

무변압기형 태양광 인버터의 출력 전류 DC offset 제거 방법

홍기남*, 최익+, 최주엽**, 이상철***, 이동하***

*광운대학교 임베디드SW공학과(hong0093@kw.ac.kr), +교신저자: 광운대학교 제어계측공학과,
광운대학교 전기공학과, *대구경북과학기술원

Output Current DC offset Removal Method for Trans-less PV Inverter

Hong, Ki-Nam* Choy, Ick+ Choi, Ju-Yeop** Lee, Sang-Chul*** Lee, Dong-Ha***

*Dept. of Embedded Software Eng. Kwangwoon Univ,
+Dept. of Information and Control Eng. Kwangwoon Univ,
**Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ
***Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

Abstract

Since PV PCS uses output current sensor for ac output current control, the sensor's sensing value includes unnecessary offset inevitably. If PV inverter is controlled by the included offset value, it's output current will generate DC offset. The DC offset of output current for trans-less PV inverter is fatal to grid, which results in saturating grid side transformer. Usually DSP controller of PV inverter reads several times sensing value during initial operation and, finally, it's average value is used for offset calibration. However, if temperature changes, the offset changes, too. And also, the switch device is not ideal, both each switching element of the voltage drop difference and on & off time delay difference generate DC offset. Thus, to compensate for deadtime and the switch voltage drop, feedback control by output current DC offset should be provided to compensate additional distortion of the output current. The validity of the proposed method is confirmed through PSIM simulation.

Keywords : PV PCS, 무변압기형 인버터(Trans-less Inverter), 직류 편차(DC Offset), 센서 보정(Sensor Calibration), 듀얼 센서(Dual Sensor)

기 호 설 명

	I_o	: 인버터 출력전류 [A]
	D_{on}	: duty 대비 스위치의 on delay [pu]
D		: PWM duty [pu]
	D_{off}	: duty 대비 스위치의 off delay [pu]
V_{dc}		: 직류단 전압 [V]
	$V_{Isens-p}$: 정방향 전류센서 측정값 [V]

Submit date : 2012. 5. 12, Judgment date : 2012. 6. 12, Publication decide date : 2012. 6. 30
Communication author : Choy, Ick(ickchoy@kw.ac.kr)

$V_{I\text{sens}-n}$: 역방향 전류센서 측정값 [V]

V_{offset} : 전류센서의 오프셋 [V]

1. 서 론

교류 전동기 구동 시스템에서 계통연계형 인버터까지 많은 분야에서 빠른 스위칭이 가능한 MOSFET, IGBT와 같은 스위칭소자를 사용하여 출력전압과 주파수를 동시에 제어할 수 있는 전압형 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터를 사용하고 있다.

일반적으로 전압형 PWM 인버터는 회로의 단락을 방지하기 위해 삽입된 dead time과 스위칭소자의 voltage drop 및 on & off time delay 등과 같은 스위칭 소자의 비선형적인 특성에 의해 출력전류와 출력전압에 왜곡이 존재한다. 이로 인해 출력전압의 기본파 성분이 감소하며 전동기 제어시에는 소음과 진동이 유발되고 계통연계형 인버터에서는 THD(Total Harmonic Distortion)의 증가와 출력전류에 DC offset이 발생한다. 특히 저전압 대전류 시스템에서 그 영향이 크게 나타나고 DC offset은 계통연계형 인버터에서는 더욱 치명적이다.

dead time과 switch voltage drop, on & off time delay의 영향을 가장 간단한 토폴로지에서 분석을 하였고 기본적인 영향에 대해서 feedforward로 보상을 하고 실제로 발생하는 추가적인 영향에 대해서는 출력전류의 DC offset을 feedback으로 하여 추가로 보상을 하여 결국 출력전류의 왜곡보상과 DC offset의 제거를 동시에 이루었다.

2. dead time과 스위치 전압 강하 보상

그림 1에 나타낸 단상 인버터를 기준으로 출력전류 I_o 를 인버터에서 나가는 방향을 (+) 방향으로 인버터로 들어오는 방향을 (-) 방향으로 정의하고 각 방향일 때의 출력전압 V_o 를 평균전압으로 분석하면 전류가 (+)방향일

면 스위치 S_p 와 다이오드 D_n 의 voltage drop의 영향이 나타나고 전류가 (-)방향이면 스위치 S_n 과 다이오드 D_p 의 voltage drop의 영향이 나타난다.

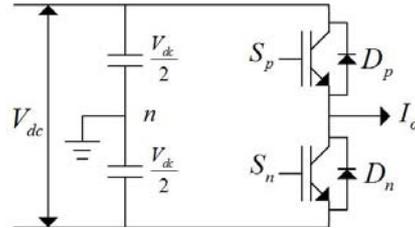


Fig. 1 1 Phase PWM Inverter

PWM 반주기 기준으로 출력전류가 (+)방향일 때 dead time의 영향이 나타나는 구간과 나타나지 않는 구간, 출력전류가 (-)방향일 때 dead time의 영향이 나타나지 않는 구간과 나타나는 구간으로 총 4가지의 경우(①, ②, ③, ④)로 나누어 분석할 수 있다. 각 구간마다 보상해야 할 값을 duty(D)에 비례하는 값(ΔD)으로 표현할 수 있는데 이상적으로 스위칭 소자의 voltage drop(V')이 모두 같다면 각 구간마다 feedforward로 보상해야 할 값들은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \Delta D = D' + \frac{V'}{V_{dc}}, \quad \textcircled{2} \Delta D = \frac{V'}{V_{dc}} \quad (1)$$

$$\textcircled{3} \Delta D = -\frac{V'}{V_{dc}}, \quad \textcircled{4} \Delta D = -D' - \frac{V'}{V_{dc}} \quad (2)$$

D' 는 duty 대비 dead time의 비율이므로 시간으로 변환하면 dead time(T_d)과 PWM 주기(T_c), 스위칭 주파수(f_c)로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$D' = \frac{T_d}{T_c/2} = 2T_d f_c$$

그림 2의 feedforward 제어 블록도와 같이

dead time과 스위치의 voltage drop만 존재한다면 출력전류의 방향을 판단하여 (+)방향일 때는 식(1)의 두 보상값의 평균만큼 증가해주고, (-)방향일 때는 식(2)의 두 보상값의 평균만큼 감소해주면 된다. 즉 전류의 방향에 따라 duty를 조금씩 증감해주면 된다.

시뮬레이션의 전류 출력파형을 기준 전류와 비교, 보상 전, 후 파형을 그림 3에 나타내었다. (Vdc=24V, dead time=3us, 스위치 voltage drop=1V, bipolar SPWM)

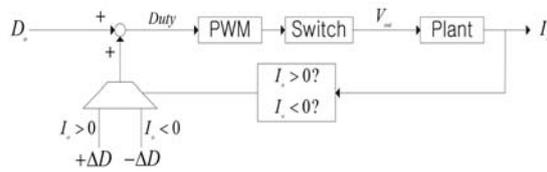


Fig. 2 Feedforward Control Block

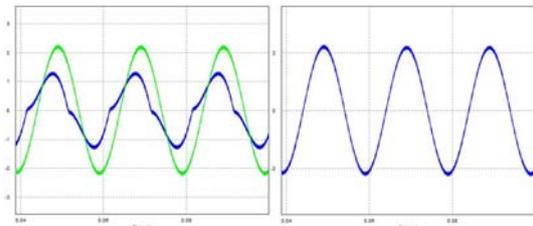


Fig. 3 Dead time and Switch Voltage Drop Compensation (THD 14% -> 2%)

3. 출력전류의 DC offset 발생

스위칭 소자가 이상적이지 않기 때문에 스위칭 소자의 특성을 실제에 가깝게 가정하고 또다시 PWM 반주기 기준으로 출력전류가 (+)방향일 때 dead time의 영향이 나타나는 구간과 나타나지 않는 구간, 출력전류가 (-)방향일 때 dead time의 영향이 나타나지 않는 구간과 나타나는 구간으로 총 4가지의 경우 ①, ②, ③, ④로 나누어 분석해 보면 다음과 같다. 4가지의 구간을 그림 4에 나타내었다. 각 경우의 평균출력전압(V_o^*)을 구해보면 ①경우는 다음과 같다.

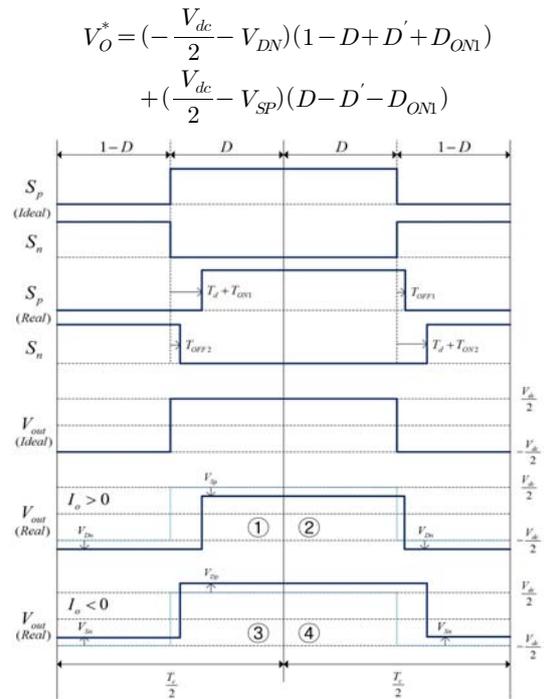


Fig. 4 Switch Pulse and Output Voltage of Non-Ideal Switch

$$V_o^* + \frac{V_{dc}}{2} + V_{DN} + (V_{dc} + V_{DN} - V_{SP})D' + (V_{dc} + V_{DN} - V_{SP})D_{ON1} = (V_{dc} + V_{DN} - V_{SP})D$$

여기에서 각 스위치들의 voltage drop이 이상적으로 같고 ($V^1 = V_{DN} = V_{SP}$), on & off time delay가 없다면 D에 대해 수식을 정리하여 보상분을 구해보면 식(1)의 ①과 같다. 수식을 계속 전개하면 다음과 같다.

$$V_o^* + V'_{dc} + V' + (V_{dc} + \Delta V)D' + (V_{dc} + \Delta V)D_{ON1} = (V_{dc} + \Delta V)D$$

(여기에서 $V'_{dc} = \frac{V_{dc}}{2}$, $V' = V_{DN}$, $\Delta V = V_{DN} - V_{SP}$)

$$\frac{V_o^*}{V_{dc} + \Delta V} + \frac{V'_{dc}}{V_{dc} + \Delta V} + \frac{V'}{V_{dc} + \Delta V} + D + D_{ON1} = D \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Taylor series : } f(x + \Delta x) = \\
 & f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)}{2!}\Delta x^2 + \frac{f'''(x)}{3!}\Delta x^3 \\
 & + \dots + \frac{f^n(x)}{n!}\Delta x^n \quad (4)
 \end{aligned}$$

식의 간소화를 위해서 식(3)의 처음 3개의 항을 테일러급수로 정리하면 다음과 같다. 식(4)는 테일러급수를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \frac{V_O^*}{V_{dc} + \Delta V} &= \frac{V_O^*}{V_{dc}} - \frac{V_O^*}{V_{dc}^2} \Delta V + \frac{V_O^*}{V_{dc}^3} \Delta V^2 \\
 &- \frac{V_{dc}^*}{V_{dc}^4} \Delta V^3 + \dots \approx \frac{V_O^*}{V_{dc}} - \frac{V_O^*}{V_{dc}^2} \Delta V \\
 \frac{V_{dc}'}{V_{dc} + \Delta V} &= \frac{V_{dc}'}{V_{dc}} - \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^2} \Delta V + \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^3} \Delta V^2 \\
 &- \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^4} \Delta V^3 + \dots \approx \frac{V_{dc}'}{V_{dc}} - \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^2} \Delta V \\
 \frac{V'}{V_{dc} + \Delta V} &= \frac{V'}{V_{dc}} - \frac{V'}{V_{dc}^2} \Delta V + \frac{V'}{V_{dc}^3} \Delta V^2 \\
 &- \frac{V'}{V_{dc}^4} \Delta V^3 + \dots \approx \frac{V'}{V_{dc}} - \frac{V'}{V_{dc}^2} \Delta V
 \end{aligned}$$

전개한 3개의 항을 다시 식(3)에 적용하여 계속 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{V_O^*}{V_{dc}} + \frac{V_{dc}'}{V_{dc}} + \frac{V'}{V_{dc}} - \frac{V_O^*}{V_{dc}^2} \Delta V - \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^2} \Delta V \\
 - \frac{V'}{V_{dc}^2} \Delta V + D' + D_{ON1} = D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{여기에서 } \alpha_{case1} = \\
 - \frac{V_O^*}{V_{dc}^2} \Delta V - \frac{V_{dc}'}{V_{dc}^2} \Delta V - \frac{V'}{V_{dc}^2} \Delta V) \\
 \frac{V_{dc} D_O - V_{dc}/2}{V_{dc}} + \frac{V_{dc}/2}{V_{dc}} + \frac{V'}{V_{dc}} \\
 + \alpha_{case1} + D' + D_{ON1} = D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\because V_O^* = V_{dc} D_O - \frac{V_{dc}}{2}, V_{dc}' = \frac{V_{dc}}{2}) \\
 D_O + D' + D_{ON1} + \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{case1} = D
 \end{aligned}$$

$$D = D_O + D' + \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{case1} + D_{ON1} \quad (5)$$

식(1)의 ①에 비해 각 스위치의 voltage drop의 차이로 인한 α 항과 on time delay로 인한 D_{ON} 항이 늘어난 것을 알 수 있다. 늘어난 값만큼 더 보상을 해주어야 출력에 왜곡이 생기지 않는다. 하지만 스위치의 voltage drop의 차이와 on & off time delay는 미리 알 수 없는 값이다. ②, ③, ④의 경우도 계산해 보면 다음과 같다.

②의 경우:

$$\begin{aligned}
 V_O^* &= \left(\frac{V_{dc}}{2} - V_{SP} \right) (D + D_{OFF1}) \\
 &+ \left(-\frac{V_{dc}}{2} - V_{DN} \right) (1 - D - D_{OFF1}) \\
 V_O^* + \frac{V_{dc}}{2} + V_{DN} + (V_{dc} + V_{DN} - V_{SP}) D_{OFF1} \\
 &= (V_{dc} + V_{DN} - V_{SP}) D \\
 D &= D_O + \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{case2} - D_{OFF1} \quad (6)
 \end{aligned}$$

③의 경우:

$$\begin{aligned}
 V_O^* &= \left(-\frac{V_{dc}}{2} + V_{SN} \right) (1 - D + D_{OFF2}) \\
 &+ \left(\frac{V_{dc}}{2} + V_{DP} \right) (D - D_{OFF2}) \\
 V_O^* + \frac{V_{dc}}{2} - V_{SN} + (V_{dc} + V_{DP} - V_{SN}) D_{OFF2} \\
 &= (V_{dc} + V_{DP} - V_{SN}) D \\
 D &= D_O - \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{case3} + D_{OFF2} \quad (7)
 \end{aligned}$$

④의 경우:

$$\begin{aligned}
 V_O^* &= \left(\frac{V_{dc}}{2} + V_{DP} \right) (D + D' + D_{ON2}) \\
 &+ \left(-\frac{V_{dc}}{2} + V_{SN} \right) (1 - D - D' - D_{ON2}) \\
 V_O^* + \frac{V_{dc}}{2} - V_{SN} - (V_{dc} + V_{DP} - V_{SN}) D' \\
 &- (V_{dc} + V_{DP} - V_{SN}) D_{ON2} \\
 &= (V_{dc} + V_{DP} - V_{SN}) D
 \end{aligned}$$

$$D = D_O - D' - \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{casc4} - D_{ON2} \quad (8)$$

식(5), (6), (7), (8)을 이용하여 식(1), (2)와 대조적으로 실제 이상적이지 않은 스위치일 때의 ①, ②, ③, ④의 경우마다 각 보상분을 다시 정리하면 식(9), (10), (11), (12)와 같다.

$$\textcircled{1} \Delta D = D' + \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{casc1} + D_{ON1} \quad (9)$$

$$\textcircled{2} \Delta D = \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{casc2} - D_{OFF1} \quad (10)$$

$$\textcircled{3} \Delta D = -\frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{casc3} + D_{OFF2} \quad (11)$$

$$\textcircled{4} \Delta D = -D' - \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_{casc4} - D_{ON2} \quad (12)$$

식(9), (10), (11), (12)에서 보듯이 이상적인 스위치일 때의 보상분인 식(1), (2)에 비해 α 항과 on & off time delay에 의한 항이 늘었다. 말하자면 왜곡이 더욱 크게 나타난다는 것이다.

식(9), (10), (11), (12)를 전류의 방향에 따라 합치면 아래와 같다.

$I_O > 0$:

$$\Delta D = \frac{D'}{2} + \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_P + \frac{D_{ON1} - D_{OFF1}}{2}$$

$I_O < 0$:

$$\Delta D = -\frac{D'}{2} - \frac{V'}{V_{dc}} + \alpha_N + \frac{D_{OFF2} - D_{ON2}}{2}$$

전류의 방향에 따라서 판단해 보면 α 항과 on & off time delay 항이 전류가 (+)방향일 때와 (-)방향일 때 각각 차이가 난다면 출력 전류에 DC offset이 발생한다.

$$\alpha_P + \frac{D_{ON1} - D_{OFF1}}{2} > \alpha_N + \frac{D_{OFF2} - D_{ON2}}{2} \quad (13)$$

$$\alpha_P + \frac{D_{ON1} - D_{OFF1}}{2} < \alpha_N + \frac{D_{OFF2} - D_{ON2}}{2} \quad (14)$$

추가로 보상해 주어야 할 보상분의 차이이기 때문에 식(13)의 경우라면 출력전류의 DC offset이 음의 값으로 나타날 것이고 식(14)의 경우라면 출력전류의 DC offset이 양의 값으로 나타날 것이다.

하지만 α 항과 on & off time delay 항은 미리 알 수 없는 값이기 때문에 feedforward로 보상할 수 없다. 하지만 위에서 설명했듯이 DC offset의 발생 원인이기 때문에 출력전류의 DC offset을 체크하여 DC offset이 발생하면 그 값을 feedback으로 받아 feedforward의 보상분에 추가로 더 보상을 해주어야 한다.

4. 듀얼 센서를 이용한 출력전류의 측정

PV PCS 시스템에서 출력전류 제어를 위해서 인버터의 출력부에 전류센서를 사용하는데 보통 센서의 측정값에는 오프셋이 포함된다.[2] 온도 변화에 따른 전류센서의 오프셋 변화를 추정하기 위해서 본 논문에서는 기존에 인버터의 출력전류의 측정을 위해 정방향으로 한 개의 전류센서만 사용하던 방식을 보완하여 정방향과 역방향으로 각각 전류 센서 2개를 사용하여 즉, 듀얼 센서를 사용하여 두 센서의 측정값을 비교함으로써 실시간으로 오프셋을 계산하는 방법을 제안하였다. 듀얼 센서로 계산된 오프셋을 측정값에 보정해 줌으로써 실시간으로 온도 변화에 상관없이 측정값을 신뢰할 수 있게 하였다.

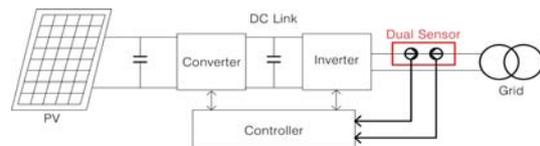


Fig. 5 PV PCS with Dual Current Sensor

$$V_{offset} = \frac{V_{Isens-p} + V_{Isens-n} - 3}{2} \quad (15)$$

센서의 출력전압이 5V레벨이고 DSP의 ADC 입력 전압이 3V레벨이라면 식(15)과 같이 간단한 수식으로 전류 센서부의 오프셋을 계산할 수 있다.[2]

5. 출력전류의 DC offset 제거

전적으로 출력전류의 값을 믿고 제어하기 때문에 4절과 같은 방법으로 출력전류의 측정 신뢰도를 확보한 후에 제안된 출력전류의 DC offset 제거방법을 구현하였다.

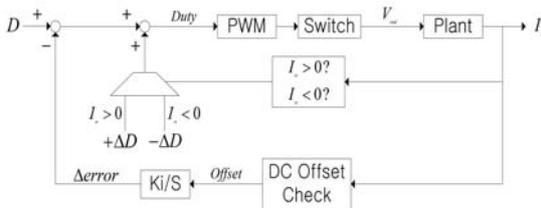


Fig. 6 Feedback Control Block

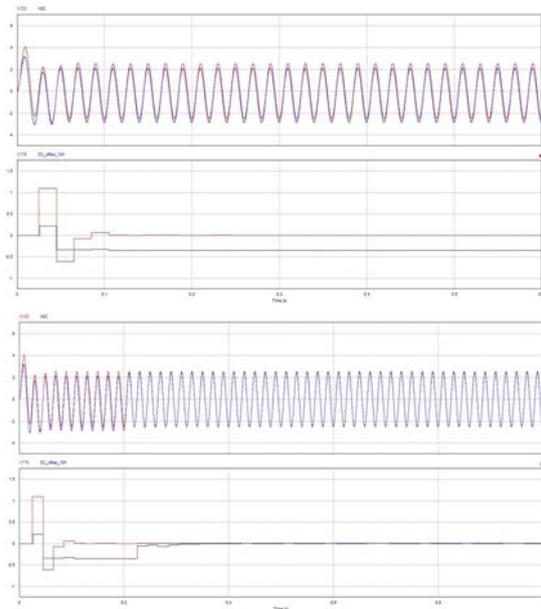


Fig. 7 Output Current DC offset Removal Simulation

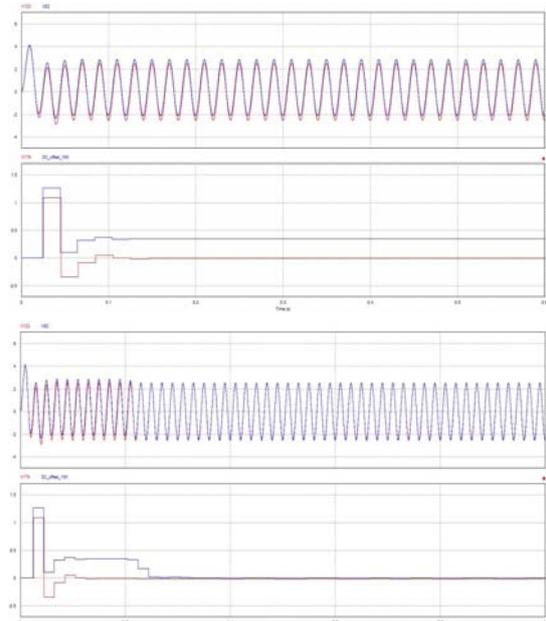


Fig. 8 Output Current DC offset Removal Simulation

그림 6의 제어 블록도에서 보듯이 전류의 방향을 판단해서 식(1), (2)에 계산된 보상 값을 feedforward로 기본적으로 보상을 한다. 그리고 식(9)-(12)에서 나타낸 추가로 발생하는 왜곡은 feedback으로 출력전류를 측정하여 DC offset check 블록에서 출력전류의 DC offset을 계산한 후 이 값을 적분제어를 통해 duty에 증감해 줌으로써 추가적인 왜곡도 보상할 수 있다. 결론적으로 출력전류의 DC offset이 제거되는 것이다.

그림 7은 상단 스위치(Sp)의 voltage drop을 다른 스위치에 비해 더 크게 한 것이고 그림 8은 상단 스위치의 on time delay를 다른 스위치에 비해 길게 한 것이다. 스위치 voltage drop의 차이, on & off time delay의 차이가 DC offset을 발생시킨 후 이를 보상한 것이다.

DC offset 발생 확인을 위해 10 cycle정도는 feedforward보상만 한 후, 10 cycle 이후부터 제안한 방식대로 feedback으로 추가 보상을 duty에 더하여 DC offset이 제거되도록 하였다.

6. 결 론

결론적으로 feedforward로 dead time과 스위치의 voltage drop에 의한 출력전류의 왜곡을 보상하였고 추가적으로 출력전류의 DC offset을 체크하여 feedback으로 추가 보상분을 보상함으로써 DC offset도 함께 제거되는 효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 광운대학교 교내학술연구비 지원과 교육과학기술부 대구경북과학기술원 일반사업(12-BD-0101)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Seung-Gi Jeong, Min-Ho Park, "The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters", IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol.38, No.2, pp.108-114, 1991.
2. Ki-Nam Hong, Ick Choy, Ju-Yeop Choi, Young-Kwon Lee, "Current Sensor Offset Calibration Method using Dual Sensor for trans-less PV Inverter", KSES, KSES 2012 Spring Annual Conference. Vol 32, NO.1, pp.182-187