(\theta) P(\varphi, \theta') r d\varphi \dots (5)$$

回転子の k 番目導体を励磁したときの g 番目導体の磁束鎖交数は(6)式となる。

$$\phi_{gk} = \frac{1}{2} u \int_{\beta+(g-1)\gamma-(\pi/2)}^{\beta+(g-1)\gamma+(\pi/2)} F_{2k}(\varphi) P(\varphi, \theta') r d\varphi \dots (6)$$

8 極のコイル接続の場合は、回転子の極数も 8 極として計算しなければならないので、回転子 k 番目導体による起磁力分布は(2')式となる。

$$F_{2k}(\varphi) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{I}{l\pi} \sin l \frac{\pi}{8} \cos l \{ \varphi - \beta - (k-1)\gamma \} \dots (2')$$

但し、 $\gamma = 2\pi/R$ 、 $\beta = (-\pi/4 + \gamma)/2$ である。

磁束鎖交数 $\phi_{a_g a_k}$ は(4)式、 $\phi_{ga k}$ は(5)式、 ϕ_{gk} は(6')式となる。

$$\phi_{ga k} = \frac{1}{2} u \int_{\beta+(g-1)\gamma-(\pi/8)}^{\beta+(g-1)\gamma+(\pi/8)} F_{1ak}(\theta) P(\varphi, \theta') r d\varphi \dots (5')$$

$$\phi_{gk} = \frac{1}{2} u \int_{\beta+(g-1)\gamma-(\pi/8)}^{\beta+(g-1)\gamma+(\pi/8)} F_{2k}(\varphi) P(\varphi, \theta') r d\varphi \dots (6')$$

(4)~(6)式より、図2(a)のように各相のコイルが接続されていない状態の固定子巻線、相互および回転子巻線のインダクタンス行列 $[L_1']$ 、 $[M']$ 、 $[L_2']$ が求まる。

例えば、 $[L_1']$ は 24 行 24 列の行列となり次式のように表わされる。

$$[L_1'] = \begin{matrix} & a_1 & \dots & a_g & \dots & b_k & \dots & c_i & \dots \\ \begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_g \\ \vdots \\ b_k \\ \vdots \\ c_i \\ \vdots \end{matrix} & \begin{bmatrix} L_{a_1 a_1} & \dots & L_{a_1 a_g} & \dots & L_{a_1 b_k} & \dots & L_{a_1 c_i} & \dots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ L_{a_g a_1} & \dots & L_{a_g a_g} & \dots & L_{a_g b_k} & \dots & L_{a_g c_i} & \dots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ L_{b_k a_1} & \dots & L_{b_k a_g} & \dots & L_{b_k b_k} & \dots & L_{b_k c_i} & \dots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ L_{c_i a_1} & \dots & L_{c_i a_g} & \dots & L_{c_i b_k} & \dots & L_{c_i c_i} & \dots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned}
L_{agb_k} = & \sum_{lmn} \frac{2}{\pi} w^2 ur P_{msnR} D_s(l) \\
& \times \left[D_s(mS+nR+l) \cdot \cos \left\{ (mS+nR+l) \right. \right. \\
& \times (g-1) \frac{\pi}{p} - nR\theta' - l \left(\frac{2\pi}{3} + \overline{k-1} \cdot \frac{\pi}{p} \right) \Bigg\} \\
& + D_s(mS+nR-l) \cdot \cos \left\{ (mS+nR-l) \right. \\
& \times (g-1) \frac{\pi}{p} - nR\theta' + l \left(\frac{2\pi}{3} + \overline{k-1} \cdot \frac{\pi}{p} \right) \Bigg\} \\
& + D_s(mS-nR+l) \cdot \cos \left\{ (mS-nR+l) \right. \\
& \times (g-1) \frac{\pi}{p} + nR\theta' - l \left(\frac{2\pi}{3} + \overline{k-1} \cdot \frac{\pi}{p} \right) \Bigg\} \\
& + D_s(mS-nR-l) \cdot \cos \left\{ (mS-nR-l) \right. \\
& \times (g-1) \frac{\pi}{p} + nR\theta' + l \left(\frac{2\pi}{3} + \overline{k-1} \cdot \frac{\pi}{p} \right) \Bigg\} \Bigg]
\end{aligned}$$

〈2・3〉 回路接続の変更 PAM 方式極数切換誘導電動機は、図2(a)の個々のコイルを(b)のように接続することによって8極、また、(c)(d)のように接続することによって10極の誘導電動機として動作する。このような回路接続の変更には、接続行列が用いられる。

図2(a)の各コイルを(b)の8極の接続をした場合のコイル電流 $i_{a1} \sim i_{a8}$ と a 相電流 i_a との関係は、

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= i_{a3} = i_{a5} = i_{a7} = i_a \\ i_{a2} &= i_{a4} = i_{a6} = i_{a8} = -i_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、同図(c)の10極の接続をした場合は、

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= i_{a3} = i_{a6} = i_{a8} = i_a \\ i_{a2} &= i_{a4} = i_{a5} = i_{a7} = -i_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

同図(d)の接続においては、

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= i_{a3} = i_{a6} = i_a \\ i_{a2} &= i_{a5} = i_{a7} = -i_a \\ i_{a4} &= i_{a8} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

となる。b相およびc相についても同様である。このコイル電流と相電流の関係より接続行列〔C〕が求まる。

図2(b)~(d)のようにコイルを接続した場合のインダクタンス行列は、各コイル接続に対応した接続行列〔C〕によって変換することによって求まる。

固定子巻線のインダクタンス行列〔L₁〕は、(10)式となる。

$$[L_1] = [C] : [L_1'] [C] \dots\dots\dots (10)$$

固定子巻線から回転子巻線への相互インダクタンス行列〔M〕は(11)式となる。

$$[M] = [M'] [C] \dots\dots\dots (11)$$

回転子巻線における接続の変更はないので、回転子巻線のインダクタンス行列〔L₂〕は(12)式となる。

$$[L_2] = [L_2'] \dots\dots\dots (12)$$

例えば図1(b)の変調波で磁極を変調した場合、すなわち、図2(c)の接続した場合の固定子の k 相巻線から g 相巻線への相互インダクタンス $L_{1gk}(\theta')$ は、(13)式となる。

$$\begin{aligned}
L_{1gk}(\theta') = & \sum_{lmn} \frac{2}{\pi} (8w)^2 ur P_{msnR} D_s(l) C(l) \\
& \times \left[D_s(mS+nR+l) C(mS+nR+l) \cos \right. \\
& \left\{ (mS+nR) \frac{7\pi}{2p} + (mS+nR+l)(g-1)\alpha \right. \\
& \left. - nR\theta' - l(k-1)\alpha \right\} \\
& + D_s(mS+nR-l) C(mS+nR-l) \cos \\
& \left\{ (mS+nR) \frac{7\pi}{2p} + (mS+nR-l)(g-1)\alpha \right. \\
& \left. - nR\theta' + l(k-1)\alpha \right\} \\
& + D_s(mS-nR+l) C(mS-nR+l) \cos \\
& \left\{ (mS-nR) \frac{7\pi}{2p} + (mS-nR+l)(g-1)\alpha \right. \\
& \left. + nR\theta' - l(k-1)\alpha \right\} \\
& + D_s(mS-nR-l) C(mS-nR-l) \cos \\
& \left\{ (mS-nR) \frac{7\pi}{2p} + (mS-nR-l)(g-1)\alpha \right. \\
& \left. + nR\theta' + l(k-1)\alpha \right\} \Bigg] \dots\dots\dots (13)
\end{aligned}$$

ここで、

$$\alpha = 2\pi/3$$

$$D_s(l) = \frac{1}{l} \cdot k_d(l) \cdot k_s(l)$$

$$C(l) = \sin l \frac{2\pi}{p} \cos l \frac{\pi}{p} \sin l \frac{\pi}{2p}$$

であり、 $C(l)$ は Connection factor と呼ばれている⁽²⁾。また、 $(8w)$ はコイル群の全巻数となる。

固定子 k 相巻線から回転子 g 番目導体への相互インダクタンス $M_{gk}(\theta')$ は、(14)式となる。

$$\begin{aligned}
M_{gk}(\theta') = & \sum_{lmn} -\frac{1}{\pi} (8w) ur P_{msnR} D_s(l) C(l) \\
& \times \left[D_R(mS+nR+l) \cos \left\{ (mS+l)\theta' + (mS \right. \right. \\
& \left. \left. + nR+l)(\beta + \overline{g-1} \cdot \gamma) - l \frac{7\pi}{2p} - l(k-1)\alpha \right\} \right. \\
& \left. + D_R(mS+nR-l) \cos \left\{ (mS-l)\theta' + (mS \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +nR-l(\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+l\frac{7\pi}{2p}+l(k-1)\alpha\} \\
& +D_R(mS-nR+l)\cos\{(mS+l)\theta'+(mS \\
& -nR+l)(\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)-l\frac{7\pi}{2p}-l(k-1)\alpha\} \\
& +D_R(mS-nR-l)\cos\{(mS-l)\theta'+(mS \\
& -nR-l)(\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+l\frac{7\pi}{2p}+l(k-1)\alpha\} \\
& \dots\dots\dots (14)
\end{aligned}$$

ここで、

$$D_R(l)=\frac{1}{l}\sin l\frac{\pi}{2}$$

である。

回転子巻線は回路接続の変更はないので、 k 番目導体から g 番目導体への相互インダクタンス $L_{2gk}(\theta')$ は (15) 式となる。

$$\begin{aligned}
L_{2gk}(\theta') &= \sum_{lmn} \frac{ur}{2\pi} P_{msnr} D_R(l) \\
&\times \{D_R(mS+nR+l)\cos\{(mS+nR+l) \\
&\times (\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+mS\theta'-l(\beta+\overline{k-1}\cdot\gamma)\} \\
&+D_R(mS+nR-l)\cos\{(mS+nR-l) \\
&\times (\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+mS\theta'+l(\beta+\overline{k-1}\cdot\gamma)\} \\
&+D_R(mS-nR+l)\cos\{(mS-nR+l) \\
&\times (\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+mS\theta'-l(\beta+\overline{k-1}\cdot\gamma)\} \\
&+D_R(mS-nR-l)\cos\{(mS-nR-l) \\
&\times (\beta+\overline{g-1}\cdot\gamma)+mS\theta'+l(\beta+\overline{k-1}\cdot\gamma)\}\} \\
&\dots\dots\dots (15)
\end{aligned}$$

一般的なかご形誘導電動機の場合と同様に⁽³⁾⁽⁴⁾、図 2(c) の結線によって 10 極へ極数を切換えた PAM 方式極数切換誘導電動機の固定子巻線のインダクタンスには、 θ' の nR 倍の周期で変化する成分が含まれる。この成分は、固定子の正相回路と逆相回路を結合する成分であり、固定子の逆相回路に高調波すべり周波数電流を流す。また、回転子巻線のインダクタンスには、 θ' の mS 倍の周期で変動する成分が含まれる。この成分は、回転子の高調波すべり周波数回路を相互に結合する成分である。

同様に、接続行列による変換によって、各コイル接続の場合の Connection factor が求まり、図 2(d) の場合^(注)、

$$C(l)=\frac{1}{4}\left\{2\cos\left(l\frac{\pi}{p}\right)-1\right\}\sin\left(l\frac{2\pi}{p}\right)$$

図 2(b)、すなわち 8 極の場合は

表 1 Connection factor
Table 1. Connection factors.

高調波次数 l	コイル接続		
	Fig. 2(b)	Fig. 2(c)	Fig. 2(d)
1	0	0.271	0.104
2	0	0	0
3	0	0.653	0.604
4	-1.0	0	0
5	0	-0.653	-0.604
6	0	0	0
7	0	-0.271	-0.104
8	0	0	0
9	0	-0.271	0.104
10	0	0	0
11	0	-0.653	0.604
12	1.0	0	0
13	0	0.653	-0.604
14	0	0	0
15	0	0.271	-0.104
16	0	0	0
17	0	0.271	0.104
18	0	0	0
19	0	0.653	0.604
20	-1.0	0	0

$$C(l)=\cos\left(l\frac{2\pi}{p}\right)\cdot\cos\left(l\frac{\pi}{p}\right)\sin\left(l\frac{\pi}{2p}\right)$$

となる。各高調波に対する Connection factor は表 1 となる。

高調波は、8 極接続の場合は 4 の奇数倍の次数となり、また 10 極接続の場合は奇数次のみとなる。

パーミアンス分布のスロットリップルが無視できる場合の固定子巻線のインダクタンスは、コイル接続によらず (16) 式で表わされる。

$$\begin{aligned}
L_{1gk} &= \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} (8w)^2 ur P_{00} \{Ds(l)C(l)\}^2 \\
&\times 4\cos l(g-k)\alpha \dots\dots\dots (16)
\end{aligned}$$

すなわち、各接続の場合の Connection factor が異なるのみである。これより、10 極へ極数を切換えた場合のインダクタンスは、8 極の場合のインダクタンスより容易に求めることができる。8 極の場合、高調波起磁力の影響は小さいので、 $l=4$ のみをとればよく、固定子 a 相巻の自己インダクタンス L_{1aa} は、

$$L_{1aa}=\frac{8}{\pi}(8w)^2 ur P_{00} \{Ds(4)\}^2$$

となる。 L_{1aa} は無負試験によって容易に実測すること

(注) : Rawcliffe 氏は、文献(2)において Connection factor を
(Resultant e.m.f. of coil groups in series)
(Number of groups)×(E.M.F. per group)

とし、図 1(d) の変調を行った場合の Connection factor を
 $\frac{1}{3}\left(2\cos l\frac{\pi}{p}-1\right)\sin l\frac{2\pi}{p}$

と求めている。これは、図 2(d) において直列に接続されていない a_4 と a_6 コイルを除いて、Number of groups=6 として計算していることによるものである。

ができる。これを(16)式に代入することによって、10極へ極数を切替えた場合のインダクタンスは、

$$L_{lqk} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{L_{1aa}}{\{D_s(4)\}^2} \{D_s(l)C(l)\}^2 \cos l(q-k)\alpha$$

と求めることができる。

3. 巻線係数の検討

前節における解析によって分布巻係数 $k_d(l)$ 、短節巻係数 $k_s(l)$ および Connection factor $C(l)$ が求まった。巻線係数 $k_w(l)$ は、

$$k_w(l) = k_d(l) \cdot k_s(l) \cdot C(l) \dots\dots\dots (17)$$

となる⁽⁸⁾。

8極のコイル接続をした場合、高調波次数 l は、4の奇数倍の次数しか存在しないので、 $l=4l'$ とすると、 $k_d(l')$ 、 $k_s(l')$ は、8極の分布および短節巻係数と一致する。

PAM方式によって、10極へ極数を切替えた場合の分布巻係数を表2に示す。この場合、高調波は偶数および3の倍数次のは零となるので、1, 5, 7...次のもののみを示す。

一般の三相巻線の場合、高調波に対する分布巻係数は、毎極毎相のスロット数 q の増加につれて急激に減少する。しかし、図2(c)および(d)の結線の場合、

表2 分布巻係数

Table 2. Distribution factors.

高調波次数 l	毎極毎相のスロット数			
	$q=1$	$q=2$	$q=3$	$q=4$
1	1.0	0.998	0.998	0.997
5	1.0	0.947	0.938	0.934
7	1.0	0.897	0.879	0.873
11	1.0	0.752	0.716	0.704
13	1.0	0.659	0.616	0.601
17	1.0	0.442	0.391	0.376
19	1.0	0.321	0.275	0.261
23	1.0	0.065	0.052	0.048
25	1.0	-0.065	-0.049	-0.045

次数の低い高調波に対する分布巻係数は、 q を増加しても大幅に減少しないことがわかる。

PAM方式によって10極へ極数を切替えた場合の短節巻係数は表3となる。固定子スロット数が96の場合である。

表4は、コイルピッチが1/4の場合、すなわち、8極の場合において全節巻のコイルについて、巻線係数を計算したものである。コイル接続は、図2(c)および(d)について計算している。 $q=4$ となっても、5, 11, 13次高調波に対する巻線係数が大きな値となっている。PAM方式によって誘導電動機の極数を10極へ切替えた場合、誘導電動機は5次高調波によってトルクを発生し回転する。従って、PAM方式によって誘導電動機の極数を10極へ切替えた場合は、11次および13次高調波起磁力に対する対策が必要となる。

図5はPAM方式極数切替誘導電動機のトルク・速度特性の測定結果である。電動機は、8極、全節巻固定子スロット数48、回転子スロット数38で、回転子は斜溝されていないものである。また、10極へ極数を切替えた場合のコイル接続は、図2(c)の接続を用いている。すべりは、10極へ切替えた場合の基本波回転磁界に対するすべりを表わしている。

表3 短節巻係数

Table 3. Short pitch factors.

高調波次数 1	コイルピッチ				
	12/48	11/48	10/48	9/48	8/48
1	0.383	0.352	0.321	0.290	0.259
5	0.294	0.974	0.998	0.995	0.966
7	0.383	0.582	0.752	0.882	0.966
11	-0.924	-0.730	-0.442	-0.098	0.259
13	-0.924	-0.999	-0.897	-0.634	-0.259
17	0.383	-0.163	-0.659	-0.957	-0.966
19	0.924	0.528	-0.065	-0.634	-0.966
23	0.383	0.911	0.947	0.471	-0.259
25	-0.383	0.413	0.947	0.882	0.259

固定子スロット数 96

表4 巻線係数(全節巻)

Table 4. Winding factors (Full pitch winding).

高調波次数 l	結線 Fig. 2 (c)				結線 Fig. 2 (d)			
	$q=1$	$q=2$	$q=3$	$q=4$	$q=1$	$q=2$	$q=3$	$q=4$
1	0.104	0.103	0.103	0.103	0.040	0.040	0.040	0.040
5	-0.604	-0.572	-0.566	-0.564	-0.558	-0.528	-0.523	-0.521
7	-0.104	-0.093	-0.091	-0.091	-0.040	-0.036	-0.035	-0.035
11	0.604	0.454	0.432	0.425	-0.558	-0.419	-0.399	-0.392
13	-0.604	-0.398	-0.371	-0.363	0.588	0.368	0.343	0.335
17	0.104	0.046	0.041	0.039	0.040	0.018	0.016	0.015
19	0.604	0.194	0.166	0.158	0.558	0.179	0.153	0.146
23	-0.104	-0.007	-0.005	-0.005	-0.040	-0.003	-0.002	-0.002
25	0.104	-0.007	-0.005	-0.005	-0.040	0.003	0.002	0.002

図 5 PAM 方式極数切換誘導電動機のトルク・速度特性

Fig. 5. Torque-speed characteristics of pole-change motor with pole-amplitude modulation.

8 極の場合、高調波トルクの影響はほとんど表われていない。しかし、10 極へ極数を切換えた場合、7, 11, 13 次高調波非同期トルクの影響が表われ、また、157.9 rpm において高調波同期トルクを発生している。

このように、PAM 方式によって 8 極から 10 極へ極数を切換えた場合、11 次ならびに 13 次高調波起磁力の影響が非常に大きく、これらの高調波に対する対策が重要なことが明らかである。

表 5 は図 2 (c) のコイル接続を用いた場合の、各コイルピッチにおける巻線係数を示している。電動機の固定子スロット数は、96 の場合である。コイルピッチが 9/48 において、11 次高調波に対する巻線係数が非常に小さくなることがわかる。

文献(1)において、コイルピッチを変えた場合に PAM 方式極数切換誘導電動機のトルク・速度特性が大きく変化する例として図 6 が示されている。この電動機は、固定子スロット数 96、回転子スロット数 74 であり、8 極から 10 極に極数を切換える電動機であ

表 5 巻線係数 (短節巻)

Table 5. Winding factors (Short pitch winding).

高調波次数 l	コイルピッチ				
	12/48	11/48	10/48	9/48	8/48
1	0.103	0.095	0.089	0.078	0.070
5	-0.564	-0.594	-0.609	-0.607	-0.589
7	-0.091	-0.138	-0.178	-0.209	-0.229
11	0.425	0.336	0.203	0.045	-0.119
13	-0.363	-0.392	-0.352	-0.249	-0.102
17	0.039	-0.017	-0.067	-0.098	-0.098
19	0.157	0.090	-0.011	-0.103	-0.165
23	-0.005	-0.012	-0.012	-0.006	0.003
25	-0.005	0.005	0.012	0.011	0.003

固定子スロット数 96 結線 図 2 (c)

図 6 コイルピッチによるトルク特性の違い

Fig. 6. Difference of torque characteristics due to coil pitch.

る。トルク、速度特性が大幅に変化したのは、コイルピッチを 10/48 から 9/48 にしたことにより、11 次高調波非同期トルクが大幅に減少したものであることが表 5 から明らかである。

このように、10 極へ極数を切換えた場合の 11 次高調波起磁力の影響を軽減するためには 9/48 ピッチのコイルを用いることが有効であることが明らかになった。

4. ま と め

PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析法を検討した結果、かご形誘導電動機の高調波トルクの解析法へ接続行列を導入することによって解析することが可能となった。

本論文においては、PAM 方式によって誘導電動機の極数を切換えた場合のインダクタンス行列を、接続されていない個々のコイルのインダクタンス行列を接続行列による変換によって求め、巻線係数を導き検討した。

本研究によって得られた結果は次の通りである。

(1) 接続されていない個々のコイルのインダクタンス行列を接続行列で変換することによって、PAM 方式極数切換誘導電動機のインダクタンス行列を求めることができた。このインダクタンス行列には起磁力高調波とスロットの存在によるギャップパーミアンス分布の脈動の影響が含まれており、PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの防止法の総合的な検討が可能となる。

(2) 接続行列による変換によって得られたインダクタンス行列より、巻線係数を求め検討した結果、PAM 方式によって 8 極から 10 極へ極数を切換えた場合、11 次および 13 次高調波起磁力に対する対策が必要になったことが明らかになった。11 次高調波起磁力に

対する対策としては、9/48 の短節巻が効果があることが短節巻係数の検討より明らかになった。

接続行列による変換によって任意極数のかご形誘導電動機のインダクタンス行列を求めることができる。これにより、二極当りの回転子スロット数が分数となる場合も含む、任意極数のかご形誘導電動機の高調波トルクの解析が可能となった。

なお、PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析と防止法の検討については、今後報告する予定である。

(昭和60年1月28日受付, 同60年7月26日再受付)

文 献

- (1) 高橋, 他: 「最近の極数切換誘導電動機」電学誌, **100**, 1143 (昭 55-12)
- (2) G. H. Rawcliffe, et al.: "Induction motor speed-changing by pole-amplitude modulation." *Proc. Instn. Elect. Engrs.* **105 A**, 411 (1958)
- (3) 穴澤, 他: 「かご形誘導電動機の回転時同期トルクの解析」電学論 B, **99**, 17 (昭 54-1)
- (4) 穴澤, 他: 「かご形誘導電動機の高調波非同期トルクの解析」電学論 B, **102**, 637 (昭 57-10)
- (5) 穴澤, 他: 「PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析 (インダクタンス行列について)」昭 59 電気関係学会東北支部連大 No. 2 E-1
- (6) 穴澤, 他: 「PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析 (トルクの一般式)」昭 59 電気関係学会東北支部連大 No. 2 E-2
- (7) 穴澤, 他: 「PAM 方式極数切換誘導電動機の高調波トルクの解析」回転機研究会資料 RM-84-81
- (8) R. F. Burbidge: "A rapid method of analysing the m. m. f. wave of a single or polyphase winding" *Proc. Instn. Elect. Engrs.* **105 C**, 307 (1958)