

# 80296SA 를 이용한 영구자석 동기전동기 벡터제어의 완전 디지털화

안 영 식\*, 배 정 용, 이 흥 회

## A fully digitized Vector Control of PMSM using 80296SA

Young-Shick Ahn, Jung-Yong Bae, Hong-Hee Lee

### ABSTRACT

The adaptation to vector control theory is so generalized that it is widely used for implementing the high-performance of AC machine. Nowadays, One-Chip microprocessors or DSP chips are being well-used to implement Vector Control Algorithm. DSP Chip have less flexibility for memory decoding and I/O rather than One-Chip microprocessor so that is requires more additional circuit and high cost. And the past One-Chip micro processors have difficult of implementation the complex algorithm because of small memory capacity and low arithmetic performance.

Therefore we implemented the vector control algorithm of PMSM(Permanent Magnetic Synchronous Motors) using 80296SA form intel®, which have many features as 6M memory space, 50MHz clock frequency, including memory decoding circuit and general I/O, Special I/O(EPA, Interrupt controller, Timer/Count, PWM generator) which is proper controller for the complex algorithm or operation program requiring so much memory capacity,

So in this paper we fully digitized the vector control of PMSM included SVPWM Voltage controller using the intel 80296SA

연산이 가능하지만, 메모리 디코딩과 I/O 유연성이 부족하여 추가적인 회로가 많이 요구되고 가격이 비싸다. 그리고 기존의 원칩프로세서(80C196KC)의 경우 연산속도가 비교적 느리고 메모리 용량이 작아 복잡한 알고리즘 구현에 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 복잡한 제어 알고리즘의 연산을 위해 최근에 새로이 출시된 Intel사의 마이크로프로세서인 80296SA 를 사용하였다. 80296SA 는 6Mbyte 메모리공간, 50MHz 동작 주파수, 메모리 디코딩 회로와 일반용도의 I/O 및 특수기능 I/O 를 내장하고 있어 복잡한 알고리즘이나 메모리량을 많이 차지하는 운전상황의 프로그램등에도 적합하다. 그리고 공간벡터 PWM 제어기 적용과 회로 집적화를 위해 본 실험에서는 PLD 를 사용하였다. PLD 는 사용자의 프로그램에 의해 특별한 로직을 구현할 수 있는 소자회로 집적화에 필수적이며 최근에는 많은 분야에 적용되고 있다.

본 논문에서는 Intel사의 고성능 마이크로프로세서인 80296SA 와 PLD 를 사용하여 공간벡터 PWM 전압제어를 구현하고 영구자석 동기전동기 벡터 제어의 완전 디지털 제어를 구현하였다.

**Key Words** : Vector Control, PMSM, SVPWM, 80296SA

## 2. PMSM 의 모델링 및 제어

전동기의 과도상태 해석을 위해 자주 사용되는 2상 좌표계는 고정자측을 기준으로 하는 고정좌표( $\alpha-\beta$ )계와 동기속도로 회전하는 회전좌표( $d-q$ )계로 나누어 진다. 그림 2-1 은 3상 좌표축, 고정좌표축( $\alpha-\beta$ )과 회전좌표축( $d-q$ )의 관계를 나타낸다.

## 1. 서론

영구자석 동기전동기의 고효율 운전과 정밀한 위치 및 속도 제어를 위해 벡터제어기법이 널리 사용되고 있다.<sup>[1], [2]</sup> 영구자석 동기전동기의 벡터제어를 위해 대부분 PWM 인버터를 사용하며 PWM 인버터의 성능은 전동기의 위치 및 속도의 과도응답, 전류 및 토크리플 등 전동기 제어 특성에 큰 영향을 미치므로 PWM 제어기법에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.<sup>[3], [4]</sup> 기존에는 비교적 제어알고리즘이 간단한 삼각파 비교기법과 히스테리시스제어기법을 사용하였으나, 이 제어기들은 추가적인 아날로그회로를 많이 요구하며 회로집적화에 어려움이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 공간벡터 PWM 제어기법이 많이 연구되고 있다.<sup>[5], [6]</sup> 공간벡터 PWM 제어기법은 스위칭 주파수가 일정하며 전류의 고조파성분을 줄이고 최대 출력전류를 높여주는 장점이 있으며 그 구현이 있어 추가적인 아날로그 회로를 요구하지 않아 완전 디지털화 시킬 수 있다.<sup>[4], [5]</sup> 많은 연산량을 요구하는 벡터제어와 공간벡터 PWM 제어기 알고리즘 연산을 위해 원칩 마이크로 프로세서나 DSP 칩이 많이 사용되고 있다. DSP 칩의 경우 부동소수점

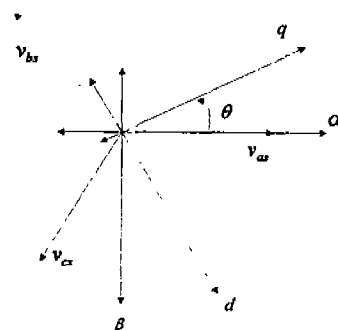


그림 2-1. 2상 좌표계

영구자석 동기전동기의 동가모델은 그림 2-2 와 같으며 그림 2-1 의 2상 좌표계에 의한 영구자석 동기전동기의 회전좌표축( $d-q$ )상의 전압방정식 및 운동

방정식은 식(2-1)과 같다.

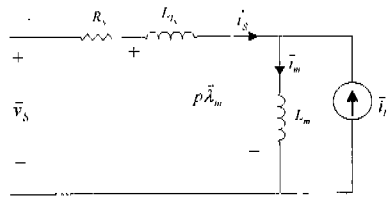


그림 2-2 영구자석 동기전동기의 등가모델

$$p i_{ds} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ds} + \omega i_{qs} + \frac{1}{L_s} v_{ds} \quad \text{식(2-1a)}$$

$$p i_{qs} = -\omega i_{ds} - \frac{R_s}{L_s} i_{qs} + \frac{1}{L_s} v_{qs} - \frac{\Lambda_m}{L_s} \omega \quad \text{식(2-1b)}$$

$$p \omega = \frac{3P^2 \Lambda_m}{2J} i_{qs} - \frac{B}{J} \omega - \frac{P}{J} T_l \quad \text{식(2-1c)}$$

$L_s$ 는 고정자측 자기 리액턴스이고,  $R_s$ 는 고정자 저항  $\Lambda_m$ 은 고정자 권선을 쇄교하는 영구자석에 의한 자속을 나타낸다.

본 논문에서는 전압 제어형 벡터제어를 사용하므로 디커플링제어를 위해 새로운 제어입력  $u_{ds}, u_{qs}$ 를 사용하여 식(2-1)을 다음과 같이 선형화 했다.<sup>[6]</sup>

$$u_{ds} = v_{ds} + L_s \omega i_{qs} \quad \text{식(2-2a)}$$

$$u_{qs} = v_{qs} - L_s \omega i_{ds} \quad \text{식(2-2b)}$$

따라서 영구자석 동기전동기의 전압 방정식은 식(2-3)과 같이 된다.

$$p i_{ds} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ds} + \frac{1}{L_s} u_{ds} \quad \text{식(2-3a)}$$

$$p i_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} i_{qs} - \frac{\Lambda_m}{L_s} \omega + \frac{1}{L_s} u_{qs} \quad \text{식(2-3b)}$$

식(2-3)을 이용한 영구자석 동기전동기의 벡터제어 알고리즘은 그림 2-3의 블록다이어그램과 같다. 약계자 제어를 고려하지 않고 있으므로 직축분 전류지령치  $i_{ds}^* = 0$ 으로 하였으며 횡축분 전류지령치  $i_{qs}^*$ 는 속도오차로부터 구했다. 제어입력  $u_{ds}^*, u_{qs}^*$ 는 지령치 전류와 실제 전류의 오차로부터 구했으며 실제 전압지령치  $v_{ds}^*, v_{qs}^*$ 는 식(2-4)와 같이 구한다.

$$v_{ds}^* = u_{ds}^* - L_s \omega i_{qs} \quad \text{식(2-4a)}$$

$$v_{qs}^* = u_{qs}^* + L_s \omega i_{ds} \quad \text{식(2-4b)}$$

이 2상 전압지령치를 이용해 PLE를 사용한 Space Vector Controller가 3상 전압지령치를 만들어 낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 벡터제어 알고리즘과 공간전압벡터 PWM(SVPWM)의 모든 연산은 intel사의 고속 프로세서 80296SA를 통해 구현했다.

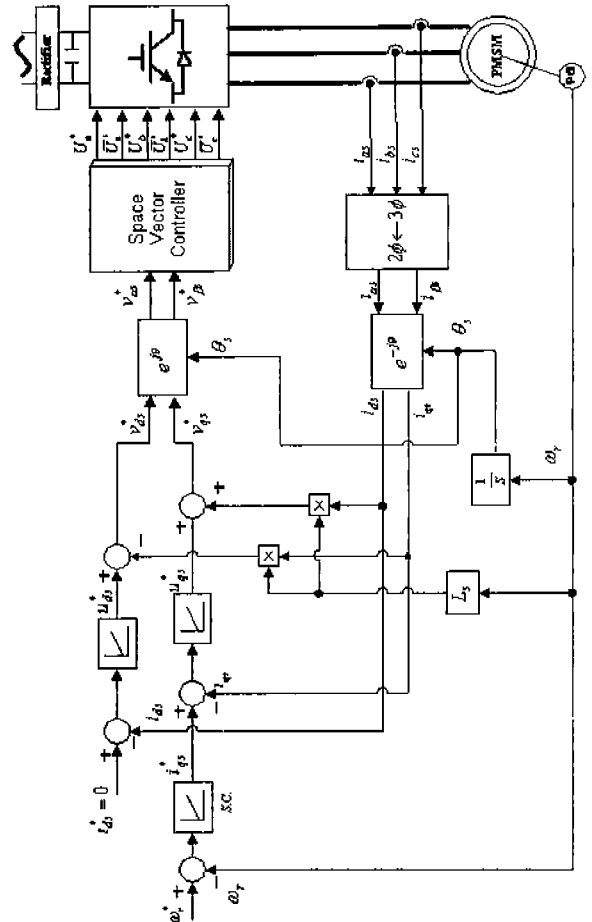


그림 2-3. 영구자석 동기전동기의 벡터제어 알고리즘 구성도

### 3. 공간 벡터 PWM 제어기(SVPWM)

영구자석 동기전동기 벡터제어의 완전 디지털제어를 위해 본 논문에서 사용한 공간벡터 PWM 전압제어기의 구성도는 그림 3-1과 같다.

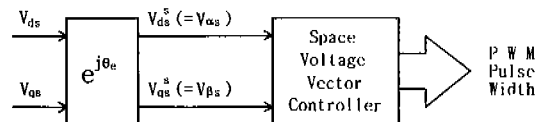


그림 3-1. 공간벡터 PWM 전압제어기

공간 벡터 PWM 제어기의 기본 원리는 그림 3-2와 같다. 8개의 PWM 스위칭 모드에 따른 공간전압 벡터도에서 형성된 6개의 Sector에 의해, 만약 정지좌표계( $\alpha-\beta$ )에서 결정된 기준전압 벡터가 Sector 1에 있을 경우 V(1)전압 벡터와 V(2)전압 벡터의 조합으로 이 기준전압 벡터를 만들 수 있다. 따라서 샘플링 시간( $T_s$ )에서  $T_1$ 시간 동안 V(1)전압을,  $T_2$ 시간동안 V(2)전압을 인가하여 기준전압( $V_{ref}$ )을 만드는 것이다.

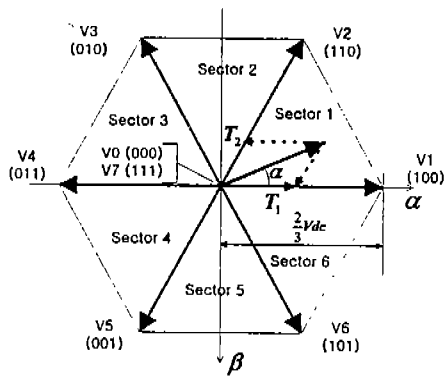


그림 3-2. 공간 벡터도

공간벡터 PWM구현을 위해서는  $V_{ref}$ 에 따른 스위칭 시간  $T_1, T_2$ 의 계산이 필요하다. 예를 들어 Sector1에서는 식(3-2)가 성립하고 이 식에서  $V_{ref}$ 를 고정 좌표계( $\alpha-\beta$ )축으로 분리시켜 정리하면 식(3-3)과 같은  $T_1, T_2, T_0$ 에 대한 관계식을 구할 수 있다.

$$\int_0^{T_h} V_{ref} dt = \int_0^{T_1} V(1) dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V(2) dt + \int_{T_1+T_2}^{T_h} V(0) dt \quad \text{식(3-2)}$$

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_h}{V_{dc}} \left[ V_{\alpha}^* \sin \frac{n\pi}{3} + V_{\beta}^* \cos \frac{n\pi}{3} \right] \quad \text{식(3-3a)}$$

$$T_2 = -\frac{\sqrt{3}T_h}{V_{dc}} \left[ V_{\alpha}^* \sin \frac{(n-1)\pi}{3} + V_{\beta}^* \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \right] \quad \text{식(3-3b)}$$

$$T_0 = T_h - (T_1 + T_2) \quad \text{식(3-3c)}$$

그리고 sector1에서의 PWM 파형은 그림 3-3와 같다.

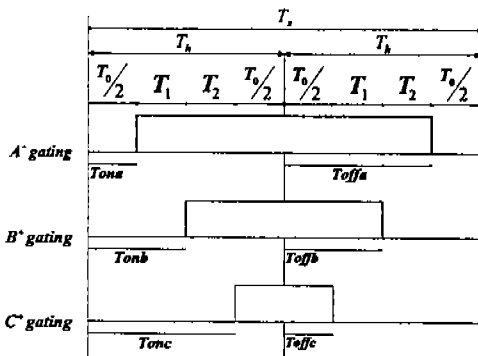


그림 3-3. Sector = 1 일 때의 PWM 파형

#### 4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 속도 제어 루우프 샘플링 시간과 토크제어 샘플링 시간은 실제 구현시의 시간(0.2[ms])과 같다. 시뮬레이션 결과는 그림 4-1에서 그림 4-3에 나타내었다. 그림 4-1은 부하에 따른 즉, 무부하, 1/2 부하, 전부하로 변화 할 때 속도의 영향과 토크분 전류의 실제치를 나타낸다. 현재 속도는 200RPM 이고 전동기 회전자 위치를 따른 SVPWM

sector와 직축분 횡축분 전류를 보여주고 있다 또한 그림 4-2는 속도와 부하가 동시에 변화할 경우를 나타내고 그림 4-3은 전부하시 정, 역운전을 행할 경우를 나타낸다.

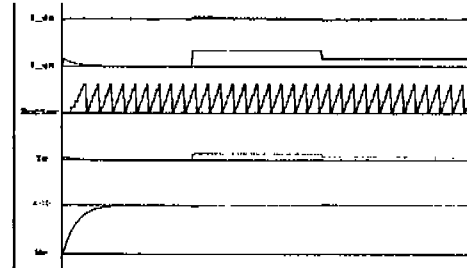


그림 4-1 부하의 따른 전동기 속도의 영향

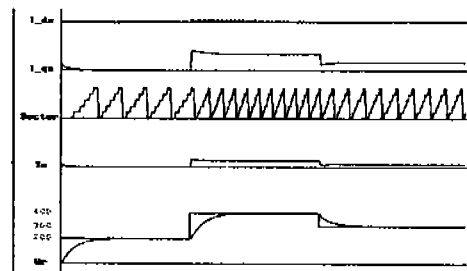


그림 4-2 부하와 속도변화에 따른 전동기 영향

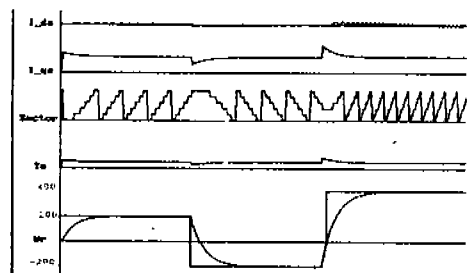


그림 4-3 전부하시 정, 역운전에 따른 전동기 영향

#### 5. 80296SA

본 논문에서는 마이크로 프로세서 제어를 intel사의 고성능 One Chip Processor인 80296SA를 사용하였다. 그림 5-1은 80296SA의 내부 블록도를 나타낸다. 그림에서와 같이 80296SA는 메모리 디코딩 회로와 일반용도 I/O 및 특수기능 I/O를 내장하고 있으며 6Mbyte 메모리 공간, 50MHz의 빠른 주파수로 동작한다. 표 5-1은 80296SA에 내장된 각종 I/O를 이용하여 본 연구의 제어 알고리즘 구현을 위한 I/O 구성이다.

이름	형태	기능
EPA0	OUT	2ms Speed sampling time 발생
EPA1	IN	Speed Interrupt 발생
TIMER1	내부	EPA0, EPA1 기준 클럭
TIMER2	IN	PLG 입력
EPORT.4	OUT	CPU Status LED
EXT INT1	IN	FALUT(과전류, IPM)
EXT INT0	IN	PLG Z상 입력

PI.7	IN	전동기 회전 방향
P4.2, P4.2, P4.3	IN	U, V, W 상 입력
CS2	OUT	ADC base Address
CS3	OUT	PLE Count Address

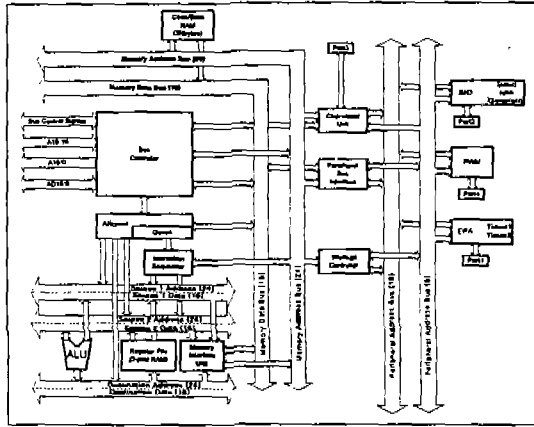


그림 5-1 80296SA 내부 블록도

### 6. 실험 결과

본 연구에서는 영구자석 동기전동기 벡터제어의 완전 디지털제어가 가능함을 실험을 통해 확인하였다. 제어를 위한 시스템 구성도는 그림 6-1 과 같으며, 본 실험에서 사용한 전동기 사양은 표 6-1 과 같다.

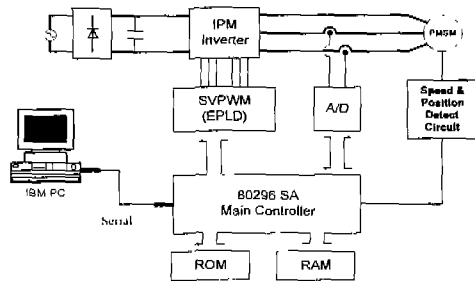


그림 6-1 제어시스템 구성도

정격 출력	400 W	정격 속도	3000rpm
극 수	8	마찰계수	0.00209
La	2.5	관성모멘트	0.000596
Ls	0.01098	자속	0.1853

표 6-1 전동기 사양

그림 6-1 은 무부하 상태에서 기준속도를 300[RPM]으로 기동 하였을 때 벡터제어 SVPWM 제어기의 PWM 전압 출력파형을 나타내고 그림 6-2 는 그림 6-1 의 스펙트럼 분석 파형을 나타내고 있다.

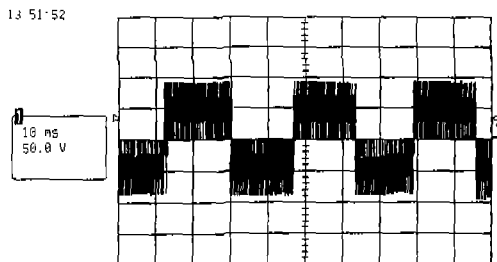


그림 6-1 벡터제어 SVPWM 제어기 PWM 파형

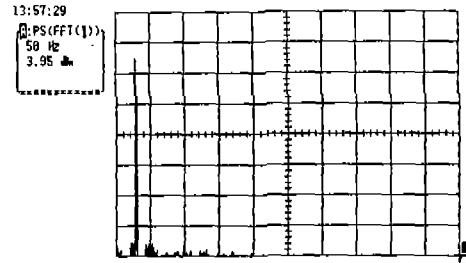


그림 6-2. 그림 6-1 의 스펙트럼 분석

### 7. 결론

본 논문에서는 intel 80296SA 를 이용하여 영구자석 동기 전동기의 완전 디지털화를 이룩하였다. 80296SA 는 기존의 원칩 마이크로 컨트롤러와 달리 전체 6Mbyte 메모리 공간을 사용할 수 있으므로 자기진단 체크 프로그램과 초기에 많은 환경설정을 요구하는 곳에 사용할 수 있다. 또한 메모리 디코딩이나 각종 I/O 가 내장되어 있어 구성이 간단하다. 또한 벡터제어에 필요한 각종 알고리즘 연산을 200[us]이내에 처리하여 실시간 제어가 가능하게 했다.

### 8. 참고 문헌

- [1] D.W.Novotny and T.A.Lipo, "Vector control and dynamics of AC drives" carendon press. OXFORD 1996
- [2] Gordon R. Selmon, "Electric Machines and Drives" University of Toronto
- [3] D. Wuest, F. Jenni, " Space vector based current control schemes for voltage source inverters" 1993 IEEE Trans. on ind pp. 986-992
- [4] Heinz Willi Van Der Broeck, Hans-Christoph skudelny, George Viktor Stanke " Analysis and Realization of a pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors" IEEE Trans. on Ind. App, vol. 24, NO. 1, January/February 1988 pp. 142 - 150
- [5] Marian P. Kazmierkoski, Maciei A. Dzieciakowski, Waldemar Sulkowski, "Novel Space Vector Based Current Controllers for PWM-Inverters " IEEE Trans. on Power Electronics VOL. 6, NO. 1, January 1991 pp. 158 - 166
- [6] 이흥희, " 상태관측기에 의한 영구자석형 동기전동기의 속도 추정 벡터제어 알고리즘 개발" 공학 연구논문집 제 25 권 제 1 호 pp. 89-98, 울산대학교
- [7] 80296SA Microcontroller User's Manual, intel september 1996