

국제 핵융합실험로용 VS(Vertical Stabilization) 컨버터 제어기 해석 및 실험

조현식, 오종석*, 차한주
 충남대학교, 국가핵융합연구소*

Analysis and Experiment of VS(Vertical Stabilization) Converter Controller for International Thermonuclear Experimental Reactor

Hyunsik Jo, Jong Seok Oh*, Hanju Cha
 Chungnam National University, National Fusion Research Institute*

ABSTRACT

본 논문에서는 국제 핵융합실험로용 VS 컨버터 제어기 해석 및 실험에 대하여 서술하였다. VS 컨버터는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위해서 $\pm 1000V$ 의 정격전압과 최대 $\pm 25kA$ 의 전류를 공급해야 하며, 영 전류구간이 없이 4상한 운전을 수행할 수 있어야 한다. 이를 위해서 부하전류의 크기에 따른 동작모드 구분과 순환전류제어기, 차전류 제어기가 요구되며 싸이리스터의 소자 특성에 의하여 발생하는 중복각 보상과 싸이리스터의 전류실패를 방지하는 감마제어가 포함이 된 점호각이 보장 되어야 한다. 본 논문에서는 국제 열핵융합실험로용 VS 컨버터 제어기를 해석하고, 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 9ms의 순환전류 제어기 응답성과 계통에 50% 새그가 발생하였을 때 전류실패를 방지하는 감마제어의 타당성을 실험으로 확인하였다.

1. 서 론

국제 핵융합 실험로는 자기장 밀폐형 토카막장치로써 플라즈마 전류, 온도 및 형상을 안정적으로 제어하여 핵융합실험을 수행한다. 토카막 장치에서 발생한 고온의 플라즈마를 제어하기 위해서는 강력한 자장을 형성해주기 위한 다양한 대용량 전원장치가 사용된다^[1]. 그중에서 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위한 VS(Vertical Stabilization)컨버터는 플라즈마를 제어하기 위해서 부하 전류의 급격한 정역운전을 수행할 수 있어야 한다. 하지만 스위칭 소자로 싸이리스터를 사용하기 때문에 정역 운전모드 변환과정에서 데드타임 구간을 필요로 하며, 이 과정에서 유도성 부하에 영전류 불연속 구간이 발생하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 순환전류구간을 포함하는 4상한 운전이 수행되어야 한다^[2]. 본 논문에서는 순환전류제어와 감마제어에 대하여 해석하고, 실제 제어기를 RTDS와 연동하여 실험하였다.

2. VS 컨버터의 구조 및 제어기 구성

2.1 VS 컨버터의 구조

그림 1은 12펄스 위상 제어 정류기의 구성으로 이루어진 VS 컨버터의 구조를 나타내며, 12펄스로 위상을 제어하고 고조파의 영향을 저감하기 위하여 Y-Y와 Y- Δ 결선의 변압기를 사용한다. 각 싸이리스터 밸브의 직류 리액터(DCL)는 순환전류를 이용한 모드에 따른 컨버터의 안정적인 정역 전환 동작을 수행할 수 있게 하고 컨버터 출력에서 단락사고 발생 시 전류가 급격히 상승하지 않도록 제한해 준다. 초전도 코일을 대신하는 더미부하에 공급되는 출력전압 V_D 는 3상 AC전원 내부와

배선상의 인덕턴스로 이루어지는 L_S 에 의한 영향을 받으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)로부터 출력전압 V_D 가 전압 지령치를 추종하기 위한 순방향 점호각 α 를 유도하면 식(2)와 같이 표현할 수 있으며, 역방향 점호각은 $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$ 이다.

$$V_D = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \omega L_S I_D \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left\{ \left(V_{cmd} + \frac{3}{\pi} \omega L_S I_D \right) \cdot \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2} V_{LL}} \right) \right\} \quad (2)$$

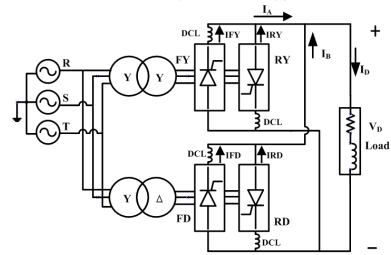


그림 1 VS 컨버터의 구조

Fig. 1 Configuration of VS converter

2.2 VS 컨버터의 제어기

VS 컨버터의 운전모드를 그림 2에 나타낸다. 모드 5에서는 순방향 컨버터 FY와 FD가 12펄스로 동작을 하며, 모드 5에서는 역방향 컨버터 RY와 RD가 12펄스로 동작을 한다. 모드 3에서는 순방향 컨버터 FY가 6펄스로 동작을 하며, 모드 3에서는 역방향 컨버터 RD가 6펄스로 동작을 한다. 모드 1과 1에서는 순방향 컨버터 FY와 역방향 컨버터 RD가 순환전류모드로 동작을 한다. 그림 3은 VS 컨버터를 제어하기 위한 제어기의 구조도를 나타낸다. 식 (2)를 통하여 전압 지령치에 따른 점호각이 계산이 되며, 모드 ± 5 에서는 각 밸브가 부하전류를 균등하게 분담하지 않을 경우 발생하는 차전류를 제어하기 위한 차전류 제어기가 동작을 하고, 모드 ± 1 에서는 순환전류 제어기가 동작을 하게 된다. 또한 부하전류가 설정값 I_{max} 이상이 되면 부하전류를 제한하는 전류제한기가 동작을 한다. 이외에 계통전압에 단락이나 새그가 발생하였을 때 전류실패를 방지하기 위한 감마제어가 최종 점호각 출력단에 추가되어 있다.

2.3 순환전류 제어기와 감마제어

그림 4는 순환전류 모드 등가회로를 나타낸다. V_L 은 FY밸브와 RD밸브의 출력전압인 V_{FY} 와 V_{RD} 의 합이다. 순환전류 I_{CR} 의 값은 DCL에 걸리는 V_L 에 의해 제어되며, 이는 식 (3)과 같다. 순환전류 제어기는 식 (3)에서 계산되는 순환전류값과 식 (4)로 표현되는 순환전류 지령치와의 오차를 0으로 만드는 위상마진이 60도를 만족하는 PI 제어기의 게인을 설계하였으나, 지면

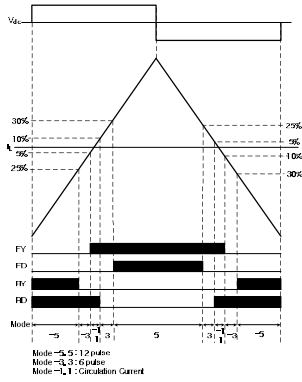


그림 2 VS 컨버터 운전모드
Fig. 2 Operation mode of VS converter

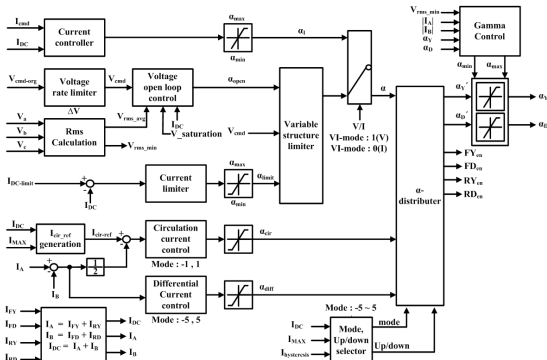


그림 3 VS 컨버터 제어기 구조도
Fig. 3 Control block diagram of VS converter

관계상 제어기 해석 및 설계부분은 생략한다. 순환전류 제어기의 출력은 식(2)로부터 계산되는 α_1 에는 더해지고 α_2 에는 뺄으로써 구현된다.

$$I_{CIR} = \frac{V_L}{2(Ls + R)} = \frac{I_A - I_B}{2} \quad L = 150\mu H, R = 1m\Omega \quad (3)$$

$$I_{CREF} = \{(0.15 \times I_{max}) - (|I_L| \times 0.5)\} \quad (4)$$

싸이리스터는 역전압이 걸리거나 흐르는 전류가 소거되어야 턴오프가 되는 특성을 가지고 있다. 따라서 전류실패를 방지하기 위해서 점호각의 최대값을 식 (5)와 같이 제한하며, γ_{min} 값은 일반적으로 15도정도로 설정하지만 VS 컨버터의 γ_{min} 은 22도이다. μ_{max} 는 중복각으로써 식 (6)으로 표현된다. 따라서 계통에 단락이나 새그가 발생하여도 싸이리스터의 점호각의 최대값을 감마제어로 제한하기 때문에 전류실패를 방지할 수 있다.

$$\alpha_{max_lim} = 180^\circ - \mu_{max} - \gamma_{min} \quad (5)$$

$$\mu_{max} = \cos^{-1} \left(\cos \alpha_{max} - \frac{\sqrt{2}\omega L_s I_{max}}{V_{rmsmin}} \right) - \alpha_{max} \quad (6)$$

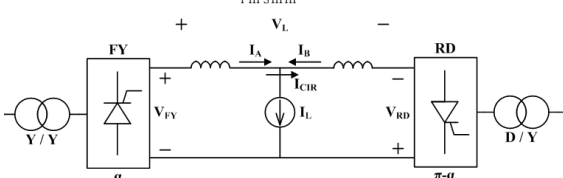


그림 4 순환전류 모드 등가회로
Fig. 4 Circulation current mode equivalent circuit

2.4 실험결과

앞 절에서 서술한 제어기들의 타당성을 증명하기 위하여 실제 하드웨어 제어기와 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 연동하여 실험을 진행하였다.

전압지령치를 VS 컨버터의 출력전압인 V_D 가 정상적으로 추종하고 부하전류 크기에 따라서 동작 모드가 구별되는 것을 그림 5에서 확인할 수 있다. 그림 6에서는 순환전류 제어기가 정상적으로 동작하여 순환전류 I_{CIR} 이 지령치인 I_{CREF} 를 9ms의 응답성을 가지고 추종하는 것을 RTDS에서 측정된 파형이다. 그림 7은 감마제어에 대한 RTDS 측정 파형으로써, 그림 7(a)는 감마제어가 없을 때 계통에서 50% 새그가 0.3초 발생했을 때 컨버터 변압기 2차측의 전류실패가 발생하는 것을 나타내며, 그림 7(b)는 감마제어가 정상적으로 동작하여 전류실패가 방지되는 것을 확인할 수 있다.

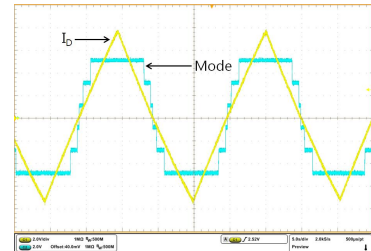


그림 5 부하전류크기에 따른 동작모드
Fig. 5 Operation mode according to load current

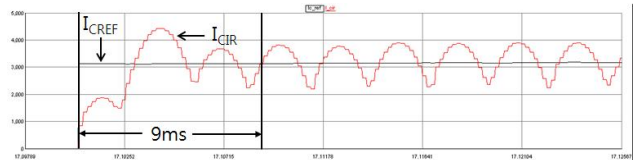
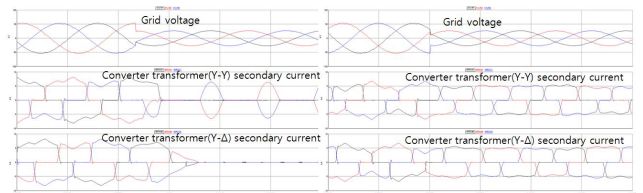


그림 6 순환전류 제어기의 응답성(RTDS)
Fig. 6 Response of circulation current controller(RTDS)



(a) Without gamma control (b) With gamma control
그림 7 계통 30% 새그 발생시의 감마제어(RTDS)
Fig. 7 Gamma control at grid 30% sag(RTDS)

3. 결론

본 논문에서는 국제 핵융합실험로용 VS 컨버터 제어기 해석 및 실험에 대하여 서술하였으며, 부하전류의 크기에 따른 동작모드 구분과 순환전류 제어, 차전류 제어, 중복각 보상, 감마제어가 포함이 된 VS 컨버터 제어기를 해석 하고, 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 9ms의 순환전류 제어기 응답성과 계통에 50% 새그가 발생하였을 때 전류실패를 방지하는 감마제어의 타당성을 실험하였다.

“이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업임(No. 2007 -2006995)”

참고 문헌

- [1] 최정원, “ITER 초전도자석 전원계통”, 전력전자학회지, 제 17권 제4호, pp.33-38, 2012.08.
- [2] C.Lee, H.Liu, K.Hwang, S.Lee, H.Park, C.Kim, J.S.Oh, J.H.Suh, J.Choi, “A Novel Control for Four quadrant Operation of ITER VS Converter”, Electrical Machines and Systems(ICEMS), 2013 International Conference, pp. 1657-1661, 2013.