

인공지능 SV-PWM 제어를 이용한 SynRM의 고성능 제어

(High Performance Control of SynRM using Artificial Intelligent SV-PWM Control)

김도연* · 고재섭 · 최정식 · 정철호 · 정병진 · 전영선 · 정동화

(Do·Yeon Kim* · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Chul-Ho Jung · Byung-Jin Jung · Young-Sun Jun · Dong-Hwa Chung)

Abstract

This paper is proposed a high performance speed control of the synchronous reluctance motor through the artificial intelligent SV-PWM. SV-PWM is controlled using fuzzy control that is artificial intelligent 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. Fuzzy control has a advantage which can be robustly controlled. Simulation results are presented to show the validity of the proposed algorithm

1. 서론

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 제어를 많이 사용하고 있다. 이는 PI 제어가 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]-[6]. 본 논문에서는 SynRM의 고성능 제어를 위하여 인공지능 제어기법인 퍼지제어를 이용하여 SV PWM 인버터를 제어한다. 지령속도, 부하변화, 관성 및 저항 등과 같은 파라미터 변동에 대하여 종래의 PI 제어와 비교하여 그 타당성을 분석한다.

2. SynRM의 모델링

SynRM의 이상적인 등가회로는 그림 1과 같다.

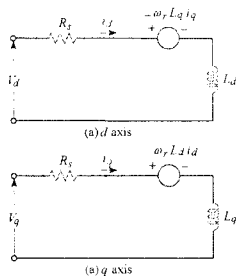


그림 1 SynRM의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of SynRM

이 등가회로에 의한 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R_d i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = R_q i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d \quad (2)$$

SynRM의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P (L_d - L_q) i_d i_q \quad (3)$$

식(3)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P L_d (1 - L_q / L_d) i_d i_q \quad (4)$$

3. 인공지능 SV PWM

3.1 SV PWM

그림 2는 공간전압 벡터도를 나타낸다.

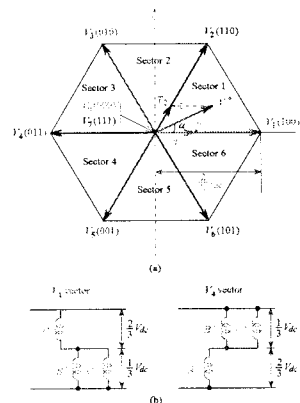


그림 2 공간전압 벡터
Fig. 2 space voltage vector

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

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

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

기준벡터가 벡터 공간상에서 섹터 1에 주어진다고 가정에서 식(5)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.

$$V_1 = \frac{2}{3} V_{dc}$$

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

$$V^* = |V^*| (X + jY) = |V^*| (\cos \alpha + j \sin \alpha) \quad (7)$$

식(7)을 식(6)에 대입하고 행렬로 표현하면 다음과 같다.

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

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)를 T_1 에 대해 정리하면 다음과 같다.

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

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

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

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

식(12)-(14)를 정리하면 다음과 같다.

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

3.2. 인공지능 SV PWM

그림 3은 인공지능 제어를 적용한 SV PWM의 전체 구성도를 나타낸다.

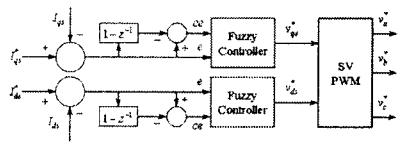


그림 3 인공지능 제어에 의한 SV-PWM 전체 구성도
Fig. 3 Block diagram of SV-PWM by artificial intelligent control

퍼지제어기의 입력은 d, q 축 전류의 오차와 오차 변화분이며, V_u^*, V_w^* 를 출력한다. SV PWM은 V_u^*, V_w^* 를 입력받아 전동기 구동을 위한 V_u, V_w, V_c^* 를 출력한다. 퍼지제어기에 사용된 퍼지룰은 표 1과 같다. 퍼지집합은 같은 쪽으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

표 1 퍼지룰 베이스

Table 1 Fuzzy rule base

$e_d \backslash e_{dq}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

그림 4는 본 논문에서 제시한 인공지능 SV-PWM 제어를 이용한 SynRM의 제어시스템을 나타낸다.

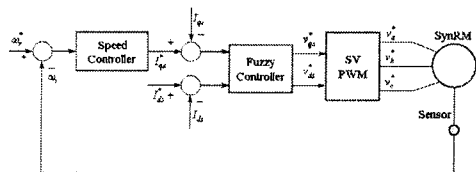


그림 4 인공지능 SV-PWM 제어를 이용한 SynRM의 제어시스템
Fig. 4 Control system of SynRM using artificial intelligent SV-PWM control

5. 시스템의 성능결과

그림 5는 0.2[sec]에 1800[rpm]으로 운전중 0.6[sec]초에서 0.8[sec]사이에서 부하토크 5[N.m]를 인가하였을 때 인공지능 제어와 PI 제어의 비교를 나타낸다. (a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 q 축 전류, (c)는 d 축전류 (d)는 발생 토크를 나타낸다.

그림 6은 인공지능 제어와 PI 제어의 응답특성을 자세히 비교하기 위하여 그림 9를 확대해석한 것으로서, (a)는 초기상태 속도변화, (b)는 q 축 전류를 나타낸다. 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 상승시간이 짧고, 정상상태에 빠르게 도달하는 것을 알 수 있다. (c)는 부하토크를 인가하였을 때 속도변화이며, (d)는 q 축 전류를 나타낸다. 부하변화에 대해서도 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 오버슈트가 작고 빠르게 안정화되고 있다.

그림 7은 0.2[sec]에 1800[rpm]으로 운전중 0.5[sec]에 -1800[rpm]으로 정·역 운전 운전하였을 때 인공지능 제어와 PI 제어의 응답특성을 비교한 것이다. 정·역운전을 하였을 경우에도 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 상승시간이 빠르고 빠르게 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

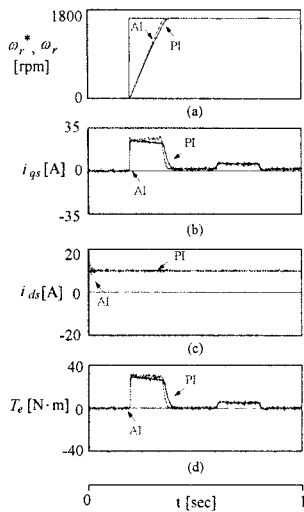


그림 5 스텝지령속도 및 부하변화에 대한 응답특성 비교
Fig. 5 Comparison of response characteristic about step command speed and load torque variation

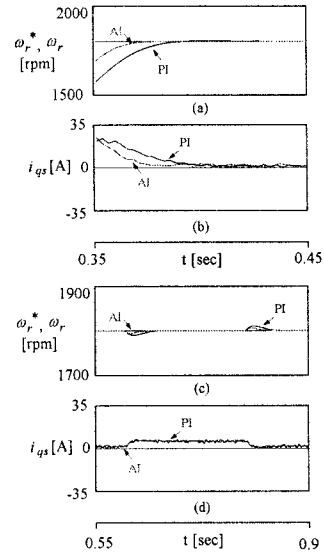


그림 6 스텝지령속도 및 부하변화에 대한 응답특성 비교
Fig. 6 Comparison of response characteristic about step command speed and load torque variation

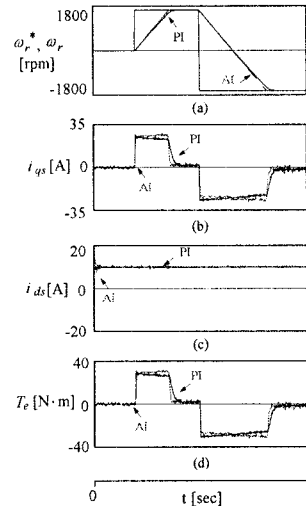


그림 7 정·역 운전에 대한 응답특성 비교
Fig. 7 Comparison of response characteristic about forward and reverse operation

그림 8은 4상한 운전에 대하여 응답특성을 비교한 것으로, (a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 발생토크, (c)는 속도오차를 나타낸다. 그림 (c)에 나타났것과 같이 인공지능 제어가 PI 제어에 비하여 속도오차가 매우 작게 나타나는 것을 보여준다.

그림 9는 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 10은 관성이 2배로

변화하였을 때 응답특성을 비교한 것으로서 인공지능제어가 PI 제어에 비하여 속도오차 작게 나타나며 양호한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

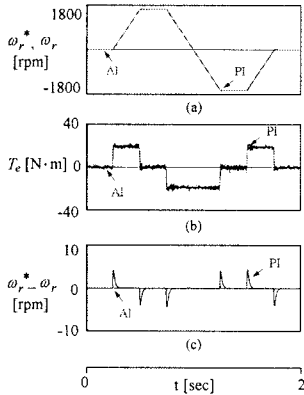


그림 8 4상한 운전에 대한 응답특성 비교
Fig. 8 Comparison of response characteristic about quadrant operation

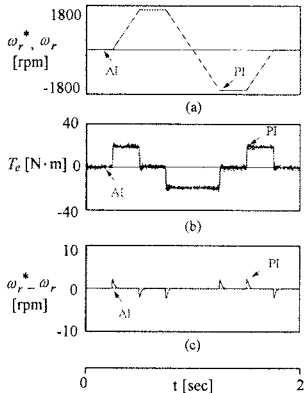


그림 9 4상한 운전에 대한 응답특성 비교 [$R = 2R_n$]
Fig. 9 Comparison of response characteristic about quadrant operation [$R = 2R_n$]

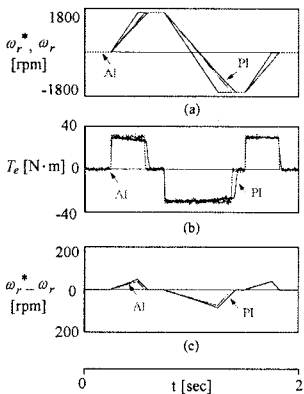


그림 10 4상한 운전에 대한 응답특성 비교 [$J = 2J_n$]
Fig. 10 Comparison of response characteristic about quadrant operation [$J = 2J_n$]

5. 결 론

본 논문에서는 SynRM의 고성능 제어를 위하여 인공지능 제어인 퍼지제어를 적용한 SV-PWM 제어를 제시하였다.

SynRM 드라이브의 속도 및 부하변화와 회전자 저항 및 관성변화등과 같은 파라미터 변동에 대하여 응답특성을 구하였으며, 인공지능 제어와 PI 제어를 비교하였다. 종래에는 지령 d, q 축 전압을 PI 제어기를 사용하여 구하였으나 본 논문에서는 인공지능 제어인 퍼지 제어를 이용하여 지령 d, q 축 전압을 구하였다.

인공지능 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.
- [5] J. Chen and Y. Li, "Virtual vector based predictive control of torque and flux of induction motor and speed sensorless drives," IEEE IAS Annu. Mtg., vol. 4, pp. 2606-2613.
- [6] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Trans. on IA, vol. 22, 1986.