

단상 3레벨 대용량 정류기의 PWM방법

조성준, 송중호, 김용덕, 최익, 유지윤*
 한국과학기술연구원 지능제어연구센터, * : 고려대학교 전기공학과

A PWM Method for Single-Phase 3-Level High Power Rectifiers

S.J.Cho, J.H.Song, Y.D.Kim, I.Choy, J.Y.Yoo*

Intelligent System Control Research Center, KIST, * : Dept. of Electrical Eng. Korea Univ.

Abstract - This paper presents a simple switching method to generate a PWM pattern mostly relevant to single-phase three-level PWM rectifier. The adopted PWM switching pattern is performed in a manner similar to the space vector PWM method, which is popularly used in the three-phase rectifier and inverter. A set of possible voltages has been selected so that an equation with a time integral considered within a sampling period should be satisfied every sampling time. The simulation result shows that the proposed control scheme is good in some performance criteria such as unity power factor, low harmonic distortion of input current, dynamic response and voltage balancing of two series-connected DC capacitors.

1. 서론

PWM 정류기는 SCR 브리지 정류기나 다이오드 정류기에 비해 낮은 고조파 왜곡, 높은 역률, 작은 필터 크기 등과 같은 우수한 성능으로 인해 산업 응용분야에 널리 쓰이고 있다 [1,2,3]. 특히, PWM 정류기는 작은 무효 전력을 소비하기 때문에 경제적인 시스템을 구축할 수 있게 된다. 최근에 2레벨 PWM 정류기에 비해 같은 스위칭 주파수에서 더 작은 고조파 왜곡을 갖는 3레벨 PWM 정류기에 대한 관심이 높아져 왔다. 또한 3레벨 PWM 정류기에서는 2레벨 PWM 정류기에 비해 스위칭 소자의 전압 부담을 절반으로 낮추기 때문에 고압, 대용량 시스템에 응용이 가능하다 [4].

삼각파를 이용한 삼각파 비교 펄스폭 변조방식은 3레벨 PWM 정류기에 널리 사용되는 방법이다 [5]. 본 논문에서는 단상 3레벨 PWM 정류기의 PWM 방법으로 이산화된 PWM 구현을 쉽게하고 더욱 규칙적인 PWM 방법을 제안한다. 기본적으로 이 방법은 3상 정류기와 인버터의 공간벡터 펄스폭 변조방식과 유사하다. 그러나 제안된 방법은 3레벨 시스템 고유의 문제인 전압 불균형 문제를 효과적으로 제어할 수 있다.

단상 3레벨 PWM 정류기의 모델링 식과 PWM 방법을 제시한다. 또한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안된 방법이 입력전압과 전류의 역률, 입력 전류의 THD, 부하 변동에 따른 응답특성 등에서 좋은 성능을 가지고 있음을 보인다.

2. 모델링

단상 3레벨 정류기의 회로는 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 여기서 A레그와 B레그의 스위칭 함수는 S_A 와 S_B 로 각각 표시된다. 정류기의 전압, 전류와 스위칭 함수의 관계는 표 1과 같이 표현된다. 표 1에 표시된 S_1 과 S_2 를 이용해서 일반화된 단상 3레벨 정류기의 모델

링 식을 세우면 다음과 같다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + v_i \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{dc1} - \frac{(v_{C1} + v_{C2})}{R} \quad (2)$$

$$C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{dc2} - \frac{(v_{C1} + v_{C2})}{R} \quad (3)$$

$$v_i = S_1 v_{C1} + S_2 v_{C2} \quad (4)$$

$$i_{dc1} = S_1 i_s, \quad i_{dc2} = S_2 i_s \quad (5)$$

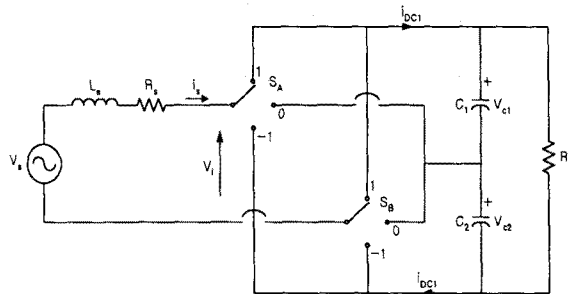


그림 1. 단상 3레벨 PWM 정류기의 회로도

표 1. 단상 3레벨 PWM 정류기의 전압, 전류와 스위칭 함수의 관계

S_A	S_B	v_i	i_{pc1}	i_{pc2}	S_1	S_2
1	1	0	0	0	0	0
1	0	v_{C1}	i_s	0	1	0
1	-1	$v_{C1} + v_{C2}$	i_s	i_s	1	1
0	1	$-v_{C1}$	$-i_s$	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0
0	-1	v_{C2}	0	i_s	0	1
-1	1	$-v_{C1} - v_{C2}$	$-i_s$	$-i_s$	-1	-1
-1	0	$-v_{C2}$	0	$-i_s$	0	-1
-1	-1	0	0	0	0	0

새로운 PWM 방법은 그림 1의 회로도에 나타난 전압, 전류 변수를 스위칭 함수로 표현한 표 1로부터 얻어질 수 있다.

3. 새로운 PWM 방법

정류기의 입력 단자에 인가되는 전압은 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 7가지의 다른 상태를 가지고 있으며, 각각의 상태를 스위칭 함수로 표현할 수 있으므로 어떤 시점에서 인가되는 전압을 적당한 스위칭 함수를 선택함으로써 결정할 수 있다. 샘플링 한 주기 T_s 내에서 전압 지령 v_s^* 의 시간에 대한 적분치와 선택 가능한 전압들

가운데 적분치의 합이 같은 두 개의 전압을 선정할 수 있다. 선택된 두 개의 전압이 인가되는 시간은 다음의 식으로부터 결정된다.

$$\int_{t_i}^{t_i+T_s} v_i^* dt = v_k t_k + v_{k+1} t_{k+1} \quad (6)$$

$$T_s = t_k + t_{k+1} \quad (7)$$

여기서 v_k 와 v_{k+1} 은 t_i 부터 t_i+T_s 사이에서 인가되는 선택된 두 개의 전압을 나타내며 t_k 와 t_{k+1} 은 전압 v_k 와 v_{k+1} 이 인가되는 각각의 시간을 나타낸다. 또한 식(7)에 주어진 바와 같이 두 전압이 인가되는 시간의 합은 샘플링 주기 T_s 와 같아야 한다. 일반적으로 공간 벡터 PWM 방법에서 입력 전압 지령치 v_i^* 는 샘플링 주기 T_s 동안 일정한 상수라고 가정된다. 하지만 본 논문에서 제안하는 방법의 입력 전압 지령치 v_i^* 는 고압 대용량 시스템에서 상대적으로 낮은 스위칭 주파수에서도 응용하기 위해 시변 변수로 고려된다. 그림 2에 제안된 PWM 방법을 도식적으로 표현한다. 그림에서 보는 바와 같이 선택된 두 개의 전압이 만들어내는 전압 파형은 샘플링 주기 T_s 의 중앙에 위치하도록 한다.

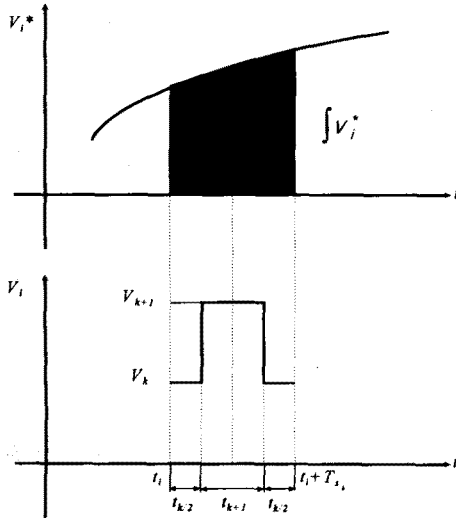


그림 2. 제안된 PWM 방법

3레벨 시스템에서 발생하는 두 개의 직렬 콘덴서의 전압 불균형 문제는 v_{C1} 과 v_{C2} 를 적절히 선택함으로써 해결될 수 있다. 두 개의 직렬 콘덴서 중 어떤 전압을 선택할 것인지는 입력 전류의 방향과 두 콘덴서의 전압의 크기를 고려하여 결정된다. 두 개의 콘덴서 전압 중에서 어떤 것을 전원측과 연결할 것인지를 선택하는 조건은 표 2와 같이 결정된다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 PWM 방법을 사용한 단상 3레벨 PWM 정류기의 제어 블록도는 그림 3과 같다. 정류기의 입력 전압 지령치 v_i^* 는 실제 입력 전류 i_s 가 각 샘플링 주기 T_s 의 끝에서 입력 전류 지령치 i_s^* 와 같아지도록 다음 수식과 같이 계산된다.

$$v_i^* = v_s - R_s i_s - \frac{L_s}{T_s} (i_s^* - i_s) \quad (8)$$

식 (8)과 같이 계산되는 v_i^* 의 시간에 대한 적분치를 구해서 그림 2와 같이 스위칭 펄스를 만들어 낸다.

표 2. 전압 불균형을 고려한 전압 선택

$ \int v_i^* $	v_i^*	v_{C1}, v_{C2}	i_s	v_k	v_{k+1}
$ \int v_i^* < \frac{V_{dc}}{2} T_s$	$v_i^* > 0$	$v_{C1} > v_{C2}$	$i_s > 0$	0	v_{C2}
		$v_{C1} < v_{C2}$	$i_s < 0$	0	v_{C1}
	$v_i^* < 0$	$v_{C1} > v_{C2}$	$i_s > 0$	0	$-v_{C1}$
		$v_{C1} < v_{C2}$	$i_s < 0$	0	$-v_{C2}$
$ \int v_i^* > \frac{V_{dc}}{2} T_s$	$v_i^* > 0$	$v_{C1} > v_{C2}$	$i_s > 0$	v_{C2}	$v_{C1} + v_{C2}$
		$v_{C1} < v_{C2}$	$i_s < 0$	v_{C1}	$v_{C1} + v_{C2}$
	$v_i^* < 0$	$v_{C1} > v_{C2}$	$i_s > 0$	$-v_{C1}$	$-(v_{C1} + v_{C2})$
		$v_{C1} < v_{C2}$	$i_s < 0$	$-v_{C2}$	$-(v_{C1} + v_{C2})$

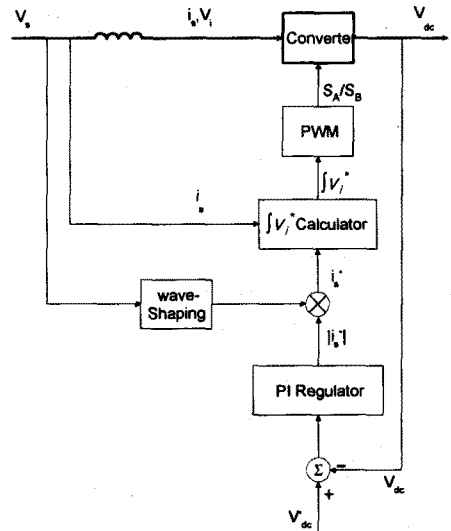
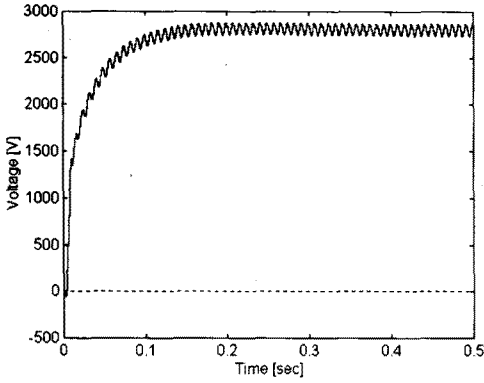


그림 3. 제어 블록도

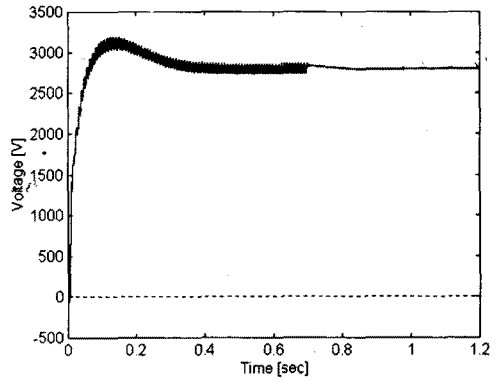
그림 4(a), (b), (c), (d)에서 시뮬레이션의 결과로 DC 출력단의 전압, 정류기 입력전압, 전원전압과 입력 전류, 출력단 콘덴서의 전압 불평형 에러를 각각 보인다. 그림 4(e), (f)는 $t = 0.7$ sec에서 부하를 전부하에서 전부하의 10% 부하로 바꾸었을 때의 응답특성 중에서 DC 출력전압, 전원전압과 입력전류를 각각 보인다. 그림 4(c)와 (f)에 나타난 입력전류에 대해서 FFT 분석을 해보면 THD가 각각 1.86%와 14.84%로 얻어진다.

5. 결론

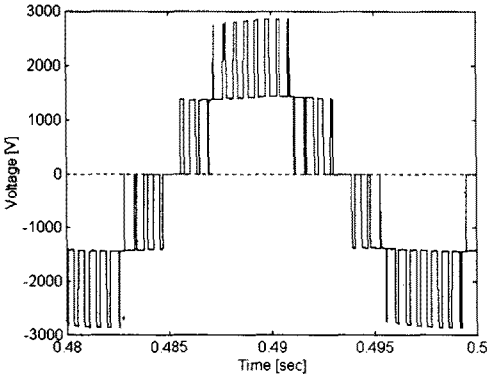
본 논문에서는 고압 대용량에 응용될 수 있는 새로운 단상 3레벨 PWM 정류기에 대한 PWM 방법을 제안하였다. 제안된 PWM 방법은 이산화된 시스템에 실현되기 쉬울 뿐 아니라 3레벨 정류기 고유의 DC 출력단 전압의 불균형 문제도 해결할 수 있다. 또한 입력전류의 THD, 전원전압과 전류의 역할, 부하변동시의 응답특성 등의 면에서 좋은 성능을 보인다.



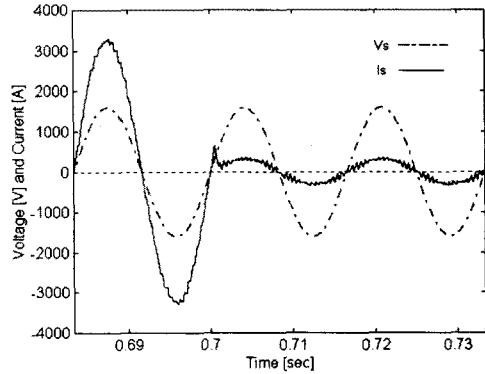
(a) DC 출력 전압



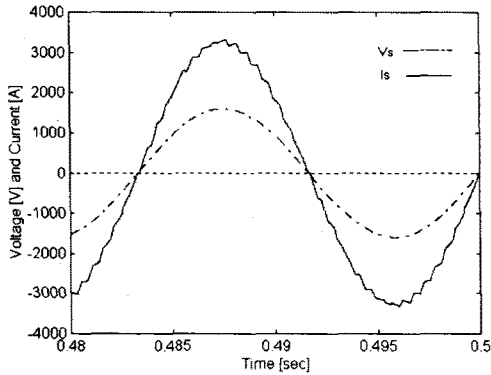
(e) $t = 0.7$ sec에서 부하를 100% \rightarrow 10%로 변화시 DC 출력 전압



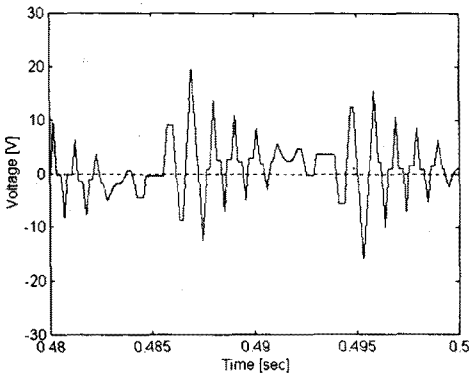
(b) 정류기 입력 전압



(f) $t = 0.7$ sec에서 부하를 100% \rightarrow 10%로 변화시 전원전압과 입력전류



(c) 제안된 PWM의 전원전압과 입력전류



(d) 커패시터 전압 불평형 에러 ($V_{C1} - V_{C2}$)

그림 4. 시뮬레이션 결과파형

(참고 문헌)

- [1] O. Stihl and B. T. Ooi, "A Single-phase Controlled-current PWM Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol 3 no 4, pp453~459, 1988
- [2] J. C. Salmon, "Techniques for Minimizing the Input Current Distortion of the Current-controlled Single-phase Boost Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol 8 no 4, pp 509~520, 1993
- [3] K. Thiyagarajah, V. T. Ranganathan, and B. S. R. Iyengar, "A High Switching Frequency IGBT PWM Rectifier/Inverter System for AC Motor Drives Operation from Single Phase Supply", IEEE Trans. on Power Electronics, vol6 no 4, pp 576~584, 1991
- [4] S. Tamai, M. Koyama, T. Fujii, S. Mizoguchi, and T. Kawabata, "3 Level GTO Rectifier-Inverter pair System for Large Capacity Induction Motor Drive", Proc. of EPE, pp 45~50, 1993
- [5] H. Stemmler, "Power Electronics in Electric Trancion Applications", Proc. of IECON'93, pp 707~713, 1993