

개방-델타 단권선 변압기를 이용한 새로운 다중 펄스 정류기 시스템

論 文

48B-5-8

New Multi-pulse Rectifier Systems Using An Open-Delta Auto-Connected Transformer

姜 文 弼 · 禹 柄 玉

(Moon-Shik Kang · Byeong-Ok Woo)

Abstract - This paper proposes new 12 and 24-pulse rectifier systems using an open-delta auto-connected transformer. This approach employs two static converters to operate it at higher than utility line frequencies and to provide multi-pulse operation. By operating magnetic components at a higher frequency, higher power density can be achieved. A unique feature of the proposed approach is that the magnetic components for the dc-side are also exposed to a higher frequency and these components too are reduced in size. The switching frequency and its harmonic components are absent in the utility input line current. The VA ratings of the transformer and static converter are 0.236/0.292 [pu] and 0.11/0.18 [pu] in 12 and 24-pulse rectifier system, respectively. A finer grade of steel or alternatives can be deployed to increase performance and reduce size further. Analysis, simulations, design example, and experimental results for a 480[V], 10[kVA] prototype system are presented.

Key Words : Multi-pulse rectifier, Auto-connected transformer, Open-delta, Utility input line current

1. 서 론

오늘날 사용되는 대부분의 전력 변환기는 60Hz 상용 전원을 정류하여 전력 변환이 용이한 직류 전원을 만든 후, 전압(혹은 전류)을 제어하거나 주파수를 가변시켜 부하를 구동한다. 따라서 정류기는 가장 널리 쓰이는 전력 변환기이다. 일반적으로 다이오우드 정류기가 널리 쓰이고 있으나 입력 전류의 고조파 성분이 커 전원의 질을 저하시키는 주된 원인이 된다. 이러한 문제를 없애기 위해 하모닉 필터, PWM 컨버터, 다중 펄스 정류기 등 여러 가지 방식이 연구되고 있다. 하모닉 필터 방식은 부피가 크고 가격이 비쌌뿐만 아니라 시간이 지남에 따라 필터 소자의 특성이 변하므로 설계 및 유지가 어렵다. 최근 PWM 컨버터 방식이 많이 연구되어 엘리베이터와 같이 전원 회생이 필요한 부하에는 일부 사용되고 있으나 제어가 복잡하여 널리 사용되지는 않는다. 또한 직류 링크의 전압이 상승되므로 다른 전력 변환기의 전압 정격을 높여야 하는 단점이 있다.

다중 펄스(12 혹은 24 펄스) 정류기 방식은 변압기와 두 개의 다이오우드 정류기의 조합으로 구성되어 시스템 동작이 간단하고 신뢰성이 높아 대용량 전력 변환기에 널리 사용되고 있다. 단권선 변압기(Auto-connected transformer)를 사용하면 자화소자의 VA정격을 줄일 수 있다[3]. 또한 변압

기에 보다 높은 주파수를 인가하면 그 크기를 줄일 수 있다[1,2,4]. 단권선 변압기에 고주파를 인가해 자화소자를 줄이는 방식의 다중펄스 정류기가 소개되었다[1]. 이때 컨버터를 이용해 변압기를 고주파로 동작시키면 60Hz에서 동작 시킬 때와 비교해 그 크기를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 사용되는 스위치 수가 많다는 단점이 있다.

이 논문은 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 새로운 방식의 다중 펄스 정류기 시스템에 관한 것이다. 삼상 중 두 상에만 컨버터를 사용하므로 고주파의 장점은 살리고 동작에 필요한 컨버터 수는 줄인 새로운 방식이다. 다중 펄스 정류기에서 두 다이오우드 정류기는 영상분 전류를 막아주는 변압기(ZSBT: Zero-Sequence Blocking Transformer)와 전류 배분을 하는 변압기(IPT: Inter-Phase Transformer)를 통해 직류 링크에 연결되어 독립된 동작을 한다. 변압기(ZSBT와 IPT)에 고주파가 인가되면 그 크기를 줄일 수 있다. 개방-델타 단권선 변압기에 연결된 컨버터의 데드타임(Dead time)이 충분히 작다고 가정하면 입력전류의 스위칭 주파수는 서로 상쇄되어 스위칭에 의한 하모닉 성분은 사라진다. 입력 측에 용량이 작은 커패시터를 연결하여 EMI를 줄일 수 있다. 이 논문에서 제안한 개방형 단권선 변압기를 이용한 정류기 시스템의 장점은 다음과 같다

- ▶ 고주파에서 동작하여 자화소자의 크기와 무게를 줄일 수 있다.
- ▶ 12펄스 및 24펄스 정류기 구성 시 컨버터의 VA정격은 출력 정격에 비해 각각 0.11[pu]과 0.18[pu]이다.
- ▶ 12펄스 및 24펄스 정류기 구성 시 변압기의 VA정격은 출력 정격에 비해 각각 0.236[pu]과 0.292[pu]이다.

* 準 會 員 : Texas A&M University 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : LG產電 中央研究所 責任研求員 · 工博

接受日字 : 1999年 1月 22日

最終完了 : 1999年 4月 6日

- ▶ 저주파 성분 전류가 서로 상쇄되어 입력 전류는 거의 정현파에 가깝다.
- ▶ 스위칭 주파수 성분이 상쇄되어 없어지므로 고주파 스위칭을 하여도 EMI 문제가 거의 없다.
- ▶ 컨버터에 트립(Trip)이 발생하여도 6펄스 형태로 운전 가능하므로 시스템의 신뢰성이 높다.

2. 제안된 시스템의 전압 및 전류 분석

2.1 새로운 다중 펄스 정류기 시스템의 전압 분석

제안된 다중 펄스 정류기 시스템에 사용된 개방-델타 단권선 변압기의 구성도가 그림1(a)에 나타나 있다. 그림 1(b)에 나타나 있듯이 각 상에 연결된 컨버터는 양방향 스위치를 사용하여 풀 브리지(Full bridge) 형태로 구성되어 있다. 그림1(c)와 (d)는 개방-델타 단권선 변압기로 구성된 새로운 12펄스 및 24펄스 다이오우드 정류기 시스템의 구성도를 나타낸다. 새로운 정류기 시스템은 두 개의 양방향성 컨버터를 필요로 하며 컨버터는 그림1(c)와 (d)에서 보인 바와 같이 삼상 전원 중 두 상에만 연결된다. 입력 전압 V_{ab} 는 컨버터 스위칭에 의해 변조되고 그 전압 V_{ρ} (Fig. 1 (a) 와 Fig. 2 (a))가 변압기 권선에 가해진다. 전압 V_{ρ} 는 스위칭 주파수에 해당하는 고주파 성분을 가지며 변압기 동작에 의해 V_{clc} , V_{dca} , V_{dca} 및 V_{dal} (Fig. 1 (c), Fig. 1 (d))의 전압이 유기 된다. 같은 방법으로 전압 V_{blb} , V_{lbb} , V_{dla} 및 V_{dal} 는 V_{tu} 에 의해 유기 된다. 따라서 단권선 변압기에는 컨버터 스위칭 주파수에 해당하는 성분이 주로 인가된다. 그림1(c)와 (d)에 있는 정류기 구성도에서 다이오우드 정류기 I(Rectifier I)의 입력 전압은 다음과 같이 된다.

$$V_{aln} = V_{an} + V_{dla} + V_{ald} = V_{an} + V_{ala} \quad (1)$$

$$V_{bln} = V_{bn} + V_{blb} \quad (2)$$

$$V_{cln} = V_{cn} + V_{clc} \quad (3)$$

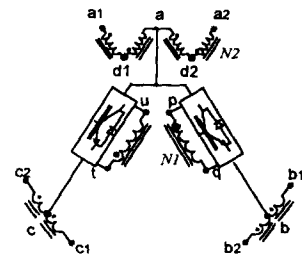
여기서 V_{an} , V_{bn} 과 V_{cn} 은 입력측의 상전압을 나타낸다. 전압 V_{ρ} 와 V_{tu} 는 V_{ab} 와 V_{ca} 가 변조되어 얻어지므로 입력전압과 스위칭 함수를 곱하여 얻어진다.

$$\begin{aligned} V_{\rho} &= V_{ab} \cdot S_{sw} \\ V_{tu} &= V_{ca} \cdot S_{sw} \end{aligned} \quad (4)$$

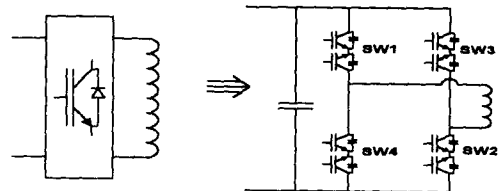
여기서 S_{sw} 는 다음과 같이 푸리함수(Fourier Series)로 표현된다.

$$S_{sw} = \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sin(n\omega_s t) \quad (5)$$

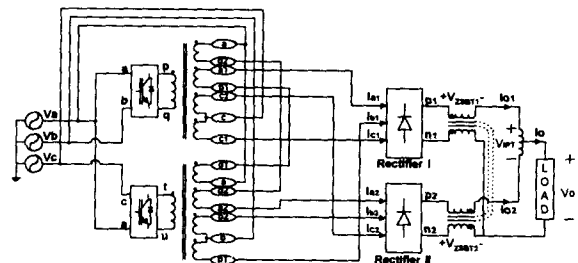
여기서 ω_s 는 스위칭 주파수 이다.



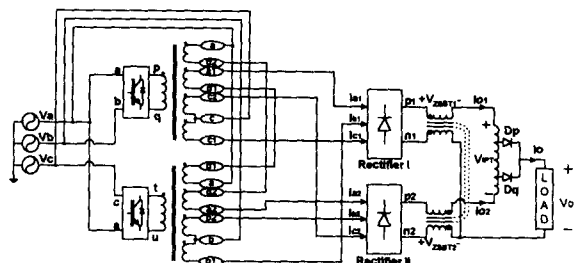
(a) 제안된 개방-델타 단권선 변압기의 구성도



(b) 컨버터의 회로도(풀 브리지)



(c) 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 12펄스 정류기



(d) 개방-델타 24펄스 다이오우드 정류기 시스템

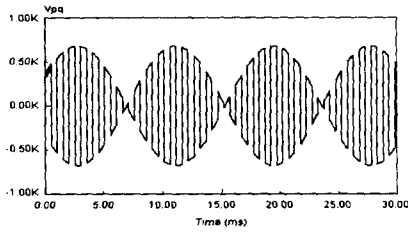
그림 1 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 새로운 다이오우드 정류기 시스템

Fig. 1. Proposed diode rectifier systems employing open-delta auto-connected transformer

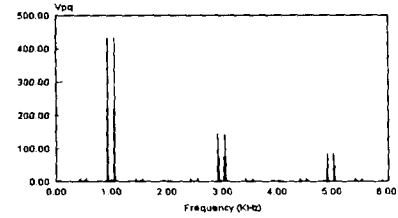
단권선 변압기의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{dla} &= k \cdot V_{tu}, & V_{ald} &= k \cdot V_{\rho} \\ V_{blb} &= -k \cdot V_{tu}, & V_{clc} &= -k \cdot V_{\rho} \end{aligned} \quad (6)$$

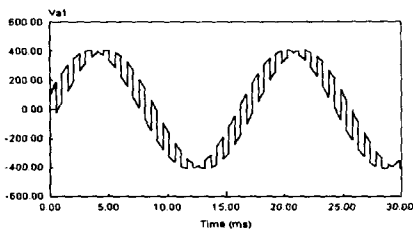
식(4), (5) 및 (6)을 식(1), (2) 및(3)에 대입하여 풀면 정류기 I의 입력 전압은 다음과 같이 표현된다.



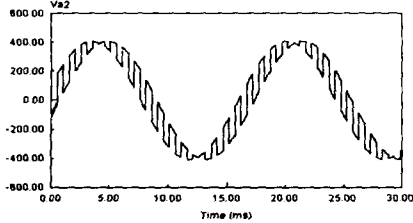
(a) 단권선 변압기 양단의 전압



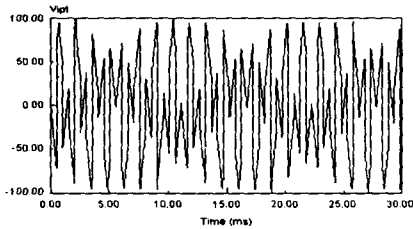
(b) 전압 V_{pa} 의 주파수 스펙트럼



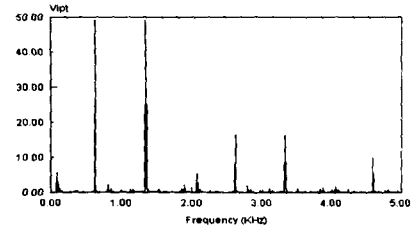
(c) 정류기 입력 전압 V_{d1} .



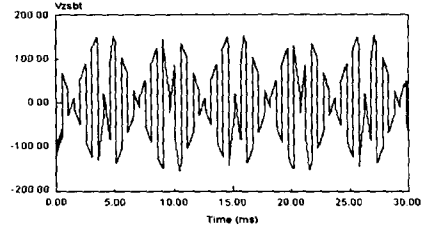
(d) 정류기 입력 전압 V_{d2}



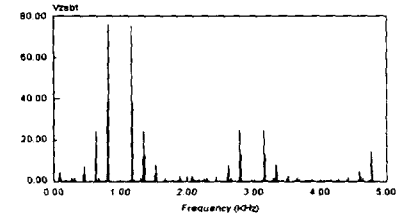
(e) IPT 양단의 전압 V_{IPT}



(f) V_{IPT} 의 주파수 스펙트럼



(h) ZSBT양단 전압 V_{ZSBT}



(i) V_{ZSBT} 의 주파수 스펙트럼

그림 2 제안된 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 다중 (12/24) 펄스 다이오드 정류기 시스템의 시뮬레이션 결과(전압 해석)

Fig. 2. Simulation results of the proposed open-delta auto-connected transformer based 12/24-pulse diode rectifier system(Voltage analysis)

$$V_{a1n} = V_{an} + k \cdot V_{bc} \cdot S_{sw} \quad (7)$$

$$V_{b1n} = V_{bn} + k \cdot V_{ca} \cdot S_{sw} \quad (8)$$

$$V_{c1n} = V_{cn} + k \cdot V_{ab} \cdot S_{sw} \quad (9)$$

같은 방법으로 정류기II의 입력 전압을 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$V_{a2n} = V_{an} - k \cdot V_{bc} \cdot S_{sw} \quad (10)$$

$$V_{b2n} = V_{bn} - k \cdot V_{ca} \cdot S_{sw} \quad (11)$$

$$V_{c2n} = V_{cn} - k \cdot V_{ab} \cdot S_{sw} \quad (12)$$

식(7)-(9)와 식(10)-(12)으로부터 정류기I과 정류기II의 전압은 상전압과 변조된 고주파 전압의 합으로 각각 이루어짐을 알 수 있다. 또 두 정류기 입력 전압의 고주파 성분 전압은 위상차가 있다(그림2 (c), (d)). 따라서 정류기I과 정류기II의 출력 전압 중 기본파(360Hz 성분)는 동상이고 고주파 성분에만 위상차이가 있다. 따라서 직류 링크에 있는 ZSBT나 IPT(TIPT)에는 고주파가 인가된다.

2.2 새로운 12펄스 정류기 시스템의 전류 해석

스위칭 함수 S_{sw} 는 그림3에 보인 바와 같이 순서값의 크기가 1이라 가정하고 이를 푸리 함수로 전개한 것이 식(5)에 나타나 있다. 이때 $S_{sw}=1$ 이면 스위치 SW1과 SW2가

닫히고, $S_{sw}=-1$ 이면 스위치 SW3과 SW4가 닫힌다(Fig. 1 (b)). 따라서 $S_{sw}=1$ 일때 정류기I의 전압 및 전류는 -15° , $S_{sw}=-1$ 일 때는 $+15^\circ$ 의 위상차가 있다. 그림3에서 정류기 I의 입력 전류 I_{a1} 를 정류기 출력 전류 I_{o1} 과 스위칭 함수 (S_{ax} , S_{ay} 및 S_{sw})로 나타내었다. 컨버터가 정상적으로 동작하면 스위치가 $S_{sw}=-1$ 과 $S_{sw}=1$ 로 번갈아 상태가 바뀐다. $S_{sw}=1$ 일때 정류기I의 a상 입력 전류를 I_{ax} 라하고 $S_{sw}=-1$ 일때 전류를 I_{ay} 라 하면, 정류기I의 입력전류는 두 전류의 합으로 나타낼 수 있다. 그림3에 나타낸 스위칭 함수 정의로부터 다음 식이 성립한다.

$$I_{ax} = 0.5I_{o1}(1 + S_{sw})S_{ax} \quad (13)$$

$$I_{by} = 0.5I_{o1}(1 - S_{sw})S_{ay} \quad (14)$$

$$I_{a1} = I_{ax} + I_{by} = 0.5I_{o1}[(1 + S_{sw})S_{ax} + (1 - S_{sw})S_{ay}] \quad (15)$$

여기서,

$$S_{ax} = \sum_{n=odd} \frac{4}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right)\right) \quad (16)$$

$$S_{ay} = \sum_{n=odd} \frac{4}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin\left(n\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right)\right) \quad (17)$$

이다. 비슷한 방법으로 정류기I의 입력전류 I_{b1} 과 I_{c1} 은 아래와 같다.

$$I_{b1} = 0.5I_{o1}[(1 + S_{sw})S_{bx} + (1 - S_{sw})S_{by}] \quad (18)$$

$$I_{c1} = 0.5I_{o1}[(1 + S_{sw})S_{cx} + (1 - S_{sw})S_{cy}] \quad (19)$$

여기서 $S_{bx} = S_{ax}(t-120)$, $S_{cx} = S_{ax}(t+120)$, $S_{by} = S_{ay}(t-120)$ 이고 $S_{cy} = S_{ay}(t+120)$ 이다.

정류기II의 입력전류(I_{a2} , I_{b2} 및 I_{c2})는 그림3과 그림 4(b)에서 보듯이 다음의 스위칭 함수로 표현된다.

$$I_{a2} = 0.5I_{o2}[(1 - S_{sw})S_{ax} + (1 + S_{sw})S_{ay}] \quad (20)$$

$$I_{b2} = 0.5I_{o2}[(1 - S_{sw})S_{bx} + (1 + S_{sw})S_{by}] \quad (21)$$

$$I_{c2} = 0.5I_{o2}[(1 - S_{sw})S_{cx} + (1 + S_{sw})S_{cy}] \quad (22)$$

컨버터의 스위칭 동작으로 I_{pq} 와 I_{tu} 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{pq} = k(I_{a1} - I_{a2} - I_{c1} + I_{c2}) \quad (23)$$

$$I_{tu} = k(I_{a1} - I_{a2} - I_{b1} + I_{b2}) \quad (24)$$

여기서 k는 단권선 변압기의 권선비이다(그림1(a)).

$$k = \frac{N_2}{N_1} \quad (25)$$

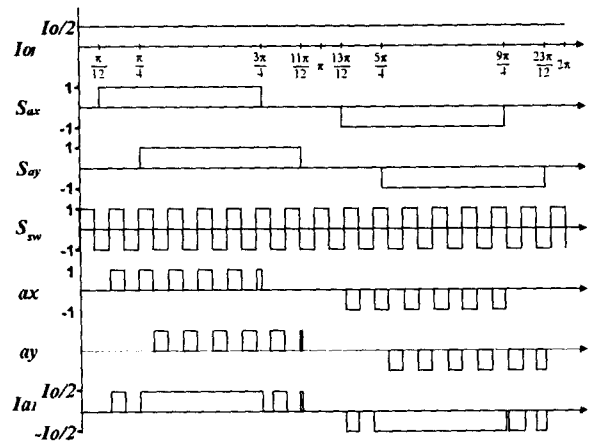


그림 3 정류기 입력측의 전류 I_a

Fig. 3. The components of rectifier input current I_a

부하 전류의 리플 성분을 무시하면 I_{o1} 과 I_{o2} 는 모두 $I_o/2$ 이고 I_a 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + k[(I_{b1} - I_{b2}) - (I_{c1} - I_{c2})] S_{sw} = \frac{I_o}{2}[S_{ax} + S_{ay} + k(S_{bx} - S_{by} - S_{cx} + S_{cy})] \quad (26)$$

식(26)은 정류기 시스템 입력 전류 I_a 가 스위칭 함수 S_{sw} 와 무관함을 해석적으로 보여 준다. 스위칭 함수 S_{ax} , S_{bx} , S_{cx} , S_{ay} , S_{by} 및 S_{cy} 는 60Hz에서 동작하는 단권선 변압기를 이용한 기존의 12펄스 정류기와 동일하다. 따라서 식(26)의 전류식은 60Hz로 동작하는 기존의 12펄스 정류기 입력 전류의 식과 동일하다[3]. 그림4의 시뮬레이션 파형에서도 보였듯이 정류기I과 II의 입력전류(그림4(a)와 (b))에는 스위칭 주파수 성분이 있다. 그러나 개방-델타 단권선 변압기 입력 측에서는 스위칭 주파수 성분 전류가 서로 상쇄되어 전원측 전류에는 스위칭 주파수 성분이 없음을 그림4(c)에서 볼 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 그림4(c)의 파형은 60Hz에서 동작하는 기존의 12펄스 정류기 시스템의 입력 전류 파형과 동일하다. 그림4(d)는 입력 전류 파형의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 주파수 스펙트럼 결과는 5차, 7차(350Hz, 420Hz) 및 스위칭 주파수 성분은 없고 11차, 13차, 23차 및 25차(660Hz, 780Hz, 1.38kHz 및 1.5kHz) 등의 성분이 존재함을 보여준다. 이는 60Hz로 동작하는 기존의 12펄스 다이오우드 정류기 시스템의 전류 스펙트럼 분석과 일치한다.

일반적으로 다중 펄스 정류기 시스템에서 변압기 및 리액터 등의 자화소자가 시스템의 크기를 좌우한다. 제안된 새로운 방식의 12펄스 정류기 시스템은 고주파로 스위칭하여 자화소자의 크기를 줄이면서도 입력 측에는 스위칭 주파수 성분 전류가 없는 장점이 있다.

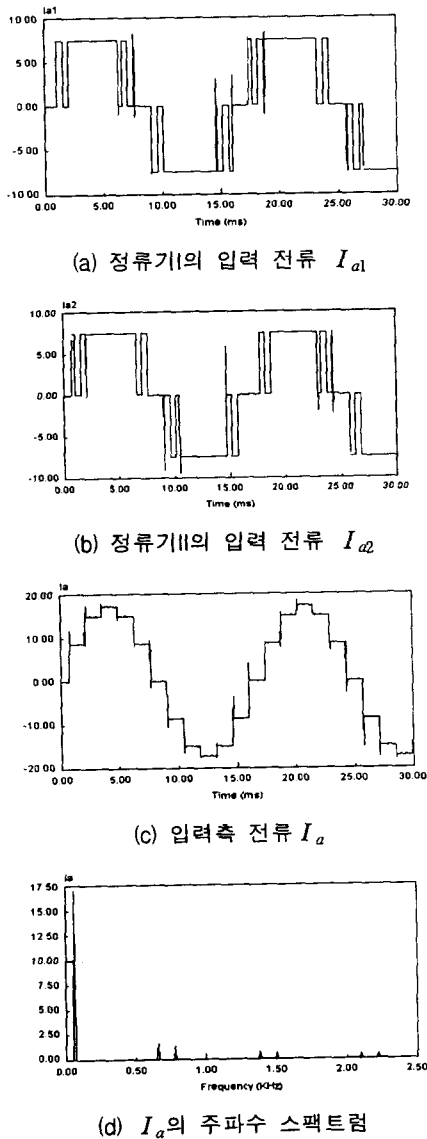


그림 4 제안된 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 정류기 시스템의 시뮬레이션 결과(전류해석)
 Fig. 4. Simulation results of the proposed open - delta auto-connected transformer based 12-pulse diode rectifier system (Current analysis)

2.3 새로운 24펄스 정류기 시스템의 전류해석

그림1(d)는 새로운 방식의 24펄스 정류기 시스템의 구성도를 나타낸다. 그림1(c)에 보인 12펄스 정류기 시스템과 비교하면 직류 링크의 연결이 다른 것을 알 수 있다. 60Hz로 동작하는 기존의 24펄스 다이오우드 정류기 시스템[2]에서와 같이, 새로운 방식에서도 영상분을 전류를 차단해 주는 변압기(ZSBT: Zero-Sequence Blocking Transformer)와 전류의 분할을 위한 변압기(TIPT: Tapped Inter - Phase Transformer)가 필요하다. 여기에 두 개의 다이오우드를 추가하여 직류 링크를 연결하였다. ZSBT는 한 개의 철심에

두 권선을 감도록 설계되었다.

그림5(a)와 (b)는 TIPT의 구조 및 동작원리를 설명하고 있다. TIPT양단 전압 V_{IPT} 는 극성이 변하므로 다이오우드 D_p 와 D_q 는 번갈아 가면서 도통하게 된다. TIPT의 전압극성과 연계되어 D_p 와 D_q 가 도통되고 정류기 전류 I_{o1} 과 I_{o2} 는 그에 따라 변조된다[3]. 따라서 부하전류는 TIPT 양단 전압 극성의 함수이다. TIPT의 권선수를 N_0 라하고 권선의 중간점과 다이오우드 D_p (또는 다이오우드 D_q)가 연결되는 점 사이의 권선수를 N_i 라 하자. 또한 권선비 k 를 다음과 같이 정의하자.

$$k = N_i / N_0 \tag{27}$$

전압 $V_{IPT} > 0$ 이면 D_p 가 도통하는데 이때 TIPT의 MMF관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$I_{o1} \left(\frac{N_0}{2} - N_i \right) - I_{o2} \left(\frac{N_0}{2} + N_i \right) = 0 \tag{28}$$

또한 부하전류는 두 정류기 출력 전류의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_o = I_{o1} + I_{o2} \tag{29}$$

식(27), (28) 및 (29)를 정리하여 정류기출력 전류를 나타내면 다음과 같이 된다.

$$I_{o1} = (0.5 + k)I_o \tag{30}$$

$$I_{o2} = (0.5 - k)I_o \tag{31}$$

전압 $V_{IPT} < 0$ 인 경우에는 다이오우드 D_q 가 도통하게 된다. 같은 방법으로 식을 정리하면 다음과 같다.

$$I_{o1} = (0.5 - k)I_o \tag{32}$$

$$I_{o2} = (0.5 + k)I_o \tag{33}$$

24펄스 정류기 시스템의 전류 해석을 위해 아래와 같은 스위칭 함수를 정의하였다.

$$S_{ipt} = \sum_{n=odd} -\frac{4}{h\pi} \sin(6h\omega t) \tag{34}$$

여기서 S_{ipt} 는 정류기가 60Hz로 동작할 때 TIPT의 전압극성을 나타낸다. 전압 V_{IPT} 는 스위칭 주파수(그림2(a))에 의해 변조되므로 V_{IPT} 와 S_{ipt} 의 극성은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{npt} = S_{ipt} \cdot S_{sw} \tag{35}$$

식(35)를 이용하여 전압의 극성에 따른 전류식(30)-(33)을 정리하면 정류기 출력 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{o1} = 0.5I_o [(0.5 + k1)(1 + S_{tip}) + (0.5 - k1)(1 - S_{tip})] \quad (36)$$

$$I_{o2} = 0.5I_o [(0.5 - k1)(1 + S_{tip}) + (0.5 + k1)(1 - S_{tip})] \quad (37)$$

식(36)과 (37)를 식(15)-(24)에 대입하여 풀면 입력 전류의 식이 다음과 같이 구해진다.

$$I_a = 0.5I_o [S_{ax} + S_{ay} + k(S_{bx} - S_{by} - S_{cx} + S_{cy}) + k1 \cdot I_o \cdot S_{ipt} [S_{ax} - S_{ay} + k(S_{bx} + S_{by} - S_{cx} - S_{cy})] \quad (38)$$

식(38)에서 나타나 있듯이 입력 전류에는 S_{sw} 나 S_{tip} 의 스위칭 주파수 성분이 없으며 60Hz로 동작하는 기존의 24펄스 정류기와 같은 전류를 얻을 수 있다[3]. 제안된 새로운 방식의 24펄스 정류기 시스템이 자화소자를 줄이기 위해 고주파로 스위칭을 하지만 입력 측에는 스위칭 주파수 성분 전류가 없다.

3. 설계 예

새로운 방식의 12펄스 및 24펄스 다이오드 정류기 시스템과 60Hz로 동작하는 단권선 변압기를 이용한 기존 방식의 VA정격[3]을 비교한 결과가 표1에 나타나 있다. 여기서 P_o 는 정격 전력 즉 정격전압과 정격전류의 곱을 나타낸다.

새로운 방식 정류기 시스템의 자화소자 VA정격은 기존 60Hz 정류기 시스템에 비해 조금 높다. 그러나 자화소자가

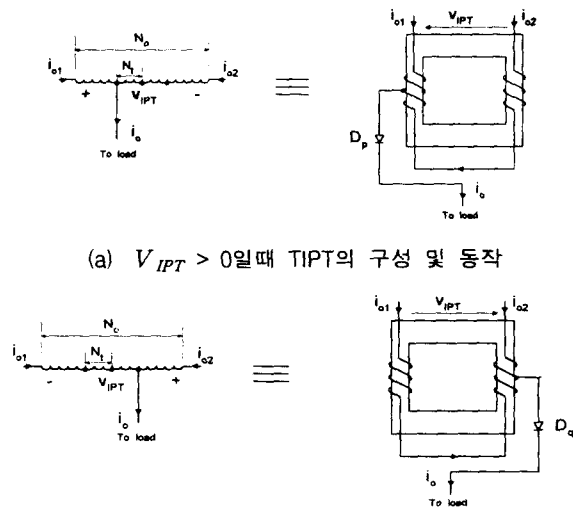
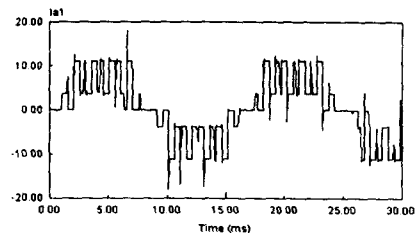
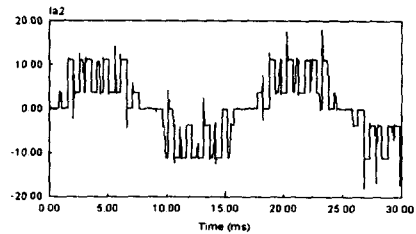


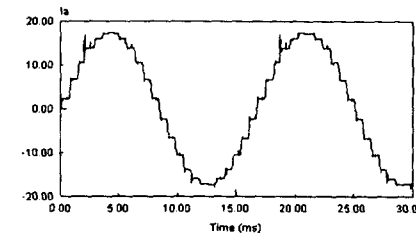
Figure 5. Configuration and operation of TIPT.



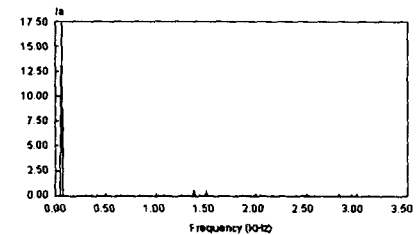
(a) 정류기 I의 입력 전류 I_{o1}



(b) 정류기II의 입력 전류 I_{o2}



(c) 전원측 입력 전류 I_a



(d) 전류 I_a 의 주파수 스펙트럼

그림 6 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 24펄스 정류기 시스템의 시뮬레이션 결과(전류 해석)

Fig. 6. Simulation results of the proposed OD-ACET based 24-pulse diode rectifier system (Current Analysis)

높은 주파수에서 동작하므로 크기와 무게가 작아진다. 그림 1에 나타난 정류기 시스템의 480V, 10kVA 모델에 대한 12펄스 및 24펄스 정류기 시스템의 설계 예가 표2에 나타나 있다. 비교를 위해 같은 용량의 60Hz에 동작하는 정류기 설계 데이터도 같이 나타내었다. 동작 주파수와 자화 밀도가 높아질수록 철손과 동손은 증가하였다[5]. 자화소자가 높은 주파수에서 동작하면 자화 밀도가 낮아지므로 자화소자의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 새로운 시스템의 자화 소자는 60Hz에서 동작하는 기존의 시스템과 비교하면 그 무게를 32% 가량 줄였다. 또한 IPT와 ZSBT는 각각 63%와 71%정도 줄였다. 사용되는 스위치 수를 비교하면 새로운 방식은 델타형 단권선 변압기를 이용한 정류기 시스템과 비교하면 24개에서 18개로 줄어들었다[1].

표 1. 12/24펄스 정류기 시스템의 자화 소자 VA 정격

Table 1. VA ratings of the magnetic components for 12 and 24-pulse rectifier system.

구분	12 펄스 정류기 (고주파 동작)	24펄스 정류기 (고주파 동작)
변압기	0.236 Po	0.292 Po
ZSBT	0.066 Po	0.075 Po
IPT	0.020 Po	0.022 Po
컨버터	0.111 Po	0.181 Po
구분	12 펄스 정류기 (60Hz 동작)	24 펄스 정류기 (60Hz 동작)
변압기	0.183 Po	0.234 Po
ZSBT	0.066 Po	0.075 Po
IPT	0.020 Po	0.022 Po
컨버터	없음	없음

표 2. 자화 소자의 설계 값 (480V 10kVA)

Table 2. Parameters for magnetic components (480V 10kVA)

구분	시스템	fo [Hz] 동작 주파수	Bm [kG] 자화 밀도	Pc [W] 철손	Pw [W] 동손	W [kg] 무게	%W [%] 무게
다중 변압기	기존 방식*	60	16.4	23.7	96.2	15.2	100
	개방- 델타**	990	4.9	32.1	31.6	4.8	31.7
IPT	기존 방식*	360	6.8	11.2	11.5	2.1	100
	개방- 델타**	990 ±360	2.1	2.4	19.4	1.3	63.0
ZSBT	기존 방식*	180	14.6	16.8	15.6	3.0	100
	개방- 델타**	990 ±180	3.4	12.8	22.6	2.1	71.2

* 60Hz로 동작(단권선), ** 고주파로 동작(개방-델타)

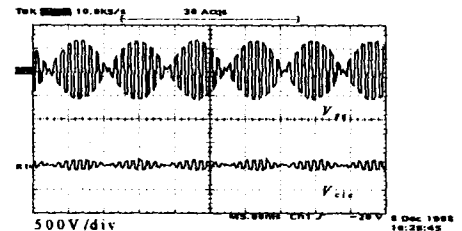
4. 실험 결과

새로운 정류기 시스템의 480V, 10kVA 시험 장치(그림1)를 설계, 제작하여 실험하였다. 표2는 시험장치의 설계 사양이다. 그림7은 제안된 시스템의 각 부분 전압 파형이다. 그림7(a)는 단권선 변압기의 전압파형 V_{pq} 와 V_{dc} 이다(그림 1(a)). 이 전압 파형은 단권선 변압기가 고주파에서 동작함을 보여준다. 그림7(b)는 정류기 입력 전압 V_{a1n} 와 V_{a2n} 이다.

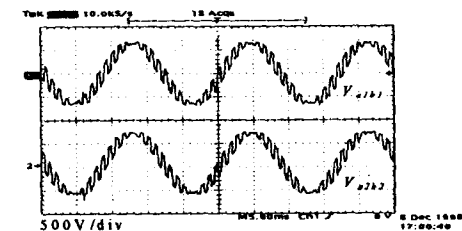
그림8은 제안된 12펄스 정류기 시스템의 각 부분 전류 파형이다. 그림8(a)는 정류기 입력 전류 I_{a1} 과 I_{a2} 이다. 그림 8(b)와 (c)는 전원측 전류 I_a 와 주파수 스펙트럼을 보여준다. 그림8에 나타난 실험 결과에서 알 수 있듯이 제안된 정류기 시스템의 특성은 기본적으로 기존의 다중펄스 정류기 시스템과 동일하다. 그림9는 제안된 24펄스 정류기 시스템의 실험 결과를 나타낸다. 그림9(a), (b) 및 (c)는 각각 정류기 입력 전류 I_{a1} , 전원측 전류 I_{a2} , I_a 및 주파수 스펙트럼이다. 실험 결과에서 제안된 24펄스 정류기 시스템의 입력 전

류는 거의 정현파임을 보여준다. 그림8(c)와 그림9(c)에 나타난 전류의 크기는 실효값이다.

실험 및 시뮬레이션에서 50 Ω 저항과 0.5mH 리액터를 직렬로 연결하여 부하로 사용하였다. 이때 부하에는 리플이 거의 없는 직류전류가 흘렀다. 이론적으로 입력전류의 주파수 스펙트럼은 부하전류의 크기와 무관하다. 비교적 부하전류가 클 때는 전류변동에 따라 입력전류의 스펙트럼 결과가 거의 같게 나타났다. 그러나 작은 부하 전류에서는 고조파 성분이 상대적으로 더 크게 나타났다. 이는 정류기 시스템에 사용된 소자들의 오차에 의해 최소한 일정 이상의 고조파가 발생하므로 부하전류가 적어지면 입력전류의 기본파에 비해 상대적으로 고조파가 증가하기 때문이다.



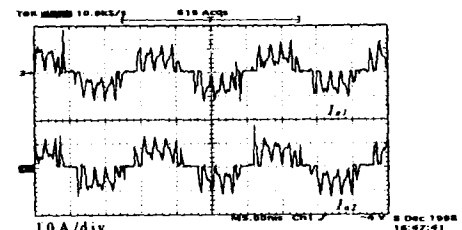
(a) 단권선 양단의 전압, V_{pq} , V_{dc}



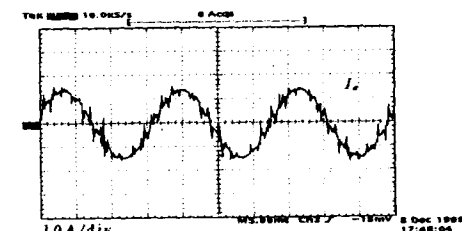
(b) 정류기 입력 전압, V_{a1n} , V_{a2n}

그림 7 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 12/24펄스 정류기 시스템의 실험 결과(전압 파형)

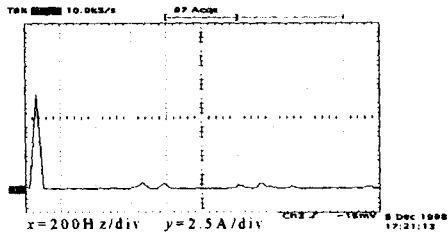
Fig. 7. Experimental results of open-delta auto-connected transformer based 12/24 pulse rectifier system voltage.



(a) 정류기 입력 전류, I_{a1} , I_{a2}



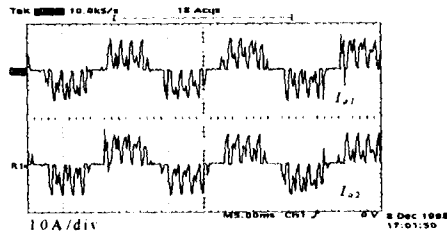
(b) 전원측 입력 전류, I_a



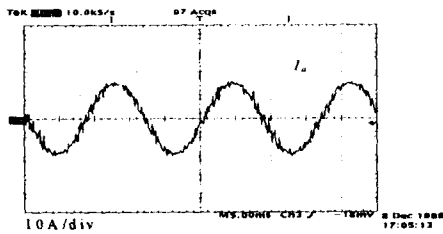
(c) 전원측 입력 전류 I_d 의 FFT 결과

그림 8 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 12펄스 정류기 시스템의 실험 결과(전류 파형)

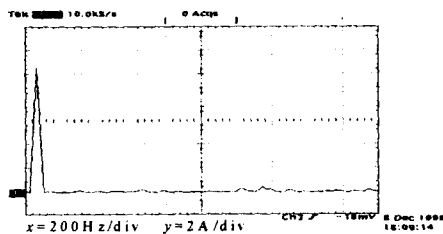
Fig. 8. Experimental results of open-delta auto-connected transformer based 12-pulse rectifier system (Currents)



(a) 정류기 입력 전류, I_{d1} , I_{d2}



(b) 전원측 입력 전류, I_d



(c) 전원측 입력 전류 I_d 의 FFT 결과

그림 9 개방-델타 단권선 변압기를 이용한 24펄스 정류기 시스템의 실험 결과(전류 파형)

Fig. 9. Experimental results of open-delta auto-connected transformer based 24-pulse rectifier system currents

5. 결론

이 논문에서는 개방-델타 단권선 변압기와 컨버터를 적용한 새로운 다중펄스 정류기 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 컨버터를 이용해 변압기에 고주파 전압을 인가해서 자화소자의 크기와 무게를 줄였다. 컨버터를 통해 스위칭을 하지만 스위칭 주파수 성분의 전류는 서로 상쇄되어 없으므로 입력 전류가 거의 정현파에 가깝다. 또한 개방-

델타 단권선 변압기를 적용하여 삼상 중 두 상에만 컨버터를 사용하므로 시스템 구성에 필요한 스위치 수는 줄이고 고주파 운전의 우수한 특성은 유지한다.

본문에서는 제안된 정류기 방식의 동작을 설명하고 전압과 전류 파형을 중심으로 시스템을 분석하였다. 또한 480V, 10kVA 시험 장치를 설계, 제작하여 제안된 정류기 시스템의 정상 동작을 실험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. Kang, B. O. Woo, P. Enjeti, and I. Pitel, "Auto-connected electronic transformer (ACET) based multi-pulse rectifiers for utility interface of power electronic systems", IEEE IAS 98, 1998.
- [2] M. Kang, P. Enjeti, and I. Pitel, "Analysis and design of electronic transformer for electric power distribution system", IEEE IAS 97, 1997.
- [3] S. Choi, B. Lee, and P. Enjeti, "New 24-pulse diode rectifier systems for utility interface of high-power AC motor drives", IEEE Trans. Ind. App., vol 33, pp. 531-541, March 1997
- [4] W. McMurray, "Power converter circuits having a high-frequency link", U.S. Patent 3,517,300, 1970.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons Inc., 1995.

저 자 소 개



강 문 식 (姜 文 植)

1967년 생. 1992년 중앙대 전기공학과 졸업, 1994년 중앙대 전기공학과 졸업(석사), 1996년 University of Texas 전기공학과 졸업(석사), 1996년-현재 Texas A&M University 전기공학과 박사과정.

Tel : +1-409-845-1171

E-mail : mkang@ieee.org



우 병 옥 (禹 柄 玉)

1962년 9월 29일 생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업, 1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사), 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학), 1997년-1998년 Texas A&M University 전기공학과 방문연구원, 1992년-현재 LG산전 중앙 연구소 책임연구원.

Tel : (0343) 450-7565

E-mail : bowoo@mail.lgis.co.kr