

견인전동기의 전속도 영역에서의 PWM 모드제어

송영신 유병우 최재호 이은규
충북대학교 우진산전(주)

PWM Mode Control of Traction Motor under the Full Speed Range

Youngsin Song Byoungwoo Yu Jaeho Choi Yuenkue Lee
Chungbuk National University Woo Jin Industrial Electronics Co.

Abstract - This paper presents the vector control of induction motor for traction drives. Especially, the PWM mode control method is well described to be selected as the change of speed to meet the wide speed range of the traction motor. Asynchronous space vector PWM mode and synchronous one pulse mode are basically used under the full speed range with the overmodulation PWM mode for the soft transfer between them. The validity of this proposed control scheme is verified with the simulation results.

용하였다. 그림 1은 견인전동기 구동시스템을 위한 벡터 제어 블록도를 보여준다.

벡터제어를 위해 회전자 자속 기준축으로 모델링된 농형 유도 전동기의 고정자의 전압 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.[3]

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e + \sigma L_s p i_{ds}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^e + \omega \lambda_{dr}^e + \sigma L_s p i_{qs}^e \quad (2)$$

단, v_{ds}^e, v_{qs}^e : d, q축 고정자 전압
 i_{ds}^e, i_{qs}^e : d, q축 고정자 전류
 r_s : 고정자 저항

$$\sigma L_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$$

L_s : 고정자 인덕턴스

L_m : 상호 인덕턴스

p : 미분연산자 ($\frac{d}{dt}$)

λ_{dr}^e : 회전자 자속

ω_e : 전기각으로 표현된 인버터 주파수

위 식 (1)~(2)로부터 전류 리퍼치와 슬립 주파수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_{ds}^{e*} = \frac{\lambda_{dr}^{e*}}{L_m} \quad (3)$$

$$i_{qs}^{e*} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{Torque_{Ref}}{\lambda_{dr}^{e*}} \quad (4)$$

$$\omega_{sl} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \frac{i_{qs}^{e*}}{i_{ds}^{e*}} \quad (5)$$

또한 마찬가지로 식 (1)~(2)로부터 다음과 같은 식 (6)과 식(7)의 고정자 전류와 고정자 전압의 관계를 구할 수 있다. 이렇게 계산된 전압방정식에 위의 전류지령을

1. 서 론

슬립주파수 제어방식은 견인전동기의 구동 시스템의 제어를 위하여 오랫동안 사용되어져 왔다. 슬립주파수 제어방식은 운전패턴이 비교적 빠르게 바뀌지 않는 철도 차량의 제어에 적합하지만 전동기의 순시전류와 순시도 오크를 제어할 수 없는 단점이 있다. 고속의 철도차량에서 휠과 레일 사이에 슬립이 일어나게 되는데 정전류로 제어되므로 슬립현상은 철도차량의 전속도로 영향을 주어 속도가 발산하는 결과를 초래하게 된다.[1] 이를 방지하기 위해서 토크의 순시적인 제어는 매우 중요하다. 벡터제어 기법은 유도 전동기를 직류 전동기의 경우와 같은 방법으로 자속분과 토크분의 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 순시적인 토크응답을 제공한다.

도시철도차량의 경우 견인 전동기는 그 정격 속도의 3배의 범위에 해당하는 넓은 속도 영역에서 운전하게 된다. 특히 고속에서 가선편압을 최대한 이용하기 위해 1펄스 모드에서 최대의 전압을 출력하면서 운전하게 된다. 속도의 증가에 의해 인버터 주파수가 증가하게 되면 펄스수가 줄게 되어 비대칭의 문제가 생기게 된다. 따라서 저속과 고속영역에서의 PWM제어는 차별화 되어야 한다. 특히 1펄스 모드로 전환되는 시점에서는 순간적으로 토크의 리플이 증가하기 때문에 부드러운 전환이 필요하다.[2]

본 논문에서는 저속 영역에서 비동기 모드 공간 전압 벡터 PWM기법을 사용하며 고속 영역에서의 동기 1펄스 모드 PWM을 사용한 견인 전동기의 벡터 제어기법을 소개한다. 그리고 비동기 모드와 1펄스 모드의 부드러운 전환을 위하여 과변조 기법을 사용한다. 이 구간에서 비대칭의 문제를 해결하기 위해 PWM제어의 샘플링 주파수를 증가시키는 방법을 소개한다. 그 결과로 디지털 시뮬레이션으로서 그 제어의 타당함을 보여줄 것이다.

2. 본 론

2.1 벡터제어기법

벡터제어는 회전자 자속기준 간접벡터 제어방식을 사

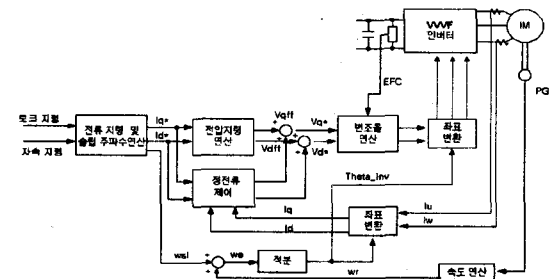


그림 1 벡터제어 블록도

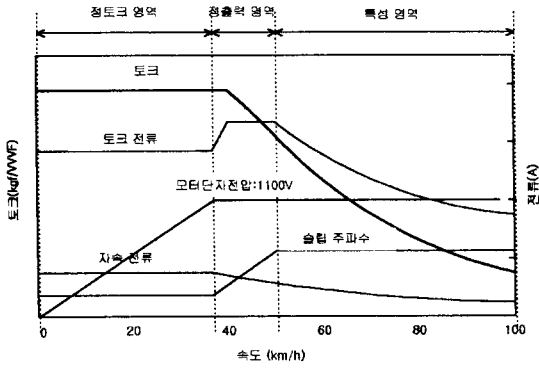


그림 2 속도-토크 특성

$$V_{dff} = r_s \cdot I_{ds}^* - \omega_e \cdot L_s' \cdot I_{qs}^* \quad (6)$$

$$V_{qff} = r_s \cdot I_{qs}^* + \omega_e \cdot L_s' \cdot I_{ds}^* + \omega_e \cdot \lambda_{dr}^* \quad (7)$$

대입하여 그림 1에서 고정자 전압의 지령치로서 사용한다.

이와 같이 그림 2의 토크와 속도 특성을 갖도록 하기 위하여 만들어진 토크와 자속의 지령치는 식 (3)~(5)와 같이 벡터제어기에 의하여 전류와 전압지령치를 만들어 낸다. 피드백된 전류는 전류제어기에 의하여 전류제어를 행하고 전향보상된 식 (6),(7)의 전압 지령치와 함께 최종적으로 PWM제어기의 지령치로서 입력된다.

2.2 PWM 제어

2.2.1 PWM 제어모드

견인전동기는 그 속도제어범위가 광범위하고 가선으로부터 공급되는 직류 링크 전압은 한계를 가지고 있기 때문에 PWM제어는 각 속도별, 즉 출력전압의 크기에 따라 전압의 효율을 높이기 위해 여러 가지 제어모드로 나뉘게 된다. 또한 이러한 제어모드를 변환하는 경계에서는 스위칭주파수의 변화로 전류의 일그러짐이 생기고 결과적으로 토크의 리플을 가져오기 때문에 모드의 부드러운 변환이 필요하다.

그림 3은 견인전동기 구동 시스템의 PWM 제어모드를 보여준다. 정격속도 이하의 저속 영역에서 인버터의 출력전압은 정상적이기 때문에 비동기 공간 전압 벡터 PWM제어를 행한다. 출력전압이 증가하여 인버터가 출력할 수 있는 범위를 넘어서게 되고 인버터의 출력주파수의 증가에 따라 펄스수가 감소하게 된다. 이 부분에서는 과변조 PWM을 행하여 그림에서와 같이 샘플링 주파수를 증가시키고, 스위칭 주파수는 감소하게 된다.

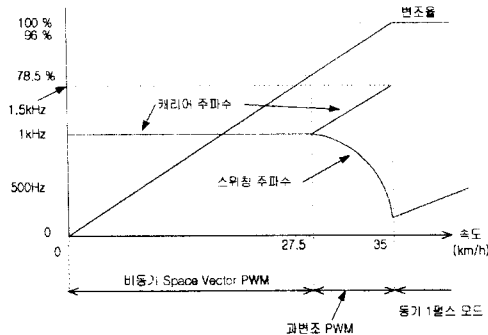


그림 3 PWM 제어 모드

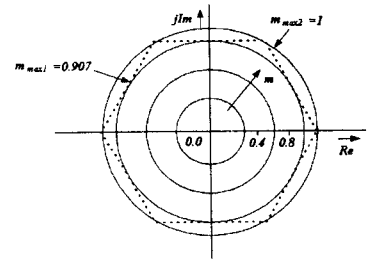


그림 4 기준전압의 궤도

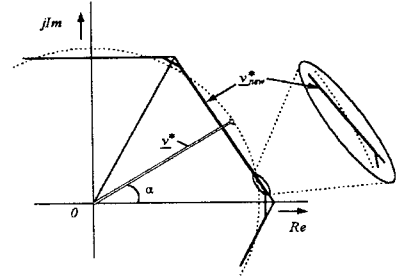


그림 5 과변조 영역 I

출력 주파수, 즉 전동기의 속도가 더욱 증가하여 변조율이 "1"이 되어 인버터가 최대의 전압을 출력할 때는 1 펄스모드로 전환하여 최대전압을 출력하게 된다. 1펄스 모드에서는 기준전압과 동기를 맞추는 동기 PWM제어를 행하여 전류와 토크의 리플을 최소화시킬 수 있다.

2.2.2 과변조 모드

과변조 모드에서는 식 (8)과 같이 정의되는 변조율이 "0.907"에서 "1" 사이에 해당되는 부분으로 1펄스로 부드럽게 진입하기 위하여 사용된다. 그림3의 제어모드에서 알 수 있듯이 이 부분에서는 인버터 주파수의 증가로 인해 펄스수가 감소하므로 그림과 같이 캐리어 주파수를 증가시켜 최대한 비대칭의 요소를 줄일 수 있도록 한다.

$$\text{변조율} = \frac{|V_{Ref}|}{\frac{2}{\pi} \cdot V_{dc}} \quad (8)$$

그림 4는 기준전압의 궤도와 변조율의 관계를 보여준다. 과변조 영역에서의 제어는 Holtz가 제안한 방법으로 변조율에 따라 두 가지 모드로 나뉜다. 이 기법으로 변조율이 0.907~0.954인 부분에서 그림 5에서 나타내는 것과 같이 기준전압의 크기를 인버터가 출력할 수 있는 육각형을 따라 움직이도록 변형한다.

변조율이 0.954~1인 부분에서는 기준전압의 각도와 크기를 변형시킨다. 변조율이 늘어감에 따라 새로운 각도에 의해 펄스수가 줄게 되고 변조율이 "1"에 이르면 1 펄스 모드를 시작하게 된다. 이 부분에서 "holding angle"을 이용하여 다음의 식 (9)를 이용하여 새로운 각도를 계산해 내고 기준전압의 크기는 모드 1의 경우와 같이 육각형을 따라 움직이도록 변형시킨다.[2]

$$\begin{aligned} \alpha_{new} &= 0 & 0 \leq \alpha \leq \alpha_h \\ &= \frac{\alpha - \alpha_h}{\pi/6 - \alpha_h} \cdot \frac{\pi}{6} & \alpha_h \leq \alpha \leq \pi/3 - \alpha_h \\ &= \pi/3 & \pi/3 - \alpha_h \leq \alpha \leq \pi/3 \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 시뮬레이션

2.3.1 시스템 구성

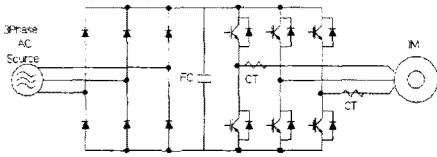


그림 6 전력변환기의 구성

표 1. 견인전동기 정수

Parameter	Value	Parameter	Value
정격전압	1100[V]	정격전류	130[A]
극수	4극	정격속도	1945[rpm]
정격출력	240[kW]	모터 관성	0.3[kg-m ²]
고정자저항	0.0855[Ω]	정격토크	1150[N-m]
회전자저항	0.1514[Ω]	상호 인덕턴스	42.76[mH]
고정자인덕턴스	44.716[mH]	회전자인덕턴스	43.86[mH]

시뮬레이션을 위해 그림 6과 같이 3상 교류 전원으로부터 정류 다이오드를 통해 필터 커패시터로서 DC 링크를 이루고 IGBT를 이용한 전력변환기를 구성하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 견인 전동기의 정수이다.

2.3.2 시뮬레이션 결과

다음의 그림 7~12에 시뮬레이션의 결과를 보였다. 그림 7은 전동기의 A상의 전류이며 그림 8과 그림 9는 각각 자속전류(d축전류)와 토오크전류(q축전류)를 나타낸다. 그림에서 약 2.8초 부근에서 1펄스 모드로 전환되는 시점이며 거의 리플없이 부드럽게 전환된다. 그림 10에서 1펄스 모드로 전환되는 시점에서의 상전류 파형과 스위칭 파형을 나타냈다. 그림 11과 그림 12에서 발생 토크 오크와 전동기 속도를 보였다. 선형 영역은 물론 1펄스 영역에서도 토크의 발생이 정상적이며 전동기의 속도가 일정한 가속을 가지며 증가하는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서 철도차량용 견인전동기의 제어를 위한 벡터 제어시스템과 PWM제어기법을 보였다. 견인전동기는 정격주파수의 약 3배의 범위까지 적용되는 운전범위를 가지고 있는 특징을 가지고 있다. 정격속도 이상에서 한 정된 직류전압으로 자속을 제어해야 하므로 과변조의 가능성이 있어야 하며, 1펄스에서의 제어도 필요하다. 즉 견인전동기의 구동시스템은 어떠한 속도범위에서도 전압과 주파수의 자유로운 조절이 필요하다. 따라서 본 연구에서 토크와 자속의 일정제어를 위한 벡터제어가 소개되었고, 전운전 영역에서의 PWM 변조방법에 대하여 설명되었다. 마지막으로 디지털 시뮬레이션으로서 제어의 타당함을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. J. Schwartz and R. KreBe, "Implementation Advanced Wheel Creep Control with Searching St on a Light Rail Vehicle", *Proc. EPE'97*, pp. 3.434 1997
- [2] J. Holtz, W. Lotzkat and A. Khambadkone, "O tinuous Control of PWM Inverter in the Overmou Range including the Six-Step Mode", *Proc. I IECON'92*, pp. 307-312, 1992

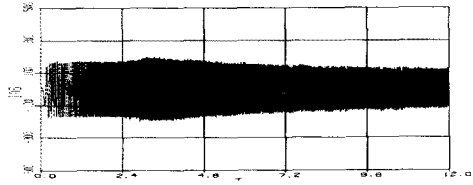


그림 7 상전류

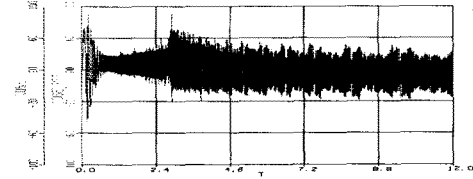


그림 8 자속 전류

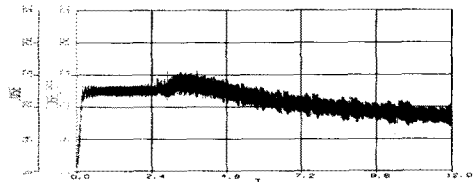


그림 9 토오크 전류

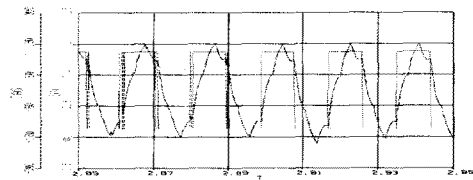


그림 10 1펄스모드 전환시 스위칭 파형과 상전류

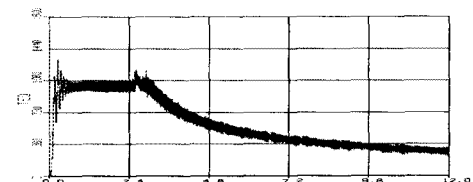


그림 11 발생 토크

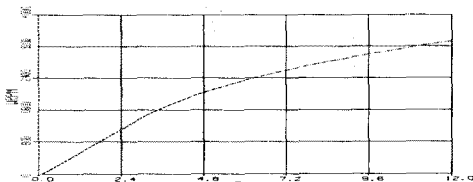


그림 12 전동기 속도

- [3] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Pren Hall, 1986
- [4] Y. A. Chapuis, C. Pelissou, and D. Roze, "Torque Control of Induction Machine under Square Conditions", *IEEE IAS'95*, pp. 343-349, 1995