

# GTO-CSC의 PWM 제어기법에 관한 연구

○ 채 경훈, 팽 성일, 최 재호  
 충북대학교 전기전자공학부

## A Study of PWM Technique for GTO-CSC

○ K. H. Chae, S. I. Pang, J. H. Choi  
 School of Electrical & Electronic Eng. ChungBuk National Univ.

### Abstract

This paper presents the novel control and analysis of GTO-CSC. The control method is based on the linearization of an optimal modulation strategy so that the turn-on-periods of the GTO switches can be computed in real-time for any specified modulation index. These PWM patterns allow to produce minimal ac line current low order harmonics of ac line current and low switchings. Finally, the computer simulation results are presented to verify the theoretical analysis.

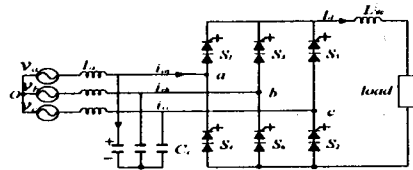


그림 1. PWM-CSC 컨버터 시스템

### 1. 서론

대용량 전력 변환 시스템을 위한 GTO 컨버터 제어를 위한 여러가지의 PWM 기법 중에서, 각 기본 주기에 대해 스위칭 손실을 감소하면서, 원하는 출력이 가능한 최적 PWM(Optimal PWM)기법이 있다(2). 이것은 선택적으로 고조파를 제거함으로써 고조파 손실을 저감시킬 뿐만 아니라 삼각파 비교 변조 기법보다 출력에 대하여 더 낮은 스위칭 주파수의 잇점을 가져 스위칭 손실을 감소시킨다.(4) 그러나 이것은 마이크로프로세서가 원하는 고조파 성분을 제거하고 출력 전압 및 주파수 변화에 따라, 스위칭 방식을 결정할 때 계산 시간이 스위칭 수의 증가에 따라 기하급수적으로 증가하게 되어 정확한 스위칭 패턴을 결정하는데 어려움이 있다. 따라서 마이크로프로세서의 On-line 계산을 이용할 수 있는 제어 조건인 시간 범위 내에서 실시간 구현이 불가능하게 되어 일반 산업계의 적용에 많은 제한을 받고 있는 실정이다.

본 논문은 6펄스 GTO 컨버터의 스위칭 방식을 선형화한 최적 PWM 방식을 제안한다. 최적 PWM 선형화 기법은 요구되는 변조도에 따라 스위칭 각을 선형화함으로써 GTO의 turn-on 주기를 미리 결정한다. 즉, 이 방식은 낮은 스위칭을 가지는 GTO에 알맞은 알고리즘을 채용함으로써 스위칭 손실을 최소화하고, 쉽게 계산될 수 없는 최적 변조 기법을 선형화하여 실시간 제어를 가능케 한다. 본 논문에서는 전류형 컨버터의 최적 PWM 선형화 기법과 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 보인다.

### 2. 최적 스위칭을 위한 수학적 전개

최적화된 PWM 스위칭 패턴에 의한 ac 선전류를 일반적인 Fourier 급수로 전개하면,

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

여기서, 파형이 quarter-cycle 대칭인 기함수이므로,

$$a_0 = 0, a_n = 0 (n = 1, 2, 3, \dots) \text{ 그러므로,}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

이다. 여기서, 식(2)로부터  $T = 2\pi$  라 놓으면,

식(2)은 다음과 같다.

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

여기서,  $I_a$  = dc 측 전류,  $n$  = 고조파 차수  
 그러므로, ac 선전류는 다음과 같이 나타난다.

$$I_a = b_n I_a \quad (4)$$

식(4)은 비선형 함수  $b_n$  으로 인한 ac 선전류  $I_a$  을 의미한다. 여기서, 3의 배수 고조파인  $b_3, b_9, b_{15} \dots$  은 회로 구성성 성형결선으로 제거가 가능하므로,  $b_1 =$  기본파 전류,  $b_5 = 0, b_7 = 0, b_{11} = 0, b_{13} = 0$  을 만드는 비선형 연립 방정식의 5개 스위칭 주기  $\theta_1 - \theta_5$  를 얻음으로써 ac 선전류의 저차 고조파인 5, 7, 11, 13차 고조파를 최소화할 수 있다.

$$F_e = A_5^{2+} A_7^{2+} A_{11}^{2+} A_{13}^{2+} = \text{최소} \quad (5)$$

단, 아래와 같이 중복각 제약 조건이 있다.

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

### 3. 최적 PWM 스위칭 알고리즘

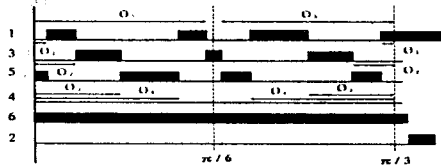


그림 2. 간격 0-60도에 대한 최적화 PWM 스위칭 패턴.

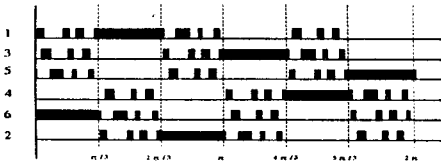


그림 3. 한 주기간 대한 최적화 PWM 스위칭 패턴.

on-off 스위칭 알고리즘을 설명하면, 스위칭 패턴은 60도 간격 안에서, 우선 0도 - 60도 간격에서, 스위치 6번은 on되며, 위상 브리지의 스위치 1,3,5는 주기  $\theta_1 - \theta_5$  에 대하여 on이 되며, 그 중 스위치 3이 on시, 파워 브리지는 단락회로로 구성되어 동작된다. 다음 60도 - 120도 간격에서는 위 브리지 1번은 on되며, 아랫상 스위치 2,4,6이 on-off 된다. 이러한 동작은 일련의 순서로 동작하게 되는데, 즉, 다음 60-120도 간격에선, 스위치 1은 스위치 6을 대신하고, 스위치 2는 스위치 1를 대신하게 된다. 세 번째인 120-180도 간격에선, 스위치 2는 스위치 6를 대신, 스위치 3은 스위치 2를 대신한다. 최종적으로 매 60도마다 위와 같은 반복적인 스위칭 패턴으로 동작을 하게된다.

여기서, 3상 컨버터의 한 상에 대한 전류의 총 실효치는 다음과 같이 계산된다. 즉,

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_a \quad (7)$$

이다.

그림 4은 5,7,11,13 고조파를 제거한 비선형 함수의 증가에 따른 스위칭 각들의 변화를 보여주고 있다.

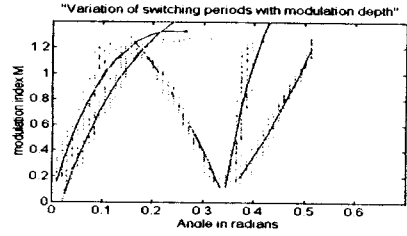


그림 4 : 변조도 M 과 스위칭 각의 변화

변조도의 크기에 따른 스위칭 각  $\theta_1 - \theta_5$  의 변동을 보이고 있다. 하지만, 이것은 스위칭 간격을 결정하기 위하여 계산 시간이 매우 많이 소요되며, 정확한 해를 구하는데 매우 어려우며, 따라서 디지털 구현시 비경제적인 단점이 있다. 즉 이것은 직접적인 실시간 구현에 적합하지 않음을 말해준다. 실시간 시스템으로 최적화 PWM 알고리즘을 구현키 위해, 그림 4 에서 보여준 최적 스위칭 곡선을 선형화한다.

각 스위칭 주기를 선형화하기 위하여 다음과 같은 방정식을 만든다. 즉,

$$[\theta_i] = M \cdot [K_i] + [C_i] \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

우선, 제어하고자 하는 변조도의 범위를 선정하면, 그에 따라  $K_i$  와  $C_i$  범위가 정해진다. 그후  $K_i, C_i$  의 값은 최소자승법(Least Squares Method)를 이용하여 구했다. 이로써 주어진 변조도 정도 M에 대하여, 방정식 (8)은 단지 5개의 곱셈과 5개의 덧셈으로 5개의 스위칭 주기  $\theta_1 - \theta_5$  를 결정되게 된다. 변조도 범위  $0.2 \leq M \leq 1.2$  안에서, 선형화와 관계된 상수  $K_i$  와  $C_i$  는 표 1에 보여준다.

0.2 < M < 1.2			
K1	0.073304	C1	0.0062832
K2	0.10472	C2	0.010472
K3	-0.157079	C3	0.3455748
K4	0.031416	C4	0.3497638
K5	0.146608	C5	0.3371974

표 1 : 상수  $K_i$  과  $C_i$  값들

그림 5.는 스위칭 각을 선형화시킨후, 변조도와 각과의 관계를 보인다.

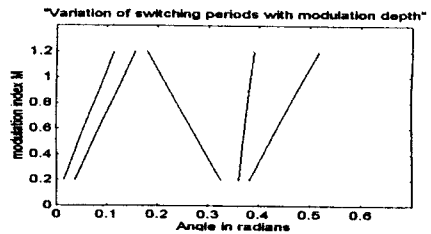


그림 5 : 선형화한 변조도 M 과 스위칭 주기의 변화

#### 4. 시뮬레이션

그림 6.는 선형화 최적 PWM 스위칭을 사용한 PWM-CSC의 기본 회로도를 보인다. dc 측 전류의 오차를 PI 제어를 한 후, 결정된 변조도에 따른 스위칭 각에 맞추어 스위칭을 하게 된다. 표2는 시뮬레이션 파라메터이다.

ac side voltage	220V	dc side Load	1Ω
Reactor of ac filter	3mH	Smoothing Reactor	1.2H
Capacitor of ac filter	200uF	P gain	0.9
Damping R	5Ω	I time constant	0.001(sec)
Switching frequency	600Hz		

표 2 : 시뮬레이션 파라메터

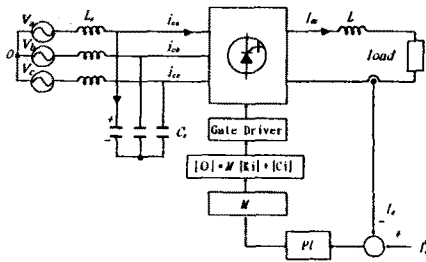


그림 6. 제안한 GTO-CSC 시스템

그림 7.은 ac 선전류 파형과 전압파형을 보이며, 그림 8.은 컨버터 입력단 전류파형을 보인다. 그림 9.는 dc 기준치를 90A일 때, 부하에 나타나는 전압과 전류파형을 보인다. 그림 10.은 입력단 전류의 고조파 분석을 보인다. 5, 7, 11, 13 고조파는 거의 나타나지 않으며, 17차 고조파가 가장 큼을 알 수있다.

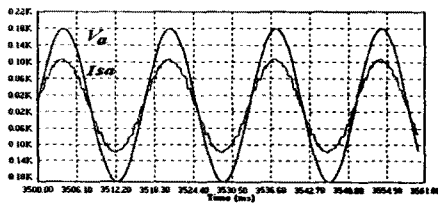


그림 7. ac 측 선전류와 전압

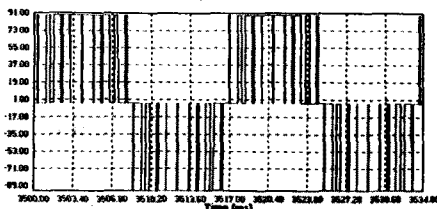


그림 8. 컨버터 입력단 전류

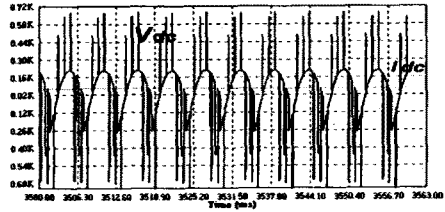


그림 9. dc 측 전류와 전압

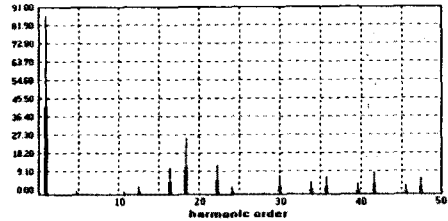


그림 10. 컨버터 입력단 전류의 고조파분석

#### 6. 결론

본 연구에서는 6펄스 GTO 컨버터의 스위칭 방식을 선형화한 최적 PWM 제어 기법을 제안하였다. 선형화한 최적 PWM 기법은 요구되는 변조도에 따라 스위칭 각을 선형화함으로써 GTO의 turn-on 주기를 미리 결정한다. 이 방식은 낮은 스위칭을 가지는 GTO에 알맞은 알고리즘을 채용함으로써 스위칭 손실을 최소화하고, 쉽게 계산될 수 없는 최적 변조 기법을 선형화하여 실시간 제어를 가능케 할 수 있다. 제안된 알고리즘은 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 양호한 결과를 얻었으며, 향후 제안된 방식을 실험을 통해 전류형 컨버터에 적용시키는 것이 앞으로 계속 연구해야 할 과제이다.

본 연구는 '96 기초전력공학공동연구소 지원 연구의 일부임 (과제번호 :96-054)

#### 참고문헌

1. Q.Jiang, D.B. Giesner, D.G. Holmes, "A linear used Optimal Modulation Strategy for a GTO Converter to Allow Real-time Control of Active and Reactive Power Flows into a SMES System", in Conf. Rec. EPE'91, vol.1, pp.504-509, 1991.
2. M. Iwahori and K. Kousaka, "Three-Phase Current Source GTO Rectifier Adopting New PWM Control Techniques.", in Conf. Rec. IEEE IAS'89, pp. 855-860, 1989.
3. Tominga T. et al, "Power Control Experiments Using a PWM GTO Thyristor Storage", in Conf. Rec. IEEE IAS'89, pp.937-942, 1989.
4. J.H.Choi, H.A.Kojori, and S.B.Dewan, "High power GTO-CSC based power supply utilising SHE-PWM and operating at unity power factor", in Conf. Rec. IEEE CCECE'93, pp76-79, 1993.