

## NN-SV PWM을 이용한 IPMSM 드라이브의 고성능 속도제어

김도연\*, 고재섭\*\*, 최정식\*\*, 정철호\*\*, 정병진\*\*, 박기태\*\*, 정동화\*\*  
 순천대학교 정보통신공학부\*, 순천대학교 정보통신공학부\*\*

### High Performance Speed Control of IPMSM Drive Using Neural Network-SV PWM

Do-Yeon Kim\*, Jae-Sub Ko\*\*, Jung-Sik Choi\*\*, Chul-Ho Jung\*\*, Byung-Jin Jung\*\*, Ki-Tae Park\*\*, Dong-Hwa Chung\*\*  
 Suncheon University\*, Suncheon University\*\*

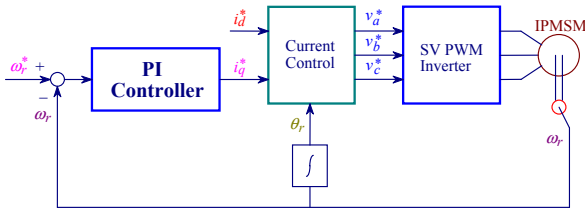
**Abstract** - This paper is proposed a high performance speed control of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor through the Neural Network SV-PWM. SV-PWM is controlled using Neural Network control. SV-PWM can be maximum used maximum dc link voltage and is excellent control method due to characteristic to reducing harmonic more than others. Neural Network control has a advantage which can be robustly controlled. Simulation results are presented to show the validity of the proposed algorithm

#### 1. 서 론

최근 전력용 반도체소자와 고성능 마이크로프로세서의 발달에 따라 전력전자기술이 진보하였다. 이에 따라 고도의 정밀도를 요구하는 전동기 제어기술이 많은 호응을 얻고 있으며 고 정밀도의 PWM 기술에 관심이 집중되고 있다. 3상 인버터의 SV PWM 기법이 Broeck에 의해 제시되어 최근에는 일반화되고 있다[1]. SV PWM을 제어하기 위하여 일반적으로 PI 제어기를 많이 사용하고 있다. 이는 PI 제어기가 간단하게 구현할 수 있고 파라미터와 시스템의 응답설정 사이에 존재하는 관계가 명확하기 때문이다.[2] SV PWM 방식은 기본적인 방식이며 새로운 방식과 최적 방식 등 많은 방식등이 제시되었다[3][4]. 본 논문에서는 IPMSM의 고성능 제어를 위하여 신경회로망 제어기법을 이용하여 SV PWM 인버터를 제어한다. 또한 속도변화 및 파라미터 변동에 대하여 종래의 PI 제어와 비교하여 그 타당성을 분석한다.

#### 2. IPMSM의 모델링

그림1은 IPMSM의 일반적인 벡터제어 블록도를 나타낸다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.



〈그림 1〉 속도제어를 위한 벡터제어 IPMSM의 블록도

$i_d^*$ 와  $i_q^*$ 는 지령 토크 및 자속 성분의 전류를 나타내며 전류제어에 의해  $v_d^*$ ,  $v_b^*$ ,  $v_c^*$ 를 얻는다. 이를 SV PWM 인버터에 의해 IPMSM을 제어한다. 회전자 위치정보  $\theta_r$ 는 좌표변환에 이용한다.

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.

$$p i_d = (v_d - R i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \quad (1)$$

$$p i_q = (v_q - R i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_{af}) / L_q \quad (2)$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \quad (3)$$

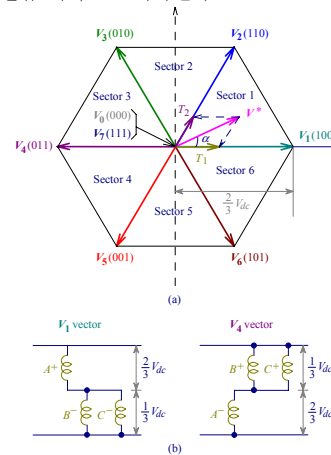
여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

#### 3. NN(Neural Network) SV PWM

##### 3.1 SV PWM

그림 2는 공간전압 벡터도를 나타낸다.



〈그림 2〉 공간전압 벡터

전압에 대한 한 주기 내에서의 적분으로부터 인가시간을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\int_0^{T_s} V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_0 dt \quad (5)$$

$T_s \cdot V^* = (T_1 \cdot V_n + T_2 \cdot V_{n+1})$   
 기준벡터가 벡터 공간상에서 섹터 1에 주어진다 가정에서 식(1)의 전압을 벡터성분으로 환산하면 다음과 같다.

$$T_s \cdot V^* = T_1 V_1 + T_2 V_2 \quad (6)$$

여기서  $V^*$ ,  $V_2$ 를 복소수로 표현하면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{2}{3} V_{dc} \quad (7)$$

$$V_2 = X + jY = \frac{2}{3} V_{dc} (\cos \frac{\pi}{3} + j \sin \frac{\pi}{3})$$

$$V^* = |V^*| (X + jY) = |V^*| (\cos \alpha + j \sin \alpha)$$

식(7)을 식(6)에 대입하고 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$T_s \cdot |V^*| \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{3} \\ \sin \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

단,  $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

따라서 각 유효벡터가 인가되는 시간을 계산하면 다음과 같다.

$$T_s \cdot |V^*| \cdot \cos \alpha = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \cos \frac{\pi}{3} \quad (9)$$

$$T_s \cdot |V^*| \cdot \sin \alpha = T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{T_s \cdot |V^*| \sin \alpha}{\frac{2}{3} V_{dc} \cdot \sin \frac{\pi}{3}} \quad (11)$$

식(11)을 식(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_s \cdot |V^*| \cdot \cos \alpha = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} + \frac{T_s \cdot |V^*| \cdot \cos \frac{\pi}{3} \sin \alpha}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (12)$$

식(12)을  $T_1$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} = T_s \cdot |\mathbf{V}^*| \cdot \cos \alpha - \frac{T_s \cdot |\mathbf{V}^*| \cdot \cos \frac{\pi}{3} \sin \alpha}{\sin \frac{\pi}{3}}$$

$$= T_s \cdot |\mathbf{V}^*| \left[ \frac{\sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha - \cos \frac{\pi}{3} \sin \alpha}{\sin \frac{\pi}{3}} \right] \quad (13)$$

$$T_1 = T_s \cdot \frac{|\mathbf{V}^*|}{\frac{2}{3} V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \quad (14)$$

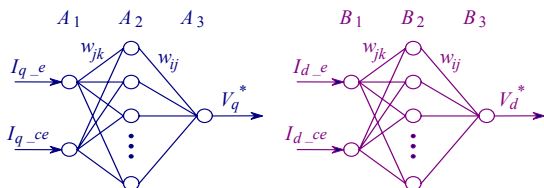
$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (15)$$

식(13)-(15)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} T_1 = T_s \cdot \frac{|\mathbf{V}^*|}{\frac{2}{3} V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \\ T_2 = T_s \cdot \frac{|\mathbf{V}^*|}{\frac{2}{3} V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin \frac{\pi}{3}} \\ T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \end{cases} \quad (16)$$

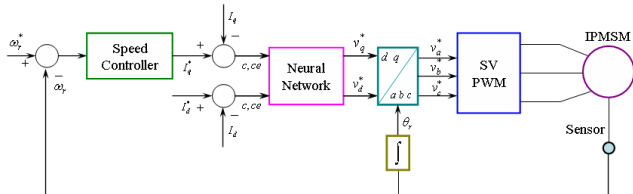
### 3.2. NN-SV PWM

공간벡터 PWM의 제어를 위해 IPMSM의 지령 전압을 계산하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 지령 전압을 구하기 위해 신경회로망 제어기법을 적용하였으며, 그림3은 신경회로망 제어기의 구조를 나타내고 있다.



<그림 3> 신경회로망 제어기의 구조

신경회로망 제어의 입력은  $d, q$  축 전류의 오차와 오차 변화분이며, 출력은 지령  $d, q$  축 전압을 나타낸다.  $d, q$  축 전압은 축 변환(axis Transform)을 통해 지령 3상 전압을 출력하며, 이러한 3상 지령전압을 통해 전동기를 구동한다. 그림 4는 본 논문에서 제시한 NN-SV PWM 제어를 이용한 IPMSM의 제어시스템을 나타낸다.

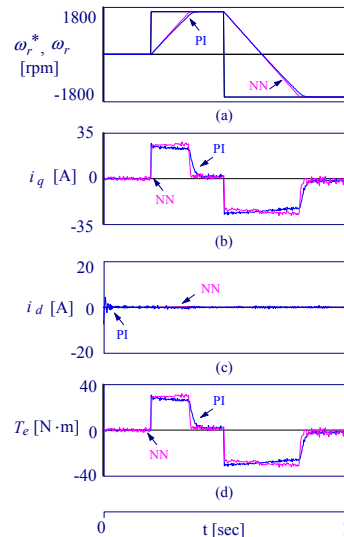


<그림 4> NN SV-PWM 제어를 이용한 SynRM의 제어시스템

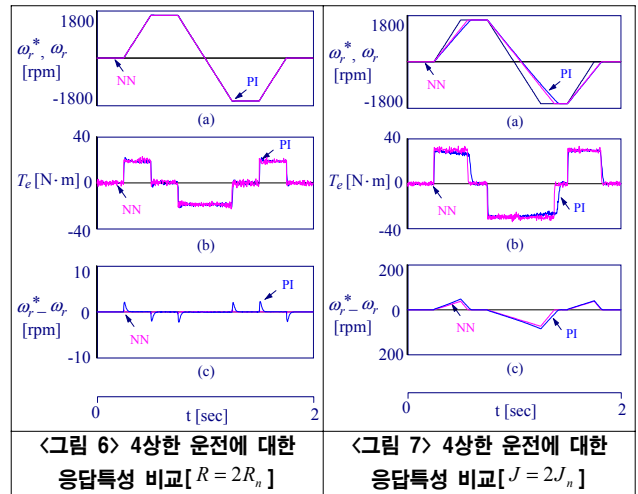
### 4. 시스템의 성능결과

그림 5는 0.2[sec]에 1800[rpm]으로 운전중 0.5[sec]에 -1800[rpm]으로 정·역 운전 운전하였을 때 인공지능 제어와 PI 제어기의 응답특성을 비교한 것이다. 정·역 운전을 하였을 경우에도 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 상승시간이 빠르고 빠르게 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 회전자 저항이 2배로 변화하였을 때 응답특성을 보여준다. 회전자 저항이 2배로 변화하였을 경우에도 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 속도오차가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 7은 관성이 2 배로 변화하였을 때 응답특성을 비교한 것으로서 인공지능제어가 PI 제어에 비하여 속도오차 작게 나타나며 양호한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.



<그림 5> 정·역 운전에 대한 응답특성 비교



<그림 6> 4상한 운전에 대한 응답특성 비교 [R = 2R<sub>n</sub>]

<그림 7> 4상한 운전에 대한 응답특성 비교 [J = 2J<sub>n</sub>]

### 5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 고성능 제어를 위하여 신경회로망 제어를 적용한 SV-PWM 제어를 제시하였다. IPMSM 드라이브의 속도 및 과라미터 변동에 대하여 응답특성을 구하였으며, 신경회로망 제어와 PI 제어를 비교하였다. 종래에는 지령  $d, q$  축 지령 전압을 PI 제어기를 사용하여 구하였으나 본 논문에서는 신경회로망 제어를 이용하여 지령  $d, q$  축 전압을 구하였다.

신경회로망 제어를 적용한 SV-PWM 제어는 종래의 PI 제어기에 비하여 오버슈트 및 상승시간이 작게 나타났으며, 빠르게 안정화되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 인공지능 SV-PWM 제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] van der Broeck, Skudelny, Stanke., "Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors," IEEE Trans, vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 1998.
- [2] Z. Ibrahim and E. Levi, "Comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance AC drives using experimental approach," Proc. of IEEE IAS'2000, Rome, Italy, CD-ROM paper 46-3, 2000.
- [3] M. C. Ficarra, et al., "Adaptive predictive speed controller for induction motor drive," IEEE IECON'99, Conf. Rec., vol. 2, pp. 630-635, 1999.
- [4] Y. Li, et al., "Predictive control of torque and flux of induction motor with an improved stator flux estimator," IEEE PESC Conf. Rec., vol. 3, pp. 1464-1469, 2001.