

매입형 영구자석 동기전동기의 초기위치 추정에 관한 연구

정우택*, 이정흠*, 김대현*, 최양광*, 김영석*
*인하대학교 전기공학과

A study of the initial position estimation of an interior permanent magnet synchronous motor

*Woo-Taik Jung, *Jeong-Hum Lee, *Dai-Hyun Kim, *Yang-Kwang Choi, *Young-seok Kim
*Dept. of Electrical Engineering of Inha University

Abstract - Recently, the study of sensorless drive of IPMSM is coming to be active. In sensorless drive, because the wrong estimation of the initial rotor position brings about the decrease of the starting torque, or a temporary reverse revolution, it is important to know the exact information of the initial rotor position.

In this paper, the initial rotor position estimation method is based on the current peak measured by applying the pulsewise voltage and the current peak is changed according to the rotor position owing to the saliency of the rotor. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by the experimental results.

1. 서 론

최근 산업분야의 다양한 측면에서 PMSM이 사용될 것이 거의 확실시 되고 있어, PMSM의 가변속 구동 시스템은 더욱 활발히 사용되리라고 생각된다. PMSM은 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받는다. 따라서 원활한 토크 제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치정보를 가지고 전류제어를 해야만 하기 때문에 통상 엔코더나 레졸바등의 위치센서가 쓰여진다. 그러나, 내환경성 신뢰성향상, 코스트저감등의 요구로 위치센서리스제어의 연구가 진행되고있다. PMSM의 센서리스제어에 관한 문제의 하나로서, 시동시의 회전자자극위치의 추정을 들 수 있다. 시동시의 자극위치추정에 실패한 경우 시동토크의 감소또는 일시적인 역전동을 동반하는 경우가 있다.

따라서, 본 논문에서는 정확한 초기위치 추정을 위하여 두종류의 펄스를 인버터로부터 모터에 인가할 때 3상권선의 인덕턴스가 회전자의 위치에 관한 함수로 나타나므로 권선에 흐르는 전류는 회전자의 위치에 따라 다르게 된다는 원리를 이용하여[1,2], 이때의 전류응답을 가지고 초기 회전자 위치의 추정을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 초기위치 추정 이론

초기 전류가 0인 상태에서 전압벡터 $v(100)$ 을 T_s 동안 인가한 경우, $\alpha_u - \beta_u$ 좌표계에서 각각의 전류의 피크치 i_{au} 와 $i_{\beta u}$ 는 식(1)과 같이 나타난다.

또한, 전압벡터 $V(010)$ 과 전압벡터 $v(001)$ 을 각각 T_s 동안 인가하여 얻은, $\alpha_v - \beta_v$ 의 고정자 좌표계에서의 피크전류 i_{av} 와 $i_{\beta v}$, $\alpha_w - \beta_w$ 의 고정자좌표계에서의 피크전류 $i_{aw} - i_{\beta w}$ 는 각각 식(2), 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha u} \\ i_{\beta u} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{DC}}{R} \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} + e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) \\ + \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} - e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) \cos 2\theta \\ \frac{1}{2} (e^{-\frac{R}{L_q} T_s} - e^{-\frac{R}{L_d} T_s}) \sin 2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} I_s + \Delta I_s \cos 2\theta \\ \Delta I_s \sin 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} i_u \\ 1/\sqrt{2} (i_v - i_w) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha v} \\ i_{\beta v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s + \Delta I_s \cos 2(\theta - 2\pi/3) \\ \Delta I_s \sin 2(\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha w} \\ i_{\beta w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s + \Delta I_s \cos 2(\theta + 2\pi/3) \\ \Delta I_s \sin 2(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 초기위치의 추정

초기위치 추정을 위해 각각의 전압벡터 $v(100)$, $v(010)$, $v(001)$ 을 가하여, 각각의 i_{au} , i_{av} , i_{aw} 와 $i_{\beta u}$, $i_{\beta v}$, $i_{\beta w}$ 를 검출한다. <그림1>은 식(1), (2), (3)에서 보 여진 i_{au} , i_{av} , i_{aw} 와 $i_{\beta u}$, $i_{\beta v}$, $i_{\beta w}$ 를 위치에 따라 나타낸 것이며, 식(1), (2), (3)으로부터, 식(4)를 산출한다. 식(4)로부터 $\Delta i_{\alpha u}$, $\Delta i_{\alpha v}$, $\Delta i_{\alpha w}$ 의 부호는 $\cos 2\theta$, $\cos 2(\theta - 2\pi/3)$, $\cos 2(\theta + 2\pi/3)$ 의 부호와 동일하다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{\alpha u} &= \frac{1}{3} (2i_{au} - i_{av} - i_{aw}) = \Delta I_s \cos 2\theta \\ \Delta i_{\alpha v} &= \frac{1}{3} (2i_{av} - i_{aw} - i_{au}) = \Delta I_s \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\alpha w} &= \frac{1}{3} (2i_{aw} - i_{au} - i_{av}) = \Delta I_s \cos 2(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\alpha v w} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{av} - i_{aw}) = \Delta I_s \sin 2\theta \\ \Delta i_{\alpha w u} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{aw} - i_{au}) = \Delta I_s \sin 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\alpha u v} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{au} - i_{av}) = \Delta I_s \sin 2(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

대칭적인 방법으로 식(1), (2), (3)의 β 축 전류로부터 $\Delta i_{\beta u}$, $\Delta i_{\beta v}$, $\Delta i_{\beta w}$, 및 $\Delta i_{\beta w w}$, $\Delta i_{\beta w u}$, $\Delta i_{\beta w v}$ 를 식(5)와 같이 산출한다.

α 축 전류에서와 마찬가지로 $\Delta i_{\beta w w}$, $\Delta i_{\beta w u}$, $\Delta i_{\beta w v}$ 의 부호는 각각 $\cos 2\theta$, $\cos 2(\theta - 2\pi/3)$, $\cos 2(\theta + 2\pi/3)$ 의 부호와 동일하다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{\beta u} &= \frac{1}{3}(2i_{\beta u} - i_{\beta v} - i_{\beta w}) = \Delta I_s \sin 2\theta \\ \Delta i_{\beta v} &= \frac{1}{3}(2i_{\beta v} - i_{\beta w} - i_{\beta u}) = \Delta I_s \sin 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\beta w} &= \frac{1}{3}(2i_{\beta w} - i_{\beta u} - i_{\beta v}) = \Delta I_s \sin 2(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\beta vw} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{\beta v} - i_{\beta w}) = \Delta I_s \cos 2\theta \\ \Delta i_{\beta wu} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{\beta w} - i_{\beta u}) = \Delta I_s \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Delta i_{\beta uv} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{\beta u} - i_{\beta v}) = \Delta I_s \cos 2(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$

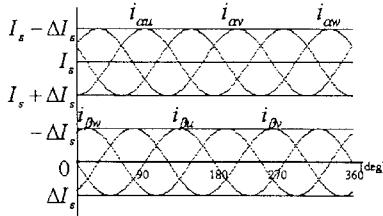


그림 1. 3상에 펄스전압 인가시 전류의 피크값

θ	$\Delta i_{\alpha u}$	$\Delta i_{\alpha v}$	$\Delta i_{\alpha w}$	구분
$-\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{12}$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta u} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha u} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})}$
$\frac{11}{12}\pi \sim \frac{13}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta w} - i_{\beta u})}{2(2i_{\alpha v} - i_{\alpha w} - i_{\alpha u})} + \frac{\pi}{6}$
$\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{4}$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta w} - i_{\beta u} - i_{\beta v})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha u} - i_{\alpha v})} + \frac{\pi}{3}$
$\frac{13}{12}\pi \sim \frac{5}{4}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta u} - i_{\beta v} - i_{\beta w})}{2(2i_{\alpha v} - i_{\alpha w} - i_{\alpha u})} + \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{4} \sim \frac{5}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta v} - i_{\beta w} - i_{\beta u})}{2(2i_{\alpha w} - i_{\alpha u} - i_{\alpha v})} + \frac{2}{3}\pi$
$\frac{5}{4}\pi \sim \frac{17}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(2i_{\beta w} - i_{\beta u} - i_{\beta v})}{2(2i_{\alpha u} - i_{\alpha v} - i_{\alpha w})} + \frac{5}{6}\pi$
$\frac{5}{12}\pi \sim \frac{7}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{17}{12}\pi \sim \frac{19}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{7}{12}\pi \sim \frac{3}{4}\pi$	-	-	-	
$\frac{19}{12}\pi \sim \frac{7}{4}\pi$	-	-	-	
$\frac{3}{4}\pi \sim \frac{11}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{7}{4}\pi \sim \frac{23}{12}\pi$	-	-	-	

표 1. 3상 펄스인가 알고리즘에서 α 축, β 축 전류의 피크치를 이용한 초기위치 영역에 따른 초기위치의 추정식(1)

식(4)와 식(5)를 이용한 초기위치 추정식은 <표1>과 <표2>에 나타내었다. <표1>과 <표2>에서 보여진 것처럼, θ 는 θ 와 $\theta + \pi$ 의 두 개의 값이 존재하므로 다음절의 극성 판별 식을 통해 θ 를 판별한다.

$$\theta \approx \begin{cases} \frac{1}{2} \tan 2\theta \\ \frac{1}{2} \tan 2\theta + \pi \end{cases} \quad (6)$$

θ	$\Delta i_{\beta vw}$	$\Delta i_{\beta wu}$	$\Delta i_{\beta uv}$	구분
$-\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{12}$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha w} - i_{\alpha v})}{2(i_{\beta v} - i_{\beta w})}$
$\frac{11}{12}\pi \sim \frac{13}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha v} - i_{\alpha w})}{2(i_{\beta w} - i_{\beta u})} + \frac{\pi}{6}$
$\frac{\pi}{12} \sim \frac{\pi}{4}$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha v} - i_{\alpha w})}{2(i_{\beta u} - i_{\beta v})} + \frac{\pi}{3}$
$\frac{13}{12}\pi \sim \frac{5}{4}\pi$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha w} - i_{\alpha v})}{2(i_{\beta v} - i_{\beta w})} + \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{4} \sim \frac{5}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha u} - i_{\alpha w})}{2(i_{\beta w} - i_{\beta u})} + \frac{2}{3}\pi$
$\frac{5}{4}\pi \sim \frac{17}{12}\pi$	-	-	-	$\frac{(i_{\alpha v} - i_{\alpha w})}{2(i_{\beta u} - i_{\beta v})} + \frac{5}{6}\pi$
$\frac{5}{12}\pi \sim \frac{7}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{17}{12}\pi \sim \frac{19}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{7}{12}\pi \sim \frac{3}{4}\pi$	-	-	-	
$\frac{19}{12}\pi \sim \frac{7}{4}\pi$	-	-	-	
$\frac{3}{4}\pi \sim \frac{11}{12}\pi$	-	-	-	
$\frac{7}{4}\pi \sim \frac{23}{12}\pi$	-	-	-	

표 2. 3상 펄스인가 알고리즘에서 α 축, β 축 전류의 피크치를 이용한 초기위치 영역에 따른 초기위치의 추정식(2)

2.3 극성의 판별

식(6)의 두 위치 사이에는 π 라디안의 차이가 있다. 따라서 이 두 위치로 부터 실제의 회전자 위치를 정하기 위하여 극성판별을 시행한다.

우선 u 상의 경우를 설명하면, 전압벡터 $v(100)$ 과 $v(011)$ 을 전류의 초기값이 0인 상태에서 초기위치 추정을 위해 인가된 펄스보다 비교적 긴 과장을 T_L 동안 인가한다. 이 경우 인가된 전압벡터에 의한 자속이 영구자석에 의한 자속에 더해지는 경우, 자속포화가 유발되며 인가된 전압벡터에 의한 자속이 영구자석의 자속을 감하는 경우 자속포화는 유발되지 않는다.

<그림2>는 전압벡터 $v(100)$ 과 $v(011)$ 를 극성판별을 위해 회전자의 위치에 따라 인가한 경우의 u 상 전류피크 i_{uL}^+ 와 i_{uL}^- 를 보여준다.

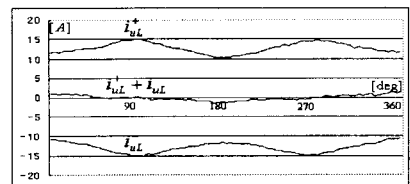


그림 2. 전압벡터 인가시 u 상의 피크전류

위와 같은 방법으로 v상의 전류피크값 i_{vL}^+ , i_{vL}^- 은 T_L 동안 전압벡터 $v(010)$ 및 전압벡터 $v(101)$ 을 인가했을 때, w상의 전류피크값 i_{wL}^+ , i_{wL}^- 은 T_L 동안 전압벡터 $v(001)$ 및 전압벡터 $v(110)$ 을 인가했을 때 각각 구할 수 있다.

식(6)의 두 위치는 각상에서의 전류피크값의 합과 부호에 의해 결정되어질 수 있다. 모든 영역에서 두 추정위치 사이의 판별식은 <표3>에서 보여준다.

θ	전압벡터	구 분
$-\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{6}$	$v(100)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- > 0$
$\frac{5}{6}\pi \sim \frac{7}{6}\pi$	$v(011)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- < 0$
$\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{2}$	$v(001)$	$i_{wL}^+ + i_{wL}^- < 0$
$\frac{7}{6}\pi \sim \frac{3}{2}\pi$	$v(110)$	$i_{wL}^+ + i_{wL}^- > 0$
$\frac{\pi}{2} \sim \frac{5}{6}\pi$	$v(010)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- > 0$
$\frac{3}{2}\pi \sim \frac{11}{6}\pi$	$v(101)$	$i_{vL}^+ + i_{vL}^- < 0$

표 3. 극성의 판별

2.4 실험 결과

<그림3>은 초기위치 추정을 위해 각각의 전압벡터 $v(100)$, $v(010)$, $v(001)$ 을 인가하여, 각 축의 피크전류인 $i_{\alpha v}$, $i_{\alpha w}$, $i_{\alpha u}$ 와 $i_{\beta v}$, $i_{\beta w}$, $i_{\beta u}$ 를 위치에 따라 나타낸 것이다. 또한, <그림4>는 초기 위치 추정을 위해 인가한 세 번의 단파장 전압 펄스와 두 번의 장파장 전압 펄스의 u상 전류를 나타낸다.

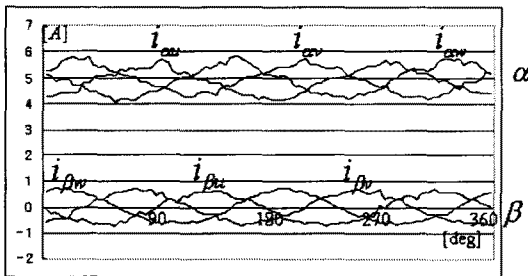


그림 3. 3상 펄스전압 인가시 각축의 전류피크치

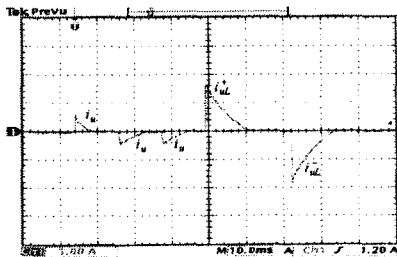


그림 4. 3상 펄스전압 인가를 이용한 초기위치 추정알고리즘 수행 시 응답전류

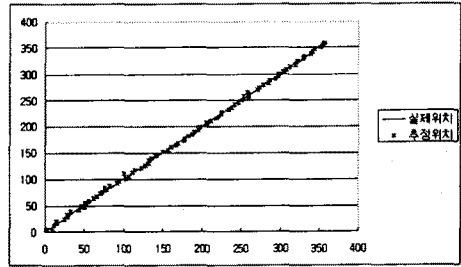


그림 5. 3상 펄스전압을 이용한 초기위치 추정알고리즘에서 α 축, β 축 전류로 추정시 초기위치추정결과(표1의 수식 사용)

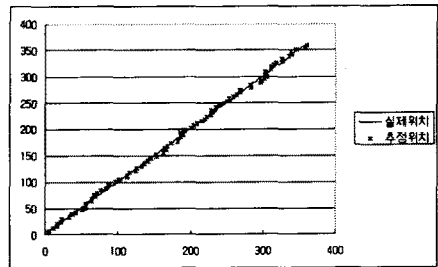


그림 6. 3상 펄스전압을 이용한 초기위치 추정알고리즘에서 α 축, β 축 전류로 추정시 초기위치추정결과(표2의 수식 사용)

<그림5>는 <표1>을 이용하여 초기위치를 추정하였을 경우의 실제위치에 따른 추정위치를 나타내고, <그림6>은 <표2>를 사용하여 초기위치를 추정하였을 경우의 추정위치를 나타낸다. 이는 회전자의 위치를 0° 에서 360° 까지 이동시키면서 추정한 결과이다.

본 실험에서 <표1>의 수식을 이용해 구한 실제위치와 추정위치의 평균 초기위치추정오차는 2.13° 이고, 최대 초기위치추정오차는 8.52° 로 나타났으며, <표2>의 수식을 이용해 구한 실제위치와 추정위치의 평균위치추정오차가 3.45° 이고, 최대 초기위치추정오차는 9.99° 로 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 두 종류의 펄스를 인버터로부터 모터에 인가할 때 3상권선의 인덕턴스가 회전자의 위치에 관한 함수로 나타나므로 권선에 흐르는 전류는 회전자의 위치에 따라 다르게 나타난다는 원리로 회전자 초기위치 추정을 하였다. 즉, 3상 펄스 전압을 인가시 α 축 및, β 축 전류의 피크치를 이용하여 회전자의 초기위치를 추정하였다. <표1>과 <표2>를 이용한 두가지 방법은 비교적 양호한 추정성능을 나타내고있음을 알수있다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-041-D00243)

[참 고 문 헌]

- [1] N. Matsui, T. Takeshita, "A Novel Starting Method of Sensorless Salient-Pole Brushless Motor", IAS '94, vol.1, pp.386-392, Oct. 1994.
- [2] Ajith H. Wijanayake, J. M. Bailey, Malakondaiah Naidu, "A DSP-based position sensor elimination method with an on-line parameter identification scheme for permanent magnet synchronous motor drives", IAS '95, vol.1, pp. 207-215, Oct. 1995.