

리액터의 권선수에 따른 매트릭스형 한류기 최적화 설계

Optimal Design of Matrix-type SFCLs According to Turn Number of Reactors

정 동 철*
(Dong Chul Chung)

Abstract -In this work, we investigated quench characteristics of matrix-type superconducting fault current limiters (MFCLs) according to the turn number of reactors. The reactors used in MFCLs apply magnetic field to superconducting elements within reactors when fault currents surge into MFCL systems. It makes the fast and simultaneous quenches between superconducting elements. Also reactors decrease the fault power burden of superconducting elements by bypassing the partial fault currents to itself, when quench occurs. These structure proposed in this work can be expected to achieve much more current limiting capacity even though it uses less superconductors compared with other type SFCLs. Three reactors were made by Bakelite. These reactors with the turn number of 190, 380 and 570, had the length of 270 mm and diameter of 80 mm. We reported experimental results, including fault currents, fault voltages and resistance in superconducting elements according to the turn number of reactors. We confirmed that experimental results will be useful in next future plan for the real power grid.

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

1. 서 론

급격한 산업화와 도시화로 인해 전력계통 설비는 날이 갈수록 용량이 거대화되고 복잡해지고 있으며 여기에 비례하여 계통에서의 사고의 위험성도 증가하고 있는 현실에서 다양한 종류의 고장전류를 차단할 수 있는 기술이 제안되고 있다. 초전도 한류기는 지금까지 개발된 한류기 중 가장 뛰어난 성능을 가지고 있다. 초전도 한류기 성능은 고장전력은 1/4 주기 (시간으로 환산시 0.0042초) 안에 차단할 수 있으며 현재까지 저항형, 변압기형, 유도형, 자속 구속형 등 다양한 종류의 초전도 한류기들이 제안되고 개발 중에 있다 [1-3].

초전도 한류기는 초전도체 고유의 상전이 특성을 이용한 것으로 초전도체의 임계전류를 초과하는 고장전류가 계통이 인입되었을 때 초전도체가 매우 빠른 시간에 저항을 발생시키는 상전이를 일으킨다. 본 연구팀에서 제안한 바 있는 매트릭스형 한류기는 초전도체에 자기장을 인가하는 형태를 가진 것으로 초전도체의 동시 퀘칭 특성 향상과 더불어 한류용량 증대에도 유리하다. [3-4].

매트릭스형 한류기는 최초 고장전류가 발생했을 때 사고를 감지하고 고장전류의 일부를 리액터로 우회시켜 초전도체에 자기장을 인가하는 트리거 파트와 실제 고장전류를 제한하는 전류제한 파트, 일부 고장전류를 우회시켜 자기장을 발생시키는 병렬 리액터로 구성되어 있다. 매트릭스형 한류기의 동작원리는 고장전류가 한류 시스템으로 인입 시 트리거 파트의 초전도체는 빠른 퀘칭으로 인한 저항을 발생시키고 이 저항 성분에 의해 고장전류의 일부를 리액터로 우회시킨

다. 우회된 고장전류는 리액터 내에 탑재된 전류제한 파트의 초전도체에 강한 자기장을 인가, 초전도체의 급속 퀘칭을 유도한다. 이때 리액터는 자기장의 인가뿐만 아니라 고장전류의 일부를 분담할 수 있는 기능을 동시에 가지고 있다. 리액터의 일부 고장전류 분담은 초전도 소자의 전력분담을 줄여줄 수 있기 때문에 동일한 숫자의 초전도체를 가지고 좀더 높은 용량의 한류 시스템 설계가 가능해진다.

본 논문에서는 매트릭스형 한류기의 리액터의 권선 수에 따른 전류 제한 특성에 대하여 조사하였으며 이를 매트릭스형 한류기 내에서의 고장전류, 고장전압, 저항 발생 특성을 조사하여 최적의 리액터 권선 수를 도출하였다.

2. 실험 장치의 구성

2.1 매트릭스형 한류기용 리액터의 제작

리액터는 베이클라이트 재질로 제작하였으며 리액터의 길이는 270 mm, 리액터의 직경은 80 mm 였고 동일한 제원으로 총 3개의 리액터가 제작되었다. 각각의 리액터는 190 turn과 380 turn, 570턴의 권선수를 가지고 있으며 그림 1에 그 사진을 제시하였다. 또한 각각의 권선을 가진 리액터를 LCR 미터를 이용하여 측정해 본 결과, 1.52 Ω, 2.38 Ω, 3.57 Ω의 저항과 4.52 mH, 7.58 mH, 13.67 mH의 인덕턴스를 가지고 있었다. 각 리액터 안에 1개의 트리거 파트 초전도 소자와 2개의 고장전류제한 파트 초전도 소자가 탑재되어 있다. 3개의 초전도 소자는 meander line 형태의 선로를 가지고 있으며 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

* Corresponding Author : Dept. of EE, Woosuk Univ.

E-mail : dchung@woosuk.ac.kr

Received : November 11, 2012; Accepted : November 19, 2012

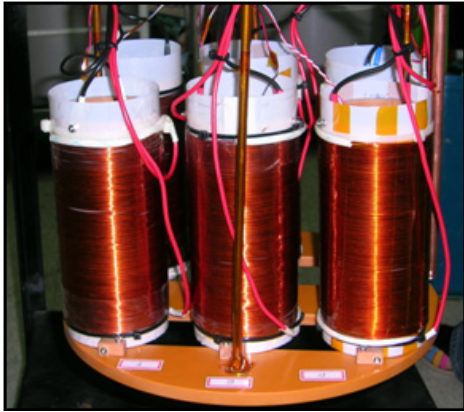


그림 1 제작된 리액터 사진.
Fig. 1 Photograph of fabricated reactors.

YBCO 박막에 0.1 um의 금을 증착하였다.

2.2 매트릭스형 한류기의 구성

그림 2에 매트릭스형 한류기의 등가회로를 제시하였다. 그림에서 보여지는 것처럼 매트릭스형 한류기는 1개의 트리거 파트와 두 개의 전류제한 파트로 이루어져 있으며 총 3개의 초전도 소자가 사용되었다. 그림에서 R_T, R_{C1}, R_{C2} 는 각각 고장전류 유입으로 3개의 초전도체에 발생한 저항을 의미하며 L_R 는 리액터의 자체 인덕턴스, L_{C1} 과 L_{C2} 는 전류제한 파트에 병렬로 연결된 인덕턴스로 1 mH의 값을 갖는다. 더불어 R_{C1} 과 R_{C2} 는 전류제한 파트에 병렬로 연결된 저항으로 10 옴의 값을 갖는다. V_T, V_{C1}, V_{C2} 는 트리거 파트와 전류제한 파트에 사고시 인가되는 전압을 의미하며 I_{FCL} 은 전체 고장전류, I_T 는 트리거 파트로 유입되는 전류, I_{LT} 는 리액터 L_R 로 우회하는 전류, I_{C1} 과 I_{C2} 는 전류제한 파트로 유입되는 전류를 의미한다. 그림 3에 매트릭스형 한류기의

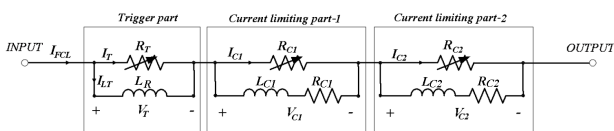


그림 2 매트릭스형 한류기의 등가회로.
Fig. 2 Equivalent circuits for MFCLs.

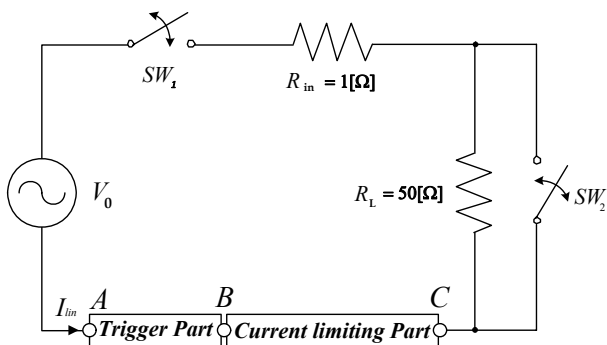


그림 3 매트릭스형 한류기의 한류 실험 회로.
Fig. 3 Experimental circuits for MFCLs.

실험회로를 제시하였다. R_{in} 은 선로 저항, R_L 은 부하저항이며 SW_1 을 닫으면 정상 상태의 전력계통을 의미하며 SW_2 가 동시에 닫힐 경우가 사고 상태를 의미한다. 인가된 고장전압은 540 V이고 총 5 주기 동안 고장전류를 인가하였으며 시험 완료 후 실험 회로에 사용된 모든 스위치를 개방하였다 [3-4].

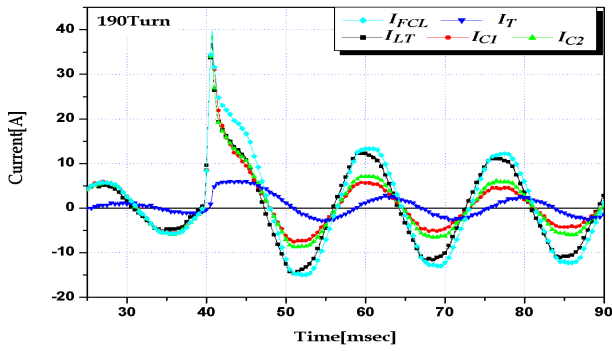
3. 실험결과

3.1 고장전류 특성

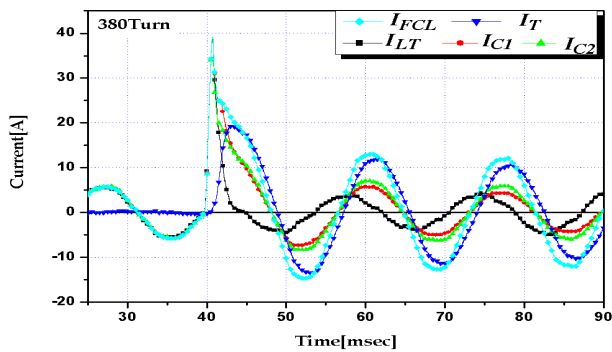
그림 4에 고장전류가 유입되었을 때, 리액터의 권선수 190, 380, 570 turn에 따른 고장전류 패턴을 제시하였다. 그림에서 보여지는 것처럼 전체적인 고장전류 I_{FCL} 는 세 리액터 공히 38.7 A로 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 그림 4(a)에 제시된 것처럼 190 turn의 권선수를 가진 리액터에서 트리거 파트의 전류 I_T 가 6.1 A로 다른 권선수의 리액터보다 적은 전류값을 보여주는 것을 알 수 있다. 이것은 190 turn을 가지는 리액터의 리액턴스가 너무 적어 트리거 파트의 초전도체가 충분한 퀘칭을 이루기 전에 고장전류가 리액턴스로 우회했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 전체적인 고장전류 I_{FCL} 과 리액터 우회전류 I_{LT} 가 거의 근사적으로 동일한 고장전류 패턴을 보여주었다. 실제 고장전류를 제한하는 전류제한 파트의 고장전류 I_{C1} 과 I_{C2} 는 4.8 A와 5.2 A로 두 전류 값이 근사적으로 동일함을 알 수 있으며 이는 고장전류 분배가 잘 이루어지고 있음을 시사하는 것이다. 그림 4(b)와 그림 4(c)에 제시된 것처럼 380 turn과 570 turn을 가지는 리액터에 흐르는 전류 I_{LT} 는 각각 19 A와 18.8 A로 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 트리거 파트의 초전도체에 충분한 퀘칭이 이루어졌음을 의미하는 것이며 사고 3주기 이후 전류제한 파트의 초전도체에 흐르는 전류 I_{C1} 과 I_{C2} 도 380 turn의 경우 4.8 A와 5.2 A, 570 turn의 경우 4.7 A와 5.1 A로 큰 차이를 나타내지 않았다. 이러한 결과는 7.58 mH, 380 turn 이상의 권선수를 갖는 리액터가 고장전류를 효과적으로 제한하기에 충분한 권선수라는 것을 의미하며 이 이상의 경우 특별한 차이가 없다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 고장전압 특성

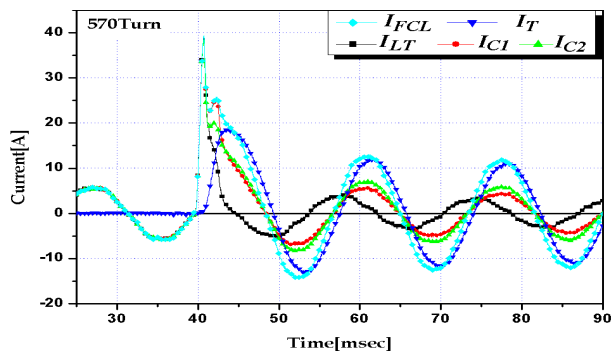
그림 4에 고장전류가 유입되었을 때, 리액터의 권선수 190, 380, 570 turn에 따른 트리거 파트와 전류제한 파트에 걸린 고장전압 패턴을 제시하였다. 그림에서 보여지는 것처럼 전류제한 파트의 첫 번째 초전도체의 고장전압 V_{C1} 은 사고 3주기 이후에 동일하게 150 V에 이르는 것을 알 수 있다. 또한 전류제한 파트의 두 번째 초전도체에서 분담하고 있는 고장전압 V_{C2} 는 사고 3주기 이후에 근사적으로 동일하게 126 V였다. 이는 전체적으로 전류제한 파트의 초전도체의 고장전력 분담이 적절하게 분배되고 있다는 것을 의미한다. 트리거 파트 초전도체의 전압 V_T 는 380 turn를 갖는 리액터에서 사고 직후에는 51 V, 사고 3주기 이후에는 26 V로 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 또한 570 turn을 갖는 리액터에서 트리거 파트 초전도체의 전압 V_T 는 사고 직후에 90.1 V, 사고 3주기 이후에는 45 V로 안정화되는 것을



(a)



(b)

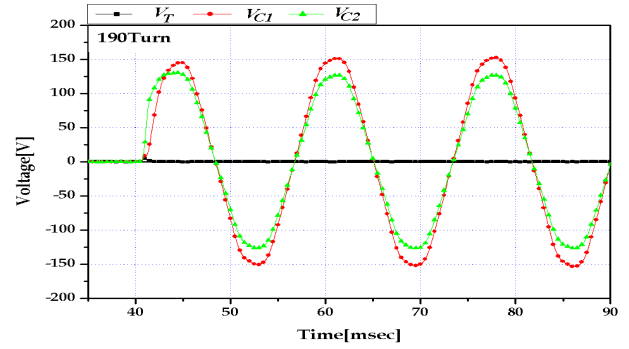


(c)

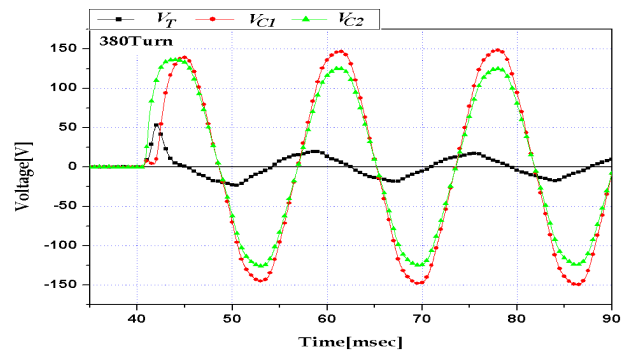
그림 4 리액터 권선수에 따른 고장전류 패턴; (a) 190 turn (b) 380 turn (c) 570 turn.

Fig. 4 The pattern of fault currents according to (a) 190 turn, (b) 380 turn and 570 turn.

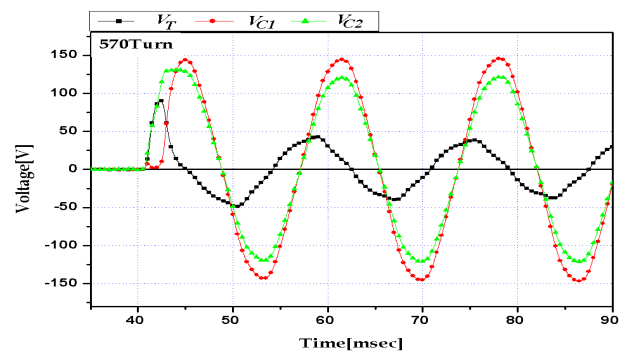
알 수 있다. 그러나 190 turn을 갖는 리액터에서 고장전압 V_T 는 사고 직후부터 사고기간 내내 0 V인 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 트리거 파트의 초전도체에서 고장전류 유입으로 인한 퀘치가 전혀 발생하지 않았다는 것을 의미하며 고장전류가 대부분 리액터로 우회했다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 그림 3의 고장전류 패턴에서도 확인할 수 있듯, 리액터가 고장전류의 대부분을 분담하고 있다는 것을 의미하며 이러한 고장전력의 과다한 집중은 리액터 권선의 손손으로 이루어질 수 있기 때문에 실제 전력계통에 투입을 위해 매트릭스형 한류기를 설계할 경우, 세심한 주의를 요해야 할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



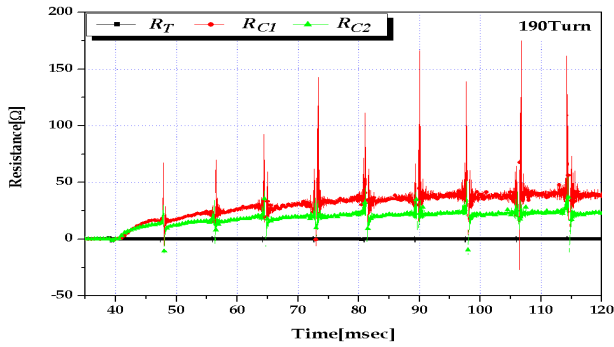
(c)

그림 5 리액터 권선수에 따른 고장전압 패턴; (a) 190 turn (b) 380 turn (c) 570 turn.

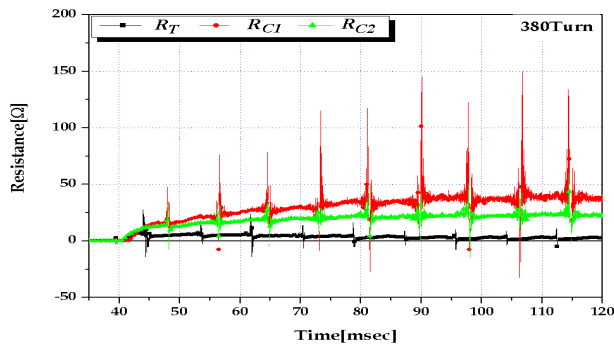
Fig. 5 The pattern of fault voltages according to (a) 190 turn, (b) 380 turn and 570 turn.

3.3 저항 특성

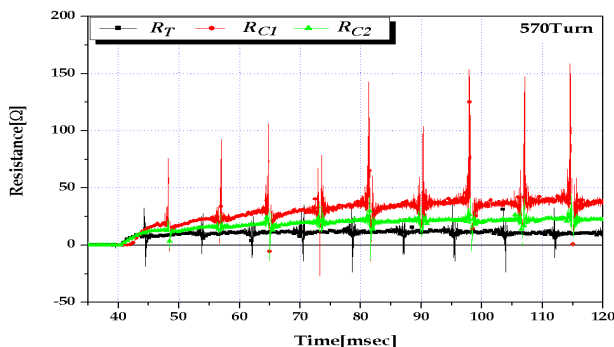
그림 6에 권선수 190 turn, 380 turn, 570 turn에 따른 매트릭스형 한류기 내의 저항 발생 곡선을 제시하였다. 그림에서 보여지는 것처럼 190 turn의 권선수를 가진 리액터에서 트리거 파트의 초전도체의 저항이 사고직후부터 사고기간 전체를 통해 '0'임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그림 5의 결과와 동일한 것으로 트리거 파트 초전도체의 퀘치가 발생하지 않았다는 명확한 근거가 된다. 전체적으로 볼 때 570 turn의 권선수를 가진 리액터에서 초전도체 간 저항 차가 가장 적었으며 자기장을 인가하는 리액터의 권선수 증가



(a)



(b)



(c)

그림 6 리액터 권선수에 따른 저항 패턴; (a) 190 turn (b) 380 turn (c) 570 turn.

Fig. 6 The pattern of resistances according to (a) 190 turn, (b) 380 turn and 570 turn.

함에 따라 트리거 파트의 전체 임피던스가 증가하기 때문이며 리액터와 병렬로 연결된 트리거 파트의 초전도체의 저항이 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 자기장을 인가하는 리액터의 영향으로 전류제한 파트 각 초전도 소자의 저항값의 차이가 줄어든다는 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 매트릭스형 한류기에서 사용되는 리액터의 권선수에 따른 전류제한 특성을 조사하였다. 실험 결과 190 turn의 권선수를 갖는 리액터에서 트리거 파트 초전도체의 켄치가 발생하지 않음을 확인하였으며 380 turn 이상의 권선수를 갖는 리액터들에서는 각 초전도체 간의 적절한 고장

전력 분배가 이루어지고 있음을 확인하였다. 또한 권선수가 증가할수록 초전도 간의 저항차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 권선수가 380 turn 이상인 리액터의 적절한 인덕턴스로 인해 고장전류의 우회가 초전도체의 켄치 이후에 발생하고 있음을 의미하며 이러한 고장 전류의 우회가 리액터 내부의 초전도체에 강력한 자기장을 인가하여 초전도체 간의 동시켄치 특성을 향상시키는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 결과는 매트릭스형 한류기를 향후 전력계통에 투입할 때 중요한 공정변수로 작용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 링크사업단 학술연구비 지원을 일부 받았습니다

References

- [1] M. Noe, et. als., "High voltage design, requirements and tests of a 10MVA superconducting fault current limiter," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.2082-2085, 2005
- [2] 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.
- [3] 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, pp.1193-1197, 2007.
- [4] Y. S. Cho, H. S Choi, S. P. Go, "Operational Characteristics of Transformer-Type SFCL with or without Neutral Line between the Secondary windings and Superconducting units", Trans. KIEE, Vol. 60, No. 6, pp.1268-1273, 2011.

저 자 소 개



정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송.