

해수 전기분해용 대전류 정류기의 설계 및 시뮬레이션

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

Design and Simulation of High-Current Rectifier for Electrolysis of Seawater

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

ABSTRACT

The plating equipment, water treatment system, electrolysis facility, etc need the high current and high power rectifier for their original purposes. So the paper investigates the applicable types of rectifiers and carries out their comparisons, and also suggest the practical design guidelines for a suitable candidate rectifier for low voltage high current high power applications.

1. 서론

전기분해, 도금, 수 처리 시설 및 장비는 본래의 목적을 원활히 달성하기 위해 성능이 우수한 저전압 대전류 정류기를 필요로 한다[1]. 이와 같은 정류기를 구성하는 방법은 다음 표 1과 같이 크게 3가지 방식을 고려 할 수 있다.[1]-[6]

표 1 저전압 대전류 정류기 방식 비교
 Table. 1 Comparison of Low-voltage High-current Rectifier types

종류	특성
(1) 60Hz 변압기 + 3상 위상제어정류기 방식	-부피가 큰 60Hz 변압기 사용 -큰 출력전류 용량의 변압기 및 사이리스터 필요 -낮은 입력단 역률과 많은 고조파성분 포함 -제어가 다소 복잡함 (입력단 전압과 동기)
(2) 60Hz 변압기 + 3상 전파정류기 + 초퍼 방식	-부피가 큰 60Hz 변압기 사용 -초퍼는 큰 전류용량의 스위칭 소자를 필요로 함 -제어가 용이
(3) 3상전파정류기 + 고주파 인버터 + 고주파 변압기 (그림 1)	-고주파인버터 및 고주파 변압기를 사용하므로 무게 및 부피 감소 -출력단 다이오드만 출력전류와 같은 전류 용량의 소자 필요 -제어가 용이

표 1과 같이 정류기의 특성을 비교한 결과 그림 1과 같이 3상 전파 정류기 + 고주파 인버터 + 고주파 변압기 방식이 저전압 대전류 정류기 방식으로 가장 적합한 것으로 판단되며 본 논문에서는 이 방식에 대한 전력회로 및 제어기 설계 후에 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 해수 전기분해용 대전류 정류기의 설계

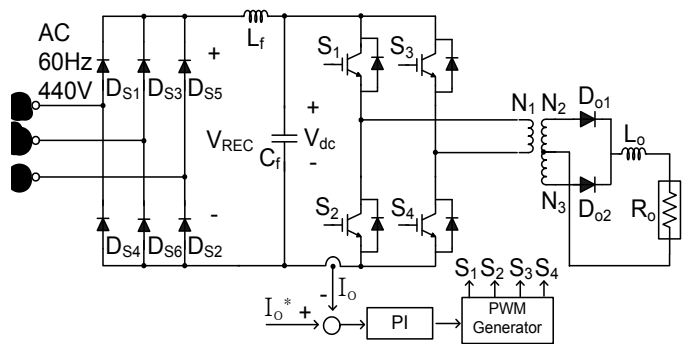


그림 1 3상전파정류기 + 고주파 인버터 방식
 Fig. 1 3-phase diode rectifier and high-frequency inverter type

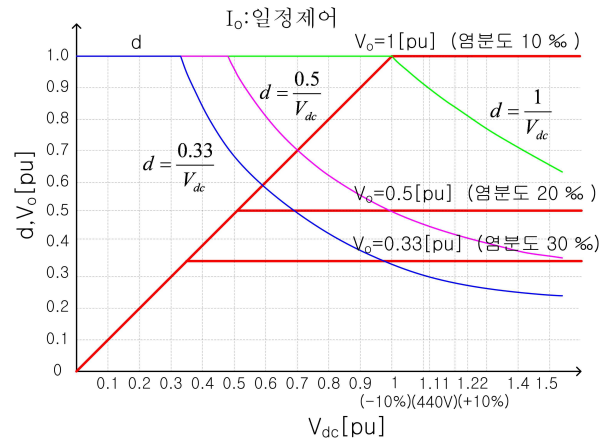


그림 2 부하 전류의 일정 제어시 부하변동과 전원전압변동에 따른 듀티사이클(d)과 출력전압(Vo)
 Fig. 2 Duty cycle and output voltage vs. dc link voltage with respect to several load variations during constant output current operation

그림 2는 부하변동과 입력 전원전압 변동에 관계없이 출력 전류를 일정하게 제어하기 위한 듀티 사이클 d와 이때의 출력 전압 Vo를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 전기분해 부하의 경우 해수의 염분도에 따라 부하저항이 변동하며, 전기분해량을 제어하기 위해 일정 전류제어를 행한다. 이를 위해 정류

기 내의 고주파 DC/DC 컨버터의 듀티 사이클을 적절하게 제어해야 한다.

본 정류기의 정격전류는 $I_o=1200[A]$, 정격 출력전압은 $V_o=12[V]$ 이며, 정격 출력은 $P_L=14.4[kW]$, 과부하내량은 150% 1분간이다. 본 설계의 주요한 설계 동작점은 그림 4에서의 입력전압 $440+10\%[V]$ 와 염분도가 10‰인 점으로서 이때의 듀티 사이클은 $d=0.82$ 이다. 상세 설계 절차는 참고 문헌[1]의 논문에서 상세히 서술되어 있으며 그 결과는 다음과 같다.

표 2 대전류 정류기의 설계 파라미터 값
Table 2 high-current rectifier values of the Design parameters

구분	설계 값	비고
DC link 필터 L_f	$L_f=1[mH]$ $I_{LFSAT}=52.8[A]$	
DC link 필터 C_f	$C_f=720[\mu F]$ $UN=840[V]$ (20% margin)	
Transformer (100% 정격부하)	1차권선: 6.8 kVA $V_1=205[V_{rms}]$ $I_1=32.9[A_{rms}]$ 2차권선: 4.6 kVA $V_2=16.9[V_{rms}]$ $I_2=268[A_{rms}]$ (권선비 11:1)	변압기 3대 2차측: Center-tapped winding
출력단 필터 L_o	$2[\mu H]$, 1800[A]	전극과 거리 $2[m]$ 이상시 불필요
블로킹 커패시터 C_B	$C_B=20[\mu F]$, 200[V] $I_B=70[A]$	

3. 해수용 대전류 정류기의 제어기 설계

3-1 해수분해 정류기의 기동/정지 시퀀스

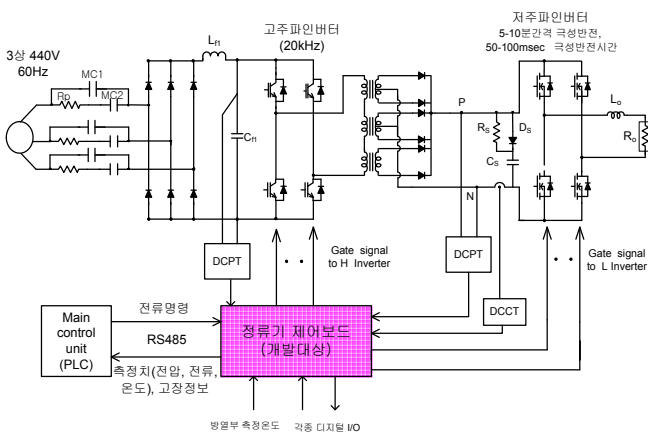


그림 3 해수분해용 정류기 회로도
Fig. 3 schematics for the rectifier Electrolysis of Seawater

해수분해용 정류기 전체회로도도 그림 3과 같다. 이를 제어하기 위한 기동 및 정지 시퀀스제어의 타이밍 다이어그램은 그림 4와 같다. 그림에서 보는 것처럼 주제어부의 PC는 RS-485 통신을 통해 정류기 제어보드로 기동신호(Start)를 보낸다. 정류기 제어보드는 이 기동신호로부터 정류기를 기동시키기 위해 DC Link 커패시터 충전용 접촉기 MC2를 ON시킨다. MC2가 ON됨에 따라 MC2와 직렬로 연결된 충전저항 R_p 와 AC/DC 컨

버터의 전파 정류 다이오드 정류기를 통해 DC Link 커패시터가 충전된다. 충전전압이 충분히 전원의 전파정류전압의 피크 값에 도달하도록 6sec간 지연시간을 가진 후, 주접촉기 MC1이 ON된다. 이로부터 0.6sec의 지연시간 후 MC2는 OFF 되고, 동시에 저주파 인버터 (LF-INV: MOSFET 인버터)의 MOSFET가 극성반전을 위한 스위칭동작을 개시하며, 0.5초의 시간지연 후 고주파 인버터(HF-INV: IGBT 인버터) ON 지령에 의해 DC/DC 컨버터가 PWM 동작을 개시하며, 전체 시스템이 해수분해용 정류기로 작동한다.

해수분해용 정류기의 정지동작은 앞에서 설명한 기동동작과 거의 반대 순서이다. 먼저 PC에서의 정지신호에 의해 정류기 제어보드는 고주파 인버터 OFF지령에 의해 IGBT 인버터가 OFF되며, 이어서 저주파 인버터 Stop 지령에 의해 IGBT가 OFF됨에 따라 입력단 인덕터의 전류가 영으로 감쇄되며, IGBT가 OFF된 후 120msec 후에 주접촉기 MC1이 OFF됨에 따라서 해수분해용 정류기는 전원으로부터 분리되며 정지하게 된다.

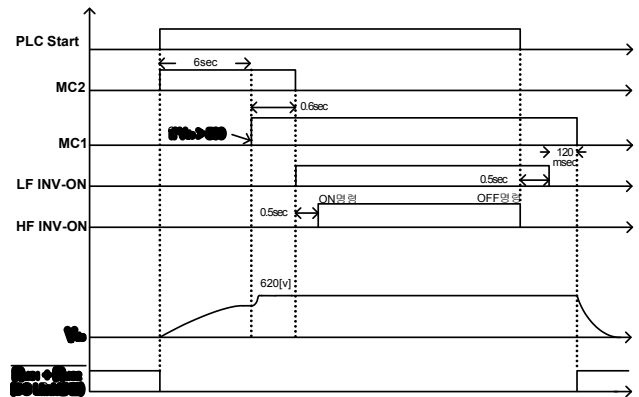


그림 4 해수분해 정류기의 기동/정지 시퀀스
Fig. 4 Electrolysis of Seawater rectifier start/ stop sequences

3-2 정류기의 전류제어 블록다이어그램

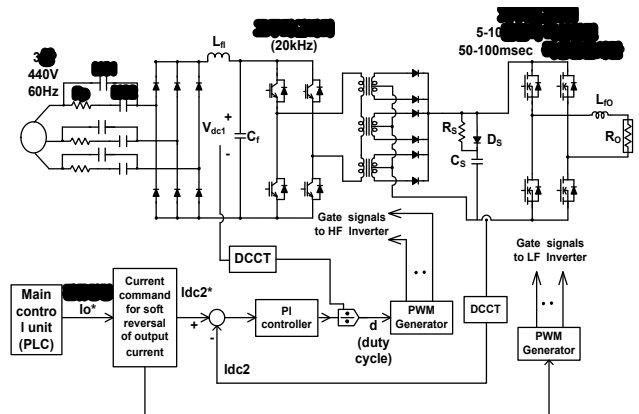


그림 5 정류기의 전류제어 블록다이어그램
Fig. 5 Rectifier current control block diagram

정류기를 제어하기 위한 제어 블록다이어그램은 그림 5와 같이 다이오드 정류부, 절연형 DC/DC 컨버터부, 저주파 인버터로 구성되어 있으며 정류기의 제어는 기본적으로 전류제어모드로 동작 한다. 전류 제어 모드는 출력단의 전류를 원하는 값으로 제어하는 closed-loop 방식으로 제어하는 방식이다. 전류제어모드는 출력단에 설치한 전류 측정 센서로부터 측정된 전류

값을 규정된 값으로 유지하도록 정류기의 DC/DC 컨버터부를 PWM제어하는 모드이다. 그림 6는 PI 제어를 사용하여 전류 제어모드에서 전류를 페루프로 제어하는 방식을 보이고 있다.

그러나 필요시 정류기는 전압모드로 작동시켜 출력단의 전압을 원하는 값으로 open-loop 방식으로 제어하는 것이 가능하다. 전압제어모드는 DC/DC 컨버터부의 출력전압을 직접 제어하는 모드이다. 전압제어모드는 피드백루프를 제거한 상태와 같다.

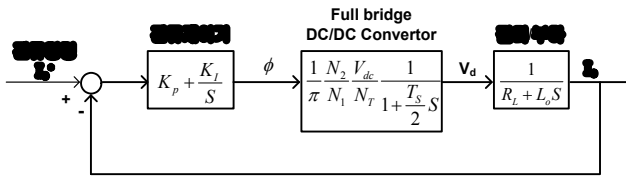


그림 6 정류기의 제어 블록다이아그램
Fig. 6 Rectifier's control block diagram

3-3 저주파 인버터의 극성 반전 제어 알고리즘

해수분해 정류기의 경우 고정극성으로 대전류를 계속해 흘리게 되면 이물질이 계속해서 쌓이므로 전기 분해 성능을 저하시킨다. 이를 제거 하기위해 5~10분 간격으로 극성 반전이 필요하다. 반전시의 스위칭 손실을 줄이기 위해 ZVS/ZCS 스위칭을 하기 위해 다음과 같은 알고리즘으로 동작한다. 100msec동안의 극성 반전 시간중 50msec 동안 전류 명령치를 감소 시킨 후 0V에서 스위칭 후 50sec동안 전류 명령치를 상승 시킨다.

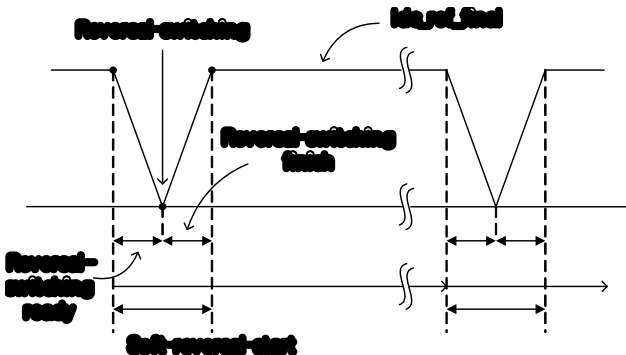


그림 7 저주파 인버터의 극성 반전 제어 알고리즘
Fig. 7 Low-frequency inverter control algorithms for inverting the polarity

4. 해수용 대전류 정류기의 시뮬레이션 결과

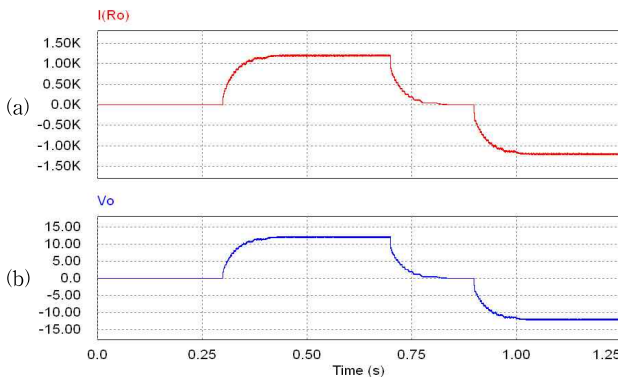


그림 8 정류기의 출력 전류(a) / 전압(b) 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Rectifier output current / voltage simulation waveforms

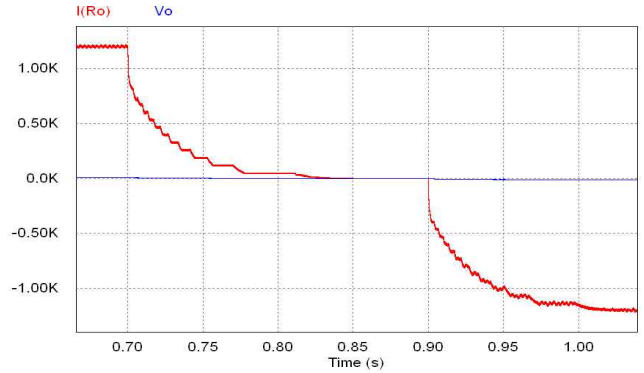


그림 9 극성반전 ZVS / ZCS 시뮬레이션 파형
Fig. 9 Polarity reversal ZVS / ZCS simulation waveforms

그림9는 동 시퀀스에 따라 최초구동 0.3초간 DC Link 커패시터 충전 시간을 가지며 출력전류가 안정적으로 1200A 까지 추종하여 유지 하는 결과를 보여 준다. 그림 9는 극성 반전 알고리즘에 따라 ZVS / ZCS 스위칭이 잘 이루어지고 있음을 보여준다.

5. 결론

전기분해, 도금, 수 처리 시설 및 장비는 본래의 목적을 원활히 달성하기 위해 성능이 우수한 저전압 대전류 정류기를 필요로 한다. 표 1과 같이 정류기의 특성을 비교한 결과 그림 3과 같이 3상 전파 정류기 + 고주파 인버터 + 고주파 변압기 방식이 저전압 대전류 정류기 방식으로 가장 적합한 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 성능이 우수한 해수 전기분해용 대전류 정류기의 전력회로 및 제어기설계를 하고 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증을 하였다.

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

참고 문헌

- [1] 김형운, 김진영, 김인동, 노의철, 김홍근 “저전압 대전류용 인버터 방식의 정류기 설계” “전력전자학회 2009년도 하계 학술대회 논문집, 2009. 7, pp. 687 ~ 689”
- [2] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001
- [3] 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
- [4] M. H. Rashid, Power Electronics-Circuits, Devices and Applications, 3rd edition, Pearson-Prentice Hall 2004.
- [5] 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.
- [6] 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.