

전류형 GTO 컨버터의 최적제어 PWM 선형화기법

°팽성일 채경훈 최재호
충북대학교 전기전자공학부

Linearized Optimal PWM Techniques for Current Source GTO Converter

°Sung-il pang Kyong-Hun Chae Jae-Ho Choi

School of Electrical & Electronics Engineering, Chungbuk National University

Abstract: This paper presents the linearized optimal PWM techniques for current source GTO converter. This proposed method is to linearize an optimal PWM modulation strategy so that the turn-on/off-periods of the GTO switches can be computed on-line in real-time for any modulation index. This allows the rapid and continuous regulation of the DC output current while producing the sinusoidal AC input current waveform and unit power factor

1. 서론

중래의 위상제어정류기는 구조가 간단하고 경제적인 반면 출력전류의 제어응답이 늦고 교류입력측에 고조파 및 무효전력을 발생하는 단점이 있었다. 이에 PWM 컨버터가 대안으로 제시되어 많은 연구가 진행되었으나 전압형에 비하여 전류형 컨버터는 회로 단락시에도 강한 특성을 가졌음에도 불구하고 PWM 펄스 발생시에 회로가 개방되지 않도록 제어해야 하므로 사용에 많은 제한이 있었다.

본 연구에서는 전류형 GTO 컨버터의 PWM 실시간 제어를 위한 선형화 기법을 제안한다. 프로그램 제어방식에서는 특정 차수의 고조파를 억제하도록 PWM 펄스 패턴을 결정하기 위하여 비선형 방정식의 해를 구해야 한다. 그런데 기존의 방식들에서는 비선형 방정식의 해를 구하는 과정에서 계산시간 지연에 기인하여 실시간 제어를 수행하지 못하고 Look-up Table을 사용함으로써 제어응답속도가 느리고 변조율을 연속적으로 제어할 수 없는 단점이 있었다. 이에 본 연구에서는 변조지수와 PWM 스위칭 펄스와의 관계를 선형화하고 변조지수에 따라서 선형화계수를 이용하여 실시간으로 펄스 패턴을 결정하도록 함으로써 선형화 이전의 특성을 거의 그대로 유지하면서 제어응답속도를 개선하도록 하였다. 최적화 PWM 방식의 선형화 기법에 대한 이론적인 해석이 수행되고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 입증하였다

2. 전류형 GTO 컨버터의 구성 및 동작

그림 1은 교류측 입력필터를 고려한 3상 GTO-CSC(Current Source Converter)의 기본 구성도이다. 스위칭 소자는 GTO 사이리스터이며 역전압 저지를 위하여 적절로 다이오드가 연결되었다. 컨버터의 교류입력측에는 PWM 구형파 전류파형을 정현파화하기 위하여 인덕터-커패시터에 의한 LC 저역필터가 사용되었다.

컨버터의 기본적 특성으로 다음 사항이 요구된다

- 직류 출력전류의 크기를 조정하면서 컨버터 입력

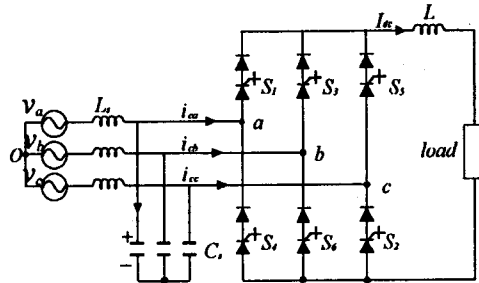


Fig. 1. System configuration of GTO-CSC.

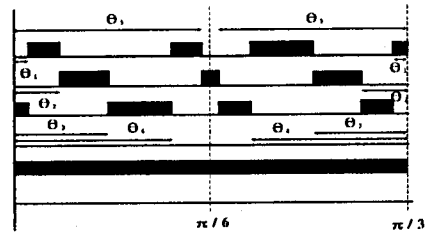


Fig. 2. PWM patterns with 5 variables from 0 to $\pi/3$.

전류 파형의 저차고조파를 최적으로 억제한다.

- 교류 전원전류파형을 정현파로 유지하면서 입력역률을 '1.0' 또는 최대로 유지한다.

전류형 PWM 컨버터의 직류측 출력전류는 시스템의 특성상 항상 일정한 전류로 유지되어야 한다. 만약 직류측 부하가 개방되는 경우에는 직류측 평활 리액터에 과도한 역전압이 유기되고 이에 기인하여 GTO 소자가 손상되므로 선로가 개방되지 않도록 GTO 소자의 스위칭시에 이를 고려하여야 한다. 따라서 전력변환장치의 6개의 GTO 소자들의 스위칭 알고리즘을 설계함에 있어서 상부와 하부의 각 3개의 GTO 소자들 중에서 어느 한 개의 소자가 반드시 도통상태가 유지되어 폐회로를 구성하도록 한다.

이러한 소자 도통의 기본원리를 바탕으로 각 소자의 도통상태를 제어하게 되는데 본 연구에서는 컨버터의 직류출력측 전류의 방향이 정방향인 것으로 설정하고 해석상의 편의를 위하여 다음의 두 가지 사항을 가정한다.

- 전류형 컨버터의 GTO 소자는 이상적인 스위치이다.
- 스위칭 기간동안 직류출력측 전류 I_{dc} 는 평활하다.

그림 2에 주어진 PWM 펄스 패턴을 사용하고 컨버터 입력 전류파형을 푸리에 급수로 전개하면 각 조조파의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$b_n = \frac{8I_{dc}}{n\pi} \left[\left\{ \cos n\left(\frac{\pi}{6} - \theta_1\right) - \cos n\left(\frac{\pi}{6} + \theta_2\right) + \cos n\left(\frac{\pi}{6} - \theta_4\right) - \cos n\left(\frac{\pi}{6} + \theta_5\right) \right\} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) - \sin(n\theta_3) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right] \quad (1)$$

단, $n = 2N - 1, N = 1, 2, 3, \dots$

식 (1)로부터 평가함수 F_e 를 식 (2)와 같이 정의하고 F_e 를 최소화하는 $\theta_1 \sim \theta_5$ 의 5개의 변수들에 대하여 식 (3)를 만족하는 최적값을 구한다.

$$F_e = \theta_5^2 + b_7^2 + b_{11}^2 + b_{13}^2 \quad (2)$$

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 < \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

그림 3은 변조지수 M 값에 따른 $\theta_1 \sim \theta_5$ 값을 보인다. 이를 선형화하기 위하여 그림 3의 정보를 다음과 같이 선형화 한다.

$$[\theta_i] = M[K_i] + [C_i], \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

본 연구에서는 선형화에 따르는 오차를 줄이기 위하여 변조지수 M 의 제어범위를 $0.2 < M < 1.2$ 로 제한하였다. 그림 4는 선형화 이후에 변조지수 M 값에 따른 $\theta_1 \sim \theta_5$ 값을 보인다. 그리고 표 1에 선형화 상수값을 나타내었다.

Table 1. Constants, K_i and C_i for linearization.

| K_i | | C_i | |
|-------|-----------|-------|-----------|
| K_1 | 0.073304 | C_1 | 0.0062832 |
| K_2 | 0.104720 | C_2 | 0.0104720 |
| K_3 | -0.157079 | C_3 | 0.3455748 |
| K_4 | 0.031416 | C_4 | 0.3497638 |
| K_5 | 0.146608 | C_5 | 0.3371974 |

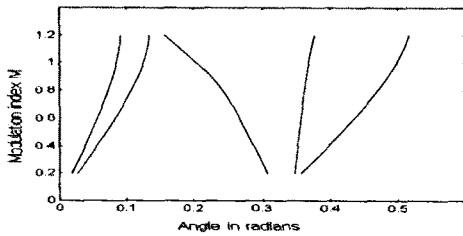


Fig. 3. Switching angles to the variation of modulation index before linearization.

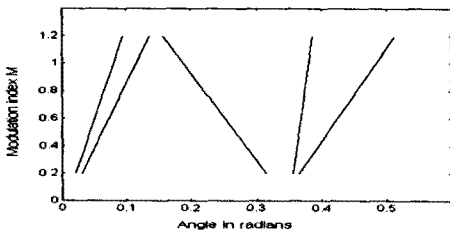


Fig. 4. Switching angles to the variation of modulation index after linearization.

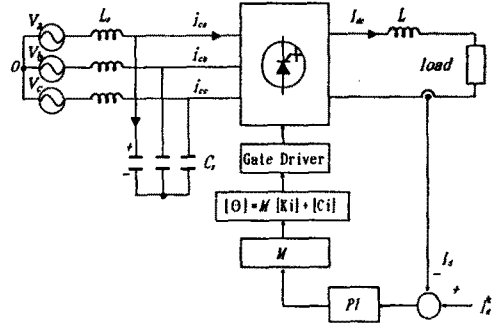


Fig. 5. Configuration of proposed GTO-CSC power circuit and control circuit.

3. 시뮬레이션 및 실험

그림 5는 본 연구의 제어 알고리즘을 이용한 PWM-CSC의 전력회로 및 제어회로를 포함하는 전체 시스템의 기본 구성도를 보인다.

직류측 부하전류 I_d 가 제한되어 기준전류 I_d^* 를 충족하도록 PI 전류제어기가 구성되었으며 제어기의 출력에 따라서 변조도 M 값이 결정되고 그림 4의 결과로부터 PWM 펄스각을 발생하도록 한다.

그림 6(a)는 컨버터 입력전류파형과 전원측 전류파형을 그림 6(b)는 전원측 전압과 전류파형을 보인다. 최적적으로 변조제어된 컨버터 입력전류파형은 교류필터에 의해 정현파로 잘 필터링되고 있고 역률제어 동작에 의해 전원전류가 전원전압파형과 거의 동상으로 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 6(c)와 그림 6(d)는 선형화에 따르는 영향을 검토하기 위하여 선형화 이전 PWM 펄스 패턴을 사용하여 시뮬레이션한 경우의 각 부의 파형을 제시하고 있다. 선형화 전후의 파형을 비교한 결과 선형화에 따르는 오차가 크게 발생하고 있지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 이상의 컨버터입력 전류파형과 전원 전류파형에 대한 고조파 해석결과를 보인다. 저차 고조파 성분을 억제하는 최적 PWM 제어기법을 사용함으로써 컨버터 입력전류파형에 고조파 성분이 거의 나타나지 않고 있으며 교류측 저역필터의 작용으로 전원 전류파형은 기본파를 제외한 대부분의 전류고조파가 잘 제거되고 있음을 알 수 있다.

그림 8부터 그림 11까지는 실험결과를 보인다. PWM 제어부는 Intel 80c196KC 마이크로프로세서로 구성하였다. 그림 8은 GTO 게이트 펄스신호와 컨버터 입력 전류파형을 그림 9는 전원 전압 및 전류파형을 그림 10은 직류측 출력전류 및 전압파형을 그리고 그림 10은 컨버터 입력 전류와 전원전류의 고조파 분석결과를 보인다. 실험결과도 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 최적화 PWM 스위칭에 선형화 기법을 도입하여 실시간제어가 가능하도록 함으로써 부하전류 제어응답속도를 개선하였고 변조율을 연속적으로 바꿀 수 있도록 하였다.

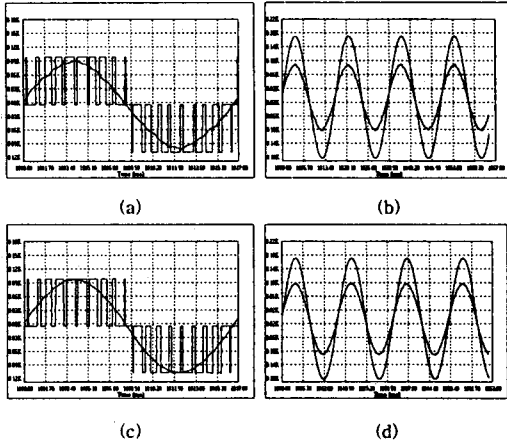


Fig. 6. Simulation results after and before linearization:
 (a) Converter input current and AC line current AL.
 (b) AC line voltage and current AL.
 (c) Converter input current and AC line current BL.
 (d) AC line voltage and current BL.

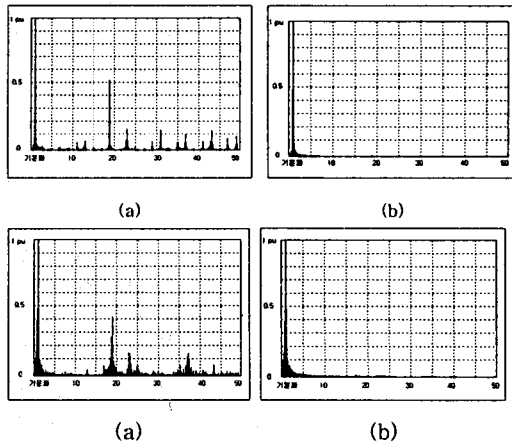


Fig. 7. Harmonic spectra after and before linearization:
 (a) Converter input current AL.
 (b) AC line current AL.
 (c) Converter input current BL.
 (d) AC line current BL.

참고문헌

[1] J. Choi, et. al., "High power GTO-CSC based power supply utilizing SHE-PWM and operating at unity power factor," in *Conf. Rec. CCECE'93*, pp. 76-79, 1993
 [2] J. Sun, et. al., "Pulsewidth modulation based on real-time solution of algebraic harmonic elimination equations," *IEEE IAS'94*, pp. 79-84, 1994

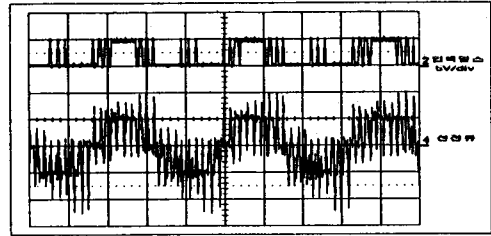


Fig. 8. Experimental results of GTO gate pulse and converter input current waveforms.

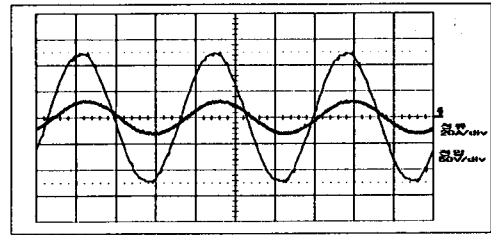


Fig. 9. Experimental results of AC line voltage and current waveforms.

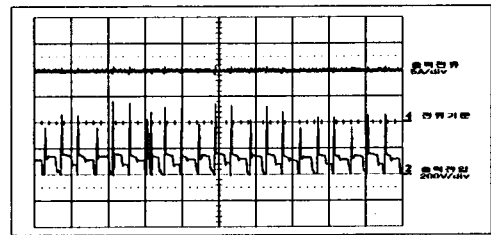


Fig. 10. Experimental results of DC output current and voltage waveforms.

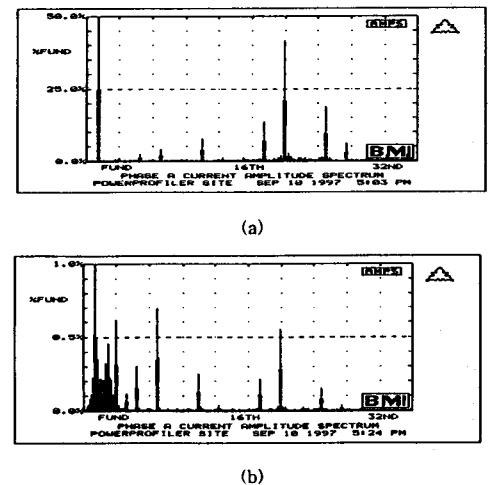


Fig. 11. Harmonic spectra:
 (a) Converter input current waveform.
 (b) AC line current waveform.