

대전력 Thyristor 다병렬 구조의 전류배분

최정원¹⁾, 오종석¹⁾, 서재학¹⁾, 안중수²⁾, 권오정²⁾
국가핵융합연구소¹⁾, (주)플라스포²⁾

Current Sharing for the Multi-parallel Configuration of High Power Thyristors

J. Choi¹⁾, J.S. Oh¹⁾, J.H. Suh¹⁾, J.S. An²⁾, O. Kwon²⁾
National Fusion Research Institute¹⁾, PLASPO Co. Ltd.²⁾

ABSTRACT

토카막(Tokamak)형 핵융합실험장치의 초전도전자석 전원공급장치는 수 kV, 수십 kA의 대전력 직류전원을 얻기 위한 ac-dc 컨버터가 필요하다. 이와 같은 고전압, 대전류 사양을 얻기 위하여 일반적으로 thyristor ac-dc 컨버터를 사용하며, 필요한 전류사양을 충족하기 위하여 다수의 대전류용 thyristor 소자를 병렬로 연결하여 각 암(arm)의 스위치를 구성한다. 이와 같이 다수의 반도체 스위치 소자를 병렬로 연결하여 사용하는 경우에는 각 단위 소자별 전압강하, 직렬회로 임피던스 및 전류 경로 차이 등의 이유로 균등한 전류 배분을 얻기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 각 암(arm)마다 8개씩의 대전류 thyristor를 병렬로 연결 구성하여 제작한 시작품 단상 컨버터에 대한 전류배분 실험을 실시하고 그 결과를 분석 및 정리한다.

1. 서론

ITER(국제열핵융합실험로)와 같은 대형 TOKAMAK 핵융합실험장치의 초전도전자석에는 수 kV, 수 kA ~ 70 kA에 달하는 대전류 직류전원의 공급이 필요하다. ITER 초전도전자석 전원공급장치는 상용 교류전원으로부터 2상한 또는 4상한 운전이 가능한 대전류 ac-dc 전력변환기를 얻기 위하여 개별 스위치 소자를 다수 병렬로 연결한 구조의 thyristor ac-dc 컨버터 방식을 사용한다. 이와 같이 여러 개의 thyristor를 병렬로 연결하여 사용하는 데에는 다이오드 정류기의 병렬 연결에 적용하는 개별 소자 간 전압강하, 직렬회로 임피던스 및 전류 경로의 차이 등 여러 가지 문제를 고려해야 한다. 대전력 thyristor의 병렬 연결 구조에 있어서 가장 기본적인 문제는 각 개별 소자 간에 균등한 전류 분배를 보장해야 한다는 것이다. Thyristor 컨버터에서는 적절한 위치에서 게이트 구동을 통하여 스위치를 턴온해 줌으로써 출력을 제어하는데, 병렬로 연결된 thyristor들 중 지나치게 빠르거나 느린 턴온 특성을 갖는 소자들인하여 전류 분배를 적절히 맞추기가 쉽지 않다. 즉, 상대적으로 턴온 시간이 짧은 스위치가 있을 경우에는 이 스위치가 대부분의 전류를 부담하기 때문에 나머지 스위치들의 턴온을 방해하거나 균등한 전류 배분을 저해한다. 이 논문에서는 대전력 다병렬 thyristor 병렬 구조에서 개별 스위치의 턴온 및 전류 배분 특성을 확인하기 위하여 8병렬 thyristor 구조의 11.25 kA급 단상형 ac-dc 컨버터를 제작 및 실험하고 그 결과를 분석 및 정리한다. [1]

2. 8병렬 Thyristor 단상 AC-DC 컨버터의 제작 및 실험

2.1 Thyristor 스위치 다병렬 구조의 고려사항^[1]

Thyristor와 같은 반도체 정류기 스위치 소자는 제조 공차로 인하여 각 제품별 온-상태 전압강하(V_T)가 서로 다르다. 대전력 용도에서 이와 같이 각각 다른 V_T 특성을 고려하고 thyristor 스위치를 다병렬 구조로 사용할 때에는 V_T 값의 차이를 200 mV 이내로 제한하는 것이 좋다. 필요에 따라 이 차이 값을 50 mV 이내로 하는 것도 가능하지만, 이러한 경우에는 소자의 구입가 상승을 감수해야 한다.

Thyristor 스위치 소자는 사용 온도에 따라 V_T 가 다른 특성을 갖는다. 일반적으로 thyristor는 소자에 흐르는 전류가 비교적 낮은 범위에서는 온도가 낮을 경우에 V_T 가 높고, 보다 높은 전류 범위에서는 온도가 높을 경우에 V_T 가 높은 특성을 갖는다. 따라서 스위치들이 병렬로 연결되어 인가되는 전압이 같게 되는 구조에서는 온도가 높은 소자에 전류가 덜 흐르기 때문에 각 소자별 온도가 저절로 평균화되는 이점이 있다. 또한, 각 소자별 온도 차이가 있으면 V_T 가 달라지는 문제가 있으므로 병렬로 연결된 그룹 내의 모든 소자들이 같은 온도에서 동작하도록 방열판을 공유하도록 하거나 냉각온도가 같게 운전하는 등의 대책이 필요하다.

Thyristor 다병렬 구조에서 각 소자 간 버스바 연결방식도 전류 분배에 큰 영향을 끼칠 수 있기 때문에 원형(실린더형) 배치구조를 사용하기도 하지만, 대전류 응용에는 적합하지 않아 직선형 버스바 구조가 주로 적용된다. 이러한 구조에서는 최 외곽에 위치한 소자에 전류가 몰리고 중간으로 갈수록 전류가 작아지는 특성이 있으므로 V_T 가 큰 소자를 최 외곽에 배치하고 낮은 V_T 의 소자는 중간 부분에 배치하는 것이 좋다.

2.2 8병렬 단상 ac-dc 컨버터 제작 및 실험^[1]

2.1절의 내용을 고려하여 표 1의 사양을 갖는 단상형 ac-dc 컨버터 시작품을 제작하였다. Ac 버스바와 dc 버스바는 직선형 알루미늄 평판을 사용하였고 dc 버스바를 사이에 두고 thyristor 스택 2조를 양면으로 조립하고, 이 양면 조립 스택을 4열로 배열하여 컨버터의 1개 암 당 총 8개의 thyristor가 병렬로 연결되도록 하였다. 각각의 thyristor는 공통의 dc 버스바에 상·하 1개씩의 수냉식 방열기와 절연체를 순서대로 적층하고 ABB사의 SAC 22V1311 클램프를 이용하여 조립하였다.

표 1 8병렬 단상 thyristor ac-dc 컨버터 시작품의 사양
Table 1 Specifications of single phase thyristor ac-dc converter configured with 8 parallel switches

컨버터 구조	단상 폴-브리지	출력전류	11.25 kA
출력전압	1,550 Vdc	출력전력	17.44 MW



그림 1 8병렬 단상 ac-dc 컨버터 시작품
Fig. 1 The prototype of single phase thyristor ac-dc converter configured with 8 parallel switches

양면 조립된 각각의 thyristor는 상부 방열기에 부가되어 있는 단자로부터 알루미늄으로 제작된 플렉시블 버스와 퓨즈블럭을 통하여 ac 버스바로 연결된다. 즉, 직렬로 연결된 thyristor, 방열기, 플렉시블 및 퓨즈블럭 회로 8조가 병렬로 ac-dc 버스바 간을 연결하여 컨버터의 1개 암을 구성한다.

표 2는 컨버터의 임의의 1개 암을 구성하고 있는 thyristor에 대한 V_T 데이터이다. V_T 데이터 중 한 세트는 Infineon사에서 출하 시 소정의 조건에서 측정된 것이고, 다른 한 세트는 각각의 thyristor에 약 3 kA의 전류를 흘리며 측정된 것이다.

표 2 한 개의 암을 구성하고 있는 thyristor의 온-상태 전압 V_T 데이터

Table 2 On-state voltage V_T data of the thyristors consisting of an arm

순번	Thyristor 배치번호	Infineon 데이터 V_T @ 6 kA	실측 데이터/순위 V_T @ 3 kA
1	#17	1.67 V	1.500 Vdc/ 7
2	#18	1.67 V	1.313 Vdc/ 1
3	#19	1.67 V	1.540 Vdc/ 8
4	#20	1.67 V	1.400 Vdc/ 4
5	#21	1.68 V	1.340 Vdc/ 2
6	#22	1.68 V	1.370 Vdc/ 3
7	#23	1.68 V	1.490 Vdc/ 6
8	#24	1.69 V	1.470 Vdc/ 5

표 2의 데이터를 살펴보면 제조사의 제공 데이터 순으로 thyristor를 배치하였지만, 스택을 조립한 후 실측한 데이터는 순서가 불규칙함을 볼 수 있다. 이와 같이 제조사의 제공 데이터 순으로 실측 데이터가 정렬되지 않은 이유 중 하나로 대직경 thyristor가 전체 면적에 걸쳐 균일한 압력 분포로 조립되지 않은 상태를 들 수 있다. 시작품 컨버터의 thyristor 스택을 조

립하기 전 소자의 상·하부에 압력 감응지(후지필름 제조)를 삽입하고 압력 분포를 측정해 본 결과 사용한 방열판의 표면 편평도 불균일로 인하여 thyristor의 일부분은 과도하게, 나머지 부분은 과소하게 압력이 가해지고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 이와 같이 압력 분포가 불균일하게 조립되어 있는 관계로 각 소자별 온-상태 전압강하인 V_T 가 제조사의 제공 데이터의 정렬상태와는 다르게 나타나고 있음을 추정할 수 있다. 표 3은 4 조의 8병렬 암 중 하나에 대하여 분배 전류를 측정된 데이터이다. 표 2의 V_T 실측 데이터와 표 3의 소자전류 1(정상 운전 전류 상당) 데이터를 살펴보면 대체적으로 V_T 가 낮은 소자의 전류가 높게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 소자전류 2의 단락 전류 상당 데이터를 살펴보면 전류 배분의 순서가 얼마간 바뀌어 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 낮은 전류로 동작할 경우와 높은 전류로 동작할 경우에 각 소자의 특성이 바뀔 수 있음에 기인한다. 한편, 표 3은 thyristor 병렬구조에서 동작 전류가 높아질수록 전류 분배 불균형율이 작아짐을 보여준다.

표 3 8병렬 thyristor 구조의 전류 분포 측정 결과

Table 3 Experimental result of current distribution for a 8 parallel connected thyristor arm

순번	Thyristor 배치번호	소자전류 1/순위 (전체전류=7 kA)	소자전류 2/순위 (전체전류=165 kA)
1	#17	0.29 kA/ 7	22.92 kA/ 2
2	#18	1.54 kA/ 1	19.33 kA/ 7
3	#19	0.51 kA/ 6	21.24 kA/ 3
4	#20	1.42 kA/ 2	20.74 kA/ 4
5	#21	1.35 kA/ 3	19.82 kA/ 5
6	#22	1.12 kA/ 4	19.38 kA/ 6
7	#23	0.00 kA/ 8	17.32 kA/ 8
8	#24	0.79 kA/ 5	23.70 kA/ 1

3. 결론 및 과제

다병렬 thyristor 구조에서 각 스위치 소자 간 전류 분배를 측정해 본 결과 실측된 V_T 값의 순서에 따라 분담하는 전류의 크기가 결정되는 경향이 있고 동작전류가 높아질수록 소자 간 전류 분배의 불균형율이 작아짐을 볼 수 있었다. 그러나, 소자 냉각용 방열기 표면의 불균일이 원인으로 추정되는 제조사가 제공한 V_T 데이터와 실측 데이터의 정렬 순위 경향이 다른 문제를 알아보기 위하여 양호한 품질의 방열기를 적용한 실험 및 고찰을 다음 과제로 남겨둔다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부, 지식경제부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2009-0064120)의 연구결과임.

참고 문헌

[1] Dynex Semiconductor, *Turn-On Performance Of Thyristors In Parallel*, Dynex Semiconductor 2002 Tech. Documentation, AN4999-4.1, July 2002, United Kingdom.