

인버터 전압왜곡 보상방법의 분석 및 적용상의 문제점에 대한 연구

김남수, 김현배
삼성전자

박기현
성균관대학교

Modeling and Compensation of Voltage Source Inverter Nonlinearity

Namsu Kim, Hyunbae Kim
Samsung electronics

Kiheon Park
Sungkyunkwan University

Abstract - In this paper, an improved dead time compensation method which is concerned about dead time and extra time in Pulse-Width-Modulation(PWM) period is presented comparing the existing dead time compensation. The voltage drop across the switches are modeled excluding effect of stray capacitor. A low pass filter(LPF) is adopted for accurate detecting of current polarity. The method is based on Space-Vector-Pulse-Width- Modulation(SVPWM). All simulation results are presented using MATLAB and Simulink .

표 1. 분석 조건

Parameter	Value
PWM	16KHz SVPWM
Dead time	1,2,3,4,5us
Vpeak	70V
Inverter output frequency	20Hz
R	6Ω
L	5mH

1. 서 론

DC link단의 Arm 단락을 피하기 위해 삽입한 데드타임과 인버터가 갖는 비선형성으로 지령전압과 실제 공급되는 전압과의 오차를 가져온다. 이 전압왜곡은 부하에 인가되는 전류의 방향과 인버터의 high-side(HS)/low-side(LS) 스위치의 도통 상태에 따라 환류다이오드의 전압 강하와 IGBT의 도통 전압강하 및 스위칭 소자의 기생 콘덴서에 의한 충방전으로 인하여 발생한다.

데드타임에 의한 이러한 왜곡은 스위칭 마다 발생되므로 공급하고자 하는 전압의 기본파 성분에 의해 오차의 크기가 결정된다.

인버터내부의 IGBT와 환류다이오드의 전압강하는 부하 전류크기에 따라 변하며 전류극성에 따라 부하에 공급되는 DC link 전압에 가감되어 전압왜곡을 가중시킨다.

이러한 전압왜곡을 보상하기 위해 많은 연구들이 이루어 졌다 [1]-[3]. 전류의 극성에 따라 데드타임 만큼 스위치의 on/off 시간을 조절하는 방법이 제시 되었고 [1], 전류 검출을 통하여 데드타임에 의해 환류 다이오드 및 IGBT의 전압 강하에 따른 왜곡량을 예측하고 왜곡되는 양만큼 전류 극성에 따라 전압 지령치에 가감하는 방식이 제안 되었다 [2].

본 논문에서는 이러한 연구들을 비교 검토하여 인버터로 PWM을 발생시킴에 있어서 효과적인 데드 타임 보상 방법을 제시하며 적용상의 문제점에 대한 결과에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 데드타임 효과

부하가 3상 R-L load인 경우 전류의 관철로 전압의 왜곡을 예측할 수 있다. 분석을 간략화 하기 위해 환류 다이오드의 전압강하와 IGBT의 도통시의 전압강하를 각각 1.5V, 2V로 고정하고 3상 전압벡터의 지령치와 표 1 조건으로 분석하였다.

인버터에서 부하로 흘러가는 전류를 정방향 전류 부하에서 인버터로 유입되는 전류를 역방향 전류라고 하면 전압의 왜곡은 그림 1과 같이 전류의 극성에 따라 정방향의 전류에서는 지령치 보다 작은 전압을, 역방향 전류에서는 지령치 보다 큰 전압을 인가하는 오류를 가져온다. 이 전압왜곡은 데드타임이 증가함에 따라 증가하여 정지좌표계의 전류벡터 크기가 그림 2 와 같이 감소하게 된다.

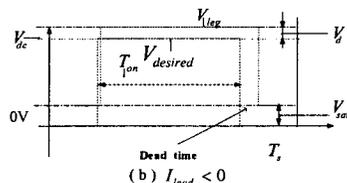
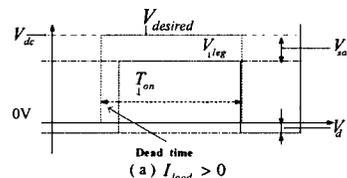


그림 1. 전압왜곡

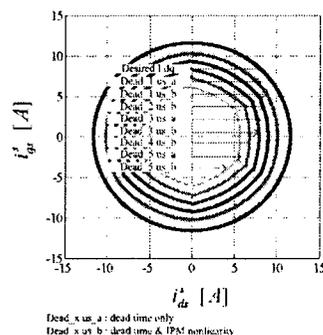


그림 2. 데드타임의 영향

그림 3과 같이 인버터의 출력 전류 주파수에 따라 주파수에 반비례한 왜곡을 갖으며 데드타임이 클수록 주파수에 따른 전압왜곡은 증가한다.

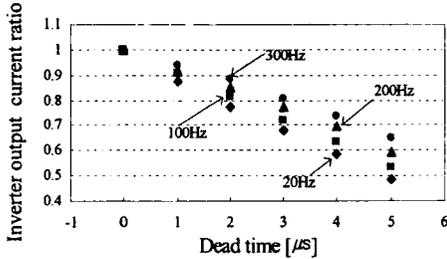


그림 3. 출력 주파수에 따른 데드타임의 영향

2.2 데드타임보상방법비교

A 전류극성에 의한 데드타iming 보상 방식 [1]:

일반적으로 데드타임은 스위치 on 시간을 지연시켜 구현한다.

인버터의 전류가 정방향 극성을 가지면 부하에 공급되는 전압은 그림 1(a)와 같이 작아지므로 데드타임 만큼 on 시간을 앞당겨 주고, 역방향 극성이면 그림 1(b)와 같이 전압이 커지므로 데드타임 만큼 off 시간을 앞당겨 주어 그림 4와 같은 보상결과를 얻을 수 있다.

이 방식은 전류 극성 판별을 통하여 쉽게 구현되나 인버터의 IGBT의 전압강화 및 환류다이오드 전압강화 등 인버터의 비선형특성은 고려하지 않았다.

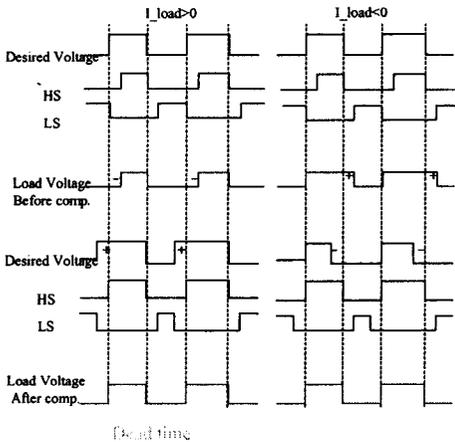


그림 4. 전류 극성에 의한 데드타임 보상방식

B 전압왜곡모델에 의한 보상 [2]:

$$\Delta V = \frac{T_{dead} + t_{on} + t_{off}}{T_s} [V_{dc} - V_{sat} + V_d] + \frac{V_{sat} - V_d}{V_{dc}} V_{desired} + \frac{V_{sat} + V_d}{2} \quad (1)$$

where

T_s : switching time
 t_{on} : on time delay

T_{dead} : dead time
 t_{off} : off time delay

전류 극성에 따라 식 (1)의 전압왜곡을 예측하여 전류 극성에 따라 전압 지령치에 가감하여 인버터 출력전압 왜곡을 보상한다.

이 방식은 인버터의 IGBT와 환류다이오드의 비선형 특성을 고려하여 전압왜곡을 예측하므로 전류 극성에 의한 데드타iming 보상 방식에 비해 보상율이 개선된다.

C 제안된 전압왜곡모델에 의한 보상:

$$I_{load} > 0$$

$$\Delta V = -\frac{V_d(T_s - T_{ON} + (T_{dead} + t_{on} - t_{off}))}{T_s} - \frac{V_{dc}(T_{dead} + t_{on} - t_{off}) + V_{sat}(T_{on} - (T_{dead} + t_{on} - t_{off}))}{T_s} \quad (2)$$

$$I_{load} < 0$$

$$\Delta V = \frac{V_{sat}(T_s - T_{ON} - (T_{dead} + t_{on} - t_{off}))}{T_s} + \frac{V_{dc}(T_{dead} + t_{on} - t_{off}) + V_d(T_{on} + (T_{dead} + t_{on} - t_{off}))}{T_s} \quad (3)$$

where

T_s : switching time

T_{on} : desired on time,

T_{dead} : dead time

t_{on} : on time delay

t_{off} : off time delay

전압의 왜곡은 그림 1과 같이 전류 극성에 따라 데드타임 이외의 구간에서도 다이오드의 전압강하 및 IGBT 전압강하로 인한 왜곡이 발생한다.

전압 지령치에 따라 변하는 T_{on} 의 값을 추가하여 데드타임 이외의 구간에서 발생하는 왜곡까지 고려한 식 (2),(3)을 그림 1을 통해 구현하였다.

그림 5와 그림 6과 같이 3가지 보상 방법 중 제안된 보상방법이 데드타임이 없는 경우에 더욱 가까운 결과를 얻었다.

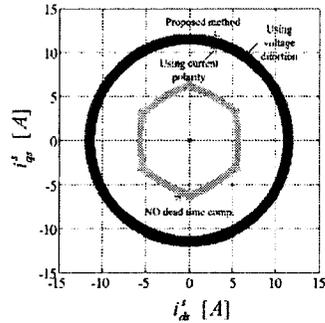


그림 5. 데드타임 보상방법에 따른 dq 전류벡터 비교

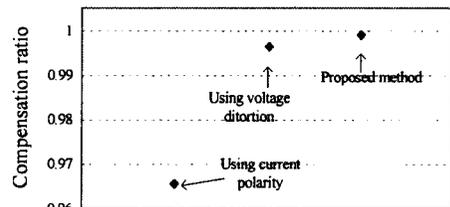


그림 6. 데드타임보상방법에 따른 보상 효과

이상의 3가지 방법을 비교한 결과 표 2와 같이 전류 극성에 의한 데드타iming 보상 방식은 비교적 간단하고 적은 비용으로 구현이 가능한 방법이지만 보상 효율 측

면에서는 제안된 방법이 개선된 결과를 얻었다.

표 2. 데드타임 보상 비교표

보상방법	A	B	C
구현방식	간단	복잡	복잡
센싱신호	전류극성	전류극성 상전류	전류극성 상전류
연산량	저	고	고
보상효율	저	중고	고고

A : 데드 타이밍에 의한 보상
B : 전압왜곡모델이용
C : 데드타임이의 구간의 왜곡 고려

표 2와 같이 A방식은 전류 극성 판단으로 구현이 가능하여 저 성능 연산기로 구현 가능하나 B,C방법은 전류극성 이외에 상전류 검출을 필요로 하고 전압왜곡 예측을 위해 A방식보다 고속의 연산기가 필요 하나 전압왜곡 보상이 개선된다.

2.3 적용상의 문제점

인버터의 전기적인 특성 data를 통해 식(4), (5)의 회기함수를 구현하였다.

$$V_d = 0.0002i_{sensg}^3 - 0.00842i_{sensg}^2 + 0.1332i_{sensg} + 0.5891 \quad (4)$$

$$V_{sat} = 0.0002i_{sensg}^3 - 0.0063i_{sensg}^2 + 0.1327i_{sensg} + 0.6782 \quad (5)$$

where

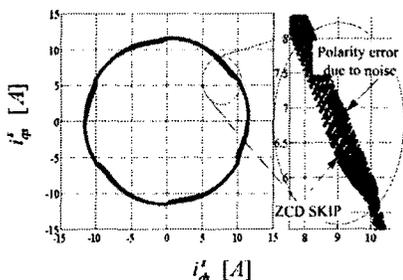
V_d : FWD voltage drop V_{sat} : IGBT voltage drop
 i_{sensg} : Detecting current

수식 (4),(5)의 함수는 전류센싱을 통하여 전류에 따른 인버터 내부의 다이오드의 전압강하 및 IGBT의 도통 전압강하를 나타내며 전압왜곡모델 식 (1),(2),(3)에 적용된다.

일반적으로 노이즈에 의한 전류의 극성판별 오류에 따른 왜곡은 전류 크기에 반비례하며 인버터 출력 주파수가 증가하면 극성판별 오류가 증가하여 왜곡을 가중시킨다.

전류극성 판별오류에 대한 대책으로 저 전류에서 데드타임을 보상을 하지 않는 방식이 많이 쓰인다.

그러나 이와 같은 방법은 구동주파수가 낮은 영역(20Hz)에서 그림 7과 같이 왜곡을 가중시킨다.



where

ZCD SKIP : No comp. at low current
Polarity error due to noise : comp. with current polarity error

그림 7. 노이즈가 있는 전류의 데드타임 보상결과 비교

노이즈에 대한 대책으로 감쇄정수 0.7, 차단주파수 3kHz의 저역통과 필터를 적용한 결과 저역통과필터의 차수와 차단주파수에 따라 신호의 감쇄와 위상 지연이 발생하며 데드타임 보상에 영향을 준다.

하지만 구동주파수에 따른 위상지연은 그림 8과 같이 시간영역에서 보면 그 변화가 미비하므로 모든 주파수의 신호에 대한 필터의 시간지연은 동일하다고 근사화 할 수 있다.

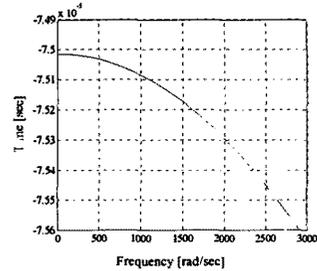


그림 8. 출력주파수에 따른 필터의 시간 지연

인버터 출력전류의 주파수가 바뀌더라도 필터 채택에 의해 복원된 신호의 시간지연은 큰 변화가 없으므로 필터 설계시 지연시간을 예측하여 제어기에 지연시간만큼을 보상하여 필터채택으로 인한 극성 판단의 시간지연에 대한 오류를 개선할 수 있다.

3. 결 론

PWM을 고려하여 데드타임 이외의 구간에 대한 전압 왜곡항을 추가한 모델을 제시하여 보상을 개선 시켰다.

인버터의 환류다이오드의 도통 전압 강화 및 IGBT의 도통 전압 강하를 전류에 관한 식으로 모델링 하였으며 노이즈를 감안하여 필터효과가 충분한 저역통과 필터를 채택하고 그에 따른 시간지연을 감안하여 극성 및 전류의 신호를 앞당겨 전압왜곡을 추정하고 보상하는 방식으로 개선된 데드타임 보상결과를 얻었다.

[참고문헌]

- [1] Jong-Woo Choi, Seung-Ki Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation", IEEE Transactions On Power Electronics, VOL.11, NO.2, MARCH 1996
- [2] Alfredo R. Munoz, Thomas A. Lipo, "On-line Dead-time Compensation Technique for Open-Loop PWM-VSI Drives", IEEE Transactions On Power Electronics, VOL.14, NO.4, JULY 1999
- [3] Yoshihiro Murai, A. Riyanto, H. Nakamura and K. Matsui, "PWM Strategy for High Frequency Carrier Inverters Eliminating Current-Clamps during Switching Dead-Time", Conf. Rec. of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1992
- [4] Joachim Holtz, Juntao Quan, "Sensorless Vector Control of Induction Motors at Very Low Speed Using a Nonlinear Inverter Model and Parameter Identification", IEEE Transactions On Industry Applications, VOL.38, NO.4, JULY/AUGUST 2002