

逆相成分電流に含まれるスロット高調波を利用した誘導電動機速度センサレスベクトル制御

清武 博文* 篠原 勝次** 加藤 大輔***

Vector Control of Induction Motor without Speed Sensor Utilizing Slot Harmonics
Included in Negative Sequence Carrier Signal Current

Hirofumi KIYOTAKE, Katsuji SHINOHARA and Daisuke KATOH

Speed sensorless vector controlled induction motor drives are the standard choice in many industrial applications, but this can hardly control torque and rotor speed at low speed. Recently, a method based on the high-frequency signal injection has been studied. This paper presents a method for suppressing the effects of the saturation saliency by using high pass filter, and a new approach to estimate the rotor speed. The effectiveness of these methods are demonstrated through experimental results showing good sensorless speed control at low speed.

Keywords: Induction motor, sensorless vector control, high frequency signal injection, slot harmonics

1. まえがき

誘導電動機の世界速度センサレスベクトル制御方式は速度センサを用いた場合に比べコスト・メンテナンス・耐環境性の点で優れており、産業界で実用化されている。一般に、速度センサレスベクトル制御方式では誘導起電力から磁束位置や回転速度を推定しているため、回転速度が低くなると誘導起電力も小さくなり、正確な速度・トルク制御が困難となる問

題点がある。これに対して、インバータの電圧指令値に高周波信号や微小幅の電圧ベクトルを重畳してスロットリップルや磁気飽和など電動機の数学モデルでは扱われない物理現象を利用して磁束位置や回転速度の推定を行う方式が提案されている^{1)-13),16),18)-20)}。この中で、スロットリップルから回転速度を推定する方式は検出原理によって以下の三つのカテゴリーに分類できる¹⁴⁾。(i) 標準のPWMパターンに短時間の大きさが同じで向きは反対の電圧ベクトルを印加し零相電流の微分値や零相電圧から漏れインダクタンスの変化を抽出する零相成分検出法^{4),13),16),19),20)}、(ii) 電動機の中性点と直流リンク部の中間点との間で測定される零相電圧に含まれるスロット高調波から速度を推定する零相電圧検出法^{5),18)}、(iii) 一次電流に含まれる逆相成分電流からス

2006年8月30日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻 (社会人)
(大分工業高等専門学校電気電子工学科)

** 電気電子工学科

*** 博士前期課程電気電子工学専攻

ロット高調波を抽出して速度を推定する逆相成分電流検出法^{1),3),6),8)~12)}の3つである。しかし、上記(i)~(iii)の方法では飽和高調波や他の不要な周波数成分の補償にルックアップテーブルを用いる必要があり、外部メモリを必要とすることで制御回路が複雑になる、使用する電動機ごとに補償データを事前に測定しておく必要がある、などの欠点がある。さらに、速度推定にPLLや \tan^{-1} 関数などを使用しており、DSPプログラムが複雑になる。

本論文は、上記(iii)の逆相成分電流検出法においてハイパスフィルタを用いた飽和高調波の除去法、ならびにスロット高調波をパルス化してカウントすることで速度推定を行う方式を提案したものである^{15),17)}。この方式の特長は簡単な回路構成でスロット高調波の抽出と飽和高調波の除去ができる点にあり、制御回路の簡単化やDSPプログラムを簡略できる。従来のインバータの電圧指令値に高周波信号や微小幅の電圧ベクトルを重畳して得られるスロットリプルから速度を推定する方式と提案する手法との相違点を表1に示す。また、それらの速度推定部分の構成を図1に示す。ルックアップテーブルを使った飽和高調波補償部分が提案法では非常に簡単になることがわかる。

表1 高周波信号重畳方式の分類

	Detection object	Saturation harmonics compensator	Speed estimator
PWM switching excitation based sensorless method	Zero sequence voltage or current	Look Up Table	\tan^{-1} function
Carrier signal excitation based sensorless method	Zero sequence carrier signal voltage	"	Observer
"	Negative sequence carrier signal current (conventional method)	"	\tan^{-1} function
"	"	"	PLL
"	"	"	Machine model
"	(proposed method)	HPF	Pulse count

本論文では、まず逆相成分電流に含まれるスロット高調波による速度センサレスベクトル制御方式の原理とシステム構成について述べる。また、提案する手法での速度推定の課程を説明し、スロット高調

波を検出しやすいスキューなし回転子を使った実験から低速でのセンサレス運転が可能であることを確認したので報告する。

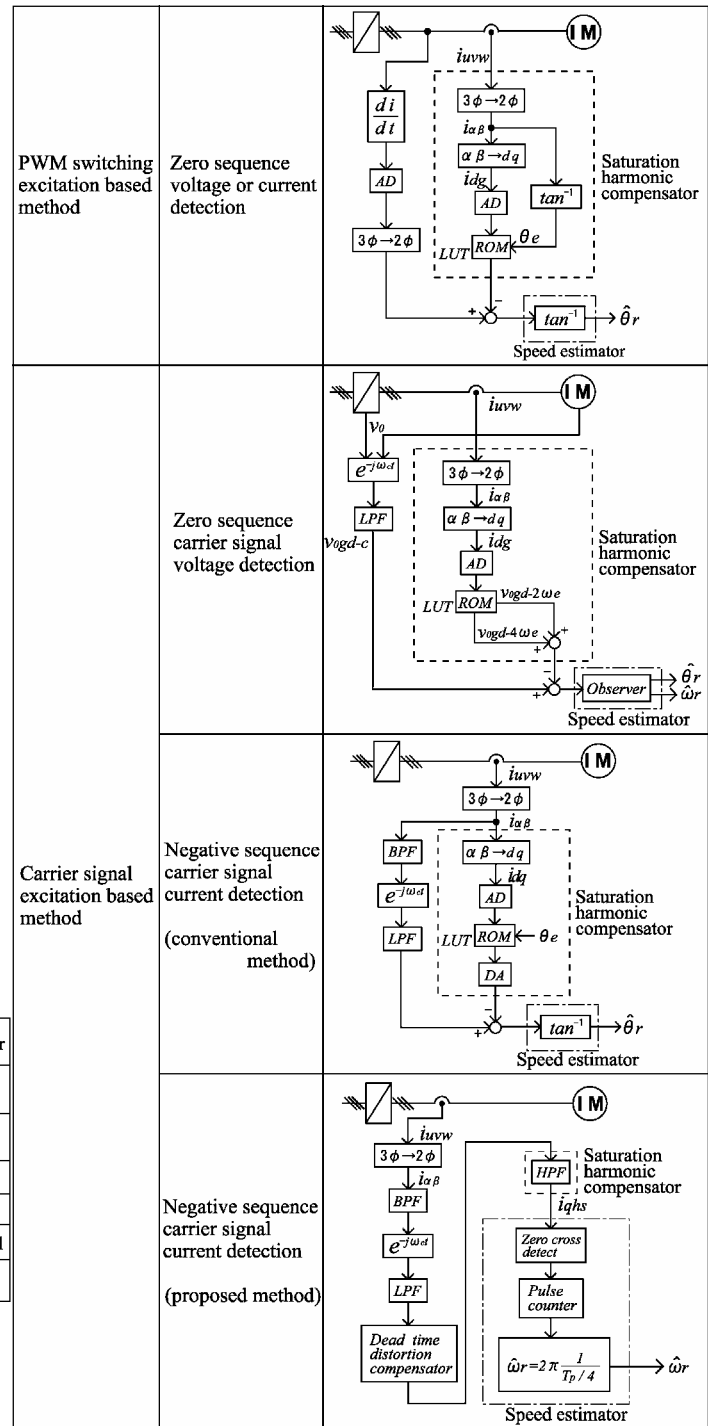


図1 高周波信号重畳方式の分類

2. 本方式の原理およびシステム構成

2.1 本方式の原理

誘導電動機の回転子は、鉄心と二次導体を埋めるスロットから構成されている。この二つは透磁率が異なるため、ギャップ中の磁束は回転子スロットの数だけ脈動する。このとき、(1)式のような高周波信号電圧をインバータ電圧指令値に重畳する。

$$v_{1\alpha\beta c} = V_c \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t) \\ \sin(\omega_c t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)によって作られる磁束は表皮効果により回転子表面付近に集中するが、鉄心とスロットの透磁率の違いから回転子スロットの数だけ脈動するので、結果として固定子電流の高周波成分にこの脈動が含まれる。これを(2)式で示す。

$$i_{1\alpha\beta c} = I_{cp} \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t) \\ \cos(\omega_c t) \end{bmatrix} - I_{cn} \begin{bmatrix} \sin(h\omega_r t - \omega_c t) \\ \cos(h\omega_r t - \omega_c t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$I_{cp} = \frac{V_c}{\omega_c(L_\sigma^2 - \Delta L_\sigma^2)} L_\sigma, \quad I_{cn} = \frac{V_c}{\omega_c(L_\sigma^2 - \Delta L_\sigma^2)} \Delta L_\sigma$$

L_σ : 固定子過渡インダクタンス

ΔL_σ : 固定子過渡インダクタンスの変化分

(2)式の右辺第一項は正相成分であり速度情報を含んでいないが、右辺第二項の逆相成分は速度情報を含んでいるのがわかる。従って、固定子電流に含まれる逆相成分を検出し速度情報を抽出することで速度推定値を得ることができる。

2.2 システム構成

図2に提案するスロット高調波を利用した速度センサレスベクトル制御のシステム構成を示す。

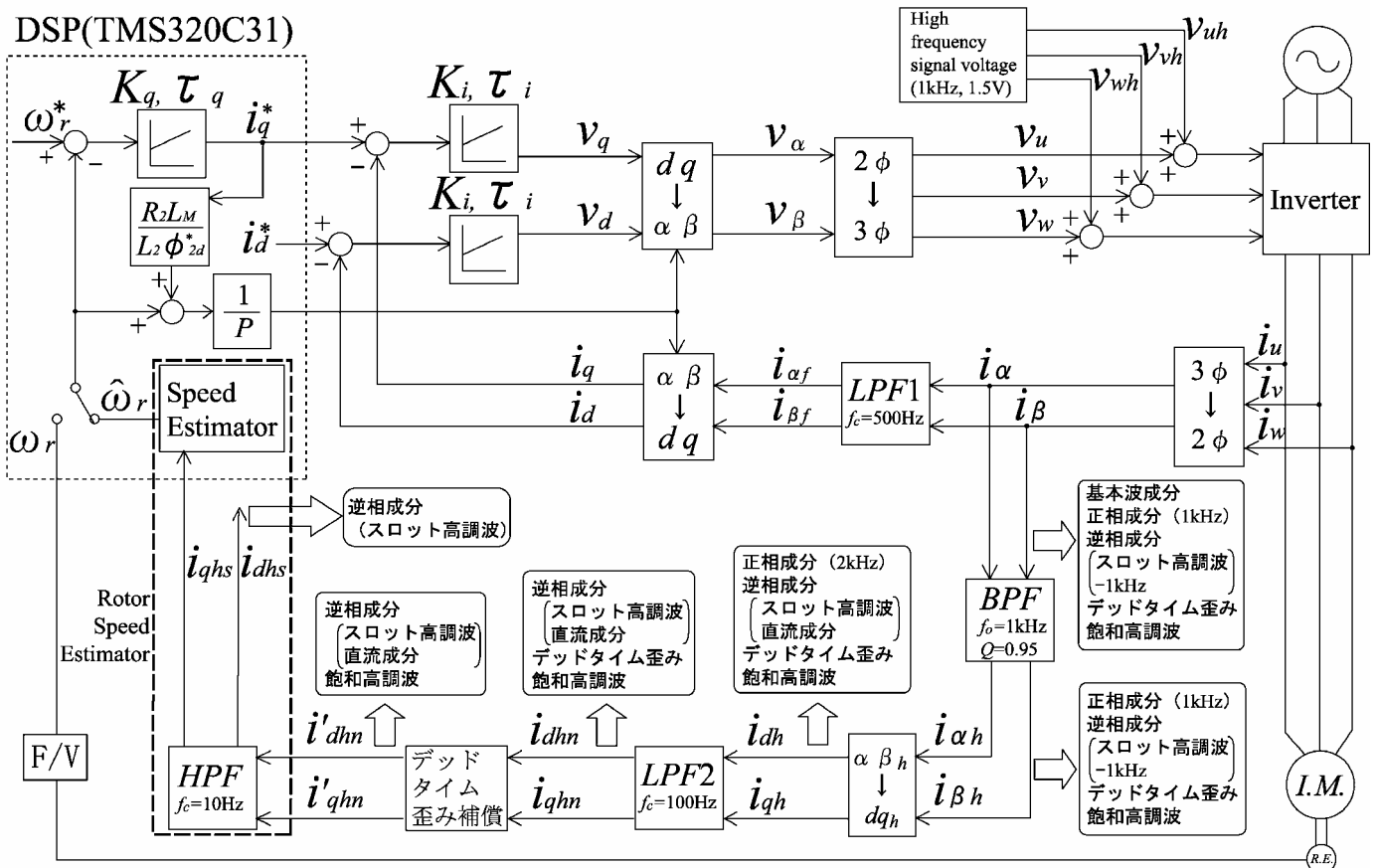


図2 システム構成

指令として速度指令値 ω_r^* および励磁成分電流指令値 i_d^* を与え、DSP 内で速度制御を、アナログ回路で dq 軸上電流制御を行う。得られた V_d, V_q を dq 座標から静止三相に座標変換してインバータの電圧指令値 V_u, V_v, V_w を得る。 V_u, V_v, V_w にそれぞれ 1[kHz], 1.5[V] の高周波信号 V_{uh}, V_{vh}, V_{wh} を重畳し三角波と比較することで PWM 信号を作りインバータを動作させる。一方、検出した一次電流 i_u, i_v, i_w を二相交流に変換した後、基本波を取り出すための LPF1 (カットオフ周波数 500[Hz]) と重畳した高周波信号と同じ周波数成分を取り出すための BPF (中心周波数 1[kHz]) に入力する。BPF で分離した高周波成分 $i_{\alpha h}, i_{\beta h}$ を逆相成分の 1[kHz] (以下-1[kHz] と表示) に同期した座標系に変換することで逆相成分を直流にする。この変換により正相成分は重畳周波数の 2 倍の周波数(2[kHz])となるので、カットオフ周波数 100[Hz] の LPF 2 を用いて正相成分を除去し i_{dhn}, i_{qhn} を得る。その後、デッドタイム歪み補償を行って得られる i'_{dhn}, i'_{qhn} には逆相成分 (スロット高調波と座標変換による直流成分) と飽和高調波が含まれることになる。これらの電流 i'_{dqhn} は誘導電動機の等価回路と固定子過渡インダクタンスより (3)式で表される 1),3),9)。

$$i'_{dqhn} = \sum_m \sum_k I_{cnmk} e^{j(h_{mk}\theta_m + \varphi_{mk})} \quad (3)$$

ここで、 $m=1$ のとき飽和高調波を、 $m=2$ のときスロット高調波を表し、 h_{1k}, h_{2k} はそれらの次数である。

$$h_{1k} = 2, 4, \dots, 2k, \quad \theta_1 = \omega_e t$$

$$h_{2k} = 2n, 4n, \dots, 2nk, \quad \theta_2 = \omega_r t$$

ただし、 $n = N_r/P$ であり、 N_r は回転子スロット数、 P は極数である。

図 3 に提案する回転子速度推定器のブロック図を、図 4 に速度推定の原理を示す。スロット高調波の周波数成分が回転速度に比例した周波数成分であることを利用して、スロット高調波のゼロクロスの数をカウントしその時間から回転子速度を推定

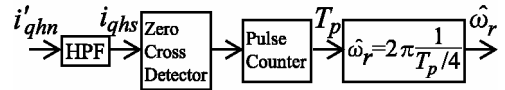


図 3 回転子速度推定器

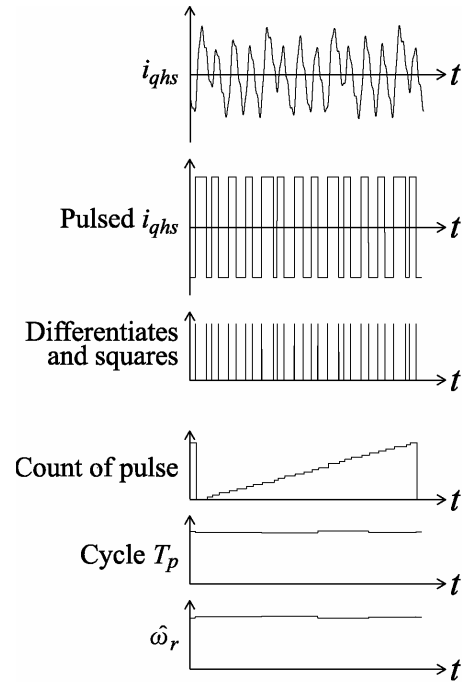


図 4 速度推定の原理

する構成となっている。以下、図 3、図 4 より回転子速度を推定する過程を説明する。まず、 i'_{qhn} をカットオフ周波数 10[Hz] の HPF に通して飽和高調波の分離と逆相成分に含まれる直流成分の除去を同時に行い、スロット高調波 i_{qhs} をゼロクロスさせる。次に i_{qhs} を増幅し上下にリミットをかけてパルス状の信号を作る。この信号を微分しさらに 2 乗することでスロット高調波のゼロクロスで立ち上がる信号を得る。この立ち上がりの数は、電気角の回転周波数 1 周期ごとに 1 極あたりの回転子スロット数の 2 倍であり (本論文では 4 極、回転子スロット数 28, スキューなし回転子なので 1 回転あたり 56 パルス発生する), パルスがその数に達するまでの時間 T_p をカウンタを用いて測定する。これより回転子速度の推定値 $\hat{\omega}_r$ は(4)式で求められる。

$$\hat{\omega}_r = 2\pi \frac{1}{(T_p/4)} \quad (4)$$

本論文では、速度推定の推定時間を早めるため $T_p/4$ で(4)式の計算を行うようにした。例えば、28 スロットの回転子の場合、 $28/4=7$ スロット分で速度推定値が得られることになる。

3. 実験結果

図5に $\omega_r^*=15[\text{rpm}]$ 一定でのセンサレス運転の実験結果を示す。実験の条件として、無負荷で速度制御を行っている。実験機はベクトル制御用の1.5[kW], 1750[rpm]の標準品で回転子のみをスロット高調波を検出しやすいスキューなし回転子に変更したものである。標準品としての回転子変更前（スキュー付き回転子使用）での電動機定数を表2に示す。図より、 i_{qhs} のゼロクロス点で立ち上がったパルスをカウンタで数えて回転速度を推定しているのがわか

表2 回転子変更前の標準誘導電動機定数

Rated power	1.5kW	Stator inductance	0.079H
Rated voltage	180V	Rotor inductance	0.079H
Number of poles	4	Mutual inductance	0.077H
Stator resistance	0.532Ω	Number of stator slots	36
Rotor resistance	0.537Ω	Number of rotor slots	28
		(semi-enclosed)	

る。スロット高調波から作成したパルスを検証するためF/V変換器に入力されるエンコーダからのパルスと比較する。エンコーダからのパルスを8分周して一回転ごとに75パルス得られる信号を図に示す。これらの比較より、スロット高調波から作成した回転子1回転分のパルス56個に対してエンコーダからのパルスは75個となっており、回転数に対して正確なスロット高調波が検出されていることがわかる。図より、低速でのセンサレス運転でもスロット高調波が正確に検出でき、速度推定値と実測値が一致していることがわかる。

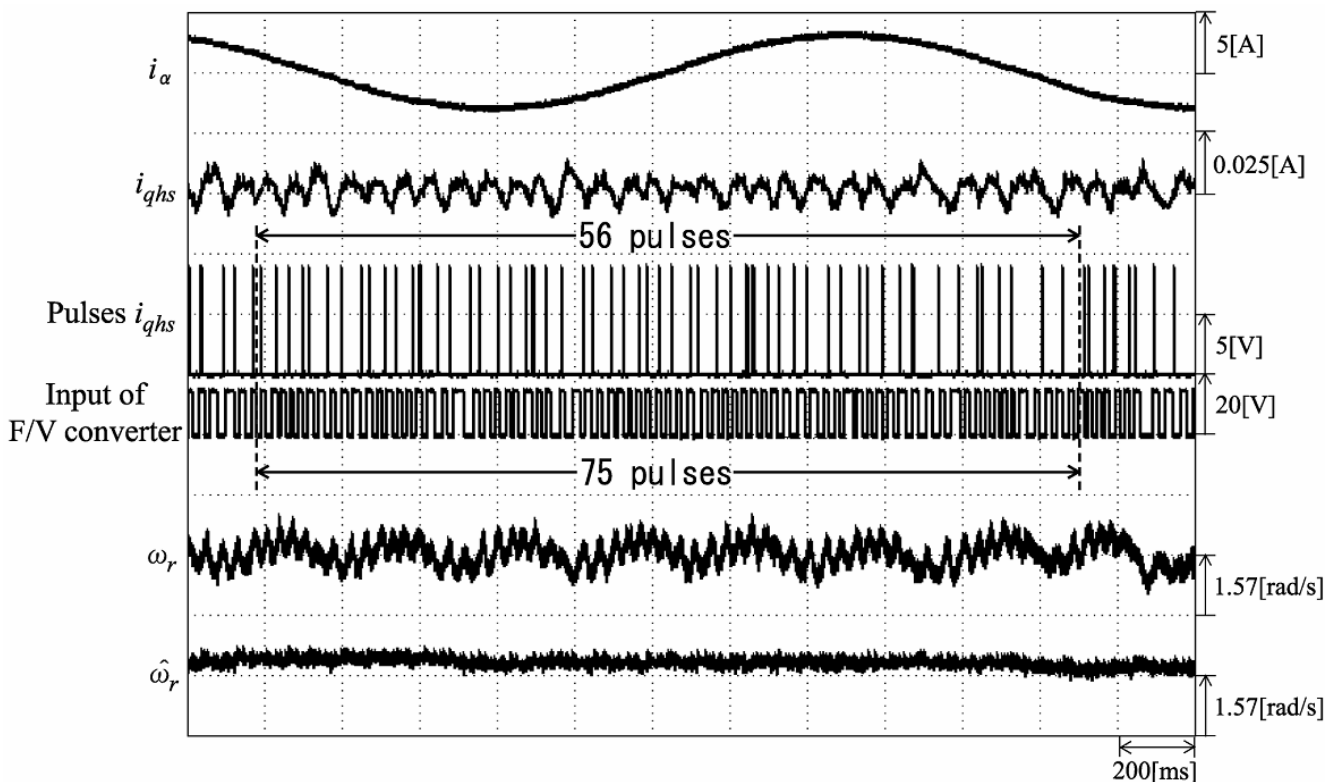


図5 センサレス時の実験結果

4. まとめ

本論文では、誘導電動機速度センサレスベクトル制御におけるスロット高調波を利用した速度検出法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 逆相成分電流に含まれるスロット高調波をパルス化しカウントすることで速度を推定する方式ならびにハイパスフィルタを用いた飽和高調波の除去法を提案した。特に、ルックアップテーブルを使うことなく簡単な回路構成で飽和高調波を除去でき、かつ、PLL や \tan^{-1} 関数を用いずに正確な回転速度を検出できる点に特徴がある。
- (2) 15[rpm]の低速運転で実回転速度と一致した速度推定値が得られ、センサレス運転が実現できた。

参考文献

- 1) P. L. Jansen, R. D. Lorenz : "Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and Salient AC Machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.31, No.2, pp.240-247 (1995)
- 2) P. L. Jansen, R. D. Lorenz : "Transducerless Field Orientation Concepts Employing Saturation-Induced Saliencies in Induction Machine", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.32, No.6, pp.1380-1393 (1996)
- 3) M.W.Degner, R.D.Lorenz : "Using Multiple Saliencies for the Estimation Flux, Position, and Velocity in AC Machines", IEEE Trans. Ind. Applicant, Vol.34, No.5, pp.1097-1104 (1998)
- 4) J.Holtz : "Sensorless Position Control of Induction Motors -An Emerging Technology", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.45, No.6, pp.840-852 (1998)
- 5) A.Consoli, G. Scarcella, A. Testa : "A New Zero-Frequency Flux-Position Detection Approach for Direct-Field-Oriented-Control Drive", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.36, No.3, pp.797-804 (2000)
- 6) N.Teske, G.M.Asher, Mark Sumner, K.J.Bradley : "Suppression of Saturation Saliency Effect for the Sensorless Position Control of Induction Motor Drives Under Loaded Conditions", IEEE Trans. Ind. Electron. Vol.47, No.5, pp.1142-1150 (2000)
- 7) D.W.Chung, J.K.Ha, S.K.Sul, 井手耕三, 室北幾磨, 沢俊裕 : 「誘導電動機の高調波電圧重畳による速度センサレスベクトル制御」, 電学論 D, Vol.121-D, No.11, pp.1257-1264 (2000)
- 8) F.Briz, M.W.Degner, A.Diez, R.D.Lorenz : "Measuring, Modeling, and Decoupling of Saturation-Induced Saliencies in Carrier-Signal Injection- Based Sensorless AC Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.37, No.5, pp.1356-1364 (2001)
- 9) N.Teske, G.M.Asher, M.Sumner, K.J.Bradley : "Encoderless Position Estimation for Symmetric Cage Induction Machines Under Loaded Conditions", IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol.37, No.6, pp.1793-1800 (2001)
- 10) F.Briz, M.W.Degner, A.Diez, R.D.Lorenz : "Static and Dynamic Behavior of Saturation-Induced Saliencies and Their Effect on Carrier-Signal-Based Sensorless AC Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.38, No.3, pp.670-678 (2002)
- 11) N.Teske, G.M.Asher, M.Sumner, K.J.Bradley : "Analysis and Suppression of High-Frequency Inverter Modulation in Sensorless Position-Controlled Induction Machine Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol.39, No.1, pp.10-18 (2003)
- 12) C.Caruaana, G.M.Asher, K.J.Bradley, M.Woolfson : "Flux Position Estimation in Cage Induction Machines Using Synchronous HF Injection and Kalman Filtering", IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol.39, No.5, pp.1372-1378 (2003)
- 13) J.Holtz, H.Pan : "Elimination of Saturation Effects in Sensorless Position-Controlled Induction Motors", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.40, No.2, pp.623-631 (2004)
- 14) F.Briz, M.W.Degner, P.Garcia, R.D.Lorenz : "Comparison of Saliency-Based Sensorless Control Techniques for AC Machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.40, No.4, pp.1107-1115 (2004)
- 15) 清武博文, 篠原勝次, 下麥卓也 : 「スロット高調波を利用した誘導電動機速度センサレスベクトル制御について」, 電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.1-103, pp.491-494 (2004)
- 16) C.Caruaana, G.M.Asher, J.C.Clare : "Sensorless Flux Position Estimation at Low and Zero Frequency by Measuring Zero-Sequence Current in Delta-Connected Cage Induction Machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.41, No.2, pp.609-617 (2005)
- 17) 清武博文, 篠原勝次, 下麥卓也 : 「スロット高調波を利用した速度センサレスベクトル制御の速度制御範囲について」, 電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.1-75 pp.303-306 (2005)
- 18) F.Briz, M.W.Degner, P.G.Garcia, J.M.Guerrero : "Rotor Position Estimation of AC Machines Using the Zero-Sequence Carrier-Signal Voltage", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.41, No.6, pp.1637-1646 (2005)
- 19) J.Holtz, J.Juliet : "Sensorless Acquisition of the Rotor Position Angle of Induction Motors With Arbitrary Stator Windings", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.41, No.6, pp.1675-1682 (2005)
- 20) C.S.Staines, G.M.Asher, M.Sumner : "Rotor-Position Estimation for Induction Machines at Zero and Low Frequency Utilizing Zero-Sequence Currents", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.42, No.1, pp.105-112 (2006)