

산업용 인버터의 출력전압 정밀도 향상기법

유두영, 정세중, 김승환, 이헌수
현대중공업(주)

Improvement Method of Output Voltage Accuracy for Industrial Inverter

Doo-Young You, Se-Jong Jeong, Seung-Hwan Kim, Heon-Su Lee
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

산업용 인버터는 운전상황에 따라 캐리어 주파수와 부하전류가 변하게 되며, 이 때 제어기 내부 회로 소자의 Propagation 지연에 따른 Dead Time의 왜곡 그리고 출력전류 크기에 따른 전력소자 내부의 전압강하 등에 의해 전압의 왜곡이 발생하여 전동기 토크진동의 원인이 된다. 이를 방지하기 위하여 상황에 따라 출력전압을 보상해야 한다. 특히 전력소자의 전압강하는 전류의 크기에 따라 변하므로 캐리어 주파수에 의한 보상뿐만 아니라 부하전류의 크기에 따른 출력전압을 보상해야 한다. 본 연구에서는 캐리어 주파수 변화에 따른 전압보상량을 기준으로 출력전류 크기에 따른 보상방법 중 비선형적으로 변하는 저전류 영역에서의 전력소자 전압 강하량을 개선하는 보상방법을 제시하였고, 그 유효성을 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

일반적으로 인버터에 있어서 암단락 방지를 위한 Dead Time, 전력소자의 전압강하 그리고 DC 전압의 변동에 의해 출력전압에 왜곡이 발생하고 출력전류의 왜곡으로 이어져 오픈루프 속도 제어 시 토크의 품질을 떨어뜨려 진동을 발생시키게 된다. 특히, 이것은 전동기의 센서리스 속도제어에 있어서 속도 추정 오차를 증가시키는 원인이 되어 저속 운전 특성을 나쁘게 한다.

출력전압 왜곡에 대한 보상방법으로는 오프라인에서 측정된 보상량을 사용하거나, 출력전류의 고조파성분을 검출하여 온라인으로 보상하는 방법들이 있다.^{[1][2]}

본 논문에서는 DC 전압이 일정할 때, Dead Time에 의한 전압왜곡과 전력소자 전압강하에 의한 전압왜곡을 독립적으로 보상하는 방법에 있어 전류가 작은 영역에서의 전압보상 방법을 개선하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 문

2.1 전압 왜곡량 측정 방법

출력전압 보상량을 계산하기 위해서는 전압 왜곡량을 측정해야 한다. 이 전압 왜곡량의 측정은 임의의 한 상에 크기가 다른 직류 전류를 두 번 인가함으로써 각각의 기준전압 값으로부터 전력소자의 Turn-On 저항과 케이블의 저항 등이 포함된 시스템 저항(R_{system})을 계산할 수 있다. A상에 전류를 인가하는 경우 수식은 아래와 같다.

$$V_{dist} = V_{an_ref} - R_{system} \cdot I_{as} \quad (1)$$

A상에 직류전류가 흐르는 경우 전력소자의 Turn-On 시간과 Turn-Off 시간의 차이가 무시할 만큼 작다고 가정할 수 있고, 전력소자와 케이블 저항은 시스템 저항에 포함되므로 식 (1)의 A상 Pole전압의 왜곡량은 다음 식과 같이 On-Drop과 Dead Time의 함수로 구성할 수 있다.

$$V_{dist} = V_{drop} + \frac{T_{dead}}{T_s} (V_{dc}) \quad (2)$$

식 (2)에서 V_{drop} 은 캐리어 주파수의 영향이 없는 IGBT와 Diode 전압강하량의 평균값이다. 이 전력소자 전압강하량과 Dead Time을 구하기 위해 서로 다른 캐리어 주파수에서 직류전류를 인가함으로써 전압왜곡량을 측정할 수 있다.

2.2 전압 강하량과 Dead Time량 계산

식 (2)의 전압에 의한 왜곡량 관계식을 시간에 의한 왜곡량으로 변환가능하며, 식 (3)과 같이 시간의 함수로 표현할 수 있다. 여기에서 T_{dead} 는 Dead Time 보상량을 의미하며 실제값의 1/2이다. 식 (3)으로부터 서로 다른 캐리어 주파수를 가진 직류전류를 두 번 인가함으로써 Dead Time과 전력소자 전압강하량을 계산할 수 있다. 이렇게 두 개의 캐리어 주파수에서 보상량을 구하는 경우, 측정오차로 인하여 전압보상량의 오차가 커질 수 있다. 측정오차를 감소시키기 위해 캐리어 주파수별로 전압왜곡량을 측정하고 최소자승법을 통해 Dead Time과 전력소자 전압강하량을 구하는 경우 측정오차를 감소시킬 수 있다.

식 (4)와 같이 여러 번의 측정값을 최소 자승법에 의한 시험식으로 표현할 수 있다.^[3]

최소 자승법에 의해 얻은 캐리어 주파수별 보상량의 추이는 그림 1-(a)와 같으며 캐리어 주파수가 증가함에 따라 시간 보상량이 변함을 알 수 있다.

$$T_{comp} = T_{dead} + \frac{V_{drop}}{V_{dc}} (T_s) \quad (3)$$

$$Y = X \cdot A, \quad (4)$$

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y$$

여기에서,

$$Y = \begin{bmatrix} Tc_1k \\ Tc_3k \\ Tc_5k \\ Tc_7k \\ Tc_10k \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Ts_1k & 1 \\ Ts_3k & 1 \\ Ts_5k & 1 \\ Ts_7k & 1 \\ Ts_10k & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} V_{drop}/V_{dc} \\ T_{dead} \end{bmatrix}$$

Tc : 캐리어 주파수별 시간 보상량
Ts_1k ~ Ts_10k : 캐리어 주파수별 타이머 값

그림 1-(b)는 전류의 크기가 증가함에 따라 전압 왜곡량의 추이를 나타내고 있으며 5kHz에서의 실 계측량과 그림 1-(a)의 캐리어 주파수별 시간보상량을 근거로 1kHz와 10kHz의 예측량을 나타내고 있다. 여기에서 작은 전류에서의 비선형성이 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 작은 전류에서의 비선형성을 개선하는 전압보상 방법을 제시하고자 한다.

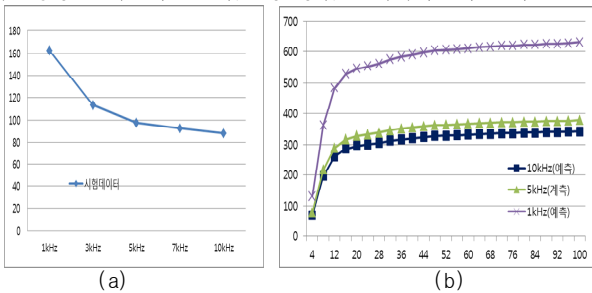


그림 1. 캐리어 주파수별 시간보상량(좌측)과 전류크기에 따른 전압 왜곡량(우측) 추이

2.3 전류 크기의 변화에 따른 보상

기존의 방법으로 전류 크기의 변화에 따른 보상은 그림 2와 같이 간단한 비례보상을 하였으나 전류가 작은 영역에서는 계측한 전류와 오차가 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서는 인버터의 계산시간과 저장 메모리를 고려하여 5개의 데이터를 샘플링 한 후 선형화하여 전압보상을 적용함으로써 실제로 측정된 전압 보상량과 거의 일치함을 알 수 있다.

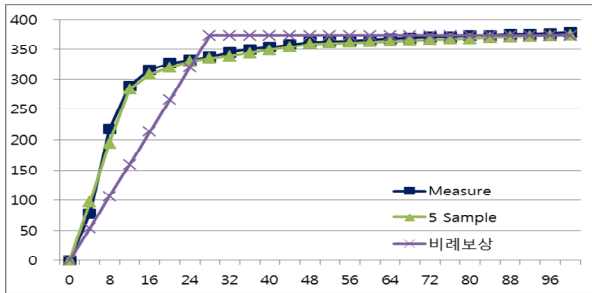


그림 2. 전류크기에 따른 계측량과 5샘플을 계산 적용한 보상

2.3 시험결과

본 제안을 검증하기 위해 440V, 22kW 산업용 인버터와 전동기를 2Hz 무부하 운전을 실시하였다.

시험과형에 있어서 기존방법에서의 전압보상은 전류극성에 따라 소자 턴온 시간에 일정량을 가감하고, 전류의 크기가 작은 구간에서는 전류크기에 비례적으로 보상량을 줄여주는 방식을 사용하였다. 제안된 방식에서는 운전 전 전압 강하량과 Dead Time량을 스스로 측정하여 운전 중에 캐리어 주파수에 따라 보상시간이 변동되도록 하였고, 전류가 작은 구간에서는 5샘플 선형화 방식에 의한 보상방법을 적용하였다.

그림 3은 기존 방법과 제안된 방법의 1kHz, 5kHz, 10kHz에서의 출력전류 파형을 나타내며, 그림 4는 측정된 전류파형의 THD를 나타내고 있다. 이것을 통하여 기존의

보상방법에 비하여 제안된 보상방법에서 전류파형의 왜곡이 감소하였음을 알 수 있으며 이는 전압보상량이 개선되었음을 의미한다.

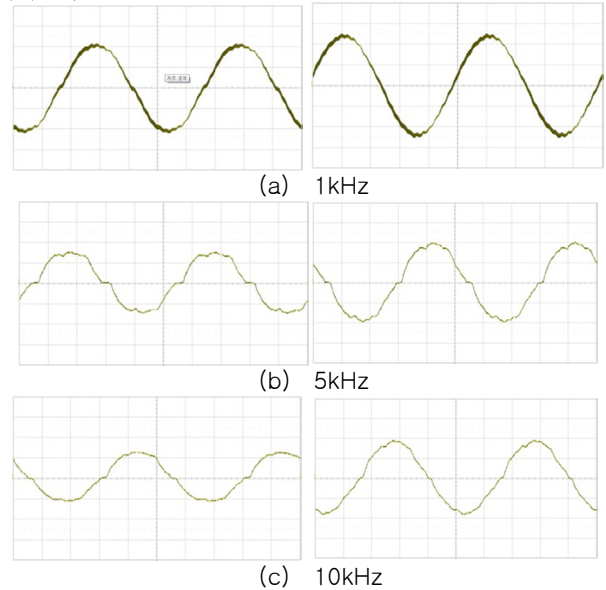


그림 3. 기존 방법(좌측)과 제안된 방법(우측)의 전류파형

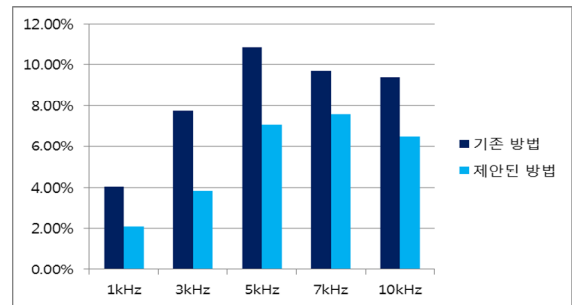


그림 4. 기존과 제안된 방법에서의 전류 THD 비교

3. 결론

본 논문에서 제안한 산업용 인버터의 출력전압 보상방법은 직류전류를 인가하여 전압왜곡량을 측정하고 주파수 변화에 따른 전압보상량과 출력전류의 크기에 따른 전압강하량을 보상함에 있어서 저전류 영역에서의 전압보상량을 개선하는 방법을 제시하였다. 실험을 통하여 기존의 방법과 제안된 방법의 THD를 비교 분석하여 출력전압이 개선됨을 검증하였고, 캐리어 주파수와 출력전류가 변하는 산업용 인버터에 효과적인 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 류호선, 김봉석, 이주현, 임익현, 황선환, 김장목 "전압형 PWM 인버터에서의 새로운 데드 타임 보상 기법", 전력전자학회 논문지, Vol. 11, No. 5, pp. 395-403, 2006.10
- [2] Frede Blaabjerg, John K. Pedersen, Paul Thøgersen, "Improved Modulation Techniques for PWM-VSI Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, pp. 87-95, Feb. 1997
- [3] 정세중, 김승환 "산업용 인버터의 출력전압 보상방법" 전력전자학회 하계학술대회 논문집, 2015.07, pp. 39-40