

단상 PVPCS 출력 전류의 리플 개선을 위한 노치 필터 및 피드 포워드 제어기 설계

김승민*, 양승대*, 최주엽*, 최 익**, 이영권***

*광운대학교 대학원 임베디드SW공학과(seungmin@kw.ac.kr), 광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr)
광운대학교 로봇학과, *금비전자 기술연구소

The Feed-forward Controller and Notch Filter Design of Single-Phase Photovoltaic Power Conditioning System for Current Ripple Mitigation

Kim, Seung-Min* Yang, Seung-Dae* Choi, Ju-Yeop* Choy, Ick** Lee, Young-Gwon***

*Dept. of Embedded Software, Kwangwoon University(seungmin@kw.ac.kr)

**Dept. of Information and Control Engineering, Kwangwoon University(seungmin@kw.ac.kr)

***Kum-Bee Technical Institute, Kwangwoon University(seungmin@kw.ac.kr)

Abstract

A single-phase PVPCS(photovoltaic power conditioning system) that contains a single phase dc-ac inverter tends to draw an ac ripple current at twice the out frequency. Such a ripple current may shorten passive elements life span and worsen output current THD. As a result, it may reduce the efficiency of the whole PVPCS system. In this paper, the ripple current propagation is analyzed, and two methods to reduce the ripple current are proposed. Firstly, this paper presents notch filter with IP voltage controller to reject specific current ripple in single-phase PVPCS. The notch filter can be designed that suppress just only specific frequency component and no phase delay. The proposed notch filter can suppress output command signal in the ripple bandwidth for reducing output current THD. Secondly, for reducing specific current ripple, the other method is feed-forward compensation to incorporate a current control loop in the dc-dc converter. The proposed notch filter and feed-forward compensation method have been verified with computer simulation and simulation results obtained demonstrate the validity of the proposed control scheme.

Keywords : 노치필터(Notch Filter), THD(Total Harmonic Distortion), 전향 보상(feed-forward compensation), 전류 제어 루프(current control loop), 120hz 전류 리플(120Hz Current Ripple)

1. 서론

단상 dc-ac inverter를 포함하는 단상 PVPCS (Photovoltaic power conditioning system)에서는 계통의 주파수의 2배에 해당하는 120Hz의 ac 리플이 inverter를 타고 넘어와서 dc-link 단에 남게 된다.

그러한 저주파 리플 전류는 커패시터의 수명을 단축시키고, 출력 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)을 나쁘게 만든다. 그 결과, 전체 PV PCS 시스템의 효율을 떨어뜨리게 된다.

그러므로 계통으로부터 타고 들어오는 120Hz 저주파 리플을 효과적으로 저감시키는 방안이 필요하다. 이에 대해 본 논문에서는 두 가지 방법을 제시하였다. 하나는 노치필터에 의한 120Hz 리플 차단이고 다른 하나는 피드포워드 보상을 통한 리플 저감방법이다.

각각의 방법을 해당 시스템에 적용하여 적용 전·후 효과를 비교하여 효과를 입증하였다.

2. Notch filter 설계

노치 필터는 특정 주파수에서 급격한 감쇠 특성을 가지는 필터로 원치 않는 특정 주파수 성분을 제거하는 데 그 목적이 있다.

노치 필터의 형태는 기본적으로 저역통과 필터와 고역통과 필터의 조합으로 정의될 수 있으며, 다음 식과 같이 2차 전달함수 형태로 나타낼 수 있다. [1]

$$G_n = \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

where, f_n : 공진 주파수(노치 주파수)

ζ_z : 전달함수의 영점에 관계된 상수

ζ_p : 전달함수의 극점에 관계된 상수

공진 주파수 ω_n 에서 $G_n(j\omega)$ 의 크기로 인한 감쇠는 다음 식과 같다.

$$|G_n(j\omega)| = \frac{\zeta_z}{\zeta_p} \quad (2)$$

감쇄시킬 주파수(공진 주파수)를 알고 그 주파수에서 필요한 감쇠를 알면 위 전달함수 식을 통해 노치 필터를 설계할 수 있다.

2.1 노치 필터의 특성

동일 공진주파수라 하더라도 ζ_z , ζ_p 를 어떻게 설계하느냐에 따라 그 특성이 달라진다. 공진 주파수를 120Hz로 정하고, 하기 표와 같이 ζ_z 와 ζ_p 를 바꿔가며 보드선도를 그려보면 다음과 같다.

	ζ_p	ζ_z	depth	width
G_{n1}	0.1	0.05	-6dB	66Hz
G_{n2}	0.3	0.05	-15.6dB	273Hz
G_{n3}	0.1	0.03	-10.5dB	84Hz

표1. Buck 컨버터의 주요 설계 사양

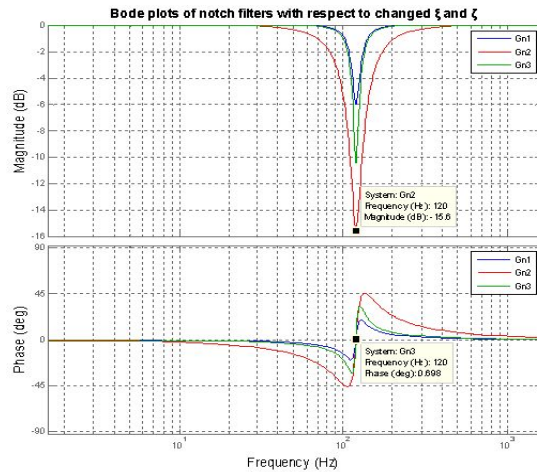


그림1. 노치 필터 전달함수의 보드 선도

ζ_z 는 깊이에 주로 영향을 미치는 변수로서 크기가 작을수록 깊이가 깊어지고, ζ_p 는 폭과 감쇄율에 관계된 인자로서 ζ_p 가 커지면 폭이 넓어지고 감쇄율이 커진다.

ζ_z 와 ζ_p 의 영향을 보기 위해 근궤적을 그려보면 다음과 같다.

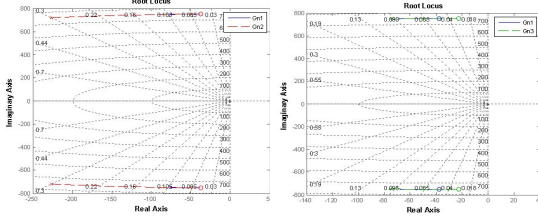


그림2. 노치 필터 전달함수의 근궤적

ζ_p 의 증가는 복소평면 상에서 영점의 위치는 변화가 없으나, 극점의 위치가 좌측으로 이동한다. 또한 ζ_z 의 감소는 복소평면 상에서 극점의 위치는 변화가 없으나, 영점의 위치가 우측으로 이동한다. 이는 제어기 측면에서 보면 s평면의 허수축에 매우 근접한 복소극쌍을 상쇄할 수 있다. 원치 않는 극을 상쇄하는 영점들이 존재하는 전달함수를 설계하여 동적 성능을 향상시킬 수 있다.

2.2 노치필터 선정

주파수영역 관점에서 보면, 노치필터는 크기 특성과 위상 특성이 시스템의 고주파수 및 저주파수 성질에 영향을 주지 않으므로, 어떤 경우에는 진상 및 지상보상기보다 우수한 장점을 가진다.

차단 주파수 120Hz에서 감쇄율 39.1dB로 잡아서 노치필터 설계하면 다음 그림과 같다.

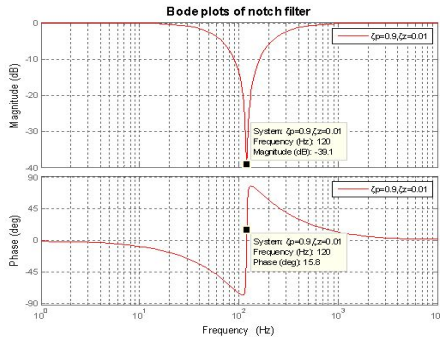


그림3. 설계된 노치 필터 전달함수의 보드선도

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(1.759e^{-6})s^2 + (2.653e^{-5})s + 1}{1.759e^{-6}s^2 + 2.387e^{-3}s + 1} \quad (3)$$

2.3 디지털 노치 필터

식 1은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_n = \frac{s^2 + D_z s + \omega_n^2}{s^2 + D_p s + \omega_n^2} \quad (4)$$

위 식을 이산치 노치 필터의 설계를 위해 bilinear transform(Tustin's method)을 적용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{s^2 + D_z s + \omega_n^2}{s^2 + D_p s + \omega_n^2} \Bigg|_{s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}} \\ &= \frac{\frac{2}{T^2} \frac{(z-1)^2}{(z+1)^2} + D_z \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} + \omega_n^2}{\frac{2}{T^2} \frac{(z-1)^2}{(z+1)^2} + D_p \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} + \omega_n^2} \quad (5) \\ &= \frac{z^0(1 + \frac{TD_z}{2} + \frac{T^2\omega_n^2}{4}) + z^{-1}(\frac{T^2\omega_n^2}{2} - 2) + z^{-2}(\frac{T^2\omega_n^2}{4} - \frac{TD_z}{2} + 1)}{z^0(1 + \frac{TD_p}{2} + \frac{T^2\omega_n^2}{4}) + z^{-1}(\frac{T^2\omega_n^2}{2} - 2) + z^{-2}(\frac{T^2\omega_n^2}{4} - \frac{TD_p}{2} + 1)} \end{aligned}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.9372z^0 - 1.8678z^{-1} + 0.9358z^{-2}}{1.0000z^0 - 1.8678z^{-1} + 0.8731z^{-2}} \quad (6)$$

2.4 디지털 노치 필터의 MATLAB Simulink

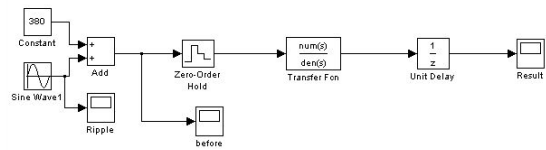


그림4. 노치 필터의 MATLAB Simulink

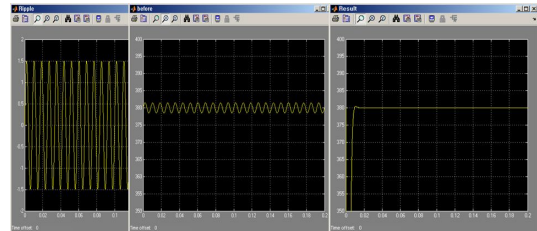


그림5. 노치 필터의 MATLAB Simulink 파형

3. Feed-Forward 보상

DC-Link의 120Hz 전압 리플에 대한 영향을 효과적으로 저감하는 또 다른 방법으로 feed-forward 보상이 있다.

3.1 DC-Link에 나타나는 저주파 리플

무 변압기형 단상 DC/AC 인버터에는 계통의 60Hz 주파수가 넘어와서 120Hz 리플이 DC Link 단에 생기게 된다.

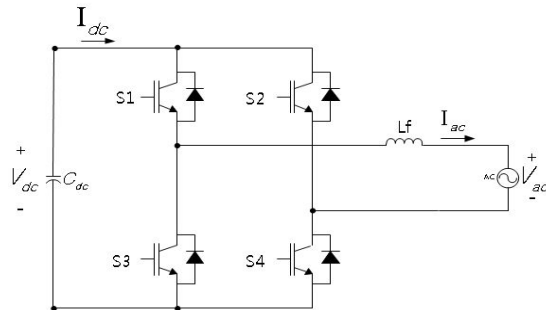


그림6. 단상 계통 연계 인버터 회로

계통의 전압과 전류를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_m \sin \omega t \\ I_{ac} &= I_m \sin \omega t \quad (7) \\ \text{where, } \omega &= 2\pi f \end{aligned}$$

dc-link의 전력과 인버터 출력단의 전압을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{dc} &= V_{dc} I_{dc} \\ P_{ac} &= V_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{V_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (8) \end{aligned}$$

인버터가 이상적이라 가정하면, dc-link단의 전력은 인버터의 출력전압과 같다.

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{V_m I_m}{2 V_{dc}} (1 - 2 \cos 2\omega t) = I_{DC} + I_{dc(ac)} \quad (9) \\ \text{where, } I_{DC} &= \frac{V_m I_m}{2 V_{dc}}, I_{dc(ac)} = -\frac{V_m I_m}{2 V_{dc}} \cos 2\omega t \end{aligned}$$

그러므로 dc-link의 전압 리플은 리플 전류 $I_{dc(ac)}$ 에 의해 커패시터 C_{dc} 에 걸리는 전압의 크기와 같다.

$$\begin{aligned} V_{dc(ac)} &= \frac{1}{C} \int -I_{dc(ac)} dt = \frac{V_m I_m}{2 V_{DC} C} \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \\ &= \frac{V_m I_m}{4\omega C V_{DC}} \sin 2\omega t = V_{m(ac)} \sin 2\omega t \quad (10) \\ \text{where, } \omega &= 2\pi f \end{aligned}$$

3.2 제어 블록도

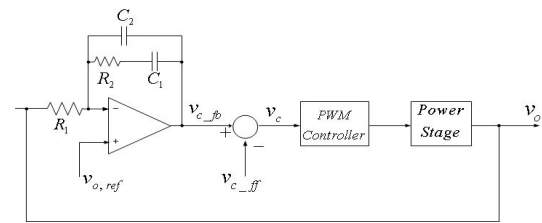


그림7. dc/dc 컨버터의 제어 블록도

출력은 부하와 입력전압의 변화에 의해 변동하게 된다. 이러한 변동을 억제하기 위해 negative feedback을 걸어준다. 그리고 전압 리플에 해당하는 성분을 feed-forward 보상한다.

4. 시뮬레이션

4.1 노치 필터 적용 전/후 시뮬레이션

(1) 시뮬레이션을 위한 회로 구성

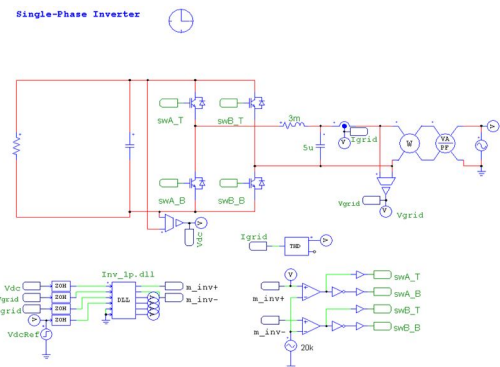
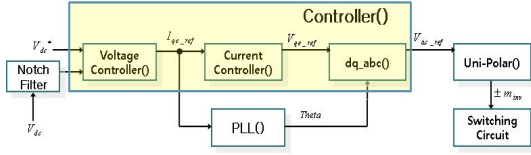


그림8. PSIM 시뮬레이션 회로도

(2) 제어 블록도



(3) 적용 전 / 후 시뮬레이션 결과

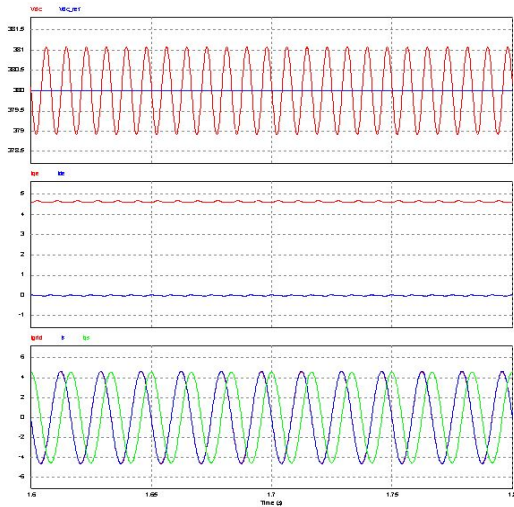


그림9. 노치필터 적용 전 파형

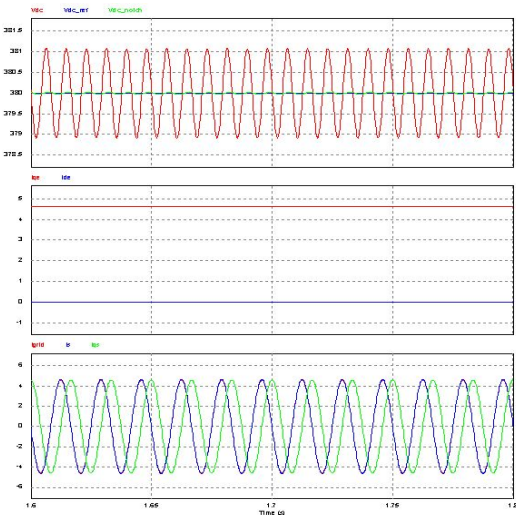


그림10. 노치필터 적용 후 파형

앞서 설계한 노치 필터 적용하여 V_{dc} 의 120Hz 전압 리플은 99% 감쇄시켰으며, 그로 인해 PWM의 기준 전류의 리플이 완전히 사라졌다.

그에 대한 효과로 출력전류의 THD가 노치필터를 적용한 경우에는 1%미만으로 개선되었다.

4.2 Feed-forward 보상 적용 전/후 시뮬레이션

(1) 시뮬레이션을 위한 회로 구성

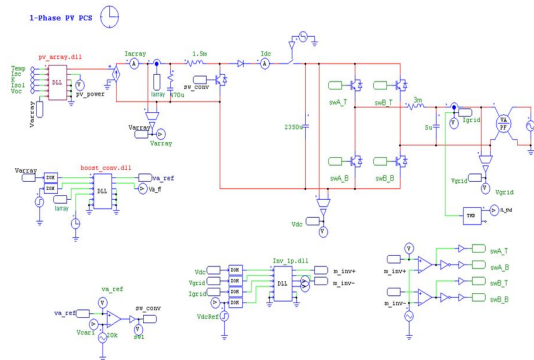


그림11. PSIM 시뮬레이션 회로도

(2) 적용 전 / 후 시뮬레이션 결과

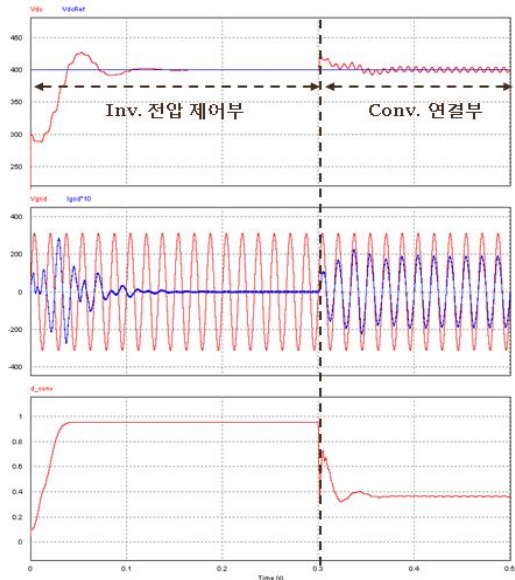


그림12. feed-forward 보상 적용 전 파형

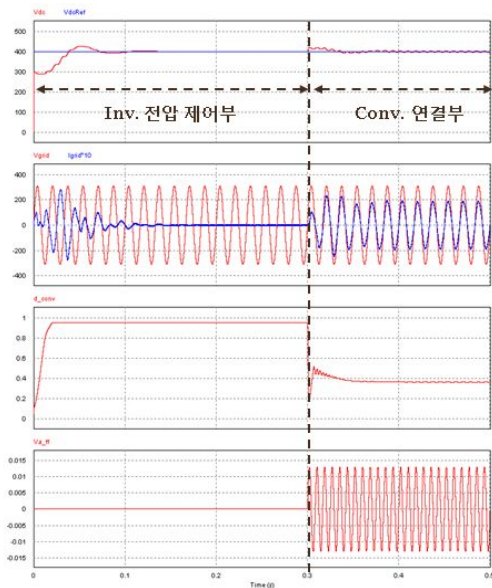


그림13. feed-forward 보상 적용 후 파형

처음에 Inverter에 의해서 DC-Link단 전압이 원하는 400V에 도달하도록 제어를 한다. 그리고 400V에 도달한 후 일정 시간이 지나서 Converter가 동작하도록 되어 있다. Converter가 동작되면서 전향 보상을 통해 리플을 상당부분 줄여주는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 출력전류의 THD가 4.14%로 적용 전에 비해 개선되었다.

5. 결론

단상 PV-PCS 시스템에서는 DC-Lin단에 필연적으로 120Hz 전압 리플이 생기게 된다. 이를 완전히 제거할 수는 없다.

그러나 노치 필터나 피드포워드 보상을 통해 추가적인 하드웨어 구성없이 소프트웨어적으로 그에 따른 영향을 줄이고 PCS 출력전류의 THD를 개선시킬 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증해보았다.

추후 이를 더 개선하여 실제 시스템에 이를 적용하여 실험을 통한 정확한 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(20113030010130)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

1. Kuo, Automatic Control System, 교보문고
2. 유승열, 이록륜, 배용채, 노명규, “자기부상 회전체 시스템의 제어 안정성을 고려한 Notch filter의 설계”, 대한기계학회, 2010.11, page(s):1221-1226
3. 이상희, 안태풍, 차한주, “Mitigation of Low Frequency AC Ripple in Single-Phase Photovoltaic Power Conditioning Systems”, 전력전자학회, 2010.5, page(s):328-333
4. KOTARO HIRANO, “Design of Digital Notch Filters”, 1974.7