

플라즈마 응용을 위한 위상제어 정류기의 과부하 특성해석

Overload Characteristics Analysis of Phase Controlled Rectifier for Plasma Application

노 의 철¹, 정 규 범², 김 용 진³, 최 정 완³

¹:부경대학교, ²:우석대학교, ³:기초과학지원연구소

Abstract

This paper deals with the design considerations and characteristics analysis of a SCR rectifier in pulsed over load operation. The pulse repetition rate is one every 150 seconds and each current pulse width is 10 seconds. Therefore the characteristics of the transformer and SCR rectifier which consist the pulsed DC power supply are different from those of the conventional AC/DC power converters having continuous load. The variations of the DC output voltage drop, PF and THD versus the %Z of the transformer is analyzed through simulations and the experimental results thought to be useful in design high power pulsed DC power supply.

1. 서론

플라즈마가 갖는 대표적 성질로서 높은 도진성, 고온에 도달 가능한 열적 성질, 전자기장 상호작용의 결과로 얻을 수 있는 전자기력, 발광성, 화학적 관성이 매우 큰 이온에 의한 화학반응성 등을 들 수 있다. 이들 성질을 이용한 응용분야로는 신소재의 합성 및 가공, MHD발전, 핵융합발전, 고출력레이저, 초고온추진체, 환경처리, 입자가속기, 플라즈마 프로세싱 등 매우 광범위하며 새로운 응용기술 분야로 그 범위가 계속 확대되고 있다. 다양한 용도를 갖는 플라즈마를 이용하는데 있어서는 여러 형태의 전원장치가 필수적이다. 본 논문에서는 특히 핵융합발전에 관련된 플라즈마의 밀폐 및 구속을 위한 전원장치의 설계시 고려해야할 특성과 성능해석을 다룬다. 열핵

융합 실험장치의 플라즈마 밀폐 및 구속을 위한 연구는 현재 매우 활발히 진행되고 있다¹⁾⁻⁵⁾. 그러나 플라즈마의 밀폐제어기술이 확립되어 있지 않기 때문에 연속이 아닌 펄스형태의 직류전류로 초전도 전자석을 구동하여 수~수십 T의 밀폐용 자장을 형성한다^{4),5)}. 최근 국내에서도 플라즈마 밀폐가열 장치인 '한빛'이 실험단계에 있으며 '한빛' 장치의 펄스출력 용량은 600 V, 7 kA로서 150 초 마다 10 초간 펄스형태로 출력된다. 본 논문에서는 '한빛' 장치의 펄스전원장치를 구성하는 변압기와 SCR 정류기의 특성이 과부하 동작시 역률과 고조파 및 출력전압 변동에 미치는 영향을 파악하고 실험결과를 토대로 대용량 펄스 전원장치의 특성향상을 위한 방안을 모색한다.

2. 전원장치의 시스템 구성

2.1 주회로 및 동작원리

그림 1은 600 VDC, 7 kADC 펄스 출력용량을 갖는 직류 전원장치의 주회로도이다. 전원장치는 크게 변압기와 6-펄스 SCR 정류기로 구성되며 전자석 부하에 직류 전원을 공급하는 기능을 갖는다. 변압기의 1차측은 델타(delta) 결선되어 3상 3300 V를 수전하고 2차측은 와이(wye) 결선되어 있으며 각 상에는 120, 180, 240, 480 V의 탭(tap)이 인출되어 있다. 2차측에 탭을 인출한 이유는 전원장치의 부하설비인 수냉식 전자석의 정격용량이 여러가지이므로 부하설비의 용량에 따라 역률을 최대로 하기 위한 것이다.

제어장치에 입력되는 전류 기준치는 폭이 10 초이고 주기가 150 초인 펄스 형태이다. 펄스의 형태는 상승과 하강 시간이 각각 4초이고 일정값 지속 시간

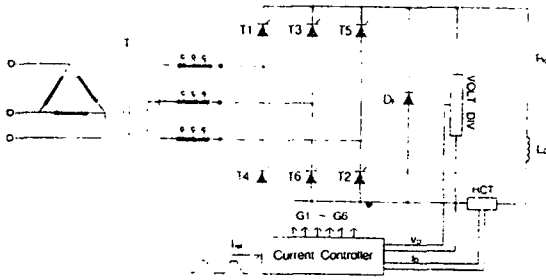


그림 1. 직류 전원장치의 주회로도

이 2초인 사다리꼴이며 펄스의 상승과 하강을 완만히 한 이유는 출력전류에 의한 전원의 교란을 최소로 하기 위한 것이다.

2.2 변압기 용량산정

전원장치의 최대 펄스전류는 7 kADC이다. 따라서 변압기 2차측의 480 V 단자에서 최대 부하를 공급할 경우 변압기의 용량 S는

$$S = \sqrt{3}VI = \sqrt{3} \times 480 \times 7000 \times \sqrt{\frac{2}{3}} = 4.75 \text{ MVA} \quad (1)$$

이다. 그런데, 본 전원장치의 운전은 연속이 아니고 펄스폭이 10 초인 펄스 형태로 150 초 간격으로 이루어지므로 열적 온도상승 측면에서 보면 변압기의 용량을 4.75 MVA로 할 필요는 없다. 전원장치의 운전율로부터 열적 온도상승 측면을 고려하여 변압기 용량을 결정한다면, 변압기의 철손과 동손의 비율에 따라 차이는 있지만 316 kVA~4.75 MVA 즉, 변압기 최대 용량의 6.7~100 % 사이에서 정해진다.

그러나 온도상승 측면만 고려하여 변압기 용량을 최소로 정하면 전원장치의 펄스 출력시 발생하는 전압강하와 역률감소가 매우 커지는 문제가 발생한다. 그림 2는 변압기 용량에 따른 전원장치의 출력전압 평균값 ($V_{oavg,n}$), 역률(PF) 및 전고조파왜율(THD)을

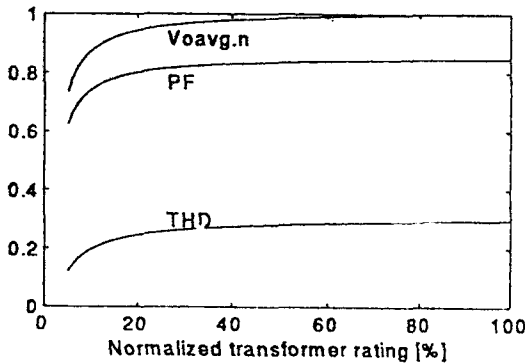


그림 2. 변압기 용량에 따른 출력전압 평균값, PF, THD

나타낸 것이다. 그림 2에서 변압기 용량은 4.75 MVA를 100 %로 하였으며, $V_{oavg,n}$ 은 변압기 용량이 4.75 MVA이고 부하전류가 7 kADC일 때의 직류 출력전압 평균값을 기준으로 정규화(normalization)한 값이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 변압기의 용량이 4.75 MVA의 10~15 % 이하가 되면 $V_{oavg,n}$ 과 PF가 급격히 감소한다. 따라서, 변압기의 온도상승과 전원장치의 역률 및 전압강하를 고려하여 변압기 용량을 4.75 MVA의 16 % 정도로 해서 750 kVA로 한다.

3. 과부하시 특성해석

3.1 출력전압 강하

그림 1에서 직류 출력전압의 평균값은 식 (2)와 같다.

$$V_{oavg} = \begin{cases} \frac{3}{\pi} \left[\sqrt{2}V \left\{ 1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right\} \right] - 2 \\ (R_T + R_l) I_o \left(\frac{2}{3} \pi - \alpha \right) - 2V_T, & \left(\frac{\pi}{3} \leq \alpha < \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{3\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha - 2(R_T + R_l) I_o + \\ \frac{3}{\pi} \omega L_s \left\{ I_o - 2V_T \right\}, & \left(0 \leq \alpha < \frac{\pi}{3} \right) \end{cases}$$

여기서,

V : 변압기 2차측 선간전압

α : 위상제어 정류기의 지연각 (delay angle)

R_T : 변압기 상당 등가저항

R_l : 변압기와 위상제어 정류기간의 배선 저항

I_o : 위상제어 정류기 직류 출력전류

L_s : 변압기의 누설 인덕턴스 (L_T) + 배선의 표류 인덕턴스 (L_l)

V_T : SCR의 온상태 전압강하

시뮬레이션에 사용된 각 parameter들은 다음과 같다.

$$R_T = 0.34 \text{ m}\Omega, \quad R_l = 0.69 \text{ m}\Omega, \quad V_T = 83 \times 10^{-6} I_o + 1.0$$

그림 3은 750 kVA 용량의 변압기로 약 4.2 MW (600 VDC, 7 kADC)의 위상제어 정류기 부하를 구동할 경우 변압기의 %Z에 따라 변화하는 정규화한 출력전압 평균값을 나타낸다. 변압기의 %Z는 식 (3)과 같다.

$$\%Z = \sqrt{(\%R_T)^2 + (\%(\omega L_T))^2} \quad (3)$$

변압기의 %Z가 0~6 % 범위로 가변할 때 출력 전압 평균값은 0~15.6 % 정도 변한다.

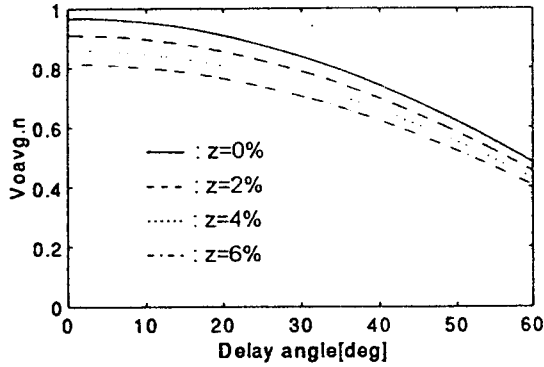


그림 3. 변압기의 %Z와 지연각 α 의 변화에 대한 출력전압 평균값의 변화

3.2 역률

SCR의 턴온 및 턴오프시 해당 선전류의 상승과 하강은 각각 다음과 같다.

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{2\omega L_S} (\sin(\alpha + \omega t) - \sin \alpha), & (\text{턴온 시}) \\ I_0 - \frac{\sqrt{2}V}{2\omega L_S} (\sin(\alpha + \omega t) - \sin \alpha), & (\text{턴오프 시}) \end{cases} \quad (4)$$

단, $(\alpha \leq \omega t < \alpha + u)$

식 (4)에서 증복각 u 는 다음식으로부터 구한다.

$$\cos(\alpha + u) + \frac{2I_0(R_T + R_I)}{\sqrt{2}V} u = \cos \alpha - \frac{2\omega L_S I_0}{\sqrt{2}V} \quad (5)$$

식 (5)를 근사적으로 선형화하여 정류기 입력 선전류의 실효치 I 를 구하면

$$I = I_0 \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{4}{3} \times \frac{u}{180}}, \quad (0 \leq \alpha < \frac{\pi}{3}) \quad (6)$$

이다. 따라서 역률 PF는

$$PF = \frac{V_{avg} I_0}{\sqrt{3}VI} = \frac{V_{avg}}{\sqrt{3}V \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{4}{3} \times \frac{u}{180}}} \quad (7)$$

($0 \leq \alpha < \frac{\pi}{3}$)

이다. 그림 4는 변압기의 %Z와 지연각 α 의 변화에 대한 역률의 변화를 나타낸다.

출력전압 평균값 강하에서와 마찬가지로 변압기의 %Z가 0~6 %로 증가하면 역률은 0~14.5 % 감소한

다.

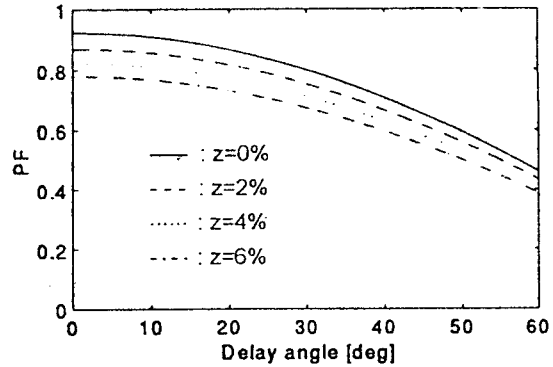


그림 4. 변압기의 %Z와 지연각 α 의 변화에 대한 역률의 변화

3.3 전고조파왜율

SCR 정류기의 입력전원에 포함된 인덕턴스 성분으로 인하여 입력 선전류가 구형파가 아닌 사다리꼴로 됨에 따라 역률과 출력전압은 감소하지만 입력 선전류의 고조파 성분은 오히려 줄어들어 전고조파왜율이 감소하는 잇점이 있다.

식 (4)에서 주어진 전류를 근사적으로 선형화하여 입력 선전류를 푸리에 전개하여 기본과 성분의 실효치 I_1 을 구하면

$$I_1 = \frac{4\sqrt{3}I_0}{\sqrt{2}\pi u} \sin \frac{u}{2}, \quad (u \neq 0) \quad (8)$$

이다. 식 (6)과 (8)로부터 전고조파 왜율 THD는

$$THD = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} - \frac{u}{3\pi} - \left(\frac{4\sqrt{3}}{\sqrt{2}\pi u} \sin \frac{u}{2}\right)^2}}{\frac{4\sqrt{3}}{\sqrt{2}\pi u} \sin \frac{u}{2}}, \quad (u \neq 0) \quad (9)$$

이며 u 가 0일 경우는 이상적인 경우로서 이때의 THD는

$$THD = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}}}{\frac{\sqrt{6}}{\pi}} \quad (10)$$

이다.

그림 5는 전고조파왜율이 지연각 α 와 변압기의 %Z에 따라 변화하는 경향을 나타낸다. 변압기의 %Z가 0이면 이상적인 경우로서 증복구간이 존재하지 않으므로 입력 선전류는 구형파이다. 즉, 지연각

이나 부하의 크기에 무관하게 전류 파형이 구형파로 일정하므로 THD는 31.08 %로서 일정하다.

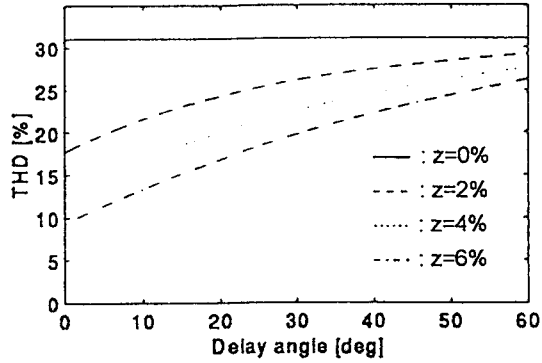


그림 5. 변압기의 %Z와 지연각 α 의 변화에 대한 전고조파왜율의 변화

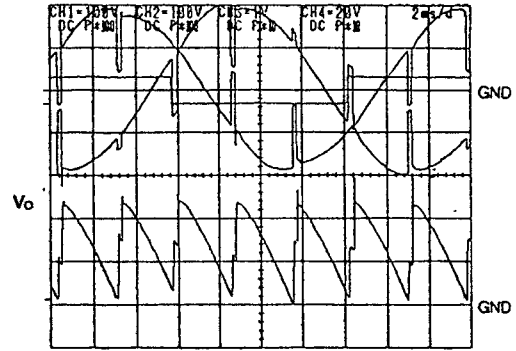
4. 실험결과

실험에 사용된 부하는 정격전류가 4.5 kA인 전자석으로서 코일의 저항성분 R_C 는 0.057Ω , L_C 는 65 mH이며 변압기의 %Z는 2.9 %이다. SCR 정류기의 입력은 변압기 2차측 탭의 240 V 단자로 하였으며 전원장치의 제어기는 P-I 제어기로 구현하였다.

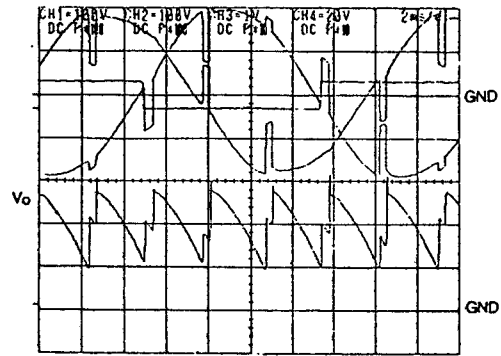
그림 6은 각 출력전류에 있어서 입력전압과 출력전압 파형을 나타낸다.

그림 7은 부하전류가 0~4.5 kA로 변할 때 출력전압 평균값의 계산값과 실험값을 나타낸 것이다.

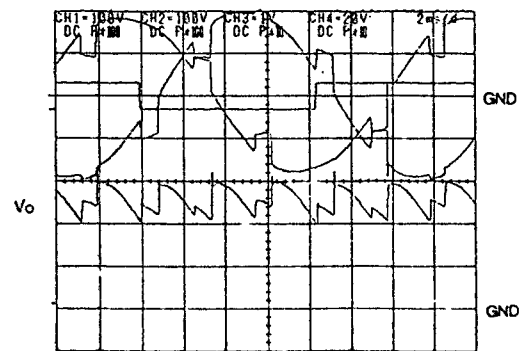
750 kVA 변압기의 2차측 정격전류는 $750 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 240) = 1804$ A이므로 부하전류가 2210 A 이하인 경우는 변압기 용량을 초과하지 않으므로 계산값과 실험값이 거의 일치한다. 그러나 2210 A 이상이 되면 변압기의 정격 용량을 초과하여 과부하 상태가 되어 실험값이 계산값보다 10~13 % 정도 작다. 과부하의 정도가 심할수록 실험값과 계산값과의 차이는 증가하는데 이것은 전류가 커짐에 따라 변압기 권선에서 근접효과에 의해 권선의 등가 저항값이 증가하고 또한 누설자속이 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 실험에서 사용한 변압기는 원통형 동심 배치권선 구조를 갖는다. 원통형 동심 배치권선 변압기의 과부하시 등가 저항값과 누설 자속의 증가분을 정량적으로 표현하기는 매우 어렵지만 실험적으로 측정된 값은 증기의 정도와 경향을 파악하여 대용량 펄스 전원장치용 변압기의 설계 및 제작에 중요한 자료로 활용되리라 기대된다.



(a) $I_o = 2.5$ kA



(b) $I_o = 3.5$ kA



(c) $I_o = 4.4$ kA

그림 6. 각 출력전류시 입출력 전압파형

참고문헌

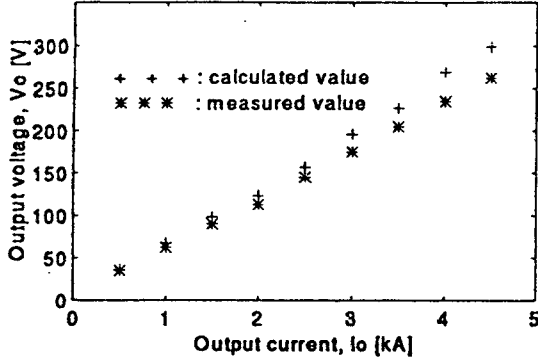


그림 7. 출력전압 평균값의 계산값과 측정값

5. 결론

본 논문에서는 플라즈마를 밀폐, 구속하기 위한 전자석 구동용 대용량 펄스 직류전원 장치에서 변압기 및 SCR정류기의 특성이 전체 성능에 미치는 영향을 중점적으로 파악하였다.

750 kVA 용량으로 갖는 변압기의 2차측 240 V 단자를 위상제어 정류기의 입력으로 하여 4.5 kADC의 펄스 출력전류를 흘리면 무부하일 경우보다 출력전압이 약 19 % 감소한다. 또한, 4.5 kA 출력시 변압기의 %Z가 이상적으로 0인 경우에 비해 역률은 약 3.5 % 감소한다. 그러나, 입력 전류의 고조파 측면에서는 오히려 유리하게 작용하여 전고조파 왜율은 33.8 % 정도 줄어든다. 이상 시뮬레이션과 실험결과를 토대로 직류 펄스 전원장치에 대한 성능을 분석하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) 변압기의 운전율과 전압강하, 역률, 고조파 등을 고려하여 변압기 용량을 최대 펄스 출력용량의 16 % 정도로 선정한다.
- 2) 변압기의 %Z가 증가할수록 역률과 출력전압 평균값은 감소하여 2.9 %일 경우 최대 펄스 출력시 역률은 8.4 %, 출력전압 평균값은 9.2 % 감소한다.
- 3) 연속부하일 경우와는 달리 과부하 대전류 펄스 출력시 전원장치의 출력특성은 특히 변압기의 %Z에 좌우되므로 변압기의 %Z를 가능한 한 최소로 한다.
- 4) 교류 입력 전원측 전류의 고조파 측면에서는 %Z가 클수록 유리하며 2.9 %일 경우 최대 펄스 출력시 THD는 약 50 % 정도 줄어든다.

- 1) Kuchinski V., Bulgakov S. Larionov B., Mikhailov N., silin V., Soikin V., "Power Supply Systems of Russian Fusion Installations", proc. of IPEC, pp. 893-898, 1995.
- 2) M. P. J. Gandrean, M.S.Shuster, V.J. Berkman, P. Thomas, "The TARA 24 MVA Magnet System", Proc. of the 14th Symp. on Fusion Tech. Vol. 2, pp. 1749-1758, 1986.
- 3) E. Bertolini, T. Bonicelli, D. Chiron, A. Santaguiustina, " Power Electronics Systems at JET objectives and Operational Experience", proc. of IPEC, pp. 875-881, 1995.
- 4) PL. Mondino, B Bareyt, I Benfatto, M Matsukawa, A Roshal, "The ITER Tokamak and Its Power Supply", proc. of IPEC, pp. 869-874, 1995.
- 5) Chikaraish H. , Yamada S., Tanahashi S. , Kitagawas. , Satow T. , Yamamoto J. , Motojima O. , "DC power system for Superconducting Magnets of LHD", proc. of IPEC, pp. 904-909, 1995.