동기 정류 토템폴 PFC의 영전압 지점 전류 왜곡 개선을 위한 전류 제어 기법

정우혁, 장바울 한국공학대학교

A Current Control Method to Improve Current Distortion at Zero Crossing for Totem-Pole PFC with Synchronous Rectifier

Woo-hyuk Jung and Paul Jang Department of Energy & Electrical Engineering, Tech University of Korea

ABSTRACT

동기 정류 토템폴 브리지리스 PFC에서 측정된 입력 전류에 절대값을 취해 전류 제어를 수행하는 경우, 특히 경부하 조건에서 영전압 지점 근처의 전류 왜곡이 심해 질 수 있으며, 극단적인 경우 역방향 전류가 발산하여 PFC의 과전류 보호 기능이 동작할 수도 있다.

본 연구에서는 입력 전류의 순시값을 제어에 활용하게 되면 이러한 문제점을 개선할 수 있음에 주목하여 관련 분석을 수행하였으며, 6.6kW급 동기 정류 토템폴 브리지 리스 PFC 프로토타입을 제작 후 실험을 통하여 분석의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

토템폴 브리지리스 PFC는 일반적인 PFC에 비해 적은 수의 스위칭 소자를 사용하기 때문에 손실을 저감하여 높은 효율 달성에 유리하며, 다른 브리지리스 회로들에 비해 공통 모드 노이즈 특성이 좋다는 장점이 있다. 이 러한 장점들을 바탕으로 전기자동차용 내부 충전기(On Board Charger, OBC) 등 응용에서 널리 활용되고 있다^{[1][2]}. 하지만 보다 높은 효율을 달성하기 위해 토템폴 브리지 리스 PFC에 동기 정류기를 사용하는 경우 MOSFET 바디 다이오드의 느린 역회복 특성, 스위칭 시퀀스 등에 의해 영전압 지점에서 전류 왜곡이 발생한다는 사실이 알려져 있다^[3].

한편 동기 정류 토템폴 브리지리스 PFC에서 측정된 입력 전류에 절대값을 취해 전류 제어를 수행하는 경우, 영전압 지점에서의 전류 왜곡이 더욱 심해질 수 있으며, 극단적인 경우 역방향 전류가 발산하여 PFC의 과전류 보호 기능이 동작할 수 있다. 본 연구에서는 입력 전류 의 순시값을 제어에 활용하게 되면 이러한 문제점을 개 선할 수 있음을 보이고, 6.6kW급 동기 정류 토템폴 브리 지리스 PFC 프로토타입에서 수행한 실험 결과를 통해 분석의 타당성을 검증하도록 한다.

2. 전류 제어기 입력 방식에 따른 전류 왜곡 특성

2.1 절대값 비교 방식



그림1 인터리브드 토템폴 브리지리스 부스트 PFC Fig.1 Interleaved totem-pole bridgeless boost PFC

입력 전류 제어를 위하여 측정된 전류값에 절대값을 취하여 제어를 수행하는 경우, 제어기의 구성을 그림2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 전압 제어기의 출력에 정류된 *sin*을 곱한 값이 전류 지령이 되며, 이를 측정 전류에 절대값을 취한 값, |*L*|과 비교하여 전류 제어가 수행된다. 전류 제어기의 출력값에는 절대값 형태의 피드 포워드 제어값이 더해져 최종 동작 시비율(duty)이 결정된다. 이 시비율은 입력 전압 양의 주기에서는 그림1의 *S*2와 *S*4에 적용되고, 음의 주기에서는 *S*1과 *S*3에 적용된다.

절대값 비교 방식에서 측정된 전류값의 크기가 극성이 같은 전류 지령보다 클 경우, 음의 오차가 전류 제어기로 입력되어 입력 전류값이 감소하는 방향으로 제어가 수행된다. 그러나 측정된 전류값의 크기가 극성이 다른 전류 지령보다 클 경우, 오차가 더 커지는 방향으로 제어가 수행되게 된다.

경부하 조건에서 동기 정류기가 동작할 경우 입력 측 인덕터에 충분한 에너지가 충전되어 있지 않아 실제 전류가 지령과 반대의 극성을 가지는 상황이 발생할 수 있는데, 이 경우에 심한 영전압 지점에서 전류 왜곡이 나타날 수 있으며 극단적인 경우 역방향 전류가 발산하여 PFC의 과전류 보호 기능이 동작할 수도 있다.

2.2 순시값 비교 방식

입력 전류 제어를 위하여 측정된 순시 전류값을



(a) 절대값 비교 방식



(b) 순시값 비교 방식

그림2 제어 블록 다이어그램 Fig.2 Control block diagram

이용하는 경우, 제어기의 구성을 그림2(b)와 같이 나타낼 수 있다. 절대값 비교 방식의 경우와 차이점은 피드 포워드 제어값이 식 (1)과 같이 입력 전압의 극성에 따라 다르게 입력된다는 점이다.

$$Feed - forward \begin{cases} 1 - \frac{V_{AC_{-peak}}\sin\theta}{V_{ref}} & (V_g \ge 0) \\ - \frac{V_{AC_{-peak}}\sin\theta}{V_{ref}} & (V_g \le 0) \end{cases}$$
(1)

또한 제어기의 출력인 최종 동작 시비율이 입력 전압의 극성과 상관없이 모두 그림1의 S2와 S4에 적용된다는 점이다. 이 경우 측정된 전류값의 크기가 극성이 다른 전류 지령보다 크다 하더라도 오차가 줄어드는 방향으로 제어기가 동작해 입력 전류가 발산하지 않는다. 이와 같은 특징으로 인해 순시값 비교 방식을 적용한 전류 제어기를 활용 시, 모든 부하 구간에서 동기 정류기를 정상적으로 동작 시킬 수 있게 된다.

3. 실험 결과

분석의 내용을 검증하기 위해 두 모듈이 인터리빙으로 동작하는 6.6kW급 동기 정류 토템폴 브리지리스 부스트 PFC의 프로토타입을 제작하였으며, 절대값 비교 방식과 순시값 비교 방식을 각각 구현하여 실험을 수행하였다. 설계 사양 및 실험 조건을 표 1에 정리하였으며, 제작된 프로토타입을 그림 3에 도시하였다.

그림4(a)와 그림4(b)는 절대값 비교 방식의 전류 제어 기를 적용하였을 시, 각각 700 와 850 부 부하 조건에서 동기 정류기를 동작시켰을 때 실험 결과이다. 700 부하 조건에서는 영전압 지점 근처에서 심한 전류 왜곡이 발 생하였으며, 그 결과 PFC의 과전류 보호 기능이 동작하 였다. 반면, 850 부하 조건에서는 정상적으로 제어가 수 행되었다.

다음으로 그림5와 그림 6에서는 EMI 필터에 의해 순 환 전류가 발생하는 경우, 전류 제어기 입력 방식에 따 른 동작의 차이를 각각 무부하 조건과 300W 부하 조건 에서 확인한 실험 결과이다. 무부하 조건 및 300W 조건 에서 모두 절대값 입력 방식에 비해 순시값 입력 방식이 더 우수한 전류 왜곡 특성을 보이고 있음을 확인할 수

표 1 설계된 인터리브드 토템폴 브리지리스 PFC 제원

Table 1 Specification of interleaved totem-pole bridgeless PFC

입력 전압 (<i>Vg</i>)	$220 V_{rms}$
입력 주파수 (<i>f</i>)	60 Hz
출력 전압 (<i>V_{DC}</i>)	380 V
정격 출력 (<i>P_{rated}</i>)	6.6 kW
스위칭 주파수 (<i>f_{sw}</i>)	120 kHz
PFC 인덕터 (<i>L</i> ₁ , <i>L</i> ₂)	400µH
출력 커패시터 (<i>C</i> ₀)	1.41mH



그림3 인터리브드 토템폴 브리지리스 부스트 PFC 프로토타입 Fig.3 Totem-pole bridgeless boost PFC prototype





그림4 절대값 비교 방식을 이용했을 때의 전류 왜곡 Fig.4 Current distortion when the absolute value comparison is applied 있다.

순시값 비교 방식으로 전류 제어기를 구현 시 정격 부 하인 6.6kW 조건에서 모든 동작이 정상적으로 수행됨을 확인하였으며, 그 결과를 그림7에 도시하였다.





(b) 순시값 비교 방식

그림5 무부하 조건 시 전류 제어기 입력 방식에 따른 동작 파형 Fig.5 Experimental waveforms according to the current controller input under no load condition

4. 결 론

동기 정류 토템폴 브리지리스 PFC에서 측정된 입력 전류에 절대값을 취해 전류 제어를 수행하는 경우, 특히 경부하 조건에서 영전압 지점 근처의 전류 왜곡이 심해 질 수 있으며, 극단적인 경우 역방향 전류가 발산하여 PFC의 과전류 보호 기능이 동작할 수도 있다. 본 연구에 서는 입력 전류의 순시값을 제어에 활용하게 되면 이러 한 문제점을 개선할 수 있음에 주목하여 관련 분석을 수 행하고, 6.6kW급 프로토타입에서 수행한 실험 결과를 통 해 분석의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2024년도 중소벤처기업부의 지원을 받아 수행된 창업성장기술개발사업의 결과물임. (No.S3317079)

참 고 문 헌

 Bay O, Tran MT, El Baghdadi M, Chakraborty S, Hegazy O. A Comprehensive Review of GaN-Based Bi-directional On-Board Charger Topologies and Modulation Methods. Energies. 2023; 16(8):3433.





(b) 순시값 비교 방식

그림6 300W 부하 조건 시 전류 제어기 입력 방식에 따른 동작 파형 Fig.6 Experimental waveforms according to the current controller input under 300W load condition



그림7 6.6kW 정격 부하에서의 동작 파형

Fig.7 Experimental waveforms under the 6.6kW rated load condition

- [2] P. Jang, S. W. Kang, B. H. Cho, J. H. Kim, H.S. Seo, and H. S. Park "Totem-pole Bridgeless Boost PFC Converter Based on GaN FETs", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 20, No. 3, June
- [3] B. Sun, "How to reduce current spikes at AC zero-crossing for totempole PFC," Texas Instruments Analog Applications Journal (SLYT650), 4Q 2015.