

모의 송전계통에 초전도한류기의 적용에 따른 거리계전기의 동작특성 연구

(Analysis on Operational Characteristics of Distance Relay due to Application of Superconducting Fault Current Limiter in a Simulated Power Transmission System)

노신의* · 김진석 · 김이관 · 김재철 · 임성훈**

(Shin-Eui Noh · Jin-Seok Kim · Yi-Gwan Kim · Jae-Chul Kim · Sung-Hun Lim)

Abstract

The development of the superconducting fault current limiter (SFCL) to apply into a power transmission system where makes larger fault current compared to the power distribution system has been performed. Among various SFCLs, the trigger-type SFCL is suitable for application into the power transmission system due to the effective reduction on power burden of the high temperature superconducting element (HTSC) for the larger fault current.

To protect the power transmission line in the power grid, the distance relay, which decides to interrupt fault section where can be calculated by the measured voltage and current from sound grid, is one of important protective devices in the power transmission system. However, the operation of the distance relay from the impedance of the fault point on the transmission line is affected by the impedance of the trigger-type SFCL. Therefore, the analysis on the operational characteristics of distance relay considering the application of the SFCL is required.

In this paper, the effect on the operation zones of the distance relay by the impedance of the SFCL in a power transmission system was analyzed through the PSCAD/EMTDC simulation.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Distance Relay, Power Transmission System

* 주저자 : 송실대학교 공대 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 송실대학교 공대 전기공학과 교수
* Main author : Master course of Electrical Engineering, Soongsil University
** Corresponding author : Professor in the Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr
접수일자 : 2013년 10월 10일
1차심사 : 2013년 10월 23일, 2차심사 : 2014년 2월 10일
심사완료 : 2014년 7월 10일

1. 서 론

현재 국내 전력계통은 대도심의 부하 집중화와 전력 수요의 증가로 인해 모선 연계, 주변압기의 대용량화 등 계통의 규모가 복잡하게 확장되고 있다. 그러나 이와 같은 방안들은 계통에서 고장발생시 고장전류를 증가시키며, 이로 인해 기존 보호기기의 정격차단용량 초과라는 문제를 발생시킨다. 따라서 이러한 문제를

해결하기 위해 고장전류를 제한시키는 다양한 방안들이 제안되고 있으며, 한류 리액터 설치, 모선 분리 등이 이에 해당된다. 이러한 방안들은 평상시 계통 운전시 손실 발생과 전압강하 발생 등의 문제를 발생시킨다. 이에 반해 초전도한류기는 평상시 영저항 특성으로 손실이 발생하지 않으며, 고장 발생 시 초전도상태를 벗어나 저항을 가지는 퀘칭(Quench)현상을 통해 고장전류를 제한시킨다. 이와 같은 장점으로 현재 가장 이상적인 고장전류 저감 방안으로 평가되어 많은 연구가 진행 중에 있다. 현재까지 초전도한류기의 적용에 관한 연구는 주로 배전계통에 관해 진행이 되었으나 최근에는 송전계통에 관한 연구가 진행되고 있다[1-4].

본 논문에서는 송전계통에 초전도한류기를 적용하기 위한 선행 연구로서 송전선로 보호와 후비보호기로 많이 사용되는 거리계전기에 대하여 초전도한류기 적용시 그에 대한 영향을 분석하였다. 분석을 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 각 보호계전기 및 모의 송전계통을 구성하고 동작특성을 확인하였다.

2. 보호계전기의 동작특성

2.1 송전급 초전도한류기의 구조 및 동작특성

송전계통에서 고장 발생시 나타나는 큰 고장전류의 영향으로 초전도한류기를 적용하기 위하여 일반적으로 사용되는 저항형 초전도한류기와 다른 모델이 필요하다. 저항형 초전도한류기는 초전도소자(HTSC)만으로 구성된 기본적인 모델로 이를 송전계통에 적용시 고장 발생에 의한 큰 고장전류가 소자에 직접 지속적으로 도통되기 때문에 초전도소자의 파손이 발생하는 문제점을 가진다[5-6].

그림 1은 송전계통에 적용하기 위해 제안되고 있는 초전도한류기 구조를 나타낸다. 송전급 초전도한류기는 초전도소자, 차단기(CB) 그리고 한류소자(CLR)의 병렬구조를 이용하여 평상시에는 초전도한류기에 흐르는 전류(i_{SFCL})가 초전도소자로만 흐른다. 그러나 고장 발생시 퀘칭 현상으로 초전도소자의 저항이 발생하고, 이 때 생기는 저항의 크기에 따라 일부 초전도한류기에 흐르는 전류가 한류소자(i_{CLR})로 분기되어 흐르

게 된다. 그리고 일정 시간 후에 초전도소자 앞단의 차단기를 이용하여 초전도소자로 흐르는 전류를 차단함으로써 한류소자로 고장전류를 제한하는 특성을 가지고 있다. 이를 통해 초전도소자는 고장 발생 초기에 고장전류를 감지하는 역할을 하며 송전계통의 큰 고장전류에 대한 부담을 최소화시키는 장점을 갖게 된다[7-9].

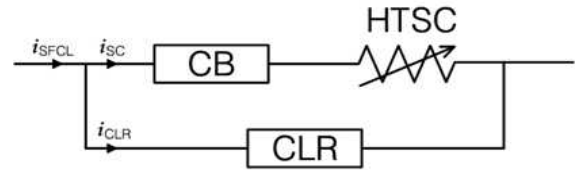


그림 1. 송전급 초전도한류기의 구조
Fig. 1. Structure of SFCL for the transmission voltage level

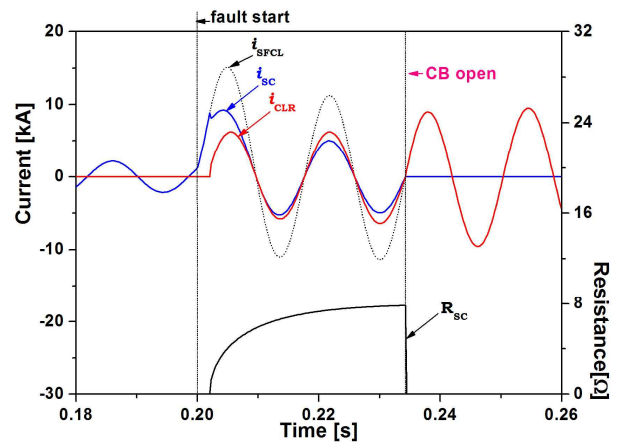


그림 2. 송전급 초전도한류기의 동작특성
Fig. 2. Operation characteristic of SFCL for the transmission voltage level

그림 2는 현재 한국전력공사에서 연구 중인 송전급 초전도한류기의 사양을 이용하여 나타낸 송전급 초전도한류기의 동작특성이다. 그림에서 초전도소자에 흐르는 전류가 8.7kA를 넘는 시점에서 초전도소자 저항(R_{sc})이 발생하며 이 값은 8Ω의 크기를 갖는다. 이를 통해 초전도소자 전류의 크기가 저감된 것을 확인할 수 있으며, 초전도한류기를 구성하는 차단기가 동작된 이후에 초전도소자에 흐르는 고장전류가 0A이 되므로 초전도소자는 영저항을 갖게 됨을 확인할 수 있다. 또한 초전도한류기에 흐르는 전류가 한류소자로만 흐

르게 되어 이 후로는 한류소자의 값에 의해 고장전류가 저감된 것을 확인할 수 있다.

2.2 거리계전기의 동작특성

송전계통은 배전계통에 비해 고장과급의 영향이 크기 때문에 사용되는 보호계전기는 고장에 대해 빠른 동작과 높은 신뢰도가 필요하다. 이에 따라 적용되는 보호계전시스템이 배전계통과는 다르다. 우리나라의 경우 주로 송전계통의 후비보호기기로 거리계전기를 많이 사용하고 있다. 거리계전기는 송전선로에서 계전기 설치 지점으로부터 계산된 임피던스(Impedance)를 통해 고장여부를 판별, 보호하는 보호계전시스템이다.

그림 3은 1선 지락 고장시 송전선로에 적용된 거리계전기의 동작영역과 동작시간을 개념적으로 나타낸 그림이다. 보호거리에 따라 단계적으로 보호동작 영역을 구분하며, Zone 1 영역에서는 5Hz 이내 순시차단을 하고 Zone 2 영역에서는 24Hz 이내, Zone 3 영역에서 100Hz의 지연차단을 한다.

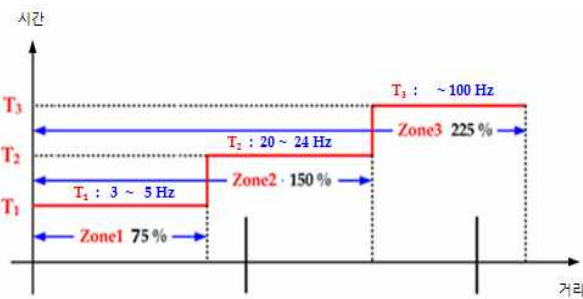


그림 3. 1선 지락 고장시 거리계전기의 동작도
Fig. 3. Operation scheme of distance relay in case of the single line-to-ground fault

3. 모의 시뮬레이션 구성 및 결과 분석

3.1 모의 시뮬레이션 구성

그림 4는 초전도한류기 적용에 따른 거리계전기의 동작특성 분석을 위해 구성한 모의회로이다. 모의 시뮬레이션에서 각 기준 보호구간은 15km로 설정하였

으며, 보호구간 별로 설치된 거리계전기는 mho형 거리계전기로 선로에 단방향으로 설치하였다. 초전도한류기는 선로 인출점에 설치하였다. 거리계전기의 영향을 분석하기 위하여 1선 지락 고장을 모의하였으며, 초전도한류기의 영향을 명확하게 확인하기 위해 21.13 기준으로 Zone 1의 한계 보호구간인 75% 위치에서 (F_1)을 모의하였다[10].

모의회로에 사용된 계통 파라미터 값은 표 1에 나타내었다[11].

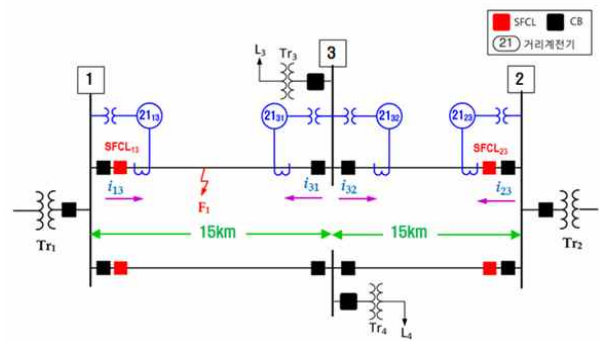


그림 4. 모의 송전계통 구성도
Fig. 4. Structure of simulated power transmission system

표 1. 계통 파라미터
Table 1. Parameters of power system

| | |
|------------------------|-------------------------|
| 변압기 | 400MVA, 345/154kV, j11% |
| 선로 | 0.238+j1.044Ω/km(영상) |
| (ACSR) | 0.043+j0.344Ω/km(정상) |
| 410mm ² *2) | 총 선로 구간 30km |

3.2 송전급 초전도한류기의 적용에 따른 거리계전기의 동작특성

송전급 초전도한류기 적용에 따른 거리계전기의 동작특성을 분석하기 위해 초전도한류기의 적용여부에 따라 모의회로에 설치된 각 거리계전기들의 임피던스 궤적 변화를 분석하였다. 이 때 적용된 초전도한류기의 한류소자에 대하여 저항과 리액턴스 성분을 갖도록 각각 적용하여 분석하였다. 먼저 한류소자가 저항 성분을 가질 경우에 대하여 표 2를 통해 나타낸 사례

연구를 진행하였다.

그림 5와 6은 표 2에 나타난 송전급 초전도한류기의 사양별로 모선 1과 3 사이의 보호구간에 설치된 21₁₃, 21₃₁의 임피던스 궤적 변화를 R-X 좌표에 나타난 그림이다.

표 2. ZCLR이 저항인 사례연구 구성
Table 2. Configuration of ZCLR in case of resistance

| 구분 Z_{HTSC}^{CLR} | HTSC Resistance (Ω) | CLR Resistance (Ω) |
|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Z_0^0 | 0 | 0 |
| Z_8^3 | 8 | 3 |
| Z_8^6 | 8 | 6 |
| Z_8^9 | 8 | 9 |
| Z_8^{12} | 8 | 12 |

그림 5에서 초전도한류기가 없는 경우에 나타난 21₁₃의 임피던스 궤적은 보호구간 내 Zone 1의 한계영역인 75%를 나타내며, 초전도한류기의 한류소자인 저항이 커질수록 R-X 좌표에서 X축의 저항방향으로 이동하나 Zone 1의 보호영역을 벗어나지 않아 거리계전기의 동작시간에는 영향이 없음을 예상할 수 있다.

그림 6에 나타난 21₃₁ 임피던스 궤적은 25%를 나타내며 Zone 1의 보호영역에 해당된다. 그림에서 나타난 임피던스 궤적은 초전도한류기의 영향이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있으며, 21₁₃의 임피던스 궤적과 마찬가지로 Zone 1의 보호영역을 벗어나지 않아 거리계전기의 동작시간에는 영향이 없음을 예상할 수 있다.

그림 7과 8은 표 2에 나타난 송전급 초전도한류기의 사양별로 모선 3과 2 사이의 보호구간에 설치된 21₃₂, 21₂₃의 임피던스 궤적 변화를 R-X 좌표에 나타난 그림이다.

그림 7에 나타난 21₃₂의 임피던스 궤적은 21₃₁의 임피던스 궤적과 원점을 기준으로 대칭으로 형성된다. 이는 고장위치는 25%로 같지만 21₃₂에서 외부 고장으로 21₃₁의 고장전류 방향과 21₃₂에서 측정되는 고장전류의 방향이 반대이므로 해당 임피던스 궤적은 거리

계전기의 보호영역 밖인 3사분면에 형성되어 거리계전기가 동작하지 않는다. 초전도한류기의 대한 영향은 21₃₁과 마찬가지로 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

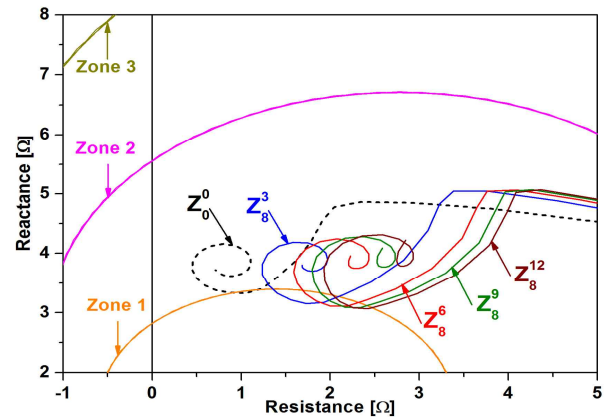


그림 5. 초전도한류기의 사양별 21₁₃의 임피던스 궤적 변화
Fig. 5. Change in the impedance locus 21₁₃ specifications for each of the SFCL

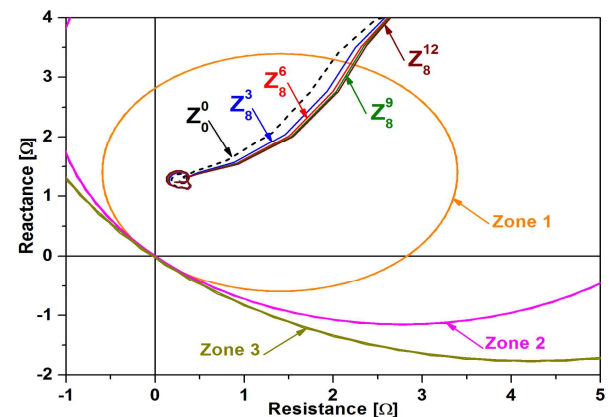


그림 6. 초전도한류기의 사양별 21₃₁의 임피던스 궤적 변화
Fig. 6. Change in the impedance locus 21₃₁ specifications for each of the SFCL

그림 8에 나타난 21₂₃의 임피던스 궤적은 125%를 나타내며 Zone 2의 보호영역에 해당된다. 그림에서 나타난 임피던스 궤적은 초전도한류기의 소자저항의 크기가 커질수록 R-X 좌표에서 X축의 저항방향으로 이동하나 Zone 2의 보호영역을 벗어나지 않아 거리계전기의 동작시간에는 영향이 없음을 확인할 수 있다.

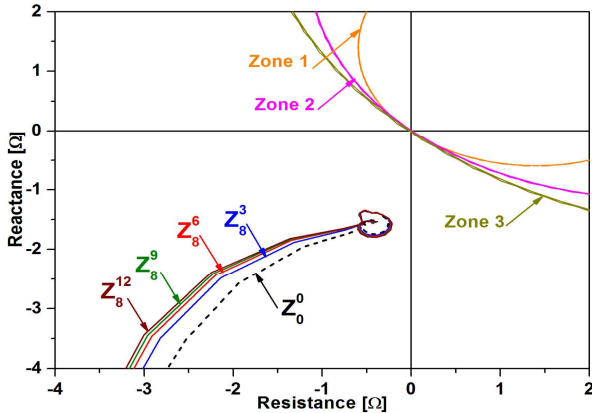


그림 7. 초전도한류기의 사양별 21₃₂의 임피던스 궤적 변화
Fig. 7. Change in the impedance locus 21₃₂ specifications for each of the SFCL

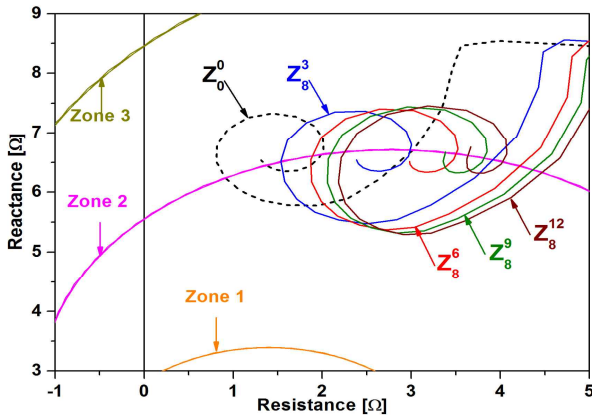


그림 8. 초전도한류기의 사양별 21₂₃의 임피던스 궤적 변화
Fig. 8. Change in the impedance locus 21₂₃ specifications for each of the SFCL

표 3. ZCLR이 리액턴스인 사례연구 구성
Table 3. Configuration of ZCLR in case of reactance

| 구분 Z_{HTSC}^{CLR} | HTSC Resistance(Ω) | CLR Reactance(Ω) |
|------------------------|-----------------------|---------------------|
| Z_0^0 | 0 | 0 |
| Z_8^{j3} | 8 | j3 |
| Z_8^{j6} | 8 | j6 |
| Z_8^{j9} | 8 | j9 |
| Z_8^{j12} | 8 | j12 |

다음은 한류소자가 리액턴스 성분을 가질 경우에 대해 분석하였으며, 사례연구 구성은 표 3을 통해 나타내었다.

그림 9과 10은 표 3에 나타난 송전급 초전도한류기의 사양별로 모선 1과 3 사이의 보호구간에 설치된 21₁₃, 21₃₁의 임피던스 궤적 변화를 R-X 좌표에 나타낸 결과이다.

그림 9에 나타난 21₁₃의 임피던스 궤적은 보호구간 내 Zone 1의 한계영역인 75%를 나타내며, 초전도한류기의 한류소자인 리액턴스 크기가 커질수록 R-X 좌표에서 Y축의 리액턴스 방향으로 궤적이 이동하여 동작영역이 Zone 1에서 Zone 2로 변화함을 확인할 수 있다.

그림 10에 나타난 21₃₁ 임피던스 궤적은 보호영역의 25%의 고장위치로 Zone 1에 해당된다. 앞서 표 2의 사례연구를 통해 확인한 한류소자가 저항성분인 사례의 임피던스 궤적과 마찬가지로 초전도한류기의 영향이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있으며, 임피던스 궤적이 Zone 1의 보호영역을 벗어나지 않아 거리계전기의 동작시간에 영향이 없음을 예상할 수 있다.

그림 11과 12는 표 3에 나타난 송전급 초전도한류기의 사양별로 모선 3과 2 사이의 보호구간에 설치된 21₃₂, 21₂₃의 임피던스 궤적 변화를 R-X 좌표에 나타낸 결과이다.

그림 11의 21₃₂의 임피던스 궤적은 앞서 분석한 한류소자가 저항성분일 경우에 나타난 21₃₂의 임피던스 궤적과 마찬가지로 21₃₁의 임피던스 궤적과 원점을 기준으로 대칭으로 형성된다. 초전도한류기에 대한 영향 또한 21₃₁과 마찬가지로 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

그림 12에 나타난 21₂₃의 임피던스 궤적은 125%를 나타내며 Zone 2의 보호영역에 해당된다. 그림에서 나타난 임피던스 궤적은 초전도한류기의 한류소자인 리액턴스 크기가 커질수록 R-X 좌표에서 Y축의 리액턴스 방향으로 이동하나 Zone 2의 보호영역을 벗어나지 않아 거리계전기의 동작시간에는 영향이 없음을 예상할 수 있다.

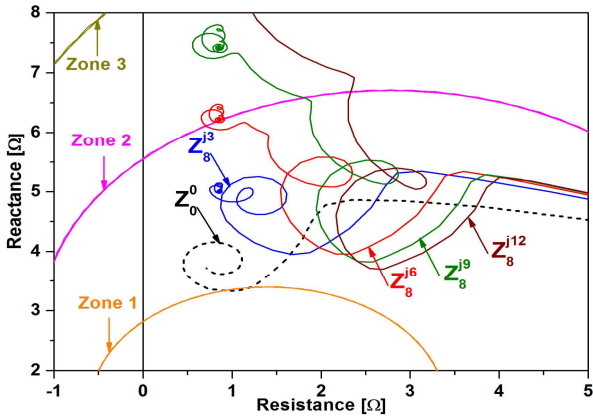


그림 9. 초전도한류기의 사양별 21₁₃의 임피던스 궤적 변화

Fig. 9. Change in the impedance locus 21₁₃ specifications for each of the SFCL

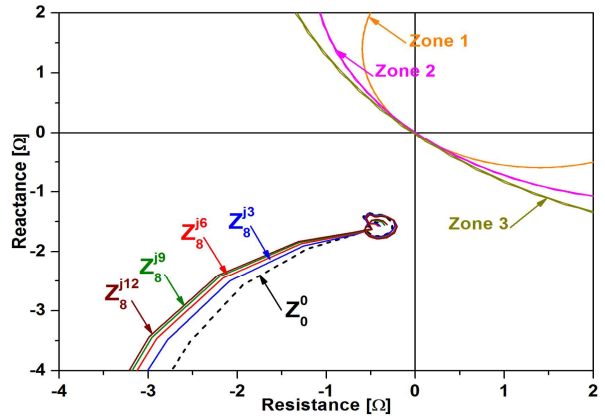


그림 11. 초전도한류기의 사양별 21₃₂의 임피던스 궤적 변화

Fig. 11. Change in the impedance locus 21₃₂ specifications for each of the SFCL

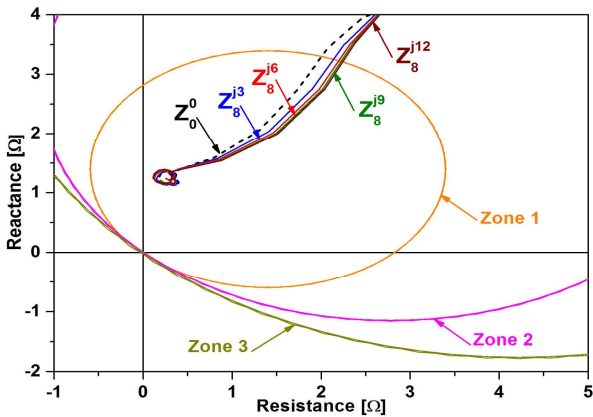


그림 10. 초전도한류기의 사양별 21₃₁의 임피던스 궤적 변화

Fig. 10. Change in the impedance locus 21₃₁ specifications for each of the SFCL

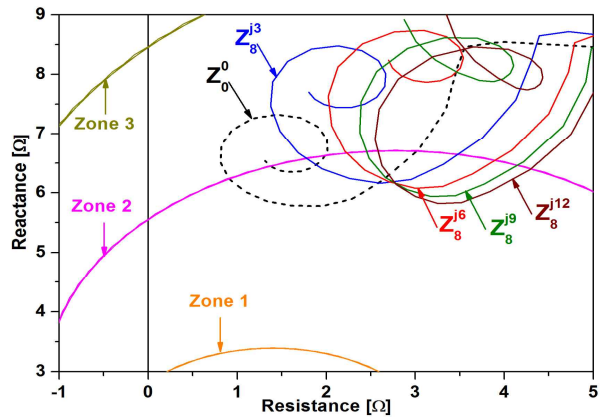


그림 12. 초전도한류기의 사양별 21₂₃의 임피던스 궤적 변화

Fig. 12. Change in the impedance locus 21₂₃ specifications for each of the SFCL

4. 결 론

본 논문에서는 송전계통 내 초전도한류기 적용을 위해 제안되고 있는 초전도한류기 모델과 송전선로에서 후비보호기기로 많이 사용되는 거리계전기간의 동작특성을 알아보았다. 분석을 위해 송전급 초전도한류기의 한류소자가 저항성분과 리액턴스 성분일 경우에 따른 거리계전기의 임피던스 궤적 변화를 확인하였다. 그 결과로 거리계전기는 초전도한류기를 설치한 선로의 고장에서 인근에 위치한

거리계전기에서 영향이 많이 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 초전도한류기의 한류소자가 저항성분일 때는 동작시간의 변화가 크게 나타나지 않았으나, 초전도한류기의 한류소자가 리액턴스 성분일 때는 내부고장 구간에서 보호구역 한계영역에서 동작시간이 Zone 1에서 Zone 2로 변함을 확인할 수 있었다.

이 같은 분석을 통해 초전도한류기의 한류소자가 리액턴스 성분일 때 고장보호 구간에 따른 거리계전기의 동작시간이 변화함을 알 수 있었으며, 이는 거리계

전기간의 보호협조에 문제가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 그러므로 향후 송전계통에 초전도한류기 적용을 위해서는 초전도한류기의 사양에 대한 검토와 거리계전기의 오부동작 사례에 대한 해결책이 마련되어야 할 것이다.

감사의 글

“본 과제는 지식경제부에 의해 투자된 전력산업융합원천기술개발의 일환으로 수행되었음”

References

[1] Kim, J. S, “A Study on Application of Superconducting Fault Current Limiter into Large Power Transformer installed in Distribution Substation”, Soong-sil Univ., 2009.

[2] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, “Development of new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system”, IEEE Trans. Appl. Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 188-198, Jan. 1993.

[3] Seung Ryul Lee, Jae-young Yoon, and Byongmo Yang, “Protection system for the application of 22.9 kV HTS cable and FCL to real power grid in Korea”, Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol. 12, No. 3, pp. 25-28, 2010.

[4] Jong-Soo Choi, Myoung-Hoo Kim, Il-Kyoung You, Jin-Seok Kim, Sung-Hun Lim, and Jae-Chul Kim, “Analysis on Current Limiting and Recovery Characteristics of a Trigger Type SFCL as the Composition of the Contact”, Journal of KIEE, Vol. 24, No. 9, pp. 159-164, 2010.

[5] Lee, S. R, Yoon, J. Y, Hwang, I. T, Yang, B. M, “A basic study on the activating current of 154kV SFCL”, 2012 Spring conference of KIEE, pp. 40-42, 2012.

[6] Lee, S. R, Yoon, J. Y, Hwang, I. T, Yang, B. M, “A basic study on the current limiting resistance/reactance for the application of 154kV SFCL to Korean power systems”, 2012 Spring conference of KIEE, pp. 37-39, 2012.

[7] Hyun, O. B, Park, K. B, Sim, J, Kim, H. R, “Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1946-1949, 2009.

[8] Choi, J. S, Kim, M. H, You, I. K, Kim, J. S, Lim, S. H, Kim, J. C, “Analysis on Current Limiting and Recovery Characteristics of a Trigger Type SFCL as the Composition of the Contact”, Journal of KIEE, Vol. 24, No. 9, pp. 159-164, 2010.

[9] Cho, Y. S, Kim, J. S, Kim, M. H, Kim, Y. K, Noh, S. E, Lim, S. H, Kim, J. C, “Analysis on Operating Characteristics between the Current Ratio Differential

Relay and the Overcurrent Relay in s Loop Power Distribution System with the introduction of Trigger-type SFCL”, 2012 Autumn Conference of KIEE, pp. 129-130, 2012.

[10] Kim, M. H, Kim, J. S, Lim, S. H, Kim, J. C, “A study on the Effect of Superconducting Fault Current Limiter on Power System with Separated Bus and Superconducting Fault Current Limiter”, Journal of KIEE, Vol 26, No. 12, pp. 74-79, 2012.

◇ 저자소개 ◇



노신의(盧信義)

2012년 숭실대 전기공학과 졸업. 2014년 2월 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
E-mail : nono3005@ssu.ac.kr



김진석(金辰碩)

2007년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2009년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009~2014년 2월 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사).
E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr



김이관(金二寬)

2012년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2014년 2월 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
E-mail : yigwan86@hanmail.net



김재철(金載哲)

1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수. 본 학회 회장.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr



임성훈(林成勳)

1996년 전북대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학 부교수.
E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr