

# 다중 3상 PWM 정류기의 해석

\*신 대 호\*, 윤 경섭\*, 조 정구\*\*, 권 우현\*  
 \* 경북대학교 전자공학과, \*\* 한국 전기 연구소

## The Analysis of The Three Phase Rectifier

\*Shin D.H\*, Youn K.S.\*, Cho J.G.\*\* , Kwon.W.H.\*

\* Dep. of Electronic Eng. Kyungpook National University, \*\* KERI

**Abstracts:** In this paper the multiple three phase rectifiers for the power factor correction are proposed, analyzed and designed. The multiple three phase rectifiers draw sinusoidal ac currents from the ac voltage sources with nearly unity input power factor and operate with PWM making the control circuit simple and system cost low. Outstandingly it reduces the rated power capacity of devices and the input filter size by reducing input current ripples. Moreover design rules can be obtained from input and output current equations. With the proposed rules, input power factor and output power capacity are determined approximately. Finally these design rules are verified with computer simulations.

**Keywords:** Multiple three phase rectifiers, Power factor, Duty ratio, Switching time.

### I. 서론

3상 교류 대 직류 변환기는 단순한 다이오드 정류기나 위상제이 정류기를 이용해서 간단히 이루어질 수 있으나 역률이 나쁘므로 이를 개선하기 위하여 많은 연구가 활발히 진행되고있다. 6-스위칭 전파정류기는 우수한 성능을 나타내기는 하지만 제어방법이 복잡하고, 스위치가 6개 필요하므로 가격이 비싸다는 단점이 있다. 최근에는 적은 개수의 스위칭으로도 역률을 개선하려는 동향이 일고되었다<sup>[1]</sup>. A.R.Prsad등이 제안된 정류기는 6개의 다이오드와 1개의 스위칭으로 구성되는 승압형 정류기로서 역률개선의 기능을 가진다. 그러나 이 구조는 PWM제이되는 불연속전류가 입력에 흐르므로 입력전류의 고조파성분이 커서 비교적 큰 입력필터를 필요로한다. 한편 Slobodan Gataric등은<sup>[2][3]</sup> 3상 PWM정류기에 대해 입력전류가 불연속을 만족시키는 제어조건을 구하였다.

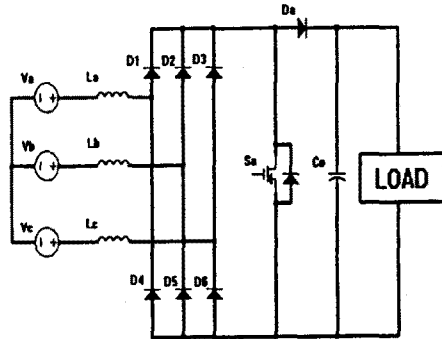
본 논문에서 제안하는 다중 3상 PWM정류기는 3상 PWM정류기를 입력단과 출력단을 병렬연결 시킴으로써 개별 PWM정류기가 갖는 불연속 입력전류를 연속전류가 되게하기 때문에 고조파성분을 최소화시키고 또한 기본파성분이 커지므로 비교적 작은 입력필터로도 역률을 개선시킬 수 있다. 또 PWM스위칭 주파수를 낮게 할 수 있으므로 스위칭손실을 줄일 수 있고, 각 정류기의 소자들의 정격을 줄여 사용할 수 있는 장점이 있다. 이를 실현하기 위하여 입력전류방정식으로부터 입력전류가 불연속 또는 연속이 되는 경계조건과 승압률에 따른 역률의 관계를 구했으며, 이를 이용하여 최적의 역률조건에서 회로소자의 값을 정할 수 있었다.

### II. 본론

#### 1. 3상 PWM정류기

불연속 전류제이를 하는 3상 컨버터는 <그림1>과 같다. 이 회로 구성은 스위치가 인장주파수도 동작하비 동작시간은 부하의 상태에 따라 바뀐다. 스위치가 온 일때 모든 3상 입력 교류전류는 3개의 리액터와 브릿지 다이오드와 스위치를 통하여 단락된다. 이 때 모든

입력전류는 동시에 각 상의 순시값에 비례하며 상승한다. 오프 때는 인덕터에 저장된 에너지가 출력으로 전달되며 전류가 감소하게 되어 0전류가 흐르게 되어 전류 불연속구간을 만들게 된다. 결과적으로 평균모양은 정현파가 되고 전압에 대한 전류의 위상은 같아서 고조파성분을 최소화시키는 것이 역률을 개선할 수 있는 방법이 된다.



<그림1> 3상 불연속전류모드 승압형 정류기

#### 2. 3상 PWM정류기의 해석

시스템을 분석하기 이전에 다음의 몇가지 가정을 전제하기로 한다.

1. 입력 전압이 완전히 정현파이고 서로 120° 위상차를 가진다.
2. 출력전압의 크기는 일정하다.
3. 스위칭 주파수가 입력전압의 주파수보다 아주 커서 스위칭 주기 동안에 입력전압은 일정하다.
4. 스위칭에서의 온-오프 손실은 무시한다.
5. 3상의 승압용 인덕터의 크기는 동일하다.

##### 2-1. 동작모드

부하의 조건에 따라 PWM으로 스위치를 제어하기 때문에 입력전류는 불연속이 되며 전류의 상태에 따라 크게 네가지로 나뉘어진다. 입력이 3상이므로  $0 < \pi/6 < \theta < \pi/2$ ,  $V_c < V_b < V_a$ 에 대하여 해석하여 전체시간으로 확장하기로 한다. 여기서

$$V_a = V \cos(\theta), V_b = V \cos(\theta - 2\pi/3), V_c = V \cos(\theta - 4\pi/3) \quad (1)$$

이다.

(모드1)  $t_0 < t < t_1$

스위치가 도통되는 구간으로써 그 인덕터전류는 전압의 크기에 비례하여 선형적으로 증가한다. 그래서  $t_0$ 에서 전류는 피크치를 이룬다.

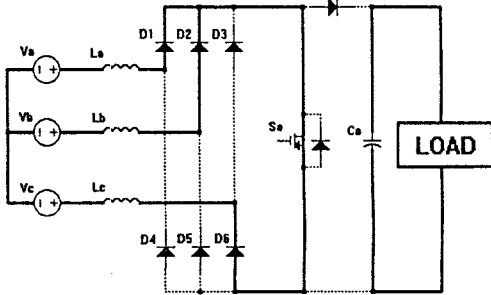
$$t_1 - t_0 = DTs \quad (2)$$

$$I_0(t_1) = \frac{V_a}{L} t_1 \quad (3)$$

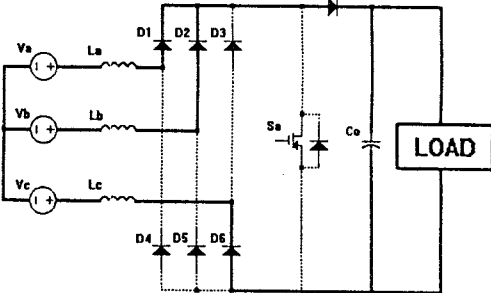
$$I_b(t_1) = \frac{V_b}{L} t_1 \quad (4)$$

$$I_c(t_1) = \frac{V_c}{L} t_1 \quad (5)$$

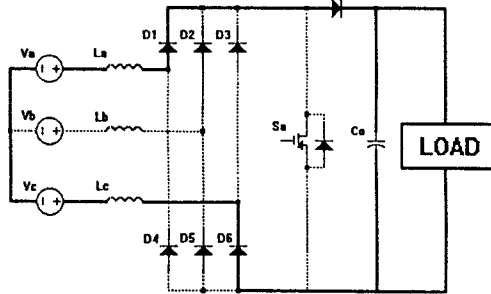
식(2)의  $D$ 는 PWM스위치의 도통율이고,  $T_s$ 는 스위칭의 주기를 나타낸다.



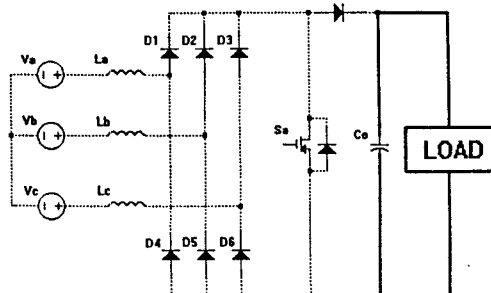
(a) 모드 1



(b) 모드 2



(c) 모드 3



(d) 모드 4

<그림2> 3상 PWM정류기의 동작모드

(모드2)  $t_1 < t < t_2$

스위치가 오프되어 인덕터에 저장된 에너지가 출력으로 전달되는 구간으로  $t_2$ 에서 전압의 크기가 가장 작은 상( $V_b$ )의 전류 ( $I_b$ )가 먼저 0이 된다.

$$t_2 - t_1 = \frac{-3V_b}{V_o + 3V_b} t_1 \quad (6)$$

$$I_a(t_2) = \frac{1}{L} \frac{V_o(V_b - V_o)}{V_o + 3V_b} t_1 \quad (7)$$

$$I_b(t_2) = 0 \quad (8)$$

$$I_c(t_2) = \frac{1}{L} \frac{V_o(V_c - V_o)}{V_o + 3V_b} t_1 \quad (9)$$

(모드3)  $t_2 < t < t_3$

이 구간에서는 두 상의 전류만이 출력으로 공급되는 구간으로써  $t_3$ 에서 모든 전류는 0이 된다.

$$t_3 - t_2 = \frac{-2V_o(V_b - V_o)}{(V_o + 3V_b)(V_o - V_o - V_o)} t_1 \quad (10)$$

$$I_a(t_3) = 0, \quad I_b(t_3) = 0, \quad I_c(t_3) = 0 \quad (11)$$

(모드4)  $t_3 < t < t_0 + T_s$

이 구간은 불연속 전류구간으로써 다음 PWM이 시작할 때까지 전류를 0으로 유지한다.

## 2-2. 부하전류와 입력전류의 계산

하나의 정류기에 대한 출력 평균전류는  $t_1$ 에서  $t_3$ 까지의 입력전류를 한주기에 대해서 평균하면 된다.

$$I_a T_s = \frac{1}{2} (I_a(t_1) + I_a(t_2))(t_2 - t_1) + \frac{1}{2} I_a(t_2)(t_3 - t_2) \quad (12)$$

$\theta = 0$ 일 때와  $\theta = \pi/6$ 일 때의 평균으로써 이 식을 근사화하면

$$I_a = \frac{V I_s^2 T_s}{4L} \left( \frac{3}{2\sqrt{3}M-3} + \frac{3}{2\sqrt{3}M-2\sqrt{3}} \right) \quad (13)$$

이 된다. 이 식은 3상 PWM정류기를 설계하는데 있어서 기준이 된다.

한편 입력필터를 통과한 입력전류의 평균치는 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$I_a = \frac{1}{2} I_a(t_1) \frac{(t_3 - t_0)}{T_s} \quad (14)$$

$$I_b = \frac{1}{2} I_b(t_1) \frac{(t_2 - t_0)}{T_s} \quad (15)$$

$$I_c = \frac{1}{2} I_c(t_1) \frac{(t_3 - t_0)}{T_s} \quad (16)$$

$$I_a = \frac{D^2 T_s}{2L} \frac{V_o V_o}{V_o - V_o + V_c} \quad (17)$$

$$I_b = \frac{D^2 T_s}{2L} \frac{V_b V_o}{V_o - 3V_b} \quad (18)$$

$$I_c = \frac{D^2 T_s}{2L} \frac{V_c V_o}{V_o - V_o + V_c} \quad (19)$$

이 된다. 이것을 각 구간별 한 상에 대해서 정리해보면 구간이  $\text{in } \pi/6 \leq \theta \leq 5\pi/6, 7\pi/6 \leq \theta \leq 11\pi/6$  인 경우는

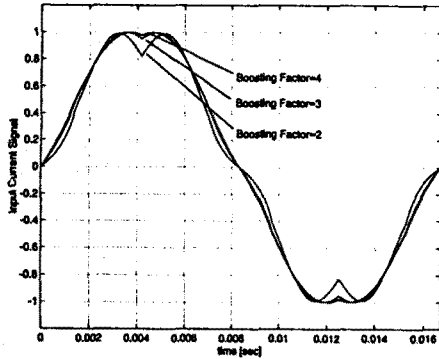
$$I_a = \frac{D^2 T_s V}{2L} \frac{2M \cos \theta}{2M - \sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta} \quad (21)$$

이고, 구간이  $\text{in } 0 \leq \theta < \pi/6, 5\pi/6 \leq \theta < 7\pi/6, 11\pi/6 \leq \theta$  인 경우는

$$I_a = \frac{D^2 T_s V}{2L} \frac{M \cos \theta}{M - \sqrt{3} |\cos \theta|} \quad (22)$$

이 된다.

식(21)(22)를 이용하여 평균화된 입력전류파형은 <그림3>과 같다. 그림에서 보면 승압률이 적으면 입력전류파형에 왜곡률이 많이 생긴을 알 수 있다.



<그림3> 승압률에 따른 입력전류의 파형

### 2-3. 경계조건

입력전류가 연속이 되면 대칭성이 사라지게 되므로 역률을 좋게 하기 위해서는 입력전류가 불연속이 되어야 한다. 즉 모드4가 나타나야 하며, 이는 입력전류가 흐르는 모드3까지의 시간  $t_0 \sim t_3$ 이 스위칭주기  $T_s$ 보다 작아야만 한다. 입력전류가 가장 오래 흐르는 때는 입력중의 한상이 0이 될 때이다. 따라서  $t_0 \sim t_3$ 의 구간은  $V_o = \sqrt{3}V/2$ ,  $V_s = 0$ ,  $V_r = -\sqrt{3}V/2$  일 때 최대가 되며 입력전류가 불연속이 되는 조건은 식(2), (6), (10)으로부터

$$T_s \geq t_3 - t_0 \quad (23)$$

$$T_s \geq \frac{V_o}{V_o - \sqrt{3}V} (t_1 - t_0) = \frac{V_o}{V_o - \sqrt{3}V} DT_s \quad (24)$$

따라서  $M = V_o/\sqrt{3}V$  라 두면 최대 도통율은

$$D_{max} = \frac{M-1}{M} \quad (25)$$

이 된다.

### 2-4. 다중 3상 PWM정류기

<그림4>는 2중 3상 PWM 정류기를 나타내고 있는데 일반적인 경우로써 3상 PWM정류기의 입력단과 출력단을 병렬연결하는 다중 3상 정류기의 경우 병렬연결하는 정류기의 개수를  $N$ 이라 하면  $I_o = N I_o = P_o/V_o = P_i/(\sqrt{3}MV)$  이 된다. 따라서 다중 3상 PWM정류기에 대해 식(25)로 주어진 각 정류기의 인덕터전류가 불연속이 되기 위한 경계조건을 만족하는 설계조건은 식(13)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{P_o L}{V_o^2 T_s} = \frac{N}{4} \sqrt{3} M \left( \frac{3}{2\sqrt{3}M-3} + \frac{3}{2\sqrt{3}M-2\sqrt{3}} \right) \left( \frac{M-1}{M} \right)^2 \quad (26)$$

이 된다. <그림5>은  $N=1,2,3$ 에 대해 식(26)을 나타낸 것으로 윗쪽영역은 입력전류가 연속이 되는 영역이며, 아래쪽은 불연속영역이다. 따라서 역률을 최적의 상태로 유지시키기 위해서는 최연수를 설계 조건의 아래쪽에 오도록 결정하면 된다.

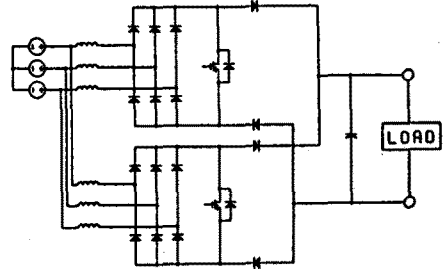
또  $V_o = I_o R$  이므로 식(13)를 이용하여 출력전압방정식을 구해보면,

$$V_o = \frac{NVD^2 T_s}{4L} \left( \frac{3}{2\sqrt{3}-3} + \frac{3}{2\sqrt{3}-2\sqrt{3}} \right) R \quad (27)$$

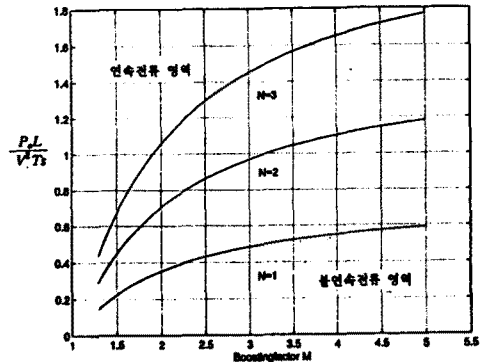
이 되고, 정리하면,

$$V_o^2 - 3.23VV_o^2 + (2.6 - 0.75QR)V_o^2 + 1.21QRV_o^2 = 0 \quad (28)$$

이 되고, 여기서  $Q = ND^2 T_s R / L$  로 정의한다.



<그림4> 2중 3상 PWM정류기



<그림5> 설계의 경계조건

출력전력  $P_o$ 를 구해보면  $P_o = I_o R$ 이므로

$$P_o = 1.3 \frac{V_o^2 Q}{R} \left( \frac{M}{2\sqrt{3}M-3} + \frac{M}{2\sqrt{3}M-2\sqrt{3}} \right) \quad (29)$$

가 된다.

한편 역률(power factor)은

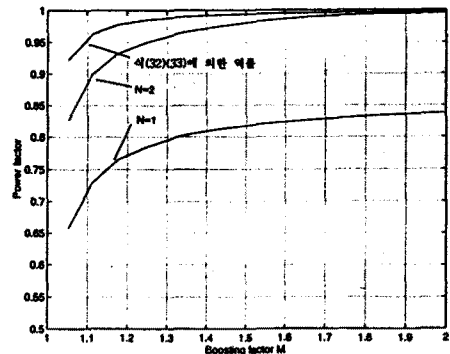
$$PF = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_o I_o d\theta \quad (30)$$

$$= \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (31)$$

으로 표현할 수 있으며, 식(21), (22)를 이용하면

$$P_{in} = \frac{D^2 T_s V_o^2}{\pi L} \left[ \int_0^{\pi/3} \frac{M \cos^2 \theta}{M - \cos(\theta - \pi/6)} d\theta + \int_{\pi/3}^{\pi/2} \frac{M \cos^2 \theta}{M - \sqrt{3} \cos \theta} d\theta \right] \quad (32)$$

$$P_{out} = \frac{D^2 T_s V_o^2}{2\sqrt{3}\pi L} \left[ \int_0^{\pi/3} \left( \frac{M \cos \theta}{M - \cos(\theta - \pi/6)} \right)^2 d\theta + \int_{\pi/3}^{\pi/2} \left( \frac{M \cos \theta}{M - \sqrt{3} \cos \theta} \right)^2 d\theta \right]^{1/2} \quad (33)$$



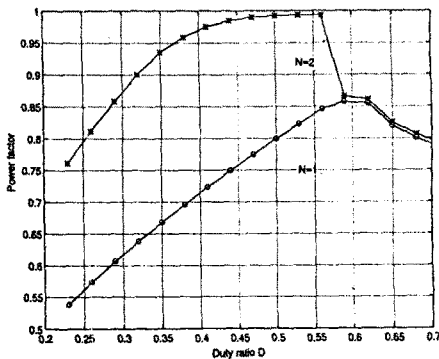
<그림6> 승압률과 역률의 관계

이 된다. 식(32)와 식(33)에서 역률은 승압률의 함수로써 근사적으로 표현됨을 알 수 있다. <그림6>는 승압률에 따른 PWM정류기의 역률을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 승압률이 1에 가까울 경우에는 역률이 급격히 감소하며, 다중의 경우 입력전류가 평균화되므로 식(32), (33)으로 주어지는 근사식을 만족시킴을 볼 수 있다.

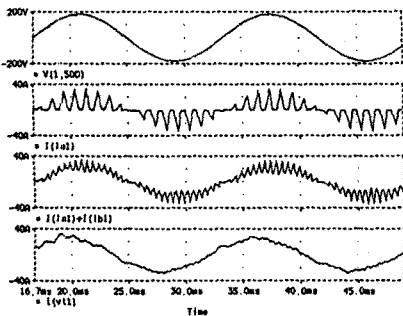
### 2-5. 정류회로의 파형 및 특성

정류기의 일반적인 응용은 부하가 변동하여도 출력전압을 일정하게 유지시키는 정전압장치는이다. 부하가 증가하면 입력전류가 증가하여야만 출력전압은 일정하게 유지되며, 따라서 도통용이 변해야한다. 이 경우 입력전류가 연속이 되는 경우가 발생되며 역률이 떨어지게 된다. <그림7>는 일정 출력전압조건에서 도통용에 대한 역률을 나타낸 것으로 경계조건식(26)에서 구한 경계조건을 넘게되는 경우 역률이 급격히 감소되며, 경부하의 경우에도 같은 경향을 나타낸다. 그러므로 회로설계시 제약조건을 만족시키는 부하범위를 설정할 수 있다.

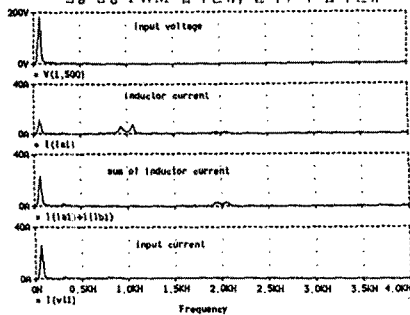
<그림8>은 2중 3상 PWM정류기의 시뮬레이션 파형으로 나중화 하므로써 전류파형이 개선되고 스위칭주파수가 채택되어 작은 외부 필터로써 전류파형을 이상적으로 정현파로 만들 수 있음을 보여준다.



<그림7> 일정 출력전압에서 도통용과 역률의 관계



(a) 시간상의 입력전압, 3상 PWM 입력전류, 2중 3상 PWM 입력전류, 필터후의 입력전류



(b) 주파수상의 입력전압, 3상 PWM 입력전류, 2중 3상 PWM 입력전류, 필터후의 입력전류

<그림8> 입력전압 및 입력전류 파형

### III. 결론

본 논문에서는 다중 3상 PWM정류기의 임출력전류방정식을 유도하고, 입력전류가 불연속이 되는 한계조건을 결정하였다. 또 평균치 개념을 도입하여 3상 PWM정류기를 해석적으로 표현하였으며, 출력전압방정식, 출력전력방정식 및 역률방정식을 구함으로써 시스템에 대한 완벽한 해석을 하였다. 그리고 이로부터 최적의 역률을 구현하기 위한 시스템의 설계조건과 제어기준을 마련하였다. 이론적으로 유도한 임출력전류방정식과 역률방정식은 다중화를 많이 시킬수록 설계값과 근사함을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] A.R.Prsad, P.D.Ziogas, and S.Manias, "An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers," *Conference Record IEEE 1989*, pp.58-66.
- [2] Kwang-Hwa Liu and Yung-Lin Lin, "Current waveform distortion in power factor correction circuits employing discontinuous-mode boost converters," *Conference Record IEEE PESC 1989*, pp.825-829.
- [3] Slobodan Gataric, Dushan Boroyevich, and Fred C.Lee, "Soft-switched single-switch three-phase rectifier with power factor correction," *APEC 1994*, pp.738-744.