

일체형 삼상 고온 초전도 한류기의 단락 특성 해석

이승제, 이찬주, 이창열, 장미혜, 고태국
연세대학교 전기공학과

The conceptual design and analysis of
three phase superconducting fault current limiter

Suengje Lee, Chanjoo Lee, Changyul Lee, My-hye Jang, Taekuk Ko
Dept. of E E Yonsei University

Abstract - The conceptual design of integrated three phase superconducting fault current limiter (SFCL) is presented. And through simulation of power system where this SFCL is installed, the characteristics of this SFCL is analyzed. It is like three-phase transformer. So it has the same characteristics with inductive single phase SFCL. But it has more merits than single phase SFCL. Differently to single phase SFCL, integrated three phase SFCL induces impedance at all phase by any single phase fault to protect the power system more safely.

서로 독립적으로 동작한다. 삼상형 계통에 사고가 발생하면 상의 1차측 전류는 급격히 증가한다. 이 증가한 전류는 초전도 링에서 많은 전류를 발생시킨다. 따라서 이 유기된 전류가 빠른 시간에 초전도체의 임계전류값을 초과하여 높은 상전도 저항이 발생한다. 따라서 2차측 초전도 Ring에서 발생한 상전도 저항으로 인하여 거의 완전히 차폐되었던 자속이 전류에 따라 증가하고 Impedance($L = \frac{d\Phi}{dt}$)가 발생하여 결국 사고전류를 제한한다.

1. 서 론

고온초전도한류기는 전력계통의 안정도 향상에 기여할 것이다. 하지만 지금까지 개발되어진 고온초전도한류기는 실제로 응용되어야 할 삼상형 송배전 계통과 거리가 있는 단상형 모델만이 연구되었다. 따라서 실제 계통에 고온 초전도 한류기를 효율적으로 적용하기 위해서는 삼상계통에 알맞은 삼상형 한류기의 개발이 필요하다. 다행히 삼상 계통은 3개의 단상형 기기를 설치하는 것보다 하나의 삼상형 기기를 설계하기에 좋은 점이 있다. 삼상 계통은 Balance 되어졌다는 좋은 특성을 가지고 있기 때문이다. 이번 연구에서는 삼상형 Transformer를 기본 모델로 한 삼상형 초전도 한류기를 설계하고, 삼상형 고온초전도한류기의 동작특성해석을 위해 고온초전도한류기를 포함한 모의 계통을 가정하여 모델의 특성을 파악하는데 목적이 있다.

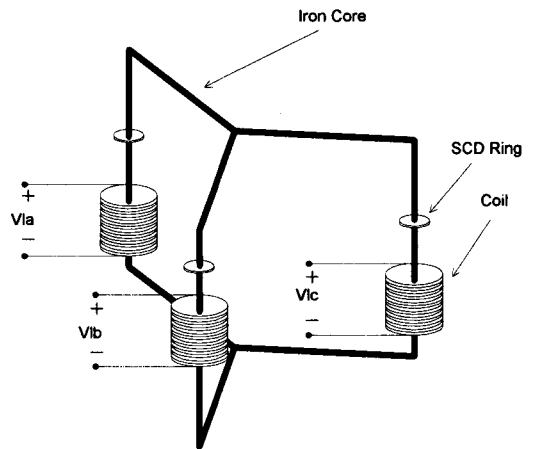


그림 1. 3SCD 삼상 고온초전도한류기의 기본 모델

2. 본 론

삼상형 초전도 한류기 모델은 삼상형 transformer를 기본 모델로 하여 설계 하였다

2.1 삼상유도형 고온초전도한류기의 동작원리

삼상 유도형 고온초전도한류기는 초전도 Ring나 Tube를 삼상형 transformer의 2차 코일로 모두 사용하는 것이다. 삼상유도형 고온초전도한류기는 각상의 1차측은 동선으로 구성하고 2차측은 단락된 고온초전도 링으로 구성된다. 이를 그림 1과 같은 형태의 강자성체 Core에서 자기적으로 결합시킨다. 각각의 1차측은 회로에 직렬로 연결한다. 정상 상태시에 초전도 링의 저항은 없으므로 1차측 코일에서 생성된 자속은 2차측의 차폐 전류에 의해 대부분이 상쇄되므로 한류기의 임피던스는 매우 낮다. 그리고 각상은 Balance 되어 있기 때문에

이것은 단상형 한류기와 동일한 것이다. 하지만 여기서 특이한 점은 사고가 발생하여 사고 난 상의 자속이 증가할 경우 단상형 한류기와는 다르게, 삼상 Balance가 깨지고 따라서 사고 난 leg의 증가된 자속은 사고가 난 상뿐만 아니라, 사고가 발생하지 않은 leg에도 영향을 미칠 수밖에 없도록 자속 Path가 정해져 있다는 점이다. 그래서 사고 난 leg의 증가된 자속은 다른 leg의 초전도 Ring 전류 발생에도 큰 영향을 미쳐, 사고가 나지 않은 leg 초전도 Ring도 임계 전류값을 넘는 전류가 유기돼 Quench가 발생하게 된다. 따라서 그것의 자기 차폐 효과마저도 사라져 나머지 두 상도 Impedance가 발생하게 된다. (balance가 깨지기 때문)이로 인하여 하나의 상에만 사고가 발생하여도 모든상에 Impedance가 발생하여 단상형 한류기에 비해 훨씬 안정적으로 전력 System를 보호하게 된다. 또한 2상 이상이 사고가 발생할 경우 더 효과적으로 사고를 제한 한다. 또한 삼상 전체가 하나의 Iron Core를 사용하기 때문에 더 경제적이고 초전도 Ring을 냉각하는데 있어 효과적이라고 할

수 있다. 이 System을 좀더 정확히 분석하기 위해서는 단순화된 계통과 삼상형 한류기를 연결하여 시스템의 파라미터에 따른 제한기의 동작특성을 수치해석을 이용해 비교분석이 필요하다.

2.2 삼상형 한류기의 등가회로 설정

삼상 고온초전도한류기 모델을 등가화 할려면, 삼상형 transformer를 기본으로 해서 등가화 할 수 있다. 세계의 상이 서로 영향을 미치기 때문에 이것으로 인한 각 코일간의 Mutual Inductance가 매우 많이 존재 하게 된다.

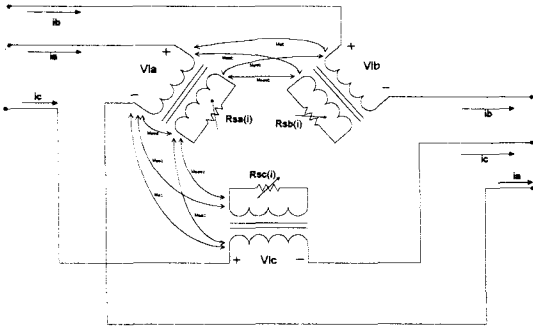


그림 2. 삼상 고온초전도한류기의 등가 회로

그림 2에서 보는 것과 같이 A상의 1차 코일은 자신을 제외한 나머지 5개의 코일과 Mutual Inductance를 갖는다. 다른 상도 A와 같은 Mutual Inductance를 갖는다.

2.3 배전 System의 모델 설정 및 설계

Y-Y결선으로 하였고 Source에 쪽에 붙여 한류기를 설치하였다. 그리고 실제 계통에서 존재하는 모든 factor을 고려하였다. 회로를 계산하기에 복잡하기 때문에 선간 Capacitance는 저항으로 대체 하였다.

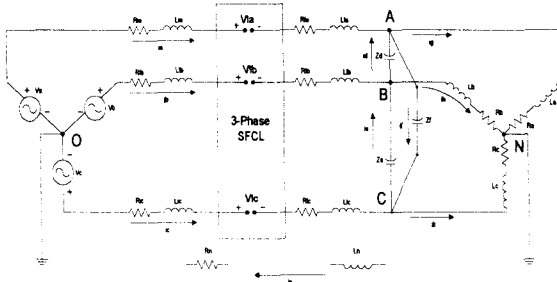


그림 3. 한류기가 설치될 배전 System

한류기를 포함하는 계통 상수는 다음과 같다.

선간전압	Va	220V/60Hz(rms)
정격부하	Ra	40Ω
정격부하	La	0.01H
내부저항	Ria + Rla,	0.2Ω
내부임피던스	Lia + Lla,	0.15 mH
접지저항	Rn	0.05Ω
접지Inductance	Ln	2mH
선간Capacitance	Zd,	10 ⁸ Ω

2.4 Circuit System Analysis

그림 3 회로는 Nonplaner Circuit이다. 따라서 이러한 Nonplaner Circuit풀기 위해서는 topological approach의 하나인 Loop Current Method를 사용하였고, 한류기와 계통을 분리하여 해석했다. 그리고 한류기 단자 전압은 한류기의 등가 회로 그림 2와 transformer의 특성을 이용하여 구한다. Ideal 하지 않은 transformer의 각단에 걸리는 전압은 Flux linkage를 시간에 따라 미분한 것이다.

즉 $v_i = \frac{d\lambda}{dt}$, $\lambda = N\Phi$ 가 된다. 각 leg에서 자속을 구하기 위해서 superposition을 이용한다. 각 leg에서 자속을 구하기 위해서 삼상형 Transformer의 각 leg에서 자속을 구한 것과 같이 superposition을 이용한다. A leg의 경우 다음과 같은 자속을 갖는다.

$$\Phi(A \text{ leg}) = \frac{2}{3R}(N_1 i_a - N_1 i_m) - \frac{1}{3R}(N_2 i_b - N_2 i_m) - \frac{1}{3R}(N_3 i_c - N_3 i_m)$$

여기서 R 은 각 leg의 Reactance 값이다. ($R = \frac{l}{\mu S}$) 이것을 이용하여 SFCL 모든 단자의 전압을 구하면 다음과 같다.

$$N_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{3R}(N_1 i_a - N_1 i_m) - \frac{1}{3R}(N_2 i_b - N_2 i_m) - \frac{1}{3R}(N_3 i_c - N_3 i_m) \right) = V_m$$

$$N_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{2}{3R}(N_1 i_a - N_1 i_m) - \frac{1}{3R}(N_2 i_b - N_2 i_m) - \frac{1}{3R}(N_3 i_c - N_3 i_m) \right) = i_m \times R_{Sd}(i_m)$$

2.5 시뮬레이션 및 결과 고찰

여러 가지 상황을 가정한 시뮬레이션이 필요하며 여기서는 부하 저항을 임의의 시간(또는 사고각)에 단락 시킴으로써 이것을 구현하였다. 한류기가 설치된 System과 비교하기 위해 단선 지락사고시 각상의 전류를 나타낸 것이다.

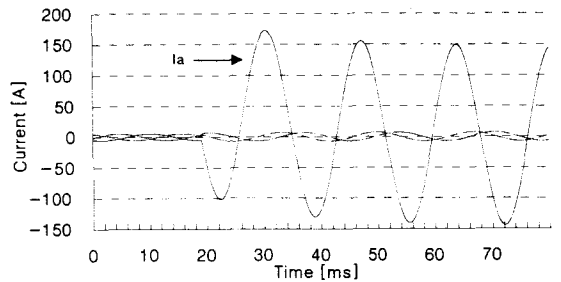


그림 4. 한류기가 없는 계통의 사고 전류

2.5.1 Symmetrical three phase faults

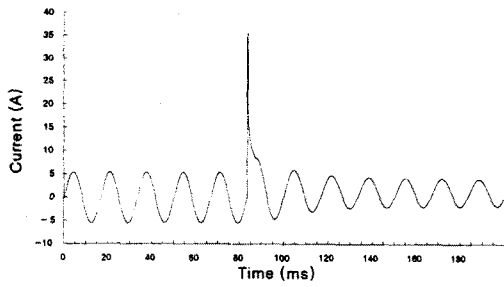


그림 5. 한류기 A상에 흐르는 전류

A, B, C상 모두에서 동일하게 사고를 제한하는 것을 알 수 있었다.

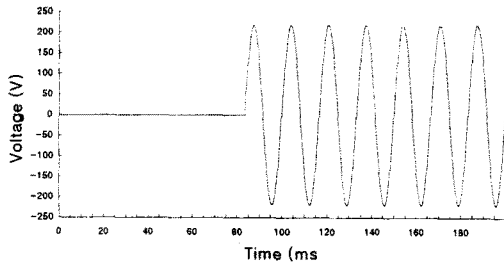


그림 6. 한류기의 A단자에 걸리는 전압

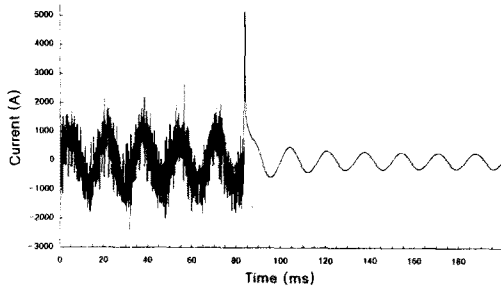


그림 7. A상의 SCD-Ring에 흐르는 전류

초전도 Ring에 흐르는 전류는 Mutual inductance에 많은 영향을 받아 정형파를 갖지 않는다.

2.6 Single Line to Ground Fault

한류기가 포함된 계통의 단선지락사고를 고찰했다.

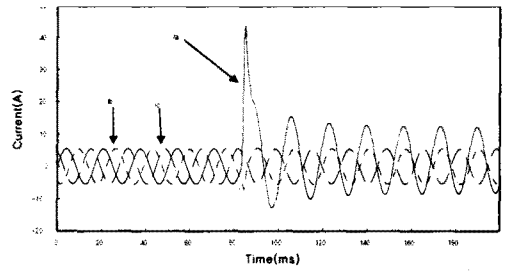


그림 8. 계통의 단선 지락시 각상의 전류

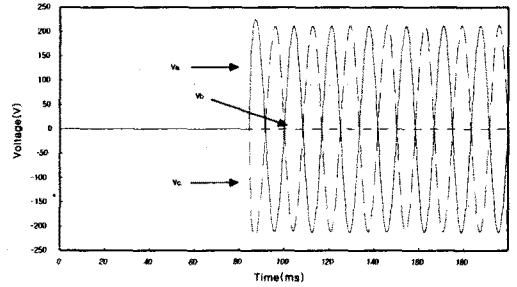


그림 9. 한류기 각 단자에 걸리는 전압

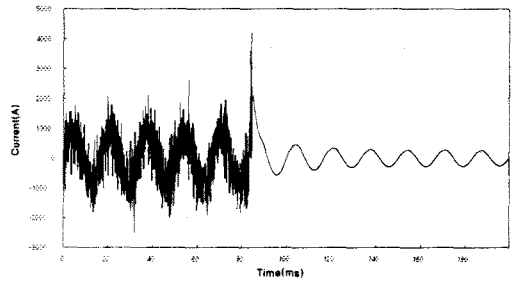


그림 10. 한류기의 A leg의 SCD-Ring 전류

2.5.3 Line to Line Fault

한류기가 포함된 계통의 양선단락사고를 고찰했다.

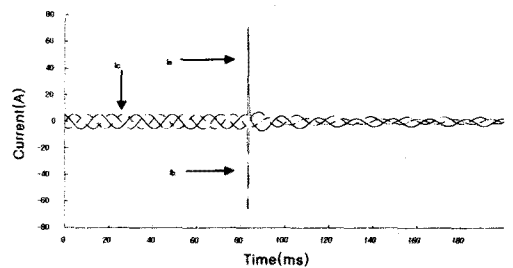


그림 11. 각 상에서 흐르는 전류

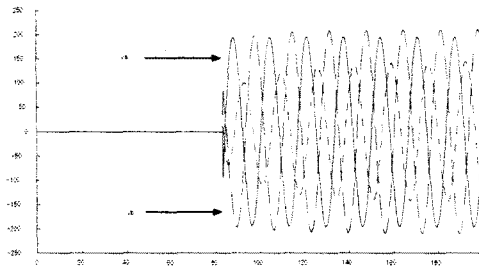


그림 12. 단락 사고시 한류기 각단에 걸리는 전압

3. 결 론

일체형 고온초전도한류기의 동작특성을 분석하였다. 일체형 삼상형 고온초전도한류기에 대한 등가회로가 유도되었으며 Mutual Inductance가 고려되었다. 단상형에 비해 전력계통 안정도 면에서 효과적인 사고전류 제한을 확인할 수 있었다. 한류기가 없을 시의 사고전류(170A)가 한류기에 의해 반주기 정도에 효과적으로 15A 이내로 제한되었다. 따라서 앞으로의 한류기 개발에 있어서 계통의 3상 환경을 고려하는 한류기 개발이 훨씬 유리하다는 것을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 주민석, "고온초전도 한류기의 단락특성 해석에 관한 연구", 박사논문, 1997.6
- [2] S. J. Chapman, "Electric machinery fundamentals", 2nd, p43-p125, 1991