

## 저항형초전도한류기 과도특성을 고려한 EMTDC 모델개발

### Development of EMTDC model for Resistance type Fault Current Limiter considering transient characteristic

윤재영\*, 김종율\*\*, 이승렬\*\*\*

Jae-Young Yoon\*, Jong Yul Kim\*\*, Seung Ryul Lee\*\*\*,

**Abstract:** Nowadays, one of the serious problems in KEPCO(Korea Electric Power Co-Operation) system is the more higher fault current than the SCC(Short Circuit Capacity) of circuit breaker. There are many alternatives to reduce the increased fault current such as isolations of bus ties, enhancement of SCC of circuit breaker, applications of HVDC-BTB(High Voltage Direct Current-Back to Back) and FCL(fault current limiter). But, these alternatives have some drawbacks in viewpoints of system stability and cost. As the superconductivity technology has been developed, the HTS-FCL(High Temperature Superconductor -Fault Current Limiter) can be one of the attractive alternatives to solve the fault current problem. Under this background, this paper presents the EMTDC(Electro-Magnetic Transient Direct Current) model for resistance type HTS-FCL considering the nonlinear characteristic of final resistance value when quenching phenomena occur.

**Key Words:** Resistance type FCC, Transient model EMTDC

#### 1. 서 론

일반적으로 전력계통에서 고장이 발생하면 차단기가 고장구간을 신속하게 분리하는데, 차단성공을 위해서는 차단기의 차단용량이 고장전류 크기보다 커야 한다. 그러나, 계통규모의 확장으로 인해 송전선로와 변전소가 증가하면 고장전류는 커지게 되어 차단용량을 초과할 수 있다. 이러한 경우 고장으로 인한 사고 파급영향을 미연에 방지하고 전력계통의 안정적인 운영을 도모하기 위해서는 고장전류의 크기를 억제해야 한다. 이를 위한 대책으로서 모선분리, 차단용량 증가, 한류리액터 적용, HVDC-BTB 적용 등의 대책을 강구할 수 있는데, 상당한 비용증가와 계통 안정도 저하 등의 문제점을 지니고 있다([1~3]). 최근에 고온초전도 한류기 개발이 진행중이며, 실 계통 적용을 위한 시도가 되고 있다. 초전도 한류기는 한류리액터 적용이나

모선분리 등의 대책들보다 계통안정화를 저하시킴이 없이 고장전류 저감효과가 크며, HVDC- BTB 적용이나 차단용량 증가보다 상대적으로 비용도 적게 드는 장점이 있다([4~5]). 이와 같은 초전도한류기의 계통 적용을 위해서는 다양한 운전조건 하에서 초전도한류기의 동작특성과 고장전류 억제효과가 검증되어야 한다. 즉, 고장이 발생하여 초전도가 붕괴되는 Quenching 현상이 발생하여 고장전류를 억제하는 과도특성에 대한 기기 모델링이 필요하다. 지금까지 계통관점에서 초전도 한류기의 특성을 PSS/E 혹은 EMTDC 가변저항 모델을 사용하여 간략하게 검토하여 왔다.[6] 그러나, 본 논문에서는 고장전류와 온도특성을 반영하여 저항형 초전도한류기의 Quenching 현상을 모의할 수 있는 정밀한 EMTDC 동특성 모델을 개발하고, 이를 실 계통 운전조건과 유사한 모의계통에 적용하여 한류기 최종값 변동, 전원임피던스 변동 등 다양한 계통조건 하에서 초전도 한류기 모델의 효용성을 검증하였다.

#### 2. 초전도한류기 기본특성

초전도한류기는 정상운전 상태에서는 임피던스가 거의 영이지만, 임계전류 이상의 고장전류가 흐르면 임피던스가 증가하여 고장전류를 일정수준 이하로 억제하는 특성을 가지고 있다. 고장전류가 흐를 때 증가하는 임피던스가 저항성분 혹은 리액턴스 성분 중 어느 것인가에 따라서 저항형과 유도형으로 분류할 수 있다. 이러한 초전도한류기의 종류별로 기본특성을 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 초전도한류기 종류별 기본특성

항 목	기 본 특 성	비 고
저항형	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 구조 및 원리 간단</li> <li>■ 전류제한과 회복특성 우수</li> <li>■ 대용량화 곤란, 주열 발생 과다</li> </ul>	SIMENS AG 중심 연구
유도형	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 대용량화 용이, 주열 발생 적음</li> <li>■ 용적이 크고 히스테리시스/ 와류손 존재</li> </ul>	ABB 중심 연구

Tab

le 1. Fundamental characteristics of HTS-FCLs

표 1에서 저항형 초전도한류기는 유도형에 비하여 구조와 원리가 간단하고 전류제한과 회복특성이 우수하지만, 대용량화가 어렵고 열 손실이 크다는 단점을 지니고 있다. 따라서, 초기에는 소용량의 구조가 단순

\* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 책임연구원  
 \*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 연구원  
 \*\*\* 비 회 원 : 한국전기연구원 전력연구단 연구원  
 원고접수 : 2002년 9월 10일  
 심사완료 : 2003년 7월 09일

한 저항형 초전도한류기를 실험적으로 적용하는 것이 보다 용이할 것으로 생각된다.

고장전류를 제한하는 저항형 초전도한류기의 동태특성을 좌우하는 주요 파라미터를 정의하면 표 2와 같다 [6]. 표 2에서 차단기 차단용량(CB<sub>SCC</sub>), 한류기 동작개시전류(T<sub>op</sub>), 한류기 최종 저항값(R<sub>FIN</sub>), 한류기 동작시간(I<sub>FIN</sub>)의 최적값 설정은 고장전류 억제효과와 직접 관련되어 있으며, 적용 대상계통의 특성에 따라서 달라진다.

표 2. 저항형 초전도한류기 파라미터 기본정의  
Table 2. Definition of R-type HTS-FCL Parameters

파라미터	기본 정의	비고
CB <sub>SCC</sub>	차단기 차단용량 (kA)	한류기 설치지점의 차단용량
I <sub>FCL</sub>	한류기 (FCL) 통과전류 (kA)	한류기 설치지점의 선로전류
I <sub>op</sub>	한류기 동작개시 전류 (kA)	상한 : (단락용량 - Margin) 하한 : (최대 부하 전류 + Margin)
R <sub>FIN</sub>	한류기 동작 최종 저항값(Ω)	CB <sub>SCC</sub> I <sub>op</sub> 등에 좌우됨
T <sub>FCL</sub>	한류기 동작시간 (msec)	Quenching 이후 최종 저항값에 도달하는 시간
T <sub>REC</sub>	한류기 복귀시간 (msec)	고장전류 억제 후 초전도상태로 복귀하는 시간, 재폐로와 협조 필요

### 3. 저항형 초전도 한류기 EMTDC 모델

#### 3.1 기본 동작특성 및 특성

저항형초전도한류기에 동작개시전류 이상의 고장전류가 흐르면 초전도상태가 붕괴되는 Quenching 상태에 돌입하여 저항이 증가하게 된다. 이러한 상태에서 일정한 시정수가 경과하면 상전도 상태의 최종적인 저항 값에 도달하게 되며 결과적으로 고장전류는 대폭 감소하게 된다. 현재 전 세계에서 개발하고 있는 보편적인 저항형 초전도한류기의 대표적인 모델을 표현하면 그림 1과 같다[7]. 그림 1은 초전도한류기에 흐르는 선로전류가 한류기 동작개시전류를 초과하면 일정한 적분 시정수(top)와 제한치를 가지고 초전도한류기 저항이 일정한 경로(Track)를 따라서 증가함을 나타내고 있다. 이는 고장전류 크기에 비례하여 초전도한류기의 저항값이 선형적으로 증가함을 의미한다.

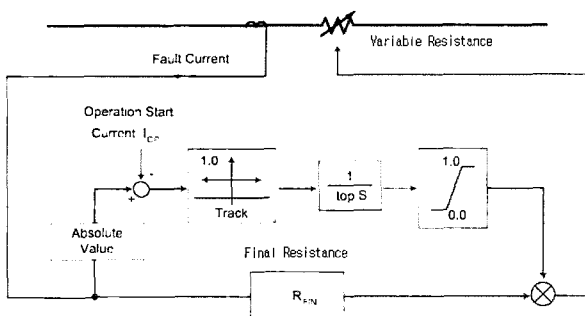


그림 1. 저항형 초전도한류기 대표모델  
Fig. 1. Standard Model of R-type HTS-FCL

#### 3.2 EMTDC 모델개발

위와 같은 보편적인 저항형초전도한류기 대표 모델에 대하여 EMTDC 모델을 구성하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 사항에 대한 모델링이 필요하다.

- 현재 EMTDC에는 3상 전류 실효치 계산모델이 없으므로 초전도한류기 3상 선로전류의 실효치를 계산해야 한다.
- 그림 1과 같은 대표 모델에 대한 EMTDC 모델 구성이 요구된다.

각상별 순시치 전류로부터 3상 실효치 전류를 계산하는 알고리즘은 다양하다. 즉, 각상별 실효치 전류를 구하고 이를 합산하여 구하거나 혹은 각 상별 순시치 전류로부터 직접 3상 실효치 전류를 구하는 방법 등 다양한 방법이 존재한다. 여기서, 각 상별 실효치 전류를 구하는 방법은 과도현상이 발생할 때 각 상별 전류 파형의 위상과 주파수가 달라지므로 부정확할 수 있다. 따라서, 과도현상을 해석할 때에는 각 상별 순시치 전류로부터 직접 3상 실효치 전류를 구하는 방법을 일반적으로 적용하지만 여기에도 여러 가지 알고리즘이 있다. 결론적으로 순시치 과도현상 해석의 기본 특성을 고려할 때 고조파와 전류 불평형 및 기타의 원인으로 야기될 수 있는 3상 전류 실효치 계산의 부정확성을 가능한 최소화하기 위하여 그림 2와 같은 모델을 구성하였으며, 3상 실효치 전류 계산식은 식 (1)과 같다.[9]

$$I_{3PhRMS} = \sqrt{\frac{1}{3}(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)} \quad (1)$$

여기서,  $I_{3PhRMS}$  : 3상전류 실효치

$i_a, i_b, i_c$  : 매 시점의 a, b, c상 전류 순시치

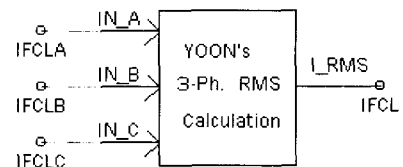


그림 2. 3상 전류 실효치 계산 알고리즘  
Fig. 2. RMS Computation Algorithm for 3 Phase Current

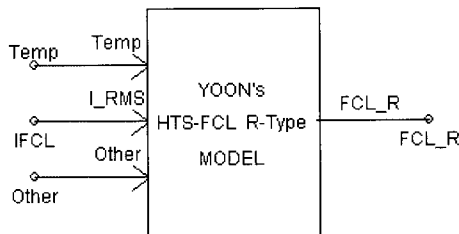
그림 1에 나타낸 저항형 초전도한류기의 보편적인 모델은 고장전류에 따라서 초전도한류기 저항값이 선형적으로 증가한다. 그러나, 실제적인 초전도한류기 저항값은 고장전류 크기와 더불어 온도와 기타 물리적 요소에 영향을 받으며, 비선형적으로 변화된다. 따라서, 본 논문에서는 그림 1의 보편적인 저항형 초전도한류기 모델을 개선하여 고장전류 뿐만 아니라 온도 및 기타 요소의 특성을 반영하고, 이러한 영향 인자들에 의하여 비선형적으로 한류기 저항값이 동적 특성을 가지는 EMTDC 모델을 개발하였다. 그림 3은 본 연구에서 개발한 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델을 나타낸 것인데, 고장전류, 온도 및 기타 요소에 따라서

한류기 저항값이 비선형적으로 변하는 동태모델이다. 그림 3의 EMTDC 모델에서 비선형 특성은 식 (2)와 같이 고장전류, 온도 및 기타 요소에 따라서 한류기 저항이 변동되도록 구성되어 있으며, 함수식의 변동과 입력 요소의 추가가 가능하도록 설계되어있다.

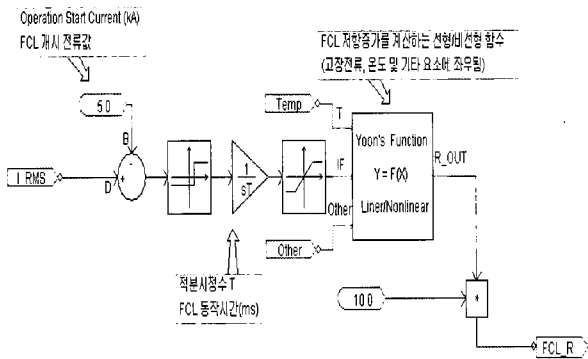
$$y = f(I_F, \text{Temperature}, \text{Other Factors}) \quad (2)$$

여기서,  $I_F$  : 고장전류(Fault current)  
 Temperature : 온도  
 Other Factors : 기타 영향요소

그러나, 다양한 물리적 변수에 따른 실제 초전도한류기의 동적 특성에 대한 정확한 관계식이 확립된 것은 아니므로, 본 논문에서는 고장전류 크기를 위주로 하여 초전도 한류기의 동작특성을 고찰하겠다.



(a) 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델 개요도  
 (a) EMTDC Model Layout of R-type HTS-FCL



(b) 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델 내용  
 (b) EMTDC Model Conternts of R-type HTS-FCL

그림 3. 저항형초전도한류기 EMTDC 모델  
 Fig. 3. EMTDC Model of R-type HTS-FCL

### 4. 계통적용효과 분석

#### 4.1 해석 개요

본 논문에서 개발한 저항형초전도한류기 EMTDC 모델의 계통적용 효과를 분석하고 개발한 모델의 효용성을 검증하였다. 해석대상 모의계통, 기본 데이터, 해석결과 및 사례 연구 해석결과 분석을 하면 다음과 같다.

##### 4.1.1. 해석대상 모의계통

본 논문에서 개발한 EMTDC 모델의 효용성을 검증하기 위하여 한전계통의 기본 특성을 가지는 모의계통

을 구성하였다. 즉, 그림 4와 같이 154kV 송수전단 특성을 가지는 양 모선과 대표적인 한전 가공선로와 케이블 선로 사양을 가지는 전형적인 한전 154kV 등가계통으로 모의하였다. 이와 같은 해석대상 모의계통에서 개별 전력기기의 모의방법과 파라미터를 변화시키면 아래와 같이 한전 실 계통의 다양한 구성상태와 운전상태를 모의할 수 있다.

- 송수전단 특성을 나타내는 양단 모선의 등가전압원과 전원 임피던스를 변경시키면 발전단과 송전단 혹은 송전단과 수전단의 특성을 각각 모의할 수 있다. 여기서, 전원 임피던스는 실제 한전계통 자료를 그대로 적용한다.
- 계통 운전상태에 따라서 고장상태를 표현할 수 있는 스위치와 송전선로와 송, 수전단전원의 연결상태를 모의할 수 있는 차단기를 배치하였으며, 모든 경우 시간제어에 의하여 동작되도록 하였다.
- 향후, 연구 대상으로서 케이블 선로의 심선(core) 및 씨스(sheath) 도체의 저항률(resistivity)을 적절하게 변화시키면 초전도 케이블의 특성을 모의할 수 있다. 단, 본 연구는 연구 목적이 초전도 한류기이므로 일반적인 상전도 케이블로 모의한다.
- 케이블선로의 경우 심선, 씨스, 절연층, 방식층 등 케이블 자체 모의는 물론이고 씨스의 가교접지(Crossbond grounding) 상태 및 이를 피뢰기와 연결하여 대지에 접지시키는 방식으로 표현하였다.

즉, 실제 케이블 선로 자체의 구성형태를 그대로 모의한 것이다. 이는 초전도 케이블 선로에 대한 향후 연구에 적용할 수 있다.

- 가공선로, 케이블 및 기타 전력기기의 모의 역시 실 계통 상태를 그대로 반영하여 계통해석을 수행하였다.

##### 4.1.2. 해석 데이터

그림 4의 해석대상 모의계통에서 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델의 효용성을 검증하기 위하여 사용한다 데이터 내용을 기술하면 다음과 같다.

- 송수전단 등가 전압원 :  $1.02 \angle 10^\circ$ (PU) 및  $1.0 \angle 0^\circ$   
 한전계통의 일반적인 운전조건을 표현하는 154kV 송수전단 모선의 전압과 위상으로서 송수전단 전압차는 0.02pu, 위상각 차이는  $10^\circ$ 로 산정하였다. 운전조건에 따라서 전압과 위상차를 변경하면서 해석할 수도 있지만, 기본적으로 본 연구는 고장해석이므로 정상상태 등가 전압원에 따라서 크게 영향을 받지 않는다.
- 전원 임피던스 :  $2.223(\Omega) \angle 85.0^\circ$ (송전단 및 수전단 동일)

현재 한전 154kV 계통에 배치되어 있는 차단기의 차단용량은 31.5kA 및 50.0kA로 구분된다. 따라서, 초전도 한류기의 효용성을 보기 위해서는 송전단 모선에서의 3상 단락용량이 40kA 수준이면서 31.5kA 차단기가 배치되어 있는 경우를 상정하였다. 따라서, 전원임피던스를 위와 같이 산정하였는데, 기본적으로 송수전단의 전원임피던스를 동일하게 적용하였으

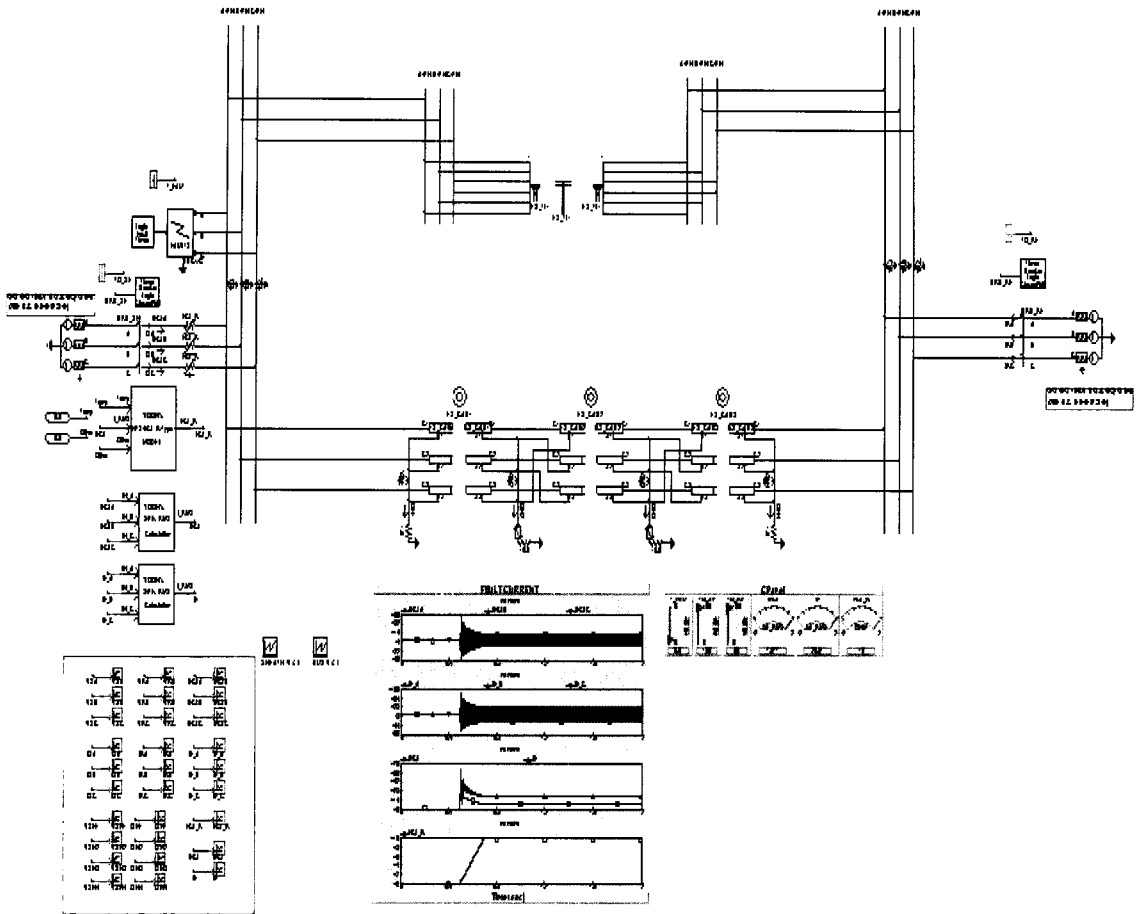


그림 4. 저항형 초전도한류기 해석대상 모의계통 (한전 154kV 등가계통)

Fig. 4. Simulated Target System for R-type HTS-FCL (KEPCO 154kV Equivalent System)

나 값을 변경하면서 사례 연구를 수행하였다.

- 가공선로 : ACSR 410[mm<sup>2</sup>] $\times$ 2B, 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)

한전 154kV 가공선로의 대표적인 선종인 ACSR 410(mm<sup>2</sup>) $\times$ 2B를 적용하였으며, 선로 길이는 일반적인 경우를 상정하여 10.0km로 선정하였다. 선로 모델은 고장해석임을 고려하여 주파수독립 비연가 모델을 적용하였다.

- 케이블 모의 : OF 2000[mm<sup>2</sup>], 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)

가공선로와 동일한 이유로 위와 같이 선정하였다.

- 한류기 동작 최종 저항값 : 10( $\Omega$ )

한류기 동작 최종 저항값을 10( $\Omega$ )으로 설정하였으며 값을 변경하면서 사례 연구를 수행하였다.

- 한류기 동작개시 전류 : 5.0(kA)

한류기 동작개시 전류는 일반적으로 한류기가 적용되는 위치에서 흐를 수 있는 정상상태 정격전류의 2~4배 이상이면 차단용량 이하가 되도록 설정한다. 따라서, ACSR 410(mm<sup>2</sup>)의 허용전류가 0.835kA인 점을 고려할 때 이 값의 3배이고 번들을 고려하여 5.0kA로 설정하였다.

- 한류기 비선형 특성 : 기본적으로 선형 및 고장전류에만 의존

기본적으로 한류기의 비선형 특성은 무시하고, 고장전류에만 선형적으로 의존하도록 특성을 모의하였다. 그러나, 일정한 비선형 함수식에 의하여 변화되는 경우를 사례 연구에서 검토하였다.

#### 4.1.3. 적용효과 분석 방법

모선분리 후 초전도한류기 적용 혹은 송전선로 직렬로 삽입 등 초전도 한류기의 최적 적용 방안과 위치는 별도의 세밀한 연구를 필요로 하는 사항이다. 따라서, 본 연구에서는 그림 4와 같은 모의계통에서 고장전류 기여분이 가장 큰 송전단 전원과 직렬로 초전도한류기를 적용하였다. 그리고 초전도한류기의 적용여부에 따른 전체 고장전류 및 초전도한류기 전류를 상호 비교함으로써 효용성을 분석한다.

### 4.2 해석결과 분석

#### 4.2.1. 기본 해석케이스

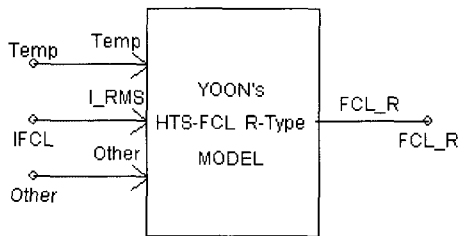
그림 4의 해석대상 계통에서 위와 같은 기본 해석데이터를 적용하여 저항형 초전도한류기의 유무에 따라 해석한 결과를 나타내면 표 3과 같다. 표 3을 분석하면 한류기가 있는 경우 전체 고장전류가 63.7kA에서 28.0kA로 감소하였으며, 초전도 한류기 적용위치에 흐

한류기 저항값이 비선형적으로 변하는 동태모델이다. 그림 3의 EMTDC 모델에서 비선형 특성은 식 (2)와 같이 고장전류, 온도 및 기타 요소에 따라서 한류기 저항이 변동되도록 구성되어 있으며, 함수식의 변동과 입력 요소의 추가가 가능하도록 설계되어있다.

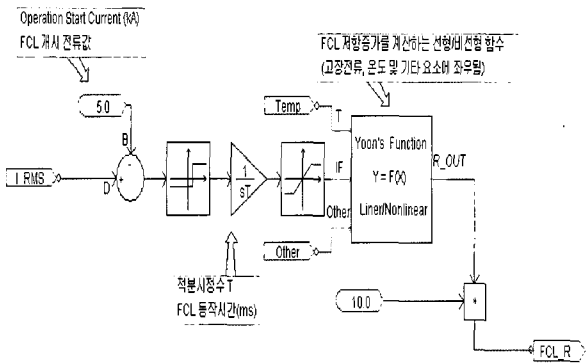
$$y = f(I_F, \text{Temperature}, \text{Other Factors}) \quad (2)$$

여기서,  $I_F$  : 고장전류(Fault current)  
 Temperature : 온도  
 Other Factors : 기타 영향요소

그러나, 다양한 물리적 변수에 따른 실제 초전도한류기의 동적 특성에 대한 정확한 관계식이 확립된 것은 아니므로, 본 논문에서는 고장전류 크기를 위주로 하여 초전도 한류기의 동작특성을 고찰하겠다.



(a) 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델 개요도  
 (a) EMTDC Model Layout of R-type HTS-FCL



(b) 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델 내용  
 (b) EMTDC Model Conternts of R-type HTS-FCL

그림 3. 저항형초전도한류기 EMTDC 모델  
 Fig. 3. EMTDC Model of R-type HTS-FCL

## 4. 계통적용효과 분석

### 4.1 해석 개요

본 논문에서 개발한 저항형초전도한류기 EMTDC 모델의 계통적용 효과를 분석하고 개발한 모델의 효용성을 검증하였다. 해석대상 모의계통, 기본 데이터, 해석결과 및 사례 연구 해석결과 분석을 하면 다음과 같다.

#### 4.1.1. 해석대상 모의계통

본 논문에서 개발한 EMTDC 모델의 효용성을 검증하기 위하여 한전계통의 기본 특성을 가지는 모의계통

을 구성하였다. 즉, 그림 4와 같이 154kV 송수전단 특성을 가지는 양 모선과 대표적인 한전 가공선로와 케이블 선로 사양을 가지는 전형적인 한전 154kV 등가계통으로 모의하였다. 이와 같은 해석대상 모의계통에서 개별 전력기기의 모의방법과 파라미터를 변화시키면 아래와 같이 한전 실 계통의 다양한 구성상태와 운전상태를 모의할 수 있다.

- 송수전단 특성을 나타내는 양단 모선의 등가전압원과 전원 임피던스를 변경시키면 발전단과 송전단 혹은 송전단과 수전단의 특성을 각각 모의할 수 있다. 여기서, 전원 임피던스는 실제 한전계통 자료를 그대로 적용한다.
- 계통 운전상태에 따라서 고장상태를 표현할 수 있는 스위치와 송전선로와 송, 수전단전원의 연결상태를 모의할 수 있는 차단기를 배치하였으며, 모든 경우 시간제어에 의하여 동작되도록 하였다.
- 향후, 연구 대상으로서 케이블 선로의 심선(core) 및 썬스(sheath) 도체의 저항율(resistivity)을 적절하게 변화시키면 초전도 케이블의 특성을 모의할 수 있다. 단, 본 연구는 연구 목적이 초전도 한류기이므로 일반적인 상전도 케이블로 모의한다.
- 케이블선로의 경우 심선, 썬스, 절연층, 방식층 등 케이블 자체 모의는 물론이고 썬스의 가교접지(Crossbond grounding) 상태 및 이를 피뢰기와 연결하여 대지에 접지시키는 방식으로 표현하였다.

즉, 실제 케이블 선로 자체의 구성형태를 그대로 모의한 것이다. 이는 초전도 케이블 선로에 대한 향후 연구에 적용할 수 있다.

- 가공선로, 케이블 및 기타 전력기기의 모의 역시 실제 계통 상태를 그대로 반영하여 계통해석을 수행하였다.

#### 4.1.2. 해석 데이터

그림 4의 해석대상 모의계통에서 저항형 초전도한류기 EMTDC 모델의 효용성을 검증하기 위하여 사용한 데이터 내용을 기술하면 다음과 같다.

- 송수전단 등가 전압원 :  $1.02 \angle 10^\circ$ (PU) 및  $1.0 \angle 0^\circ$   
 한전계통의 일반적인 운전조건을 표현하는 154kV 송수전단 모선의 전압과 위상으로서 송수전단 전압차는 0.02pu, 위상각 차이는  $10^\circ$ 로 산정하였다. 운전조건에 따라서 전압과 위상차를 변경하면서 해석할 수도 있지만, 기본적으로 본 연구는 고장해석이므로 정상상태 등가 전압원에 따라서 크게 영향을 받지 않는다.
- 전원 임피던스 :  $2.223(\Omega) \angle 85.0^\circ$ (송전단 및 수전단 동일)

현재 한전 154kV 계통에 배치되어 있는 차단기의 차단용량은 31.5kA 및 50.0kA로 구분된다. 따라서, 초전도 한류기의 효용성을 보기 위해서는 송전단 모선에서의 3상 단락용량이 40kA 수준이면서 31.5kA 차단기가 배치되어 있는 경우를 상정하였다. 따라서, 전원임피던스를 위와 같이 산정하였는데, 기본적으로 송수전단의 전원임피던스를 동일하게 적용하였으

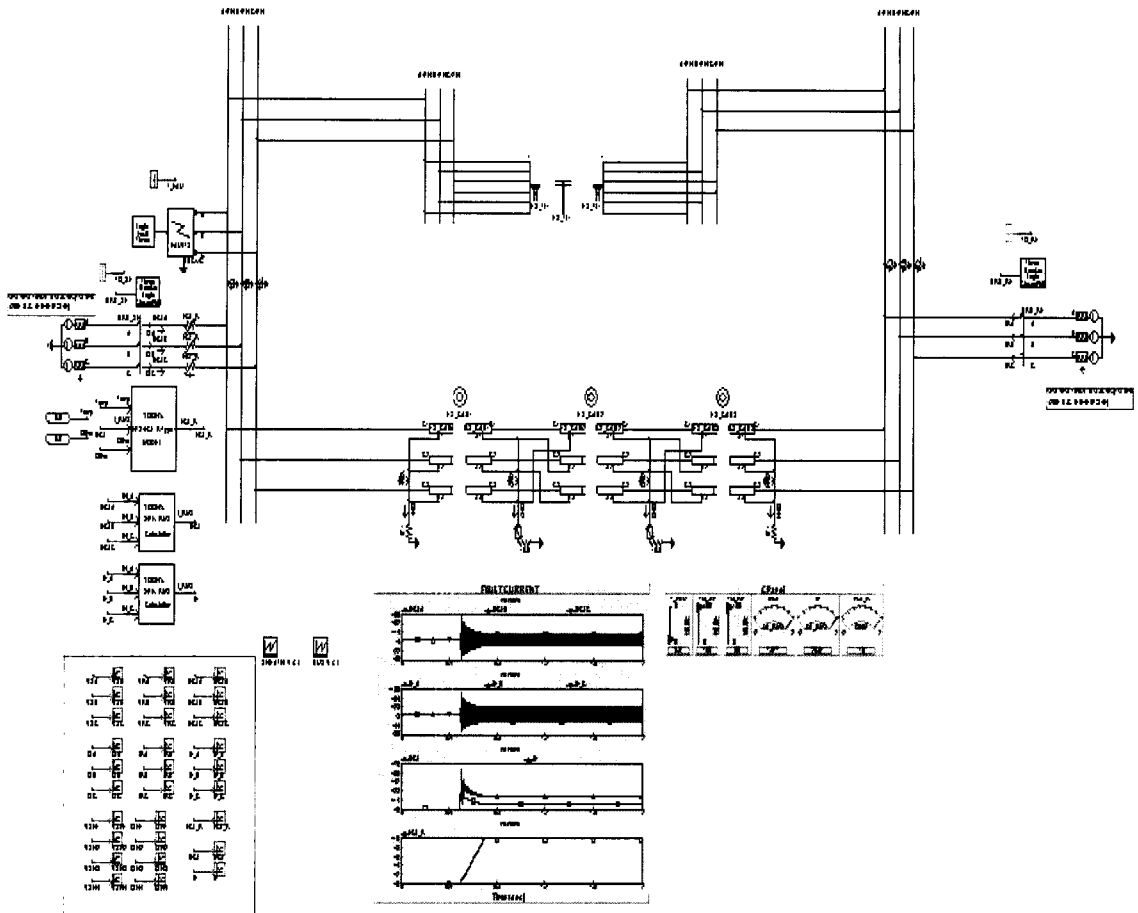


그림 4. 저항형 초전도한류기 해석대상 모의계통 (한전 154kV 등가계통)

Fig. 4. Simulated Target System for R-type HTS-FCL (KEPCO 154kV Equivalent System)

나 값을 변경하면서 사례 연구를 수행하였다.

- 가공선로 : ACSR 410[mm<sup>2</sup>] $\times$ 2B, 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)

한전 154kV 가공선로의 대표적인 선종인 ACSR 410[mm<sup>2</sup>] $\times$ 2B를 적용하였으며, 선로 길이는 일반적인 경우를 상정하여 10.0km로 선정하였다. 선로 모델은 고장해석임을 고려하여 주파수독립 비연가 모델을 적용하였다.

- 케이블 모의 : OF 2000[mm<sup>2</sup>], 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)

가공선로와 동일한 이유로 위와 같이 선정하였다.

- 한류기 동작 최종 저항값 : 10( $\Omega$ )

한류기 동작 최종 저항값을 10( $\Omega$ )으로 설정하였으며 값을 변경하면서 사례 연구를 수행하였다.

- 한류기 동작개시 전류 : 5.0(kA)

한류기 동작개시 전류는 일반적으로 한류기가 적용되는 위치에서 흐를 수 있는 정상상태 정격전류의 2~4배 이상이면서 차단용량 이하가 되도록 설정한다. 따라서, ACSR 410[mm<sup>2</sup>]의 허용전류가 0.835kA 인 점을 고려할 때 이 값의 3배이고 번들을 고려하여 5.0kA로 설정하였다.

- 한류기 비선형 특성 : 기본적으로 선형 및 고장전류에만 의존

기본적으로 한류기의 비선형 특성은 무시하고, 고장전류에만 선형적으로 의존하도록 특성을 모의하였다. 그러나, 일정한 비선형 함수식에 의하여 변화되는 경우를 사례 연구에서 검토하였다.

#### 4.1.3. 적용효과 분석 방법

모선분리 후 초전도한류기 적용 혹은 송전선로 직렬로 삽입 등 초전도 한류기의 최적 적용 방안과 위치는 별도의 세밀한 연구를 필요로 하는 사항이다. 따라서, 본 연구에서는 그림 4와 같은 모의계통에서 고장전류 기여분이 가장 큰 송전단 전원과 직렬로 초전도한류기를 적용하였다. 그리고 초전도한류기의 적용여부에 따른 전체 고장전류 및 초전도한류기 전류를 상호 비교함으로써 효용성을 분석한다.

### 4.2 해석결과 분석

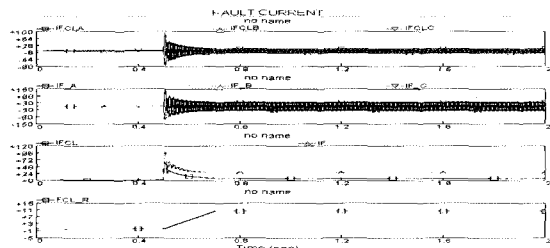
#### 4.2.1. 기본 해석케이스

그림 4의 해석대상 계통에서 위와 같은 기본 해석데이터를 적용하여 저항형 초전도한류기의 유무에 따라 해석한 결과를 나타내면 표 3과 같다. 표 3을 분석하면 한류기가 있는 경우 전체 고장전류가 63.7kA에서 28.0kA로 감소하였으며, 초전도 한류기 적용위치에 흐

르는 전류는 40.0kA에서 8.7kA로 대폭 저감되었다. 이는 한류기를 적용한 송전단 전원의 고장전류 기여분은 대폭 감소한 반면 수신단에서 가공선로와 케이블 선로를 통한 고장전류 기여분은 크게 변하지 않았음을 의미한다. 그림 2.5는 한류기 유무에 따른 해석결과를 도시한 것이다. 그림 2.5에서 t=0.5sec에서 고장이 발생하면 초전도한류기가 동작하고 그 결과로서 전체 고장전류와 한류기 전류가 저감됨을 알 수 있다.

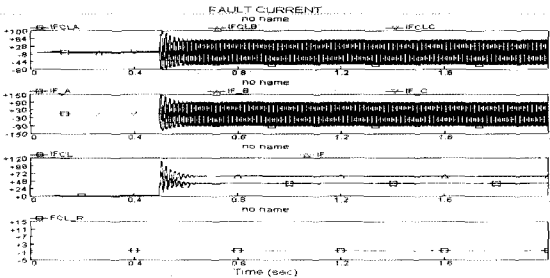
표 3. 기본 해석 Case 해석결과  
Table. 3. Analysis Result of Basic Case

해석 CASE	I <sub>F</sub> (kA) (전체 고장전류)	I <sub>FCL</sub> (kA) (한류기 고장전류)	R <sub>FIN</sub> (Ω)
기본 해석케이스 (한류기 有)	28.0	8.7	10.0
기본 해석케이스 (한류기 無)	63.7	40.0	0.00



(a) 전체 고장전류, 한류기 전류 순시치/실효치 및 한류기 최종 저항값 (한류기 有)

(a) Fault Current, FCL Current and RMS, FCL Final Resistance



(b) 전체 고장전류, 한류기 전류 순시치/실효치 및 한류기 최종 저항값 (한류기 無)

(b) Fault Current, FCL Current and RMS, FCL Final Resistance (FCL None)

그림 5. 초전도한류기 유무에 따른 기본 케이스 고장 해석 결과 (T=0.5sec 고장발생)

Fig. 5. Fault Analysis Result when HTS-FCL Exist and Not(T=0.5sec Fault)

4.2.2. 사례 연구

위의 기본 해석케이스 해석결과를 기준으로 하여 한류기 최종 저항값, 송수전단 전원임피던스, 동작개시전류의 변동 및 한류기 비선형 특성 추가에 따른 해석결과를 분석하면 다음과 같다.

가. 한류기 최종 저항값 변동 경우

표 4는 한류기 최종 저항값 변동에 따른 해석결과를 나타낸 것인데, 한류기 최종 저항값이 클수록 전체 고장전류와 한류기 전류가 감소함을 알 수 있다. 그러나, 한류기 최종 저항값이 일정 수준이상 초과하면 한류기 전류가 동작개시전류 이하로 감소하기 때문에 고장전류 억제효과도 포화가 됨을 알 수 있다. 즉, 표 4에서 최종 저항값을 20(Ω)과 30(Ω)으로 설정하면 한류기 전류가 동작개시 전류 이하로 감소하므로 양 경우에 있어서 해석결과가 동일하게 나타난다. 만약 한류기 최종 저항값이 5(Ω)인 경우 전체 고장전류는 차단용량인 31.5kA를 초과한 35.1kA를 나타낸다. 표 4의 비교에서 R<sub>FIN</sub>은 해석결과로서 나타난 초전도 한류기의 최종 저항값을 의미한다.

표 4. 한류기 최종 저항값 변동에 따른 사례 연구 해석결과

Table 4. Case Study Analysis Results by FCL Final Resistance changes

사례 연구 (기본해석 CASE와의 차이점)	I <sub>F</sub> (kA) (전체고장 전류)	I <sub>FCL</sub> (kA) (FCL 고장전류)	비 고
기본 해석케이스 (R <sub>FIN</sub> =10Ω)	28.0	8.7	
최종 저항값 변경 : 10.0→ 5.0(Ω)	35.1	16.1	R <sub>FIN</sub> = 5.0Ω
최종 저항값 변경 : 10.0→20.0(Ω)	25.3	5.0	R <sub>FIN</sub> =17.9Ω
최종 저항값 변경 : 10.0→30.0(Ω)	25.3	5.0	R <sub>FIN</sub> =17.9Ω

나. 송수전단 전원임피던스 변동 경우

표 5에서 알 수 있듯이 고장전류 크기는 송수전단 임피던스에 반비례하며, 한류기가 송전단에 위치하므로 송전단 전원임피던스가 변동하면 한류기 전류가 약간 영향을 받으며, 그 결과 전체 고장전류도 조금 변화된다. 반면에 수신단 전원임피던스가 변동하는 경우는 한류기 전류는 전혀 변화가 없고 고장전류만 큰 폭으로 변한다. 그 이유는 송전단 전원임피던스는 변화더라도 한류기에 의하여 고장전류의 변동이 억제되지만, 수신단은 그렇지 않기 때문이다.

다. 한류기 동작개시전류 변동 경우

한류기 동작개시전류가 클 수록 고장이 발생할 때 고장전류를 억제하기 위한 한류기 저항값의 증가폭이 적어지므로 고장전류 억제효과는 감소하게 된다. 표 6을 살펴보면 동작개시전류가 5.0kA에서 7.5kA로 증가하더라도 최종 저항값이 10.0Ω으로 동일하게 되어 최종적인 고장전류와 한류기 값은 기본 해석케이스와 동일하게 나타났다. 하지만, 동작개시전류가 10.0kA로 더욱 증가하면 한류기의 최종 저항값은 8.7Ω으로 감소하며, 결과적으로 고장전류 억제효과도 떨어지게 된다. 이는 위에서 검토한 한류기 최종 저항값과 더불어 동작개시전류 파라미터 설정을 최적화할 필요성이 있음을 의미한다.

표 5. 전원임피던스 변동에 따른 사례 연구 해석결과  
Table 5. Case Study Analysis Results by Source Impedance changes

사례 연구 (기본해석 CASE와의 차이점)	I <sub>F</sub> (kA) (전체고장전류)	I <sub>FCL</sub> (kA) (FCL 고장전류)	비 고
기본 해석케이스	28.0	8.7	
송전단 전원임피던스 2.223→1.112(Ω)	27.4	8.9	50% 증가
송전단 전원임피던스 2.223→3.335(Ω)	28.4	8.4	50% 감소
수전단 전원임피던스 2.223→1.112(Ω)	37.3	8.7	50% 증가
수전단 전원임피던스 2.223→3.335(Ω)	22.8	8.7	50% 감소

표 6. 한류기 동작개시전류 변동에 따른 사례 연구 해석결과

Table 6. Case Study Analysis Results by FCL Running Current Changes

사례 연구 (기본해석 CASE와의 차이점)	I <sub>F</sub> (kA) (전체고장 전류)	I <sub>FCL</sub> (kA) (FCL 고장전류)	비 고
기본 해석케이스 (I <sub>OP</sub> =5kA)	28.0	8.7	R <sub>FIN</sub> = 10.0Ω
동작개시전류 5.0→7.5(kA)	28.0	8.7	R <sub>FIN</sub> = 10.0Ω
동작개시전류 5.0→10.0(kA)	29.1	10.0	R <sub>FIN</sub> = 8.7Ω

라. 비선형특성 해석에

현재까지 초전도한류기 주변 온도와 통전전류 및 저항값에 대한 명확한 관계식이 정립된 것은 없으며, 실제로 주변 온도는 한류기의 고장전류 값 뿐만 아니라 해당 시점의 기온에 따라서 크게 좌우되기 때문에 고려하기가 곤란한 측면이 있다. 따라서, 본 연구에서는 개발된 EMTDC 모델이 비선형 특성을 고려할 수 있다는 것을 입증하기 위하여 아래와 같이 가정된 조건하에서 해석하였다. 즉, 그림 3에서 나타낸 비선형 특성을 모의한 경우로서 한류기의 최종 저항값이 식 (3)에 비례하여 결정되도록 하였다. 이러한 식은 비선형특성을 나타내는 방법으로 상세한 내용은 다음과 같다. 식 (3)에서  $INT_F$  는 한류기 모델내의 고장전류 정규치의 적분값으로서 0~1kA의 범위에 있다. 따라서, 기준 한류기 전류 실효치인 K 값도 1을 기준으로 하여 1 보다 큰 값이면 한류기 최종 저항값이 비선형특성의 형태로 적어지게 된다. 결과적으로 고장전류는 커지게 되고 이러한 사실은 표 7의 해석결과와 그림 6에서 알 수 있다. 반대로 K 값이 1 보다 작은 경우 한류기 최종 저항값이 비선형특성의 형태로 커져서 이에 따라 고장전류는 감소한다.

$$T = \frac{\sqrt{INT_F^3}}{K} \quad R_{OUT} = INT_F * T \quad (3)$$

여기서, T : 온도기준계수

$INT_F$  : 한류기 모델내 고장전류 적분치 (0~1kA)

K : 기준 한류기 전류 실효치 (kA)

R<sub>OUT</sub> : 온도의존성 초전도 한류기 저항값

표 7. 비선형특성(온도기준계수)에 따른 사례 연구 해석결과

Table 7. Case Study Analysis Results by Nonlinear Characteristics

사례 연구 (기본해석 CASE와의 차이점)	I <sub>F</sub> (kA) (전체고장 전류)	I <sub>FCL</sub> (kA) (FCL 고장전류)	비 고
기본 해석케이스 (K=1)	28.0	8.7	R <sub>FIN</sub> =10.0Ω
K = 0.5	25.3	5.0	R <sub>FIN</sub> =17.9Ω
K = 2.0	35.1	16.1	R <sub>FIN</sub> = 5.0Ω

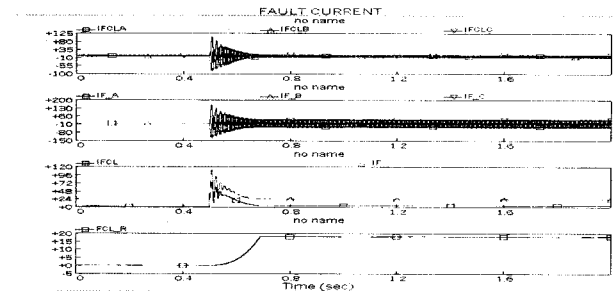


그림 6. 초전도한류기의 최종저항값 비선형 특성을 고려한 경우의 해석결과

Fig. 6. Case Analysis Result that consider Nonlinear Characteristics of HTS-FCL Final Resistance

6. 결론

본 연구에서는 저항형 초전도한류기의 EMTDC 모델을 개발하고 이를 모의계통에 적용하여 해석결과를 분석하였는데, 연구결과를 종합하여 기술하면 다음과 같다.

- 본 연구에서는 일반적인 저항형 초전도한류기의 동작특성을 분석하고 이를 바탕으로 하여 EMTDC 모델을 개발하였다. 그리고, 본 연구에서 개발한 EMTDC 모델을 한전 154kV 등가계통에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.
- 초전도한류기 유무에 따른 기본 케이스 해석결과 초전도 한류기를 적용하면 고장전류가 대폭 저감됨을 알 수 있었다. 또한, 한류기 최종 저항값, 전원 임피던스 크기 및 한류기 동작개시전류의 변동에 따라서 고장전류가 영향을 받는데, 한류기가 위치한 선로의 고장전류 기여분이 가장 큰 폭으로 변동하였다.



- 본 연구에서는 초전도한류기의 비선형 특성을 모의 하였으나 실제 비선형 특성에 관한 정확한 관계식을 적용하지는 못했다. 따라서, 향후 비선형 특성에 대한 검토와 이를 적용한 연구를 수행할 필요성이 있다. 그리고, 실 계통 적용을 위해서는 한류기 파라미터의 최적 설정에 대한 연구도 필요하다. 또한, 본 연구 대상인 저항형외에 유도형초전도한류기에 대한 분석과 상호 비교도 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

“본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

“This research was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Science and Technology, Republic of Korea”

### 참고 문헌

- [1] 한국전력공사 전원계획처, “계통특성 개선설비 설치 타당성 검토 보고서”, 1995. 11
- [2] 한국전기연구원, “초고압 대용량 직류송전 기술개발”, 1996. 12
- [3] 한국전기연구원, “HTS-FCL 특성비교 검토”, 2002. 6
- [4] M. Noe, B. R. Oswald, “Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems” IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999.
- [5] J. N. Nielsen, J. J. Ostergaard, “Applications of HTS fault current limiters in the danish utility network”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 1347-1350
- [6] 한밭대 연구보고서, “초전도한류기 파라미터 검토”, 2000. 6
- [7] H. Kameda, “Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection” IEEE Trans. Appl. Supercond. June 1999
- [8] Charles A. Gross, “Power System Analysis”, 1986
- [9] EMTDC Manual, Custom Model. 2001

### 저 자 소 개



#### 윤재영 (尹在暎)

1962년 7월 30일생. 1985년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 기술사(발송배전). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구원 신전력 시스템그룹장, 책임연구원



#### 김종율 (金鍾律)

1974년 7월 6일생. 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹



#### 이승렬 (李昇烈)

1975년 9월 13일생. 1999년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 박사수료. 현재 한국전기연구원 신전력시스템그룹