

# 단상 계통연계형 풀브릿지 인버터의 Active Power Decoupling 회로 연구

정승민, 송영우, 이경수  
한국공학대학교 에너지·전기공학과

## A Research on the Active Power Decoupling Circuit in the Single-phase Grid-connected Full-bridge Inverter

Seungmin Jeong, Youngwoo Song, Kyungsoo Lee  
Department of Energy and Electrical Engineering, Tech University of Korea

### ABSTRACT

최근 태양광발전, 수소연료전지발전 등 신재생에너지 중심의 분산형 전원 시스템에 관한 관심이 높아지고 있는 가운데, 소용량(5kW 이하) 단상 계통연계형 풀브릿지 인버터의 사용 역시 증가하고 있다. 그러나 단상 계통연계형 풀브릿지 인버터는 계통 측에서 발생하는 제2고조파 전력 성분으로 인하여 DC 입력단에서 맥동 전력 성분이 발생한다. 이로 인하여 DC 입력 전류 파형이 왜곡되어 전력 변환 효율과 전력품질의 저하 및 DC 입력 커패시터의 수명을 감소시킨다. 본 논문에서는 계통 측에서 발생하는 제2고조파 전력 발생에 따른 DC 입력 맥동 전력 성분을 감소시키는 Active Power Decoupling(APD) 방식 회로를 제안한다. 제안하는 APD 방식 회로 구성과 동작 원리를 제시하고 이를 시뮬레이션 검증을 통해 제2고조파 전력 성분을 제어하여 DC 입력 전류의 맥동 성분 저감을 확인하였다.

### 1. 서론

최근 분산형 전원 시스템에 대한 관심이 증가하는 가운데 신재생 에너지원에 관한 연구가 진행되고 있다.[1] 일반적인 계통연계형 단상 인버터의 경우에는 계통 측에서 발생하는 제2고조파 전력에 의해서 직류 측에 제2고조파의 전류가 흘러 맥동 전력이 발생한다. 이러한 문제로 인하여 출력 전력의 왜곡이 발생하고 태양광 시스템 내에서는 MPPT 제어에 장애를 유발하여 안정적인 제어가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 DC-Link단에 전해 커패시터를 설치하여 직류 측 맥동 전력 성분을 저장하고 있으나, 태양광 패널의 수명이 약 25년인 것에 비해서 전해 커패시터의 수명은 대략 7년 정도로 태양광 발전 시스템의 신뢰성을 떨어뜨린다. 또한, 전해 커패시터 사용은 전력 회로의 부피가 커지는 문제가 발생하고 변압기를 사용하는 방식을 이용하는 경우에는 무게가 증가하고 변환 효율이 낮다는 단점이 있다.[2]

따라서 본 논문에서는 전해 커패시터 대신 인덕터와 필름 커패시터를 사용하여 액티브 전력 디커플링 회로도를 감결합 회로로 추가한 직류-직류 부스트 타입 방식의 전력 디커플링 인버터를 제안하여 단상 인버터의 계통 유연성, 수명 및 효율성을 향상시키고 전력 회로의 부피를 감소시킨 인버터 구성 방식을 제안한다.

### 2. 제안하는 회로 구성과 동작 원리

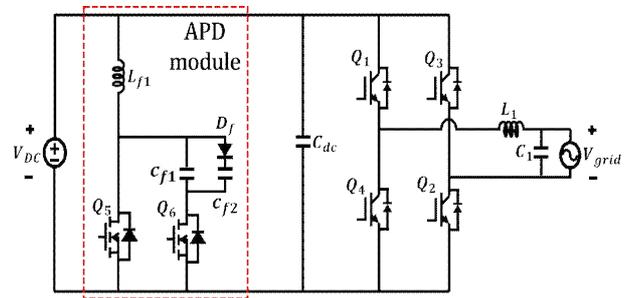


그림 1. 제안하는 전력 디커플링 모듈이 포함된 인버터 회로  
Fig. 1 Proposed Inverter with active power decoupling module

그림 1은 제안하는 전력 디커플링 모듈이 추가된 계통 연계형 단상 인버터 회로이다. 제안하는 회로는 DC 측에 전력 디커플링 모듈을 추가하여 AC 전력에 기인한 DC 맥동 전력 성분을 전력 디커플링 모듈에서 흡수하여 DC 입력 측의 제2고조파 전류를 억제하는 기능을 갖는다.

$$\begin{aligned} v_{ac} &= \sqrt{2} V_o \sin(\omega t) \\ i_{ac} &= \sqrt{2} I_o \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{ac} &= v_{ac} i_{ac} \\ &= V_o I_o \cos(\theta) - V_o I_o \cos(2\omega t + \theta) \\ &= P_{dc} + P_{pulsation} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)은 AC 측의 전압과 전류로 이를 통해 AC 출력 전력을 구하면 식 (2)와 같이 표현된다. AC 출력 전력은 DC 전력 성분과 제2고조파 성분이 포함된 전력 성분으로 구성되며, 따라서 맥동 전력 성분에서 발생하는 제2고조파 성분을 저장해야 전력 효율성 측면에서 효과적으로 DC 측에서 AC 측으로 전력을 전달할 수 있다.

여기서, 필름 커패시터의 평균 전력  $P_{cf}$ 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{cf} = C_f \times V_{cf} \times \frac{dV_{cf}}{dt} \quad (3)$$

식 (3)에서는  $V_{cf}$  또는  $\frac{dV_{cf}}{dt}$  값을 조정하여 필름 커패시터의 커패시턴스를 유연하게 선정할 수 있다.

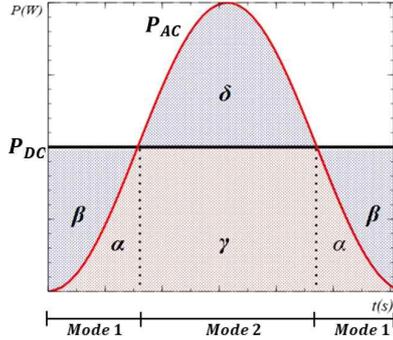


그림 2. 전력 디커플링 모듈의 모드 별 출력 전력 관계 그래프  
Fig. 2 Relationship between output power and operation mode in the Power Decoupling Module

그림 2는 전력 디커플링 회로가 단상 계통연계형 인버터에 추가될 경우, 모드 별 출력 전력과의 관계를 나타내고 있으며 그림 3과 같이 두 가지 모드로 나누어 해석할 수 있다.

Mode ① ( $P_{DC} > P_{AC}$ )

- $\alpha$ : DC측에서 AC측으로 전력을 전달한다.
- $\beta$ : DC측에서 전력 디커플링 모듈로 전력을 전달한다.

Mode ② ( $P_{DC} < P_{AC}$ )

- $\gamma$ : DC측에서 AC측으로 전력을 전달한다.
- $\delta$ : 전력 디커플링 모듈에서 AC측으로 전력을 전달한다.

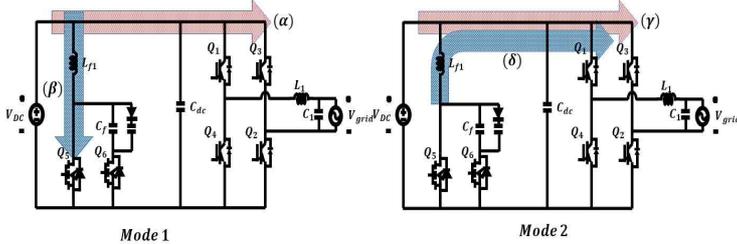


그림 3. 각 모드별 동작 상태 및 전력 흐름  
Fig. 3 The each operation mode and power flow of the proposed system

액티브 전력 디커플링 모듈은 식 (2)에 포함된 제2고조파 DC 전력 성분이 인버터 단으로 전력을 전달하므로, 인덕터 ( $L_f$ ) 전류는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$i_{L_f}^* = \frac{P_{pulsation}}{V_{dc}} = \frac{V_o I_o}{V_{dc}} \cos(2\omega t + \theta) \quad (4)$$

액티브 전력 디커플링 모듈의 커패시터의 전압 ( $V_{cf}$ )는 식 (5)과 같다.

$$V_{cf} = \frac{V_{dc}}{1 - D_6} \quad (5)$$

식 (5)에서  $D_6$ 는 액티브 전력 디커플링 모듈의 스위치  $Q_6$ 의 듀티비를 나타낸다.

액티브 전력 디커플링 커패시터의 전류  $i_{cf}$ 와 커패시터의 관계식, 그리고 인덕터 전류와의 관계식은 식 (6)~(7)과 같다.

$$i_{cf} = C_f \frac{dV_{cf}}{dt} \quad (6)$$

$$i_{cf} = (1 - D_6) i_{L_f} \quad (7)$$

위의 식 (4)~(7)을 연립하여 듀티비를 설계할 수 있으며 계산한 값은 식 (8)~(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{1}{1 - D_6}\right) \times \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{1 - D_6}\right) = \frac{V_o I_o}{C_f V_{dc}^2} \cos(2\omega t + \theta) \quad (8)$$

$$D_6 = 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{V_o I_o}{\omega C_f V_{dc}^2} \sin(2\omega t + \theta) + C_t}} \quad (9)$$

$$D_5 = 1 - D_6 \quad (10)$$

식 (9)에서  $C_t$ 는 계산 과정 중 포함된 적분 상수이다.

식 (11)에서 적절한 필름 커패시터 ( $V_{cf}$ )의 커패시턴스와 커패시터 양단의 전압을 구하려면 식 (3)을 이용하여 도출해 낼 수 있다.

$$C_f = \frac{P_{dc}}{2\omega V_{cf} \Delta V_{cf}} \quad (11)$$

$\Delta V_{cf}$ 는 필름 커패시터에 걸리는 전압(최대전압-평균전압, 리플 전압의 1/2에 해당)이다.

그림 5는 액티브 전력 디커플링 회로의 제어 블록도를 나타낸다. 여기서 비례제어기의 전달함수는 식 (12)와 같다. 전력 디커플링 모듈이 포함된 회로에서는  $V_{dc,ripple}$ 을 0에 수렴하게 만들어야 리플 전류의 흐름을 통해 발생하는 내부 저항 역시 0에 수렴하게 된다. 또한 BPF(Band Pass Filter)를 이용하여  $V_{dc}$ 의 0Hz ~ 240Hz 구간의 리플 전압을 제거하여 비례제어기를 통해 제어하고 이를 PI제어기를 통해 PWM 신호를 발생시켜 전력 디커플링 모듈의 스위치를 제어하여 맥동 성분 즉, 제2고조파 성분을 제거하여 AC 측에 전달하는 구조이다.

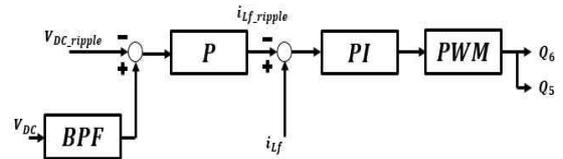


그림 5. 액티브 전력 디커플링 회로 제어블록도  
Fig. 5 APD module closed-loop control block diagram

식 (12)는 인덕터 리플 전류의 전달함수이다.

$$G_p(s) = \frac{CV}{LCs^2 + (1 - D)^2} \quad (12)$$

$$BPF(s) = \frac{Bs}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (13)$$

### 3. 시뮬레이션 검증

제안한 액티브 전력 디커플링 모듈을 포함한 인버터 회로는 PSIM 소프트웨어를 이용하여 검증하였다. 본 검증에서는 (a) 전력 디커플링 모듈이 없을 때, (b) 기존 전력 디커플링 모듈 방식[3], (c) 본 논문에서 제안하는 액티브 전력 디커플링 모듈을 인버터에 적용한 시뮬레이션 해석을 진행하였다.

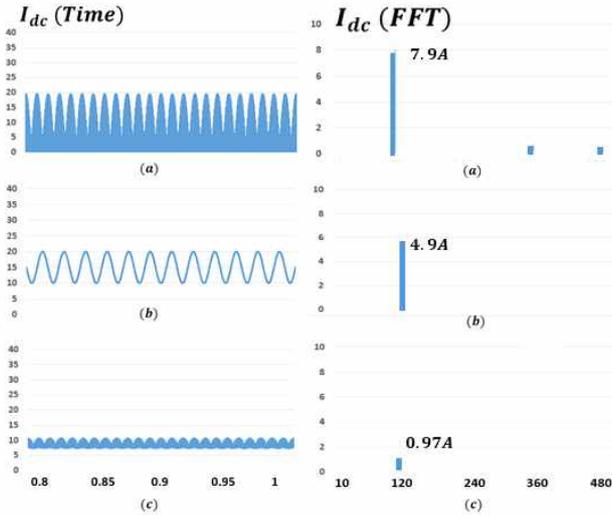


그림 6.  $I_{dc}$ 의 파형 및 푸리에 변환 그래프  
 (a) 전력 디커플링 모듈이 포함되지 않은 인버터  
 (b) 기존 논문의 전력 디커플링 모듈이 포함된 인버터  
 (c) 제안하는 액티브 전력 디커플링 모듈이 포함된 인버터

Fig. 6 DC current waveforms and FFT analysis

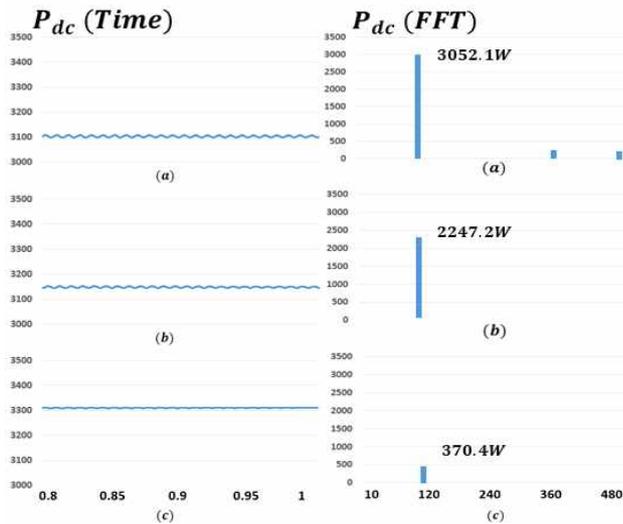


그림 7.  $P_{dc}$ 의 파형 및 푸리에 변환 그래프  
 (a) 전력 디커플링 모듈이 포함되지 않은 인버터  
 (b) 기존 논문의 전력 디커플링 모듈이 포함된 인버터  
 (c) 제안하는 액티브 전력 디커플링 모듈이 포함된 인버터

Fig. 7 DC power waveforms and FFT analysis

그림 6~7은 각각 전력 디커플링 회로의 유무에 따른 DC전류와 DC 전력 그리고 제2고조파 성분에 대한 분석 파형으로 APD 모듈이 포함된 회로에서는 기존의 APD 모듈이 없는 인버터의 리플 전류가 88.23% 감소되었고 기존 논문에 제시된 디커플링 모듈보다 80.2%의 감소되었다. 또한 DC 직류측 전력

역시 모듈이 존재하지 않을 때 보다 87.86% 기존의 디커플링 모듈보다 83.52%의 리플 저감율이 나타났다. 따라서 제안한 APD 모듈을 적용한 방식은 제2고조파 성분을 적절히 제거함에 따라 안정적으로 전력을 전달할 수 있고, 전해 커패시터가 아닌 필름 커패시터를 사용하기 때문에 수명이 늘어나고 단상 계통연계형 인버터에 대한 신뢰성이 향상됨을 알 수 있다.

표 1은 3kW급 단상 계통연계형 인버터에 제안하는 APD 모듈이 포함된 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

표 1. 3kW 전력 디커플링 인버터 파라미터

Table 1. Parameter of 3kW Inverter with APD module

Parameters	Value
Power rated $P$	3kW
Input voltage $V_{dc}$	380V
Output Voltage(RMS) $V_{grid}$	220V
Fundamental frequency $f_o$	60Hz
Switching frequency of inverter $f_s$	20kHz
Switching frequency of APD circuit $f_{su,plw}$	50kHz
Output filter inductance $L_1$	2.875mH
Output filter capacitance $C_1$	2.25uF
DC-Link capacitance $C_{dc}$	470uF
APD inductance $L_{f1}$	1.2mH
APD capacitance $C_{f1}$	0.39uF
APD capacitance $C_{f2}$	0.39uF

### 4. 결론

본 논문은 단상 계통연계형 인버터의 계통 측에서 발생하는 제2고조파 전력 성분으로 인하여 DC 입력단에서 나타나는 맥동 전력을 제거하기 위한 방법으로 APD 모듈을 새롭게 제안한다. 제안하는 APD 방식 회로 구성과 동작 원리를 제시하고 이를 시뮬레이션 검증을 통해 제2고조파 전력 성분을 제어하여 DC 입력 전류의 맥동 성분이 저감됨을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(환경부) 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(DX기반 탄소공급망 환경 전문인력 양성)

### 참고 문헌

[1] 박세환, 박완기, 정택중 "신재생에너지 기반 분산형 전원 이슈 및 정책 제언", 2019년 대한전자공학회 추계학술대회 논문집, 2019년 11월.

[2] M. Albach; T. Durbaum; A. Brockmeyer "Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents a comparison of different approaches" PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 06 August 2002

[3] Haijun Wang, Meiqin Mao, Liuchen Chang; Single-Phase Voltage Source Inverter with Active Power Decoupling Based on Buck-Boost Converter, 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)