単一巻線形極数切換誘導電動機の 過渡特性とその一改善法

正員 野 沢 純 一 (足利工大)

正員 山 下 喜美雄 (足利工大)

正員 三 木 一 郎 (明 治 大)

正員 松 瀬 貢 規 (明 治 大)

Analysis and an Improvement of Transient Characteristics of Pole-Changing Induction Motor with Single Primary Winding

Jun-ichi Nozawa, Member, Kimio Yamashita, Member (Ashikaga Institute of Technology),
Ichiro Miki, Member, Kouki Matsuse, Member (Meiji University)

Pole-changing is a simple method for changing the speed of a cage induction motor. However, excessive currents and torques appear during deceleration of the motor by pole-changing. These characteristics are unfavorable for shafts and couplings of the motor system. And further, these cause the sudden voltage drop of the supply. From user's viewpoint, it is desirable to control these currents and torques as low as possible.

In order to decelerate the speed by pole-changing, first, the supply is removed from the delta connected high speed terminals. Next, the supply is connected to low speed terminals, and finally, the winding is changed to the parallel γ connection. From the simulation results, the authors discuss the effects of the supply removal period, impressed voltage phase and the period between the supply impression and the changing to the parallel γ on the motor. This discussion gives the conclusion that the transient current and torque can not sufficiently controlled even when the above conditions are appropriately selected.

In order to reduce these transient current and torque sufficiently, this paper proposes a method in which external resistors are inserted in series with the three-phase primary winding. From the simulation results, it is found that the inserted resistance of 1.55 times the locked rotor impedance of the induction motor, can sufficiently reduce the excessive transients.

キーワード：極数切換，誘導電動機，過渡特性，過渡特性改善，単一巻線

1. ま え が き

簡便に回転速度を変えることができるかご形極数切換誘導電動機^{(1)~(3)}は，省エネルギー⁽⁴⁾や連続的な速度制御を必要としない用途，例えば繊維産業の織機の駆動用に現在用いられている。

しかし，この電動機は極数切換時に大きな過渡電流およびトルクを発生するので，電源電圧の降下を生じ

たり，負荷ならびに電動機の軸やそれらを結ぶカップリングなどに悪影響を及ぼす⁽⁵⁾⁽⁶⁾。従って，これらの過渡特性は，電源の容量や回転系の強度などを決定する場合に極めて重要な特性となる。

本論文では，まず極数比1対2の単一巻線形極数切換誘導電動機の極数切換法を説明し，減速時には巻線端子に加える電源電圧を入れ換えることによって，基準相での投入前の電圧と投入電圧との位相差が3通り

あることを示す。

次に、実測結果より減速時は加速時に比べて、大きな過渡電流および負のトルクが発生することを明らかにし、減速時のシミュレーションを行い、その結果が実測結果とよく一致することを確認する。

更に、減速時のシミュレーションによって、電源開放から電源再投入までの時間と、電源再投入時の位相や端子を短絡して巻線をつなぎ替えるまでの時間が過渡特性に与える影響を検討する。また、3通りの位相差の切換法についても比較し、上述の条件を変えただけでは、過渡電流およびトルクの十分な抑制が得られないことを明らかにする。

そこで、これらを抑制し十分な過渡特性の改善を行うための一つの方法として、電動機の一次側三相に抵抗を挿入して極数を切り換える方法を提案し⁽⁷⁾、挿入抵抗の改善効果を検討するとともに、巻線端子の短絡時の回転速度が改善効果に及ぼす影響も検討する。そして、最大の効果が得られると考えられるこの回転速度と挿入抵抗の目安となる値を示す。

2. 極数の切換方法

本章では、供試機についての極数の切換方法を説明し、各極数に対応する端子に発生する電圧についても述べる。図1(a)～(d)は、4極から8極に切り換えるときの固定子巻線の結線の変化を示している。

(a)図は4極運転状態であり、4極端子 $U_2V_2W_2$ には電源が投入されている。従って、1相の巻線 U_2U_1 と U_1V_2 に流れる電流の方向は同じとなり、その他の相の巻線も同様となるので極数は4となる。

(b)図は4極端子から電源を開放した状態であり、このとき4極端子および8極端子 $U_1V_1W_1$ には残留電圧が発生する。

図1 極数切換結線図

Fig. 1. Connection for pole-changing.

(c)図は残留電圧の発生している8極端子に電源を投入した状態である。この状態では結線は△であるので、巻線 U_1U_2 と U_1V_2 を流れる電流の方向が(d)図のように常に逆とはならないが、一周期においてこれらの巻線を流れる電流の方向が逆となる期間が長く、その他の巻線も同様となるので極数が8の動作が主体となる。

(d)図は、4極端子を短絡して巻線をYY結線にした状態であり、巻線中の電流が先に述べたように流れるために極数は8となる。

ここで、切換方法として残留電圧が消滅した時点で4極端子を短絡し、8極の同期速度になった時点で8極端子に電源を投入する方法も考えられる。この方法では過渡電流やトルクがある程度抑制され、電圧変動などを始動時よりは小さくできる⁽⁸⁾。一方、さきに述べた切換方法は再生制動がかかり、短時間で回転速度を落とすことができ、電源に電力を返すことができる⁽⁹⁾利点があるが、大きな過渡電流や過渡トルクが発生する。従って、これらを十分に抑制できればより良い方法となると考えられる。

そこで、過渡電流やトルクを抑制するために(c)の状態では三相抵抗を電源と8極端子間に挿入し、次の(d)の状態では4極端子を短絡すると同時に抵抗を除く方法と、4極端子を短絡の後に回転速度が8極の同期速度になった時点で、抵抗を除く方法を検討する。なお、前者を方法1、後者を方法2と呼ぶことにする。

逆に、8極から4極に切り換える手順は次のようになる。まず、(d)図において4極端子 $U_2V_2W_2$ を短絡している線を取り除くとともに、8極端子 $U_1V_1W_1$ から電源を開放し、(b)図の電源開放状態にする。続いて、(a)図のように4極端子に電源を投入する。このようにして8極から4極への切換えが完了する。

図2は、4極運転と8極運転状態における $U_1V_1W_1$ 端子間の電圧ベクトルである。両状態の電圧を比較す

図2 $U_1V_1W_1$ 端子間電圧の位相の関係

Fig. 2. Phase relations of voltages between terminals U_1 , V_1 and W_1 .

ると、8極の電圧の大きさは4極の2倍となっている。また、4極の U_1V_1 間電圧と8極のその電圧との位相差が0, 120および240 degとなる場合があることを示している。この3通りの位相差は、8極端子あるいは4極端子に加える電源電圧を入れ換えることによって得られる。更に、8極と4極とで相順が逆になっていることがわかる。

3. シミュレーション

次式は二軸理論に基づく誘導電動機の電圧方程式⁽⁹⁾、トルク方程式および回転系の運動方程式である。

$$v_a = \{R_1 + P(l_1 + L_{01})\}i_a + PMi_d \quad \cdots \cdots (1)$$

$$v_\beta = \{R_1 + P(l_1 + L_{01})\}i_\beta + PMi_q \quad \cdots \cdots (2)$$

$$-e_d = PMi_a + \{R_2 + P(l_2 + L_{02})\}i_d \quad \cdots \cdots (3)$$

$$e_q = PMi_\beta + \{R_2 + P(l_2 + L_{02})\}i_q \quad \cdots \cdots (4)$$

$$T = Mp(i_\beta i_d - i_a i_q) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$JP\omega_m/p + D\omega_m/p + T_L = T \quad \cdots \cdots (6)$$

極数切換時の過度特性は、基本的には以上の式を変形して得られる次の状態方程式を、極数切換状態に対応する回路定数や初期値を与え、ルンゲ・クッタ法によって解くことで得られる。なお、その際刻み時間は0.2 msとし、トルクは(5)式から求める。

$$Pi_a = \{(l_2 + L_{02})(v_a - R_1 i_a) + M(e_d + R_2 i_d)\}/\Delta \quad \cdots \cdots (7)$$

$$Pi_\beta = \{(l_2 + L_{02})(v_\beta - R_1 i_\beta) + M(-e_q + R_2 i_q)\}/\Delta \quad \cdots \cdots (8)$$

$$Pi_d = \{-M(v_a - R_1 i_a) - (l_1 + L_{01})(e_d + R_2 i_d)\}/\Delta \quad \cdots \cdots (9)$$

$$Pi_q = \{-M(v_\beta - R_1 i_\beta) + (l_1 + L_{01})(e_q - R_2 i_q)\}/\Delta \quad \cdots \cdots (10)$$

$$P\omega_m = (pT - D\omega_m - pT_L)/J \quad \cdots \cdots (11)$$

ただし、

$$\Delta = (l_1 + L_{01})(l_2 + L_{02}) - M^2 \quad \cdots \cdots (12)$$

$$v_a = \sqrt{3} V_s \cos(\omega t + \theta_0 + \theta) \quad \cdots \cdots (13)$$

$$v_\beta = \sqrt{3} V_s \sin(\omega t + \theta_0 + \theta) \quad \cdots \cdots (14)$$

$$e_d = \omega_m \{Mi_\beta + (l_2 + L_{02})i_q\} \quad \cdots \cdots (15)$$

$$e_q = \omega_m \{Mi_a + (l_2 + L_{02})i_d\} \quad \cdots \cdots (16)$$

$$L_{01} = 3L_1/2, L_{02} = 3L_2/2, M = 3M_{12}/2 \quad \cdots \cdots (17)$$

である。

以上の式で用いた記号は次に示すとおりである。た

だし、本論文ではかご形誘導電動機を対象とするので二次側の定数などはすべて一次側の三相巻線に換算した値とする。

i_a, i_β : 一次(固定子側) α, β 軸電流

i_d, i_q : 二次(回転子側) d, q 軸電流

v_a, v_β : 一次 α, β 軸電圧

V_s : 相電圧の実効値, ω : 電源の角周波数

θ_0 : 初期位相, θ : 投入電圧位相

ω_m : 回転子の電氣的角速度, P : 微分演算子

T : 発生トルク, T_L : 負荷トルク

e_d, e_q : 二次 d, q 軸速度起電力

R_1, R_2 : 一次, 二次の3相中の1相分抵抗

l_1, l_2 : 一次, 二次の3相中の1相分漏れインダクタンス

L_1, L_2 : 一次, 二次の3相中の1相分主自己インダクタンス

M_{12} : 一次, 二次間の3相中の1相当りの最大相互インダクタンス

J : 回転系の慣性モーメント

D : 回転系の制動係数, p : 極対数

ここで、切換時におけるそれぞれの状態で使用する初期条件や定数ならびに式について述べる。最初に4極運転状態では(7)~(11)式と(5)式を用い、定数は4極 Δ 定数を使用する。初期値は適当に与え $\theta=0$ として、定常状態であるので収束するまで計算を行えば、この状態での特性を求めることができる。

次に、電源開放状態では電源から固定子巻線が切り離されるために i_a および i_β が零となり、(3), (4)および(6)式は(18)~(20)式のように変形できる。回転子側の電流 i_d および i_q の初期値は、回転子側が閉回路となるので磁束鎖交数不変の理から決定することができる。また、回転子側が閉回路であるために固定子側が電源から切り離されても、固定子側巻線には残留電圧がしばらくの間、誘導されることになる。この残留電圧は(21)式から求めることができる。なお、定数は4極運転状態で使用したものをを用いる。

$$Pi_d = -\omega_m i_q - R_2 i_d / (l_2 + L_{02}) \quad \cdots \cdots (18)$$

$$Pi_q = \omega_m i_d - R_2 i_q / (l_2 + L_{02}) \quad \cdots \cdots (19)$$

$$P\omega_m = (-D\omega_m - pT_L)/J \quad \cdots \cdots (20)$$

$$e_{ra} = MPi_d, e_{r\beta} = MPi_q \quad \cdots \cdots (21)$$

続いて、8極端子に電源を投入した状態では、過度特性の改善のために一次側に抵抗を挿入する場合があるので、(7)~(10)式は次に示す(22)~(25)式のように書き換えられ、これらの式と(5)および(11)式を用いることになる。なお、(5)式の定数は8極 Δ 定数

を用い、また、次の式中の定数などに添字 k を付けたものは、8 極 Δ 定数を用いたものを表す。

$$P_{ia} = \{ (l_{2k} + L_{02k})(v_a - e_{ira} - R_{11k}i_a) + M_k(e_a + R_{2k}i_a) \} / \Delta_k \dots\dots\dots (22)$$

$$K_{i\beta} = \{ (l_{2k} + L_{02k})(v_\beta - e_{ir\beta} - R_{11k}i_\beta) + M_k(-e_q + R_{2k}i_q) \} / \Delta_k \dots\dots\dots (23)$$

$$P_{id} = \{ -M_k(v_a - e_{ira} - R_{11k}i_a) - (l_{1k} + L_{01k})(e_a + R_{2k}i_a) \} / \Delta_k \dots\dots\dots (24)$$

$$P_{iq} = \{ -M_k(v_\beta - e_{ir\beta} - R_{11k}i_\beta) + (l_{1k} + L_{01k})(e_q - R_{2k}i_q) \} / \Delta_k \dots\dots\dots (25)$$

ここで、(22)～(25)式中の R_{11k} は R_{1k} と挿入した抵抗を加えたものである。抵抗を挿入しない場合には、 $R_{11k} = R_{1k}$ となる。また、 e_{ira} および $e_{ir\beta}$ は残留電圧を表す。この残留電圧は、次式で求めることができる。なぜなら、図 2 から電源投入前の電圧は投入電圧に対して相順が逆になっており、その大きさは電源電圧の半分になるからである。

$$e_{ira} = e_{ra}/2, \quad e_{ir\beta} = -e_{r\beta}/2 \dots\dots\dots (26)$$

なお、 e_{ra} および $e_{r\beta}$ は電源投入による影響を受けないものと仮定し、開放状態の計算を続けることで求めることができる。

投入電圧位相 θ は、電源投入時の基準相の位相角を与える。また、(22)～(25)式の計算における電流の初期値は固定子側では零、回転子側ではさきの状態の最終値をもとに(26)式の残留電圧の関係と同様に決定し、回転角速度の初期値は電気角で表しているために、電源投入直前の ω_m に極数切換後と前との極数の比をかけた値とする。

最後に、4 極端子を短絡した 8 極運転状態では(7)～(11)式と(5)式を用い、短絡して巻線をつなぎ替えた状態の定数を使用する。また、電源投入状態で計算した最後の電流の値がこの状態の初期電流となる。なお、挿入抵抗を入れて切れ換える方法 2 では、一次の抵抗は最初は電動機の定数に挿入抵抗の値を加えたものとし、8 極同期速度で挿入抵抗を除いた状態では電動機の定数とする。

4. 実験およびシミュレーション結果の比較と検討

本章では過渡電流および過渡トルク特性を明らかにするが、電流およびトルクの最大値とはそれぞれの絶対値をとった値とする。また、シミュレーション結果では、3 相のうちの最も大きな電流を最大値とする。

〈4・1〉 結果の比較 試料機は全閉外扇形でその定格値を表 1 に示す。また、試料機の定数を表 2 に示

表 1 電動機の定格
Table 1. Motor rating.

極 数	4	8
容 量 (kW)	0.75	0.75
周波数 (Hz)	50	50
電 圧 (V)	200	200
電 流 (A)	3.4	6.6
回転速度 (rpm)	1,420	710
トルク (Nm)	5	10

表 2 電動機の定数
Table 2. Motor quantities.

	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	$l_1 + L_{01} = l_2 + L_{02}$ (mH)	M (mH)
4 極 Δ	2.355	1.958	259.9	252.1
8 極 Δ	2.352	3.387	64.63	56.59
8 極 Y-Y	1.764	2.570	58.58	52.26

す。ただし、 L_{02} および M は一次 1 相当なりに換算した値であり、 $l_1 = l_2$ と仮定するので $l_1 + L_{01} = l_2 + L_{02}$ と置く。実測においては、負荷側に直流発電機が電動機と固定軸継手でトルク計を介して連結されている。この状態で、回転系の機械的な定数は制動係数が $D = 3.13 \times 10^{-3} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$ 、慣性モーメントが $J = 9.95 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ である。なお、電動機自体の制動係数は $6.00 \times 10^{-4} \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$ 、慣性モーメントは $3.14 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ である。

ただし、実測では直流発電機を無負荷状態とした。従って、運動方程式(11)および(20)式の負荷トルク T_L は零と置き、シミュレーションを行った。

極数の切換えは電磁接触器で行い、このとき発生する過渡特性の測定は次に述べる方法で行った。すなわち、過渡電流は固定子の各相に 1.67 m Ω の抵抗を挿入し、その両端の電圧を電磁オシログラフで記録し、過渡トルクは磁わい式トルク計で検出し電磁オシログラフで記録した。

図 3 は抵抗を挿入しない場合の減速時の過渡特性を実測した結果である。この図において、電源開放から 8 極端子に電源を投入するまでの時間は約 60 ms で約 3 周期に相当し、電源投入から 4 極端子を短絡するまでの時間は約 140 ms である。次に、電源投入時の基準相の残留電圧の位相はほぼ 120 deg、投入電圧の位相は 240 deg である。従って、位相差 120 deg の場合であることがわかる。なお、電源の線間電圧は 216 V である。

図中の a, b および c 点はそれぞれ順に電源開放、8 極端子に電源を投入、4 極端子を短絡した点を示している。図から電流の最大値は約 41 A となり、この

図 3 減速時の実測結果

Fig. 3. Measured results during deceleration.

図 4 減速時のシミュレーション結果

Fig. 4. Simulated results during deceleration.

値は 8 極の定格電流の約 4 倍となる。また、トルクも最大値 90 Nm となり、8 極の定格トルクの約 9 倍という大きな値となることがわかる。

図 4 は実測と同じ条件の下でシミュレーションを行った結果である。図から電流の最大値は 42 A、トルクは最大値が 85 Nm となっており、実測値とよく一致することがわかる。

図 5 は加速時の過渡特性を実測した結果である。図中の a 点で 4 極端子を短絡している線を取り除くと同時に、8 極端子から電源を開放している。続いて、b 点で 4 極端子に電源を投入している。電源投入時の電流の最大値は 26 A、トルクの最大値は 22 Nm となり、いずれも減速時の値より小さいことがわかる。これは、減速時は発電機領域となるためと、電源を投入する端子に残留電圧があるので、この電圧と投入電圧との位相差によって電流やトルクが大きくなるためと考えられる。

なお、加速時に、10 Nm ほどのトルクがしばらくの間発生するのは、回転系の慣性モーメントが大きく、回転速度が急速に上がらないためである。また、

図 5 加速時の実測結果

Fig. 5. Measured results during acceleration.

図 5 の a~b の期間で 4 極端子に残留電圧が発生しないのは、8 極運転時にはこの端子間は短絡してあり、その端子間の電圧が零となっていたためである。

〈4・2〉投入位相差と過渡特性 減速切換時に投入位相差および電源開放時間が、過渡特性に与える影響を検討するために、これらの条件を変えてシミュレーションを行った。ただし、電源開放から投入までの時間は、実測の場合はおおよそ 3 周期であるが、ここでは、その周期から前後に 1 周期ずつずらして 1~14 周期まで変え、この最初の値を $n=1$ 、最後の値を $n=14$ とする。なお、ここで述べた以外の条件は実測の場合と同じとした。

シミュレーション結果から、位相差と電流およびトルクの最大値との関係を示したものが図 6 および図 7 である。図 6 から、電流の最大値は $85 \sim 130 \text{ deg}$ で最小となり、 n の増加に伴いこの値は減少し、 $n=12$ で最小となり約 4 pu となる。更に、 n が増加するとこの値は増加の傾向を示す。また、図 7 からトルクの最大値は $80 \sim 120 \text{ deg}$ で最小となり、 n の増加に伴いこの値は減少し、 $n=11$ で最小となり約 7 pu となる。更に、 n が増加するとこの値は増加の傾向を示す。

ここで、さきに述べた位相差 0, 120 および 240 deg の 3 通りの切換法を図 6 および図 7 で比較すると、電流およびトルクの最大値が $80 \sim 130 \text{ deg}$ で最小となるので、位相差 120 deg の場合に最も抑制の効果が期待できることがわかる。

更に、この結果に検討を加えるために、図 2 をもとに α - β 軸電圧 v_α, v_β と $e_{ir\alpha}, e_{ir\beta}$ の関係をベクトルで表示し、 v_α を基準に描いたものが図 8 である。ただし、 $e_{ir\alpha}, e_{ir\beta}$ は n の増加に伴い大きさは減衰し位相も変化するが、図ではそれらを無視して描いてある。

図 6 位相差と電流の最大値との関係
Fig. 6. Relationship between phase differences and maximum values of currents.

図 7 位相差とトルクの最大値との関係
Fig. 7. Relationship between phase differences and maximum values of torques.

図 8 α - β 軸における電源電圧と残留電圧の関係
Fig. 8. Relationship between source voltage and residual voltage in the α - β reference frame.

電源投入時の(22)～(25)式には v_α, v_β から $e_{i\alpha}, e_{i\beta}$ をそれぞれ引いた項があり、その引いたものの α, β 軸成分を表示したものが図中の $e_{ai}, e_{\beta i}$ である。

三つの位相角における $e_{ai}, e_{\beta i}$ を比較すると、位相差 120 deg の場合が小さいので、抑制の効果が大きくなると考えられる。また、 n が大きくなると図 8 において $e_{i\alpha}, e_{i\beta}$ は小さくなり、 $e_{ai}, e_{\beta i}$ が v_α, v_β に近づくために、図 6 および図 7 において、位相差による最大値の差が小さくなっていくことが理解できる。更

図 9 t_s と電流の最大値との関係
Fig. 9. Relationship between t_s and maximum values of currents.

図 10 t_s とトルクの最大値との関係
Fig. 10. Relationship between t_s and maximum values of torques.

に、位相差 120 deg 近辺の最大値が n の増加に従って減少し、その後、増加に転じるのは n の増加に従い $e_{ai}, e_{\beta i}$ の非対称性が一時緩和され、更に n が増加すると $e_{ai}, e_{\beta i}$ の位相角の変化が大きくなるために、再び非対称性が増すためと考えられる。

〈4・3〉 電源投入から端子短絡までの時間と過渡特性 8 極端子に電源を投入してから 4 極端子を短絡するまでの時間 t_s 、および電源開放時間が過渡特性に与える影響を検討するために、これらの条件を変えてシミュレーションを行った。なお、電源開放時間は位相差を変えた場合と同様に変化させた。ただし、これ以外の条件は実測の場合と同じとした。

シミュレーション結果から t_s と電流およびトルクの最大値との関係を示したものが図 9 および図 10 である。これらの図から t_s が短いと最大値の増減が見られる。これは、図 4 のようにトルクは電源投入後、電源電圧の周期の半分でしばらく振動しており、そこで端子を短絡すると発電機領域であるために負のトルクを発生し、このトルクが振動していたトルクの変化の方向と一致する場合はトルクは増加し、逆の場合は減少するために、最大値はほぼ電源電圧の半分の周期で増減すると考えられる。また、電流もトルクの増減と同様に変化すると考えられる。

次に、それぞれの n の値に対して、 t_s が長くなる

と電流およびトルクの最大値はそれぞれ一定値となり、これらの値は n が増すにつれて小さくなる。なお、それぞれの一定値は n が大きくなるに従って減少し、電流は $n=14$ で最小となり 4.1 pu、トルクは $n=12$ で 7 pu となる。更に、 n が増加するとこれらの値は増加の傾向を示す。これは、〈4・2〉節で図 8 から説明したのと同様な理由によるものと考えられる。

〈4・4〉 挿入抵抗の過渡特性改善効果 さきのシミュレーション結果から、投入位相や t_s を変えた場合は、電流の最大値は 4 pu、トルクの最大値は 7 pu ほどにしか低減できないことがわかった。

そこでまず、本節では挿入抵抗を用いる第 2 章で述べた方法 1 について、 t_s を実測時の値を用いてこれを固定した条件でその過渡特性を求め、十分な改善効果が得られないことを明らかにする。次に、方法 1 で改善効果を十分に得られる切換条件を明らかにするために、 t_s を固定せず回転速度がある値に落ちてから端子を短絡した場合や、この速度を 8 極の同期速度とした場合の改善効果を明らかにする。最後に、第 2 章で述べた方法 2 について、 t_s を実測時の値を用いてこれを固定した条件での改善効果を明らかにする。なお、シミュレーションにおいて位相差は実測の値とし、挿入抵抗を 1~12 Ω まで変え、前節と同様に n を 1~14 まで変化させた。

方法 1 で t_s を固定した場合の、挿入抵抗と電流の最大値との関係を示したものが図 11 である。同図から、挿入抵抗が 8 極拘束インピーダンス (約 5.9 Ω) の約 0.76 倍のときに電流は最小になり、その値は $n=14$ で約 2.9 pu である。その後、抵抗が増加するとかえって電流は増加してしまい、その値は約 5.7 pu にもなることがわかる。次に、図 12 の挿入抵抗とトルクの最大値との関係から、 $n=14$ で挿入抵抗を拘束インピーダンスの約 0.68 倍としたときトルクは最小になり、その値は約 6.1 pu となる。その後、抵抗が増加するとかえって増加してしまい、その値は約 13 pu にもなることがわかる。

これらの大きな電流やトルクはいずれも、4 極端子を短絡したときに発生する。このときに、過渡現象が十分に収束していない状態にあるので、挿入抵抗での電圧降下が大きく、これを除くと大きな電圧の変化となり、大きな電流やトルクが発生するものと考えられる。また、短絡時の回転速度は 8 極同期速度の 1.1~1.8 倍ほどである。なお、電源投入から同期速度に至る時間は 0.27~0.39 s ほどで、挿入抵抗が 8 極拘束インピーダンスの約 0.76 倍のときにほぼ最短となる。

図 11 方法 1 に対する挿入抵抗と電流の最大値との関係

Fig. 11. Relationship between inserted resistors and maximum values of currents for method 1.

図 12 方法 1 に対する挿入抵抗とトルクの最大値との関係

Fig. 12. Relationship between inserted resistors and maximum values of torques for method 1.

図 13 挿入抵抗 9 Ω 、 $N_{sh}=900$ rpm の過渡特性

Fig. 13. Transient characteristics for inserted resistors of 9 Ω at $N_{sh}=900$ rpm.

そこで、方法 1 で効果的な切換条件を探るために、4 極端子短絡時の回転速度 N_{sh} を変えてシミュレーションを行い、 N_{sh} が過渡特性に与える影響を明らかにした。

一例として、図 13 および図 14 は、 N_{sh} を同期速度の 1.2 倍の 900 rpm および同期速度 750 rpm にした

図 14 挿入抵抗 $9\ \Omega$, $N_{sh}=750\ \text{rpm}$ の過渡特性
Fig. 14. Transient characteristics for inserted resistors of $9\ \Omega$ at $N_{sh}=750\ \text{rpm}$.

図 15 $n=3$ における N_{sh} と電流の最大値との関係
Fig. 15. Relationship between N_{sh} and maximum values of currents in $n=3$.

図 16 $n=3$ における N_{sh} とトルクの最大値との関係
Fig. 16. Relationship between N_{sh} and maximum values of torques in $n=3$.

場合の電流とトルクの過渡特性を示したものである。なお、挿入抵抗を拘束インピーダンスの約 1.5 倍の $9\ \Omega$ とし、 $n=3$ とした。図 13 では最大電流が約 4.6 pu の 42 A、最大トルクが約 12 pu の 122 Nm である。図 14 では、最大電流は約 2.2 pu の 20 A、最大トルクは約 3.7 pu の 37 Nm と大幅に減少していることがわかる。なお、図 13 では最大電流および最大トルクは、端子短絡時に生じるのに対して、図 14 では

図 17 $N_{sh}=750\ \text{rpm}$ における挿入抵抗と電流の最大値との関係
Fig. 17. Relationship between inserted resistance and maximum values of current at $N_{sh}=750\ \text{rpm}$.

図 18 $N_{sh}=750\ \text{rpm}$ における挿入抵抗とトルクの最大値との関係
Fig. 18. Relationship between inserted resistance and maximum values of torque at $N_{sh}=750\ \text{rpm}$.

電源投入期間に生じることがわかる。

次に、 $n=3$ で N_{sh} を変えてシミュレーションを行い、 N_{sh} に対する電流およびトルクの最大値との関係としてまとめたものが図 15 および図 16 である。これらの図から、 N_{sh} の減少に伴って電流およびトルクの最大値が減少し、同期速度近辺で最小となることからわかる。電流の特性は複雑な変化を示すが、これは

図 19 方法 2 に対する挿入抵抗と電流の最大値との関係

Fig. 19. Relationship between inserted resistance and maximum values of current for method 2.

図 20 方法 2 に対する挿入抵抗とトルクの最大値との関係

Fig. 20. Relationship between inserted resistance and maximum values of torque for method 2.

〈4・3〉節に示した電流やトルクの最大値の増減と同様な理由によるものと考えられる。

なお、ここでは図示しないが、他の n の場合についても同様な傾向が得られた。従って、 N_{sh} を同期速度近辺とすれば、電流およびトルクの最大値を大幅に低減することができる。

そこで、十分に過渡特性の改善が期待できる N_{sh} を同期速度とした場合の挿入抵抗と電流およびトルクの最大値との関係を図 17 および図 18 に示す。

図 17 から、挿入抵抗が拘束インピーダンスの約 1.4 倍近辺で電流の最大値は最小となり、その値は約 2.1 pu である。図 18 から、挿入抵抗が拘束インピーダンスの約 1.7 倍近辺でトルクの最大値は最小となり、その値は約 3.3 pu となることがわかる。また、挿入抵抗が大きくなると、電流およびトルクの最大値は n によってほとんど影響を受けないことがわかる。

これは、挿入抵抗が大きくなると電源投入から 8 極の同期速度に至るまでの時間が増加するので、それに伴って残留電圧が減衰して小さくなり、 n による影響が小さくなるためと考えられる。

以上の結果から最大の効果が得られる挿入抵抗は、電流では拘束インピーダンスの約 1.4 倍、トルクでは約 1.7 倍であるので、目安としてはその平均をとって約 1.55 倍ほどの抵抗を挿入すればよいことがわかった。なお、電源投入から同期速度に至る時間は 0.33～0.64 s ほどで、挿入抵抗が拘束インピーダンスの約 1.55 倍のときは約 0.48 s であることがわかった。

最後に、 t_s を固定して方法 2 で切り換えた場合の挿入抵抗と電流およびトルクの最大値との関係を図 19 および図 20 に示す。これらの図から挿入抵抗が拘束インピーダンスの約 1.5 倍近辺で電流およびトルクの最大値は最小になり、その値は電流の場合には約 2.2 pu、トルクの場合には約 4.3 pu となり、かなり低減の効果がみられる。また、電源投入から同期速度に至る時間は 0.2～0.3 s ほどある。

なお、電流およびトルクの最大値は 4 極端子を短絡の後に生じ、更に、それらを低減するためには過渡現象がほぼ収まった 8 極の同期速度近辺で端子を短絡する必要がある。このように切り換えることは、さきに述べた方法 1 で N_{sh} を同期速度とした場合と一致することになる。

従って、方法 1 で N_{sh} を同期速度とした場合に十分な過渡特性改善効果が得られることがわかった。

5. む す び

本論文では、4 極と 8 極をもつ極数切換誘導電動機の極数切換によって発生する過渡特性の検討を行った。その結果から明らかになったことを以下に示す。

実測結果から、減速時に加速時より大きな過渡電流や過渡トルクが発生することがわかった。そこで、減速時の過渡特性を明らかにするために、そのときのシミュレーションを行い、その結果は実測結果とよく一致することを確認した。

また、減速時の極数切換法は、再投入時前後の電圧の位相差によって 3 通りあることを述べ、投入時位相差と過渡特性との関係を検討した結果、120 deg の位相差をもつ切換法が他の方法に比べて、過渡電流や過渡トルクを抑制できることがわかった。

しかし、この抑制効果は十分ではないので、更に一次側に抵抗を挿入して過渡特性を改善する方法を提案し、シミュレーションによってその改善効果を明らかにした。その結果、4 極端子を短絡するときの回転速度が 8 極同期速度近辺の場合に、大きな改善効果が得られることが明らかになった。更に、改善のための挿入抵抗値の最適値は、今回検討の対象とした電動機の場合は 8 極拘束インピーダンスの約 1.55 倍であるこ

とがわかった。巻線抵抗と漏れリアクタンスの比が今回検討の対象とした電動機と異なる場合については、今後検討を行う予定である。

(平成3年11月26日受付, 同4年10月12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:「極数変換誘導機とその省エネルギー効果」, 電気計算, **48**, 59 (昭55-7)
- (3) 大林:「極数変換誘導機と効果的な使い方」, 電気と管理, **21**, 69 (55-11)
- (4) J. M. Shulman, et al.: "Two-speed motor starting with high-inertia load", IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, A78 611-6, 1 (1978)
- (5) 野沢・山下・三木・松瀬:「単一卷線形極数変換誘導電動機の過渡特性の解析」, 昭63電気学会全大, 614
- (6) 野沢・山下・三木・松瀬:「単一卷線形極数変換誘導電動機の過渡特性」, 電気学会研資, RM-88-31 (昭63)
- (7) 野沢・山下・三木・松瀬:「単一卷線形極数変換誘導電動機の過渡特性の一改善法」, 同上, RM-90-19 (平2)
- (8) 池田・東・栗田:「PAM方式極数変換電動機と省エネルギーへの応用」, 三菱電機技報, **53**-8, 576 (昭54)
- (9) 宮入:「電気・機械エネルギー変換工学」, p. 203 (昭51) 丸善

野 沢 純 一 (正員)

昭和48年足利工業大学電気工学科卒業。同年同大学実験助手。52年明治大学大学院工学研究科修士課程修了。同年足利工業大学電気工学科助手, 講師を経て, 平成5年同助教授。計測自動制御学会会員。

山 下 喜 美 雄 (正員)

昭和25年東京工業大学電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。同社神戸製作所水車発電機設計課長および製造部長, 本社機電事業本部技師長を経て, 61年足利工業大学電気工学科教授。工学博士。IEEE会員。

三 木 一 郎 (正員)

昭和48年明治大学電気工学科卒業。53年同大学大学院博士課程単位修得退学。同年同大学工学部助手, 講師, 助教授を経て, 平成2年同理工学部教授。工学博士。IEEE会員。

松 瀬 貢 規 (正員)

昭和46年明治大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学工学部専任講師, 助教授を経て, 54年同教授, 平成元年同理工学部教授。55年3月~7月アメリカ・アイオワ州立大学客員教授。工学博士。IEEE会員。