

3상 정류기의 입력전류 THD저감을 위한 PWM 방법

신희근*, 윤병철*, 김학원*, 조관열*, 임병국*, 고돈열**
충주대학교*, (주)동아일렉콤**

PWM Method to Reduce Input Current THD for Three-phase Rectifier

Hee-Kuen Shin*, Byung-Chul Yoon*, Hag-Wone Kim*, Kwan-Yuhl Cho*, Byung-Kuk Lim*,
Don-Yeol Ko**

Chungju National Univ*, DONGAH ELECOMM Corporation**

ABSTRACT

In this paper, new PWM method is proposed to reduce input current THD of PWM Rectifier. In general, the carrier comparison PWM method is used for PWM rectifier in which triangle wave is used as a carrier wave. However, large d-axis current ripple by this method can be a source of large THD. In this paper, new carrier comparison PWM method is proposed in which sawtooth wave is used as a carrier wave. Depending on the phase of the voltage commands, the rising or falling sawtooth wave is selected to reduce the THD. The simulation results verified the performance of the proposed method.

1. 서론

일반적으로 상용 교류 전원의 안정적인 공급을 위해 부하로 입력되는 전류에 대한 하모닉 규제가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 입력전류 하모닉 규제 대응을 위한 PWM 정류기의 총 하모닉 왜곡율 (Total Harmonic Distortion) 개선을 위한 새로운 PWM 방안을 제시하고자 한다. 일반적으로 PWM 정류기의 THD개선을 위해서 큰 인덕턴스를 갖는 인덕터를 사용하거나, LC 필터를 이용하거나, 저차 고조파를 주입 하여 고조파를 상쇄시켜 저감하는 방법을 사용한다. 하지만, 실질적으로 THD를 저감하기 위해서 LC 필터의 사이즈를 키우면 컨버터의 사이즈가 커지고 재료비가 상승하고, 스위칭 주파수를 키우면 손실이 증가하는 문제가 발생된다.^[1,2,3]

본 논문에서는 THD 저감을 위하여 새로운 PWM 방식을 제안한다. 일반적인 PWM 방식은 육샷 전압을 이용한 SVPWM 방식을 사용한다.^[4] 본 논문에서 제안하는 방법은 육샷 전압을 이용한 SVPWM에서 삼각파를 톱니파로 변경하고, 입력 전압의 위상에 따라, 톱니파의 형상을 바꿔줌으로써, THD 저감하는 새로운 PWM 방식을 제안한다. 또한 제안된 방법을 3상 PWM 정류기에 대하여 적용하여 그 효과를 MATLAB Simulink로 모의해석을 통해 확인하였다.

2. PWM Rectifier

2.1 PWM Rectifier 구성

그림 1은 본 논문에서 제어 대상이되는 승압형 PWM 정류기를 나타낸다.

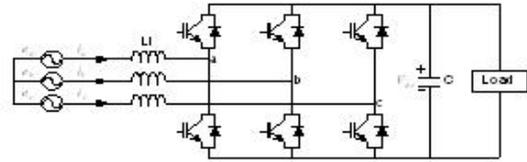


그림 1 승압형 PWM 정류기
Fig. 1 Boost PWM Rectifier

2.2 일반적인 반송파 비교 SVPWM의 방법

아래의 그림은 PWM 정류기의 입력전류에 대한 모의해석 결과를 나타내었다. 그림 2의 첫 번째 파형은 동기좌표계의 dq 축 전류이고, 두 번째 파형은 각 상의 입력전류를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, d축의 전류 맥동이 q축보다 상당히 큼을 알 수 있다.

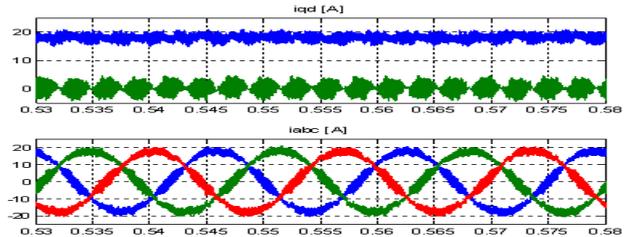


그림 2 기존 PWM 방법에 의한 입력전류 모의해석 결과
Fig. 2 Simulation Results for Input Current by Previous PWM

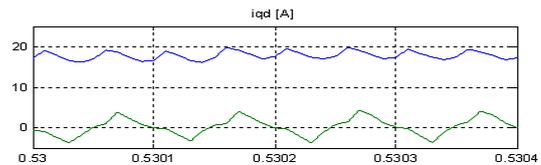


그림 3 기존의 PWM방법에 의한 스위칭 전류 리플
Fig. 3 Switching Current Ripple by the Previous PWM

그림 3은 그림 2를 확대한 결과이며, d축 전류가 양의 맥동과 음의 맥동을 가짐을 알 수 있다.

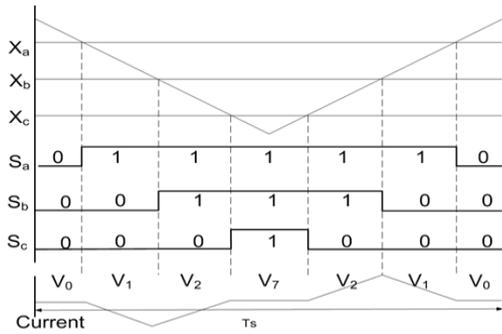


그림 4 기존 PWM 방법 스위칭 시퀀스
Fig. 4 Switching Sequence of Previous PWM

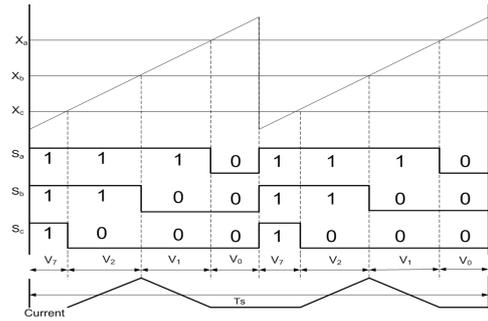


그림 6 상승 반송파 PWM 방법 스위칭 시퀀스
Fig. 6 Rising Sawtooth PWM Switching Sequence

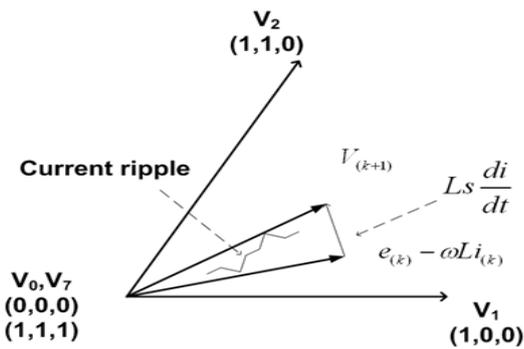


그림 5 기존 PWM 전압 벡터 인가 시 전류 리플
Fig. 5 Current Ripple by the previous PWM

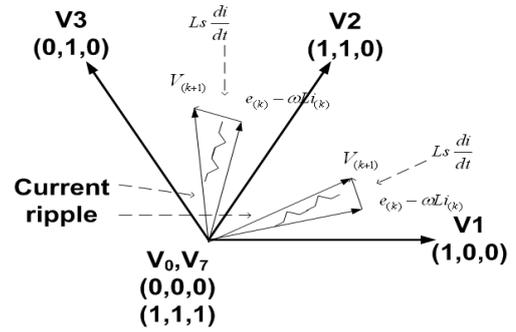


그림 7 상승 반송파 PWM 전압 벡터 인가 시 전류 리플
Fig. 7 Current Ripple by the Rising Sawtooth PWM

그림 4는 기존 삼각파 비교 PWM 방법에 대한 스위칭 시퀀스를 그림 5는 기존 PWM의 전압벡터 인가 시 전류 리플을 나타낸 그림이다. 그림 5에서 보는 것 과 같이 $e_{(k)} - \omega L i_{(k)}$ 시점에서 전압지령 벡터 $V_{(k+1)}^*$ 으로 인가해야 할 때 그 차이는 식 (1)과 같다.

$$e_{dqs} - \omega L_s i_{dqs} - V_{dqs}^* = L_s \frac{di_{dqs}}{dt} \quad (1)$$

스위칭에 의한 전압인가 시 스위칭 순서는 그림 4와 같이 영전압 V_0 와 $V_1 V_2$ 순으로 인가하게 되면 전류의 맥동은 그림 5와 같이 전류의 맥동이 아래로 향하게 되며, 영전압 V_7 와 반대로 $V_2 V_1$ 으로 전압을 인가하게 되면 전류 맥동은 반대로 위로 향하게 된다. 이에 따라 기존의 삼각파 비교 PWM 시 그림 3 과 같이 d축 전류에 맥동이 생기된다.

2.3 상승,하강 반송파 PWM 방법

그림 6은 상승 반송파만을 사용한 PWM시 스위칭 시퀀스이다. 상승 반송파로 PWM시 그림 7과 같이 전압을 인가하는 순서는 항상 세상의 스위칭 함수가 1인 영 전압과 두상의 스위치의 스위칭 함수가 1인 전압벡터 인가 후 한상의 스위칭 함수가 1인 전압벡터의 순으로 전압이 인가된다. 입력 전압벡터가 $V_1 - V_2$ 영역에 있을 때 전압의 인가 순서는 영전압 V_7

과 $V_2 V_1$ 순서로 전압을 인가하게 되고 전류 리플은 그림 7 과 같이 위로 향하게 된다. 하지만 전압 벡터가 $V_2 - V_3$ 영역에 오게 되면 $V_2 V_3$ 와 같은 순서로 전압을 인가하게 되어서 그림 7 에 볼 수 있듯이 전류리플이 아래로 향하게 된다. 이런 스위칭 동작을 반복한다면 그림 8과 같이 d축 전류 리플이 스위칭 벡터의 영역에 따라 크게 위 아래로 나타나게 되어 입력 전류의 윽셋을 갖게 된다.

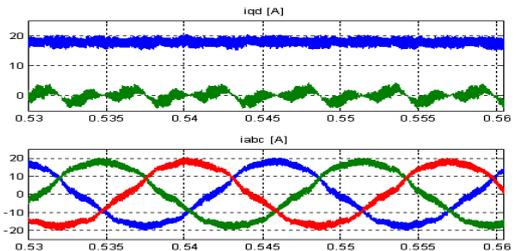


그림 8 상승 반송파 PWM방법에 의한 전류
Fig. 8 Current Waveform by the Rising Sawtooth PWM

3. 제안된 PWM 스위칭 방법

기존의 PWM 방식에는 d축 전류에 맥동이 크게 나타난다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 d축 전류 맥동을 저감할 수 있는 새로운 방식의 PWM 방식을 제안하고자 한다.

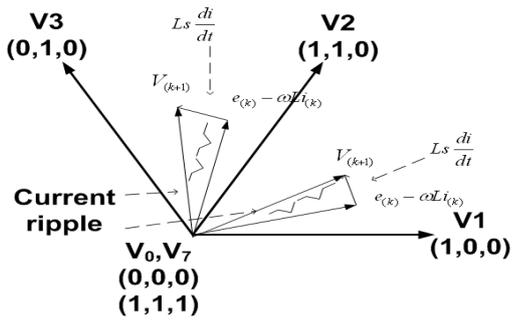


그림 9 제안한 PWM에 의한 전압벡터 인가 시 전류 리플
Fig. 9 Current ripple by the proposed PWM

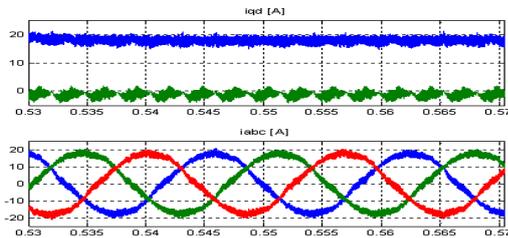


그림 10 제안한 PWM 방법에 의한 입력전류
Fig. 10 Current Waveform by the Proposed PWM

기존의 삼각파 비교 PWM 방식은 PWM 주기에서 전류 맥동이 큰 문제점이 존재한다. 반면, 상승 또는 하강 반송파에 의한 PWM 방식은 전압 섹터 내에 있을 때 전류 맥동은 줄지만, 섹터 간에 전류 맥동의 방향이 반대가 되어, 3차 Harmonic이 커지게 된다. 만약 섹터가 바뀌는 순간 전류 리플을 한쪽 방향으로 흐르게 정할 수 있게, 상승 혹은 하강 반송파를 선택하여 준다면, 전류 리플은 한쪽 방향으로 맥동을 갖으며, 기존 PWM 방식보다 효과적으로 전류의 맥동을 줄일 수 있다.

그림 9 는 제안한 PWM 방법으로 전압 벡터 인가 시 전류 맥동을 나타낸 것이다. $V_1 - V_2$ 영역에서 하강 반송파 PWM 방법을 사용하여 전압인가의 순서는 $V_1 V_2$ 순서로 인가되어 전류 맥동은 아래로 향하게 된다. $V_2 - V_3$ 영역에서는 반대로 상승 반송파 PWM 방법을 사용하게 되면 전압인가의 순서는 $V_2 V_3$ 로 되므로 전류 맥동이 이 전 영역과 동일하게 아래로 향하게 된다. 이렇게 각 스위칭 영역 60도 동안 하강 또는 상승 반송파 PWM 방법을 바꿔가며 사용하면 전류 맥동을 한 방향으로 만들 수 있다.

4. 모의해석 결과

모의해석 조건은 표 1 과 같다. 그림 11은 기존 PWM 방법과 제안된 PWM 방법의 입력전류 FFT분석 결과이다. 기존 PWM 방법과 제안된 PWM 방법의 전류 THD는 기존 6.28%에서 제안된 방법으로 했을 시 4.87%로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

표 1 모의해석 조건

Table 1. Condition for simulation

구분	기호	값	단위
선간전압	e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}	380	Vrms
PWM 주파수	f_{PWM}	10	kHz
출력전압 지령	V_{dc_ref}	680	V
입력 인덕터	L_s	1	mH
출력 캐패시터	C_{dc}	2,200	μF

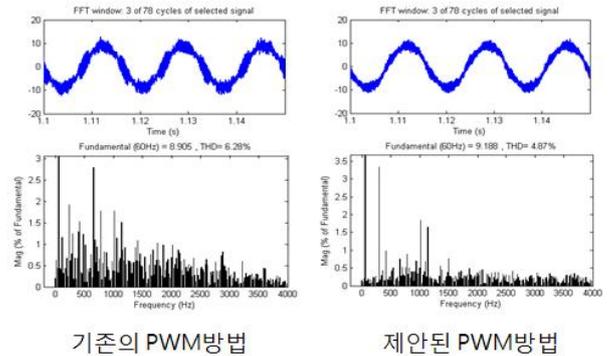


그림 11 기존 및 제안한 PWM 방법의 모의해석 결과 비교
Fig. 11 Simulation Results of the Conventional and the proposed PWM methods

5. 결론

본 논문은 기존 PWM방법으로 스위칭 시 음의 방향 양의 방향으로 생기는 전류 리플을 새로운 PWM 방법으로 전류 리플의 방향을 항상 한 방향을 향하도록 전류의 THD를 저감 하는 방법을 제안하였다. 그 방법을 기존의 방법과 비교 하여 제안된 PWM 방법이 THD 저감에 효과가 있는 것을 검증하였다.

이 논문은 동아일렉콤의 연구비지원 및 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (한국연구재단-2010-0017029)

참고 문헌

- [1] Michael H. Bierhoff, Friedrich W. Fuchs, "Active Damping for Three-Phase PWM Rectifiers With High-Order Line-Side Filters", IEEE Trans. Indus. Elec., Vol. 56, No. 2, pp. 371-378, 2009, February.
- [2] Jun-Ichi Itoh, Itsuki Ashida "A Novel Three-Phase PFC Rectifier Using a Harmonic Current Injection Method", IEEE Trans. ON. Power. Elec., Vol. 23, No. 2, 2008, March.
- [3] Liviu Mihalache, "A High Performance DSP Controller for Three-Phase PWM Rectifiers With Ultra Low Input Current THD Under Unbalanced and Distorted Input Voltage", Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005.
- [4] 김상훈, DC 및 AC 모터 제어, 북두출판사.