해수 전기분해용 대전류 인버터 방식의 정류기 특성분석

조원우*, 김진영*, 김슬기*, 김인동*, 노의철*, 고강우**, 배상범**, 강부녕**
*부경대학교, **(주)광산

Output Characteristic Analysis of High-Current Rectifier for Electrolysis of Seawater

Won-Woo Cho*, Jin-Young Kim*, Seul-gi Kim*, In-Dong Kim*, Eui-Cheol Nho*, Gangwoo Goh**, Sangbum Bae**, Bunyung Kang**
*Pukyong Nat. Univ, **Kwangsan Co., LTD.

ABSTRACT

To reduce the problem of ecocide, the plating equipment, water treatment system, electrolysis facility in ship need high current high power rectifier. This paper shows entire constitution of the proposed high-current rectifier for electrolysis of seawater, describes a way to design controller and analyzes output characteristic of the rectifier.

1. 서론

세계화와 더불어 수출·입 물동량이 크게 늘어남에 따라 세계를 왕래하는 화물선의 밸러스트수에 의한 생태계의 파괴가 큰 문제가 되고 있다. 이에 따라 이를 저감하기 위한 성능이 우수한 저전압 대전류 방식의 정류기의 필요성이 커지고 있다[1]-[2]. 저전압 대전류 방식의 정류기를 구성하기 위한 기존의 방식으로는 3상 위상제어 정류기를 사용하는 방식과 3상 전파 정류기의 출력을 쵸퍼 방식을 이용해 구성하는 방식이 있다. 하지만 이와 같은 방식은 부피가 큰 60 [Hz] 변압기가 필요할 뿐만 아니라 역률이 낮고 큰 정격용량을 가지는 스위칭 소자를 필요로 하는 단점을 가진다[3]-[5].

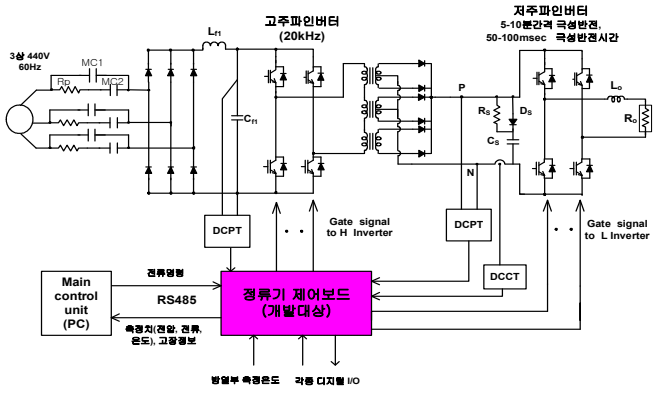

그림 1 해수 전기분해용 대전류 인버터 방식의 정류기 전체회로도
Fig. 1 All schematics for the rectifier Electrolysis of Seawater

그림 1은 3상 전파 정류기 + 고주파 인버터 + 고주파 변압기를 이용하여 구현한 저전압 대전류 방식의 정류기 전체 회로도이다. 고주파 인버터를 사용함으로써 변압기의 무게와 부피를 현저히 감소시킬 수 있으며 제어가 간단하고 높은 역률을 가지는 정류기를 구현할 수 있다.

본 논문에서는 고주파 인버터 방식을 이용한 12 [V], 1200 [A], 14.4 [kW]급 정류기의 제어기 설계와 그 출력특성을 분석하였다.

2. 대전류 인버터 방식의 정류기 제어기 설계

대전류 인버터 방식의 정류기의 부하로 작용하는 해수의 염분도는 특정 지역과 위도에 따라 40 [‰]에서 12 [‰]까지 달라진다. 정류기의 부하저항은 해수의 염분도에 따라 변동하는데 부하 저항의 변동시에도 전류 명령치를 빠르게 추종 할 수 있도록 하는 제어기의 설계가 필요하다. 정류기의 전달 함수는 그림 2와 같이 모델링 할 수 있으며 안정한 위상여유를 얻기 위해서는 정류기의 이득 곡선이 0 [dB]과의 교차점에서 -20 [dB/dec]의 기울기를 가지며 감소하여야 한다. 샘플링 이론에 의하면 교차 주파수를 f_c, 스위칭 주파수를 f_s라 할때 0 [dB]통과 주파수가 $f_c > f_s/2$ 일때는 입출력이 전달되지 못하므로 교차주파수 f_c는 스위칭 주파수 f_s의 1/4~1/5로 선정 한다. 또한 좋은 과도 특성을 얻기 위해 위상여유는 45~60 [°]정도가 되도록 제어기를 설계하여야 한다.

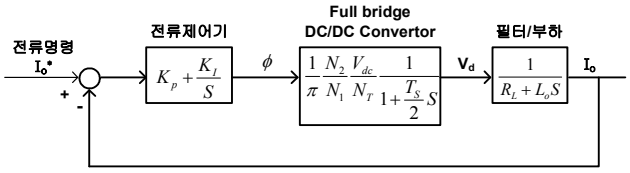

그림 2 정류기의 제어 블록다이어그램
Fig. 2 Rectifier's control block diagram

정류기의 스위칭 주파수는 40 [kHz]이므로 교차주파수 f_c를 스위칭 주파수 f_s의 1/5인 8 [kHz]로 선정한다. 제어기가 설계되지 않은 정류기의 교차주파수 이득은 25.7 [dB]이며 정류기의 주파수에 대한 이득을 $G_p(f)$라 할때 교차주파수 f_c에서의 이득이 0 [dB]에 교차하기 위한 PI제어기의 K_p는 식 (1), (2), (3)과 같이 설계할 수 있다.

$$G_p(f_c) = -20\log K_p \quad (K_p < 1) \tag{1}$$

$$K_p = 10^{-G_p(f_c)/20} \quad (K_p < 1) \tag{2}$$

$$K_p = 0.052 \quad (3)$$

K_I / K_P 값이 너무 작으면 계통의 대역폭이 낮아져 상승시간과 정정시간이 길어지는 원인이 된다. 그러므로 K_I / K_P 값을 $f_c/10$ 정도의 주파수에 대응하도록 K_I를 설계하였다.

$$\frac{K_I}{K_P} = \frac{f_c}{10}[rad/\sec] \quad (4)$$

$$K_I = 41.6 \quad (5)$$

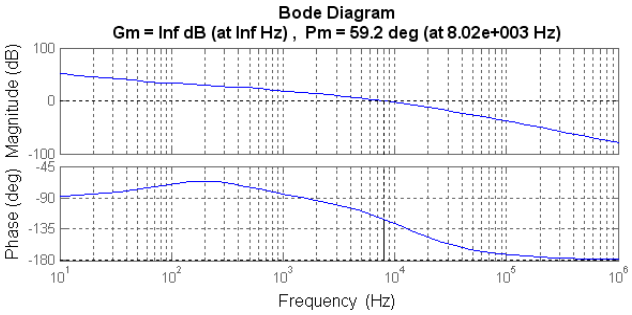

그림 3 PI제어기를 포함한 정류기의 보드선도
Fig. 3 Bode plot of the rectifier with PI controller

그림 3은 설계된 PI제어기에 의해 보상된 정류기의 보드선도이다. 교차주파수 8 [kHz]에서 −20 [dB/dec]의 기울기로 0 [dB]을 교차하고 59.2 [°]의 위상여유를 가지며 안정하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

3. 출력 특성 분석

그림 4는 ±10 [%]의 전원전압 변동에 따른 부하 전류 파형이다. 전원전압의 순간적인 변동에도 5 [%]이내의 Over shoot만이 발생하며, 수십 [msec] 이내에 정상 전류 명령치를 추종하고 있음을 알 수 있다.

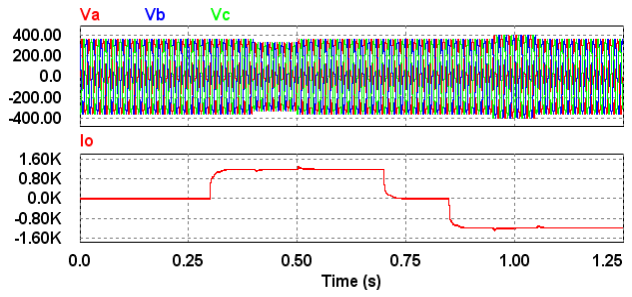

그림 4 10[%]의 전원전압 변동에 따른 부하 전류 파형
Fig. 4 Load current when input voltage changes ±10 [%]

그림 5는 전원 전압의 변동과 동시에 해수의 염분도가 10 [‰]에서 30 [‰]까지 단계적으로 변화할 때의 정류기 출력전압과 전류 파형이다. 해수 염분도의 감소는 부하의 증가로 작용하며 그림 5를 통해 전원전압의 변동과 염분도의 변화에도 출력 전류가 전류 명령치를 안정적으로 추종하고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 6은 제작완료된 대전류 인버터 방식의 정류기이다. 이를 이용해 현재 12 [V], 1200 [A], 14.4 [kW]급 정류기의 실험중에 있다.

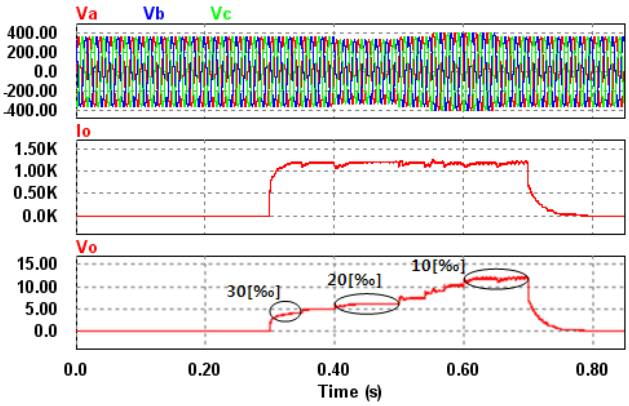

그림 5 전원전압과 염분도의 변동에 따른 부하전류, 전압파형
Fig. 5 Output Characteristic when load condition and input voltage are changed

(a) 정류기 전체구성 (b) 전면 제어 패널 (c) 제어 보드

그림 6 제작완료 된 대전류 인버터 방식의 정류기
Fig. 6 Manufactured High-Current Rectifier

4. 결론

화물선의 밸러스트수에 의한 생태계의 파괴 문제가 심화되고 있으며 이를 해결하기 위한 우수한 성능의 저전압 대전류 방식의 정류기의 필요성이 커지고 있다. 본 논문에서는 저전압 대전류 방식의 정류기 중 선박에서의 활용이 가장 적합한 정류기를 선정하고 해수 전기분해용 대전류 인버터 방식의 정류기 제어기 설계 방법과 제어기에 의해 보상된 정류기의 출력 특성을 분석하였다.

본 과제(결과물)는 중소 기업청의 지원으로 수행한 구매조건부 신제품 개발 사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001

[2] D. Cretu, W.D. Dunford, G. Garabandic and M. Edmunds, "Single Stage DC-DC Converter for High Current High Power Applications", IEEE APEC 1997, pp617-622

[3] M. H. Rashid, Power Electronics-Circuits, Devices and Applications, 3rd edition, Pearson-Prentice Hall 2004.

[4] In-Dong Kim, E. C. Nho and G. H. Cho, "Novel Constant Frequency PWM DC/DC Converter with Zero Voltage Switching for Both Primary Switches and Secondary Rectifying Diodes," IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 39, No. 5, Oct. 1992, pp.444-452.

[5] In-Dong Kim and Eui-Cheol Nho, "Module-Type Switching Rectifier for Cathodic Protection of Underground and Maritime Metallic Structures," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 1, Feb. 2005, pp.181-189.