

커패시터 필터를 갖는 3 상 다이오드 정류회로의 불평형전원에서의 입력전류 특성

이동기, 박기원, 정승기
광운대학교 전기공학과

Input Current Characteristics of a Three-Phase Diode Rectifier with Capacitive Filter Under Line Voltage Unbalance Condition

Dong-Gei Lee, Gei won Park, Seong Gei Jung
Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

The three-phase diode rectifier with capacitive filter is highly sensitive to line voltage unbalance. Because of its inherent nonlinear characteristics, small line voltage unbalance may cause highly unbalanced line current, causing detrimental effects on power quality. This paper presents a theoretical basis on this 'unbalance amplification effect' and derives an analytical model of line current characteristics under unbalanced line voltage condition for various modes of operation. The results provide a basic and important guideline for optimal design of a three-phase diode rectifier with capacitive filter that is most commonly used for interfacing various power conversion equipments to power lines.

있다. 그러나 대부분의 연구는 입력전류의 고조파 특성에 집중되어 있고 대체로 평형전원 하에서의 특성을 다루고 있다. 불평형 전원에 대한 특성에 있어서도 정류기 출력단에 커패시터와 함께 평활용 인덕터가 사용되어 직류측 전류가 연속인 상태를 대상으로 주로 다루고 있으며 대부분 정류기 동작의 비선형성을 다루기 위해 해석적 접근보다는 수치해석적 접근에 의존하고 있다.

그러나 중소용량의 다이오드 정류기는 직류 커패시터를 채용하지 않는 경우가 대부분이고 수치해석적 접근결과로는 정류회로의 특성에 대한 전반적인 통찰을 얻고 시스템의 설계에 적용하는 데에 어려움이 따른다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 출력단에 커패시터 필터만을 갖는 3 상 다이오드 정류기의 입력전류 불평형특성에 대한 해석적인 접근을 시도, 불평형특성을 억제하기 위한 제반 설계방안의 기초를 제공하고자 한다.

1. 서 론

3 상 다이오드 정류기는 산업용 전력변환 시스템과 교류전원 시스템과의 접점에서 가장 흔히 볼 수 있는 장치이다. 이러한 대부분의 3상 다이오드 정류기는 출력단에서 일정한 직류전압을 얻기 위하여 비교적 큰 용량의 커패시터 필터를 가지고 있다. 일반적으로 커패시터 필터를 갖는 다이오드 정류기는 교류측의 입력전류가 펄스 형상을 띠게 되므로 비선형성이 큰 부하에 속한다. 이러한 3 상 다이오드 정류기의 비선형적인 특성은 파형뿐만 아니라 전압전압이 불평형 되었을 때 전압과 전류의 관계에서 더욱 극명하게 나타난다.

일반적인 선형 부하의 경우와 달리 커패시터 필터를 갖는 3 상 다이오드 정류기에서는 전압전압이 불평형되면 입력전류는 훨씬 크게 불평형되는 특성을 보이는 데 이러한 특성은 아래와 같은 문제를 일으킨다.

1. 각 상 전류의 배분이 불균일해짐으로 해서 다이오드 정류회로 한 상의 소자에 전류가 집중, 소손의 우려가 있다.
2. 정류기 출력단 커패시터 필터에 흐르는 맥동전류의 실효치가 증가, 커패시터의 열화를 촉진시킨다.
3. 전원측에서 본 정류기의 역률이 감소한다.
4. 전원전류의 고조파 성분이 증가하고 이에 따라 계통손실을 증가시키며 전력품질(power quality)을 저하시킨다. 특히 평형 동작에서는 나타나지 않는 3배수 고조파가 나타날 수 있다.

종래에는 전원품질에 미치는 영향이 큰 중대용량의 싸이리스터 정류기에 대한 연구가 주종이었으나 근래에 중저압계통에서 비교적 작은 용량의 전력변환기의 보급이 크게 증가함에 따라 다이오드 정류회로의 입력전류 특성에 대한 관심이 높아지고

2. 불평형 전원의 표현

다이오드 정류기의 불평형 전압에서의 특성을 알아보기 위해 IEC에서 권고하는 불평형 계수인 VUF (Voltage Unbalance Factor)를 사용한다. 불평형 계수는 아래와 같이 대칭 좌표법을 통해 계산된 역상분 전압의 크기와 정상분 전압크기의 비율로 정의된다.^[9]

$$VUF = \frac{V_n}{V_p} \times 100 \quad (1)$$

따라서 여기서는 (2-3)의 정의를 원용, 아래와 같이 표현되는 불평형계수를 사용하도록 한다.

$$u = \frac{V_n}{V_p} = \frac{|V_n|}{|V_p|} \quad (2)$$

여기서 정상분전압 페이서 V_p 와 역상분전압 페이서 V_n 는 아래의 식으로 계산된다.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

(2-6)에서 선간전압에 의한 정의를 적용하는 이유는 본 논문에서 다루는 3 상 정류회로의 출력단 전압이 선간전압에 의해 결정되기 때문이다. 일반적으로 불평형 상태에서 선간전압과 상전압은 1:1 대응관계가 아니며 어떤 선간전압에 대응하는 상전압의 경우의 수는 무한히 많다. 그러나 주어진 부하상태에서 선간전압만 같으면 부하에 흐르는 전류는 상전압과 무관하게 결정되기 때문에 전압과 전류간의 상관관계를 나타내는 데 있어서

는 선간전압을 사용하는 것이 타당하다.

여기서 식 (2), (3)의 역함수관계로서 선간전압을 불평형계수

u 의 함수로 나타낼 수 있으나 어떤 불평형계수에 해당하는 3상 선간전압은 유일하게 주어지는 것이 아니므로 선간전압 사이의 어떤 상관관계의 형태로 나타나게 될 것이다.

그러므로 먼저 3상 선간전압이 평형상태에 있을 때 실효치를 V 라 가정한다. 선간전압 V_{ab} 를 기준 페이서로 정하여 불평형상태를 표현하기 위하여 V_{bc} 가 평형상태로부터 ΔV 만큼 변화하였다고 가정하면 3상의 선간전압의 합은 항상 0을 만족하여야 하므로 3상 선간전압 페이서는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V \\ V_{bc} &= a^2V + \Delta V \\ V_{ca} &= aV - \Delta V \end{aligned} \quad (4)$$

여기에 식 (3)을 적용하여 정상분 및 역상분 전압의 페이서를 구하면 아래와 같다.

$$V_p = \frac{1}{3}(V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}) = V + i\frac{1}{\sqrt{3}}\Delta V \quad (5)$$

$$V_n = \frac{1}{3}(V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}) = -j\frac{1}{\sqrt{3}}\Delta V \quad (6)$$

ΔV 는 전원전압의 불평형을 야기하는 성분이므로 불평형일 때만 나타나는 역상분 전압은 식 (6)에서 보는 바와 같이 이 성분에 직접적으로 비례하게 된다. 이하에서는 ΔV 를 변위전압이라 부르도록 한다.

역상분 전압에 대해 실수부와 허수부로 분리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_n = V_x + jV_y \quad (7)$$

식 (5), (6)을 전압불평형계수(u)로 식을 정리하면 다음과 같은 원의 방정식으로 귀착됨을 알 수 있다.

$$\left(V_x + \frac{u^2}{1-u^2}V\right)^2 + V_y^2 = \left(\frac{u}{1-u^2}V\right)^2 \quad (8)$$

즉 주어진 불평형계수에서 역상분 전압의 페이서는

$$|V_n - q| = r \quad (9)$$

$$q = \frac{u^2}{1-u^2}V \quad (10)$$

$$r = \frac{u}{1-u^2}V \quad (11)$$

의 관계를 만족하는 원주 상에 있게 된다.

본 논문에서 대상으로 하는 불평형은 전력계통의 지락사고 등과 같이 계통에 심각한 장애가 있는 상태에서의 불평형이 아니라 부하불평형 등으로 인한 상대적으로 작은 크기의 불평형, 즉 '일상적인 불평형' 상태를 대상으로 하고 있다. 일반적으로 통용되는 전압 불평형의 허용치는 2~3% 이내이며^[6] NEMA 표준에 의하면 전동기의 경우 5% 이상의 불평형은 허용되지 않는다.^[7] 따라서 수 % 이내의 불평형을 대상으로 하였을 경우 원의 중심이 평형상태 전압과 거의 일치한다. 그러므로 일정 불평형계수에 대한 역상분전압의 궤적은 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|V_n| \approx uV \quad (12)$$

그리고 선간전압의 변위에 대해서는

$$|\Delta V| \approx \sqrt{3}uV \quad (13)$$

로 쓸 수 있다. 즉 주어진 수 % 정도의 불평형계수를 나타내는 선간전압의 페이서는 평형상태에서의 좌표를 중심으로 한 원의 궤적을 그리게 된다.

3. 불평형 상태에서 정류회로의 동작모드

커패시터 출력필터를 갖는 3상 다이오드 정류회로에 대해서 해석의 단순화를 위해 정류회로의 부하는 일정한 크기의 전류원 I_L 로 나타내고 이때 전원측의 인덕턴스는 $L=0$ 인 것으로 가정한다. 이와 같이 전원인덕턴스가 없는 상태는 전압의 불평형에 대하여 전류의 불평형이 가장 민감한 상태에 해당한다.

전원 전압이 평형인 경우 정류기 출력단에는 전원의 6개 선간전압이 순차적으로 나타나며 각 선간전압의 침두치 부근에서 짧은 충전구간이 있고 이후 약 60도 구간은 커패시터가 방전하는 구간이 된다. 방전구간동안 출력전압이 감소분, 즉 정류기 출력전압의 맥동은 근사적으로 다음의 식으로 표현된다.

$$V_r \approx \frac{\pi}{3} \frac{I_L}{\omega C} = \frac{\pi}{3} X_C I_L \quad (1)$$

이 맥동전압의 출력단 전압의 최대치, 즉 선간전압의 파고치에 대한 비율은 평형상태에서 맥동률에 해당하며 여기서는 전압강율로 정의한다.

$$\rho = \frac{V_r}{\sqrt{2}V} \quad (2)$$

전원 불평형이 발생한 경우는 그림 3-1에 보인 것과 같이 평형 선간전압에서 변위전압만큼 이동한 선간전압들이 정류기 출력에 차례로 나타나게 된다. 이를 시간축상에 표현하면 그림 3-2와 같이 표현할 수 있다. 그리고 불평형계수가 충분히 작아서 변위전압 궤적의 중심이 기준 평형전압과 일치하는 것으로 가정하고 있으며 침두치의 변화를 나타내고 있으므로 변위전압의 크기, 즉 궤적의 반지름은 다음과 같다.

$$|\Delta V| = \sqrt{6}uV \quad (3)$$

그림 3-2에서 보는 바와 같이 직류 출력단에 나타나는 침두 전압은 $\sqrt{2}V \pm \sqrt{6}uV$ 의 범위 안에서 변화하며 그 변화 양상은 그림에 나타낸 변위전압의 위상 ϕ 에 따라 달라지게 된다. 그리고 침두전압이 나타나는 시점 역시 변위전압의 위상에 따라 기준 평형전압의 전후로 이동한다. 그림 3-1의 페이서도에서 이 위상의 변화는 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_{\max} = \pm \sqrt{3}u \text{ [rad]} \quad (4)$$

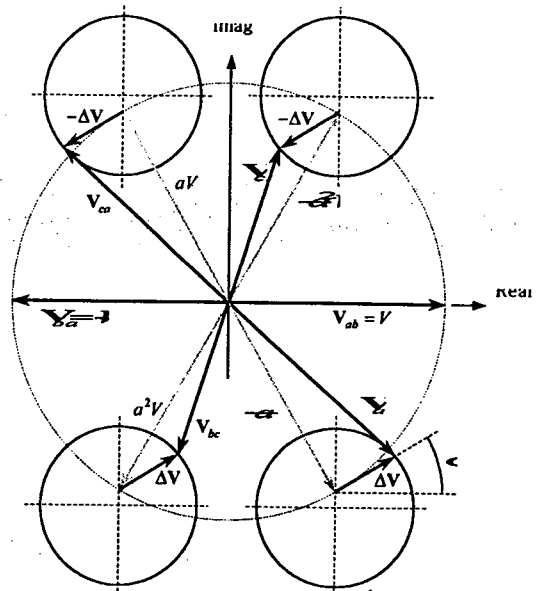


그림 3-1 정류기 출력단에 나타나는 불평형 선간전압 페이서

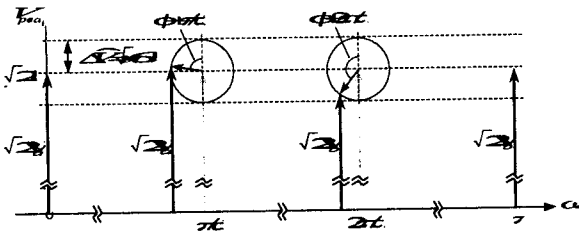


그림 3-2 시간축상에서 나타낸 선간전압 첨두치의 변화

수 % 정도의 불평형에서 이 위상의 변화는 $\pi/3$ 에 비해 훨씬 작은 값이므로 이하에서는 그 효과를 무시하기로 한다.

만일 충전구간이 매우 짧다고 가정하면 전원의 한주기 동안 정류기 출력전압의 변화는 근사적으로 그림 3-3에서와 같이 일련의 펄스로 표현된 선간전압의 파고치를 따라 변동하는 것으로 간주할 수 있다. 이때 선간전압의 파고치는 그림 3-2로부터 아래와 같이 표현된다.

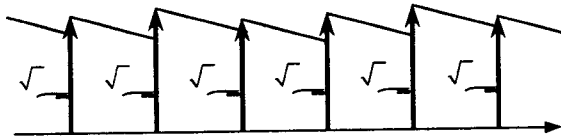
$$\sqrt{2} V_{ab} = \sqrt{2} V \quad (5)$$

$$\sqrt{2} V_{bc} = \sqrt{2} V + \Delta V \cos(\theta + \gamma) \quad (6)$$

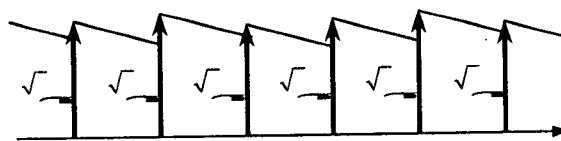
$$\sqrt{2} V_{ca} = \sqrt{2} V + \Delta V \cos(\theta + \gamma) \quad (7)$$

$$= \sqrt{2} V - \Delta V \cos(\theta - \gamma)$$

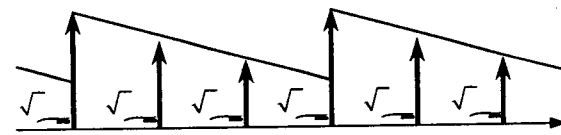
여기서 $\gamma = 2\pi/3$ 이다.



(a) 6펄스 동작모드



(b) 4펄스 동작모드



(c) 2펄스 동작모드

그림 3-3 불평형 상태에서의 동작모드 구분

그림 3-3에 보인 것과 같이 정류기의 동작은 변위전압의 크기와 위상 및 방전구간 중의 기울기에 따라 세가지 동작모드로 구분된다. 그림 3-3 (a)는 3 개 상이 모두 도통하는 상태로서 전원의 한주기동안 6 회의 충전구간이 나타나는 6 펄스 동작상태이고, 그림 3-3 (b)의 경우는 4 회의 충전구간만이 나타나는 4 펄스 동작상태, 그리고 그림 3-3 (c)는 2 회의 충전구간만이 나타나는 2 펄스 동작상태가 된다. 2 펄스 동작상태에서는 한 상에는 전혀 전류가 흐르지 않게 되므로 사실상 단상 정류기로서 동작하는 상태가 된다.

6 펄스 동작상태는 매 반주기마다 ab-bc-ca 선간전압이 교대로 도통하지만 4 펄스 동작상태는 선간전압들 사이의 상대적인 크기에 따라 ab-bc, bc-ca, ca-ab 의 세가지 도통모드가 나타날

수 있다. 마찬가지로 2 펄스 동작상태도 ab, bc, ca 도통모드로 나타날 수 있으며 총 일곱가지 도통모드 중에서 어느 모드로 동작하게 되는지는 아래와 같이 전압불평형의 정도와 식 (1)로 표현된 방전구간동안의 전압변동분 사이의 관계에 의해 결정된다.

먼저 ab-bc 도통모드의 조건은 다음과 같다.

$$\sqrt{2} V_{ab} - V_r > \sqrt{2} V_{ca} \quad (8)$$

$$\sqrt{2} V_{ab} - 2 V_r < \sqrt{2} V_{bc} \quad (9)$$

$$\sqrt{2} V_{bc} - V_r < \sqrt{2} V_{ab} \quad (10)$$

위의 조건 중 V_{bc} 가 나타나지 않게 되므로 ab도통모드의 조건은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\sqrt{2} V_{ab} - V_r > \sqrt{2} V_{ca} \quad (11)$$

$$\sqrt{2} V_{ab} - 2 V_r > \sqrt{2} V_{bc} \quad (12)$$

이와같이 그 외의 도통모드도 각각의 조건을 결정 할 수 있다. 식 (8)~(12)에 식 (5)~(7)을 대입하고 여기에 식 (2)와 (3)의 정의를 적용하면 각 도통모드의 조건은 다음과 같이 유도할 수 있다.

6펄스 동작모드

$$\rho > \max[\cos \phi, \cos(\phi + \gamma), \cos(\phi - \gamma)] \times \sqrt{3} u \quad (13)$$

4펄스 동작모드

ab-bc 도통모드의 조건은 다음과 같다.

$$\rho < \sqrt{3} u \cos(\phi - \gamma) \quad (14)$$

$$\rho > -\frac{\sqrt{3}}{2} u \cos(\phi + \gamma) \quad (15)$$

$$\rho > \sqrt{3} u \cos(\phi + \gamma) \quad (16)$$

bc-ca 및 ca-ab의 도통모드도 각각의 조건에 따라 성립한다.

2펄스 동작모드

ab 도통모드의 조건은 다음과 같다.

$$\rho < \sqrt{3} u \cos(\phi - \gamma) \quad (17)$$

$$\rho > -\frac{\sqrt{3}}{2} u \cos(\phi + \gamma) \quad (18)$$

bc 도통모드 및 ca 도통모드도 각각의 조건에 따라 성립한다.

그림 3-4는 변위전압의 페이서에 따른 정류기의 동작모드 영역을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 변위전압의 크기에 따라 도통모드가 변하고 불평형이 심화될수록 거의 모든 위상에서 2펄스모드로 동작하게 되는 것을 알 수 있다.

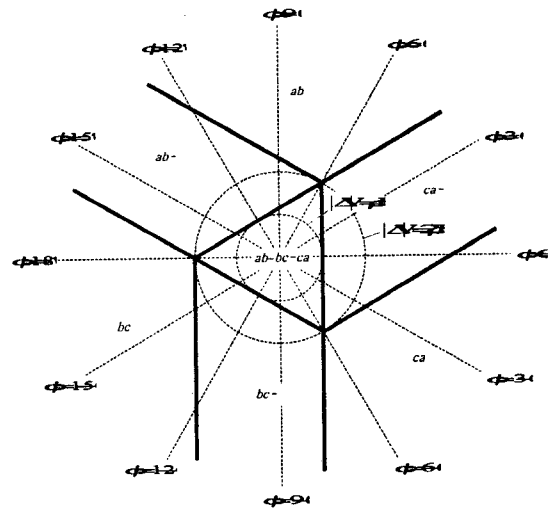


그림 3-4 변위전압의 크기와 위상에 따른 동작모드

4. 6펄스 동작모드에서의 정류기 입력전류 특성

이하에서는 위에서 정의된 각각의 동작모드에 대하여 불평형된 정류기의 입력전류 특성을 구하도록 한다. 이를 위해 먼저 그림 4-1 에서와 같이 정류기의 충전구간에서 나타나는 정류기 출력단 전류 i_d 에 나타나는 전류 펄스의 면적을 구해 보면 충전구간이 충분히 짧다고 가정하였을 때 전압의 상승분에 대하여 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A \approx \omega C V_x = \frac{V_x}{X_c} \quad (1)$$

그림 4-1의 맨 아래는 전류펄스를 충전구간 중의 평균치에 해당하는 크기를 갖는 구형파 펄스로 근사화 시킨 것을 보여주고 있다.

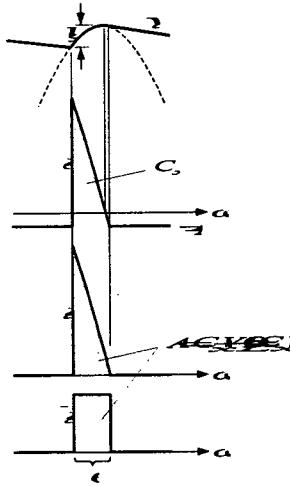


그림 4-1 충전 구간 중 전류펄스의 근사화

위에서와 같이 정류기 출력전류를 구형파 펄스로 근사화 시켰을 때 6펄스 모드에서 정류기 출력단 전류와 교류측 입력전류는 구형파와 같이 나타낼 수 있다. 한 주기 동안의 정류기 직류측 출력에는 6개의 전류펄스 $i_{ab}, i_{ac}, i_{bc}, \dots, i_{ca}$ 가 나타나는 데 각 충전구간 중의 전압의 상승분으로부터 전류펄스의 면적을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} A_{ab} &= \frac{1}{X_c} (\sqrt{2} V_{ab} - \sqrt{2} V_{bc} + V_r) \\ A_{bc} &= \frac{1}{X_c} (\sqrt{2} V_{bc} - \sqrt{2} V_{ca} + V_r) \\ A_{ca} &= \frac{1}{X_c} (\sqrt{2} V_{ca} - \sqrt{2} V_{ab} + V_r) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에 3절의 식(5)~(7)을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} A_{ab} &= \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi + r)] \\ A_{bc} &= \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos \phi] \\ A_{ca} &= \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi - r)] \end{aligned} \quad (3)$$

이들 전류펄스는 각 상 전류에 배분되면서 전원의 반주기마다 같은 크기로 극성이 반전되어 나타나게 된다. 예를 들어 $\overline{i_{ab}}$ 와 $-\overline{i_{ba}}$ 는 같은 크기로서 i_a 에서 반주기 대칭을 이루는 한 쌍으로서 나타난다. 그리고 각 상의 전류는 두개 씩의 전류펄스 쌍으로 구성된다.

한 개의 전류펄스 쌍을 그림 4-2와 같이 나타내었을 때 이에 의한 기본파 성분은 다음과 같이 된다.

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_{-\theta/2}^{\theta/2} h \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{4}{\pi} h \sin \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

만일 $\theta \ll \pi$ 라면 아래와 같이 기본파 성분의 크기를 펄스의 면적으로 나타낼 수 있다.

$$a_1 = \frac{4}{\pi} h \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2}{\pi} h \theta = \frac{2}{\pi} A \quad (5)$$

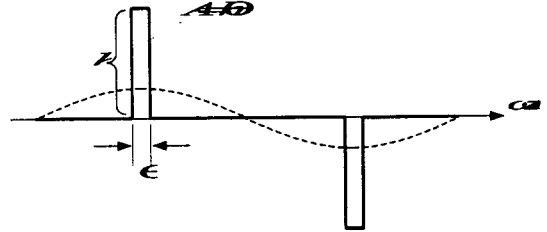


그림 4-2 상전류에 나타나는 전류펄스 쌍 및 이에 의한 기본파 성분

이로부터 식 (3)으로 주어진 펄스면적을 갖는 각 전류펄스 쌍에 의한 기본파 실효치를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} I_{ab1} &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{ab} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi + r)] \\ I_{bc1} &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{bc} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos \phi] \\ I_{ca1} &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{ca} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi - r)] \end{aligned} \quad (6)$$

위의 값들을 사용, $\overline{i_{ab}}$ 와 $-\overline{i_{ba}}$ 쌍에 의한 기본파 성분을 기준 페이서로 취하고 펄스쌍 사이의 위상차를 고려하면 3상 전류의 페이서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_{ab1} - a I_{ca1} \\ I_{b1} &= -I_{ab1} + a^2 I_{bc1} \\ I_{c1} &= a I_{ca1} - a^2 I_{bc1} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에 아래와 같이 대칭좌표변환을 적용하면

$$\begin{bmatrix} I_{\rho 1} \\ I_{m 1} \\ I_{\lambda 1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

기본파 전류의 정상분과 역상분은 아래와 같이 된다.

$$I_{\rho 1} = \frac{1}{3} (1-a)(I_{ab1} + I_{bc1} + I_{ca1}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{m 1} &= \frac{1}{3} [(1-a^2)I_{ab1} + (a-1)I_{bc1} + (a^2-a)I_{ca1}] \\ &= \frac{1}{3} (1-a^2)[I_{ab1} + aI_{bc1} + a^2I_{ca1}] \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 전류의 불평형계수는

$$\mu_1 = \frac{|(I_{ab1} + aI_{bc1} + a^2I_{ca1})|}{I_{ab1} + I_{bc1} + I_{ca1}} \quad (11)$$

위의 표현식 (9)~(11)에 식 (6)을 대입하면 기본파 전류의 정상분, 역상분 및 불평형계수를 아래와 같이 전압불평형계수의 함수로 표현할 수 있다.

먼저 정상분 전류는

$$I_{\rho 1} = (1-a) \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_r}{X_c} \quad (12)$$

이고 식 (3-1)을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$I_{\rho 1} = (1-a) \frac{\sqrt{2}}{3} I_L = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad (13)$$

역상분 전류는

$$I_{n1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\Delta \hat{V}}{X_c} (1-a) (\cos \phi + j \sin \phi) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi}} \Delta \frac{\hat{V}}{X_c} e^{j(\phi - \frac{\pi}{6})} \quad (14)$$

한편 이 표현식은 변위전압의 페이저 표현식

$$\Delta V = \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta \hat{V} e^{j\theta}$$

을 적용하면

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \Delta \frac{V}{X_c} e^{-j(\pi/6)} \quad (15)$$

로 쓸 수도 있다. 그리고 그 크기는 다음과 같다.

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{\Delta V}{X_c} = \frac{3}{\pi} \frac{V}{X_c} u \quad (16)$$

혹은 역상분 전압과의 관련성을 나타내기 위해 아래와 같이 쓸 수도 있다.

$$I_{n1} = \frac{V_n}{\frac{\pi}{3} X_c} \quad (17)$$

기본과전류 불평형계수는 (13)과 (16)으로부터

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta V}{V_r} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V}{V_r} u \quad (18)$$

혹은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\mu = \frac{3\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi}} \frac{V}{X_c I_L} u = 1.17 \frac{V}{X_c I_L} u \quad (19)$$

이상의 결과를 검토하여 보면 우선 정상분 전류의 크기는 전압불평형과 무관하게 일정한 값을 유지하며 그 크기는 부하전류에 직접 비례한다. 그리고 역상분 전류는 변위전압의 크기 및 전압불평형계수에 비례하면서 커패시터 용량에는 반비례하는 특성을 보인다. 이러한 점을 감안하면 정상분의 위상은 평형 상 전압의 위상에 해당하며 역상분 전류의 위상은 여기에 변위전압의 위상이 더해진 값이 됨을 알 수 있다.

역상분 전류의 위상은 변위전압의 위상에 따라 변화하지만 그 크기는 변위전압의 위상과 무관한 값이 된다. 여기서 역상분 임피던스는 식 (9)와 (18)로부터 다음과 같이 커패시터 필터의 리액턴스에 의해 결정된다.

$$Z_n = \frac{V_n}{I_n} = \frac{\pi}{3} X_c \quad (20)$$

정상분 전류가 전압불평형에 무관하기 때문에 전류의 불평형계수는 역상분 전류의 불평형에 대한 응답특성을 그대로 반영한다. 즉 식 (19)에서 보듯이 전류의 불평형계수는 전압의 불평형계수에 비례하며 그 비례상수는 커패시터의 리액턴스와 부하전류의 곱에 반비례한다. 따라서 커패시터가 클수록, 그리고 부하전류가 작을수록 전압불평형에 대해 전류불평형은 민감한 상태가 된다.

한편 식 (18)에 식 (2)의 정의를 적용하면 다음과 같이 간단한 형태로 쓸 수 있다.

$$\frac{\mu_1}{u} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\rho} \quad (21)$$

전원이 평형일 경우 ρ 는 정류기 직류 출력전압의 맥동 (peak-to-peak)을 선간전압의 최대치에 대한 비율로 나타낸 것으로 출력전압의 맥동률에 해당한다. 전원이 불평형 되어 있을 경우에는 전원의 선간전압의 파고치가 변동하기 때문에 직류측 전압의 맥동은 이보다 증가하게 된다. 일반적으로 다이오드 정류기에서는 출력전압을 가급적 일정하게 유지하는 것이 설계의 초점이 되므로 이 맥동률은 정류기 설계에서 중요한 파라미터가 된다. 일반적으로 정류회로의 설계시에는 전원이 평형인 것으로 가정하고 설계하게 되므로 주어진 정류기의 운전조건에 따라 맥동률이 정해진다. 따라서 식 (21)은 이 맥동률에 입각하여 정류기를 설계하였을 경우 전압의 불평형에 대해 전류가 불

평형되는 정도를 나타내게 된다.

일반적으로 출력전압의 맥동률은 수 %이하가 되도록 설계하기 때문에 이때 전압에 대한 전류 불평형은 매우 큰 값이 되게 된다. 예를 들어 출력전압의 맥동률을 2%로 설계하였다면 식 (21)로부터 전류불평형 계수는 전압불평형 계수에 비해 40배가 넘는 값이 될 수 있다. 물론 이는 이 상태에서 정류기가 6펄스 모드로 동작하는 것을 전제로 한 것으로 변위전압의 위상에 따라 4펄스 동작모드 혹은 2펄스 동작모드에 있게 되면 전류불평형 계수는 다른 값이 될 수 있다.

5. 4펄스 및 2펄스 동작모드에서의 정류기 입력전류 특성

4펄스 동작 모드중에 ca 및 ac 상의 전압이 출력이 나타나지 않는 ab-bc 동작모드의 경우에는 a상과 c상의 전류파형은 단상 정류기에서의와 같은 형태가 되고 b상에만 상하 4개의 펄스가 나타나게 된다. 이 상태에 해당하는 변위전압의 위상각은 그림 3-4에서

$$\frac{\pi}{3} < \phi < \pi \quad (22)$$

구간에 해당하며 여기서 나타나는 전류펄스의 면적을 구하면 다음과 같다.

$$A_{ab} = \frac{1}{X_c} (\sqrt{2} V_{ab} - \sqrt{2} V_{bc} + V_r) = \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)]$$

$$A_{bc} = \frac{1}{X_c} (\sqrt{2} V_{bc} - \sqrt{2} V_{ab} + 2V_r) = \frac{1}{X_c} [2V_r + \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)] \quad (23)$$

이로부터 각 전류펄스 쌍에 의한 기본과 실효치는

$$I_{abl} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{ab} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)]$$

$$I_{bcl} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{bc} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [2V_r + \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)] \quad (24)$$

한편 앞서와 같은 방식으로 각 상 전류의 페이저를 구하면

$$I_{a1} = I_{abl}$$

$$I_{b1} = -I_{abl} + a^2 I_{bcl}$$

$$I_{c1} = -a^2 I_{bcl} \quad (25)$$

가 되고 이에 따라 기본과전류의 정상분, 역상분 및 전류 불평형계수는 아래와 같이 된다.

$$I_{\rho 1} = \frac{1}{3} (1-a) (I_{abl} + I_{bcl}) \quad (26)$$

$$I_{n1} = \frac{1}{3} (1-a^2) (I_{abl} + a I_{bcl}) \quad (27)$$

$$\mu_1 = \frac{I_{n1}}{I_{\rho 1}} = \left| \frac{(I_{abl} + a I_{bcl})}{(I_{abl} + I_{bcl})} \right| \quad (28)$$

(26), (27)에 식 (24)를 대입하면

$$I_{\rho 1} = (1-a) \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_r}{X_c} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L e^{-j\frac{\pi}{6}} \quad (29)$$

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [a V_r - \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)] \quad (30)$$

가 된다. 이로부터 정상분 전류는 6펄스 동작일 경우와 같지만

역상분 전류 및 전류불평형계수는 변위전압의 크기 뿐 아니라 위상에 따라 달라짐을 알 수 있다.

4펄스 동작의 다른 두가지 경우에 대해서도 위에서와 같은 과정을 거쳐 역상분 전류를 구한 결과는 아래와 같다.

ab-bc도통모드 ($-\frac{\pi}{3} \leq \phi \leq \pi$)

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} a [V_r - a^2 \Delta \hat{V} \cos(\phi + \gamma)] \quad (31)$$

bc-ca도통모드 ($-\frac{\pi}{3} \leq \phi \leq \frac{\pi}{3}$)

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} [V_r - a^2 \Delta \hat{V} \cos(\phi - \gamma)] \quad (32)$$

ca-ab도통모드 ($-\pi \leq \phi \leq -\frac{\pi}{3}$)

$$I_{n1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} a^2 [V_r - a^2 \Delta \hat{V} \cos \phi] \quad (33)$$

식 (32)~(36)으로부터 전류불평형계수를 구하면 아래와 같이 됨을 보일 수 있다.

$$\mu = \sqrt{2c^2 \left(\frac{V}{V_r}\right)^2 u^2 + \frac{2}{3} c \frac{V}{V_r} u + \frac{1}{3}} \quad (34)$$

$$c = \cos(\phi + \gamma) \quad \pi/3 \leq \phi \leq \pi$$

$$= \cos(\phi - \gamma) \quad -\pi/3 \leq \phi \leq \pi/3$$

$$= \cos \phi \quad -\pi \leq \phi \leq -\pi/3$$

끝으로 2펄스 동작상태중 ab 상 도통모드의 경우는 ab상 선간전압이 제일 큰 경우를 보여주고 있으며 이때 c상에는 전류가 흐르지 않고 정류기가 ab상 선간전압에 의해 구동되는 단상 정류기로서 동작한다. 여기에 나타나는 전류펄스의 면적은

$$A_{ab} = \frac{1}{X_c} 3V_r \quad (35)$$

이므로

$$I_{abl} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} A_{ab} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{X_c} 3V_r \quad (36)$$

이고 이에 따라

$$I_{\rho 1} = \frac{1}{3}(1-a)I_{abl} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L e^{-j\pi/6} \quad (37)$$

$$I_{n1} = \frac{1}{3}(1-a^2)I_{abl} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L e^{j\pi/6} \quad (38)$$

bc 도통모드 및 ca 도통모드에서도 정상분 전류는 위에서와 같이 되지만 역상분 전류는 변위전압의 위상에 따라 달라진다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

ab도통모드 ($\frac{\pi}{6} \leq \phi \leq \frac{5\pi}{6}$)

$$I_{n1} = \frac{1}{3}(1-a^2)I_{abl} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L e^{j\pi/6} \quad (39)$$

bc 도통모드 ($-\frac{5\pi}{6} \leq \phi \leq \frac{9\pi}{6}$)

$$I_{n1} = \frac{1}{3}(1-a^2)aI_{abl} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L a e^{j\pi/6} \quad (40)$$

ca 도통모드 ($\frac{9\pi}{6} \leq \phi \leq \frac{13\pi}{6}$)

$$I_{n1} = \frac{1}{3}(1-a^2)a^2 I_{abl} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_L a^2 e^{j\pi/6} \quad (41)$$

이상의 모든 경우에 대해 전류 불평형계수는

$$\mu_1 = \frac{I_{n1}}{I_{\rho 1}} = 1 \quad (42)$$

즉 100% 불평형 상태가 된다.

6. 결과 검토

위의 4절과 5절에서 기술한 내용을 바탕으로 주어진 전압불평형계수에 대하여 역상분전류의 궤적을 그리면 그림 6-1과 같다.

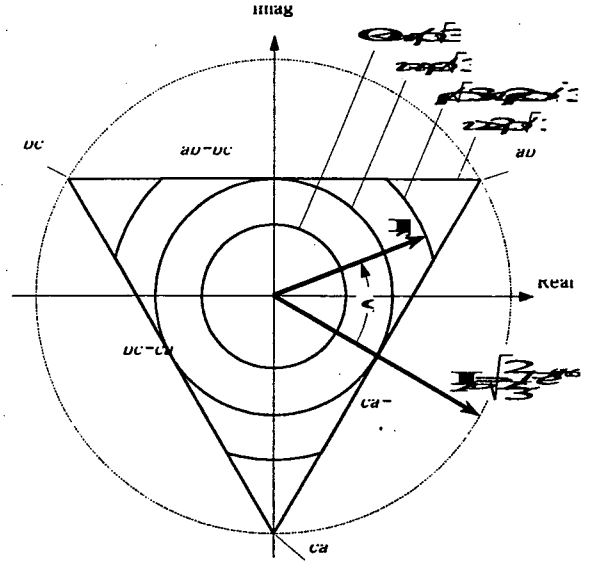


그림 6-1 일정 전압불평형계수에 대한 입력전류 대칭좌표성분의 페이서궤적

그림에 나타난 것과 같이 입력전류의 정상성분은 전압불평형과 무관하게 항상 일정한 페이서로 고정되어 있다. 이 정상성분 전류의 크기를 반지름으로 한 원을 그렸을 때(그림에서 점선으로 표시) 이 원에 내접하는 정삼각형이 역상분 전류 페이서의 한계를 나타내고 있다. 따라서 역상분 전류는 전압불평형이 커짐에 따라 0에서부터 정상분 전류의 크기까지 증가하게 된다.

전압불평형계수가 $0 < u < \rho/\sqrt{3}$ 인 범위에서는 6 펄스모드로 동작하고 역상분전류의 궤적은 원점을 중심으로 한 원을 그리게 된다. 이때 원의 반지름은 전압불평형계수에 비례한다.

전압불평형계수가 $\rho = \sqrt{3}$ 에 도달하면 역상분 전류의 크기가 정상분전류의 1/2이 되고 그 궤적은 삼각형의 내접원이 된다. 전압불평형계수가 이보다 커져서 $\rho/\sqrt{3} < u < 2\rho/\sqrt{3}$ 인 범위에서는 변위전압의 위상에 따라 6 펄스 모드 또는 4 펄스 모드에서 동작하는데 4 펄스 모드에 있을 때는 역상분 전류 페이서가 삼각형의 변 위에 놓이게 된다. 그리고 전압불평형계수가 $u > 2\rho/\sqrt{3}$ 로 증가하면 6 펄스 모드가 더 이상 나타나지 않고 페이서 궤적은 삼각형을 그리게 된다.

역상분 전류 페이서의 위상은 그림에 나타난 것과 같이 정상분 전류를 기준으로 변위전압의 위상 ϕ 만큼 앞서게 된다. 그러나 이는 6 펄스 모드에서 동작할 때만 성립하는 것으로 4 펄스 혹은 2 펄스 모드에서는 변위전압의 위상뿐 아니라 변위전압의 크기, 즉 전압불평형계수에 따라 역상분 전류의 위상이 달라지게 된다. 정류기가 2 펄스 동작모드로 진입하면 식 (39)~(41)로 표현된 것과 같이 역상분 전류는 그림 6-1에 보인 삼각형의 세 꼭지점에 고정되며 이때 위상은 변위전압의 위상과 무관해진다. 따라서 4 펄스 모드에서는 역상분 전류의 위상이 변위전압의 위상과 이들 세 점 중의 한 점의 위상 사이의 값을 갖게 된다.

그림 6-2에서는 ρ 가 2%인 경우와 5%인 경우, 그리고 각각의 경우에 대해 변위전압 위상각이 0도인 경우와 60도인 경우의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 여기서 보듯이 ρ 가 클 경우에는 이론적인 예측이 갖는 결과가 상대적으로 큰 오차를 보이고 있다. 이러한 오차는 앞서 도통구간이 매우 짧다는 가정에서 오는 것으로서 방전구간에서의 전압이 하강하는 기울기가 클수록 위의 근사적인 해석에 오차가 커지게 되는 것으로 설명할 수 있다. 그러나 근사적인 해석결과는 전체적으로 거의 시뮬레이션 결과와 합치하고 있음을 알 수 있으며 위에서 도출한 해석적 표현이 실용적인 적용에 거의 지장이 없는 수준인 것으로 판단된다.

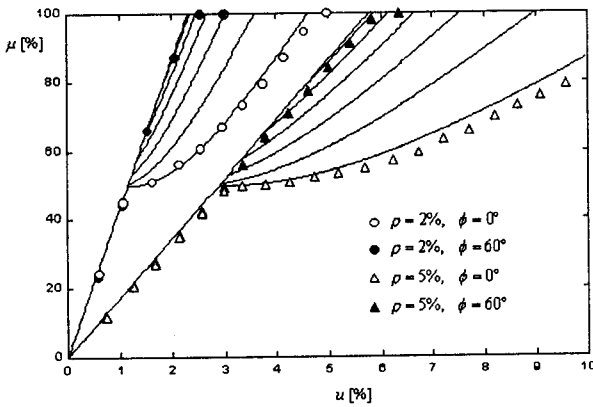


그림 6-2 시뮬레이션 결과와 예측치의 비교

7. 결 론

본 논문에서는 커패시터 출력필터를 갖는 3상 다이오드 정류회로의 입력전압 불평형특성을 검토하기 위하여 입력전압의 불평형 상태를 모델링하고 이를 기반으로 입력전류의 기본파 성분에 대하여 불평형특성을 검토하였다.

입력전압의 불평형특성은 일정부평형계수에 해당하는 상태를 포괄적으로 표현하기 위해 선간전압을 기준으로 하고 임의의 크기와 위상을 갖는 변위전압이 더해진 형태로 나타내었다. 그 결과 수 % 정도의 불평형계수에서는 평형 선간전압 페이서를 중심으로 한 원의 궤적 상에 선간전압이 위치하는 것으로 표현하는 것이 가능함을 보였다. 이로부터 주어진 불평형계수 하에서 정류기의 출력전압이 시간적으로 변화하는 양상을 간단한 형태로 나타낼 수 있었으며 전압불평형이 커짐에 따라 정류기의 동작은 6펄스, 4펄스 및 2펄스 동작모드로 이행함을 보이고 동작모드 사이의 경계조건을 불평형계수와 방전구간동안의 전압하강 특성으로 나타낼 수 있었다.

각 동작모드에서 입력전류의 불평형계수를 산출하는 데 있어서는 정류기의 충전전류물 펄스형상의 구형파로 근사화시켜 나타내었으며 그 결과 정상분 전류는 동작모드와 무관하게 주어진 부하전류에서 항상 일정한 값을 유지함을 알 수 있었다. 역상분 전류는 6펄스 동작모드에서는 전압불평형계수에 비례하면서 그 크기는 변위전압의 위상과 무관한 반면 4펄스 동작모드에서는 역상분전류의 크기가 변위전압의 위상에 따라 달라짐을 알 수 있었고 이들에 대한 해석적인 표현식을 도출하였다. 한편 2펄스 동작모드는 단상 정류기와 같은 상태로서 전류불평형계수는 100%가 된다.

이상의 결과는 다음의 가정을 기초로 하고 있다.

1. 전압불평형이 수 % 이내의 낮은 값이다.
2. 정류기의 충전구간이 매우 짧다.
3. 교류 입력단 리액턴스의 효과는 무시한다.

위의 첫번째 가정은 실제 대부분의 상황에서 타당한 가정이라 할 수 있다. 그러나 두번째 가정은 부하용량에 비해 커패시터 용량이 매우

커서 정상적인 상태에서 출력전압의 맥동이 매우 낮은 수준일 경우에 해당한다. 만일 커패시터 용량이 상대적으로 작은 경우라면 위의 결과는 상당한 오차가 나타날 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과에 의하면 그 오차는 실제적인 상황에서 수용할만한 수준이라 할 수 있다.

세번째의 가정은 정류기에 급전하는 계통의 용량이 정류기의 용량에 비해 매우 크다는 것을 전제로 한 것으로 정류기의 용량이 급전계통의 용량에서 상당한 비중을 차지한다거나 전용 변압기가 사용되고 있거나 할 경우에는 적용되지 않는 가정이라 할 수 있다. 전원에 인덕턴스가 있게 되면 전류의 과형, 특히 정류기의 도통구간에 큰 영향을 미치기 때문에 위에서 기술한 것과 같은 불평형의 증폭효과는 현저히 감소할 수 있다. 이 점에 관해서는 보다 심도 있는 연구가 필요할 것이며 본 논문에서 제시한 결과는 주어진 운전조건에서 불평형계수 증폭효과의 최대 한계치를 제시하였다는 데에 그 의의를 들 수 있을 것이다. 특히 그 한계를 해석적인 방식으로 예측할 수 있다는 것은 어떤 불평형 조건 하에서 운전될 것으로 예상되는 정류기를 설계함에 있어서 그 기초 단계 설계치를 용이하게 추정할 수 있게 됨을 의미하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Mayordomo, A. Hernandez, R. Asensi, L. F. Beites, and M. Izzeddine, "A unified theory of uncontrolled rectifiers, discharge lamps and arc furnaces? Part I: An analytical approach for normalized harmonic emission calculations," Proc. 8th International Conf. on Harmonics and Quality of Power, 1998, pp. 740~748.
- [2] G. A. Conway and K. I. Jones, "Harmonic currents produced by variable speed drives with uncontrolled rectifier inputs," Proc. IEE Colloquium on Three-Phase LV Industrial Supplies: Harmonic Pollution and Recent Developments in Remedies, 1993, 4/1-4/5.
- [3] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Pedra, "Line side behavior of single-phase uncontrolled rectifiers," Ninth International Conf. on Harmonics and Quality of Power, 2000, pp. 577~582.
- [4] M. Grotzbach and J. Xu, "Noncharacteristic line current harmonics in diode rectifier bridges produced by network asymmetries," Rec. of 1993 European Power Electronics Conf., pp. 64~69.
- [5] A. Fratta, M. Pastorelli, A. Vagati and F. Villata, "Comparison of power supply topologies for industrial drives, based on safety and EMC European standards or directives," Proc. 8th Mediterranean Electrotechnical Conf., 1996, pp. 1242~1246.
- [6] M. Bauta and M. Grotzbach, "Noncharacteristic line harmonics of AC/DC converters with high DC current ripple," IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1060~1066, July 2000.
- [7] Ching-Yin Lee Bin-Kwie Chen, "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition," Conf. Rec. 1997 Industrial and Commercial Power Systems Technical Conf. pp. 51~59.
- [8] A. E. Emanuel, "The Buchholz-Goodhue apparent power definition: The practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 344~350, April 1998.
- [9] IEC 61000-4-27, Electromagnetic compatibility - Part 4-24: Testing and measurement techniques - Unbalance, immunity test, First ed. 2000-08.