

배전계통에 초전도 전류 제한기 적용시 보호협조 분석

論 文
57-5-4

Analysis on the Protective Coordination in Power Distribution System with Superconducting Fault Current Limiter

安宰民* · 金辰碩* · 文鍾必** · 林成勳*** · 金載哲† · 金喆煥§ · 玄鈺培§§
(Jae-Min Ahn · Jin-Seok Kim · Jong-Fil Moon · Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim ·
Chul-Hwan Kim · Ok-Bae Hyun)

Abstract - The increase of fault current due to larger power demand has caused the capacity of power machines in grid to increase. To protect the power system effectively from the larger fault current, several countermeasures have been proposed. Among them, the superconducting fault current limiter (SFCL) has been expected as one of the most effective solutions. Therefore, to introduce SFCL into power distribution system, the analysis on protection in power distribution system with SFCL is essential. In this paper, the problems of the protective coordination in power distribution system with SFCL were described.

Key Words : Superconducting fault current limiter, Over current relay, Power distribution system

1. 서 론

지속적인 전력수요의 증가로 인하여 발전설비가 증가됨에 따라 계통 고장시 단락용량과 고장전류가 급격히 증가하고 있다. 여기에 더하여, 최근 증가하고 있는 신재생에너지의 계통연계는 고장전류 증가를 가속화하고 있는 실정이다. 이러한 고장전류의 증가는 전력계통 설비들의 안정도에 문제를 야기할 수 있으며, 특히 계통 고장시 고장전류가 차단기 용량을 넘어서는 경우가 발생할 수 있어 보다 용량이 큰 차단기로의 교체를 요구하고 있다 [1].

이러한 차단기의 교체는 많은 비용이 발생하므로, 보다 저렴한 방안으로 초전도 전류 제한기의 도입을 적극적으로 검토하고 있다. 즉, 초전도 전류 제한기의 계통 적용은 고장시 신속하게 고장전류를 제한함으로써 고장전류 용량 초과에 따른 기존 차단기의 교체비용을 감소시킬 수 있으며, 또한 고장시 계통 설비들이 받는 충격을 완화시킬 수 있다. 그러나 전력계통에 초전도 전류 제한기를 적용하게 되면 초전도 전류 제한기의 상전도 저항값에 따른 고장전류 값의 변화로 기존에 정정되었던 보호계전기의 동작특성이 변할 가능성이 있다.

따라서 본 논문에서는 배전계통에 초전도 전류 제한기를

적용 후 보호협조 할 경우 기존 보호협조에서 야기될 수 있는 문제점을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 분석하였다. 분석을 위해 우선 초전도 전류 제한기의 켈치특성과 회복특성을 모델링하고 다음으로 과전류 계전기(Over Current Relay)의 시간-전류 곡선(Time-Current Curve)을 모델링하였다. 샘플 배전계통에 모델링된 초전도 전류 제한기를 적용하여 과전류계전기의 보호협조를 분석하였다.

2. 초전도 사고전류제한기, 보호기기 및 배전계통 모델링

2.1 초전도 전류 제한기 모델링

고장전류 제한을 위한 다양한 종류의 초전도 전류 제한기가 제안되어왔다[2-4]. 즉, 저항형, 유도형, 브릿지형, 하이브리드형, 자속구속형 등의 다양한 초전도 사고전류 제한기에 대한 연구가 진행되어왔다. 본 논문에서는 가장 기본적이고 가장 광범위하게 사용되는 저항형 초전도 사고전류 제한기를 모델링하였다. 식 (1)은 모델링한 초전도 전류 제한기의 켈치 및 회복특성을 나타낸다.

$$R(t) = \begin{cases} 0 & (t_0 > t) & (1.1) \\ R_n \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{T_F}\right) \right]^{\frac{1}{2}} & (t_0 \leq t < t_1) & (1.2) \\ a_1(t-t_1) + b_1 & (t_1 \leq t \leq t_2) & (1.3) \\ a_2(t-t_2) + b_2 & (t_2 \leq t) & (1.4) \end{cases}$$

여기서 R_n 은 켈치발생시 수렴하는 상전도 저항, T_F 는 시정수를 나타내고 t_0, t_1, t_2 는 각각 켈치 발생시간, 1차

* 學生會員 : 崇實大 工大 電氣工學部 碩士課程
 ** 正會員 : 基礎電力研究員
 *** 正會員 : 崇實大 工大 電氣工學部 教授 · 工博
 § 正會員 : 成均館大 情報通信共學部 教授 · 工博
 §§ 正會員 : 韓國電力研究員
 † 교신저자, 正會員 : 崇實大 工大 電氣工學部 教授 · 工博
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr
 接受日字 : 2008年 2月 15日
 最終完了 : 2008年 4月 11日

회복시간, 2차 회복시간을 의미한다.

초전도 전류 제한기가 배전계통에 적용되기 위해서는 배전계통 보호기기의 재폐로 시간인 0.5 [s]이내에 회복되어야 한다. 참고문헌 [5]는 초전도 소자의 회복특성을 실험하였으며 0.5 [s]이내에 회복되는 특성을 보이므로, 본 논문에서는 초전도 전류 제한기가 0.5 [s]이내에 회복된다고 가정하였다. 또한 상전도 저항은 5 [Ω]을 적용하여 문제점을 분석하고 해결책을 찾기 위해 가변하여 시뮬레이션 하였다. 모델링에 사용한 상전도 저항의 크기와 시정수, 1차와 2차 회복속도는 표 1에 나타내었다.

표 1 초전도 전류 제한기 파라미터
Table 1 Parameter of SFCL

파라미터	값
R_n [Ω]	5
T_F	0.01
a_1 [Ω/s]	20
a_2 [Ω/s]	50
b_1 [Ω]	5
b_2 [Ω]	3

초전도 전류 제한기는 초전도 상태에서 고장이 발생하여 임계전류($I_c = I_{critical}$)를 초과하면 켄치로 인해 저항이 발생하고 고장이 제거되면 초전도 상태로 2단계에 걸쳐 회복을 한다. 그림 1은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현한 초전도 전류 제한기의 켄치 및 회복특성 흐름도를 보여주며, 그림 2에 고장전류에 따라 모델링된 초전도 전류 제한기의 동작특성을 나타낸다.

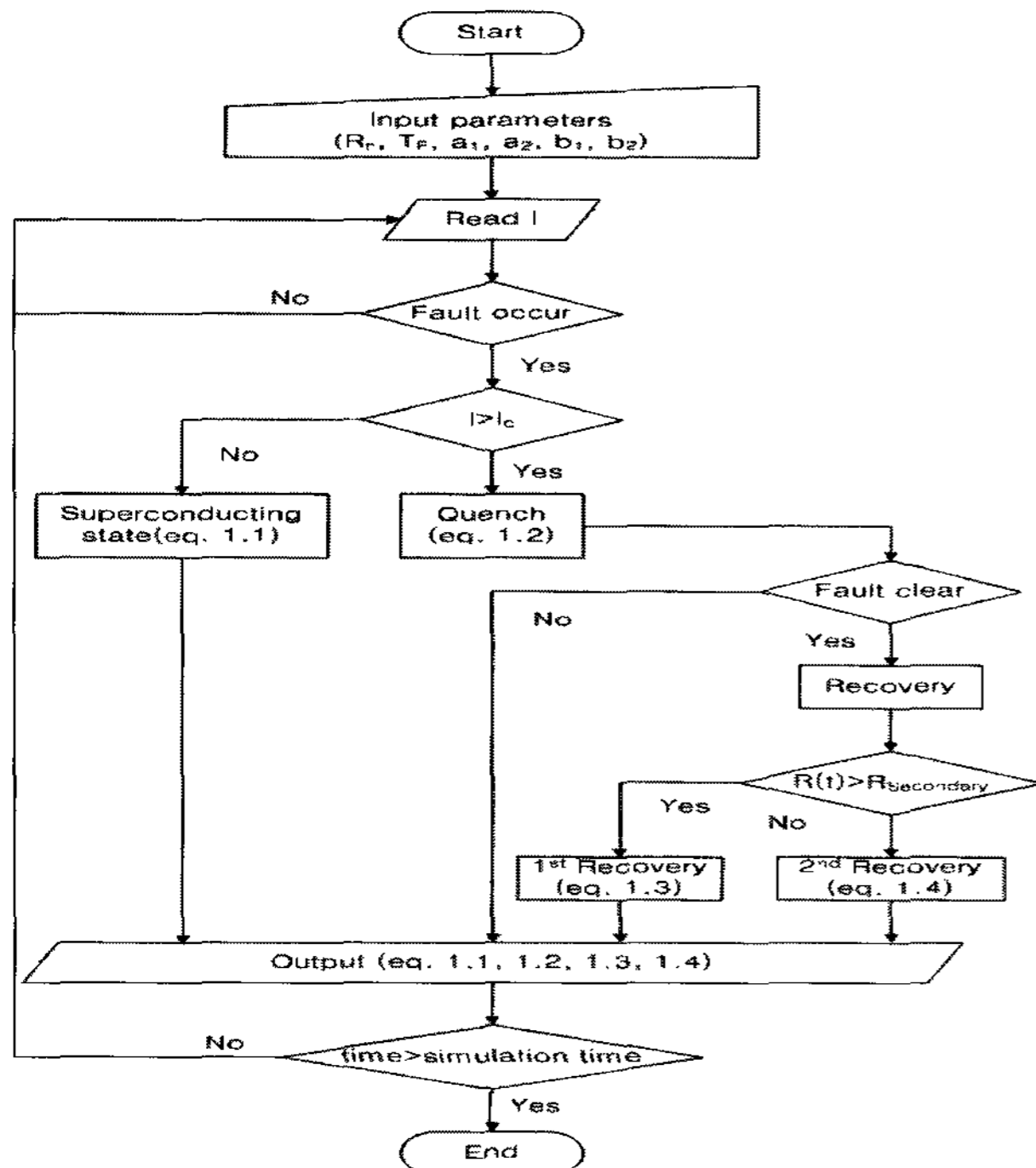


그림 1 초전도 전류 제한기의 동작 흐름도
Fig. 1 Flow chart of SFCL

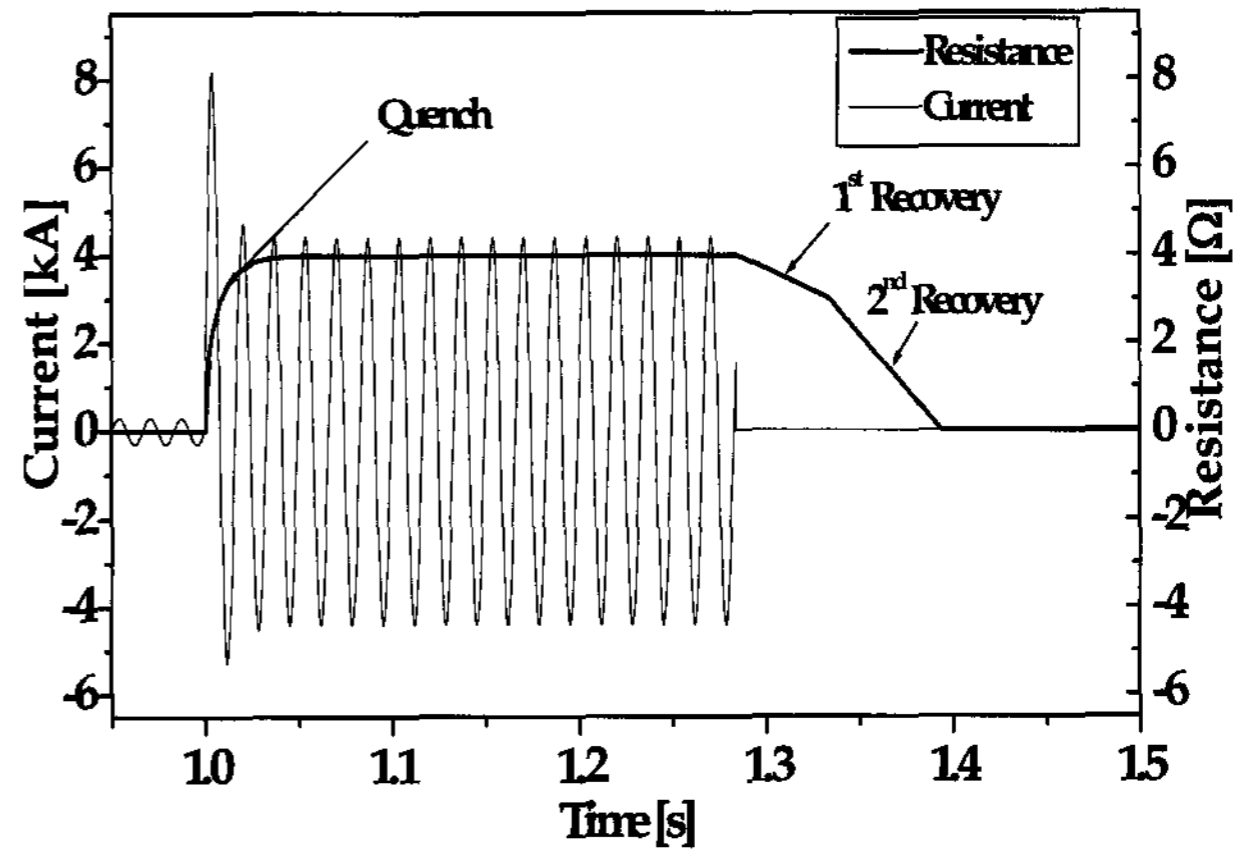


그림 2 고장전류에 따른 초전도 전류 제한기의 저항곡선
Fig. 2 Resistance curve of SFCL as fault current

위 그림의 파형은 1 [s]에 고장이 발생하여 고장전류가 임계전류(I_c)를 초과하면 초전도 전류 제한기가 켄치를 발생하고 차단기에 의해 고장이 제거되어 초전도 전류 제한기에 흐르는 전류가 임계전류 이하가 되면 20 [Ω/s]의 속도로 1차 회복하고 2차 회복저항($R_{secondary}$) 이하가 되면 50 [Ω/s]의 속도로 2차 회복하는 특성을 나타낸다.

2.2 과전류 계전기 (Over Current Relay) 모델링

배전계통은 일반적으로 과전류 보호계전 방식을 사용한다. 이는 고장전류 차가 확실하며 수지상 방식인 배전계통에서는 방향요소가 필요하지 않기 때문이다. 과전류 보호계전 방식에 사용되는 과전류 계전기(OCR)는 입력전류(I_{input})가 정정치(I_{pickup})보다 크면 시간-전류 곡선(Time-Current Curve)에 의해서 동작한다. 과전류 계전기의 시간-전류 곡선은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{trip}(I) = TD \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) + K \tag{2}$$

여기서, $t_{trip}(I)$ 는 과전류 계전기의 입력전류에 대한 트립시간을 말하고 TD는 time dial(레버), M은 입력전류/정정치의 비를 의미한다. 상수 A, B, p, K는 특성상수이며, 규격 및 제조사별로 그 값이 다르다. 본 논문에서는 한국전력공사에서 사용하는 KVI(KEPCO Very Inverse) 곡선을 사용하였다.

PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하기 위한 과전류 계전기의 동작 흐름도를 그림 3에 나타내었으며 그림 4는 과전류 계전기의 동작특성에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

그림 4의 결과 파형은 0 [s]에서 고장이 발생하여 고장전류의 실효치가 TC 곡선과 만나는 시점에서 과전류 계전기의 트립 신호가 발생하여 차단기가 개방되는 것을 나타낸다.

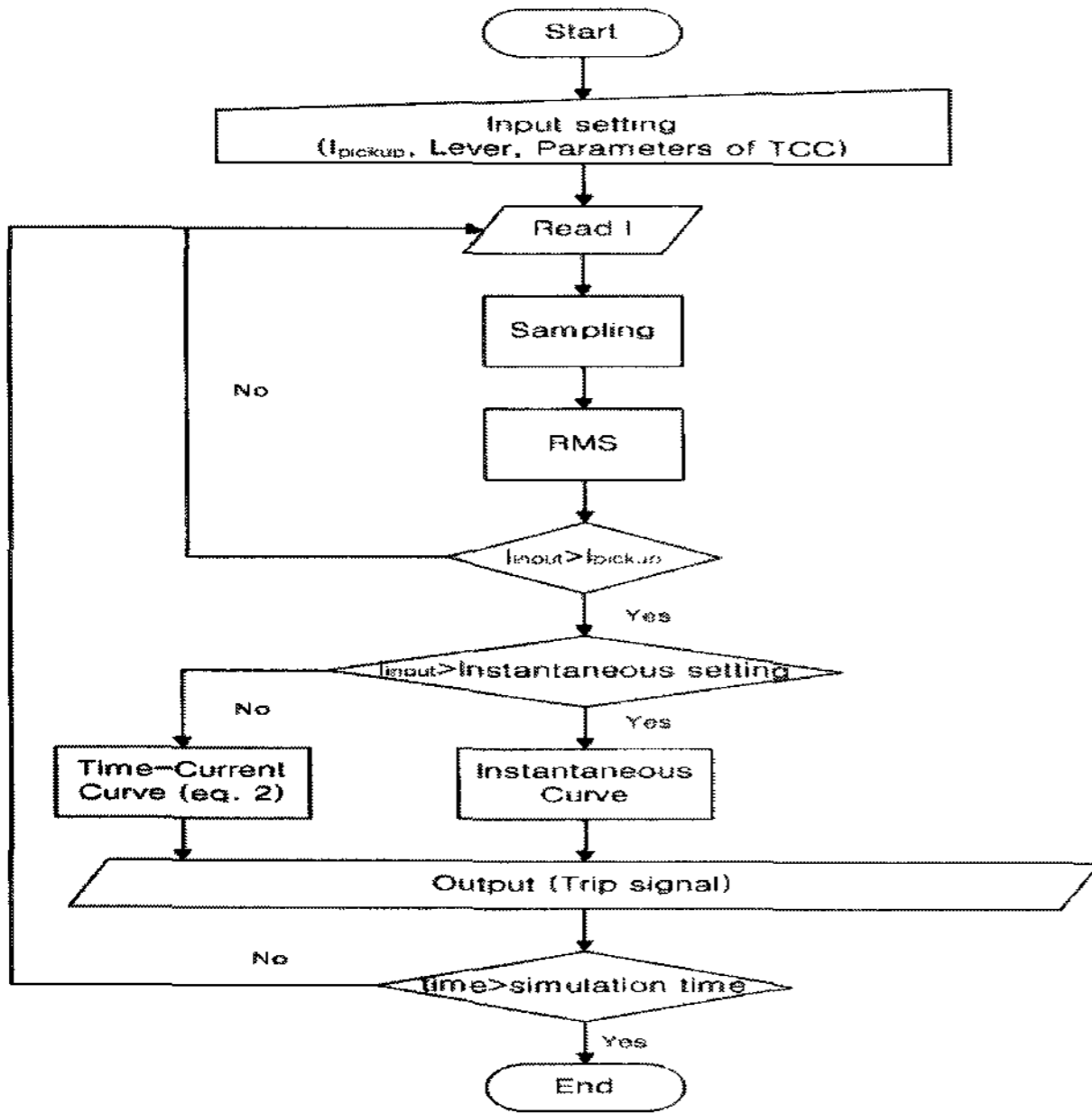


그림 3 과전류 계전기의 동작 흐름도
Fig. 3 Flow chart of OCR operation

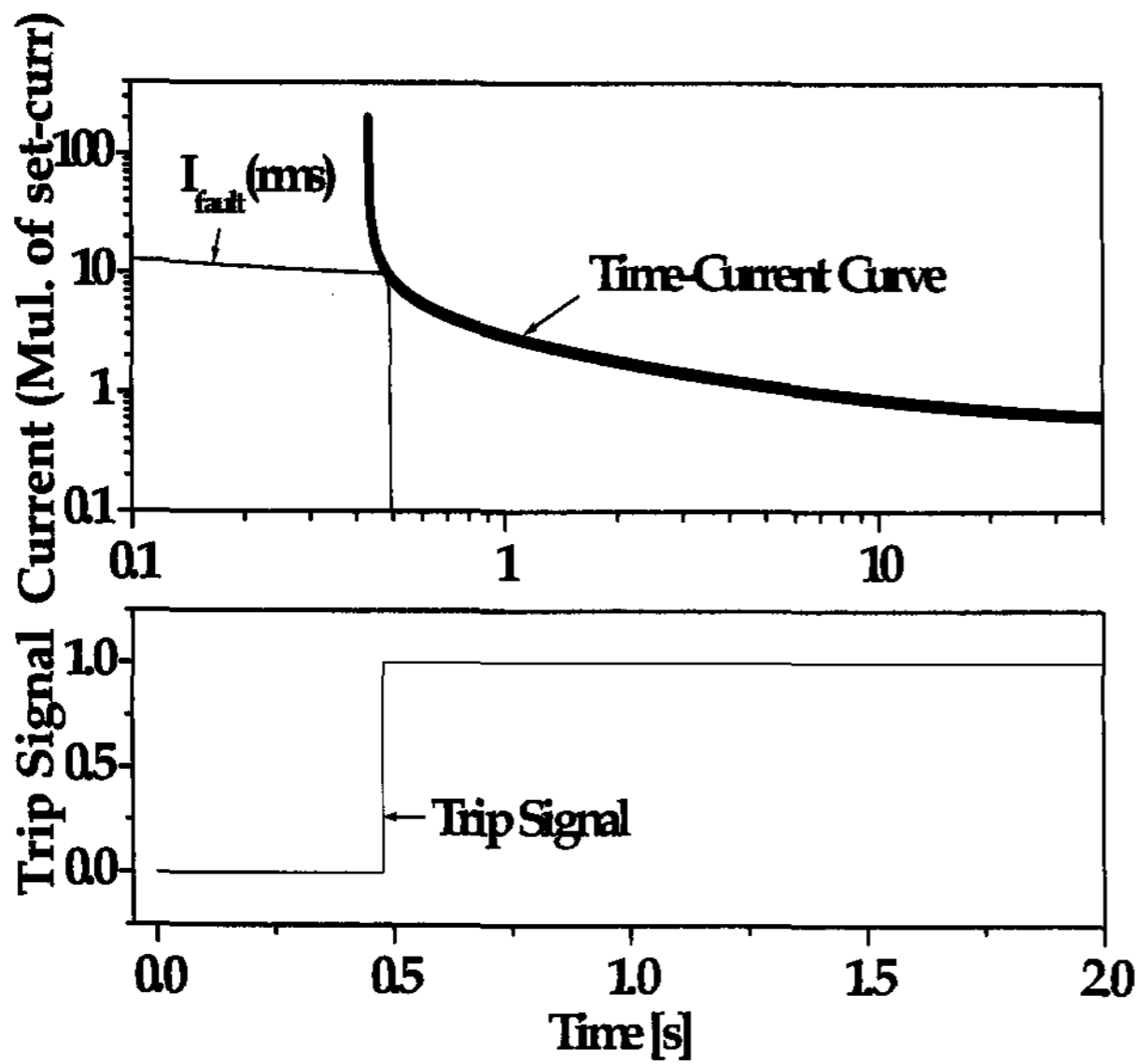


그림 4 과전류 계전기의 동작 특성 파형
Fig. 4 Waveform for operational characteristic of OCR

2.3 배전계통 모델링

그림 5는 초전도 전류 제한기와 보호계전기 테스트를 위한 샘플 배전계통을 나타낸다. 초전도 전류 제한기는 변압기 2차측, 연계선로, 피더보호용 등에 적용할 수 있으며 적용되는 위치에 따라 효과가 다르게 된다[7]. 본 논문에서는 초전도 전류 제한기를 변압기 2차측에 적용하였다. 전체 부하용량은 45 [MVA]로 설정하였고 피더 1에 9 [MVA], 피더 2에 7 [MVA], 피더 3에는 나머지 피더의 부하들을 집중하여 29 [MVA]를 적용하였다. 피더보호용으로 과전류 계전

기를 모델링하여 적용하였고 순시요소의 정정치를 정하기 위해 부하측에 전위 보호기기(protecting device)를 적용하였다. 배전계통에 적용한 전원임피던스, 변압기 임피던스 및 선로 임피던스는 표 2와 같다. Case 1, Case 2 위치에서 사고를 모의하여 과전류 계전기의 한시 및 순시동작 특성을 분석하였다.

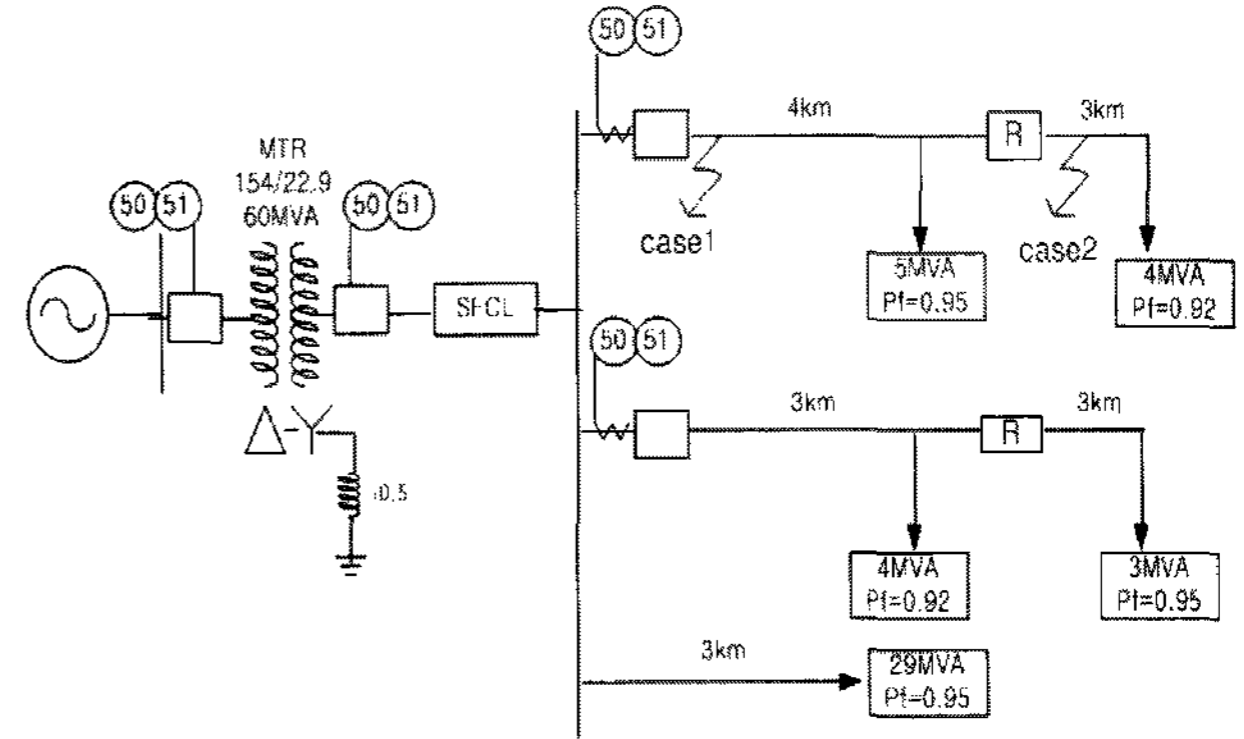


그림 5 배전계통 구성도
Fig. 5 Configuration of power distribution system

표 2 배전계통 임피던스
Table 2 Impedance of power distribution system

구분	임피던스 값
전원 임피던스	1.778 ∠ 80° [Ω] (정상) 1 ∠ 80° [Ω] (역상)
변압기 임피던스	j0.15 [pu]
선로 임피던스	0.2024 + j0.3891 [Ω/km] (정상) 0.5175 + j1.1893 [Ω/km] (역상)

3. 정정지침에 따른 보호협조 시뮬레이션

3.1 정정지침

본 논문에서는 초전도 전류 제한기를 변압기 2차측에 적용시 피더 보호용 보호기기인 과전류 계전기 동작특성 변화를 조사하고 초전도 전류 제한기 적용에 따른 보호협조 재정정 방안을 제시하고자 한다. 표 3은 현재 한국전력공사에서 적용하고 있는 피더보호용 보호기기의 정정지침을 보여준다[8].

표 3 피더보호용 보호기기 정정지침
Table 3 Setting rules of protective device for feeder protection

구분	정정지침
순시 탭	전위보호기기 설치점의 3상 단락전류 × 1.5이상
한시 탭	최대부하전류 × 1.5이상
한시레버	변전소 인출점 3상 단락전류에서 0.5초 (30cyc)이하로 동작 (단, 협조가 어려울 경우 0.6초 이하)

3.2 보호협조 시뮬레이션

표 3에 제시된 정정기준에 적합하도록 모델링한 과전류 계전기를 정정하였고 내용을 정리하면 표 4와 같다.

표 4 정정표

Table 4 Setting table

항목	과전류 계전기	전위 보호기기
부하전류	226.9 [A(rms)]	100.9 [A(rms)]
최대부하 전류	352.9 [A(rms)]	156.8 [A(rms)]
정정치(한시)	529 [A(rms)]	235.3 [A(rms)]
정정치(순시)	6.39 [kA(rms)]	-
레버	4	2
사고전류	15.35 [kA(rms)]	4.26 [kA(rms)]
배율 (case 1)	29	-
배율 (case 2)	8	18

위와 같이 정정을 한 후 보호기기가 정확히 동작하는 것을 확인하기 위하여 EMTDC를 이용하여 확인하였다. Case 1 고장시 그림 6과 같이 과전류 계전기가 순시정정치를 넘게되어 순시로 트립신호를 보내고 차단기 개방시간(3 주기)이 추가되어 3.25 주기(cycle) 이후에 고장전류가 차단되는 것을 확인하였다.

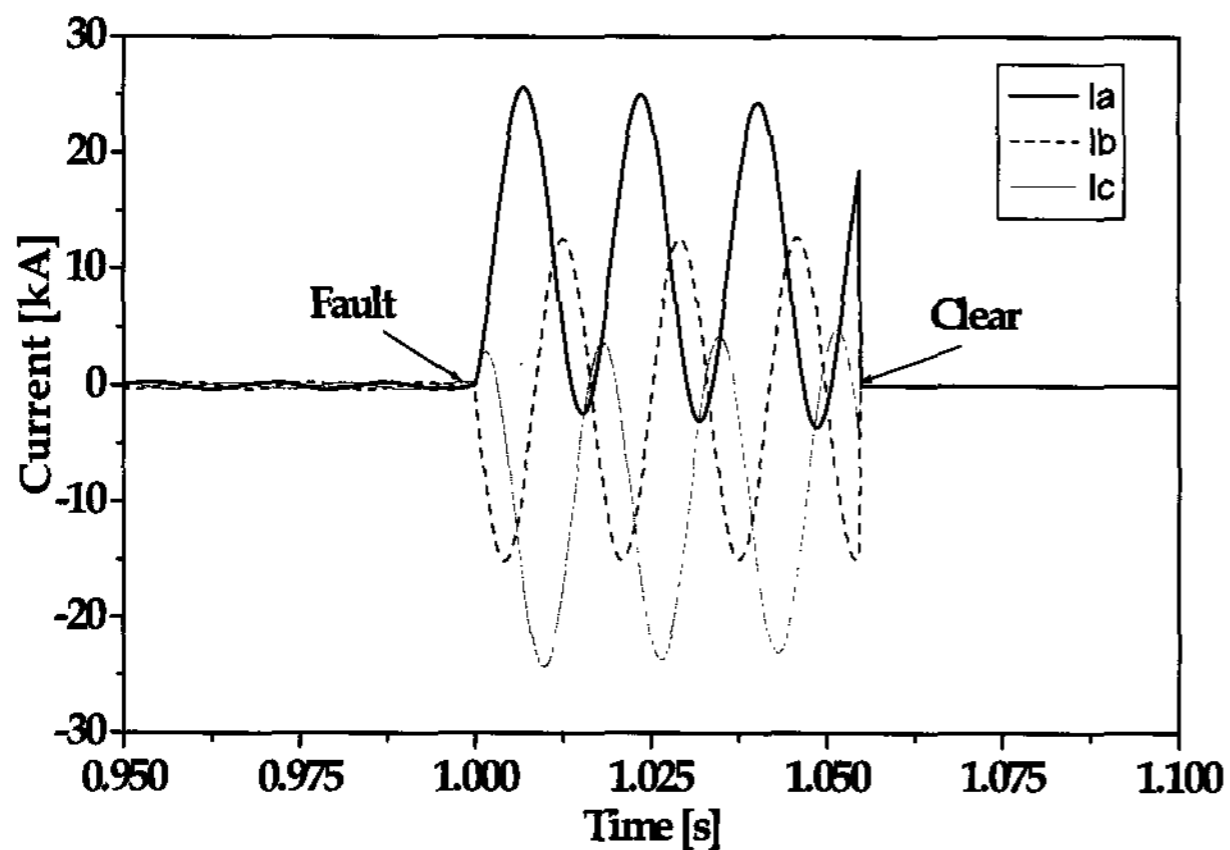


그림 6 case 1 고장시 고장전류 파형
Fig. 6 Fault current waveform of case 1

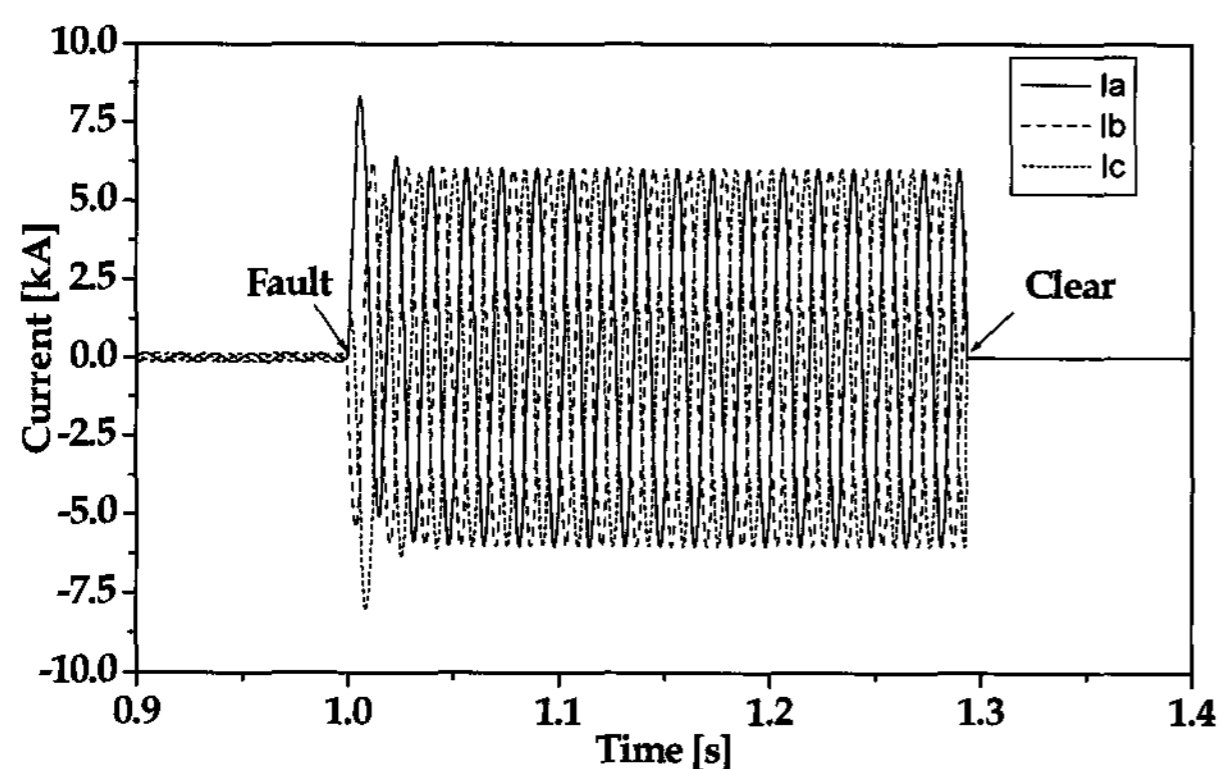


그림 7 case 2 고장시 고장전류 파형
Fig. 7 Fault current waveform of case 2

Case 2 고장시에는 전위보호기기가 시간-전류 곡선에 의해 동작해야한다. M값이 18배 이므로 고장발생 후 0.245 [s] 이후에 트립신호가 발생해야하고 차단기 개방시간(3 주기) 이후 고장전류가 차단되어야한다. 결과는 그림 7에 나타내었고 정확히 동작하는 것을 확인하였다.

4. 초전도 전류 제한기 적용시 보호협조 분석

상전도 저항이 5 [Ω]인 초전도 전류 제한기를 변압기 2차 측에 적용하고 Case 1, Case 2에서 3상 단락사고를 상정하여 시뮬레이션하였다. Case 1에서 고장이 발생한 경우의 파형은 그림 8과 같다. 이 파형은 초전도 전류 제한기로 인해 고장전류가 감소하여 고장제거 시간이 증가함을 보여준다. 이것은 순시요소가 초전도 전류 제한기로 인해 고장전류를 순시요소 정정치보다 작게 제한하여 동작하지 않는 것을 알 수 있고 정정지침에서 변전소 인출점 3상 단락전류에서 0.5 [s] 이하에서 동작하여야하는데 정정기준을 벗어나는 것을 의미한다.

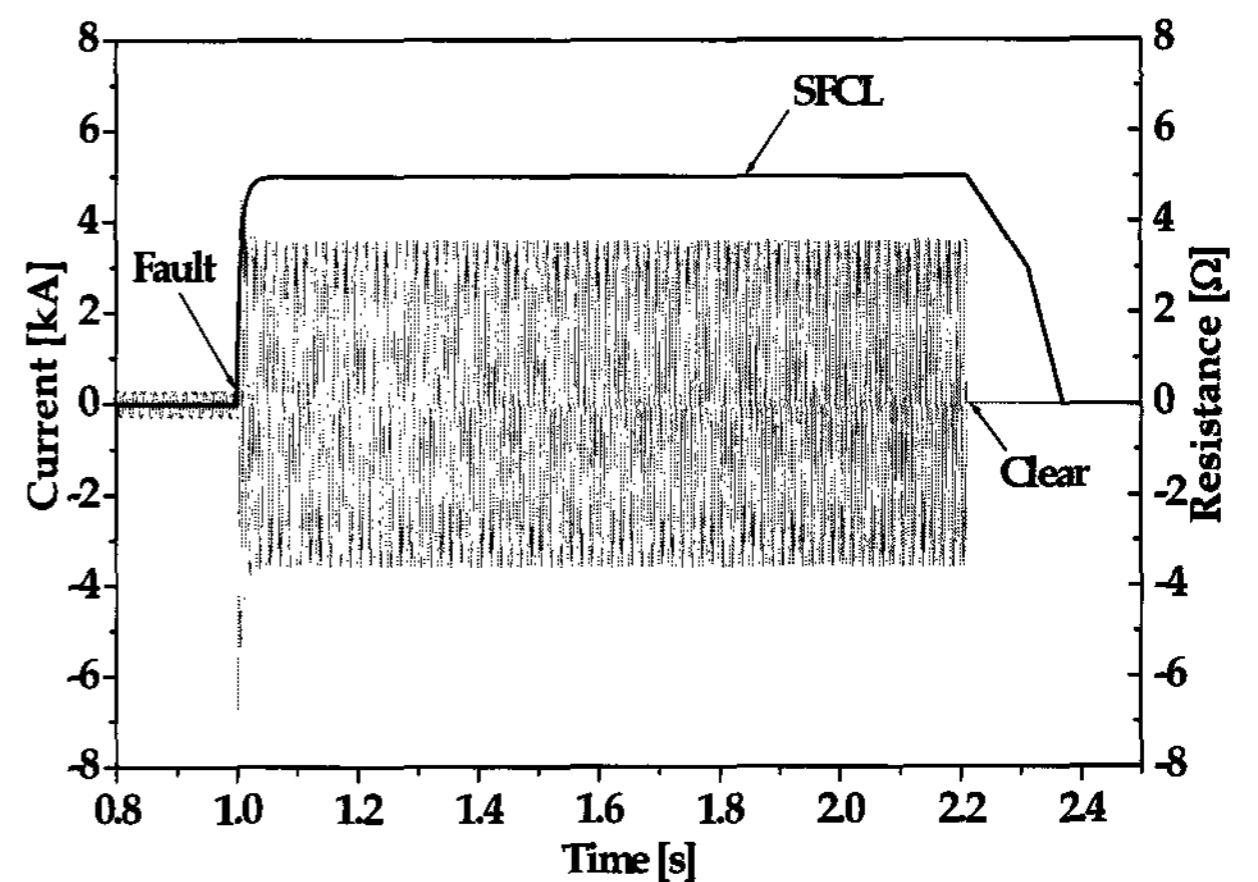


그림 8 초전도 전류 제한기 적용시 Case 1 고장전류 파형
Fig. 8 Fault current waveform of case 1 with SFCL

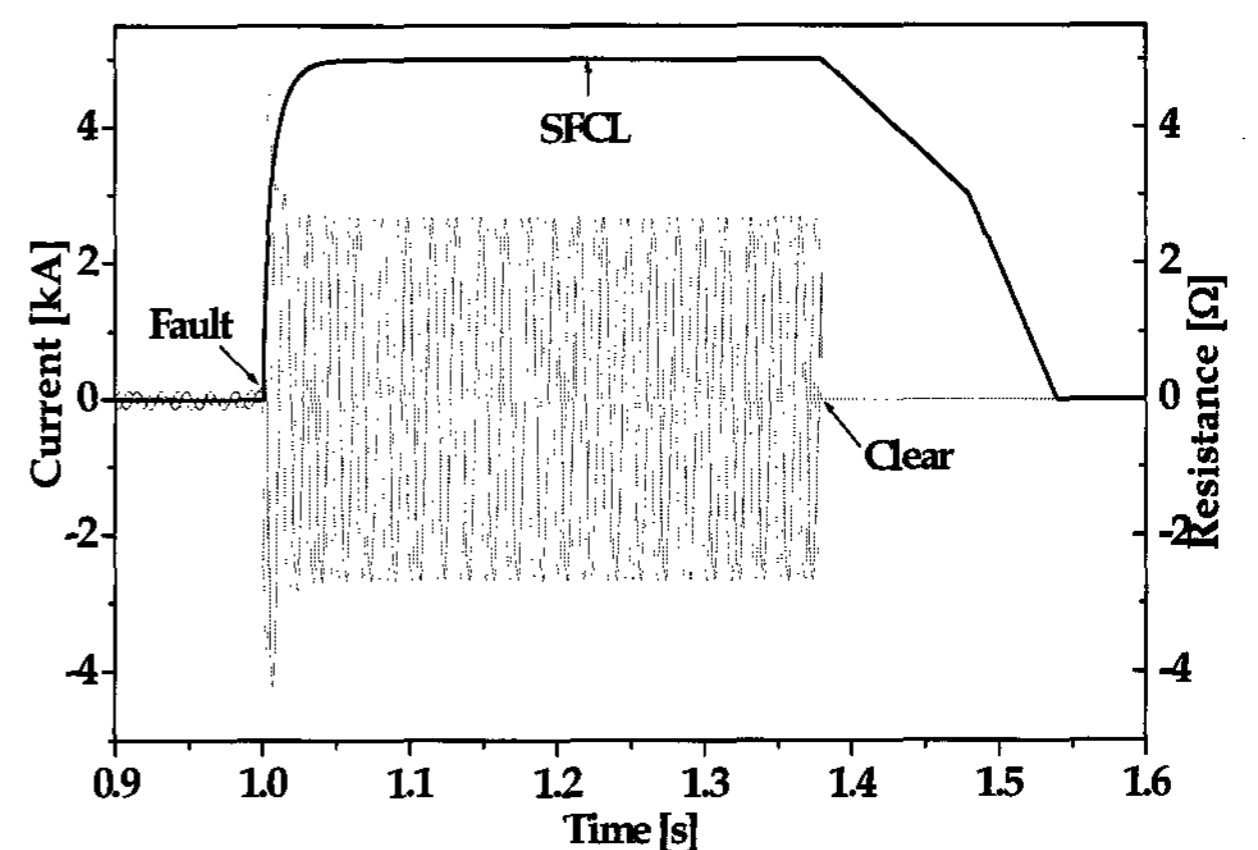


그림 9 초전도 전류 제한기 적용시 case 2 고장전류 파형
Fig. 9 Fault current waveform of case 2 with SFCL

두 번째로, Case 2에서 3상 단락고장을 모의하여 과전류 계전기와 전위보호기기의 보호협조 여부를 분석해보아야 한다. Case 2에서 고장을 모의한 파형은 그림 9와 같다. 이 파형은 초전도 전류 제한기가 적용되어 Case 2에서의 고장전류가 4.26 [kA]에서 1.86 [kA]로 감소하여 전위 보호기기의 고장제거 시간이 증가함을 의미한다. 그러나 이 경우에는 과전류 계전기와 전위보호기기의 보호협조 시간을 시간-전류 곡선에서 확인해보면 약 0.5초로 보호협조 시간을 유지하기 때문에 보호협조 문제는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

이상을 정리하면, 변전소 주변압기 2차 측에서 초전도 전류 제한기를 적용하면 고장시 고장전류 제한으로 피더보호용 과전류 계전기의 정정치가 정정지침을 벗어나고, 또한 순시요소는 오부동작 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통에 초전도 전류 제한기를 적용하여 피더보호용 과전류 계전기의 동작특성 변화를 분석하였고 고장전류 변화에 따른 보호협조 대해 분석하였다. 분석 결과는 배전계통에 초전도 전류 제한기를 적용할 경우 고장전류가 보호기기의 순시요소 정정치 이하로 되지 않도록 초전도 전류 제한기의 상전도 저항을 제한해야한다. 또한 상전도 저항으로 인해 변하는 고장전류에 대해 분석 후 보호기기를 재정정 함으로써 정정치침을 만족시켜 고장으로 인한 정전시간을 보다 단축시켜야한다. 이러한 분석 결과를 도출하기 위하여 본 논문에서는 초전도 전류 제한기의 켄치 및 회복 특성을 모델링 하였고 과전류 계전기와 배전계통을 모델링하였다. 초전도 전류 제한기가 적용되면 고장전류 변화로 인해 피더보호용 과전류 계전기의 순시요소는 오부동작하고 변전소 인출점 3상 단락전류에서 정정치침을 초과하는 결과를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 도출하였다.

본 논문은 초전도 전류 제한기를 실제 계통에 적용하기 위해 보호협조를 검토하기위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, pp.19-31, 1998
 [2] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito K. Tasaki, and K. Tsurunaga, "Development of a new 6.6kV/1500A class wuperconducting fault current limiter for electric power system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 182-192, Jan. 1993.
 [3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Krämer, P.

kummeth, and H.-W. Neumüller, "Resistive current limiters with YBCO films," IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 7, no. 2, pp. 828-831, Jun. 1997.

[4] W. Paul, Th. Baumann, J. Rhyner, and F. Platter, "Test of 100 kW high-Tc superconducting fault current limiter," IEEE Trans. Appl. superconduct., vol. 5, no. 1, pp. 1059-1062, June 1995.
 [5] H.-R. Kim, S.-W. Yim, O.-B. Hyun, J. Sim, and S.-Y. Oh, "Analysis on recovery characteristics of superconductiong fault current limiters," MT-20 Conference on Magnet Technology
 [6] IEEE PSRC Committe, IEEE Sta C37.112-1996, IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equation for Overcurrent Relays
 [7] H. Kameda, and H. Taniguchi, "Setting Mothod of Specific Parameter of a Superconducting Fault Current Limiter Considering the Operation of Power System Protection," IEEE Tran. Appl. Superconduct., vol. 9, no. 2, June 1999.
 [8] 한국전력공사 배전처, "배전보호기술서," 1995.

저 자 소 개



안재민 (安宰民)

1982년 1월 30일생, 2007년 안양대 전기 전자공학과 졸업, 2007년~현재 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (02) 817-7966

Fax : (02) 817-0780

E-mail : oloajm@hanmail.net



김진석 (金辰碩)

1983년 1월 26일생, 2007년 서울산업대 전기공학과 졸업, 2007년~현재 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (02) 817-7966

Fax : (02) 817-0780

E-mail : redwolf832@nate.com



문종필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생, 2000년 숭실대 전기 공학과 졸업, 2007년 동대 대학원 전기공 학과 졸업(공박), 2008년~현재 숭실대 전기공학과 전임강사.

Tel : (02) 828-7266

Fax : (02) 817-0780

E-mail : pickhard@ssu.ac.kr



임 성 훈 (林 成 勳)

1973년 11월 1일생, 1996년 전북대 전기공학과 졸업, 2003년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 2006년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 828-7268

Fax : (02) 817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~현재 숭실대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 817-0647

Fax : (02) 817-0870

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 10일생, 1982년 성균관대 전기공학과 졸업, 1990년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장.

Tel : (031) 290-7124

Fax : (031) 290-7179

E-mail : hmwkim@hanmail.net



현 옥 배 (玄 鈺 培)

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이박), 현재 전력연구원 수석연구원.

Tel : (042) 865-7510

Fax : (042) 865-5206

E-mail : hyun@kepri.re.kr