삼선 지락사고 발생시 매트릭스형 한류기용 리액터의 전자장 분포 해석

논 문
60-2-37

Electromagnetic Field Distribution of Reactors for Matrix-type SFCLs under Triple Lines-to-Ground Faults

정 동 철* · 한 태 희†
(Dong Chul Chung · Tae Hee Han)

Abstract - In this paper we reported the characteristics of 1 line, 2 lines and 3 lines-to-ground fault of matrix-type SFCLs (MFCLs) and the electromagnetic field distribution of reactors for MFCLs under the same cases of ground faults. To do this, we fabricated MFCLs with 6 reactors for 3 phases. Each reactor had the length of 270 mm and diameter of 80 mm. 6 reactors were made by Bakelite. We reported experimental results, including fault currents, fault voltages and magnetic field distribution according to phase differences between each phase. We confirmed that experimental results will be useful in next future plan for real power grid.

Key Words : Superconducting fault current limiters (SFCL), Matrix-type SFCL, Reactor, Magnetic field. Ground fault.

1. 서 론

전력계통의 과밀화로 인한 사고 전력의 발생은 수용가와 산업체, 국가 기간 시설들이 연결된 계통망에 막대한 영향을 주는 것은 기지의 사실이다. 따라서 사고전력을 효과적으로 차단할 수 있는 다양한 기술들이 제안되어온 바 있다. 이러한 기술 중 초전도 한류기는 사고 전력은 1/4 주기 (시간으로 환산시 0.0042초) 안에 차단할 수 있어 개발 초기부터 실 계통에 투입가능성이 높은 분야로 점차왔다 [1-3].

초전도 한류기는 초전도체 고유의 상전이 특성을 이용한 저항형 한류기를 시작으로 변압기형 한류기, 자속 구속형 한류기, 유도형 한류기 등으로 발전을 거듭하여왔지만, 현재에 이르러 가장 효과적인 한류기는 매트릭스형 한류기로 보고 되고 있다 [4-5].

매트릭스형 한류기는 기존의 저항형 한류기의 장점과 유도형 한류기의 장점을 결합시킨 것으로 최초 사고 발생시 사고를 감지하는 트리거 파트의 초전도 소자와 실제 사고 전류를 제한하는 전류제한 파트, 일부 사고 전류를 우회시켜 자기장을 발생시키는 리액터로 구성되어있다. 매트릭스형 한류기의 간단한 원리를 살펴보면 사고 전류가 한류 시스템으로 유입시 트리거 부의 초전도체는 빠른 켄치에 의해 사고 전류의 일부를 리액터로 우회시킨다. 우회된 사고전류는 리액터 내에 탑재된 전류제한 파트의 초전도체에 강한 자기장을 인가, 초전도체의 급속 켄치를 유도한다. 이때 리액터는 자기장의 인가뿐만 아니라 사고전력의 일부를 분담할 수 있다. 이러한 사고전력의 분담은 초전도 소자의 전력분담을

줄여줄 수 있기 때문에 동일한 숫자의 초전도체를 가지고 좀더 높은 용량의 한류 시스템 설계가 가능해진다.

본 논문에서는 매트릭스형 한류기에서 중요한 역할을 담당하는 리액터의 사고전류 우회와 자기장의 발생에 대하여 조사하였다. 또한 1선 지락사고, 2선 지락사고, 3선 지락사고에 따른 리액터의 전기적, 자기적 거동을 분석하였으며 이를 바탕으로 효과적인 리액터 내의 초전도체 배치에 대하여 보고하였다.

2. 매트릭스형 한류기용 리액터의 제작

그림 1에 본 실험을 위해 제작된 리액터의 사진을 제시하였다. 리액터는 베이클라이트 재질로 제작하였으며 리액터의 길이는 270 mm, 리액터의 직경은 80 mm 였고 동일한 재원으로 총 6개의 리액터가 제작되었다. 또한 초전도 소자 켄치 시 발생하는 기포의 원활한 유통을 위해 리액터의 정중앙에 타원형의 홈을 내었다. 제작된 리액터 틀에 직경 1 mm의 구리선을 570 회 감았으며 LCR 메터를 이용하여 임피던스를 측정해 본 결과, 각 리액터들은 대략 12.6 mH의 인덕턴스와 8.6 Ω 의 저항을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

그림 2에 R, S, T상으로 이루어진 매트릭스형 한류기 시스템의 사진을 제시하였다. 그림에서 보여지는 것처럼 각 상은 2개의 리액터가 병렬로 연결되어있으며 각 리액터

그림 1 제작된 리액터 사진.

Fig. 1 Photograph of fabricated reactors

* 중신회원 : 우석대학교 전기전자공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 중원대학교 에너지자원공학부 교수

E-mail : hantaehhee@jwu.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 4일

최종완료 : 2011년 1월 18일

안에 1개의 트리거 파트 초전도 소자와 2개의 사고전류제한 파트 초전도 소자가 탑재되어있다. 초전도 소자는 켄치 발생시 원활한 저항 발생을 위해 meander line 형태의 선로를 가지고 있다. 제작된 meander line의 폭은 2 mm, 전체 길이는 540 mm였다. meander line의 제작을 위해 사용된 초전도 소자의 임계 온도는 87-88 K, 임계전류밀도는 2-3 MA/cm²였으며 상온에서 공기 중의 수분에 의한 열화를 막기 위해 YBCO 박막에 0.1 um의 금을 증착하였다. 따라서 전체적으로 총 18개의 초전도 소자가 각각 R, S, T상에 3개씩 탑재되었다.

그림 2 R, S, T상으로 이루어진 삼상 한류기용 리액터 사진.
Fig. 2 Photograph of reactors for SFCLs consist of R, S and T phases.

제작된 매트릭스형 한류기의 특성 실험을 위해 참고문헌 [4-5]에 제시된 실험회로와 동일한 실험회로를 사용하였다. 인가된 사고 전압은 540 V이고 총 5 주기 동안 사고 전류를 인가하였으며 시험 완료 후 실험 회로에 사용된 모든 스위치를 개방하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 1, 2, 3선 지락 사고 발생시 리액터의 전류 패턴

그림 3에 1, 2, 3 선 지락사고가 발생했을 때, 리액터에서의 사고전류 패턴을 제시하였으며 I_{LR1} , I_{LR2} 는 R상에서 두 리액터의 전류를 I_{LS1} , I_{LS2} 는 S상에서 두 리액터의 전류를 I_{LT1} , I_{LT2} 는 T상에서의 두 리액터의 전류를 의미한다. 그림 3의 (a)는 3개의 상 중 R상에서 1선 지락사고가 발생했을 때 R 상으로 우회하는 일부 사고 전류의 패턴을 제시한 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 최초 사고전류가 인가되었을 때 트리거 파트의 초전도 소자의 켄치에 의해 a-1 점에서 두 사고 전류 I_{LR1} , I_{LR2} 가 리액터로 우회를 시작하며 a-2 지점에서 17.5 A로 최고치를 이루는 것을 알 수 있다.

이때 사고가 발생하지 않은 S 상과 T 상에서 리액터의 전류 우회는 없었으며 이는 정상상태에서 전류가 임피던스가 없는 초전도 소자로 전류가 흐르고 있음을 의미하는 것이다. 그림 3의 (b)는 R상과 T상에서 2선 지락사고가 발생, 두 상의 트리거 파트 초전도 소자의 켄치에 의해 각각 R상과 T상의 리액터로 사고 전류의 일부가 우회하는 형태를

(a)

(b)

(c)

그림 3 (a) 1선 지락, (b) 2선 지락 및, (c) 3선 지락 사고시 각 리액터에서의 사고 전류 패턴.

Fig. 3 Fault current patterns in each reactor under (a) 1 lines-to-ground fault, (b) 2 lines-to-ground fault and (c) 3 lines-to-ground fault.

제시한 것이다. 그림에서 b-1 시점은 S상에서 두 리액터에 사고전류 I_{LS1} 과 I_{LS2} 가 우회하는 시점을 b-2는 R상에서 사고전류 I_{LR1} 과 I_{LR2} 가 우회하는 시점을, b-3는 S상에서 두 사고전류가 최고값 -18.5 A를 갖는 시점을, 그리고 b-4는 R상에서 사고전류가 최고가 되는 시점을 의미한다. 이때 T상에서 사고전류 I_{LT1} 과 I_{LT2} 가 '0'인 것은 T상이 사고가 발생하

(a)

(b)

그림 4 1선 지락사고 발생시 (a) a-1지점과 (b) a-2 지점에서 자기장 분포.

Fig. 4 Magnetic field distribution at (a) a-1 and (b) a-2 points under 1 line-to-ground fault.

지 않은 정상상태임을 나타낸다. 그림 3의 (c)는 R, S, T 상에서 동시에 3선 지락사고가 발생했을 때, 각 상의 리액터로 분기된 사고전류 패턴을 제시한 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 c-1 지점은 T상의 사고전류 I_{LT1} , I_{LT2} 가 리액터로 분기를 시작한 지점을 의미하고 c-2 지점은 S상의 사고전류 I_{LS1} , I_{LS2} 가 분기된 지점을 의미한다. 또한 c-3 지점은 T상의 리액터로 분기한 두 사고 전류 I_{LT1} 과 I_{LT2} 가 최고값인 12.8 A에 도달하는 지점이며 c-4 지점은 S상의 리액터로 분기한 두 사고 전류 I_{LS1} 과 I_{LS2} 가 최고값인 18.5 A에 도달한 지점이고 c-5 지점은 R상의 리액터로 분기한 두 사고 전류 I_{LR1} 과 I_{LR2} 가 최고값 17.5 A에 도달한 지점이다. 이때 각 상의 사고시점의 차이는 각 상 간의 위상차를 의미하며 동시에 사고전류 값의 차이는 각 상의 매트릭스형 한류기 모듈의 임피던스 차이로부터 기인한 것으로 판단된다.

3.2 1, 2, 3선 지락사고가 발생했을 때 리액터의 전자장 분포

그림 4에 1선 지락사고 발생 시 리액터에서 발생하는 자기장 분포를 제시하였다. 리액터에 사고전류가 유입되기 직전인 a-1 시점에서의 자기장의 세기는 그림 4(a)에 제시된 것처럼 R, S, T 상의 모든 리액터에서 '0'임을 알 수 있다. 이러한 결과는 정상 상태에서 전류는 임피던스가 없는 초전도 소자로만 전류가 흐르고 있음을 의미한다. 반면에 그림

(a)

(b)

(c)

그림 5 2선 지락사고 발생시 (a) b-2지점, (b) b-3 (c) b-4 지점에서 자기장 분포.

Fig. 5 Magnetic field distribution at (a) b-2, (b) b-3 and (c) b-4 points under 2 lines-to-ground fault.

4의 (b)에 제시된 것처럼 사고전류가 리액터로 분기하여 최고값 17.5 A에 도달하는 a-2 시점의 경우 좌우 꼭지점 (리액터 정 중앙에서 좌우 50 mm 부근)에서 자기장의 세기가 1.75 G, 리액터의 정 중앙 (135 mm 지점)에서 자기장의 세기가 1.62 G에 이르고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 리액터 정 중앙에 초전도체 퀀치시 열 발생에 기인하는 기포의 원활한 유통을 위해 만들어 놓은 타원형의 홈 때문인 것으로 판단된다. 이 홈으로 인해 구리선의 권선이 불가능하기 때문에 자기장 분포가 낮아진 것이다. 따라서 초전도 소자를 배치할 경우, 리액터 자기장 분포의 좌우 꼭지점 부근에 강한 자기장 인가가 필요한 사고전류 제한 파트의 두 초전도 소자를 배치하고 정 중앙에 임계 자기장의 크기

그림 6 3선 지락사고 발생시 (a) b-1지점, (b) b-2 (c) b-3 지점에서 자기장 분포.

Fig. 6 Magnetic field distribution at (a) c-1, (b) c-2 (c) c-3 and (d) c-4 points under 3 lines-ground fault.

가 작은 트리거 파트의 초전도 소자를 배치하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

그림 5에 2선 지락사고가 발생했을 때 R, S, T상의 자기장 분포를 제시하였다. 그림 전체에서 보여지는 것처럼 사고가 발생하지 않는 T상의 경우 자기장의 발생이 없는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 3에 제시된 것처럼 S상의 사고전류가 분기를 시작하고 R상의 사고전류가 분기를 시작하기 직전인 그림 5(a)의 경우, 리액터 정 중앙에서 자기장의 세기는 0.7 G이고 정 중앙에서 좌우 50 mm가 떨어진 지점의 자기장의 분포가 0.8 G임을 알 수 있다. 이러한 결과는 S상의 사고전류가 최대값 -18.5 A인 지점에서 자기장의 세기를 제시한 그림 5의 (b)에서 알 수 있듯, S상 리액터의 정 중앙에서 자기장의 세기는 1.75 G, 리액터 좌우, 꼭지점 형태의 두 자기장의 세기는 1.85 G로서 최대값을 가지게 되며 이때 분기가 일부 진행된 R상의 경우 리액터 좌우 지점의 자기장의 세기는 1.48 G, 정 중앙의 자기장의 세기는 1.38 G를 나타낸다. 그림 5의 (c)는 R상의 리액터로 우회된 사고전류가 최대값 17.5 A에 이르렀을 때 R, S, T상의 리액터의 자기장 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 T상 리액터의 자기장은 여전히 '0' G을 나타내고 있어 전류의 우회가 없음을 알 수 있으며 R상 리액터에서 발생하는 자기장이 최대값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이때 R상 리액터 좌우 자기장의 최대값은 1.75 G, 리액터 정 중앙에서 발생하는 자기장은 1.62 G로서 1선 지락사고와 동일한 값을 가지고 있다. 이러한 결과는 2선 지락사고가 발생했을 때에도 R상의 경우 1선 지락사고가 발생했을 경우와 동일한 자기적 거동을 보여주는 것이다. 이러한 거동은 그림 6에 제시된 3선 지락사고 발생 시에도 같은 양상을 보임을 확인할 수 있다. 또한 S상의 경우 사고전류가 감소함에 따라 자기장의 세기는 자연스럽게 감소하고 있음도 확인할 수 있다.

그림 6은 3선 지락사고가 발생했을 때 각 시점 (c-2, c-3, c-4, c-5)에서 자기장 분포를 제시한 것이다. 그림 6(a)에 제시한 것처럼 c-1 시점에서 T상의 리액터로 우회한 사고전류가 자기장 증가를 시작하고 있음을 보여주고 있으며 S상의 사고전류는 리액터 우회가 발생하기 직전이므로 c-2 지점에서 자기장 분포는 오로지 T상 리액터에서만 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이때 최대 자기장 값은 0.75 G였다. 그림 6(b)는 c-3의 시점에서 R, S, T 각상의 자기장 분포를 제시한 것이다. 그림 3(c)에 제시된 것처럼 이 시점에서 T상의 사고 전류는 최대값 12.8 A를 가지지만 이 시점에서 S상의 사고전류 값이 더 크므로 S상 리액터의 자기장 분포가 상대적으로 큰 값을 알 수 있다. 또한 T상 리액터 자기장 최대값은 1.32 G였고 S상 리액터에서 발생한 자기장 최대값은 1.78 G였다. 또한 그림 6의 (c)와 그림 6의 (d)에 제시된 것처럼 R, S, T상 리액터에 우회된 사고 전류에 비례하여 자기장 분포가 변화하는 양상을 보여주며, 최종적으로 R상의 사고전류가 최대값을 이루는 c-5지점에서 자기장의 최대값이 1.75 G를 보여준다. 이러한 결과는 R상과 S상의 리액터들이 1선 지락사고, 2선 지락사고 때와 동일한 자기적 거동을 보이는 것이라고 판단할 수 있다.

그림 4, 그림 5, 그림 6의 결과로부터 우리는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 첫째, 리액터 중간에 버블 유출용 홈으로 인해 자기장 분포가 '역 W' 형태를 가지므로 초전

도 소자를 배치할 때, 자기장의 세기가 강한, 리액터 정 중앙으로부터 좌우 50 mm 인 지점에 전류제한 파트의 두 초전도 소자를 위치시킬 필요가 있고 트리거 파트의 초전도 소자는 임계 자기장이 낮으므로 리액터 정 중앙에 위치시킬 필요가 있음을 확인했다. 두 번째 1선 지락사고에서 나타나는 리액터 우회 사고전류 패턴과 자기장 분포가 2선 지락사고와 3선 지락사고에 동일하게 나타남으로 3상 계통에 연결 시 동일한 임피던스를 가질 수 있도록 매트릭스형 한류기 설계 전에 임피던스를 비슷하게 조정할 필요성이 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서 저자들은 매트릭스형 한류기에서 필수적 요소인 리액터의 사고전류 우회와 자기장 분포에 대하여 조사하였다. 실험결과로부터 사고전류의 일부가 효과적으로 리액터로 우회하고 있음을 확인하였으며 이러한 결과는 실제 초전도 한류기에서 초전도 소자의 사고전력분담을 크게 감소시키는 효과가 있어 적은 수의 초전도체를 가지고도 상대적으로 고용량의 초전도 한류기를 설계할 수 있는 근거가 된다. 또한 자기장의 분포 결과로부터 리액터에 초전도 소자를 배치할 경우, 정 중앙에 임계 자기장이 낮은 트리거 파트의 초전도 소자를 배치하고 정 중앙으로부터 50 mm 좌우 지점에 높은 임계 자기장을 필요로 하는 전류제한 파트의 두 초전도 소자를 배치할 때 가장 효과적인 켄치가 일어날 수 있음도 확인하였다. 따라서 본 논문에서 얻은 결과들은 실제 전력계통에 매트릭스형 한류기를 투입할 때 중요한 고려 대상으로 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 학술연구비 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- [1] 김향곤, 최충식, 김동욱, 최효상, “비닐절연선의 산화물 성장특성과 화재조사에의 적용”, 전기학회 논문지 P권, vol. 56, no. 1, pp.37-44, 2007.
- [2] 조용선, 정병익, 최효상, “1*3 행렬구조를 갖는 매트릭스형 초전도 한류기의 자장유무에 따른 켄치특성 분석,” 전기학회 논문지 P권, vol. 57, no. 3, pp.343~348, 2008.
- [3] H. S. Choi and Y. S. Cho, "Critical current equalization via neutral lines in a transformer-type SFCL", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 736-733, 2008
- [4] D. C. Chung, H.S. Choi, N.Y. Lee, G.Y. Nam, Y.S. Cho, T.H. Sung, Y.H. Han, B.S. Kim, S.H. Lim, "Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil," Physica C, Vol. 463-465, p1193-1197, 2007
- [5] 조용선, 박형민, 정수복, 최효상, "2차권선의 연결방법에

따른 변압기형 초전도 한류기 특성”, 전기학회 논문지 P권, vol. 52, no. 12, pp.2078~3083, 2007.

저 자 소 개

정 동 철 (鄭東哲)

1967년 8월 20일생, 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.
관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송

한 태 희 (韓太熙)

1964년 7월 20일생, 1991년 전북대학교 금속공학과 졸업, 1999년 전북대학교 전기공학과 졸업(공학박사) 2009년~현재, 중원대학교 에너지자원공학부 교수
관심분야 : 초전도 한류기, 에너지저장장치 및 소자 설계