

간단한 보조회로 추가에 의한 6-펄스 싸이리스터 컨버터의 다펄스화

*정재혁, *오준용, *최세완, **이인환, **황용하
*서울산업대학교 제어계측공학과, **(주)이티아이

Pulse Multiplication of 6-Pulse Thyristor Converter with Simple Auxiliary Circuit

Jaehyuck Jung, Junyong Oh, Sewan Choi, Inhwan Lee, Yongha Hwang

*Dept. of Control and Instrumentation Eng.

Seoul National University of Technology,

**ETI

ABSTRACT

A new pulse multiplication technique based on 6-pulse thyristor converters is proposed in this paper. With the proposed technique, 12-pulse, 18-pulse and 24-pulse operations have been obtained both on the input current and on the output voltage. A control strategy over the whole range of phase angle is provided along with sophisticated input current and output voltage analysis. Experimental results from a laboratory prototype verify the proposed theory.

1. 서론

싸이리스터 소자를 사용한 AC-DC 변환기는 DC 전동기 구동, UPS의 입력단, HVDC 변환기 및 정지형 무효전력보상기의 한 형태인 TCR(Thyristor Controlled Reactor)등에 폭넓게 사용되고 있다. 싸이리스터 컨버터의 스위칭 동작으로 입력전류와 출력전압에 컨버터의 펄스 수와 관련한 고조파 성분이 발생하게 된다. 즉, 컨버터의 펄스 수를 P라 하면 입력전류에는 $Pn \pm 1$ (n은 양의 정수)의 고조파가 출력전압에는 Pn 의 고조파가 발생한다. 이렇게 발생된 고조파는 근접한 전화선의 간섭, 통신장애, 차단기 등의 오동작 및 각종 고조파 문제를 야기하게 된다[1]. 이러한 고조파를 저감하기 위하여 싸이리스터 브리지와 위상변압기를 다중화함으로써 컨버터의 펄스 수를 높이는 방식은 시스템의 비용 및 용적의 상승을 가져오게 한다. 이에 따라 싸이리스터 브리지를 이중접속하고 보조회로를 사용하여 컨버터의 펄스 수를 높이는 방식이 제안되었는데 문헌[2]에서는 병렬 이중접속 컨버터의 상간변

압기의 탭에 연결된 보조 싸이리스터의 적절한 스위칭 동작으로 펄스 수를 증가시켰고, 문헌[3-4]에서는 직렬 이중접속 컨버터에 보조 싸이리스터로 출력전류를 재주입하는 방식으로 컨버터의 입·출력 파형을 개선하였다. 이와 같은 이중접속형 고조파저감방식은 다중화방식과 동등한 성능을 가지면서 비용 및 용적에 많은 절감을 가져왔다. 그러나 이중접속방식에서도 두대의 컨버터와 위상변압기의 사용은 필수적이다.

본 논문에서는 6-펄스 싸이리스터 컨버터에 보조회로를 추가하여 12-펄스, 18-펄스, 24-펄스 컨버터와 동등한 입·출력 성능을 갖는 새로운 P-펄스 싸이리스터 컨버터를 제안한다. 제안한 방식은 다음의 특징을 갖는다.

- 보조회로는 $\frac{P}{6}$ 개의 싸이리스터 소자와 저용량의 상간 변압기 및 직류분할용 커패시터로 구성된다.
- 입력전류에는 $Pn \pm 1$, 출력전압에는 Pn 의 고조파 특성을 갖는다
- DC전동기 구동 등 입력 측에 전원분리가 필요 없는 경우에는 이중접속방식과 같은 위상변압기가 필요 없다.

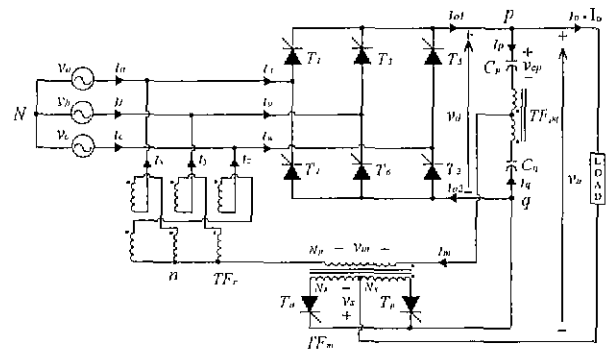


그림 1 제안하는 12-펄스 컨버터
Fig. 1 Proposed 12-pulse converter

- 제안한 방식은 이론적으로 펄스 수를 무한히 증대시킬 수 있다.
- 부하나 전원주파수가 변동해도 견고하게 동작한다.

제안한 방식은 12-펄스 컨버터를 기준으로 동작 원리 및 제어방법, 용량계산을 서술하였고, 18-펄스, 24-펄스화 하는 방식에 대하여 이론적 서술 및 이에 따른 실험으로 본 방식의 타당성을 입증한다.

2. 제안하는 12-펄스 컨버터

그림 1은 제안하는 12-펄스 컨버터를 나타낸다. 제안한 컨버터는 기존의 6-펄스 컨버터에 보조회로를 추가하여 구성한다. 이 보조회로는 저용량의 직류분할용 단권변압기 TF_{px} , 전류주입용 단상변압기 TF_m , 주입전류를 3상에 균등하게 나누기 위한 Zigzag형 결합변압기 TF_a 와 직류전압 분할용 콘덴서 C_p 와 C_q 그리고 변압기 TF_m 에 연결된 두 개의 싸이리스터 T_p 와 T_q 로 구성된다. 6-펄스 컨버터의 출력전압 v_d 는 위상각 α 에 따라 변하며 그림 2와 같이 6-펄스 특성을 갖는다. 충분히 큰 용량의 커패시터 C_p 와 C_q 를 사용하여 직류 리플전압을 무시할 수 있다고 가정하면 변압기 TF_m 의 1차측 전압은

$$v_m = v_{pm} - \frac{1}{2} v_d \quad (1)$$

로 되어 컨버터의 위상각 α 에 따라 여러가지 파형을 갖게 되고 주파수는 전원주파수의 3배가 된다. 위상각 α 가 30° 일 때 전압 v_m 의 파형을 그림 2에 나타낸다. 그림 3에 보조회로의 전류주입용 변압기 TF_m 에 연결된 2개의 보조 싸이리스터의 동작을 나타낸다. 변압기 TF_m 의 1차측 전압 v_m 의 상승모서리(rising edge)를 각 싸이리스터 T_p 와 T_q 의 점호각인 β_p 와 β_q 의 기준점으로 하며 싸이리스터 T_p 와 T_q 는 둘 중의 하나가 항상 출력전류를 도통시키도록 한다. 전압 v_m 이 양(음)일 때 T_q (T_p)가 도통하고 있다고 가정하면 T_p (T_q)가 순바이어스 되어 β_p (β_q)에서 T_p (T_q)를 점호하면 전류(commutation)되어 그림 3(a)(3(b))와 같이 출력전류 I_o 를 도통시켜 변압기 TF_m 의 1차측에 정(부) 방향의 전류 $i_m = (N_s/N_p)I_o$ ($i_m = -(N_s/N_p)I_o$)을 유기시킨다. 이러한 방식으로 반복하여 T_p 와 T_q 를 점호하면 전류 i_m 은 그림 2와 같이 2-레벨을 갖는 파형이 되고 커패시터 C_p 와 C_q 로 양분되어 흐르게 되므로 컨버터의 출력전류 i_{o1} 과 i_{o2} 는 다음과 같이 된다.

$$i_{o1} = \frac{i_m}{2} + I_o, \quad i_{o2} = -\frac{i_m}{2} + I_o \quad (2)$$

한편 'a' 상에 대한 컨버터 입력전류와 컨버터 출력전류와의 관계를 나타내기 위해 그림 4와 같이

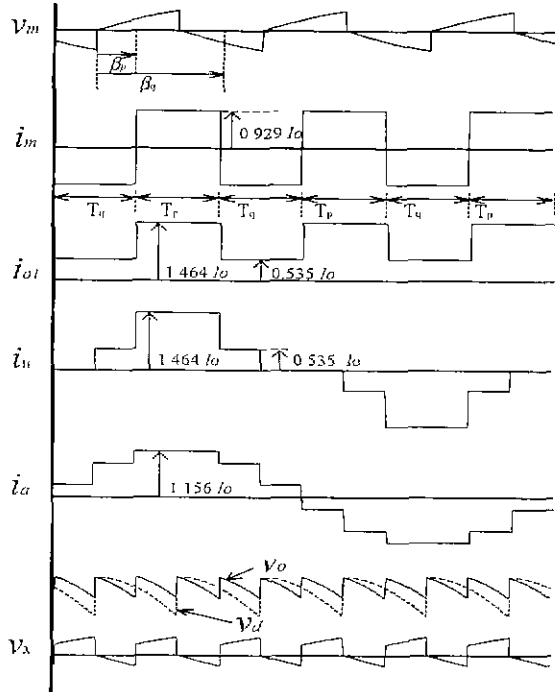
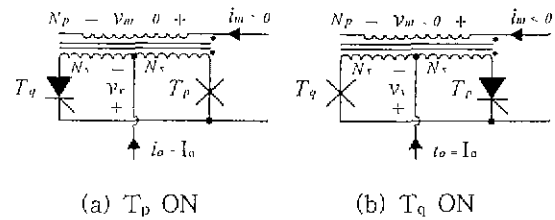


그림 2 각부파형

($V_{LL}=1(\text{PU}), I_o=1(\text{PU}), K=0.929, \alpha=30^\circ, \beta_p=30^\circ, \beta_q=90^\circ$)

Fig. 2 Various waveforms

($V_{LL}=1(\text{PU}), I_o=1(\text{PU}), K=0.929, \alpha=30^\circ, \beta_p=30^\circ, \beta_q=90^\circ$)



(a) T_p ON

(b) T_q ON

그림 3 보조회로의 동작

Fig. 3 Operation of auxiliary circuit

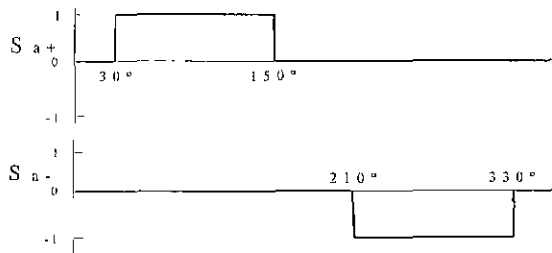


그림 4 'a' 상에 대한 스위칭 함수 S_{a+} 와 S_{a-}

Fig. 4 Switching function S_{a+} & S_{a-} for phase 'a'

스위칭함수 S_{a-} 와 S_{a+} 를 정의하면 각 상에 대한 스위칭함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{b+} &= S_{a-} \angle -120^\circ, & S_{b-} &= S_{a-} \angle -120^\circ \\ S_{c+} &= S_{a+} \angle +120^\circ, & S_{c-} &= S_{a-} \angle +120^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

위의 스위칭 함수로부터 컨버터 입력전류는

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a+} \\ S_{b+} \\ S_{c+} \end{bmatrix} i_{a1} + \begin{bmatrix} S_{a-} \\ S_{b-} \\ S_{c-} \end{bmatrix} i_{a2} \quad (4)$$

로 되고, Zigzag형 결합변압기 TF_n의 작용으로 전류 i_m 은 균등하게 3등분되어 주입전류 i_x, i_y, i_z 는

$$i_x = i_y = i_z = \frac{1}{3} i_m \quad (5)$$

이 되며, 이때 입력전류 i_a 는

$$i_a = i_u - i_x \quad (6)$$

가 되므로 식(2) ~ 식(6)으로 부터 입력전류는 다음과 같이 된다.

$$i_a = \frac{1}{6} i_m (3 S_{a+} - 3 S_{a-} - 2) + I_o (S_{a+} + S_{a-}) \quad (7)$$

식(7)로 부터 입력전류는 변압기 TF_m의 권선비 $K=(N_s/N_p)$ 에 따라 변하며 $K=0.929$ 일 때 THD가 14.19%로 최소가 되는 것을 알 수 있다. 또한, 입력전류의 THD=14.19%를 컨버터의 모든 동작구간(위상각 $0^\circ < \alpha < 180^\circ$)에서 유지할 수 있도록 보조 싸이리스터의 점호각 β 를 그림 5에 나타내었다. 그림 6에서 보듯이 12-펄스 컨버터는 전구간에서 THD를 14.19%로 할 수 있다. 이와 같이 시스템의 위상각 α 에 따라 싸이리스터 T_q와 T_p의 점호각 $\beta_p (= \beta)$ 와 $\beta_q (= \beta + 60^\circ)$ 를 조정하면 입력전류를 항상 12-펄스의 특성을 갖는 파형으로 만들 수 있다. 그림 2는 시스템의 위상각 α 가 30° 이고, $\beta_p = 30^\circ$ 와 $\beta_q = 90^\circ$ 일 때의 각부파형을 나타내는데 입력전류 i_a 는 12-펄스의 파형을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 1에서 보는 바와 같이 기존의 6-펄스 컨버터의 출력전압은 v_d 와 같고 제안한 시스템의 출력전압은

$$v_o = v_d + v_r \quad (8)$$

로 된다. 이때 전압 v_x 는 T_p가 도통하면 $v_x = (N_s/N_p)v_m$ 이 되고 T_q가 도통되면 $v_x = -(N_s/N_p)v_m$ 이 된다. 이와 같이 전압 v_x 가 6-펄스의 출력전압 v_d 에 더해져서 제안한 컨

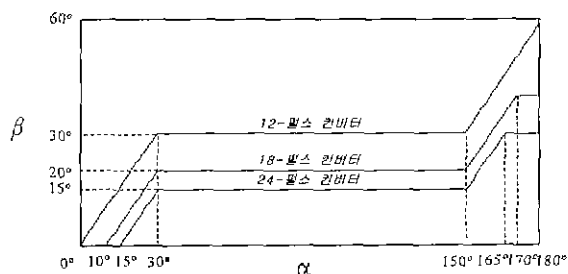


그림 5 위상각 α 에 대한 최적의 점호각 β
Fig. 5 Optimum firing angle β for phase angle α

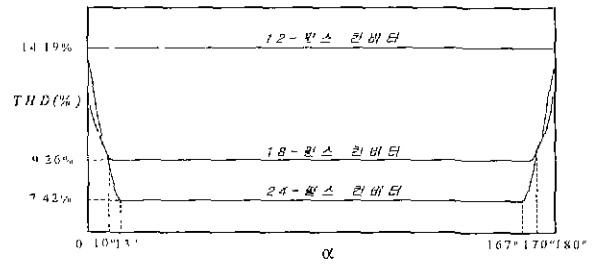


그림 6 위상각 α 에 대한 입력전류의 THD
Fig. 6 Input current THD for phase angle α

버터의 출력전압 v_o 은 그림2에서 보듯이 12-펄스의 개선된 파형을 얻게된다.

3. P-펄스 컨버터

전술한 바와 같이 기존의 6-펄스 컨버터의 보조 회로에 2개의 보조 싸이리스터를 추가하여 12-펄스로 동작시켰는데 이와 같은 방식으로 보조회로에 6개의 싸이리스터를 추가하여 적절히 동작시키면 P-펄스 컨버터를 구현할 수 있다. 그림 7에 18-펄스 및 24-펄스로 동작시키기 위한 보조 싸이리스터의 회로 구성과 동작을 예로 들었는데 이와 같이 본 방식은 보조 싸이리스터의 추가만으로 이론적으로는 펄스 수를 무한히 증대시킬 수 있다. 18-펄스(24-펄스) 동작을 위한 보조 싸이리스터 T_q, T_n 및 T_p(T_{q1}, T_{q2}, T_{p1} 및 T_{p2})에 대한 점호각 β_{q1} , β_{n1} 및 β_{p1} (β_{q2} , β_{p2} 및 β_{n2})를 그림 7(a)(그림 7(b))와 같이 할 때 전류주입용 변압기 TF_m의 1차측에 유기되는 전류 i_m 은 3-레벨(4-레벨)의 파형을 갖는다. 2절의 12-펄스 컨버터에서 유도한 모든 식은 P-펄스 컨버터에서도 유효하며 식(7)의 입력전류 i_a 는 주입전

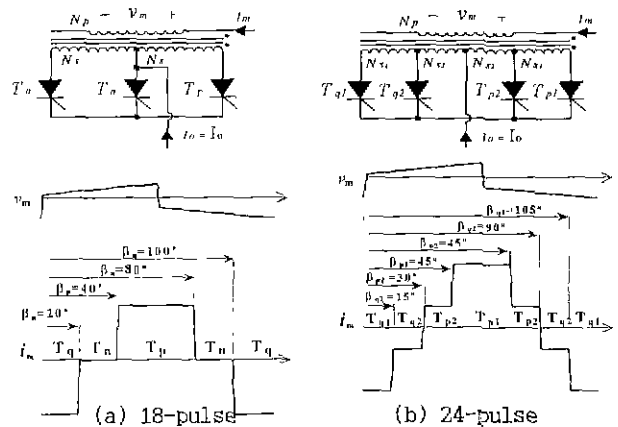


그림 7 P-펄스 컨버터의 보조회로 및 동작 ($\alpha=30^\circ$)
Fig. 7 Auxiliary circuit & operation for p-pulse converter ($\alpha=30^\circ$)

류 i_m 에 따라 변한다. 위상각 α 가 30° 일 때 식(7)과 식(8)로부터 입력전류 i_a 와 출력전압 v_o 를 구하여 그림 8에 나타냈는데 입력전류와 출력전압 모두 18-펄스(24-펄스)의 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 18-펄스(24-펄스) 컨버터의 모든 동작구간에서 입력전류의 THD를 최소로 하는 보조 싸이리스터의 점호각을 그림 5에 나타내었고, 이에 따른 입력전류의 THD를 그림 6에 나타내었다. 12-펄스와는 달리 18-펄스(24-펄스) 동작에서는 위상각 α 가 $0^\circ \sim 10^\circ$ ($0^\circ \sim 13^\circ$) 및 $170^\circ \sim 180^\circ$ ($167^\circ \sim 180^\circ$) 구간에서 THD가 약간 상승하는데 이는 이 구간에서 보조 싸이리스터가 순바이어스 되지 않아 그림 7과 같은 전류 i_m 을 만들 수 없기 때문이다. 표 I에 전류주입용 변압기의 권선비, 보조 싸이리스터의 최적 점호각과 도통순서 및 입력전류의 THD, 출력전압의 리플율(RF)등을 정리하였다. 한편, 전원과의 분리가 필요한 UPS나 SVC등의 응용분야에서는 그림 9과 같이 Zigzag형 결합 변압기를 따로 사용할 필요 없이 기존의 Δ -Y 주변압기의 중성점에 전류를 주입하면 된다.

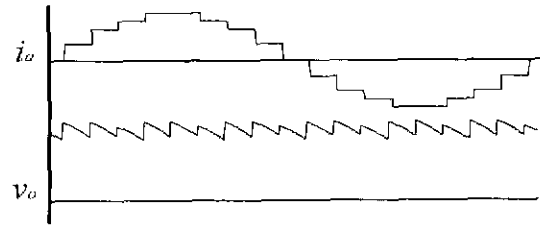
4. 변압기 용량 및 소자 정격

기존의 6-펄스 컨버터 및 제안한 12-펄스, 18-펄스, 24-펄스 컨버터에서의 사용 변압기의 VA용량과 각 싸이리스터 소자의 정격을 표 II에 비교하여 나타낸다. 변압기 용량을 계산할 때는 변압기에 걸리는 전압이 최대가 되는 $\alpha=90^\circ$ 인 경우를 기준으로 하였다. 사용 변압기의 총 VA용량은 12-펄스 컨버터의 경우 68.77%이고, 18-펄스와 24-펄스의 경우는 각각 74.57%와 76.30%로 약간 증가한다. 또한, 커패시터 $C_p(=C_q)$ 의 용량은 다음식을 이용하여 선정한다[4].

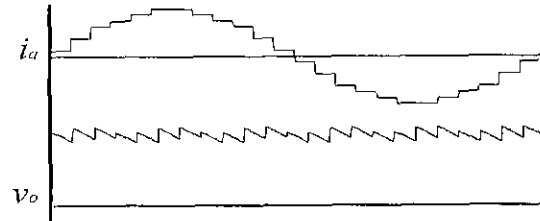
표 I 제안한 P-펄스 컨버터의 제어방법과 성능

Table I Control method and performance for the proposed P-pulse converter

	12-펄스 컨버터	18-펄스 컨버터	24-펄스 컨버터
변압기 TF _m 권선비	$N_s/N_p = 0.929$	$N_s/N_p = 1.233$	$N_s/N_p = 1.383$ $N_s/N_p = 0.475$
최적 점호각	① $\beta_n = \beta$ ② $\beta_q = \beta + 60^\circ$	① $\beta_n = \beta$ ② $\beta_q = \beta + 20^\circ$ ③ $\beta_n = \beta + 60^\circ$ ④ $\beta_q = \beta + 80^\circ$	① $\beta_{n1} = \beta$ ② $\beta_{n2} = \beta + 15^\circ$ ③ $\beta_{n3} = \beta + 30^\circ$ ④ $\beta_{n4} = \beta + 60^\circ$ ⑤ $\beta_{n5} = \beta + 75^\circ$ ⑥ $\beta_{n6} = \beta + 90^\circ$
보조회로 동시순서	$T_n \xrightarrow{①} T_p$	$T_n \xrightarrow{①} T_n \xrightarrow{②} T_p$ $\xrightarrow{③}$	$T_{n1} \xrightarrow{①} T_{n2} \xrightarrow{②} T_{n3} \xrightarrow{③} T_{n4} \xrightarrow{④} T_{n5} \xrightarrow{⑤} T_{n6} \xrightarrow{⑥} T_p$
입력전류 THD	14.19%	9.26%	7.42%
출력전압 RF ($\alpha = 30^\circ$)	883%	6.43%	5.45%



(a) 18-펄스 컨버터



(b) 24-펄스 컨버터

그림 8 P-펄스 컨버터의 입력전류와 출력전압
Fig. 8 Input current and output voltage for P-pulse converter

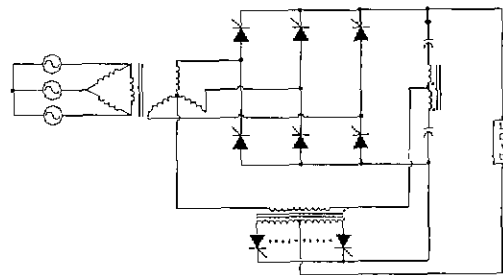
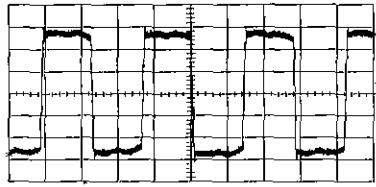


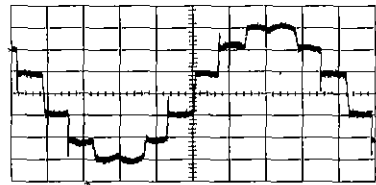
그림 9. 전원 분리형 P-펄스 컨버터
Fig. 9 P-pulse converter with isolation

표. II 변압기의 용량 및 소자의 정격
Table. II Transformer VA and component rating

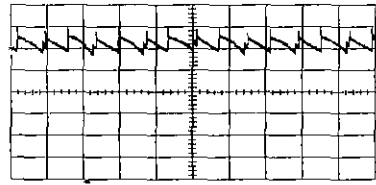
	기존의 6-펄스 시스템	제안된 12-펄스 시스템	제안된 18-펄스 시스템	제안된 24-펄스 시스템
변압기 TF _n	V_{im}/V_o	-	0.2138	0.2138
	I_{ms}/I_o	-	0.3396	0.3365
	VA/V_{old}	-	0.1986	0.2152
변압기 TF _n	V_{im}/V_o	-	0.4409	0.4409
	I_{ms}/I_o	-	0.4640	0.5033
	VA/V_{old}	-	0.2046	0.2219
변압기 TF _m	V_{im}/V_o	-	0.3066	0.3066
	I_{ms}/I_o	-	0.9280	1.0066
	VA/V_{old}	-	0.2845	0.3086
Main 싸이리스터	$V_{p,at}/V_o$	1.414	1.0474	1.0474
	I_{ms}/I_o	-	1.4645	1.6164
보조 싸이리스터	$V_{p,at}/V_o$	-	0.2977	0.3892
	$I_{p,at}/I_o$	-	1	1
	I_{ms}/L	-	0.707	0.577
커패시터 상수 K_p	-	0.0873	0.1522	



(a) 주입전류 i_m



(b) 입력전류 i_a

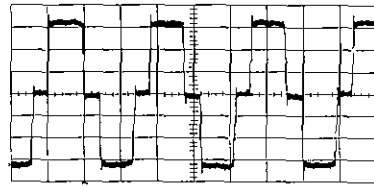


(c) 출력전압 v_o

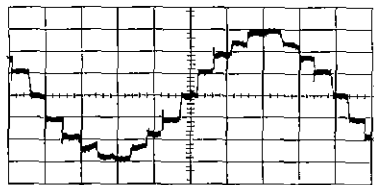
전류:2A/div, 전압:100V/div (Current:2A/div, Voltage:100V/div)

그림 10 실험 파형(12-펄스)

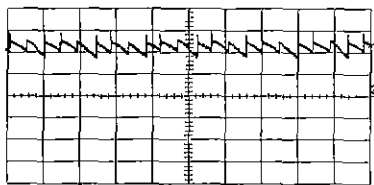
Fig. 10 Experimental waveforms(12-pulse)



(a) 주입전류 i_m



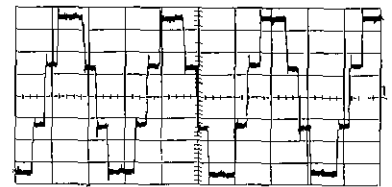
(b) 입력전류 i_a



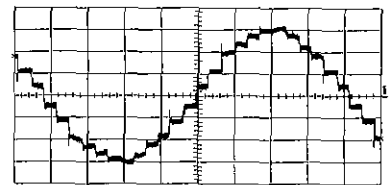
(c) 출력전압 v_o

그림 11 실험 파형(18-펄스)

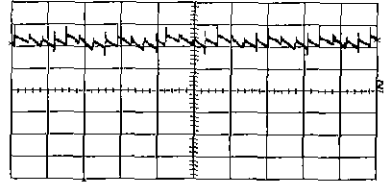
Fig. 11 Experimental waveforms(18-pulse)



(a) 주입전류 i_m



(b) 입력전류 i_a



(c) 출력전압 v_o

그림 12 실험 파형(24-펄스)

Fig. 12 Experimental waveforms(24-pulse)

$$C_p = \frac{K_p I_a}{K_v f V_{LL}} \quad (9)$$

여기서, K_v 는 커패시터 전압의 %리플, f 는 전원주파수, K_p 는 펄스 수에 따른 상수임.

5. 실험결과

제안한 방식의 실험을 위해 220V, 3KVA 컨버터 시스템을 제작하였으며 위상각 $\alpha=30^\circ$ 일때의 12-펄스, 18-펄스, 24-펄스 동작을 각각 그림 10, 그림 11, 그림 12에 나타내었다. 실험 사정상 정확한 이론적인 권수비를 사용하지 못하였으나 실험결과는 모두 이론 파형과 거의 일치하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 6-펄스의 싸이리스터 컨버터에 보 조회로로서 $\frac{P}{6}$ 개의 싸이리스터를 적절히 동작시켜 P-펄스 컨버터를 구현할 수 있는 새로운 방식의 다펄스 싸이리스터 컨버터를 제안하였다. 제안한 방식으로 입력전류와 출력전압 모두 펄스 수 증가에 따른 파형개선 효과를 갖는 것을 스위칭

함수를 사용한 이론적 해석 및 실험으로 입증하였다. 제안한 방식은 DC-전동기 구동, UPS의 입력단 및 SVC에 적용하면 효과적이다. 또한 본 방식은 이론적으로 펄스 수를 무한히 증대시킬 수 있으므로 향후 P-펄스 컨버터로 일반화하는 연구와 그림9의 전원 분리형 P-펄스 컨버터를 SVC에 적용하는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] G.D Breuer and R.L Hauth, "HVDC's increasing popularity", IEEE Potentials, Vol. 72, pp. 18-21, May. 1988.
- [2] S. Miyari, etc. al, "New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and Output of Rectifier with Interphase Transformer", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.IA-22, No. 5, pp. 790-797, Sep/Oct. 1986.
- [3] J. Arrillaga and M. Villablanca, "24-pulse HVDC Conversion", IEE Proceeding, Vol. 138, Part C, No. 1, pp. 57-64, Jan. 1991.
- [4] 오준용, 최세완, 김기용, 김영석, 원충연, "새로운 24-펄스 HVDC 컨버터", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제3호, pp. 269-275, 2000년 6월.