

# IPMSM 센서리스 제어의 안정된 기동을 위한 간단한 초기회전자 추정기법

金建明\*, 朴炳建\*\*, 具本琯\*\*\*, 金來瑛\*\*\*\*, 玄東石†

## Simple Initial Rotor Position Estimation for Stable Startup of IPMSM Sensorless Control

Gun-Myoung Kim, Byoung-Gun Park, Bon-Gwan Goo, Rae-Young Kim, and Dong-Seok Hyun

### 요 약

본 논문은 역기전력 기반 센서리스 제어 시 안정적인 기동성능 확보를 위한 간단한 초기 회전자 위치추정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 전동기의 고정자 권선 인덕턴스의 차이에 의한 전류응답특성을 이용하여 초기 회전자 위치를 추정한다. 이러한 초기 회전자 위치추정 방법은 알고리즘 구현이 간단하고 추가적인 외부회로가 불필요하며, 전동기 상수의 영향을 받지 않는다. 제안된 방법의 타당성은 실험결과를 통하여 검증하였다.

### ABSTRACT

This paper proposes a simple initial rotor position estimation method to obtain a stable startup performance for back EMF-based sensorless control. The proposed estimation method is achieved at standstill by using the current response to difference between each of the stator winding inductance. This initial rotor position estimation method can be easily implemented to control algorithm without any other external devices. The proposed algorithm is also not affected by motor parameter. The validity of the proposed method is demonstrated by experimental result.

**Key Words** : Back EMF based sensorless control, Initial rotor position estimation

## 1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 마그네틱 토크만을 이용하는 표면 부착형 영구자석 동기전동기

(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)와는 다르게 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 이용하여 단위체적당 높은 출력으로 전동기의 크기와 무게를 줄일 수 있는 장점을 지니고 있어 다양한 응용분야에서 사용되고 있다. 일반적으로 IPMSM은 회전자의 위치를 얻기 위해 레졸버나 엔코더를 사용하는데, 결과적으로 전동기 가격 상승의 주된 요인이 되며 시스템이 복잡해지고 크기가 커지며 노이즈에 취약하게 되어 기계적 강인성과 신뢰성을 확보하기가 어렵다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 위치센서가 필요 없는 센서리스 제어에 대한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>[1]-[7]</sup>. 센서리스 제어 방법은

†교신저자 : 정희원, 한양대 전자전기공학과 공학부 교수

E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr

\*학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 석사과정

\*\*정회원, 한국전기연구원 선임연구원

\*\*\*정회원, 전자부품연구원 선임연구원

\*\*\*\*정회원, 한양대 전기제어생체공학부 조교수

접수일자 : 2011. 9. 21

1차 심사 : 2011. 10. 16

심사완료 : 2011. 11. 14

크게 고주파 신호 주입방식<sup>[1-2]</sup>과 역기전력을 이용하는 방법<sup>[3-7]</sup>으로 구분 할 수 있다. 고주파 주입방법은 정격속도 5%이하의 저속일 때와 정지상태일 때 비교적 빠른 시간 안에 회전자 위치 추정이 이루어질 수 있지만 속도가 더 높아지면 주입 할 수 있는 추가 전압이 제한되며 불필요한 손실을 야기하기 때문에 초기 회전자 위치추정부터 기동까지의 운용에 만족스런 결과를 얻기가 힘들다. 다른 방법인 역기전력을 기반으로 하는 센서리스 제어 방법은 모델기준적용방법 (Model Reference Adaptive Control, MRAC)<sup>[3]-[4]</sup>과 확장형 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)방법<sup>[5]-[7]</sup> 등 다양한 방법 들이 연구되고 있다. 하지만 역기전력을 기반으로 하는 방법은 상수의 변동에 취약하며 역기전력이 정격 속도의 5%이상일 때에 정확한 추정이 가능하므로 그 이하의 속도이거나 정지상태일 때는 추정이 정확하지 않거나 불가능하다는 단점이 있다. 또 초기 회전자 위치를 얻기 위한 방법들 중에 인덕턴스의 포화현상으로 나타나는 전류의 상대적인 대소 관계를 이용하는 방법들도 제안되었다<sup>[8]-[9]</sup>. 하지만, 기존의 방법들은 구현에 있어 복잡하고 정밀한 위치 검출을 위해 반복적인 전압 펄스를 인가하는 시간적인 소요가 필요하다.

본 논문에서는 역기전력 기반 센서리스 제어 시 안정적인 기동 성능 확보를 위한 간단한 초기 회전자 위치 추정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 전동기의 고정자 각 권선에 회전자 위치적인 특성을 가지고 있는 공간전압벡터(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)를 인가하여 나타나는 전류응답 특성으로 초기 회전자 위치를 추정한다. 이러한 방법은 알고리즘 구현이 간단하고 추가적인 외부회로가 불필요하며, 전동기 상수의 영향을 받지 않기 때문에 역기전력 기반의 센서리스 제어 방법의 보조적인 방법으로 사용하기에 적합하다. 제안된 초기 회전자 위치 검출방법의 타당성은 2.2kW IPMSM 구동 실험세트를 이용하여 검증하였다.

## 2. 회전자 위치에 의한 인덕턴스의 변화

센서리스 제어에서 초기 회전자의 위치추정은 기본적으로 다음과 같은 가정 하에 이루어진다.

- 1) 고정자의 히스테리시스 자화는 무시한다.
- 2) 공극의 자속밀도 분포는 정현적이라고 본다.
- 3) 각 상 권선의 저항과 인덕턴스는 모두 같다.

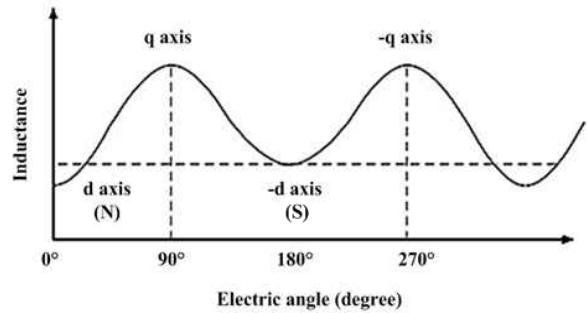


그림 1 고정자의 쇄교 자속에 의한 인덕턴스의 변화  
Fig. 1 Inductance variation by stator linkage flux

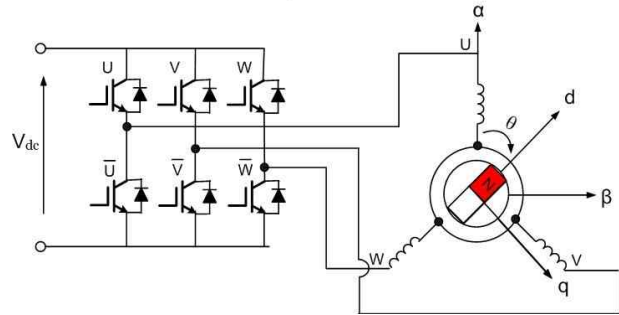


그림 2 IPMSM 구동 시스템  
Fig. 2 IPMSM drive system

이러한 가정을 토대로 3상 2극 IPMSM의 회전자 위치에 의한 인덕턴스 변화를 분석하였다. IPMSM 각 고정자 권선의 쇄교 자속은 영구자석에 의한 회전자의 쇄교 자속  $\lambda_r \phi$  과 고정자 전류에 의한 고정자 쇄교 자속  $\lambda_s \phi$ 의 합으로 나타낸다.

다음은 고정자 인덕턴스의 식이다.

$$L_s = \lambda_{ph} i_{ph} \tag{1}$$

여기서,  $L_s$ 는 고정자 인덕턴스,  $\lambda_{ph}$ 는 고정자 권선의 쇄교 자속, 그리고  $i_{ph}$ 는 고정자 권선의 상전류를 나타낸다.

IPMSM은 회전자의 돌극성에 의한 자속의 영향을 받아 영구자석이 만들어내는 자속이 항상 일정한 것이 아니라 고정자 권선을 통과하면서 부분적으로 포화현상을 일으키게 된다. 회전자 자석의 위치  $\theta$ 가 변함에 따라 고정자의 인덕턴스는  $2\theta$ 로 변동되는 특성을 보이게 된다. 그림 1은 회전자 위치에 의한 인덕턴스의 변화를 나타낸다. 회전자의 위치에 따라서 고정자 권선의 인덕턴스가  $d$ 축에서 최소가 되고  $q$ 축에서 최고가

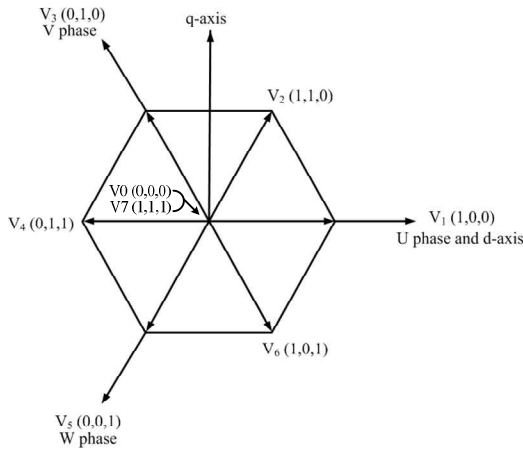


그림 3 공간전압벡터  
Fig. 3 Space voltage vector

되는 것을 볼 수 있다. 회전자 위치를 따라서 인덕턴스 값이 변화하기 때문에 각 상의 전류에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_u = I_o + \Delta I_u = I_o + \Delta I_o \cos 2\theta \quad (2)$$

$$I_v = I_o + \Delta I_v = I_o + \Delta I_o \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

$$I_w = I_o + \Delta I_w = I_o + \Delta I_o \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

$$I_{v-w} = I_o + \Delta I_u = I_o + \Delta I_o \cos(2\theta - \pi) \quad (5)$$

$$\Delta I_u = I_u - I_o, \Delta I_v = I_v - I_o, \Delta I_w = I_w - I_o \quad (6)$$

위 식에서  $I_o$ 는 전류의 직류성분이고  $\Delta I_o$ 는 전류 리플의 진폭이다. 또한  $I_u, I_v, I_w$ 는 각 고정자 권선 상 전류의 최대값을 나타내며  $\Delta I_u, \Delta I_v, \Delta I_w$ 는 각 고정자 권선의 상전류 리플을 나타낸다.

전류의 직류성분에 관한 식은 다음과 같다.

$$I_o = \frac{1}{3}(I_u + I_v + I_w) \quad (7)$$

따라서 본 논문에서는 특정한 공간전압벡터를 인가하고 회전자 위치에 따라 변하는 인덕턴스의 영향을 받아 다르게 나타나는 전류 응답의 크기를 이용하여 초기 회전자 위치를 추정하게 된다.

### 3. 제안된 초기 회전자 위치 추정 방법

그림 2는 IPMSM 구동 시스템을 나타낸다. 인버터

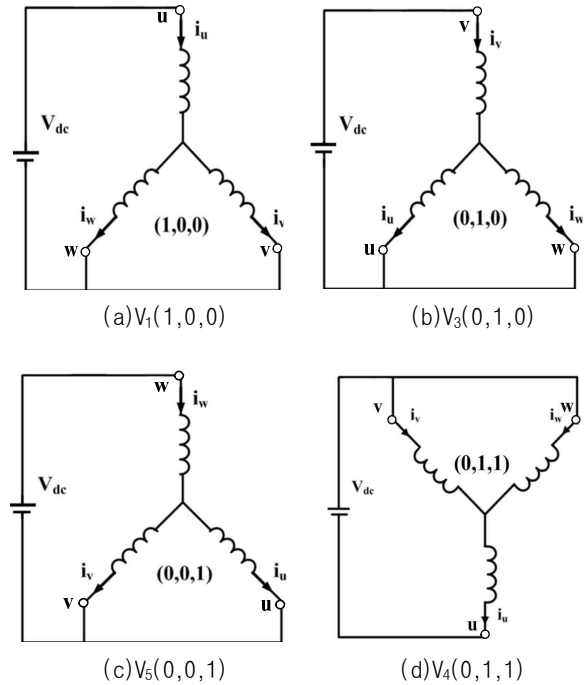


그림 4 전압벡터에 의한 회로 구성  
Fig. 4 Circuit Configuration for voltage vector

를 구성하고 있는 6개의 스위치 조합에 의해 전동기로 그림 3과 같은 공간 전압 벡터가 인가된다. 기존의 인덕턴스에 의한 전류포화현상으로 초기 회전자 위치 추정 방법들은 공간전압벡터를 수차례 인가하여 초기 회전자의 위치추정 오차 범위를 360°에서 180°, 180°에서 60°, 60°에서 30°등으로 고정자 인덕턴스의 전류응답을 수시로 확인하면서 추정 가능범위를 좁히는데 그 목적이 있었다. 하지만 제안된 초기 회전자 추정 방법은 공간전압벡터를 여러 번 인가하여 초기 회전자의 위치 오차를 줄여보려는 시도와는 달리, 그림 3에서 보여지는 120° 간격의 공간전압벡터  $V_1(1,0,0), V_3(0,1,0), V_5(0,0,1), V_4(0,1,1)$ 를 중간 연산 없이 짧게 한번만 인가하여 나타나는 각 상의 고정자 권선의 전류를 비교한다. 전류 응답의 크기는 상대적으로 작은 값을 가지는 인덕턴스 위치에서 가장 크게 나타나기 때문에 전류의 크기가 가장 큰 상의 회전자 위치를  $N$ 극이 위치하게 되는  $d$ 축 방향으로 추정하여 초기 회전자의 위치를 30°간격 이내에서 판별한다.

### 3.1 초기 회전자 추정 판별과정

그림 4는 각 고정자 권선에 공간전압벡터를 인가했을 때의 회로 구성을 보여준다. 이렇게 추정된 범위 내에서 회전시키고자 하는 방향에 의해 원하는 방향에

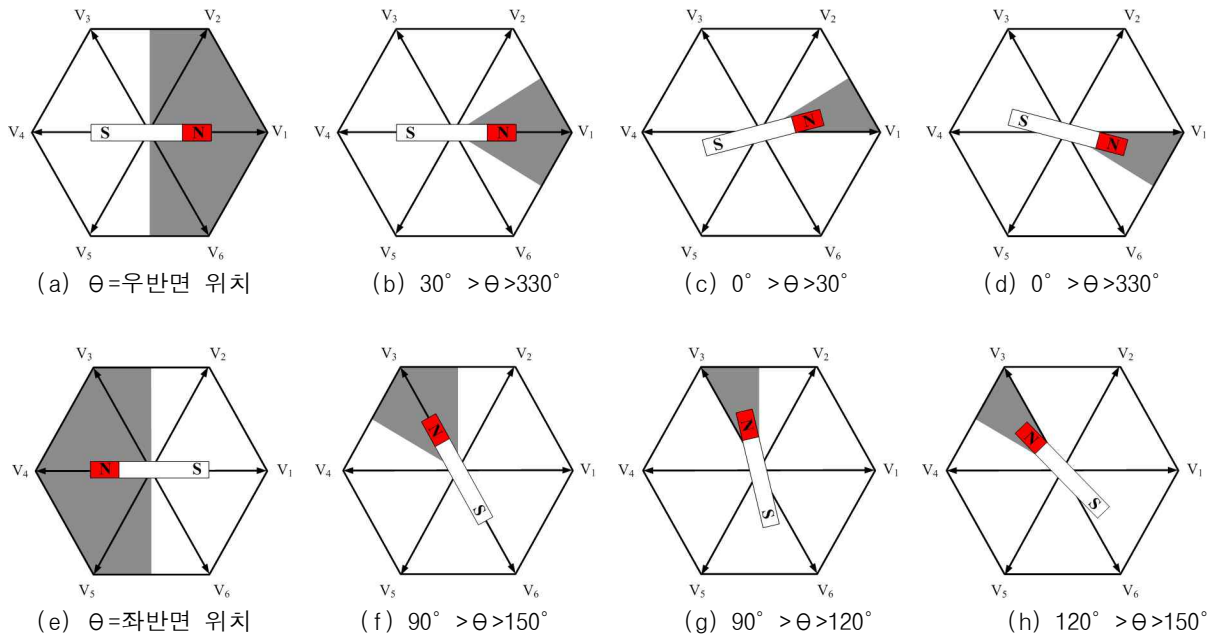


그림 5 초기 회전자의 위치 추정 판별과정  
 Fig. 5 Estimation Determine process of initial rotor position

위치한 기준이 되는 공간전압벡터 위치를 회전자의 초기 위치로 설정한다. 이러한 과정을 순서대로 나타내면 다음과 같다.

**Step1**  $V_1(1,0,0)$ ,  $V_3(0,1,0)$ ,  $V_5(0,0,1)$ ,  $V_4(0,1,1)$ 의 공간전압벡터를 짧은 시간동안 인버터로부터 전동기 고정자 권선에 인가한다. 이때 나타나는 고정자 각 상의 전류를 검출한다.

**Step2**  $V_1(1,0,0)$ 과  $V_4(0,1,1)$ 에 의해 나타나는 상전류 크기의 대소관계로 회전자의 N극의 위치가 오른쪽 반면인지 왼쪽 반면인지 판별하고, N극의 위치가 판별된 후 N극이 위치한  $180^\circ$ 범위 안에서  $V_1(1,0,0)$ ,  $V_3(0,1,0)$ , 그리고  $V_5(0,0,1)$ 의 전류 대소 관계를 비교하여 회전자 d축의 위치를 반경  $60^\circ$  범위 안에서 판별한다.

**Step3** 전동기를 회전시키고자 하는 방향에 따라 인접한 공간전압벡터를 기준으로 공간전압벡터를 인가한다.

그림 5는 초기 회전자의 위치 추정 판별과정을 도식화하여 나타낸 것이다. 초기 회전자 위치 검출을 위해

인가된 4개의 공간전압벡터( $V_1, V_3, V_5, V_4$ ) 중에 만약  $V_1$ 에 의한 전류가  $V_4$ 에 의한 전류보다 크다면 회전자의 N극은 오른쪽 반면에 있다는 뜻이며, 따라서 회전자의 d축은  $180^\circ$ 반경 내인  $90^\circ$ 와  $270^\circ$ 범위 안에 놓여있다는 것을 그림 5(a)에 나타내고 있다. 그리고 만약 전류의 크기의 결과가  $I_u > I_v > I_w$ 이라면  $I_u$ 가 가장 크기 때문에 회전자의 d축은 그림 5(b)와 같이  $V_1$ 을 중심으로  $60^\circ$

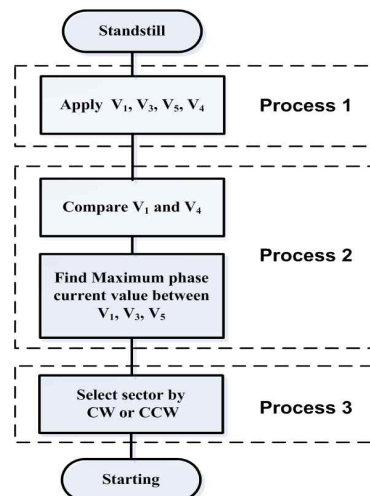


그림 6 제안된 방법의 순서도  
 Fig. 6 Flowchart of the proposed method

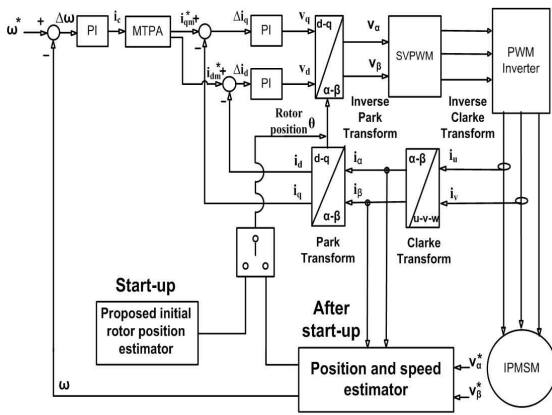


그림 7 제안된 방법을 포함한 역기전력 기반 센서리스 제어의 전체 구성도

Fig. 7 Overall block diagram of back Emf based sensorless control with the proposed method

범위 안에 위치하게 된다. 또한, 두 번째로 큰 전류의 크기가  $I_v$  이므로 그림 5(c)와 같이  $V_1$  중심의  $60^\circ$ 내의 범위 중  $0^\circ$ 에서  $30^\circ$ 범위 안에 회전자 d축이 위치하게 된다. 위와 동일한 방법으로 만약  $V_1 > V_4$ 이고  $I_u > I_w > I_v$ 의 순서라면 회전자 d축은 그림 5(d)와 같이 우반면 ( $270^\circ \sim 90^\circ$ )에 위치하고 범위는  $330^\circ$ 에서  $0^\circ$ 내에 놓여 있게 된다. 반대의 경우로서 만약  $V_1 < V_4$ 이고  $I_u > I_w > I_v$ 의 경우라면 이번엔  $V_4$ 가  $V_1$ 보다 크므로 회전자 d축은 그림 5(e)와 같이 좌반면에 위치하게 되는 것을 알 수가 있다. 그리고  $I_u$ 가 가장 크기 때문에 d축이 그림 5(f)와 같이  $V_3$ 를 중심으로  $60^\circ$ 범위인  $90^\circ \sim 150^\circ$ 안에 위치하게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 나서 두 번째로 큰 전류가  $I_w$  이므로 d축이 그림 5(g)와 같이  $V_3$ 백터를 중심의  $60^\circ$ 내의 범위에서  $90^\circ \sim 120^\circ$  범위에 위치하게 되는 것을 알 수 있다. 또한,  $V_1 < V_4$ 이고  $I_v > I_u > I_w$ 의 순서라면 회전자 d축은 그림 5(h)와 같이  $120^\circ \sim 150^\circ$ 범위 사이에 놓여 있게 된다.

### 3.2 초기 기동 방법

위에서 설명한 과정을 통해 회전자 위치범위를 좁히고, 회전시키고자 하는 방향에 따라 회전자 위치를 선정한 후 기동시키면 센서리스 기동 이전에 위치를 근접하게 알 수 있어 안정적인 구동이 가능하다. 그림 6은 제안된 초기 회전자 위치 추정 방법에 대한 순서도를 나타낸다. 초기 회전자 위치 추정을 위해 간단하게 알고리즘을 구성할 수 있으며, 전동기에 따라 최소한의 전압벡터를 인가할 수 있는 시간을 선정하는 것 또한 제안한 방법을 수행하는 데 매우 중요하다. 그림

표 1 초기 회전자 위치 판별표

Table 1 Initial rotor position determine

Angle	Phase Current
$0^\circ \sim 30^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_u > I_v > I_w$
$30^\circ \sim 60^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_v > I_u > I_w$
$60^\circ \sim 90^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_v > I_w > I_u$
$90^\circ \sim 120^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_v > I_w > I_u$
$120^\circ \sim 150^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_v > I_u > I_w$
$150^\circ \sim 180^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_u > I_v > I_w$
$180^\circ \sim 210^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_u > I_w > I_v$
$210^\circ \sim 240^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_w > I_u > I_v$
$240^\circ \sim 270^\circ$	$V_1 < V_4 \quad I_w > I_v > I_u$
$270^\circ \sim 300^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_w > I_v > I_u$
$300^\circ \sim 330^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_w > I_u > I_v$
$330^\circ \sim 0^\circ$	$V_1 > V_4 \quad I_u > I_w > I_v$

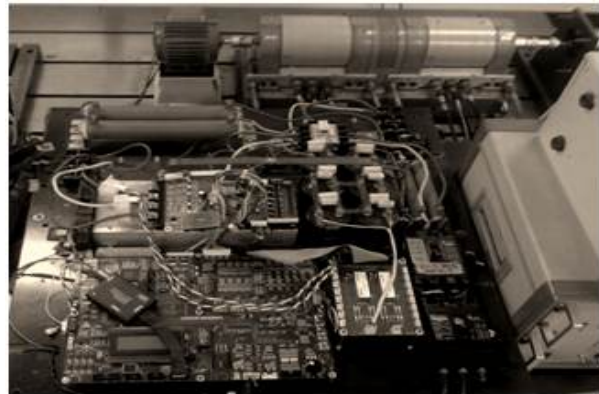


그림 8 IPMSM 구동 실험세트

Fig. 8 Experimental sets of IPMSM

표 2 IPMSM 정격과 파라미터

Table 2 Specification of IPMSM

극 수	6 pole
상당 저항	$0.43[\Omega] \pm 10\% [\Omega]$
상당 d축 인덕턴스	2.6 [mH]
상당 q축 인덕턴스	6.7 [mH]
쇄교 자속	0.297 [Wb]
회전자 관성모멘트	$0.00179 [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$
점성 마찰계수	$0.000179 [\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{s}]$

7은 제안한 방법을 포함한 역기전력 기반의 센서리스 제어 알고리즘의 전체적인 구성을 나타낸다. 초기 회전자 위치 추정을 위한 알고리즘을 수행한 후에 얻어진 회전자 위치 정보를 바탕으로 전동기의 기동을 실시한다. 표 1은 각도별 각 상전류의 크기를 정리한 것이다.



### 4. 실험 결과

제한한 초기 회전자 위치추정 방법의 타당성을 검증하기 위해 Higen사에서 제작된 2.2kW IPMSM을 사용하여 제작된 실험세트로 실험을 하였다. 실험에 사용된 전동기의 세부적인 사항은 표 2과 같다. 3상 인버터는 Mitsubishi사의 파워모듈(Intelligent Power Module, IPM)인 PM75RLA60로 구성하였다. 제어보드는 TI사의 디지털 신호 처리기(DSP) TMS320VC33과 FPGA로 구성하였다. 그림 8은 실험을 위해 구성된 실험 세트를 보여준다. 실험은 인버터로부터 공간전압벡터  $V_1(1,0,0)$ ,  $V_3(0,1,0)$ ,  $V_5(0,0,1)$ ,  $V_4(0,1,1)$ 를 40 $\mu$ s동안 인가하였으며, 제어보드에 구성된 Analog Devices사의 4ch 동시에 샘플링이 가능한 AD7865를 이용하여 전류의 크기를 비교하였다. 전압벡터를 인가하는 시간간격은 300 $\mu$ s로 설정하였다. 그림 9부터 그림 13는 제한된 초기 회전자 위치추정 방법을 이용하여 공간전압벡터 인가에 의해 회전자 위치에 따라 다르게 나타나는 전류응답을 보여준다. 그림 9는  $\theta=7^\circ$ 일 때의

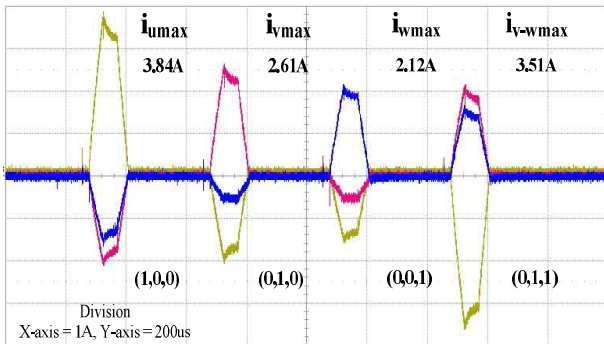


그림 9  $\theta = 7^\circ$  일 때 전압벡터에 대한 전류응답  
Fig. 9 Current response for voltage vectors at  $\theta = 7^\circ$

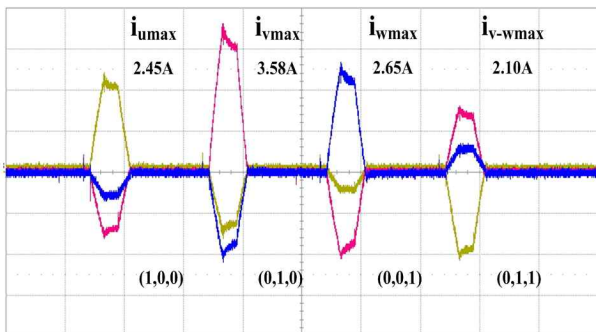


그림 10  $\theta = 75^\circ$  일 때 전압벡터에 대한 전류응답  
Fig. 10 Current response for voltage vectors at  $\theta = 75^\circ$

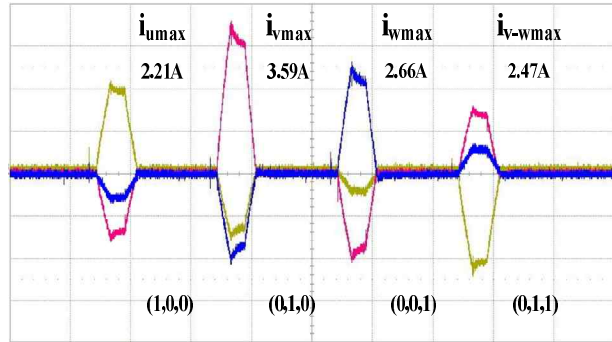


그림 11  $\theta = 127^\circ$  일 때 전압벡터에 대한 전류응답  
Fig. 11 Current response for voltage vectors at  $\theta = 127^\circ$

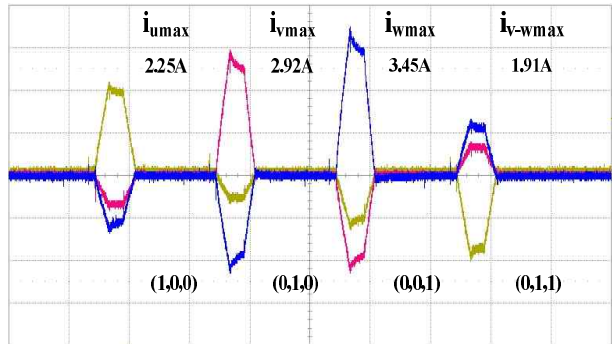


그림 12  $\theta = 309^\circ$  일 때 전압벡터에 대한 전류응답  
Fig. 12 Current response for voltage vectors at  $\theta = 309^\circ$

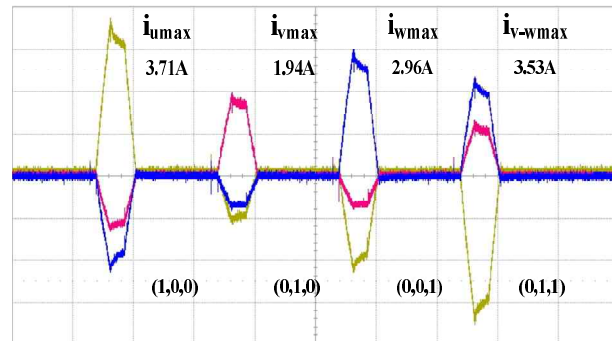


그림 13  $\theta = 355^\circ$  일 때 전압벡터에 대한 전류응답  
Fig. 13 Current response for voltage vectors at  $\theta = 355^\circ$

각 상전류응답을 보여준다. 상대적인 대소 관계를 비교해보면  $V_1$ 에 의한 상전류가  $V_4$ 보다 크게 나타나므로, 회전자의 N극이 우반면인  $90^\circ \sim 270^\circ$  사이에 위치한다고 구분할 수 있다. 이때, 각 상전류의 크기를 비교하

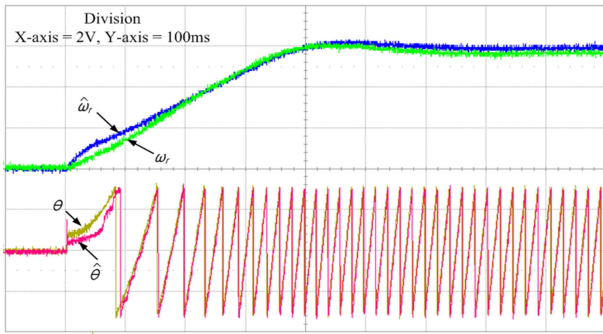


그림 14 제안한 방법을 적용한 초기 기동 결과  
Fig. 14 Startup result with the proposed method

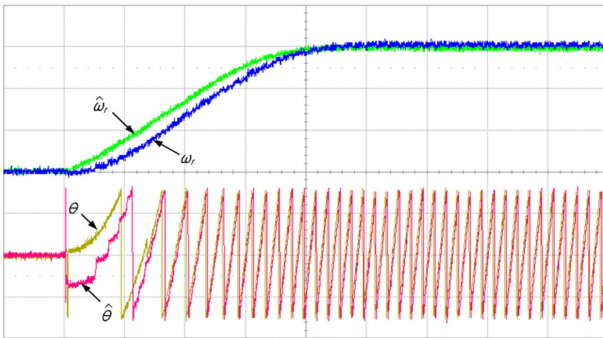


그림 15 제안한 방법을 적용하지 않은 초기 기동 결과  
Fig. 15 Startup result without the proposed method

면,  $I_u > I_v > I_w$  이므로 결과적으로 회전자  $N$ 극의  $d$ 축은  $0^\circ \sim 30^\circ$  범위 사이에 위치하고 있다는 것을 추정할 수 있다. 그림 10은  $\theta = 75^\circ$  일 때의 각 상전류 응답을 보여준다.  $V_1 > V_4$  이고,  $I_v > I_w > I_u$  이므로 회전자  $N$ 극의  $d$ 축은  $60^\circ \sim 90^\circ$  범위 사이에 놓여있다는 것을 알 수가 있다. 그림 11은  $\theta = 127^\circ$  일 때의 각 상전류 응답을 보여준다.  $V_1 < V_4$  이고,  $I_v > I_w > I_u$  이므로 회전자  $N$ 극의  $d$ 축은  $120^\circ \sim 150^\circ$  범위 사이에 놓여있다는 것을 알 수가 있다. 그림 12는  $\theta = 309^\circ$  일 때의 각 상전류 응답을 보여준다.  $V_1 > V_4$  이고,  $I_w > I_v > I_u$  이므로 회전자  $N$ 극의  $d$ 축은  $300^\circ \sim 330^\circ$  범위 사이에 놓여 있다는 것을 알 수가 있다. 그림 13은  $V_1 > V_4$  이고,  $I_u > I_w > I_v$  이므로 회전자  $N$ 극의  $d$ 축은  $330^\circ \sim 0^\circ$  범위 사이에 놓여있다는 것을 알 수가 있다. 그림 14와 그림 15는 역기전력 기반의 센서리스 제어에 제안한 초기 회전자 위치 추정방법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 초기 기동 결과를 보여준다. 센서리스 제어 성능 비교를 위해 엔코더를 부착하여 실제 회전자 각속도  $\omega_r$  과 회전자 위치  $\theta$

를 얻었다.  $\hat{\omega}_r$  와  $\hat{\theta}$  는 센서리스 제어 방법에 의해 추정된 회전자 각속도와 위치 정보를 나타낸다. 그림 14에서와 같이 제안한 초기 회전자 위치 추정방법을 적용하였을 때, 회전자의 위치를 초기 기동부터 잘 추정하는 것을 볼 수 있으며, 속도 역시 실제 속도를 잘 추정하는 것을 확인할 수 있다. 그림 15는 제안한 방법을 적용하지 않았을 때의 센서리스 기동 특성을 보여준다. 역회전 혹은 기동실패는 하지 않았으나, 초기 회전자 위치 정보가 없으므로, 추정된 회전자 위치와 실제 회전자 위치의 오차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 기동 상태에서의 회전자 속도에 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 역기전력을 기반으로 하는 IPMSM의 센서리스 제어 시에 안정된 기동 성능을 확보하기 위한 간단한 초기회전자 위치추정 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하여 역기전력기반 센서리스 제어 방법의 초기 기동에 대한 안전성을 확보하여 역회전이나 기동실패 없이 성공적인 기동을 할 수 있다. 또한, 초기회전자 위치정보를 추정하기 위한 추가적인 하드웨어를 필요로 하지 않으며, 전동기 상수의 영향을 받지 않는다. 실험적인 분석과 역기전력 기반의 센서리스 제어에 적용하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Bolognani S, Calligaro S, Petrella R, Tursini M, "Sensorless Control of IPM Motors in the Low-Speed Range and at Standstill by HF Injection and DFT Processing" *Industry Applications*, IEEE Trans TIA vol. 47 Issue. 1, pp. 96 - 104, 2011
- [2] 장지훈, "연구자석 동기전동기 센서리스 제어의 운전 영역확장에 대한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문, 2006
- [3] Mustafa R, Ibrahim Z, Lazi J.M, "Sensorless adaptive speed control for PMSM drives" *IEEE - PEOCO*, 4th, pp. 511 - 516, 2010.
- [4] Long Bo, Zhou Hao Bin, Cao Bing Gang, Hu qing hua, "Position Tracking Controlling System on Sensorless BLDCM by Using MRAC" *Industrial Electronics and Applications*, *IEEE - ICIEA* 2nd pp. 1808 - 1812, 2007
- [5] Yuchao Shi, Kai Sun, Hongyan Ma, Lipei Huang,

"Permanent magnet flux identification of IPMSM based on EKF with speed sensorless control" *IEEE - IECON IES* pp. 2252 - 2257, 2010

- [6] Vyncke T.J, Boel R.K., Melkebeek J.A.A, "On Extended Kalman Filters with augmented state vectors for the stator flux estimation in SPMSMs" *APEC, Twenty-Fifth Annual IEEE* pp. 1711 - 1718, 2010
- [7] 임동훈, 박병건, 김래영, 현동석 "병렬형 저감 차수 칼만 필터를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어" *전력전자학회 논문지*, 제16권, 제3호, pp. 266-273, 2011. 6.
- [8] 박내춘, 이윤규, 김상훈 "인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기위치 추정" *전력전자학회 논문지*, 제16권, 제4호, pp. 374-381, 2011 .8.
- [9] 이육진, 설승기 "위치 센서가 없는 소형 BLDC 전동기의 기동 방법에 관한 연구", *전력전자학술대회 논문집(II)* pp. 646-650, 2004. 7.

박). 1999년~2004년 (주)효성 중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Post Doc. Researcher. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



**현동석(玄東石)**

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원해공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전자전기공학과 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.

저 자 소 개



**김건명(金建明)**

1982년 4월 25일생. 2009년 강원대 전기제어공학과 졸업. 2010년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정.



**박병건(朴炳建)**

1979년 4월 16일생. 2005년 명지대 전기정보 제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2011년~현재 한국전기연구원 선임연구원.



**구본관(具本琯)**

1976년 2월 6일생. 1998년 2월 경북대 전자공학과 졸업. 2000년 2월 포항공대 전기전자과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박). 2005년~2007년 LG전자 선임연구원. 2007년~현재 전자메카트로닉스연구센터 선임연구원.



**김래영(金來瑛)**

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 버지니아 공대(Virginia Tech) 대학원 전기공학과 졸업(공

부품연구원 지능