

가상 DQ좌표계를 이용한 단상 PFC 전류제어 알고리즘에 관한 연구

진성민, 김현근, 이상희, 이수형, 김준석
인천대학교 전기공학과

A study of Virtual DQ Control of PI Controller for Single-Phase Power Factor Correction(PFC)

Seongmin Jin, Hyungeun Kim, Sanghee Lee, Suhyung Lee, JoohnSheok Kim
University of Incheon

ABSTRACT

본 연구는 DQ좌표계를 이용한 다이오드 브리지형 단상 PFC의 고성능 전류제어에 관한 논문이다. 단상전원에서는 일반적인 DQ좌표계를 구성할 수 없기 때문에 3상전원과 같은 동기좌표계상의 전류제어계를 구성하기가 어렵다. 특히 다이오드 브리지형 PFC의 경우 입력전압이 정현파의 절대값 형태로 나타나므로 이상적인 전류제어가 매우 힘들다. 본 연구에서는 위상각이 0~180도만 유지하는 가상 DQ좌표계를 도입하여 동기좌표계상의 전류제어계를 구현함으로써 전류제어성능을 크게 증가시키고 역률을 1로 유지하는 알고리즘을 제안한다.

1. 서론

근래들어 역률에 대한 관심이 증가하면서 수kW 미만의 소형가전기기 등에 PFC를 적용한 사례가 증가하고 있으며, 특히 구조가 간단한 다이오드 브리지를 적용한 승압형 PFC의 사용이 크게 증가하고 있다. 역률을 1로 유지하기 위해서는 PFC의 이상적인 전류제어 성능이 필수적이다. 일반적으로 많이 사용되는 PI전류제어 방식의 경우 정현파의 절대값 형태를 갖는 인덕터 전류를 제어해야 하므로 제어시스템의 비선형성으로 인해 충분한 제어 성능을 발휘하기 어렵다. 단상 풀브리지형 PFC의 경우 가상 DQ좌표계를 구성하고 동기좌표계상의 PI제어시스템을 통하여 단상전류 제어계를 구현한 경우가 있다[1].

본 논문에서는 단상시스템에 적용되는 가상 DQ좌표계를 다이오드 브리지형 승압형 PFC에 도입하여 제어계의 비선형성을 제거하고 이상적인 전류제어계를 구현하는 방법에 대해 논의한다. 전류의 형태가 정현파의 절대값으로 나타나므로 제안된 가상DQ좌표계의 전기각은 0~180도가 반복되며, 제어의 편의를 위하여 d축을 $\cos(\omega t)$ 성분을 갖는 실제 제어계, q축을 $\sin(\omega t)$ 성분을 갖는 가상제어계로 설계하였다. 제안된 방법을 통하여 이상적인 단상 PFC의 전류제어가 가능함을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. PFC 제어 토폴로지

2.1 전형적인 단상 PFC 회로

일반적인 단상 PFC 컨버터는 그림1과 같이 입력정류부, 부스트컨버터의 결합 형태의 구조를 갖는다. 전원의 역률을 1로 유지하기 위하여 인덕터의 전류는 전현파의 절대값 형태를 갖게되며 원활한 전류제어를 위하여 출력 DC전압은 입력전압보다 항상 큰 전압을 유지하도록 제어 된다. 그림2는 일반적으로 널리 사용되는 PFC 부스트 컨버터의 제어 블록도이다. 출력전

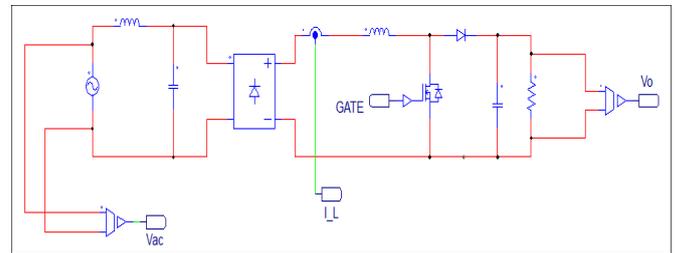


그림1. 단상 PFC 제어 토폴로지

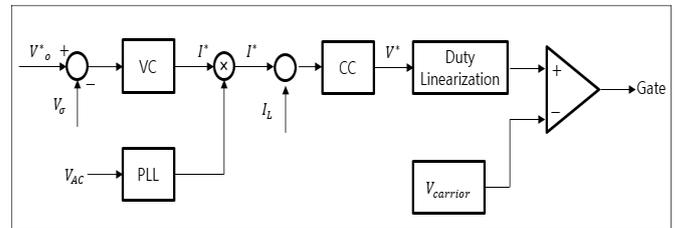


그림2. PFC 제어 블록도

압에 대한 기준값(V_o^*)과 실제 출력전압(V_o)의 차이가 PI제어기로 구성된 전압제어기(Voltage Controller)로 인가된다. 그 출력값은 전류제어기의 전원의 위상과 곱하여져 전류 기준값(I^*)으로 사용된다. 전류제어기(CC)는 인덕터에 인가되는 전압의 기준값을 생성하며 아래의 식과 같은 선형화를 과정을 거쳐 PWM 신호를 발생시킨다[2].

$$D = \frac{(V_L^* - V_i + V_o)}{V_o} \quad (1)$$

이 방식은 매우 간단하게 제어계를 구성할 수 있는 장점이 있지만 정현파 전류를 직접 제어해야하므로 전류 제어성능이 좋지 않은 문제가 있다.

2.2 동기좌표계 DQ 모델링

본 논문에서 제안하는 가상DQ 알고리즘에 대한 블록도를 그림3에 나타내었다. 제어 대상이 되는 인덕터 전류인 d축전류는 정현파의 절대값 형태로 나타나며 $I_d^s = I_m \cos(\omega t)$ 에 대하여 q축은 90도 위상차를 가진 $I_q^s = I_m \sin(\omega t)$ 으로 구성하였다. 일반적으로 d축에 대하여 90도 위상차이를 갖는 q축 전류를 얻는 방법으로 전역통과 필터(APF : All Pass Filter)를 많이 사용하지만 본 연구에서는 q축 전류제어기의 정지좌표계 기준값에 해당하는 전류를 직접 q축 전류제어 신호로 사용하여 제어를 수행한다. 정현파의 절대값 형태를 나타내는 d축의 전

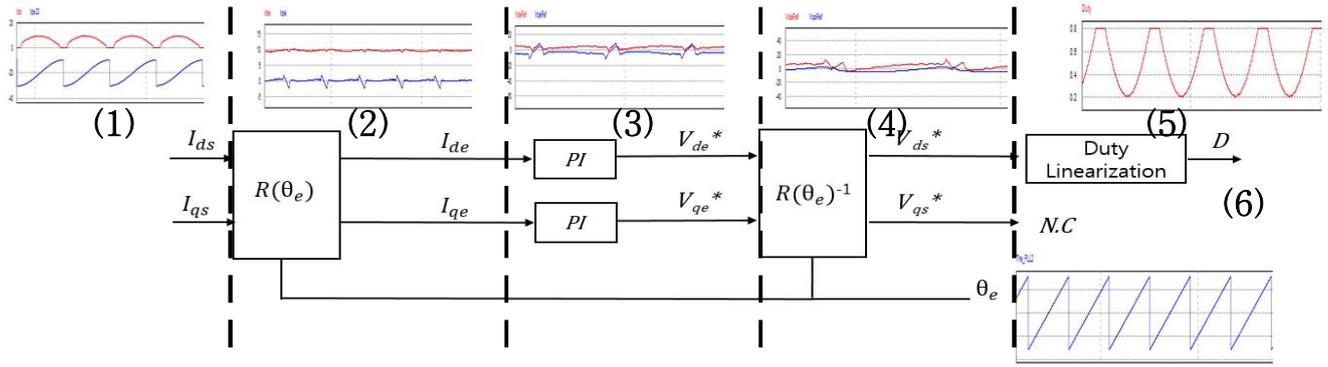


그림3 가상DQ 제어 알고리즘 블록도

류에 대하여 q축의 전류는 그림 3 (1)의 파형과 같이 나타난다. 0~180도 반복하는 제어각을 입력전원에 대하여 PLL을 통해 얻은 θ_e (그림3 (6))을 이용하여 동기좌표계 dq변환을 하면 그림 3 (2)와 같이 d축 전류가 주파수 성분이 없는 DC형태로 보임을 확인할 수 있고, 수식적으로 표현하면 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \cos(\theta) \\ I_m \sin(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

(2) 위 수식과 같은 형태로 주파수 성분이 없는 DC성분의 크기 값을 제어함으로써 이상적인 전류제어가 가능하다. PI전류 제어기를 거친 I_{dc}, I_{qc} 는 동기좌표계 전압기준값 V_{dc}^*, V_{qc}^* 를 출력하고(그림 3 (3)) 이는 다시 정지좌표계 dq변환을 통해 V_{ds}^*, V_{qs}^* 를 출력한다(그림 3 (4)). 실제 전압으로 사용되는 정지좌표계 d축 전압값인 V_{ds}^* 는 듀티 선형화를 거쳐 변환된 듀티(그림 3 (5))가 게이트 신호로 인가된다.

3. 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

설계한 가상DQ 알고리즘의 성능을 확인하기 위해서 PSIM 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 표1은 시뮬레이션으로 모델링된 회로에 사용된 소자 및 시스템 제정수 등이다.

표 1 시뮬레이션 소자 및 시스템 제정수
Table 1 The parameters of PSIM

입력전압 V_{ac}	220[Vrms]	출력전압 V_{out}	400[V]
입력필터 L C	L=100uH C=10uF	출력파워[W]	2kW
부스트 컨버터 L C	L=1mH C=2000uF	스위칭주파수 F_{sw}	20kHz

그림 4는 PSIM 시뮬레이션 결과파형을 나타내며, 각각 파형은 (1) 정류단을 거친 입력전압 V_{red} , (2)인덕터 전류 I_L , (3)입력 전압 / 입력전류 V_{ac}/I_{ac} , (4)출력전압을 V_{out} 나타낸다. 시뮬레이션은 출력기준 2kW에 대하여 진행하였고, V_{red} 전압에 대하여 인덕터 전류 I_L 이 정현파 절대값 형태로 동작함을 볼 수 있다. 또한 입력전압에 대한 입력전류의 역률을 확인해본 결과 PF = 0.993 으로 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 또한 출력 전압 역시 기준값 $V_{ref} = 400V$ 에 대한 정전압 제어가 잘되는

것을 확인했다.

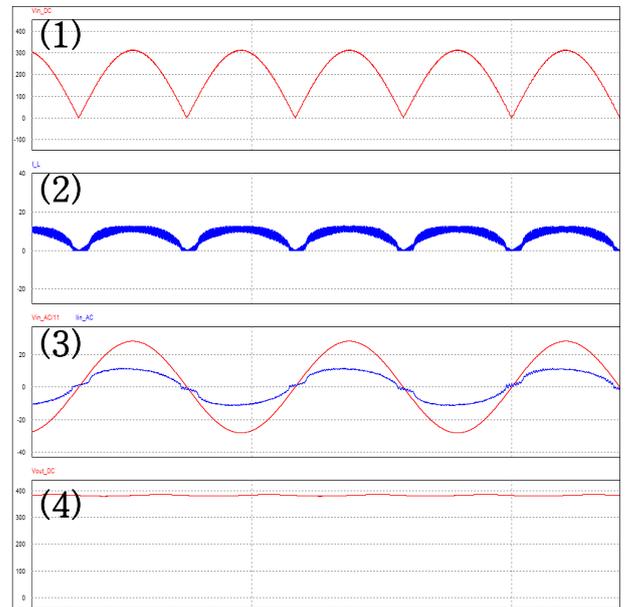


그림4. 가상DQ 알고리즘을 적용한 PFC 컨버터 시뮬레이션 결과파형

(1) V_{red} , (2) I_L , (3) V_{ac}/I_{ac} (4) V_{out}

4. 결론

본 논문에서는 가상DQ 알고리즘을 적용하여 전류제어를 수행함으로써 단상 PFC 컨버터의 역률을 높이는 방법을 제시하였다. 정현파의 절대값 형태로 나타나는 전류에 대하여 동기좌표계 상에서 DC성분으로 제어가 가능한 가상 DQ알고리즘을 적용함으로써 이상적인 전류제어를 단상 PFC에 적용한 결과를 확인하였고, PFC 본연의 목적인 역률 또한 0.993 으로 역률1에 가깝게 유지하는 것을 확인했다.

참고 문헌

- [1] Jung Min Kwon, "Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 1048 1054, 2006.
- [2] Kwang Woon Lee, DSP를 이용한 부스트 컨버터의 전류 제어기 설계 및 구현, 전력전자학회, pp 259 265, 2012.