

RTDS의 RSCAD를 이용한 4상한 컨버터의 순환전류모드 해석 및 구현

정선용, 차한주
충남대학교 전기공학과

Analysis and Implementation of 4-Quadrant Converter Circulating Current using RSCAD of RTDS

Seonyong Jung, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

ITER(국제 열핵융합 실험로) 핵융합 토카막 장치의 초전도 코일 부하에는 대용량 AC DC 4상한 컨버터가 필요하다. 4상한 컨버터는 대용량 부하에 전력을 공급하기 위해서 12펄스 위상 제어 정류기의 양방향성 병렬 구조로 이루어져 있다. 컨버터의 안정된 정역 변환 동작을 위한 방법으로 순환 전류를 이용한 알고리즘이 필요하며, 본 논문에서는 4상한 컨버터의 안정된 동작을 위한 순환전류의 알고리즘을 해석 및 연구하였다. 또한 RTDS(Real Time Digital Simulator)의 RSCAD 시뮬레이션을 통해 동작 모드에 따른 컨버터의 스위칭 동작을 확인하였으며, 실제 4상한 컨버터를 RTDS와 연계하여 순환전류를 이용한 정역 운전 변환에 대한 실험 결과를 입증하였다.

1. 서론

원자력발전에서 이용되는 하나의 원자가 두 개의 원자로 나누어지는 과정을 핵분열이라고 하며, 핵융합은 원자와 원자가 만나서 새로운 핵을 만들어 내는 반응이다. 이런 원리를 이용한 핵융합로는 물에서 얻을 수 있는 중수소와 삼중수소를 연료로 하며 1억도 이상의 고온에서 플라즈마 상태의 유지가 필요하다.^[1] 플라즈마의 제어로 인해 발생하는 에너지를 이용한 핵융합은 폐기물이 없는 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 토카막 장치에서 발생된 고온의 플라즈마를 제어하기 위해서는 부하 전류의 급격한 정역운전을 수행하는 대용량 컨버터가 요구되며, 컨버터의 정역 전환 과정에서 부하의 영전류 불연속 구간을 제거하기 위하여 순환전류를 이용한다. 따라서 별도의 전류제어기를 통해 부하전류와 차전류가 기준 값을 추종하도록 설계하여야한다. 본 논문은 부하전류를 제어하는 방식으로 순환전류의 크기를 제어 및 이용하였고, RTDS를 통해 순환전류 구간을 포함한 모드에 따른 스위칭 동작과 4상한 컨버터에 적용한 실험결과를 확인하였다.

2. 4상한 컨버터

2.1 4상한 컨버터의 구조

그림 1은 12펄스 4상한 컨버터의 구조를 나타낸다. 4상한 컨버터는 3상 AC전압을 입력으로 하는 Y-Y와 Y-Δ결선의 두 변압기를 사용하며 FY와 RY, FD와 RD 컨버터의 양방향성 병렬 구조를 가진다. 각 변압기의 2차측 결선을 Y와 Δ로 하여

30도의 위상차를 갖게 되면 순방향과 역방향의 전류를 12펄스로 위상을 제어하여 부하에 전류를 공급할 수 있다. 부하전류 I_L 의 크기는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_L = IFY + IFD + IRY + IRD \quad (1)$$

각 컨버터의 직류 측 출력 전압을 이용하여 순방향 점호각 (α_1)과 역방향 점호각(α_2)간의 관계를 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1 \quad (2)$$

컨버터의 안정적인 정역운전을 위한 순환전류를 이용하기 위해서는 컨버터의 출력 단에 직류리액터가 필요하다. 직류리액터의 인덕턴스를 큰 값으로 설정할 경우 스위칭 동작을 안정화시킬 수 있지만, 부하에 공급되는 에너지를 감소시키므로 부하 리액터의 10% 정도로 설계한다. 따라서 순환전류의 크기는 직류리액터 인덕턴스와 점호각 α 의 영향을 받는다.^[2]

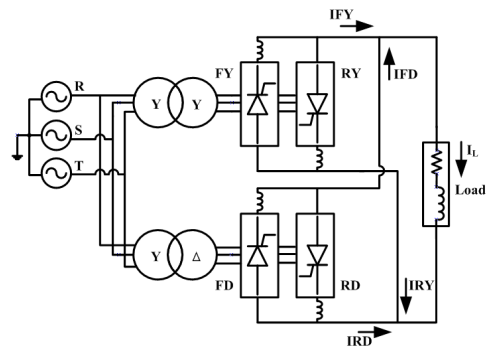


그림 1 4상한 컨버터의 구조
Fig. 1 Structure of 4-Quadrant Converter

2.2 순환전류 모드를 포함한 컨버터의 동작 원리

4상한 컨버터는 12펄스로 싸이리스터를 스위칭하여 정(+)방향일 경우에는 컨버터 FY와 FD, 역(-)방향일 경우에는 RY와 RD의 출력전류가 부하에 전류를 공급한다. 그림 2는 순환전류 구간을 포함한 컨버터의 정역 전환 과정을 모드에 따라 동작하는 것을 나타낸다. 컨버터의 출력전류 IRY와 IRD가 부하전류를 동일하게 분배하여 공급하다가 정역전환을 위해 부하전류의

크기가 작아지면 IRY는 중단하고, IRD만 음(-)방향으로 부하에 전류를 공급한다. 그리고 순환전류를 이용한 구간에서는 정역전환을 위해 IFY와 IRD가 동시에 부하에 전류를 공급한다. 부하전류의 크기가 커지면서 IRD는 중단하고, IFY만 양(+)방향으로 부하전류를 공급하며 IFD의 동작으로 양(+)방향으로 12 펄스에 의한 전류를 부하에 공급할 수 있다.

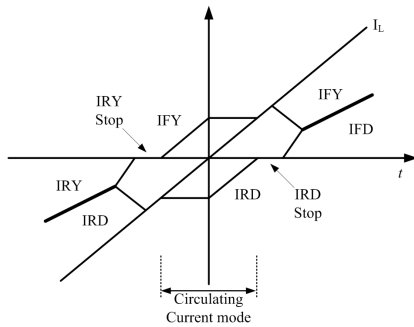


그림 2 모드에 따른 컨버터의 동작
Fig. 2 Operation of 4-Quadrant Converter

2.3 전류제어기의 구조

변압기 2차측의 Y결선과 Δ결선에 의한 각 컨버터가 병렬 운전하는 조건에서 부하전류를 균등하게 분담하지 않으면 차전류 I_c 가 발생한다. 각 변압기의 컨버터 출력전류(Y Y 컨버터 출력전류: I_A , Y Δ결선 컨버터 출력전류: I_B)와 차전류간의 관계는 식 (3)과 같다.

$$I_c = \frac{I_A - I_B}{2} \quad (3)$$

그림 3은 4상한 컨버터의 부하전류와 차전류(순환전류) 제어를 위한 PI전류제어기의 구조도이다. 기준 값과 부하전류간의 오차를 보상하는 출력값에 차전류(순환전류)를 제어하는 출력값을 각각 α_1 와 $\Delta\alpha$ 로 계산하여 기준 값을 추종하기 위한 점호각 α_1, α_2 를 각 변압기에 연결된 컨버터로 전달된다.

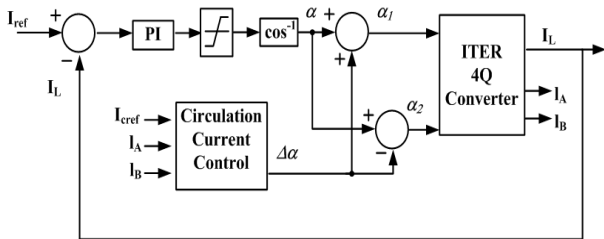


그림 3 전류제어기의 구조도
Fig. 3 Structure of Current Controller

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 4는 RTDS를 이용한 4상한 컨버터의 부하 전류 정역 변환 과정을 나타낸 시뮬레이션 결과 파형이다. 순환전류 구간의 크기를 제어하여 모드에 따른 컨버터의 안정적인 정역변환 동작을 확인하였다. 그림 5는 부하전류 하강구간에 대한 각 변압기의 2차측 전류를 확대한 파형이다. 정역변환을 위해 컨버터 FD와 FY의 동작이 정지되는 것을 확인하였다.

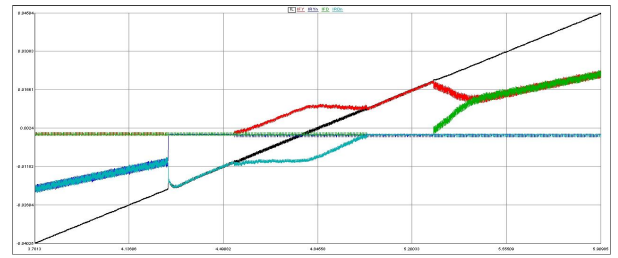


그림 4 RTDS를 이용한 4상한 컨버터의 순환전류 시뮬레이션
Fig. 4 Circulating Current Simulation of 4-Quadrant Converter using RTDS

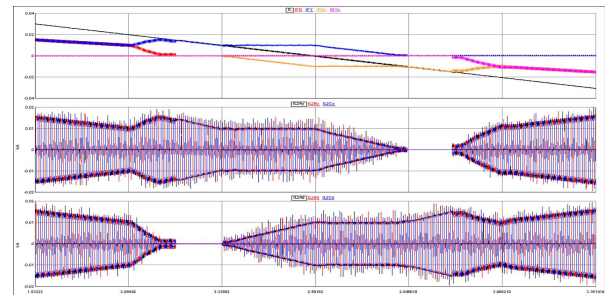


그림 5 변압기 2차측 전류 파형
Fig. 5 Outputs of Secondary winding Current of Transformer

그림 6은 RTDS와 실제 4상한 컨버터를 연계하여 부하전류 I_L 와 컨버터 출력전류 IFY, IRY의 실험 파형을 나타낸다.

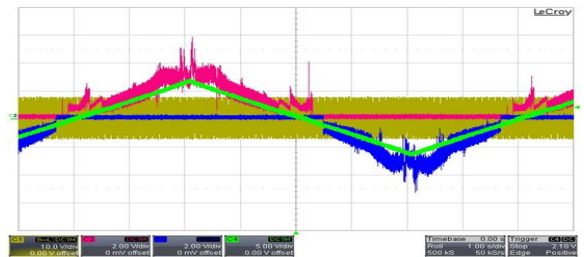


그림 6 RTDS & 4상한 컨버터 부하전류 파형
Fig. 6 Outputs of Load Current about RTDS & 4-Quadrant Converter

3. 결론

4상한 컨버터의 부하전류의 안정된 정역 전환 동작에 이용되는 순환전류 모드에 대한 해석을 하였다. 그리고 부하전류의 차이를 보상하는 제어 시스템과 순환 전류의 크기를 제어하는 PI 전류제어기를 설계하였다. 또한 RTDS의 시뮬레이션을 통해 모드에 따른 동작을 확인하였으며, 실제 컨버터와 연계하여 4상한 컨버터의 동작을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학 제 3판", 2011.
- [2] 정교범, 지준근, 목형수, "순환전류를 이용한 ITER Vertical Stabilization 컨버터의 출력 제어", 전력전자학회 논문지, 제14권 제5호, pp. 379 386, 2009. 10.