

Min Max 알고리즘과 Dead Time 보상기법에 의한 유도전동기의 성능 향상에 관한 연구

김형구*, 양오
 충주대학교 전자공학과

A study to improve the performance of induction motor using Min Max algorithm and dead time compensation method

Hyung Gu Kim*, Oh Yang
 Dept. of Electronic engineering, Chongju Univ.

Abstract

Recently PWM inverter is broadly used for control of induction motor. The inverter is able to generate sin wave current from high speed switching power device such as IGBT. However the inverter is disturbed by dead time inevitably needed to prevent a short of the DC link voltage, and the dead time mainly causes distortions of the output current.

In this paper, the dead time compensation method which corrects the voltage error from dead time, and Min Max algorithm enlarging the operating voltage of PWM were proposed. This method can be implemented by software programming without any additional hardware circuit.

The proposed algorithms were implemented by DSP(TMS320C31, 40MHz) and FPGA(QL2007, Quick Logic) described in VHDL, and applied to 3 phase induction motor(2.2 KW) to show the superior performance.

1. 서론

최근 유도 전동기의 제어를 위해 PWM 방식을 이용한 인버터가 많이 쓰이고 있다[1]. 이러한 PWM 방식의 인버터는 원하는 출력 파형에 비해 충분히 높은 주파수로 인버터를 스위칭 함으로써 출력 파형을 정현파에 가깝게 만들 수 있다는 장점을 가진다[1]. 그러나 스위칭 구동시 DC Link단의 단락현상을 방지하기 위한 dead time이 필연적으로 첨가되어야 하는 단점을 또한 가지고 있다[1-3]. 이렇게 첨가되는 dead time은 출력 파형을 왜곡시키고 불필요한 고조파 성분을 포함시키는 주 요인으로 지적되고 있다[2-3].

본 논문에서는 이러한 파형의 왜곡현상을 최소화하기 위해 dead time에 의해 손실되는 제어량을 구하여 dead Time이 발생하는 PWM 이전 단계에서 보상해주는 방법과 3상 전류의 최대치와 최소치의 평균값을 적용하여 전압 이용률을 높이는 Min Max 알고리즘을 사용하였다. 이러한 방법은 보다 정확한 출력전류의 보장은 물론이고 별도의 추가적인 하드웨어 없이 간단한 소프트웨어적 장치만으로 구현될 수 있다는 장점을 가진다.

본 논문에 대한 실험은 DSP(TMS320C31, 40MHz)[4]에 의해 수행되었고 PWM발생기 및 각종 보호회로는 VHDL로 기술된 Quick Logic사의 FPGA[5]에 의해 구현되었으며 구현된 제어회로는 벡터 전용 3상 유도전동기(2.2kw)에 적용하여 본 논문의 타당성을 실험을 통해 입증하였다.

2. 본론

2.1 PWM 인버터와 dead time 의 영향

Dead time의 적절한 보상을 위해서는 PWM 인버터의 동작에 대한 정확한 해석이 선행되어야 한다. 그림 1은 PWM 인버터에 대한 회로도를 나타낸다.

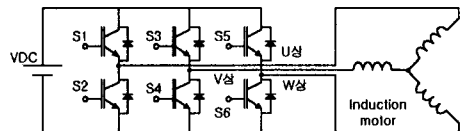


그림 1. PWM 인버터에 의한 유도전동기의 구성

그림1에 나타난 각 스위칭(S1~S6)의 스위칭 입력에 따라 IGBT단에서 발생하는 3상의 전압펄스 출력은 3상 유도전동기의 내부 인덕턴스로 공급되어 사인파의 전류를 발생시킨다[1]. 이러한 PWM 인버터는 스위칭 동작 중에 DC 링크단의 단락을 방지하기 위하여 적절한 휴지시간(dead time)이 필연적으로 요구되며 이에 대한 도식적 해석을 그림 2에 나타냈다[3].

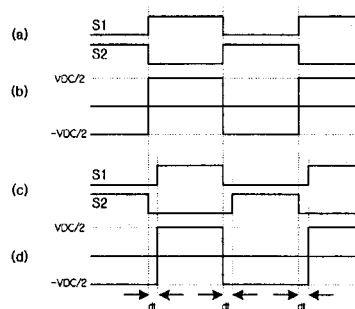


그림 2. PWM 인버터의 dead time

그림 2의 (a)와 (b)는 dead time이 없는 이상적인 스위칭 동작과 그에 따라 예상할 수 있는 출력 PWM 파형을 나타냈다. S1이 on이고 S2가 off일 경우 U상 전류는 양의 값으로 전동기에 전달되고, S1이 off이고 S2가 on이면 U상 전류는 음의 값을 갖게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 S1과 S2는 항상 서로 반대의 상태를 유지하고 있지만 스위칭순간에 발생할 수 있는 시간 오차와 IGBT의 turn on과 turn off에 의한 시간지연을 고려한다면 DC Link단의 단락현상에 대한 위험성을 쉽게 예상할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 스위칭 동작시 그림 c에서와 같이 dt만큼의 dead time을 주어 단락현상을 예방할 수 있다. 그림 2의 (c)와 (d)에서 S1이 on이고 S2가 off인 경우 양의 출력, S1이 off이고 S2가 on이면 음의 출력이 나오는 것을 확인할

수 있으며 dead time은 S1, S2 모두가 off로 DC 링크의 단락을 방지한다.

2.2 Dead time 보상기법

Dead time에 의해 발생하는 전압 오차는 식 (1)과 같이 나타나며 수식의 좌변은 dead time에 의해 발생하는 u상의 전압 오차를 나타내며 VDC는 DC 링크단의 전압, dt는 dead time 그리고 Fsw는 인버터에 의해 발생하는 펄스의 주파수를 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} V_u &= \frac{VDC}{2} \times dt \times Fsw & (i_u > 0) \\ V_u &= 0 & (i_u = 0) \\ V_u &= -\frac{VDC}{2} \times dt \times Fsw & (i_u < 0) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 정리된 dead time에 의한 전압 오차 항수를 dq고정좌표와 dq 회전좌표 방정식으로 변환하면 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{qs} &= (2V_u - V_v - V_w)/3 \\ V_{ds} &= (V_w - V_v)/\sqrt{3} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{dse} &= V_{ds} \cos(\omega t) + V_{qs} \sin(\omega t) \\ V_{qse} &= V_{qs} \cos(\omega t) - V_{ds} \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

변환된 전압오차 식은 그림 3과 같이 dq 회전좌표 상에서 보상된 후 다시 3상 좌표계로 변환되어 PWM 발생부에 의해 보상된 출력 전압을 만들어 낸다. 그림에서 i_u^* , i_v^* , i_w^* 는 dq회전좌표에서 3상 정지좌표로 변환된 전류 지령값이고 V_{uc} , V_{vc} , V_{wc} 는 전류 지령값에 따른 3상의 dead time 보상 전압이며 V_{qc} 와 V_{dc} 는 dq 변환된 보상전압을 각각 나타낸다.

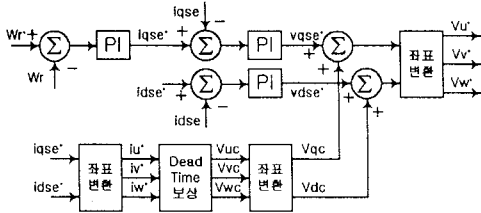


그림 3. 속도 제어루프에서의 dead time 보상

2.3 Min Max 알고리즘에 의한 전압 이용률의 개선

각상의 전압에서 임의의 동일한 값을 더하거나 빼도 선간 전압은 동일하다는 원리를 이용하여 각상의 전압지령의 양과 음의 최대 값을 줄임으로써 전압 이용률을 높일 수 있다.

$$V_{mm} = V - V_{com} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{com} &= \frac{(V_u + V_v)}{2} = -\frac{(\sin t)}{2} & (0 \sim \pi/6) \\ V_{com} &= \frac{(V_u + V_v)}{2} = \frac{(\sin t - \sqrt{3} \cos t)}{4} & (\pi/6 \sim \pi/2) \\ V_{com} &= \frac{(V_u + V_w)}{2} = \frac{(\sin t + \sqrt{3} \cos t)}{4} & (\pi/2 \sim 5\pi/6) \\ V_{com} &= (V_v + V_w)/2 = -\frac{(\sin t)}{2} & (5\pi/6 \sim \pi) \end{aligned} \quad (5)$$

그림 4의 구간 a에서의 최대 상 전압은 w상 최소 상

전압은 v상이고 구간 b에서의 최대 상 전압은 u상 최소는 v상이다. 이렇게 구분되어진 각 구간의 최대값과 최소값에 대한 평균값을 식 (5)에서 구간별로 정리하였고 식 (4)에 대입하면 각 상의 Min Max 변환값을 얻을 수 있다. 식 (4)와 식(5)의 Vcom은 각 구간에서의 최대값과 최소값의 평균값을 나타내고 V는 각 상 전압 그리고 Vmm은 Min Max 변환된 상 전압을 의미한다.

그림 4에서 (a)는 3상 전압지령을 (b)는 Min Max의 평균값을 나타내고 (c)에서는 Min Max 변환 전후의 u상 전압을 비교하여 보여준다. 그림에서의 수치는 사용 가능한 전압의 최대값이 1인 경우를 가정하였고 그에 따른 Min Max 변환된 각 상의 최대값이 $\sqrt{3}/2$ 로 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 변환 이전의 최대 전압을 최대 $2/\sqrt{3}$ 배로 올려 전압 이용률을 $2/\sqrt{3}$ 까지 설정할 수 있다.

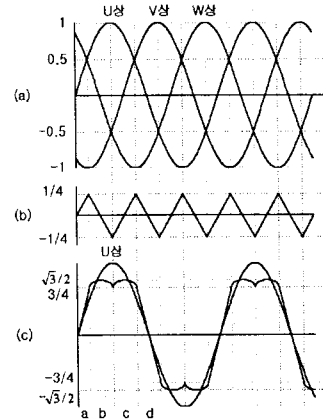


그림 4. Min Max 변환에 따른 출력 파형의 변화

그림 5는 그림 3의 dead time 보상 블록 이후에 배치되는 Min Max 변환 블록을 나타낸다. Min Max 변환된 전압 지령은 PWM인버터를 거쳐 전동기를 구동시키며 전류센서로부터 측정된 각 상 전류는 폐환 되어 전류 제어루프를 형성한다.

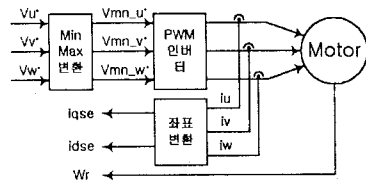


그림 5. Min Max 변환

2.4 실험 결과

본 논문에 대한 실험은 DSP(TMS320C31, 40 MHz)와 FPGA(Quick Logic, QL2007)에 의한 제어 보드와 Toshiba사의 IGBT(1200[V], 150[A])로 구성된 인버터에 의해 수행되었다. 실험에 사용된 파라미터는 다음과 같다.

VDC : 120 [V]	F : 60 [Hz]
Rs : 0.915825 [Ω]	Rr : 1.11091 [Ω]
P : 4 [극]	Lm : 0.1132335 [H]
Lr, Ls: 0.189705 [H]	J : 0.1 [kg·m ²]
dead time : 3 [μ sec]	Fsw : 10 [KHz]

그림 6과 그림 7 및 그림 8은 600(rpm)의 기준속도에서 측정된 전류 파형이며 ch1, ch2, ch3은 각각 q축

전류, d축 전류 및 u상 전류를 각각 나타낸다. q축과 d축의 전류는 한눈금당 0.5[A]이며 u상 전류는 한눈금당 2.5[A]이다. 그림 6은 dead time 전압을 보상하지 않은 d, q 전류와 u상 전류를 나타낸다. u상 전류가 제로 점을 지날 때 심한 왜곡현상이 나타남을 확인할 수 있으며 d축 전류와 q축 전류 또한 주기적인 오차를 보이고 있다. 그림 7은 dead time이 보상된 u상 전류와 d, q축 전류를 나타낸다. 그림에서 u상 전류의 왜곡이 보상된 상태를 확인할 수 있으며 그에 따라 d축 전류와 q축 전류도 좀더 안정된 상태를 유지한다.

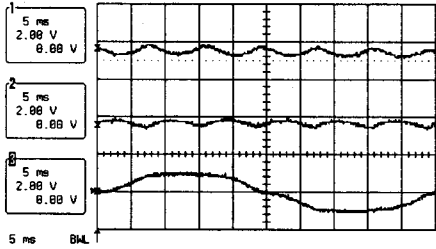


그림 6. 보상되지 않은 전류 파형 (ch1:iq, ch2:id, ch3:iu)

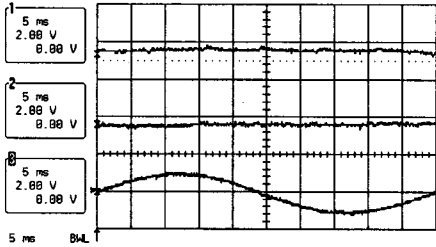


그림 7. dead time이 보상된 전류파형 (ch1:iq, ch2:id, ch3:iu)

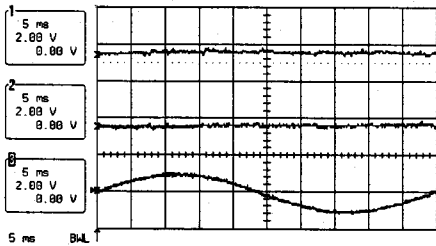
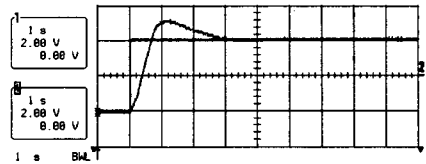


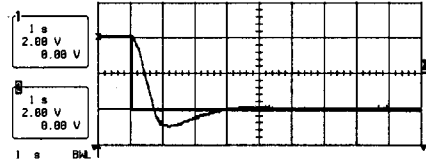
그림 8. Dead time 보상과 Min Max 변환이 적용된 전류파형(ch1:iq, ch2:id, ch3:iu)

그림 8은 dead time보상과 함께 Min Max 알고리즘을 적용하여 전압 이용률을 높인 실험 결과이다. 그림에 나타난 실험 결과 파형은 유도전동기에 부하를 걸지 않은 상태에서 실험하였기 때문에 전압 이용률의 개선에 대한 가시적인 확인을 할 수 없었다.

그림 9와 그림 10은 속도 지령을 역방향(-300[rpm])에서 정방향(+300[rpm])으로 전환시켰을 때와 반대로 정방향에서 역방향으로 전환시켰을 때의 유도전동기의 속도 추종을 보여준다. 그림에서 직각으로 보이는 실선이 속도 지령이고 곡선으로 표시된 부분이 실제 속도의 추종상태를 나타낸다. dead time 보상이 이루어지지 않은 그림 9에서는 약 3초의 정상상태 도달 시간과 약 160[rpm]의 오버슈트가 발생하는데 비해 그림 10에서는 약 2.5초의 정상상태 도달 시간과 약 100[rpm]의 오버슈트가 발생함을 확인할 수 있다.

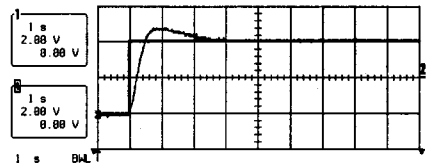


(a) 역방향에서 정방향으로 전환

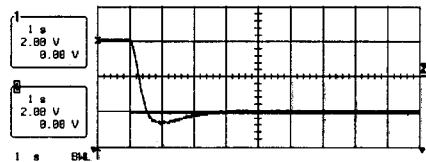


(b) 정방향에서 역방향으로 전환

그림 9. 보상없는 제어계통의 속도 추종



(a) 역방향에서 정방향으로 전환



(b) 정방향에서 역방향으로 전환

그림 10. Dead time이 보상된 전동기의 속도 추종

3. 결 론

본 논문에서는 PWM 인버터에서 필연적으로 발생하는 dead time을 보상하는 알고리즘과 Min Max 보상 기법을 이용하여 전압 이용률을 높이는 알고리즘이 제안되었다. PWM 펄스 주기마다 발생하는 dead time에 의한 전압 오차를 간단한 수식과 좌표변환만을 이용하여 보상함으로써 3상 전류를 완벽한 정현파에 근접 시켰고 직류성분인 d축과 q축 전류에 주기적으로 나타나는 오차를 현저히 감소 시켰으며 이를 통해 유도 전동기의 속도 제어 특성을 향상 시켰다. 본 논문에서 확인된 안정된 전류 및 속도 제어 특성을 발전된 신경회로망 제어이론에 적용하여 유도전동기의 속도 및 위치제어에 관한 지속적인 연구를 추진할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] B.K. Bose, "Power electronics and AC drivers," Prentice Hall.
- [2] 최정수, 김영석, "인버터 출력파형 개선을 위한 새로운 휴지 기간의 최소화 알고리즘," 전기학회 논문지 제48권 5호 pp.269-277, 1999.
- [3] 김성환, 박귀태, 박태식, 김남정, 유지윤, "벡터 제어 유도 전동기의 데드타임 보상 기법," 전기학회 논문지, 제47권 제6호, pp.788-793, 1998.
- [4] Texas Instruments, "TMS320C31 User's guide," 1998.
- [5] Quick Logic, "Quick Works User's Guide with SpDE reference," 1996.