

## 1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한특성

### Current Limiting Characteristics of a Resistive SFCL for a Single-line-to-ground Fault in the 22.9 kV System

최효상, 황시돌, 현옥배

(Hyo-Sang Choi, Si-Dole Hwang, Ok-Bae Hyun)

#### Abstract

We simulated the current limiting characteristics of a resistive superconducting fault current limiter (SFCL) for a single line-to-ground fault in the 22.9 kV system. The transient current during the fault increased to 6.33 kA, 5.80 kA and 3.71 kA without SFCL at the fault angles of 0°, 45° and 90°, respectively. a resistive SFCL limited effectively the fault current to 2.27 kA in a half cycle without any DC components. The maximum quench resistance of an SFCL, 16 Ω was suggested to be appropriate to limit the fault current in the 22.9 kV distribution system, considering the operating cooperation of a protective relay and the current limiting performance of an SFCL.

**Key Words** : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Single Line-to-Ground Fault, Quench resistance

#### 1. 서론

현재 전세계적으로 수행되고 있는 초전도 한류기에 대한 연구는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 그 하나가 YBCO 박막이나 thick film 또는 bulk를 이용한 저항형이고, 다른 형태는 변형된 변압기 형태를 갖는 차폐형과 이를 응용한 hybrid 형태를 포함하는 유도형이며, 나머지 하나는 브릿지 형태를 응용한 정류형이다 [1-5]. 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 전류제한과 회복특성이 우수한 점등 장점이 있는 반면 대용량화가 어려운 점과 주울열 발생이 많다는 단점을 가지고 있다. 저항형에 대한 연구는 독일의 Siemens AG 그룹과 FZK 등에서 활발하게 연구되고 있으며 배전급에 대한 적용이 고려되고 있다

[1-3]. 유도형은 차폐형을 중심으로 가장 많이 연구되고 있으며 대용량화가 용이하고 열발생이 상대적으로 적은 반면 기본구조상 core를 사용하여야 하기 때문에 용적이 크며 hysteresis 손실 및 와류손을 포함한다 [4]. 한편, 정류형은 초전도체의 켄치가 없고 사고전류가 서서히 증가하는 장점 때문에 새로운 가능성에 대한 기대로 연구가 활발히 진행되고 있지만 대용량 전력전자소자의 문제를 해결해야 하는 과제를 안고 있다 [5].

본 연구에서는 그동안 수행해온 초전도 박막을 이용한 저항형 초전도 한류기에 대한 연구결과를 바탕으로 국내 배전계통에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 초전도 한류기의 저항발생 특성은 220 V급 박막형 한류기의 실험결과를 그대로 적용하였다. 그리고 일정구간의 22.9 kV급 계통정수를 적용한 다음 전력계통사고의 주류를 형성하는 1선 지락 사고에 대하여 사고 및 한류특성을 연구하였다. [6-11]

시뮬레이션 방법은 우선 표준으로 선택한 화양변전소-화정배전선에서 공급하는 전영역의 데이터를 한국전력공사의 배전 사업소에서 실제 활용하고 있

한전 전력연구원 전력계통연구실

(대전시 유성구 문지동 103-16

Fax : 042-865-5804

E-mail : hschoi@kepri.re.kr

2001년 1월 30일 접수, 2001년 4월 11일 1차심사완료

2001년 4월 23일 2차심사완료

는 KEDPRO 2.0의 단선도에 적용하여 고장전류를 계산하였다. 다음으로 현재 전계적으로 많이 사용하고 있는 과도현상 해석 프로그램인 EMTDC (Electromagnetic Transient Direct Current)를 이용하여 1선 지락 사고를 구현하고 KEDPRO 2.0의 결과와 비교하여 신뢰성을 확보한 다음, 여기에 저항형 초전도 한류기를 적용한 결과를 시뮬레이션 하였다.

### 2. 모델시스템 구성

사고모델계통 구성은 국내 배전계통에서 표준으로 삼은 화양변전소-화정배전선의 실제통 데이터를 단선도로 간략화하여 설정하였다. 사고계통을 모델링하기 위하여 필요한 요소는 화양변전소-화정배전선의 임피던스, 선로의 임피던스 계산을 위한 선로 공장 및 선종 그리고 부하값이다. 변전소의 임피던스는 정확한 데이터를 확보하기 위하여 전력계통 해석용 프로그램인 PSS/E를 이용하여 구한 값을 표 1에 나타내었으며, 부하는 해당 선로의 유효 및 무효전력을 환산하여 집중모델로 표현하였다.

배전계통은 radial 시스템 방식이기 때문에 화양변전소-화정배전선의 임피던스값을 source 모델로 설정하였으며, 이를 표 1에 나타내었다. 따라서 선로의 조류는 화양변전소-화정배전선에서 부하방향으로 설정하였으며, 공급되는 총 kVA는 10,000 kVA, peak 전류는 200 A 이었다. 또한 주상변압기 임피던스등을 포함하여 기타 기기에서 발생하는 임피던스는 변전소의 임피던스로 통합하여 표시하였다.

표 1. 변전소 임피던스값.

Table 1. Substation impedances.

Substation	임피던스값		총 kVA 및 peak 전류
	정상	영상	
Rs	0.062	0	10,000 kVA, 200 A
Xs	33.714	46.911	

선로정수를 모델링하기 위하여 집중정수 모델인 PI SECTION을 사용하였다. PI SECTION 모델은 대도시 지역에서 송전선로의 길이가 10 km 이내의 짧은 길이를 가진 경우에 적합한 것으로 알려져 있다. EMTDC에서 선로정수를 표현하는데 필요한 데이터는 정상 임피던스( $Z_1$ ), 정상 어드미턴스( $Y_1$ ), 영상 임피던스( $Z_0$ ) 및 영상 어드미턴스( $Y_0$ )이다. 선로

정수의 기준용량은 100 MVA, 기준전압은 22.9 kV하에서 실제 선로정수 %Z를 단위  $Z[\Omega/km]$ 으로 환산하여 적용하였다. 아래 식 (1), (2)는 배전선로에서 %Z를  $Z[\Omega/km]$ 와 %Y를  $Y[\mu S/km]$ 로 환산하는 식이다.

$$Z = \%Z \cdot \frac{10[(kV)_{base}]^2}{(KVA)_{base}} = \%Z \cdot 0.05244 [\Omega/km] \quad (1)$$

$$Y = \%Y \cdot \frac{10[(KVA)_{base}]}{[(kV)_{base}]^2} = \%Y \cdot 1906.90490 [\mu S/km] \quad (2)$$

여기서, Z : 선로의 임피던스, %Z : 선로의 %임피던스, Y : 선로의 어드미턴스, %Y : 선로의 %어드미턴스이다.

계통에 대한 시뮬레이션을 위하여 필요한 선로공장 및 선종을 표 2에 나타내었다.

표 2. 모델 계통의 선로값.

Table 2. Line values of the model system.

구분	선로 공장(km)	선종(mm <sup>2</sup> )	
		전압선	중성선
지중 선로	1.5	CNCV-325	CNCV-325
가공 선로	19.55	ALOC-160, ALOC-95, ALOC-58.	ACSR-95, ACSR-95.

전력계통에는 특성이 서로 다른 부하가 다양하게 연결되어 있으나, 여기서는 해석을 간단하게 하기 위하여 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 직렬모델을 채택하였다. 식 (3)과 (4)는 부하전력과 모선전압

$$S = P_L + jQ_L = V^2 \cdot Y_P^* = \frac{V^2}{Z_S^*} \quad (3)$$

$$Z_S = \frac{V^2}{S^*} = \frac{V^2}{P_L - jQ_L} = \frac{V^2}{S_L(\cos\theta - jsin\theta)}$$

$$= \frac{V^2}{S_L}(\cos\theta + jsin\theta) = R_s + jX_s \quad (4)$$

$$\tan\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s}$$

여기서, S : 교류전력, P<sub>L</sub> : 유효전력, Q<sub>L</sub> : 무효전력을 나타낸다.

으로부터 부하의 R 및 X 값을 구하는 방법을 보여 주며, 이 수식을 통하여 얻은 부하모델 수립결과를 표 3에 나타내었다. 여기서 L[H]값은 EMTDC에서 입력값인 X[Ω]으로 변환하였다. 이때 구분을 위한 번호는 그림 1의 단선도에 함께 표시하였다.

표 3. 각 부하의 R 및 L 값.  
Table 3. R and L values on each load.

구분	R [Ω]	L [H]	전압[kV]
(1)	181.65	0.2333	22.9
(2)	302.76	0.3888	
(3)	181.65	0.2333	
(4)	908.25	1.1665	
(5)	272.49	0.3149	
(6)	544.95	0.6999	

EMTDC를 이용한 1선 지락사고시의 계통 모델링에서, 사고구간은 앞서 언급한 바 있는 PI SECTION을 사용하여 그림 1에서 보는 바와 같이 변전소측으로부터 1.8 km 떨어진 지점에서 사고가 발생한 경우를 가정하여 구성하였다. 고장지점 전단에 저항형 초전도 한류기를 설치한 후 각 상별 고장 전류 파형은 표준 변전소에서 각 부하까지의 실계통 값에 대하여 C상에서 고장이 발생한 경우를 모델로 삼고 사고각이 0° 일 때 과도전류값을 모의하였다. 이때 사고각도 C상을 기준으로 삼았다.

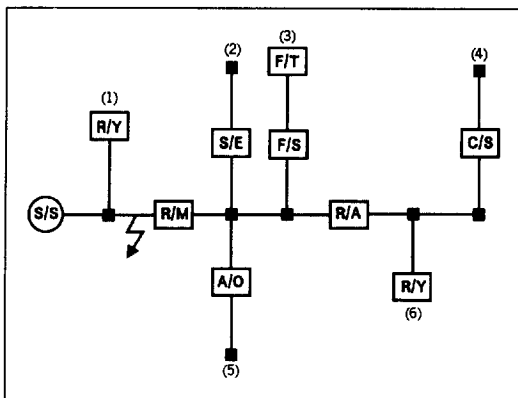


그림 1. 모델 시스템의 단선도.  
Fig. 1. A schematic diagram for the model system.

그림 1에서 S/S는 화양 변전소를, R/Y, R/M, R/A는 자동 및 수동 relay를 의미하며, S/E는 sectionalizer를, A/O, F/T, F/S, C/S는 각종 개폐기를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

EMTDC내에서 초전도 한류기 요소를 구현하기 위하여 저항형 초전도 한류기 모델링에 사용된 한류소자의 켄치에 따른 저항 변화 패턴은 최근에 수행한 박막형 초전도 한류기의 연구결과를 기준으로 하여 그림 2와 같이 library로 구성하여 적용하였다. 이때 초전도체의 동작시간은 60 msec로 설정하였다 [10]. 시뮬레이션의 편의상 초전도 한류기가 전류제한동작을 개시하는 시점은 사고발생 후 곧바로 시작되는 것으로 설정하였다. 초전도 한류기의 최종 임피던스값의 결정은 전력계통내에서 보호계전기의 정상적인 동작이 이루어지는 범위내에서 사고후 반주기되는 지점의 전류가 1/3이 되는 값까지 제한되도록 여러번의 반복 시뮬레이션을 통하여 선정하였다. 이러한 조건을 만족하는 초전도 한류기의 최적 켄치 저항은 16 Ω이었다. 참고로, 초전도 한류기에 대한 연구는 아직 기초단계에 머물러 있기 때문에 배전급 실계통에 대한 체계적인 시뮬레이션 연구는 아직 없으며 본 연구는 향후 배전급 적용에 대비한 연구결과이다.

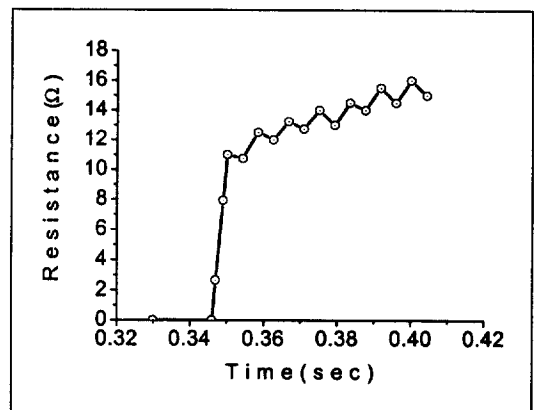


그림 2. 초전도체의 켄치 저항 변화값.  
Fig. 2. The variable impedance pattern of a superconductor under quench.

표준 변전소로부터 약 1.8 km 떨어진 지점에서 1선 지락사고(사고각 0°)가 발생한 경우의 과도 전류값 파형을 그림 3에 나타내었다. 사고가 발생하면

사고상인 C상의 전류값이 곧바로 6.5 kA까지 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 한국전력공사의 KEDPRO 2.0에서 계산한 사고전류값인 6.6 kA값과 거의 동일한 결과임을 알 수 있다. 사고발생전인 정상상태에서 선로에 흐르는 전류값이 약 317 A인 것을 고려하면 사고발생 후 전류값이 정상치의 최고 약 20배까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 참고로 배전급 차단기의 정격차단시간은 5 cycle이며 정격투입전류 31.5 kA급의 경우 정격차단전류는 12.5 kA이다. 따라서 본 연구에서 모의한 선로의 경우는 차단기의 정격차단전류를 초과하지는 않았으나 그래도 선로에 취부되어 있는 변압기를 포함한 각종 보호기기들은 최소한 차단기의 정격차단시간(약 5 사이클) 동안에는 어느 정도의 손상을 입을 수 밖에 없다. 한편, 송전급 선로와 달리 배전급 선로는 계통사고시 선로 불평형이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다 [11].

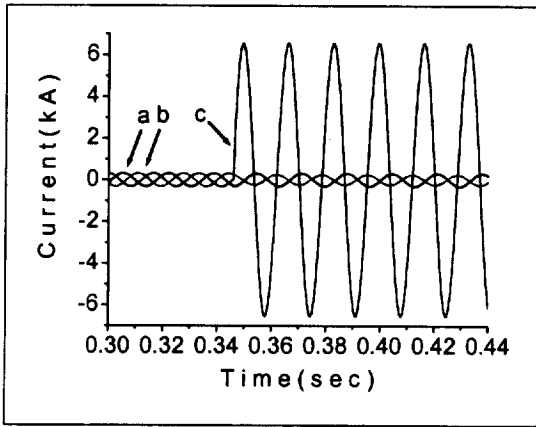


그림 3. 사고각 0° 일때의 고장전류 파형.  
Fig. 3. Fault current waveforms for the fault angle 0° (without SFCL).

전력계통에서 1선 지락 사고가 발생하였을 때 차단기 전단에 저항형 초전도 한류기를 적용하는 경우, 고장전류 제한과 과도특성을 살펴보기 위하여 사고각을 0°, 45°, 90°로 나누어 각각에 대하여 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 사고각 0°인 1선 지락 고장 계통에 대하여 저항형 초전도 한류기를 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 사고가 발생한 C상을 보면 사고발생 직후 최고 6.33 kA(최대 한류전류값)까지 상승하고 있으나 약 반주기만에 2.27 kA까지 감소하였다가 약 4주기에 걸쳐 서서히 감소하여 1.05 kA(최

종 한류전류값)에서 안정된 한류전류값을 나타내었다. 사고후에 한류파형의 피크값 부근에서의 찌그러짐은 그림 2에서 보는 바와 같이 초전도 한류기가 켜진 후 발생하는 열에 의한 켄치저항이 지그재그로 변화하면서 증가하기 때문으로 생각된다. 앞에서 언급한 바와 같이 배전급 사고의 선로 불평형이 발생하지 않았기 때문에 직류성분은 거의 발생하지 않았다.

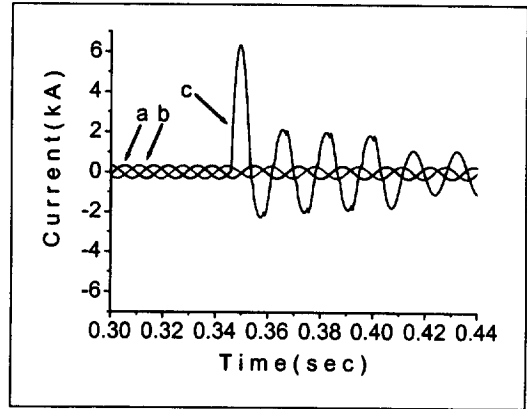


그림 4. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락 사고 (사고각 0°).

Fig. 4. The single-line-to-ground fault with an SFCL at the fault angle 0°.

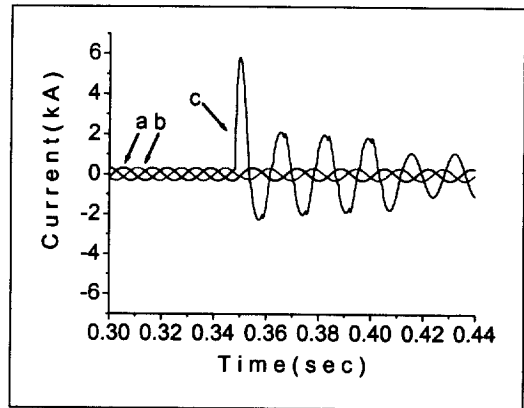


그림 5. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락 사고 (사고각 45°).

Fig. 5. The single-line-to-ground fault with an SFCL at the fault angle 45°.

그림 5는 그림 4와 같은 조건에서 사고각을 45°로 하였을 때의 결과를 보여준다. 사고발생 직후 사

고각 0° 일때와 비교할 때 약간 적은 값인 5.8 kA 까지 상승하고 약 반주기만에 2.27 kA까지 감소한 다음, 이후로는 그림 4와 동일한 특성을 보여주었다. 사고직후 과도전류값이 약간 감소한 이유는 사고각 0° 에 비해 최초 켄치 저항값에 도달하는 시간이 상대적으로 짧기 때문으로 생각된다.

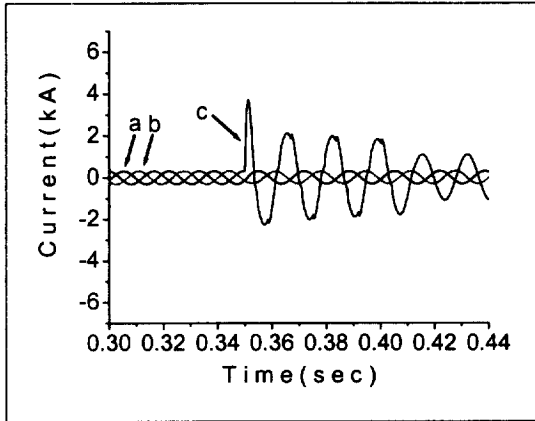


그림 6. 저항형 초전도 한류기를 적용한 1선 지락 사고 (사고각 90°).

Fig. 6. The single-line-to-ground fault with an SFCL at the fault angle 90°.

사고각 90° 에서 사고가 발생한 경우의 파형을 그림 6에 나타내었다. 사고가 발생하면 C상의 전류값이 최고 3.71 kA까지 상승하였다가 약 반주기만에 2.27 kA값까지 감소한 후 1.05 kA에서 안정된 값을 보여주었다. 사고각 0° 에 비하여 사고발생초기에 과도전류값이 현저하게 적은 이유는 사고각 45° 일때의 해석과 마찬가지로 최초 켄치 저항값에 도달하는 시간이 극히 짧아서 사고직후 곧바로 한류동작을 수행하기 때문으로 생각된다. 이는 회로에 인덕턴스 성분을 적게 구성한 저항형 초전도 한류기의 실제 실험결과와 일치하지 않는 면인데, 초전도 한류기의 켄치 저항을 정교하게 모의할 수 없는 프로그램상의 일부 한계와 실제 선로에 상당량 존재하는 인덕턴스 성분 때문인 것으로 생각된다. 그러나 프로그램상의 일부 한계에도 불구하고 사고발생 초기의 전류상승 특성을 정확하게 모의하지 못할 뿐 전반적인 한류특성과 용량을 산출하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 사료된다[5-9].

#### 4. 결론

22.9 kV급 배전선로에서 가장 빈번하게 발생하는 사고유형인 1선 지락사고에 대하여 고장전류를 계산하고 실 데이터에 근거한 저항형 초전도 한류기를 적용하였을 때 전류제한 효과를 EMTDC를 이용하여 시뮬레이션하였다.

선정된 표준 변전소의 1 선 지락사고 전류값은 약 6.5 kA 이었으며, 차단기의 정격차단전류에는 미치지 못하는 값이었다. 최종 한류전류값이 16 Ω인 저항형 초전도 한류기를 모의계통에 적용하였을 때 사고각에 따라 최고 6.33 - 3.71까지 분포하였으나 약 반주기만에 2.27 kA까지 효과적으로 전류제한을 수행함을 확인하였다. 이는 고장전류의 약 1/3이 되는 값으로써 relay와 같은 보호기기가 보호협조 동작을 수행하는 데 문제가 없는 값이다. 즉, 현재 한국전력공사의 배전선로에서 초전도 한류기의 켄치 저항값은 16 Ω 정도이면 충분함을 알 수 있었다. 향후 실제 계통 투입을 염두해 둔 연구에서는 소용량의 한류소자를 직병렬 연결한 초전도한류기의 적용에 대한 시뮬레이션과 함께 선로의 인덕턴스변화에 따른 전류제한효과의 차이를 시뮬레이션 하여야 할 것으로 여겨진다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부부분은 과학기술부 중점연구개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, Vol.9, No.2, pp.656-659, 1999.
- [2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth and H. W. Neumueller, "Resistive current limiters with YBCO films", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, Vol.7, No.2, pp.828-831, 1997.
- [3] R. Wordenweber, J. Schneider, A.I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs and P. Lahl, "Current limiting properties of superconducting

- YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> films on various substrates", *IEEE Trans. App. Supercon.*, Vol.7, No.2, pp.1021-1024, 1997.
- [4] K. Tekletsadik, M.P. Saravolac and A. Rowley, "Development of a 7.5 MVA superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, Vol.9, No.2, pp.672-675, 1999.
- [5] K. Usui, T. Nomura, T. Satoh, M. Yamaguchi, S. Fukui, K. Yokoyama and T. Nagasawa, "One dc reactor type fault current limiting interrupter for three-phase power system", *unpublished*, submitted to ASC 2000.
- [6] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시들, "15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성", 전기전자재료학회논문지, 13권 12호, pp.1058-1062, 2000.
- [7] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시들, 김상준, 한병성, "분로저항이 초전도 한류기의 전류제한 효과에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학학회논문지, 1권 2호, pp.49-53, 1999.
- [8] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시들, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 전기학회논문지, 48B권 10호, pp.537-543, 1999.
- [9] 임준형, 지봉기, 박형상, 주진호, 장미혜, 고태국, 이상진, 하홍수, 오상수, "Twisting된 Bi-2223 선재의 제조, 미세조직 관찰 및 임계 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 13권 3호, pp.241-246, 2000.
- [10] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시들, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 켄치 전파", 전기전자재료학회논문지, 13권 4호, pp.337-342, 2000.
- [11] 최효상, 현옥배, 고태국, "초전도 한류기를 포함한 계통의 지락사고에 대한 EMTDC 해석", 전기학회논문지, 48B권 4호, pp.161-166, 1999.