二重巻線形極数変換誘導電動機の過渡特性と その一改善法

正員 野沢 純一 (足利工大)

正員 尾林 康司 (足利工大)

正員 岩崎 久之 (足利工大)

正員 三木 一郎 (明治大)

正員 松瀬 貢規 (明治大)

1. ま え が き

ポンプ、ブロワ駆動や重慣性負荷の始動に省エネルギー化を図る簡便な方法として、極数変換誘導電動機(以下、PCIM と略記)を用いる方法がある^{(1)~(4)}。

この方法では極数を切り換えることによって回転速度の加速および減速が行われるが、それに伴って比較的大きな過渡電流および過渡トルクが発生する^{(5)~(10)}。この過渡電流は、電源の容量および電動機保護ヒューズを選定する場合に極めて重要な特性であり⁽¹¹⁾、過渡トルクも電動機の超過トルク耐力や、回転系の軸および軸継手の強度などを決定する場合に極めて重要な特性となる^{(12)~(13)}。

著者らは、既に二重巻線形 PCIM の極数切り換えに伴う過渡電流特性が初期回転速度および負荷の慣性モーメントに依存することを一部報告した⁽¹⁴⁾。本論文では、はじめに極数を切り換えて加速および減速したときの過渡特性を計算によって求め、実測値と良く一致することを確かめる。解析手法としては、過渡特性の数式的な検討を可能にする周知の瞬時値対称座標法およびラプラス変換法を用いる。また、この解法から得た過渡トルクの式を検討し、近似解法を得る。

次に、慣性モーメントが過渡特性に及ぼす影響を示し、減速時に過大な過渡電流および過渡トルクが生じ、その最大値は慣性モーメントの影響を受けることを述べる。また、このトルクの最大値を近似解法から慣性モーメントの影響を考慮して計算する方法⁽¹⁵⁾を

示す。

更に、この過大な電流およびトルクを抑制し、過渡特性を改善するために PCIM の固定子側に抵抗 R_s' あるいはリアクトル X_s' をいったん挿入して極数を切り換え、全速度近辺で R_s' あるいは X_s' を短絡する手法⁽¹⁶⁾を提案し、その改善効果を次のように明らかにする。

まず、過渡電流および過渡トルク特性に R_s' あるいは X_s' の大きさが与える影響を示す。次に、これらの大きさと過渡電流および過渡トルクの最大値との関係を示し、 R_s' 挿入時と X_s' 挿入時との改善効果を比較する。

2. 極数切り換えに伴う過渡特性の解析

〈2.1〉 解析法 極数切り換えは電源を運転状態にある巻線から切り離し、休止巻線に投入することで行うことができる。従って、極数切り換えに伴い極数切り換え前の定常運転、電源開放、電源投入の各状態がある。また、過渡特性を改善するために挿入した R_s' あるいは X_s' を短絡した状態がある。本節では、これらの状態での過渡特性を求める手順を示す。なお解析にあたって、一方の巻線が電源に接続されているとき、他方の休止巻線には電圧が誘起されないものとする。

本論文では三相誘導電動機を対象としており、巻線または外部回路の構成が対称となるので、二軸理論に比べて変数が少なくてすみ瞬時値対称座標法を用いる。

瞬時値対称座標法の正相分の電圧方程式は(1)~(3)式ようになる^{(17)~(19)}。ここで、使用する記号は表1にまとめて示す。

$$v_{s1} = (R_s + PL_s)i_{s1} + PLmi_{r1} \dots\dots\dots (1)$$

$$0 = (R_r + PL_r)i_{r1} + PLmi_{s1} - e_{v1} \dots\dots\dots (2)$$

$$e_{v1} = j\omega_m(Lr i_{r1} + Lm i_{s1}) \dots\dots\dots (3)$$

正相分の電源電圧は次のように与える。

Transient Characteristics in Pole-changing Induction Motor with Two Separate Stator Windings and a Method for Improving it. By Jun-ichi Nozawa, Member, Kouji Obayashi, Member, Hisayuki Iwasaki, Member (Ashikaga Institute of Technology), Ichiro Miki, Member & Kouki Matsuse, Member (Faculty of Engineering, Meiji University).

野沢純一: 正員, 足利工業大学電気工学科

尾林康司: 正員, 足利工業大学電気工学科

岩崎久之: 正員, 足利工業大学電気工学科

三木一郎: 正員, 明治大学工学部電気工学科

松瀬貢規: 正員, 明治大学工学部電気工学科

表 1 記号一覧表

Table 1. List of symbols.

i_{s1}, i_{r1} : 正相分の一次および二次電流 (A)	ξ : 電源相電圧の初期位相 (rad)
v_{s1} : 正相分の電源電圧 (V)	t : 時間 (s)
e_{v1} : 正相分の速度起電力 (V)	P : 微分演算子
R_s'', R_r : 正相分の一次および二次抵抗 (Ω)	T : 発生トルク (Nm)
R_s' : 挿入抵抗 (Ω)	T_l : 負荷トルク (Nm)
l_s, l_r : 正相分の一次および二次漏れインダクタンス (H)	J_m : 供試機の慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
L_m : 正相分の励磁インダクタンス (H)	D_m : 供試機の制動係数 ($\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
L_s' : 挿入リアクトルのインダクタンス (H)	J : 回転系の慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
V_1 : 電源相電圧の実効値 (V)	D : 回転系の制動係数 ($\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
ω : 電源電圧の角周波数 (rad/s)	q : 極対数
ω_m : 回転子の電気角速度 (ele-rad/s)	Re, Im : 複素数の実数部および虚数部
$L_s'' = l_s + L_m$ $L_r = l_r + L_m$	$c_s = (\lambda_1 - j\omega_m)L_r$ $c_s = (\lambda_2 - j\omega_m)L_r$
$\Delta = L_s L_r - L_m^2$ $Z_r = R_r - j\omega_m L_r$	$c_s' = -\alpha_1 + j(\beta_1 + \omega - 2\omega_m) = c_s' e^{j\theta_s'}$
$Z_s = R_s + j\omega_m L_s$ $Z_m = R_s L_r + j\omega_m L_s^2$	$c_s'' = -\alpha_2 + j(\beta_2 + \omega - 2\omega_m) = c_s'' e^{j\theta_s''}$
$c_1 = j\omega - \lambda_1 = c_1 e^{j\theta_1}$ $c_2 = j\omega - \lambda_2 = c_2 e^{j\theta_2}$	$c_s' = \alpha_1 - \alpha_2 + j(\beta_1 + \beta_2 - 2\omega_m) = c_s' e^{j\theta_s'}$
$c_3 = \lambda_2 - \lambda_1 = c_3 e^{j\theta_3}$ $c_4 = j(\omega - \omega_m)L_r$	

$$v_{s1} = \sqrt{3/2} V_1 e^{j(\omega t + \xi)} \quad (4)$$

なお、固定子巻線の各相に抵抗を挿入した状態では $R_s = R_s' + R_s''$ 、リアクトルを挿入した状態では $L_s = L_s' + L_s''$ となる。また、挿入しない状態では $R_s = R_s''$ 、 $L_s = L_s''$ となる。

以上の式を整理しラプラス変換を施すと次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{i_{s1}\} = I_{s1} = \{ & (L_s s + Z_r) V_{s1} \\ & + (\Delta s + j L_s Z_r) i_{s10} \\ & + Z_r L_m i_{r10} \} / \Delta' \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}\{i_{r1}\} = I_{r1} = \{ & -L_m (s - j\omega_m) V_{s1} \\ & + Z_s L_m i_{s10} + (\Delta s + Z_m) i_{r10} \} / \Delta' \quad (6) \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}\{v_{s1}\} = V_{s1} = \sqrt{3/2} V_1 e^{j\xi} \frac{1}{s - j\omega} \quad (7)$$

ただし、 $\Delta' = \Delta(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)$ であり、(5)、(6)式において添字 0 は初期値を表す。また、 λ_1, λ_2 は次に示す方程式の根であり、 $\lambda_1 = -\alpha_1 + j\beta_1$ 、 $\lambda_2 = -\alpha_2 + j\beta_2$ と表すことにする。

$$\begin{aligned} s^2 + \{ & (R_s L_r + R_r L_s) / \Delta - j\omega_m \} s \\ & + R_s (R_r - j\omega_m L_r) / \Delta = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

I_{s1}, I_{r1} をラプラス逆変換すれば、 i_{s1} および i_{r1} は以下ようになる。

$$\begin{aligned} i_{s1} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 e^{j\xi} \frac{1}{\Delta} \{ & \frac{R_r + c_4}{c_1 c_2} e^{j\omega t} \\ & + \frac{R_r + c_5}{c_1 c_3} e^{\lambda_1 t} - \frac{R_r + c_6}{c_2 c_3} e^{\lambda_2 t} \} \\ & + \{ -(\Delta \lambda_1 + L_s Z_r) e^{\lambda_1 t} \\ & + (\Delta \lambda_2 + L_s Z_r) e^{\lambda_2 t} \} i_{s10} / (\Delta c_3) \\ & + L_m Z_r (-e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t}) i_{r10} / (\Delta c_3) \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{r1} = -\sqrt{\frac{3}{2}} V_1 e^{j\xi} \frac{L_m}{\Delta L_r} \{ & \frac{c_4}{c_1 c_2} e^{j\omega t} \\ & + \frac{c_5}{c_1 c_3} e^{\lambda_1 t} - \frac{c_6}{c_2 c_3} e^{\lambda_2 t} \} \\ & + L_m Z_s (-e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t}) i_{s10} / (\Delta c_3) \\ & + \{ -(\Delta \lambda_1 + Z_m) e^{\lambda_1 t} \\ & + (\Delta \lambda_2 + Z_m) e^{\lambda_2 t} \} i_{r10} / (\Delta c_3) \quad (10) \end{aligned}$$

従って、固定子および回転子の基準の相における電流 i_s, i_r は次のようになる。

$$\begin{aligned} i_s = (2/\sqrt{3}) \text{Re} \{ & i_{s1} \} \\ i_r = (2/\sqrt{3}) \text{Re} \{ & i_{r1} \} \quad (11) \end{aligned}$$

i_{s1} の共役値を i_{s1}^* とすると、トルク T は次式のようになる。

$$T = -2q \text{Im} [L_m i_{s1}^* \cdot i_{r1}] \quad (12)$$

また、回転系の運動方程式は次式のようにになる。

$$T = (J/q) P \omega_m + (D/q) \omega_m + T_L \quad (13)$$

過渡電流および過渡トルクは、回転角速度 ω_m の影響を受けるので、その影響を次のような方法で考慮する。

まず、 $t=0$ で初期電流 i_{s10}, i_{r10} 、初期回転角速度 ω_{m0} をもとに(11)式および(12)式から電流とトルクを求める。次に、時間を ΔH だけ微小に増加させた時点で、先に求めたトルクを(13)式に代入してルンゲ・クッタ法によって ω_m を求め、この値を(11)式および(12)式に代入し、電流とトルクを求める。この手順を時間 ΔH だけ増加させるごとに繰返せば、 ω_m の変化を考慮して電流とトルクを求めることができる。ただし、本論文では ΔH の値を 0.2 ms とした。

以上の手順に従えば、定常運転状態の特性は初期値をすべて 0 とし、収束するまで計算を行えば求めることができる。また電源投入状態の特性は、電源を投入する休止巻線に電圧が誘起されていないので i_{s10}, i_{r10}

を0とし、電源投入直前の ω_m の値に極数切り換え後と前との極数の比をかけた値を ω_{m0} とすれば、求めることができる。更に、短絡状態の特性は短絡直前の i_{s1} , i_{r1} , ω_m を i_{s10} , i_{r10} , ω_{m0} とし、挿入抵抗あるいはリアクトルの値を0とすれば求めることができる。

一方、電源開放状態では開放直前の ω_m を ω_{m0} とし、 i_{s1} が0となるので T を0として(13)式をルンゲ・クッタ法によって解き、時間に対する ω_m の変化を求める。なお、この状態の i_{r1} は、次の電源投入状態に全く影響を与えないので求めることを省略する。

〈2.2〉 近似解法 近似解法は電源投入状態について行う。本節ではこの状態での過渡トルクの式を求め、この式が過渡項および定常項からなることを示す。

次に、過渡トルクの式を利用して運動方程式を解く方法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾に従い、電源投入直後の過渡項が無視できない状態での時間 t に対する ω_m の関係を求める。更に、電源投入後、時間がたち過渡項が無視できる状態での t に対する ω_m の関係を求める。

なお、回転系が大きな慣性モーメントをもつものとするので、回転系の運動方程式は次のようになる。

$$T = (J/q) P \omega_m \dots \dots \dots (14)$$

また電源投入時のトルクは、(12)式から次のようになる。ここで、式中の第1項は定常項、第2項～第6項は過渡項を表す。

$$T = \frac{3q V_1^2 L_m^2 R_r}{\Delta^2} \left[\frac{\omega - \omega_m}{|c_1 c_2|^2} + \frac{\beta_1 - \omega_m}{|c_1 c_3|^2} \varepsilon^{-2\alpha_1 t} + \frac{\beta_2 - \omega_m}{|c_2 c_3|^2} \varepsilon^{-2\alpha_2 t} + [|c_2 c_3 c_4'| \sin \{(\beta_1 - \omega)t + \varphi_{11}\} \varepsilon^{-\alpha_1 t} - |c_1 c_3 c_5'| \sin \{(\beta_2 - \omega)t + \varphi_{12}\} \varepsilon^{-\alpha_2 t} - |c_1 c_2 c_6'| \sin \{(\beta_2 - \beta_1)t + \varphi_{13}\} \times \varepsilon^{-(\alpha_1 + \alpha_2)t}] / |c_1 c_2 c_3|^2 \right] \dots \dots \dots (15)$$

ただし、 $\varphi_{11} = \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_4'$, $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_3 + \varphi_5'$, $\varphi_{13} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_6'$ である。

(1) 過渡項が無視できない状態 この状態では電源投入直後であるので、過渡項は無視できない。そこで、(15)式を(14)式の左辺に代入して ω_m について解く。ただし、回転系の慣性モーメントが大きく ω_m の変化は緩慢であるので、(15)式中の ω_m およびその関数となっているものをすべて初期回転角速度 ω_{m0} に対するものとする。このようにして得られた結果は次のようになる。

$$\omega_m = \omega_{m0} + \frac{3q^2 V_1^2 L_m^2 R_r}{J \Delta^2} \left(\frac{\omega - \omega_{m0}}{|c_1 c_2|^2} t \right.$$

$$+ \frac{\beta_1 - \omega_{m0}}{|c_1 c_3|^2} \frac{1}{2\alpha_1} (1 - \varepsilon^{-2\alpha_1 t}) + \frac{\beta_2 - \omega_{m0}}{|c_2 c_3|^2} \frac{1}{2\alpha_2} (1 - \varepsilon^{-2\alpha_2 t}) + \frac{1}{|c_1 c_2 c_3|^2} \left[\frac{|c_2 c_3 c_4'|}{|c_1|} \{ \sin \varphi_{m1} - \sin \{(\beta_1 - \omega)t + \varphi_{m1}\} \varepsilon^{-\alpha_1 t} \} - \frac{|c_1 c_3 c_5'|}{|c_2|} \{ \sin \varphi_{m2} - \sin \{(\beta_2 - \omega)t + \varphi_{m2}\} \varepsilon^{-\alpha_2 t} \} - \frac{|c_1 c_2 c_6'|}{|c_e|} \{ \sin \varphi_{m3} - \sin \{(\beta_2 - \beta_1)t + \varphi_{m3}\} \varepsilon^{-(\alpha_1 + \alpha_2)t} \} \right] \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 $\varphi_{m1} = \varphi_{11} + \varphi_e$, $\varphi_{m2} = \varphi_{12} + \varphi_d$, $\varphi_{m3} = \varphi_{13} + \varphi_e$, $\varphi_e = \tan^{-1} (\beta_1 - \omega)/\alpha_1$, $\varphi_d = \tan^{-1} (\beta_2 - \omega)/\alpha_2$, $c_e = \alpha_1 + \alpha_2 + j(\beta_2 - \beta_1) = |c_e| \varepsilon^{j\varphi_e}$ である。

従って、過渡項が無視できない状態では、任意の時間 t に対する ω_m を(16)式によって求め、 t および ω_m を(11)式および(15)式に代入すれば、電流およびトルクを求めることができる。また、このようにすれば ω_m を一定な値として電流およびトルクを求めた場合よりも正確な結果が得られる。

(2) 過渡項が無視できる状態 この状態では電源投入後、時間がたち過渡項が無視できるので、過渡トルクの式は定常項からなると考えることができる。定常項は(1)～(3)式において P を $j\omega$ とおき、(12)式を用いて求めたトルクの式と一致する。計算を簡単にするためにこの式を用いることとし、更にすべり s_1 を $s_1 = (\omega - \omega_m)/\omega$ とおくと、すべりの関数としてトルクが次のように得られる。なお、このトルクは s_1 に対して最大値をもつ。

$$T = \frac{3q\omega V_1^2 L_m^2 (R_r/s_1)}{(R_r/s_1)^2 + (\omega L_r)^2} \times \left[\left\{ R_s + \frac{(\omega L_m)^2 (R_r/s_1)}{(R_r/s_1)^2 + (\omega L_r)^2} \right\}^2 + \left\{ \omega L_s - \frac{\omega L_r (\omega L_m)^2}{(R_r/s_1)^2 + (\omega L_r)^2} \right\}^2 \right] \dots \dots (17)$$

次に、(14)式をすべりを用いて表すと次のようになる。

$$T = -(J\omega/q) P s_1 \dots \dots \dots (18)$$

(17)式を(18)式に代入して時間 t について解くと次の式が得られる。

$$t = \frac{J}{3q^2 V_1^2 L_m^2 R_r} \left[\{ R_s^2 + (\omega L_s)^2 \} L_r^2 - (\omega L_m)^2 (2L_s L_r - L_m^2) \right] \omega^2 (s_0^2 - s_1^2)/2$$

$$+ 2R_s R_r (\omega L_m)^2 (s_0 - s_1) \\ + \{R_s^2 + (\omega L_s)^2\} R_r^2 \log(s_0/s_1)] + t_0 \\ \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 s_0 と t_0 は(19)式で計算を始める直前のすべりと時間である。

よって、 s_1 に対する時間の変化は(19)式を用いれば、 s_1 が0となる近辺まで求めることができる。従って、過渡項が無視できる状態では、(19)式によって任意の s_1 に対する t を求め、更に s_1 に対する ω_m を求めて、この t および ω_m を(11)式に代入すれば電流は求めることができる。また、トルクは s_1 を(17)式に代入すれば求めることができる。

なお、計算においては(15)式の過渡項で減衰率の最も小さな第4項に注目し、その振幅の定常項に対する比率を求め、この比率の絶対値が0.015以下になった場合に過渡項が無視できる状態と判断した。

〈2・3〉 過渡最大トルクの計算法 電源投入時のトルクは、前節で述べたように定常項と過渡項からなる。高速側の全回転速度近辺から減速する場合には発電機領域となるので、定常項の最大値は電動機領域よりも大きな値となる⁽²²⁾。更に、 α_1 と α_2 が大きい場合には過渡項は速やかに減衰するので、電源投入直後に振動的な過渡トルクはほとんど表れない。

一方、 α_1 と α_2 が小さい場合には振動的な過渡トルクが表れる。しかし、その振幅は定常項の最大値より小さな値となり、 R_s が R_r より大きく、これらの抵抗の比が1に近づかないものとすれば、電源投入直後の振動的な過渡トルクは定常項の最大値を越えることはない。

よって、過渡トルクの最大値は定常項の影響を大きく受けると考えられ、定常項を表す(17)式が最大となるすべり s_{1m} の近辺で過渡トルクは最大値をもつことになる。この s_{1m} は、(17)式から次のように求めることができる。

$$s_{1m} = -R_r \left/ \left(\omega \sqrt{\frac{(R_s L_r)^2 + (\omega \Delta)^2}{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} \right) \right. \dots\dots (20)$$

従って、 s_{1m} に対応する回転角速度 ω_{ms} になるまでの時間 t_{ms} を(16)式によって求め、この ω_{ms} と t_{ms} を(15)式に代入すれば、過渡トルクの最大値を計算することができる。

3. 実測値と計算値との比較

かご形の二重巻線形 PCIM の定格および諸定数を表2に示す。ここで、実測に供した電動機は供試機1である。この供試機には直流発電機を負荷として固定軸継手で連結しており、この状態で回転系の慣性モー

メント J は $J=9.95 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、回転系の制動係数 D は $D=3.13 \times 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$ である。

過渡電流および過渡トルクの実測は、次に述べる測定条件で行った。過渡電流は固定子の各相に1.67 mΩの抵抗を挿入し、その両端に発生する電圧としてリニアコーダで記録し、過渡トルクは磁わい式トルク計で検出しリニアコーダで記録している。

電源投入条件は次のとおりである。電源の線間電圧は216 Vである。加速した場合には、電源を6極巻線から開放し4極巻線に投入するまでの時間 t_c は14 ms、初期位相 ξ は1.26 radである。また、減速した場合には、 t_c は25 ms、 ξ は4.75 radである。

図1～図4は上述の測定条件で求めた電流およびトルクの実測値と、瞬時値対称座標法および近似解法で求めた計算値とを比較したものであり、図示のように電源は a 点で開放される。ただし、近似解法で過渡項が無視できない状態として計算を行う区間は、図1、図2の場合では電源投入後130 msであり、図3、図4では60 msである。これらの図から瞬時値対称座標法および近似解法で求めた計算値は実測値と比較的良好一致し、両計算法が妥当であることが確認できる。

表2 電動機定数

Table 2. Motor parameters.

供試機1		極 数: 4/6	
定 格	出 力: 0.75 kW	電 流: 3.6/4.6 (A)	
	電 圧: 200 V	周波数: 50 Hz	
諸定数	R_s'' : 3.45/2.70 (Ω)	L_m : 182/111 (mH)	
	R_r : 1.05/1.37 (Ω)	$L_s = L_r$: 6/7 (mH)	
	J_m : $3.41 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	D_m : $6.00 \times 10^{-4} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$	
供試機2		極 数: 4/6	
定 格	出 力: 30 kW	電 流: 149/109 (A)	
	電 圧: 200 V	周波数: 50 Hz	
諸定数	R_s'' : 37.6/29.4 (mΩ)	L_m : 7.26/7.05 (mH)	
	R_r : 15.8/20.0 (mΩ)	$L_s = L_r$: 0.19/0.26 (mH)	
	J_m : 6.30 kg·m ²	D_m : $4.41 \times 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$

図1 加速時における過渡電流の実測値と計算値との比較

Fig. 1. Comparison of measured and calculated transient currents during acceleration.

図 2 加速時における過渡トルクの実測値と計算値との比較

Fig. 2. Comparison of measured and calculated transient torques during acceleration.

図 3 減速時における過渡電流の実測値と計算値との比較

Fig. 3. Comparison of measured and calculated transient currents during deceleration.

図 4 減速時における過渡トルクの実測値と計算値との比較

Fig. 4. Comparison of measured and calculated transient torques during deceleration.

4. 慣性モーメントが過渡特性に及ぼす影響と過渡トルクの最大値

本章では、負荷の慣性モーメントを J_m の 0.5~10 倍にし、電源投入条件と D は第 3 章で述べたものを用いて極数を切り換えたときの供試機 1 についての過渡特性を瞬時値対称座標法によって求める。ただし、電源開放状態での特性は、負荷の慣性モーメントを J_m の 0.5~10 倍にしてもほとんど一致するので図示することは省略し、電源投入時からの特性を図示する。

次に、このようにして求めた過渡トルクの最大値を過渡最大トルクの計算法で求めた値と比較する。

〈4.1〉 加速した場合 図 5 と図 6 は、負荷の慣

性モーメントを変えて加速した場合の過渡電流と過渡トルク特性である。図 5 において過渡電流は電源投入後 8.2 ms で最大となり、その値は慣性モーメントによらず 29.2 A と一定値を示す。この値は 4 極における定格電流の約 6 倍である。

また、過渡トルクは図 6 に示すように電源投入後 26 ms 近辺で最大となり、その値は慣性モーメントが変わってもほぼ 20 N·m の値を示す。この値は 4 極における定格トルクの約 5 倍である。従って、加速時における過渡電流および過渡トルクの最大値は、慣性モーメントによってほとんど影響を受けないことがわかる。

〈4.2〉 減速した場合 図 7 と図 8 に負荷の慣性モーメントを変えて減速した場合の過渡電流と過渡トルク特性を示す。図 7 において過渡電流の最大値は慣性モーメントが大きくなるに従って増加し、10 J_m で 40.3 A にもなり、この値は 6 極における定格電流の約 6 倍である。また、図 8 から過渡トルクは s_{1m} に対応する回転速度 1,275 rpm の近辺で最大の値を示す。過渡トルクの最大値は慣性モーメントの増加に伴い増加し、ほぼ一定値 -75.5 N·m に至る。この値は 6 極における定格トルクの約 10 倍である。

表 3 は減速時における過渡最大トルクの計算法と瞬時値対称座標法で求めた結果を比較したものである。同表から両方法で求めた結果は良く一致し、この計算法が妥当であることが確認できる。

以上の結果から減速時には、加速時よりも過大な過渡電流および過渡トルクが発生することが明らかになった。

5. 挿入抵抗あるいは挿入リアクトルの過渡特性改善効果

減速時の過渡特性を改善するために、PCIM の固定子の各相に抵抗 R_s' あるいはリアクトル X_s' をいったん挿入した状態で電源を投入して極数を切り換え、その後 R_s' あるいは X_s' を全速度近辺で短絡す

図 5 加速時の過渡電流特性に及ぼす慣性モーメントの影響

Fig. 5. Effects of inertia moment on transient current characteristics during acceleration.

図 6 加速時の過渡トルクおよび回転速度特性に及ぼす慣性モーメントの影響

Fig. 6. Effects of inertia moment on transient torque and speed characteristics during acceleration.

図 7 減速時の過渡電流特性に及ぼす慣性モーメントの影響

Fig. 7. Effects of inertia moment on transient current characteristics during deceleration.

図 8 減速時の過渡トルクおよび回転速度特性に及ぼす慣性モーメントの影響

Fig. 8. Effects of inertia moment on transient torque and speed characteristics during deceleration.

る。本章では、このときの過渡特性を瞬時値対称座標法によって求め、その改善の効果を明らかにする。

まず、負荷の慣性モーメントを $2J_m$ とし、電源投入条件と D は第 3 章で述べたものと同一として、供試機 1 について過渡特性を求めた結果を図 9～図 12 に示す。

図 9 と図 10 は抵抗 R_s' を挿入して極数を切り換え

表 3 減速時における過渡トルクの最大値の比較

Table 3. Comparison of maximum values of transient torques during deceleration.

負荷の慣性 モーメント	過渡トルクの最大値 (N·m)	
	過渡最大トルクの計算法	瞬時値対称座標法
$0.5 J_m$	-65.2	-64.7
$2 J_m$	-74.6	-73.8
$5 J_m$	-75.5	-75.5
$10 J_m$	-75.4	-75.4

た場合の過渡電流と過渡トルク特性である。図 9 において R_s' が増加すると過渡電流が最大となるまでの時間は増加し、過渡電流の最大値は減少して行くことがわかる。 R_s' を短絡した場合の過渡電流は、 R_s' が大きいと大きな値になることがわかる。

図 10 において過渡トルクの最大値は、 R_s' の増加に伴いいったん -83 N·m まで増加し、更に R_s' が増加すると減少して行くことがわかる。また、過渡トルクは、 R_s' の増加に伴い最大となるまでの時間が増加し、最大値付近では急いっんな変化を示すことがわかる。 R_s' を短絡した場合の過渡トルクは、電流の場合と同様に R_s' が大きいと大きな値になることがわかる。

図 11 と図 12 はリアクトル X_s' を挿入して極数を切り換えた場合の過渡電流と過渡トルク特性である。図 11 において X_s' の増加に伴い過渡電流の最大値は減少して行くが、 X_s' を短絡した場合には X_s' が大きいと過渡電流も大きくなることがわかる。

図 12 において X_s' の増加に伴い過渡トルクの最大値は減少して行き、抵抗を挿入した場合よりも過渡トルクの変化は滑らかであることがわかる。また、 X_s' を短絡した場合には、 X_s' が大きいと過渡トルクも大きくなるがわかる。

図 13 は過渡特性改善効果を抵抗とリアクトルと比較したものであり、過渡電流の最大値は絶対値で表し

図 9 挿入抵抗の過渡電流低減効果

Fig. 9. Effects of reduction of transient current due to inserted resistors.

図 10 挿入抵抗の過渡トルク低減効果

Fig. 10. Effects of reduction of transient torque due to inserted resistors.

図 11 挿入リアクトルの過渡電流低減効果

Fig. 11. Effects of reduction of transient current due to inserted reactors.

図 12 挿入リアクトルの過渡トルク低減効果

Fig. 12. Effects of reduction of transient torque due to inserted reactors.

ている。過渡電流を低減する効果は、抵抗とリアクトルでほとんど差異がないことがわかる。

過渡トルクの低減効果については、抵抗の場合 R_s' の値が小さい範囲では R_s' の増加に伴って過渡トルクの最大値は増加し、その値は抵抗を挿入しない場合よりも大きな値になることがわかる。一方、リアクトルの場合には、リアクトルが増加すると過渡トルクの最大値が減少することがわかる。

また、短絡時の過渡電流および過渡トルクは抵抗あるいはリアクトルが増加するに伴って増加し、電源投

入時よりも大きくなる場合があることがわかる。

次に、30 kW の供試機 2 についても同様な計算を行った。ただし、回転系の制動係数 D は $D = D_m$ とした。図 14 に供試機 2 についての計算結果を示す。同図から、過渡電流の低減効果に対しては抵抗とリアクトルでほとんど差異がないこと、また抵抗が増加すると過渡トルクの最大値は増加し、その後、減少すること、更にリアクトルが増加するに伴って過渡トルクの最大値は減少することがわかる。従って、二種類の供試機について同様な特徴がみられる。

図 13 低減効果の比較

Fig. 13. Comparison of effects of reduction.

図 14 30 kW 電動機における低減効果の比較

Fig. 14. Comparison of effects of reduction for 30 kW induction motor.

以上の結果から、抵抗を挿入した場合には過渡電流は抑制されるが、過渡トルクはかえって増加してしまう場合があることがわかった。一方、リアクトルを挿入した場合には過渡電流および過渡トルクが抑制され、十分に改善の効果が得られることが明らかになった。

6. む す び

本論文では、まず誘導電動機の極数切り換え時に発生する過渡電流および過渡トルク特性を瞬時値対称座標法および近似解法によって求め、これらの結果が実測値と良く一致することを確認した。

また減速した場合は、加速した場合に比べて過大な過渡電流および過渡トルクを発生することを明らかにし、その基本的な過渡特性を示し、過渡トルクの最大値の計算法について考察した。

最後に、減速した場合に生じる過大な過渡電流および過渡トルクを低減するための一手法を提案し、その改善の効果を明らかにした。

終りに、日ごろから御べんたつをいただいている明治大学 高木亀一教授に感謝の意を表します。また、計算機の使用にあたって足利工業大学計算機室の皆様の御協力をいただいたことに感謝いたします。

(昭和 60 年 5 月 21 日受付, 同 61 年 3 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 高橋・辻:「最近の極数切換誘導機」, 電学誌, 100, 1143 (昭 55-12)
- (2) 栗田:「極数変換電動機とその省エネルギー効果」, 電気計算, 48, 59 (昭 55-7)
- (3) 大林:「極数変換電動機と効果的な使い方」, 電気と管理, 21, 69 (昭 55-11)
- (4) J.M. Shulman, et al.: "Two-speed motor starting with high-inertia loads", IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, CA, July 16-21, 1978, A 78 611-6, p. 1~5 (1978)
- (5) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「誘導電動機の極数切換時におけるシミュレーション」, 昭 55 電気四学会北陸支部連大, A-65, p. 96
- (6) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「誘導電動機の極数切換にともなう過渡現象の実験的考察」, 昭 56 電気学会全大, No. 8, 733
- (7) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「極数変換誘導電動機の過渡特性に対する実験的検討」, 電気学会回転機研究, RM-81-25, p. 53 (昭 56-7)
- (8) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「二重巻線形極数変換誘導電動機の過渡特性に対する実験的検討」, 昭 57 電気学会全大 No. 8, 740
- (9) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「極数変換電動機の過渡特性とその改善」, 昭 58 同上, No. 8, 754
- (10) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「二重巻線形極数変換誘導電動機の過渡特性とその改善法」, 電気学会回転機研究, RM-83-84, p. 99 (昭 58-9)
- (11) 渡辺:「電動機保護ヒューズのえらび方」, 電気計算, 48, 27 (昭 55-5)
- (12) The Japanese electrotechnical committee: "JEC-37-1979 INDUCTION MACHINES", The institute of electrical engineers of Japan, p. 28 (1982)
- (13) M.R. Chidambara, et al.: "Transient torques in 3-phase induction motors during switching operations", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-594, 47 (1962)
- (14) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「極数変換誘導電動機の過渡電流特性」, 電気設備工学会誌, 4, 45 (昭 59-2)
- (15) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「二重巻線形極数変換電動機の極数切換え時過渡最大トルクの計算法」, 昭 59 電気学会全大, No. 8, 745
- (16) 野沢・尾林・岩崎・三木・松瀬:「二重巻線形極数変換誘導電動機の過渡特性の改善」, 昭 60 同上, No. 8, 768
- (17) 猪狩: 電気機械理論, p. 138 (昭 52-1) コロナ社
- (18) 三木・松瀬・西山:「運転中における誘導電動機の変周波数電源への再投入による過渡トルク特性」, 電学論 B, 100, 213 (昭 55-4)
- (19) 三木・松瀬・野沢・秋山:「誘導電動機 Y-Δ 始動時における突入電流の三相予備励磁抑制法」, 同上 B, 103, 320 (昭 58-5)
- (20) 竹内: "Matrix Theory of Electrical Machinery", p. 294 (昭 46-3) オーム社
- (21) 竹内:「同期発電機の短絡過渡トルクの解析」, 電学誌, 81, 1993 (昭 36-12)
- (22) 大河内: 誘導電動機, p. 89 (昭 47-6) オーム社