

学術論文

電気自動車 (EV) 用六相極数切換誘導電動機の定常運転時の
最適な極数切換条件

Optimum Pole-Change Condition of Six-Phase Pole-Change Induction Motor for Electric Vehicles

廣塚 功^{*1}(正員), 坪井 和男^{*1}, 谷藤 康裕^{*1}, 水野 孝行^{*2}

Isao HIROTSUKA (Mem.), Kazuo TSUBOI, Yasuhiro YATO, Takayuki MIZUNO

In addition to the fundamental characteristics of being compact and lightweight, and offering easy maintenance and a strong structure, the motor for electric vehicles (EVs) must realize a wide range of speed for constant-power operation at high speed and must produce high torque at low speed. In an attempt to further improve the constant-power operation of the induction motor (IM), we have proposed a six-phase pole-change IM (six-phase PCIM) and clarified the operating principle and the steady-state and transient characteristics of a new prototype PCIM. In addition, a calculation method is developed for the prototype PCIM.

In the present paper, an efficiency map and the smooth pole-change condition under high-efficiency of six-phase PCIMs are investigated. As a result, the steady-state characteristics of the efficiency for six-phase PCIMs are clearly shown, and it is proposed that the six-phase PCIM driven by a six-phase INV can operate the pole-change smoothly. In addition, these characteristics are clearly shown to be calculated accurately.

Keywords: electric vehicle, induction motor, pole-change induction motor, transient characteristic.

1 まえがき

近年, 環境問題に対する意識の高まりなどから, 電気自動車 (以下, EVと略記) の普及が望まれており, EV駆動用電動機の研究開発が盛んに行われている。EV駆動用電動機には, 小形軽量, 構造堅牢, 保守容易, 制御性に優れること, 低速域での高トルクおよび高速域での広範囲な定出力運転が可能であることが求められている[1]。かご形誘導電動機 (以下, IMと略記) はこれらの条件を満足するとともに, ベクトル制御により低速高トルク運転および広範囲な定出力運転も比較的容易に行うことができ, EV駆動用電動機の主流の一つになるものと期待されている[2]。

そこで, 著者らは, EV駆動用電動機の運転特性の更なる改善のため, 極数比2:1の単一巻線極数切換方式を応用した六相極数切換誘導電動機 (以下, 六相PCIMと略記) を提案し, その基本原理および解析法を提案するとともに, 現行試作機および新試作機を用いて, 定常運転特性および極数切換時の過渡特性および円滑な極数切換条件などについて検討してきた。その結果, 六相PCIMは, 電氣的制御を用いた極数切換を行うことによって, 過渡トルク変動などを抑えた円滑な極数切換が行え, 電動機の体格および電流を増大

させることなく定出力運転範囲の拡大を可能とすることなどを明らかにした[3-8]。

本論文では, 新試作機において, 従来よりも更に円滑な極数切換を行い得る条件を提案している。また, 六相PCIMをEVに搭載する場合を想定して, 新試作機の効率特性を明示するとともに, いずれの極数でも最大効率となる運転条件で円滑な極数切換を行い得ることを明らかにしている。更に, いずれの条件であっても極数切換時の過渡現象を精度よく算定できることも示している。

2 六相 PCIM の原理と解析理論

六相PCIMの原理および解析法については文献[3,4]で明らかにしているが, 本論文の理解を容易にするためにその概要を記す。

2.1 六相PCIMの原理

Fig.1に六相PCIMの定出力運転時におけるトルク特性の概略図を示す。一般に, インバータ (以下, INVと略記) 駆動IMの定出力運転時における最大トルクは, INVの出力電圧を一定とした場合, 速度の2乗に反比例する。一方, 駆動系として要求されるトルクは速度に反比例して変化するため, 例えば, 低速側の極数を $4p'$ 極 (p' : 極対数) に固定した場合, 同図に示すように, 運転限界はIMの最大トルクと駆動系として要求されるトルクとが一致する点となる。そこで,

連絡先: 廣塚 功, 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200, 中部大学工学部電気システム工学科,
e-mail: hiro@solan.chubu.ac.jp

^{*1} 中部大学 ^{*2} 明電舎

高速側の極数 ($2p'$ 極) に切り換えることによって、同図に示すように、定出力運転範囲を拡大することが可能となる。

Fig.2に六相PCIMの極数切換の原理を示す。電気角で π [rad] 隔てた位置にある2つの相巻線に同図(a)のように電流を流すと $2p'$ 極、同図(b)のように流すと $4p'$ 極となる。ただし、両相巻線の電流位相は、同図(a)では π [rad]、同図(b)では同相となっている。この関係を六相 (a~f相) に拡張し、 $2p'$ 極機としての相巻線に位相角が $\pi/3$ [rad] の対称六相交流を流すと $2p'$ 極機として、位相角が $2\pi/3$ [rad] の対称六相交流 (二倍角対称六相交流と仮称) を流すと $4p'$ 極機として動作する六相PCIMが実現できる。この場合、同一の電圧および回転数で運転したとすれば、 $2p'$ 極運転時の最大トルクが $4p'$ 極運転時の最大トルクの約2倍となり、Fig.1に示したように、 $4p'$ 極のみで運転する場合と比較して更に広範囲の定出力運転が可能となる。

2.2 六相PCIMの解析理論

電圧方程式などの導出に当たっては、時間的および空間的基本波成分のみを考慮し、磁気飽和および漂遊負荷損などを無視すると、六相PCIMの巻線配置の1極対分のみを考慮した解析モデルは、Fig.3となる。ただし、固定子鉄損は最終的な電圧方程式中で考慮す

る。ここで、a, b, ..., fおよびg, h, ..., lは固定子および回転子の各相巻線を表し、 θ は固定子a相巻線と回転子g相巻線とのなす基準座標系電気角で表した回転子位置角である。この解析モデルに対して、六相絶対変換回転d-q軸を導入すれば、最終的な電圧方程式は、 $2p'$ 極に対しては(1)式、 $4p'$ 極に対しては(2)式となる。ただし、固定子鉄損は励磁回路の直列抵抗として考慮している[9]。(1)式および(2)式において、 d_s , q_s , d_r および q_r は六相絶対変換回転d-q軸、 v_{ds} および v_{qs} は相軸上の電圧を六相絶対変換回転d-q軸上に変換した電圧、 i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} および i_{qr} は六相絶対変換回転d-q軸上の電流、 R_s は一次巻線抵抗、 L_s は一次巻線自己インダクタンス、 R_m は等価固定子鉄損抵抗、 M_{sr} は一次巻線と二次巻線との相互インダクタンス、 R_r は二次巻線抵抗、 L_r は二次巻線自己インダクタンス、 ω は電源角周波数、 s は滑り、 p は微分オペレータ、添え字“1”および添え字“2”は $2p'$ 極機および $4p'$ 極機としての定数である。

(1)式および(2)式より明らかなように、電圧方程式が $2p'$ 極と $4p'$ 極とで独立して取り扱うことができるので、トルクの式もこれらの方程式から別々に求め加え合わせればよい。従って、 $2p'$ 極としてのトルク τ_{n1} および $4p'$ 極としてのトルク τ_{n2} は(3)式となり、合成トルク τ_n は(4)式となる。また、六相PCIMと負荷との運動方程式は(5)式となる。

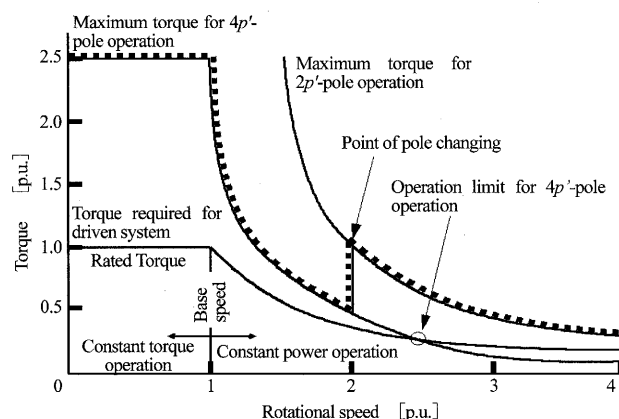


Fig. 1 Torque characteristics of six-phase PCIM at constant power operation.

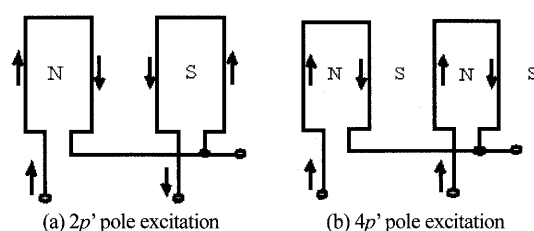


Fig. 2 Principle of six-phase PCIM.

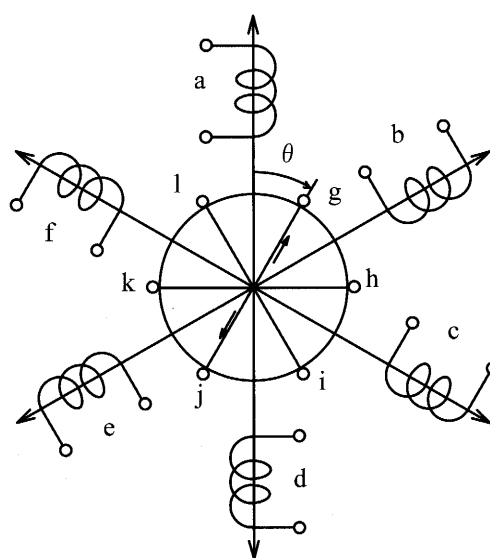


Fig. 3 Analytical model for six-phase PCIM.

$$\left. \begin{aligned} \tau_{n1} &= p' \left\{ M_{sr1} (i_{dr1} i_{qs1} - i_{qr1} i_{ds1}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_{m1}}{\omega_1} (i_{qr1} i_{qs1} + i_{qr1}^2 + i_{dr1} i_{ds1} + i_{dr1}^2) \right\} \\ \tau_{n2} &= 2p' \left\{ M_{sr2} (i_{dr2} i_{qs2} - i_{qr2} i_{ds2}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{R_{m2}}{\omega_2} (i_{qr2} i_{qs2} + i_{qr2}^2 + i_{dr2} i_{ds2} + i_{dr2}^2) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2} \quad (4)$$

$$\tau_n - \tau_L = J d\omega_r / dt \quad (5)$$

ここに、 τ_L ：負荷トルク、 J ：慣性モーメント、 ω_1 および ω_2 ： $2p'$ 極および $4p'$ 極としての電源角周波数、 ω_r ：回転子角速度（機械角）である。

以上に示した六相PCIMの定常および過渡特性シミュレーションの基本式に、ルンゲクッタ法[10]などの数値解析法を適用すれば、六相INV駆動六相PCIMの定常および過渡特性を連続的に算出することができる。なお、六相PCIMの定数は、筆者の一人らが提案した擬似正弦波法[9]を用いて求める。(1)式および(2)式の定数と擬似正弦波法との定数（ r_1 ：一次巻線抵抗、 r_{2q} ：擬似正弦波二次抵抗、 x_{1q} および x_{2q} ：擬似正弦波一次および二次漏れリアクタンス、 r_{iq} ：擬似正弦波等価鉄損抵抗、 x_{mq} ：擬似正弦波励磁リアクタンス）との関係は(6)式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_s &= r_1, R_r = r_{2q}, \omega(L_s - M_{sr}) = x_{1q}, \\ \omega(L_r - M_{sr}) &= x_{2q}, R_m = r_{iq}, \omega M_{sr} = x_{mq} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

なお、計算の簡化のために有効トルク係数 K_τ は1としている。更に、特性算定精度向上のために、六相PCIMの定数を運転周波数、電流および二次周波数の関数として取り扱っている[3]。

3 供試機の仕様および実験方法

Table 1に供試機の仕様を示す。供試機は実験用の小形機であり直接EVに搭載するものではない。極数切換を電圧の位相差を変更して行うので、線間電圧と相電圧との関係が一定とならないため、定格電圧を相電

圧で定めている。供試機に对称六相交流電圧を印加すると4極機、二倍角对称六相交流電圧を印加すると8極機として運転し、両方の電圧を同時に印加した場合、4極/8極同時運転を行うことができる。なお、本論文においては、8極から4極へ切換える場合を8極→4極、4極から8極へ切換える場合を4極→8極と略記する。

Fig.4に実験装置の構成図を示す。試作機に瞬時変動トルク検出器を介し、負荷装置である直流発電機に直結している。また、軸端には、実際のEVの車体重量および加速時間などを勘案して設計したフライホイールが取り付けられている。電源装置には、キャリア周波数3.5kHzの六相インバータ（以下、六相INVと略記）を用いており、六相INVの出力電圧および周波数はパソコンからの制御信号により任意に変更可能である。

4 実験結果

4.1 円滑な極数切換条件

極数切換パターンをTable 2に示す。現行試作機において、8極→4極切換運転ではパターン[I]、4極→8極切換運転ではパターン[II]が最も良好な極数切換条件で

Table 1 Specifications of the test machine.

Number of phases	Six-phase
Number of poles	8-pole / 4-pole
Output	0.75 kW
Frequency	60 Hz
Phase voltage	(100/√3) V
Current	5.0A / 3.4 A
Rotational speed	850 min ⁻¹ / 1750 min ⁻¹

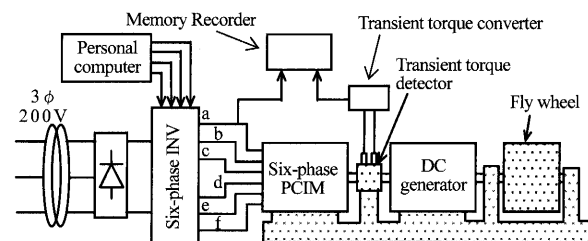


Fig. 4 Arrangement of experimental apparatuses.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} d_{s1} \\ q_{s1} \\ d_{r1} \\ q_{r1} \end{array} \begin{array}{c} v_{ds1} \\ v_{qs1} \\ \\ \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{c} d_{s1} \\ q_{s1} \\ d_{r1} \\ q_{r1} \end{array} \begin{array}{c} R_s + R_{m1} + L_{s1}p \\ \omega_1 L_{s1} - \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ s_1 R_{m1} + M_{sr1}p \\ s_1 \omega_1 M_{s1} - \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \end{array} \begin{array}{c} -\omega_1 L_{s1} + \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ R_s + R_{m1} + L_{s1}p \\ -s_1 \omega_1 M_{sr1} + \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ s_1 R_{m1} + M_{sr1}p \end{array} \begin{array}{c} d_{r1} \\ q_{r1} \end{array} \begin{array}{c} R_{m1} + M_{sr1}p \\ \omega_1 M_{sr1} - \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ R_{r1} + s_1 R_{m1} + L_{r1}p \\ s_1 \omega_1 L_{r1} - \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \end{array} \begin{array}{c} -\omega_1 M_{sr1} + \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ R_{m1} + M_{sr1}p \\ -s_1 \omega_1 L_{r1} + \frac{R_{m1}}{\omega_1}p \\ R_{r1} + s_1 R_{m1} + L_{r1}p \end{array} \begin{array}{c} d_{s1} \\ q_{s1} \\ d_{r1} \\ q_{r1} \end{array} \begin{array}{c} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{array} \quad (1)$$

[(1) 式において、座標軸および定数の添え字“1”を“2”に変更した式] (2)

あった[7]。パターン[III]は、新試作機においてパターン[II]および[III]より更に円滑に極数切換を行うため、今回新たに提案した極数切換条件である。本論文では、六相INVの出力電圧および電源に制限がある場合を想定して、極数切換期間中の過渡電圧および過渡電流が8極側の最大値を超えず、トルクの低下が少ない極数切換条件が良好な切換条件とし、(7)～(9)式を用いて評価した。

$$V_{inc} = \frac{|\text{過渡相電圧}|の最大値 - |\text{8極側相電圧}|の最大値}{|\text{8極側相電圧}|の最大値} \times 100 [\%] \quad (7)$$

$$I_{inc} = \frac{|\text{過渡電流}|の最大値 - |\text{8極側電流}|の最大値}{|\text{8極側電流}|の最大値} \times 100 [\%] \quad (8)$$

$$\tau_{dec} = \frac{\text{トルク基準値} - \text{過渡トルク値}}{\text{トルク基準値}} \times 100 [\%] \quad (9)$$

供試機への印加電圧を前論文[7]と同様に、8極側90Hz、4極側45Hz、磁気飽和の影響を避けるため、各々の周波数に対する定格電圧の80%とした。このときの新試作機の定数はTable 3となる。

Fig.5に各パターンにおける極数切換時の過渡特性を示す。同図において、Control signalはインバータへの電圧指令値を示しており、六相PCIMの各極への印

Table 2 Conditions of pole-change operation.

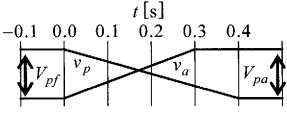
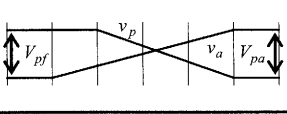
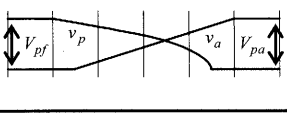
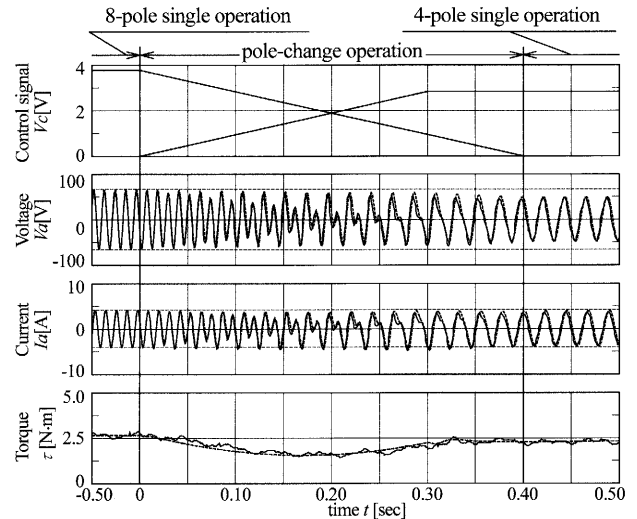
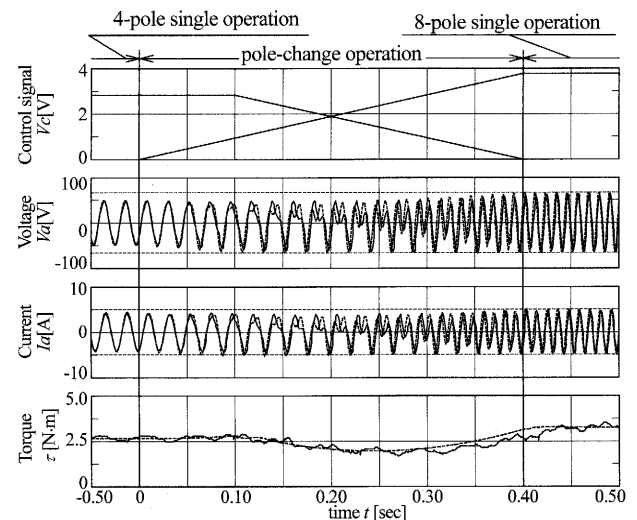
No.	Pole-change pattern	Voltage equation
[I]		$v_f = V_{pf}(1 - t/0.4)$ $0 \leq t \leq 0.4$ [s] $v_a = V_{pa}(t/0.3)$ $0 \leq t \leq 0.3$ [s]
[II]		$v_f = V_{pf}\{1 - (t - 0.1)/0.3\}$ $0.1 \leq t \leq 0.4$ [s] $v_a = V_{pa}(t/0.4)$ $0 \leq t \leq 0.4$ [s]
[III]		$v_f = V_{pf}\sqrt{1 - t/0.35}$ $0 \leq t \leq 0.35$ [s] $v_a = V_{pa}\{(t - 0.05)/0.35\}$ $0.05 \leq t \leq 0.4$ [s]

Table 3 Constants for simulation (1).

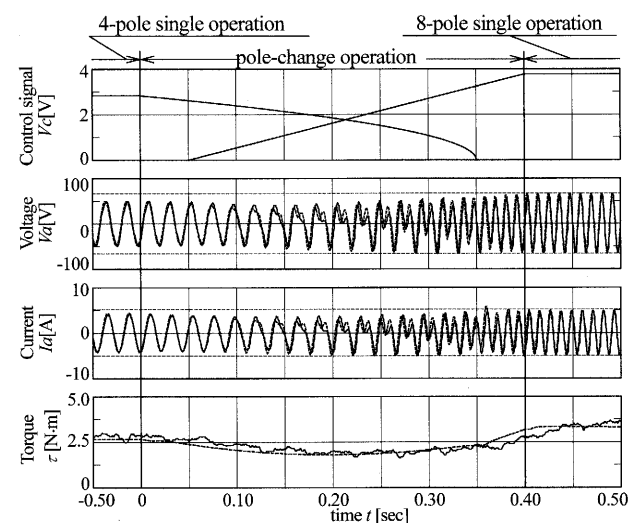
	8-pole operation (90Hz)	4-pole operation (45Hz)
r_1 [Ω]	1.267	(at 44°C)
$x_{1q} = x_{2q}$ [Ω]	3.28	1.26
x_{mq} [Ω]	22.07	20.96
r_{2q} [Ω]	1.241 (at 44°C)	1.058 (at 44°C)
r_{iq} [Ω]	2.10	2.69



(a) Pole-change pattern [I]



(b) Pole-change pattern [II]



(c) Pole-change pattern [III]

Solid line : measured data, dotted line : simulated result

Fig. 5 Comparison with pole-change pattern.

加電圧の実効値に相当する。また、極数切換期間中の過渡現象を解り易くするために、同図中の相電圧および電流には、8極単独運転時の最大電圧および最大電流を破線で示している。同図より、新試作機においても現行試作機の場合[7]と同様に、極数切換運転時の相電圧、電流およびトルクを良好にシミュレーションできることを明示できた。また、極数切換時の評価結果をまとめたTable 4に示すように、極数切換パターン[III]が最も円滑に極数切換を行うことができる。

4.2 最大効率時における極数切換結果

六相PCIMを実際にEVに搭載する場合、六相PCIMの効率特性および高効率を維持したままでの極数切換時の過渡現象を明らかにしておく必要がある。ここでは、その一例として、定格電圧印加時における効率特性およびいずれの極数でも効率の最も高い状態での極数切換結果を示す。

極数切換時の運転周波数および負荷トルクは、Fig.6の8極および4極定常運転時の効率特性に示すように、いずれの極数でも効率が72%以上となるように、8極側100Hz、4極側50Hzとした。このときの供試機の定数をTable 5に示す。4.1節での実験条件とは運転周波数、負荷状態が異なっているため、定数もTable 3の定数とは異なっている。

Fig.7に、極数切換パターン[III]におけるシミュレーション結果と実測結果とを示す。同図より明らかなよ

Table 4 Assessment of pole-change conditions.

No.		From 4-pole to 8-pole		From 8-pole to 4-pole	
		Measured	Simulated	Measured	Simulated
[1]	V_{inc}	12.7%	14.4%	—	—
	I_{inc}	14.3%	19.5%	12.1%	13.7%
	τ_{inc}	38.2%	35.7%	36.8%	37.1%
[2]	V_{inc}	—	—	11.5%	10.9%
	I_{inc}	6.9%	8.2%	17.5%	19.7%
	τ_{inc}	37.0%	33.9%	40.8%	40.1%
[3]	V_{inc}	—	—	—	—
	I_{inc}	4.4%	5.2%	1.2%	3.8%
	τ_{inc}	43.8%	40.8%	40.4%	40.5%

“—” means that the transient voltage is not over 8-pole steady-state voltage.

うに、8極→4極および4極→8極のいずれの極数切換の場合であっても、相電圧は8極側の最大電圧を超えずに、電流は8極側の最大電流を超えず、極数切換期間中のトルクの低下が抑えられている。また、相電圧、電流およびトルクの特徴は、いずれの場合にも、極めて良好にシミュレーションを行えている。

5 あとがき

以上のように、本論文では、現行試作機より特性が改善された新試作機に対して、新たな極数切換パターンを提案し、従来提案した条件より更に円滑な極数切換を行えることを明らかにした。また、新試作機の

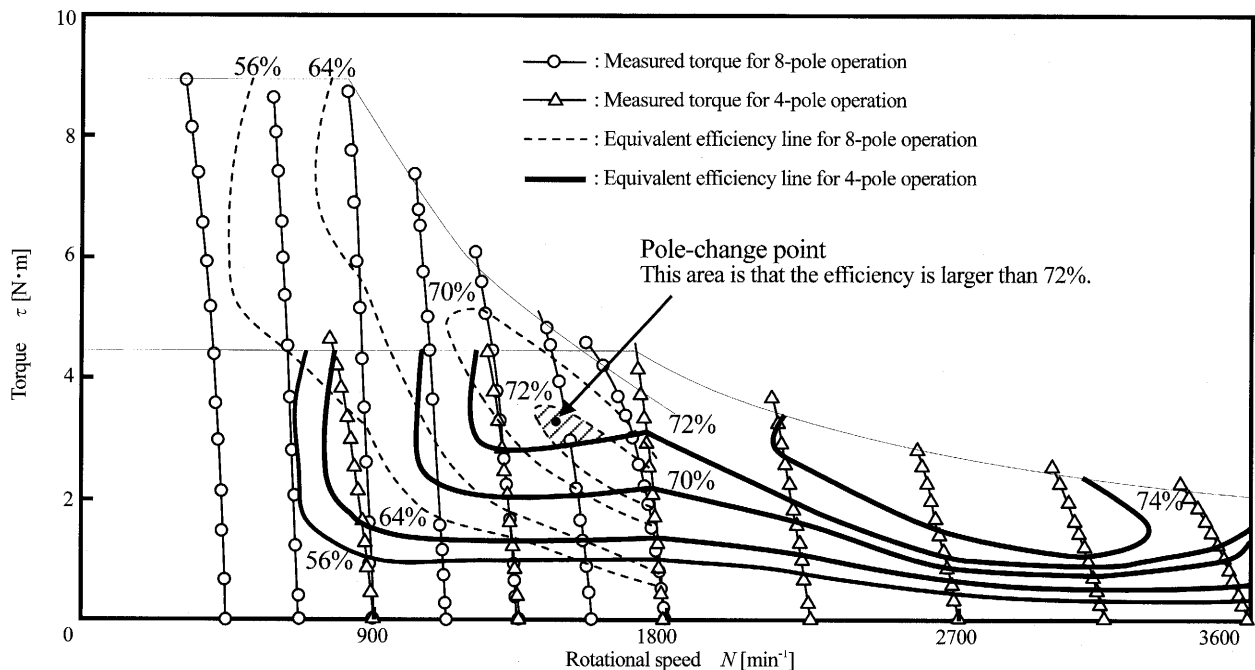


Fig. 6 Steady-state efficiency characteristics.

Table 5. Constants for simulation (2).

	8-pole operation (100Hz)	4-pole operation (50Hz)
r_1 [Ω]	1.267 (at 44°C)	
$x_{1q} = x_{2q}$ [Ω]	3.52	1.32
x_{mq} [Ω]	25.08	23.12
r_{2q} [Ω]	1.130 (at 44°C)	1.234 (at 44°C)
r_{iq} [Ω]	2.20	3.23

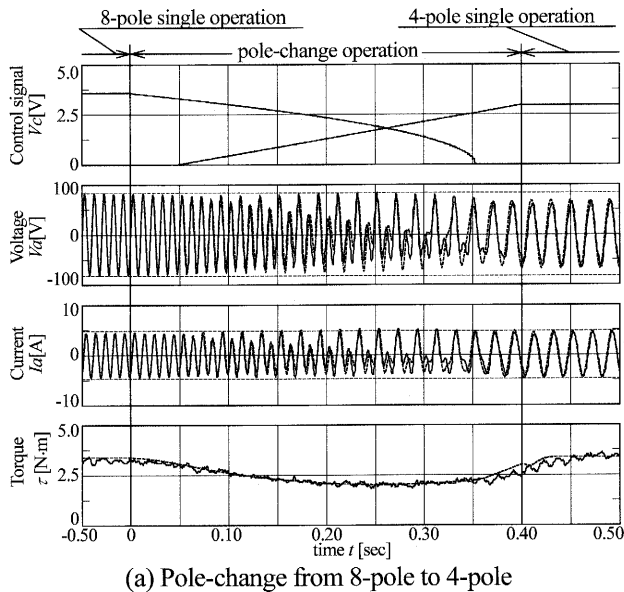
効率特性を明示し、最大効率運転時において、円滑に極数切換を行えることを明らかにした。更に、いずれの極数切換パターンであっても極数切換時の過渡現象を精度よく算定できることも明らかにした。

最後に本論文の基礎となる実験および資料の整理などに協力いただいた中部大学大学院生諸氏並びに同工学部電気工学科卒業研究生諸氏に謝意を表します。

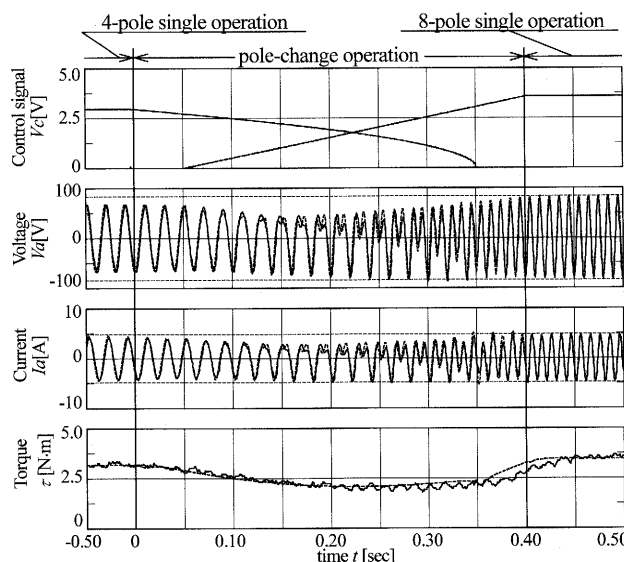
(2005年4月24日受付, 2006年1月10日再受付)

参考文献

- [1] 藤井, 電気自動車用モータの最新動向, '92モータ技術シンポジウム, A2-1-1, 1992.
- [2] 名取, 活発化する電気自動車の技術開発, 電学誌, Vol.111, No.1, pp.29-36, 1991.
- [3] 水野, 坪井, 廣塚, 鈴木, 松田, 小林, 電気自動車用六相極数切換誘導電動機の基本原理と最大トルク特性, 電学論, Vol.116D, No.3, pp.256-264, 1996.
- [4] 水野, 坪井, 廣塚, 鈴木, 足利, 松田, EV 用六相極数切換誘導電動機の過渡特性解析法, 電学論, Vol.116D, No.11, pp.1116-1125, 1996.
- [5] I.Hirotsuka, K.Tsuboi, M.Kuroko, T.Mizuno, T.Ashikaga, A Study to Suppress Transient Torque Dip During Pole Change Operation of A Six-Phase Pole Change Induction Motor for Electric Vehicles, IPEC-Tokyo2000, pp.1627-1632, 2000.
- [6] K.Tsuboi, I.Hirotsuka, M.Kuroko, K.Yamashita, T.Mizuno, T.Ashikaga, Optimal Pole Change Operation Method of A Six-Phase Pole Change Induction Motor for Electric Vehicles, ICEM-2000, pp.714-718, 2000.
- [7] 坪井, 廣塚, 水野, 足利, EV 用六相極数切換誘導電動機の円滑な極数切換方法の考察, 電学論, Vol.120D, No.11, pp.1351-1359, 2000.
- [8] 橋場, 廣塚, 坪井, 水野, 足利, EV 用六相極数切換誘導電動機の新試作機によるトルク特性の改善, 電気学会回転機研資, RM-01-144, 2001.
- [9] 坪井, 山本, 日々野, 擬似正弦波法による正弦波 PWM インバータ駆動誘導電動機の運転特性の算定, 電学論 Vol.107D, No.10, pp.1213-1220, 1987.



(a) Pole-change from 8-pole to 4-pole



(a) Pole-change from 4-pole to 8-pole

Solid line : measured data, dotted line : simulated result

Fig. 7 The measured results and simulated results of pole-change operation at high efficiency.