

각 상별 스위치의 전압강하와 스위칭 지연을 고려한 인버터의 비선형성 보상

강명찬, 이상훈, 윤영두
명지대학교

Inverter Nonlinearity Compensation Considering Voltage Drops and Switching Delays of Switches of Each Phase

Myeong-Chan Kang, Sang-Hoon Lee, Young-Doo Yoon
Myongji University

ABSTRACT

본 논문에서는 인버터의 정확한 전압 합성을 위해 인버터의 비선형성을 보상하는 기법을 제안한다. 인버터에서 데드타임, 스위칭 소자의 도통손실, 스위칭 지연 등의 성분들은 전압 합성에 비선형성을 유발한다. 제안된 방법은 이러한 요인들을 각 상별로 분석하고, 이를 보상함으로써 보다 정밀한 전압 합성을 가능케 한다. 이 방법의 유효성은 실험을 통하여 입증하였다.

1. 서론

인버터의 출력 전압은 각 상의 위쪽과 아래쪽의 스위치에 대한 상보적인 스위칭에 의해 정해진다. 그러나 실제 출력 전압은 전력용 반도체 스위치의 단락 방지를 위해 삽입된 데드타임과 스위칭 소자의 도통 손실 및 스위칭 지연에 의해 전압 왜곡이 발생하게 된다.^{[1],[2]} 이는 제어되는 전기기기에 전류왜곡을 일으키고 소음과 진동 등의 문제를 야기하며, 제어 성능을 떨어뜨린다.

본 논문에서는 전압 왜곡을 발생시키는 원인을 스위칭 소자의 도통 전압강하와 스위칭 지연으로 분류하고, 그에 따른 영향을 각 상별로 분석하였다. 이 분석결과를 토대로, 각 상별로 보상함으로써 출력 전압의 왜곡을 최소화 할 수 있다.

2. 비선형성의 분석

인버터의 출력 전압 왜곡 성분을 크게 전력용 반도체 스위치의 도통 전압강하와 스위칭 지연에 의한 오차로 분류하고, 각 상별로 분석하였다. 그리고 최종적으로 왜곡 성분들을 통합하여 분석하여 출력 전압 왜곡성분을 식으로 표현 하였다.

1.1. 스위치의 도통 전압강하

인버터에 사용되는 IGBT와 역병렬 다이오드는 도통될 때 전압강하가 발생한다. 이 전압강하 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_T = R_T i_T + V_{T0} \quad (1) \quad V_D = R_D i_D + V_{D0} \quad (2)$$

여기서, V_T 와 V_D 는 IGBT와 역병렬 다이오드의 전압 강하 성분이고 i_T 와 i_D 는 전류, R_T 와 R_D 는 온 저항을 의미하고 V_{T0} 와 V_{D0} 는 문턱 전압을 의미한다.

출력전압은 스위칭 상태와 전류의 방향에 따라서 다른 식으

로 나타낼 수 있다. 위쪽 스위치가 on되었을 경우, 인버터의 출력 전압은 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며 이와 마찬가지로 아래쪽 스위치가 on 됐을 때는 식(4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$V_{S1} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} - R_T i_s - V_{T0}, & \text{if } i_s > 0 \\ \frac{V_{dc}}{2} - R_D i_s - V_{D0}, & \text{if } i_s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{S0} = \begin{cases} -\frac{V_{dc}}{2} - R_D i_s - V_{D0}, & \text{if } i_s > 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2} - R_T i_s - V_{T0}, & \text{if } i_s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

지령전압은 식(5)과 같고 평균 출력 전압은 각 스위칭 상태에 따른 폴 전압과 스위칭 듀티로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 평균출력 전압은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_S^* = \frac{V_{dc}}{2} D + \frac{-V_{dc}}{2} (1-D) \quad (5)$$

$$\langle V_S \rangle = V_{S1} D + V_{S0} (1-D) \quad (6)$$

$$\langle V_S \rangle = V_S^* - i_s \left\{ \frac{R_T + R_D}{2} + \frac{V_S^*}{V_{dc}} (R_D - R_T) \right\} - \left\{ \frac{V_{T0} + V_{D0}}{2} + \frac{V_S^*}{V_{dc}} (V_{D0} - V_{T0}) \right\} \text{sign}(i_s) \quad (7)$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

데드타임의 영향이 큰 영 전압 근처에서 고려하면, 식(7)은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\langle V_S \rangle \cong V_S^* - i_s \frac{R_T + R_D}{2} - \frac{V_{T0} + V_{D0}}{2} \text{sign}(i_s) \quad (9)$$

1.2 스위치의 스위칭 지연

전력용 반도체 스위치는 on/off 시에 시지연이 발생하며, 그에 따른 전압 합성 오차가 발생한다. 스위칭 지연을 포함한 출력 전압의 평균은 다음과 같다.

$$\langle V_S \rangle = V_S^* - \frac{T_{dead} + T_{on} - T_{off}}{T_{sw}} V_{dc} \cdot \text{sign}(i_s) \quad (10)$$

1.3 총 출력전압 왜곡 성분

스위치의 도통 전압강하와 스위칭 지연에 의한 왜곡을 포함한 출력 전압의 평균은 중첩의 원리를 이용하여, 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\langle V \rangle = V_s^* - i_s \frac{R_T + R_D}{2} - \left(\frac{V_{T0} + V_{D0}}{2} + \frac{T_{total}}{T_{SW}} V_{ds} \right) \text{sign}(i_s) \quad (11)$$

$$T_{total} \equiv T_{dead} + T_{on} - T_{off} \quad (12)$$

따라서 식(13)과 같이 윗셋 전압을 정의 할 수 있다. 그에 따른 출력전압 합성오차는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{off} = \frac{V_{T0} + V_{D0}}{2} + \frac{T_{dead} + T_{on} - T_{off}}{T_{SW}} V_{dc} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} V_{err,x} &= V_{Sx}^* - \langle V_S \rangle \\ &= i_{Sx} \frac{R_T + R_D}{2} + V_{off,x} \text{sign}(i_{Sx}). \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, x 는 인버터의 a, b, c 각 상을 말한다. 그리고 IGBT와 diode의 on저항은 전기기기의 저항에 반영 할 수 있기 때문에 출력전압 오차는 $V_{off,x}$ 만 고려한다. 따라서 $V_{off,x}$ 측정을 통해 출력전압 오차를 알 수 있다.

3. 전압왜곡 성분의 측정 및 보상

그림 1은 $V_{offa} + V_{offb}$ 의 측정을 보여주는 등가회로이다.

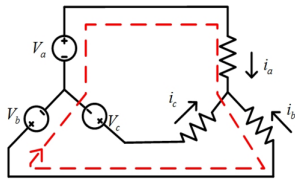


그림 1 윗셋 전압 측정을 위한 등가회로

측정을 위해 먼저, 전동기를 a상에 align하고 d축 전류를 인가한다. 이때, q축 전류는 0이다. 이때, 각 상의 전압과 전류는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{ds}^* - V_{err,a} & i_a &= i_{ds}^e \\ V_b &= -\frac{1}{2} V_{ds}^* + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{qs}^* - V_{err,b} & i_b &= -\frac{1}{2} i_{ds}^e \\ V_c &= -\frac{1}{2} V_{ds}^* - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{qs}^* - V_{err,c} & i_c &= \frac{1}{2} i_{ds}^e \end{aligned} \quad (15)$$

loop A(빨간 점선)의 전압은 식(16)과 같이 나타 낼 수 있다. 이에 식(15)값을 대입해서 정리하고, 저항 성분은 전동기의 저항에 반영되었기 때문에 저항성분을 무시하면 식(17)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_a - V_b = R_a i_a - R_b i_b \quad (16)$$

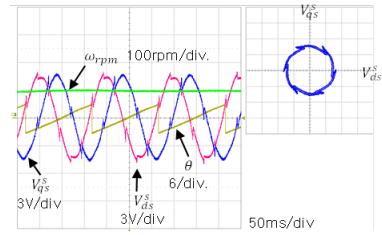
$$V_{offa} + V_{offb} = \frac{3}{2} V_{ds}^* - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{qs}^* \quad (17)$$

$V_{offb} + V_{offc}$ 와 $V_{offc} + V_{offa}$ 도 마찬가지로 b와 c상에 align하여 측정 할 수 있다.

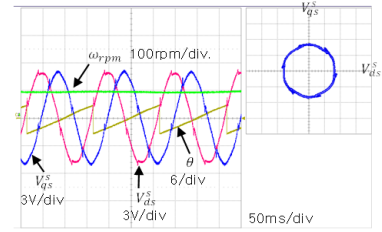
그리고 비선형성을 보상하기 위해서는 문턱전압 성분 ($\frac{V_{D0,x} + V_{T0,x}}{2}$)과 스위칭 지연 성분 ($\frac{T_{total,x}}{T_{SW}} V_{dc}$)을 각 상별로 알아야한다. 그러므로 알아야할 미지수는 6개이고 측정 가능한 값은 3개 이므로 2개의 각각 다른 스위칭 주파수에서 $V_{offa} + V_{offb}$, $V_{offb} + V_{offc}$, $V_{offc} + V_{offa}$ 을 측정한다. 그 후, 6개의 측정값과 식(13)의 각상의 전압 윗셋 식을 연립하여 각 상의 전압 윗셋 값을 구할 수 있으며 이를 보상해 줌으로써 출력 전압왜곡성분을 줄일 수 있다.

4. 실험결과

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 기존에 제안된 방법과 비교분석 하였다. 실험은 5 kW SPMSM과 부하전동기로 이루어진 M-G set로 진행 하였으며 모터드라이브로 15 kW 인버터를 사용하였다. 그림 2는 동기기를 100 r/min으로 회전시키고, 15 Nm 으로 토크제어 하고 있을 때의 기존에 제안된 방법과 제안하는 방법의 V_{ds}^s , V_{qs}^s 를 나타낸다. 실험결과를 보면 제안하는 방법의 V_{ds}^s , V_{qs}^s 의 파형이 거의 정현파로 나타남을 알 수 있다. 이는 전압 강하 성분과 스위칭 지연성분을 각 상마다 보상해 주었기 때문이다. 반면에 기존에 제안된 방법에서는 약간의 왜곡이 일어나는 것을 볼 수 있었으므로 제안된 방법으로 더 정확한 전압 합성이 가능함을 알 수 있다.



(a) 기존에 제안된 방법으로 보상 시의 V_{ds}^s , V_{qs}^s



(b) 제안된 방법으로 보상 시의 V_{ds}^s , V_{qs}^s

그림 2 V_{ds}^s , V_{qs}^s

5. 결론

본 논문에서는 인버터의 비선형성을 각 상별로 분석하고, 보상하는 방법을 제안하였다. 실험 결과로부터, 제안된 방법을 적용 했을 때 전압 왜곡이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며 그 유효성을 검증 하였다. 제안된 방법을 이용함으로써 왜곡 성분을 보상하여 더욱 정확한 인버터의 출력전압을 얻을 수 있다.

이 논문은 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20143030071320)

참고 문헌

- [1] Jong-Woo Choi, Seung-Ki Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 11, NO. 2, MAR 1996
- [2] John K. Pedersen, Frede Blasbjerg, Johnny W. Jensen, and Paul Thogersen, "An ideal PWM-VSI inverter with feedforward and feedback compensation", EPE. 1993, p.501-507.