

誘導電動機速度センサレスベクトル制御のための のスロット高調波検出法とその実験結果

逆瀬川 栄一* 篠原 勝次**

DETECTION METHOD OF SLOT HARMONICS FOR VECTOR CONTROLLED INDUCTION MOTOR WITHOUT SPEED SENSOR AND ITS EXPERIMENTAL RESULTS

Eiichi SAKASEGAWA and Katsuji SHINOHARA

The speed sensorless drive of the induction motor is widely used in industries. But, it is difficult to drive in the very low speed region including zero speed due to the measured voltage errors and machine parameter errors. Recently, various concepts, which utilize the saliency characteristics of induction motor to solve above problem, have been developed. These concepts have several advantages. One is almost not affected by machine parameters and makes stable operation by detecting rotor speed from machine structure. In this study, we describe a principle of speed detection method utilizing rotor slot harmonics for speed sensorless vector controlled induction motor. Furthermore, we investigate about slot harmonics of two motors that have different type of rotor slot.

Keywords: induction motor, vector control, speed sensorless, slot harmonics

1. はじめに

誘導電動機の世界速度センサレス駆動は、速度センサを必要としないことから、センサ付きのそれに比べ、信頼性、コストの点で有利であり、低速で、高精度なトルク制御を要求されない産業面ですでに適用されている。現在は、低速での運転領域の拡大のため、特に零速、零周波数での問題に焦点が集まっている。低速領域での安定な運転が困難な理由は、従来の方法は誘導機の基本方程式に基づいており、これは電氣的パラメータや一次電圧検出誤差に強く

依存するためである¹⁾。この問題を解決する方法として、石田氏らは、回転子スロット高調波を利用した速度検出法を提案している²⁾。また誘導機の突極特性を利用した方法としてM.W.Denger氏らは、専用設計された回転子を利用し、電圧指令の励磁成分に高周波磁束信号を重畳することによって発生する磁気突極特性から、位相同期ループを用いて回転子位置信号を推定しており³⁾、D.W.Chung氏らは、高調波信号を重畳することにより生じるインピーダンス偏差を利用している⁴⁾。またJ.Holtz氏らは、誘導機の固定子漏れインダクタンスが、回転子スロット数に依存することを利用している⁵⁾。これらの方法は、機械的構造から速度を検出することにより、電氣的パラメータに依存しないという特長を有しており、速度に対する一定振幅の速度信号を得ることで、極低速運転を実現している。

本稿では、回転子スロット高調波を利用した速度

2001年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻

** 電気電子工学科

センサレスベクトル制御系を検討するため、まず、回転子スロット高調波を利用した速度検出法の原理について述べる⁶⁾。次に、回転子スロット形状の異なる二つの誘導機にさぐりコイルを巻きそれぞれに現れるスロット高調波を比較しどちらが速度検出に適しているかについて検討を行ったので報告する。

2. さぐりコイルによる速度検出法の原理

さぐりコイルに現れるスロット高調波から誘導電動機の回転速度を検出する原理について述べる。表1に誘導機Aの定数を示す。運転条件は誘導機Aを正弦波駆動、電源周波数60Hz、無負荷で駆動した場合とする。また表2に誘導機Bの定数を示す。両者は回転子スロットの形状が異なり回転子スロットの形状でさぐりコイルに現れるスロット高調波、その振幅等が異なるため2つの誘導機について比較を行った。

誘導電動機の固定子と回転子のギャップの磁束密度 $B(\theta, t)$ は基本波成分が回転子スロット数だけ変調されるものとし次式で表される。

$$B(\theta, t) \cong B_0 \cos(\omega t - \theta) \times \{1 + k_H \cos N_r(\omega_r t - \theta)\} \quad (1)$$

ただし ω は電源角周波数、 ω_r は回転子角周波数、 N_r は1極あたりの回転子スロット数である。また、 B_0 は基本波磁束密度の大きさ、 k_H はスロット高調波の基本波磁束に対する割合である。これより一相分のさぐりコイル電圧は $v_c(t) = K \partial B / \partial t$ より

$$\begin{aligned} v_c(t) = & -KB_0[\omega \sin(\omega t - \theta) \\ & + k_H / 2(N_r \omega_r + \omega) \\ & \sin\{(N_r \omega_r + \omega)t - (N_r + 1)\theta\} \\ & + k_H / 2(N_r \omega_r - \omega) \\ & \sin\{(N_r \omega_r - \omega)t - (N_r - 1)\theta\}] \quad (2) \end{aligned}$$

得られる。ここで図-1に示すように3つのさぐりコイルを配置しこの和をとると、さぐりコイル電圧の基本波成分は打ち消されスロット高調波電圧 v_{oc} が得られる²⁾。

$$\begin{aligned} v_{oc}(t) = & \sum_{i=1}^3 v_{ic}(t) \\ \cong & -(3Kk_H B_0 / 2)(N_r \omega_r \pm \omega) \sin\{ \\ & (N_r \omega_r \pm \omega)t - (N_r \pm 1)\theta_0\} \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、 $N_r = 3N \mp 1$ で複合同順

表-1 誘導機Aの定数

定格出力	$P_0=0.75$ (kW)
定格電圧	$V=200$ (V)
極数	$P=4$ (極)
固定子巻線	7/9 短節巻
固定子スロット	$N_s=36$
回転子スロット	$N_r=44$
回転子スロット形状	開スロット

表-2 誘導機Bの定数

定格出力	$P_0=2.2$ (kW)
定格電圧	$V=200$ (V)
極数	$P=4$ (極)
固定子巻線	同心巻
固定子スロット	$N_s=48$
回転子スロット	$N_r=38$
回転子スロット形状	閉スロット

ただし θ_0 はさぐりコイルの位置で決まり、また、 $i=u, v, w$ である。(3)式よりスロット高調波には二つの成分のうちどちらか一方が現れる。これは(2)式のスロット高調波の二つの成分のうち、一方が3の倍数の場合、3相はすべて周期が同じ波形となるので3相の和をとるとこの成分のみが残ることを意味する。供試機Aの $N_r=22$ の場合、 $N_r=3N+1$ の成分が残るのでスロット高調波は(4)式となる。

$$\omega_{SH} = N_r \omega_r - \omega \quad (4)$$

また(4)式に $N_r = 3N+1$ を代入すると(5)式が得られる。

$$\omega_{SH} = 3N \omega_r - \omega_s \quad (5)$$

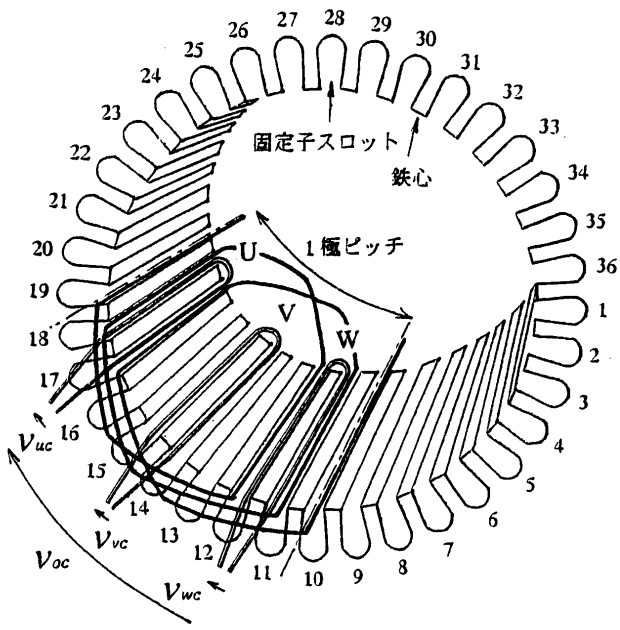
(5)式より任意速度でのスロット高調波は回転速度の3N倍からすべり ω_s を減じたものに相当する。これよりすべり ω_s を(6)式により求めるものとするれば

$$\omega_s = \frac{R_2 M}{L_2 \phi_{2d}^*} \hat{i}_{iq}^* \quad (6)$$

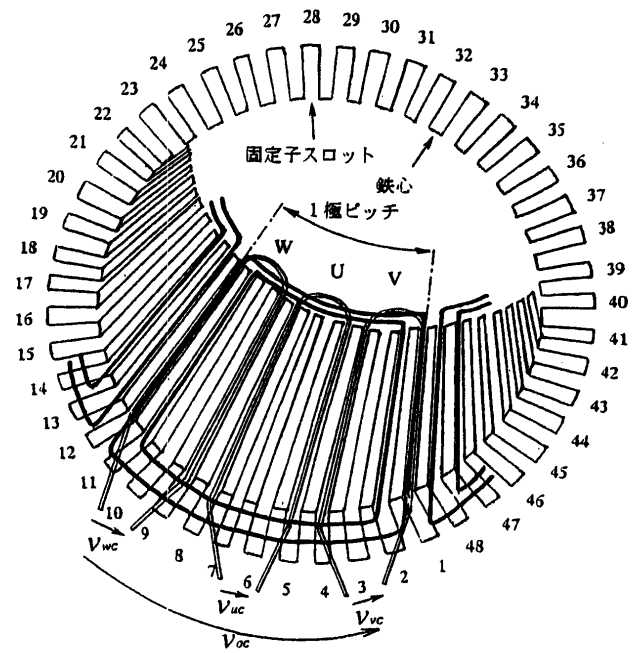
回転子角周波数は(7)式で求められる。

$$\hat{\omega}_r = \frac{1}{3N} (\omega_{SH} + \omega_s) \quad (7)$$

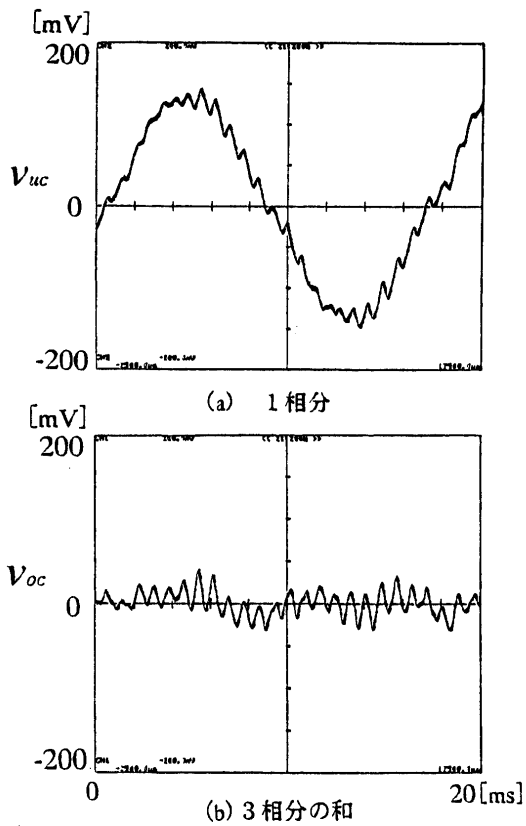
以上が、さぐりコイルによる速度検出法の原理である。



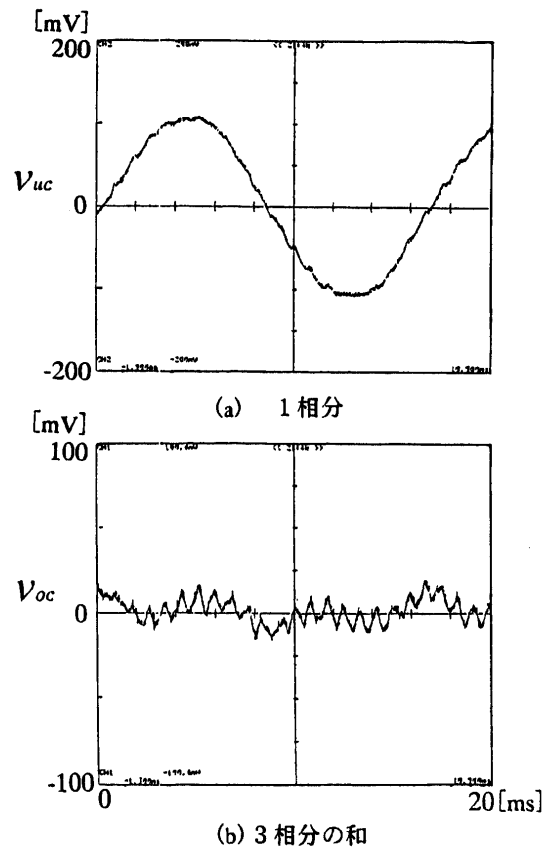
図一 1 さぐりコイルの配置 (誘導機A)



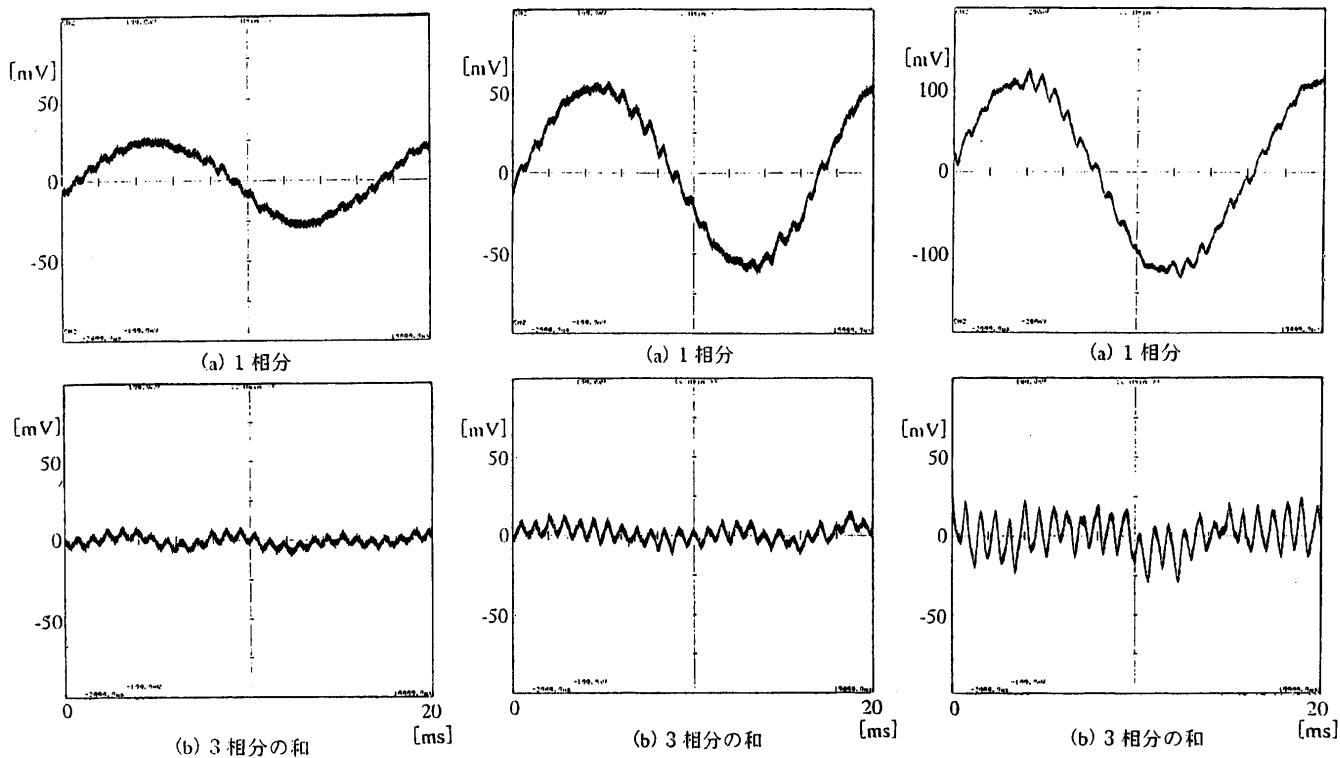
図一 3 さぐりコイルの配置 (誘導機B)



図一 2 さぐりコイル電圧の実測波形 (誘導機A)
線間電圧200V, 電源周波数60Hz, 回転数1797rpm, 無負荷

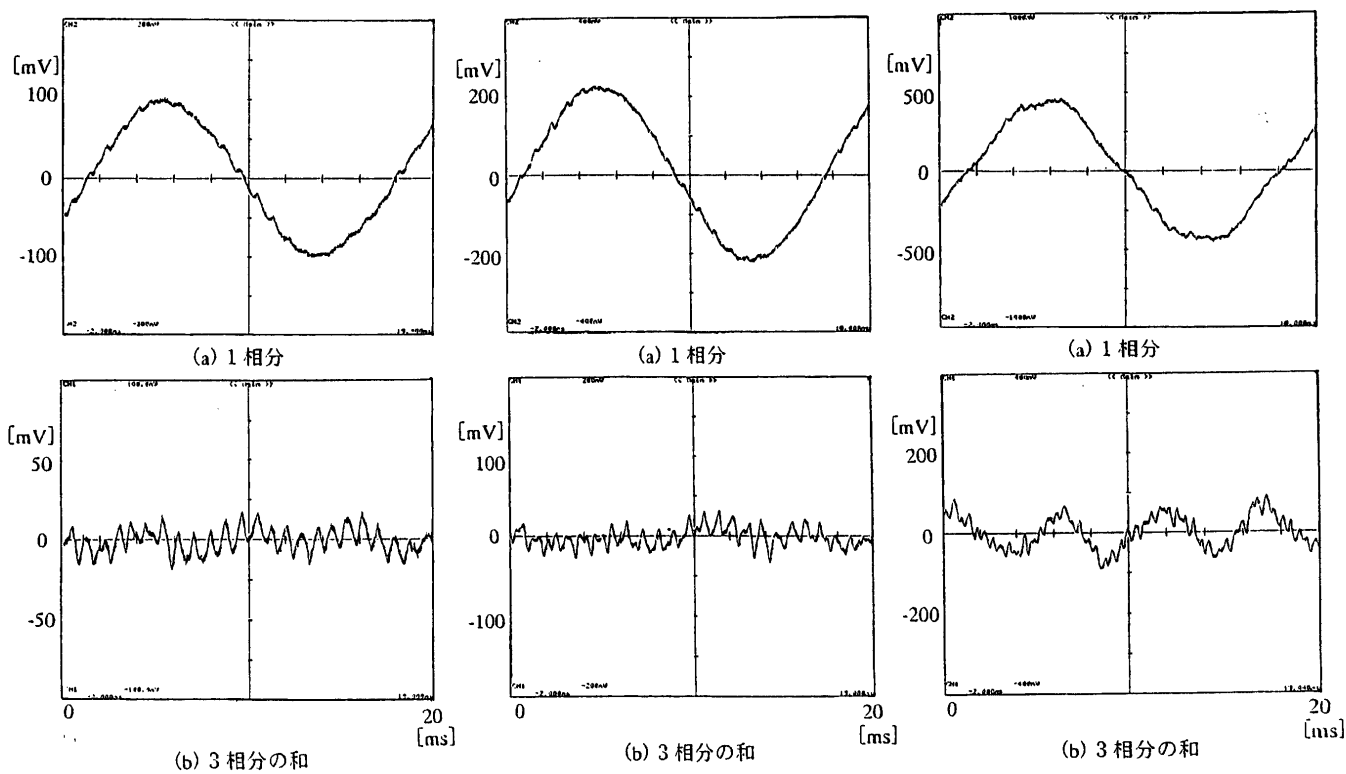


図一 4 さぐりコイル電圧の実測波形 (誘導機B)
線間電圧40V, 電源周波数60Hz, 回転数1799rpm, 無負荷



(i) 線間電圧 40V (ii) 線間電圧 90V (iii) 線間電圧 180V

図一5 線間電圧を変えた場合のさぐりコイル電圧波形 (誘導機A)



(i) 線間電圧 40V (ii) 線間電圧 90V (iii) 線間電圧 180V

図一6 線間電圧を変えた場合のさぐりコイル電圧波形 (誘導機B)

3. 実験結果

図一1に誘導機Aの一相分の固定子巻線分布と、さぐりコイルの配置を示す。固定子巻線は7/9の短節巻きである。さぐりコイルは一極分のスロット数が9であるので、中心に一相分巻き、さらに鉄心を2つ隔ててコイルを巻き120°ずつになるように配置している。

図一2に誘導機Aの場合のさぐりコイル電圧波形を示す。これは電源周波数60Hzでの正弦波駆動、無負荷時の波形である。スロットリプルは、1相分には一極対当たりの回転子スロット数の22個、3相分には(4)式より21個のリプルが出ていることが確認できる。これより、理論通りのスロットリプルを確認でき速度検出に利用可能であることがわかる。

図一3に誘導機Bの一相分の固定子巻線分布と、さぐりコイルの配置を示す。固定子巻線は同心巻きである。さぐりコイルは図一1と同様に3相分配置しているが、図一3の場合さぐりコイルを鉄心3つ分に巻いている。図一3には示していないが、比較のため鉄心1つ分に巻いたコイルでも測定を行ったところ、鉄心3つ分のコイルの方がきれいなスロットリプルを確認できたのでこちらを採用した。

図一4に誘導機Bのさぐりコイル電圧波形を示す。さぐりコイル電圧1相分の波形には、誘導機Aに比べてスロットリプルの振幅が小さいが、回転子一極対当たりの数である約19個のスロットリプルが確認できる。また、3相分の和をとると基本波成分が取り除かれスロットリプルのみが現れていることがわかる。

両者のスロットリプルを比較すると、誘導機Aの方がリプルが大きく、きれいに現れている。この理由として、回転子スロット形状のちがいがあげられる。誘導機Aは開スロット、誘導機Bは閉スロットであるが、閉スロットの場合、回転子を通る磁束が、径方向だけでなく、周方向にも通るので、さぐりコイルに誘起される電圧が小さくなると考えられる。

また、両者の大きな違いとして閉スロットの方が磁束が飽和しやすいということがあげられる。図一5, 6に線間電圧を変えた場合のさぐりコイル電圧波形を示す。誘導機Aの開スロットの場合、線間電圧を上げても、スロットリプルはあまり脈動していないが、誘導機Bの閉スロットの場合、線間電圧を上げていくと上記の理由で回転子鉄心の磁束が飽和するため、スロット高調波電圧に3倍調波が現れていることがわかる。これより、スロット高調波を速度検出に利用するためには、開スロットの方が有利であると言える。

4. まとめ

本稿では、回転子スロット高調波を利用した速度検出法の原理とそのさぐりコイル電圧波形を示し、速度検出に利用可能であることを確認した。

また、回転子スロット形状の異なる二つの誘導機に対しスロット高調波の比較を行った。その結果、鉄心の飽和の影響の小さい開スロット方が速度検出に有利であることを確認した。

参考文献

- 1) 電気学会技術報告 第760号 pp.2-15, 2000
- 2) 石田, 岩田: 「回転子溝高調波を利用した誘導電動機速度制御法」, 電学論B, **103**, (昭58-8)
- 3) M.W.Denger, R.D.Loentz, "Using Multiple Saliencies for the Estimation of Flux, Position, and Velocity in AC Machines," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol.34, No.5, 1998, pp.1097-1104
- 4) D.W.Chung, J.I.Ha, S.K.Sul, 井出, 室北, : 「誘導電動機の高周波信号重畳による速度センサレスベクトル制御」, 電学論D, **120** (平12-11)
- 5) J.Holtz, "Sensorless Position Control of Induction Motors - an Emerging Technology" *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol.45, No.6, 1998, pp.840-852
- 6) 逆瀬川, 篠原: 「回転子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系」, 平成13年電気学会産業応用部門大会, No.133