

# 유도전동기의 속도제어 기술

金光培  
(韓國科學技術院 室長)

- 1. 서론
- 2. 유도전동기의 가변속제어 방식과 기술적 특징

- 3. 교류전동기의 벡터제어
- 4. 결론  
참고문헌

## 1 서론

전력전자공학(Power Electronics)은 전력공학, 전자공학 및 제어공학이 종합된 분야로서 전력을 전자공학적인 수단으로 제어하거나 형태를 바꾸어 이용하는 모든 범위를 포괄하여 말하는 데 그 응용분야는 전동기의 가변속제어를 비롯하여 각종 A.C. Power Supply, UPS System, Induction heating & welding, VSCF System, VAR Generator, HVDC transmission등 대단히 광범위하다.

이 중에서도 산업원동력의 대부분을 공급하는 전동기의 가변속제어분야는 산업설비의 자동화 추세에 따라 제어의 정밀도, 안정도 및 신뢰도가 중요시되고 있을 뿐만 아니라 특히 근래에 들어 에너지 비용이 상승함에 따라 전력변환에 따른 효율이 매우 중요시 되고 있어 미국의 GE, Westinghouse, 유럽의 Siemens, AEG, BBC, 일본의 Toshiba, Hitachi, Mitsubishi등의 우수한 대기업에 의해 꾸준히 개발되어 왔다.

고성능 가변속제어방식으로 종래에는 직류전동기의 thyristor-Leonard 방식이 주류를 이루어 왔으며 현재에도 그 우수한 제어성은 높게 평가되고 있다. 그러나 직류전동기는 값이 비싸고 기계적인 구조상 보수유지비가 많이 드는 단점이 있다. 이에 비해 교류전동기는 기계적인 구조가 견고하고 보수유지가 용이하며 가격이 저렴한 잇점이 있

나 직류전동기에 비해 정밀한 속도제어가 어렵기 때문에 상당한 사용상의 제한이 따르게 되며 그 구동장치가 값이 비싸고 복잡하여 가변속제어제에는 잘 채택되지 않았다.

그러나 근래에 들어 thyristor의 성능이 개선되고 새로운 전력용 반도체소자(GTO, Power MOSFET, Power Transistor등)의 출현으로 구동회로가 간단화되었으며 제어용 전자회로도 LSI 기술향상과 microprocessor의 응용으로 가격이 저렴화되고 세분화된 정밀제어방식을 구사할 수 있게 되어 점차적으로 교류전동기가 가변속제어계에 채택되고 있다.

그림 1은 직류기 구동계와 교류기 구동계의 가격의 추이경향을 나타낸 것이다.<sup>1)</sup>

본고에서는 유도전동기의 가변속제어방식을 소개하고 이 중에서도 특히 최근에 상당한 주목을 받고 있는 벡터제어방식에 대하여 기술하기로 한다.

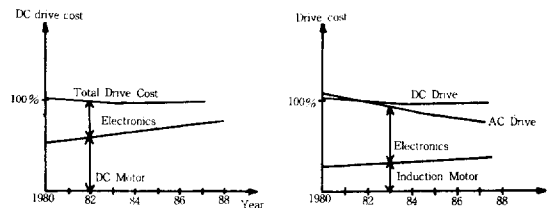


그림 1. 직류기 구동계와 교류기 구동계의 가격의 추이경향

## ② 유도전동기의 가변속도제어 방식과 기술적 특징

직류전동기의 경우 정류작용에 의해 계자전류  $i_f$ 에 의한 자속  $\Phi$ 와 전기자전류  $i_a$ 가 서로 직각을 이루고 있어 항상 최대토크를 발생시키고 있다. 이때 발생토크  $T_e$ 는 다음과 같이 된다.

$$T_e = K_1 \Phi i_a = K_2 i_f i_a$$

여기서  $K_1, K_2$ 는 상수이다.

따라서 자속 및 토크를 전기자전류와 계자전류에 의해 자유로이 제어할 수 있어 고성능 가변속도제어를 쉽게 행할 수 있다.

반면에 교류전동기의 경우는 토크를 결정하는 자속과 전류가 서로 직교하지 않고 위상각을 가지고 있으며 상호간섭도 크기 때문에 가변속제어는 비교적 복잡하게 된다.

유도전동기의 속도는 회전자의 동기속도와 slip에 의해 결정되는데 동기속도는 인가주파수에 의해, slip은 전동기에 공급되는 전압 또는 전류의 조절에 의해 제어된다. 따라서 속도제어 방식으로는

- 1) 고정자전압제어
- 2) 가변전압 가변주파수제어
- 3) 가변전류 가변주파수제어
- 4) 2차전력제어

등이 있다.<sup>2)</sup>

### 2.1 고정자전압제어

이 방식은 slip이 일정하면 토크는 1차전압의 제곱에 비례하는 특성을 이용한 것으로 높은 제어성은 기대할 수 없다.

그림 2에서 보는 바와 같이 기준속도  $\omega^*$ 와 실제 속도  $\omega$ 를 비교하여 속도조절기에 의해 점호각 신호를 발생시켜 고정자의 전압을 변화시키는 방법이다. 속도조절기는 lag-lead형 또는 PI형으로 설계할 수 있는데 PI형은 정상상태 편차가 0이 되는 장점이 있다. 그림 2의 내부 loop는 전류제한기로 사용되었다. 이 방식은 기동토크가 크게 요구되지 않는 펌프, 송풍기 등의 부하에 적합하며 slip이 큰 전동기(10~20%)에 사용된다. 고정자 전압의 감소에 따라 토크가 감소하고 저속으로 운전할 수록 효율이 나빠지며 고조파성분이 증가하는 단점이 있다.

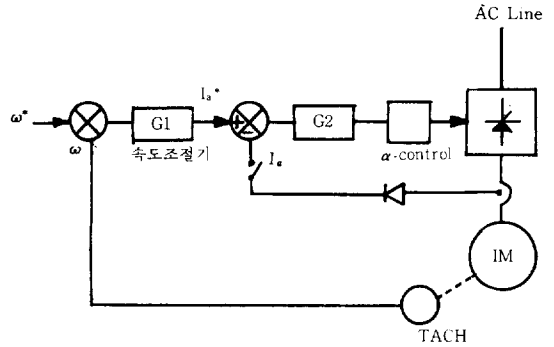


그림 2. 고정자 전압제어

### 2.2 전압원 인버터 속도제어

전압원 인버터에는 구형파 인버터와 PWM 인버터의 두가지가 있다. 구형파 인버터는 직류전압의 크기를 제어정류기로 변화시키고 주파수는 인버터에 의해 변화시키는 데 반하여 PWM 인버터는 제어기에는 diode 정류기를 사용하여 직류전압을 고정시키는 대신 인버터를 PWM 방식에 의해 구동함으로써 주파수와 전압을 동시에 바꾸는 것이다.

PWM 제어에는 microcomputer가 적합하며 그 방식에는 regular sampled PWM, natural sampled PWM, optimized PWM등이 있다.<sup>3)</sup>

주파수 변화에 따른 전압, 전류, 자속, 토크, 출력의 조절은 그림 3과 같이 정격주파수 이하에서는 정자속이 되도록 일정 V/F비 제어를 하고 정격주파수 이상에서는 자속을 감소시켜 정출력이 되도록 한다.

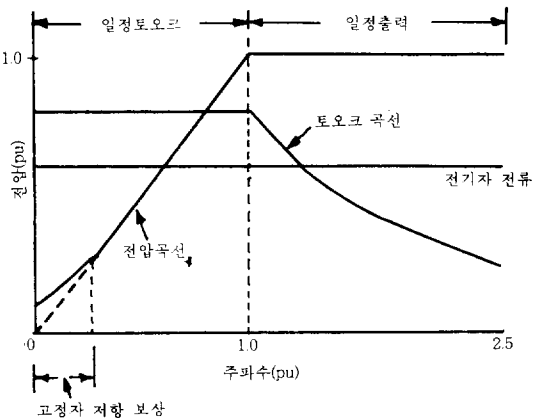


그림 3. 유도전동기의 주파수-전압 관계곡선

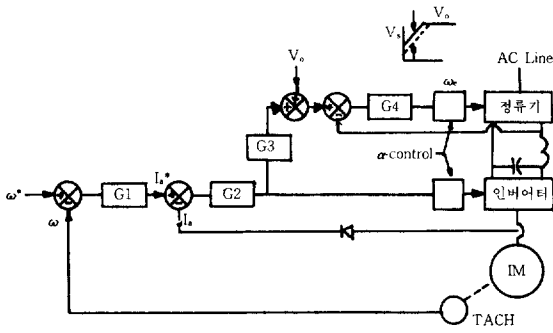


그림 4. 일정 V/F비 속도제어

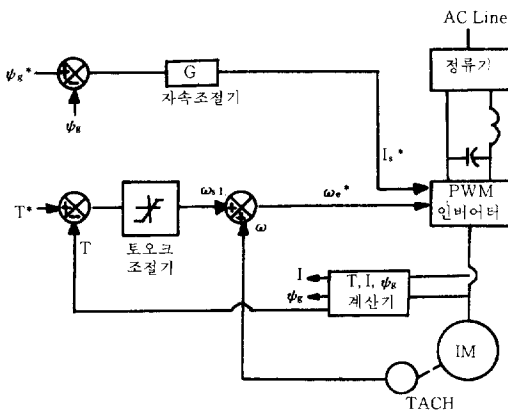


그림 5. PWM 인버터에 의한 자속 및 토크 제어

이상과 같은 제어방식을 구형파 인버터로 구성한 것이 그림 4이다.

그림 4에서 전동기속도  $\omega$ 가 기준속도를 넘으면 인버터주파수지령  $\omega_e$ 는 계속 증가하지만 정류기 전압지령  $V_s^*$ 는 고정시켜 약제자 제어를 행한다.

그림 5는 상당히 개선된 방식으로서 PWM 인버터를 사용하여 자속과 토크를 모두 폐loop 제어하는 방식을 나타낸 것이다.

토크 루우프에서는 기준토크  $T^*$ 와 전동기 토크  $T$ 에 의해 slip  $\omega_{sl}$ 이 결정되고 여기에 전동기속도  $\omega$ 가 합쳐져서 인버터 주파수지령  $\omega_e^*$ 가 발생된다.

자속 loop에서는 기준자속  $\psi_g^*$ 와 실제자속  $\psi_g$ 에 의해 전류지령  $I_s^*$ 를 발생시키는 데 이때 공극자속은 직류분권전동기에서 처럼 일정하게 유지시키거나 정상상태에서의 효율을 증가시키기 위하여

토크의 함수로 프로그램할 수도 있다.

자속과 토크의 제환신호는 전압과 전류로부터 계산된다. 따라서 계산모델의 정확성이 제어의 정확성을 좌우한다.

### 2.3 전류원 인버터 속도제어

전류원 인버터는 전압원 인버터에 비하여 신뢰성이 높고 때때로 발생할 수 있는 전류실패에도 안전한 반면 속도제어면에서는 응답속도가 느리고 주파수 범위가 낮으며 개loop 제어가 불가능한 단점이 있다.

그림 6은 전류원 인버터 속도제어 방식의 간단한 구성을 나타낸 것이다. 이 방식은 slip  $\omega_{sl}$ 을 일정하게 유지하는 것으로 공극자속의 변화가 심하여 특성이 좋지 않은 단점이 있다. 더욱 개선된 방식으로 그림 5와 같이 자속과 토크를 모두 폐loop제어하는 방식이 그림 7이다.

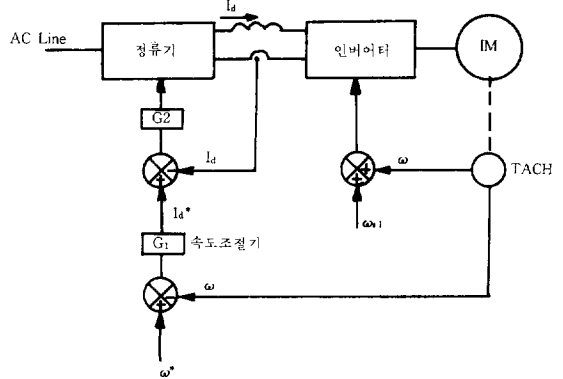


그림 6. 전류원 인버터에 의한 일정 slip 속도제어

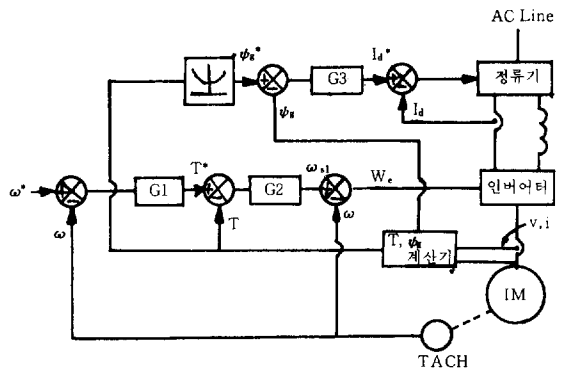


그림 7. 전류원 인버터에 의한 자속 및 토크 제어

### 2.4 2 차전력제어

권선형 유도전동기에 적용할 수 있는 구동방식으로서 회전자와 등가저항을 바꾸어 줌으로써 비례추이의 원리를 이용한 것이다. 이때 회전자의 slip전력은 인버터를 사용하여 전원으로 반환하는데 이 반환하는 전력의 크기에 비례하여 전동기의 slip이 정하여 지므로 slip이 0 보다 커서 동기속도보다 낮은 속도에서만 속도조절이 가능하다. (정지형 Kramer 방식) 한편 slip전력의 흐름이 양방향 모두 가능한 변환장치를 사용하면 동기속도보다 높은 속도로도 운전할 수 있다. (정지형 Scherbius 방식)

그림 8은 Kramer 제어방식을 나타낸것이다. 지령속도  $\omega^*$ 와 실제속도  $\omega$ 에 의해 인버터 전류지령  $I^*$ 가 발생되고 따라서 전류  $I$ 는 인버터의 점호각에 의해 제어된다.

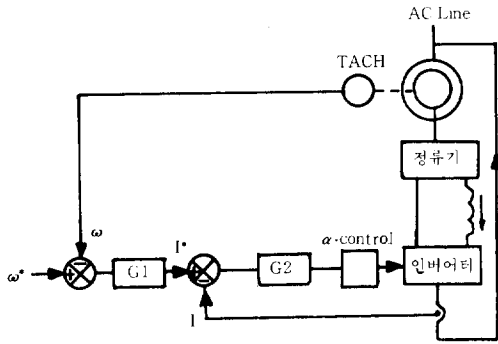


그림 8. 정지형 Kramer 구동 속도제어

### 2.5 Cycloconverter 속도제어

Cycloconverter는 전압과 주파수를 바꾸기 위하여 일정 주파수의 교류에서 DC-link의 개재없이 직접 다른 주파수의 교류로 변환시키는 장치이다. 출력주파수는 0에서부터 전원주파수의 1/2~1/3까지의 범위가 보통인데 최근에는 스위칭속도가 빠른 Power MOSFET의 개발로 주파수에 구애 받지않는 UFC에 대한 연구가 활발하다.

Cycloconverter에 의한 구동방식은 회생제동이 간단하고 4상한 운전이 쉬운 반면 3상 선로측의 역율이 나쁜 단점이 있다. 장치가 복잡하고 비싸기 때문에 ball mill 또는 cement mill과 같이 저속 대용량 전동기에 주로 이용된다.

### 3 교류전동기의 벡터제어

앞에서 설명한 주파수 제어방식에서는 고정자전류가 그 절대치만이 제어되고 고정자전류는 그때의 slip주파수에 대응하는 자속전류성분과 토오크 전류성분으로 분해되어 토오크가 발생된다.

따라서 계자전류와 전기자전류가 독립적으로 제어되는 직류전동기와 비교할 때 속도 및 토오크의 속응성은 따라갈 수 없는 정도이다. 그러므로 직류전동기와 같은 제어성을 추구하는 경우에는 주파수라는 평균치적 개념을 버리고 전압 또는 전류의 순시치제어를 행하여야 한다.

1970년도초 독일 siemens사의 F. Blaschke씨에 의해 제안된 벡터제어방식은 분권 직류전동기의 토오크 발생원리를 기본으로 해서 교류기의 고정자전류의 순시치 제어에 의해 직류기와 등가인 토오크 발생 방법을 추구한 것이다.<sup>4)</sup>

#### 3.1 벡터제어의 개념

교류전동기는 고정자전류 중에 여자전류성분과 토오크전류성분을 동시에 포함하고 있어 고정자전류의 절대치 제어에 의해서는 직류기와 같은 고성능 제어를 행할 수 없다.

그런데 전기자전류를 회전자계를 기준으로하여 자계와 평행인 성분, 즉 자속발생과 관계되는 자화전류  $i_M$ 과 자계에 수직인 성분, 즉 토오크 발생에 관계되는 토오크전류  $i_T$ 로 분해하여 이들을 독립적으로 제어를 하게되면 직류기와 같은 순시부하토오크에 대한 속응성을 가질 수 있다.

그림 9는 유도전동기에 대하여 이와 같은 관계를 나타낸 벡터도이다.

여기서  $\alpha, \beta$  축은 고정자의 기준좌표축이고 M, T축은 자계의 기준좌표축이며  $i_1$ 은 고정자전

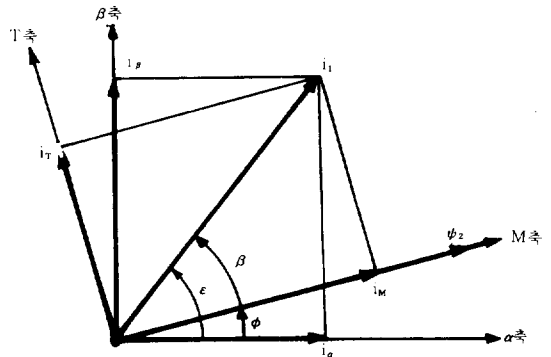


그림 9. 유도전동기의 전류 벡터도

류,  $\psi_2$ 는 회전자자속,  $i_M$ 은 자화전류성분,  $i_T$ 는 토오크전류성분이다.

따라서  $\alpha, \beta$  축에 대한 고정자전류와 회전자계를 기준으로 한 각 전류성분과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_M \\ i_T \end{pmatrix}$$

발생토크  $T_e$ 는

$$T_e = K\psi_2 i_T$$

로 주어지며 여기서  $K$ 는 토크 비례상수이다.

회전자자속  $\psi_2$ 가 일정하게 유지되면  $T_e$ 는  $i_T$ 에 비례하게 되어 토크  $T_e$ 는  $i_T$ 에 의해 쉽게 제어할 수 있다.

토크전류  $i_T$ 는 고정자전류  $i_1$  및 고정자전류와 회전자자속 사이의 위상각  $\beta$ 에 의해 제어된다. 또한  $i_M$ 에 의한  $\psi_2$ 의 조절로 직류기의 약계자방식에 해당하는 제어방법도 가능하다.

그림 10은 벡터제어의 기본구성도를 나타낸 것이다.

### 3.2 공극자속의 검출

벡터제어에 있어서 제어대상이 자속인 관계로

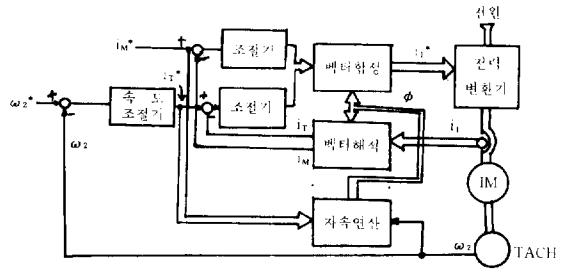


그림 10. 벡터제어의 기본구성도

정확한 자속위치와 자속량의 검출은 제어특성을 좌우한다.

공극의 자속을 검출하는 방법으로 Hall소자나 별도의 Sensing Coil을 고정자 권선에 배치하는 직접적인 측정에 의한 방법과 고정자의 전압 또는 전류로부터 간접적으로 계산하는 방법이 있는 데 후자의 방식에는 전압모델에 의한 방법과 전류모델에 의한 방법이 있다.<sup>5),6)</sup>

전류모델법은 넓은 속도범위에 동작하는 구동계의 자속계산에 적합한 반면회전자의 온도변화에 따른 회전자 저항 $R_2$ 의 변화로 그 결과가 영향을 많이 받는 단점이 있다. 전압모델법은 온도의 변화에 거의 영향을 받지 않으나 저속도에서는 유기

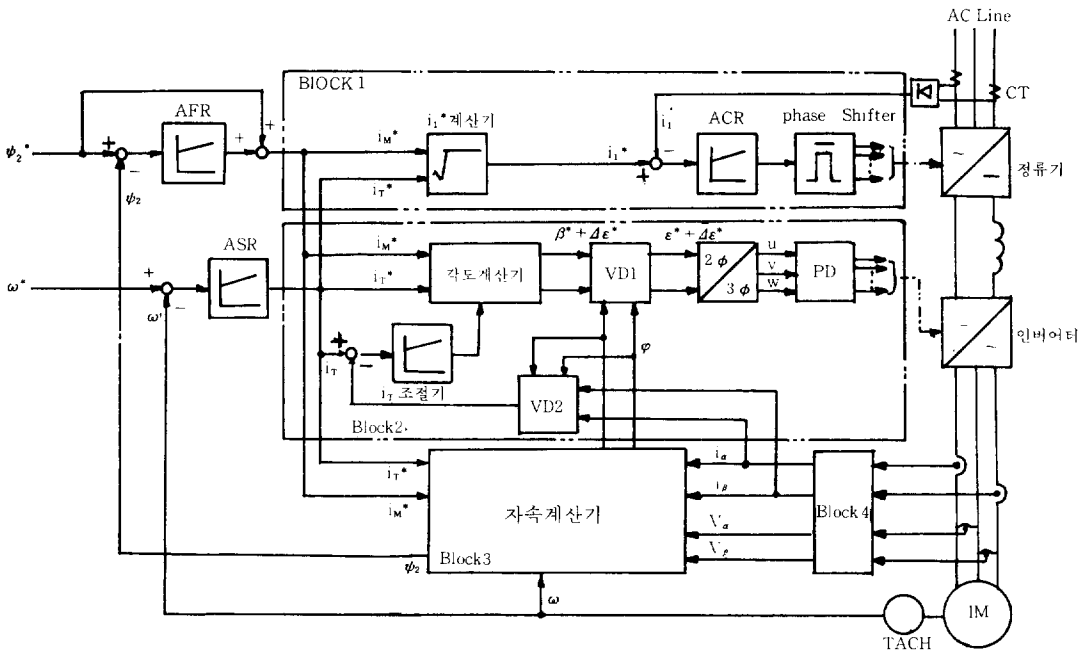


그림 11. 유도 전동기의 벡터제어

전압이 낮기 때문에 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

### 3.3 자속제어의 응용에

그림 11은 제어정류기와 전류원형 인버터로 구동되는 유도전동기에 벡터제어방식이 적용된 한 예를 나타낸 것이다.

Block 1은 전류제어 loop인 데 여기서는 자화 전류 설정치  $i^*_M$ 과 토오크전류설정치  $i^*_T$ 에 의해 고정자전류지령  $i^*_1$ 가 계산되며 PI형 전류조절기에 의해 고정자전류  $i_1$ 이 제어된다.

Block 2는 고정자전류  $i_1$ 과 회전자자속  $\psi_2$ 사이의 위상각  $\beta$ 를 제어하는 loop인 데 여기서는  $i^*_M$ ,  $i^*_T$  및 자속위치  $\varphi$ 에 의해 각위치  $\epsilon^*$ 가 결정된다. PI형  $i_T$ 조절기는 각도계산기에 의해  $i_T$ 가 설정치가 되도록  $\epsilon^*$ 를 제어한다.

Block 3은 자속계산기이며 Block 4는  $\alpha - \beta$  측에 해당하는 고정자 전압 및 전류를 측정한다.

속도조절기(ASR) 및 자속조절기(AFR)는 속도지령  $\omega^*$ 와 자속지령  $\psi^*_2$ 에 의해서 토오크전류지령  $i^*_T$ 와 자화전류  $i^*_M$ 을 발생시킨다.

VD 1 및 VD 2는 벡터회전기이며 PD는 펄스 배분기로서 인버터의 점호각을 결정한다.

이와 같은 제어회로는 hardware적으로 구성할 수도 있고 microcomputer를 사용하여 software로써도 구성할 수 있다.

Microcomputer를 사용하면 hardware가 간단해지고 장치의 신뢰도를 높일 수 있으며 복잡한 제어방식도 실현이 가능하다. 이때 처리속도가 문제가 될 수 있는 데 이는 multiprocessor의 채택으로 해결 될 수 있다.

### 4 결 론

이상에서 전동기의 가변속제어에 대하여 유도전동기를 중심으로 소개하고 최근에 상당한 주목을 받고 있는 벡터제어 방식에 대하여 간단히 설명하였다.

벡터제어방식에 의하여 교류전동기의 속도조정 기능이 실용화되었으며 직류전동기의 속도제어의 경우와 동일한 속응성 및 신뢰성을 얻을 수 있게 되었다.

### 참 고 문 헌

- 1) V.R. Stefanovic; "Present Trends in Variable Speed AC Drives", IPEC, 1983.
- 2) Bimal K. Bose; "Introduction to AC Drives", Adjustable Speed AC Drive Systems, 1981.
- 3) S.R. Bowes, et al; "Microprocessor Control of PWM Inverters", IEEE Proc., Vol. 128, No. 6, November, 1981.
- 4) F. Blaschke; "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvektor Closed - Loop Control System for Rotating - Field Machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217-220, May 1972.
- 5) Allan B. Plunkett; "Direct Flux and Torque Regulation in a PWM Inverter - Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-13, No. 2, Mar./Apr. 1977.
- 6) Masahiro Kaimoto, et el; "Performance Improvement of Current Source Inverter - Fed Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-18, No. 6, Nov./Dec. 1982.
- 7) R. Gabriel; "Field - Oriented Control of a Standard AC Motor Using Microprocessors", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-16, No. 2, Mar/Apr. 1980.