한국에너지공학회(2003년도)
추계 학술발표회 논문집 P323-330

Monte Carlo 방법을 활용한 저항형초전도한류기의 최적 파라메터 설계

윤재영, 이승렬, 김종율
한국전기연구원 신전력시스템연구그룹

Design of optimized parameter for Resistance type Fault Current Limiter using Monte Carlo Method

Yoon Jae-Young, Lee Seung-Yeul, Kim Jong Yeul
Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서 론

전력계통이 복잡화될수록 고장전류가 증가하여 차단기의 단락용량을 초과할 가능성이 높아진다. 이러한 경우를 방지하기 위하여 모선분리, 차단용량 증가, 한류리액터 적용, HVDC BTB 등의 여러 가지 대안을 상정할 수 있는데 장기적 관점에서 효과적인 대안의 하나로서 저항형 초전도한류기의 적용을 들 수 있다.([1]~[2]) 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 계통적용을 위해서는 다양한 운전조건 하에서 초전도한류기의 동작특성과 고장전류 억제효과를 검증할 수 있는 동특성 모델이 필요하며([6]), 계통조건에 적합한 동특성을 구현하기 위해서는 초전도한류기의 각종 파라메터가 최적으로 설계되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 계통 운전조건에 따라서 저항형 초전도한류기의 파라메터를 최적으로 설계하기 위한 방법론을 개발하고 이를 실 계통 운전조건과 유사한 모의계통에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

2. 저항형 초전도한류기 파라메터

저항형 초전도한류기는 정상운전 상태에서는 임피던스가 거의 영이지만, 임계전류 이상의 고장전류가 흐르면 일정한 시정수에 따라서 임피던스가 증가하여 고장전류를 일정수준 이하로 억제하는 특성을 가지고 있다. 고장전류를 제한하는 기본특성을 가진 저항형 초전도한류기의 동태특성을 좌우하는 주요 파라메터를 정의하면 표 2.1과 같다[6]. 표 2.1의 파라메터 중에서 한류기 최종 저항값(RFIN), 동작개시전류(IOP), 동작시간(TFCL)은 저항형 초전도한류기의 설계 파라메터로서 이 값들의 설계치에 따라서 한류기의 동작특성이 좌우된다. 이와 같은 세 가지 파라메터는 각각 고장전류에 상반된 영향을 미치는데, 최종저항값이 크거나, 동작개시전류가 적을수록 그리고 한류기 동작시간이 짧으면 고장전류 감소효과는 커지게 된다.

그러나, 이러한 세 가지 파라메터가 일정한 값으로 설계되었더라도 실제 계통운전 상태에서는 확률적인 특성을 가지고 있으며, 파라메터 상호간의 복합적인 효과에 의하여 고장전류에 미치는 효과가 발생하게 된다. 예를 들면 최종 저항값(RFIN)이 일정 수준 이상이고 동작시간(TFCL)도 짧으면 고장전류가 빠른 시간 내에 동작개시전류 이하로 감소하여 초전도한류기의 역할이 제한되기 때문에 최종 저항값(RFIN)과 동작시간(TFCL)이 약간 더 큰 경우보다 오히려 최종적인 고장전류 크기는 더 커질 수도 있다. 따라서, 고장전류를 좌우하는 설

계 파라메터의 확률적인 특성을 고려해야 함은 물론이고 개별 입력 파라메터 간의 상호 관계를 종합적으로 고려하여 설계를 할 필요성이 있다.

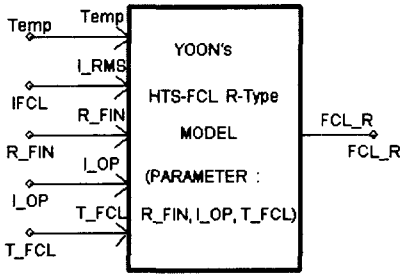
<표 2.1> 저항형초전도한류기 파라메터 기본정의

파라메터	기 본 정 의	비 고
CB_{SCC}	차단기 차단용량(kA)	한류기 설치지점의 차단용량
I_{FCL}	한류기(FCL) 통과전류(kA)	한류기 설치지점의 선로전류
I_{op}	한류기 동작개시 전류(kA)	상한 : (단락용량 - Margin) 하한 : (최대 부하전류 + Margin)
R_{FIN}	한류기 동작 최종 저항값(Ω)	CB_{SCC} I_{op} 등에 좌우됨
T_{FCL}	한류기 동작시간(msec)	Quenching이후 최종 저항값에 도달하는 시간
T_{REC}	한류기 복귀시간(msec)	고장전류 억제 후 초전도상태로 복귀하는 시간, 재폐로와 협조 필요

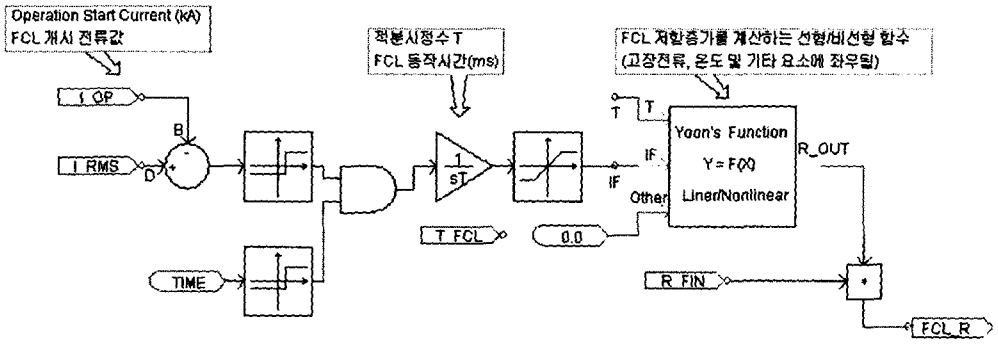
3. 저항형 초전도 한류기 EMTDC 모델

본 논문에서는 대상으로 하는 저항형초전도한류기의 과도특성을 고려한 동태모델은 그림 3.1과 같으며, 이에 대하여 최적 파라메터 설계를 하였다. 그림 3.1은 초전도한류기에 흐르는 선로전류가 한류기 동작개시전류를 초과하면 일정한 적분 시정수와 제한치를 가지고 초전도한류기 저항이 증가하는 모델이다. 그림 3.1에 나타낸 저항형초전도한류기 모델은 고장전류에 따라서 초전도한류기 저항값이 선형적으로 증가하는데, 실제적인 초전도한류기 저항값은 고장전류 크기와 더불어 온도와 기타 물리적 요소에 영향을 받으며, 비선형적으로 변화된다. 즉, 고장전류, 온도 및 기타 요소에 따라서 한류기저항값이 비선형적으로 변하는 동태모델이다. 그림 3.1의 EMTDC 모델에서 비선형 특성은 식(1)과 같이 고장전류, 온도 및 기타 요소에 따라서 한류기 저항이 변동되도록 구성되어 있으며, 함수식의 변동과 입력 요소의 추가가 가능하도록 설계되어있다. 그러나, 현재 다양한 물리적 변수에 따른 실제 초전도한류기의 동적 특성에 대한 정확한 관계식이 확립된 것은 없으므로 본 논문에서는 고장전류 크기를 위주로 하여 초전도 한류기의 동작특성을 고찰하고 파라메터를 설정하도록 한다.

$$y = f(I_F,\ Temperature,\ Other\ Factors) \qquad (1)$$



(a) 저항형초전도한류기 모델 입출력 파라메터



(b) 저항형초전도한류기 모델 세부 내용

<그림 3.1> 저항형초전도한류기 과도해석 모델

4. 최적 파라메터 설계방법

Monte Carlo Simulation은 입력변수가 가변적이고 상호간에 밀접하게 연관되어 있는 경우 최적 파라메터를 설계하기 위한 한 가지 방법으로서 입력변수를 확률함수로 보고 난수를 발생시켜서 확률해석을 하는 방법론이다. 이는 파라메터의 다양한 변화 가능성을 염두에 둔 것으로서 random 확률을 이용한 근사값 계산으로 볼 수 있다. 이러한 방법은 특정 시스템의 최적 파라메터 설계에 유용하게 적용될 수 있다. 본 논문에서는 한류기동작시간(TFCL)은 일정한 값으로 고정시키고 최종 저항값(RFIN)과 동작개시전류(Iop)의 변동에 따른 상호연관성을 고려하여 확률해석을 시행하였다. 본 논문에서 적용한 Monte Carlo 기법을 활용한 저항형초전도한류기의 최적 파라메터 설계방법은 다음과 같다.

(Step_1) 저항형초전도한류기의 설계 파라메터(RFIN, Iop)에 대한 확률변수값 범위 설정하며, 한류기 동작시간(TFCL)에 따른 Case study를 통하여 최적 파라메터의 설계값의 변화추이를 살펴본다.

- ○ 최종 저항값 : $10 \leq$ RFIN ≤ 60 (Ω) 범위에서 파라메터 결정
- ○ 동작개시전류 : $5 \leq$ Iop ≤ 10 (kA) 범위에서 파라메터 결정
- ○ 동작시간은 $0.001 \leq$ TFCL ≤ 0.01 (sec) 범위에서 Case study

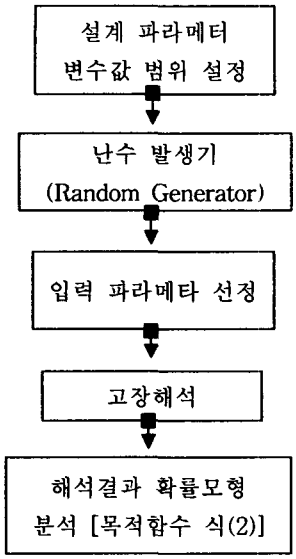
(Step_2) 개별 설계 파라메터(RFIN, Iop)의 변동 범위 내에서 난수 발생기(Random generator) 혹은 순차적인 증감을 통한 입력 파라메터 값 결정

(Step_3) Step_2에서 생성된 개별 입력 파라메터를 사용한 고장전류 해석

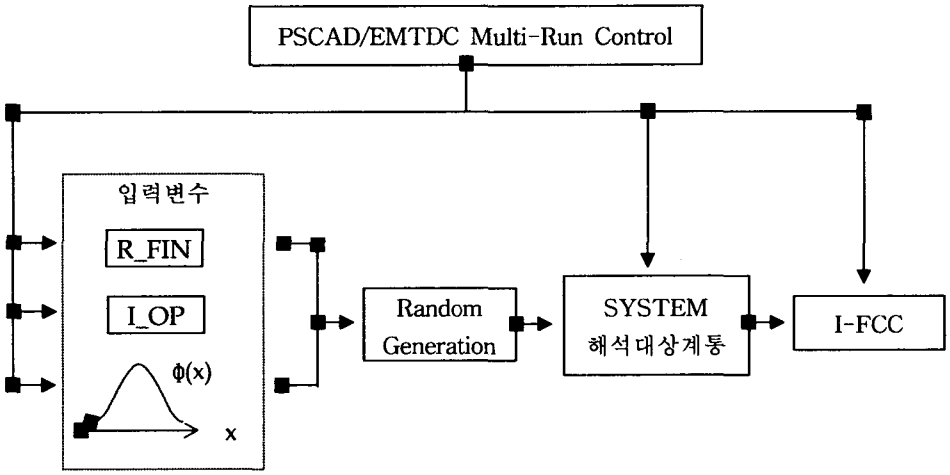
(Step_4) Step_3에서 해석한 개별 케이스의 해석결과를 정규분포 확률모형에 따라서 분석한다. 최적 파라메터 설정을 위한 목적함수는 식 (2)와 같이 초전도한류기에 흐르는 지속고장전류 실효치를 최소화하는 것으로 설정한다.

$$Min_x\ [f(x)] = Min\ |I_{FCL}| \qquad (2)$$

여기서, I_{FCL} : 초전도한류기에 흐르는 지속고장전류 실효치(rms)



<그림 4.1> 최적 파라메터 설계 수순



<그림 4.2> 확률해석 개요

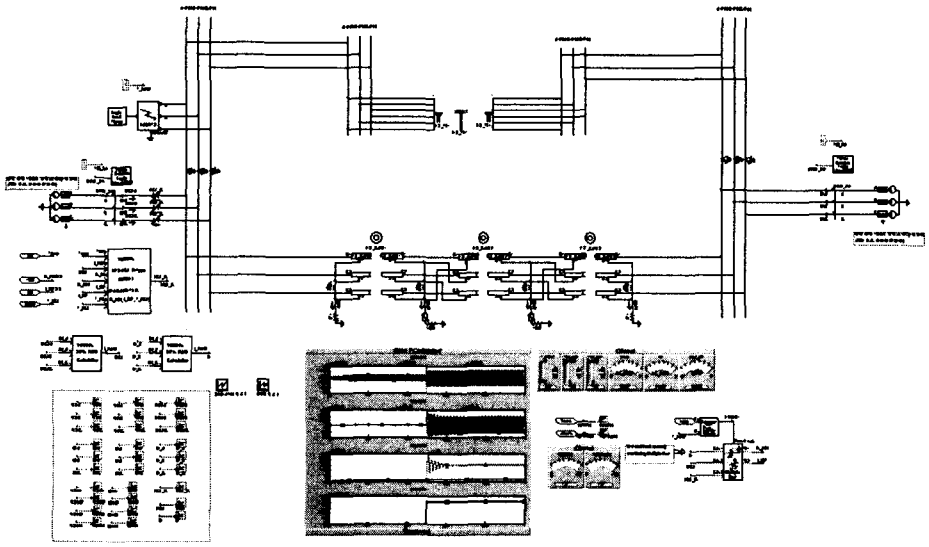
5. 파라메터 설계 적용효과 분석

5.1. 해석개요

본 논문에서는 저항형초전도한류기 EMTDC 모델의 최적 파라메터를 설계하고 이의 효용성을 검증하였다. 해석대상 모의계통, 기본 데이터, 해석결과 및 Case study 해석결과 분석을 하면 다음과 같다.

5.1.1. 해석대상 모의계통

본 논문에서 개발한 방법의 효용성을 검증하기 위하여 한전계통의 기본 특성을 가지는 그림 5.1과 같은 모의계통을 구성하였다. 그림 5.1은 154kV 송수전단 특성을 가지는 양 모선과 대표적인 한전 가공선로와 케이블 선로 사양을 가지는 전형적인 한전 154kV 등가계통으로 모의하였다.



<그림 5.1> 저항형초전도한류기 해석대상 모의계통 (한전 154kV 등가계통)

5.1.2. 해석 데이터

그림 5.1의 해석대상 모의계통에서 저항형초전도한류기의 최적 파라메터 설계를 위하여 데이터는 다음과 같다.

○ 송수전단 등가 전압원 : 1.02∠10°(PU) 및 1.0∠0°
○ 전원 임피던스 : 2.223(Ω)∠85.0°(송전단 및 수전단 동일)
○ 가공선로 : ACSR 410[mm2]x2B, 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)
○ 케이블 모의 : OF 2000[mm2], 주파수독립 비연가 모의 (10.0km)
○ 한류기 동작 최종 저항값 및 동작개시 전류 :

최적 파라메터 설정대상으로서 난수 발생기에서 값을 변동시키면서 생성하면서 계통해석을 수행하여 결과를 확률분석 하였다.

5.2. 적용효과 분석

5.2.1. 기본 해석케이스

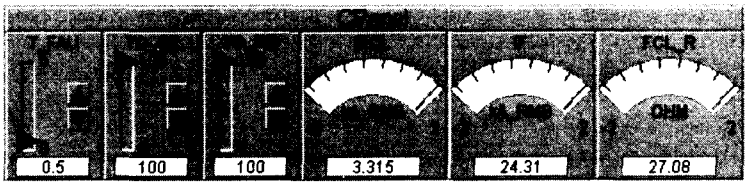
<그림 5.1>의 해석대상 계통에서 일정한 한류기 동작시간(TFCL)을 갖는 경우에 초전도한류기의 최종 저항값(RFIN)과 동작개시전류(Iop)를 아래와 같은 범위 내에서 변동시키면서 고장전류 해석을 시행하였다. 그 결과, 최소 지속 고장전류는 최종 저항값이 57(Ω), 동작개시전류가 5(kA)인 경우에 발생하였다. 이는 각 파라메터를 별개로 고려하는 경우 최종저항값이 60(Ω)인 경우에 고장전류값이 더 낮을 것으로 예상되는 것과는 달라진 경우로서 본 논문에서 검토하고자 하는 최적 파라메터 설계의 필요성을 의미한다고 할 수 있다.

○ 최종 저항값 : 10 ≤ RFIN ≤ 60 (Ω)

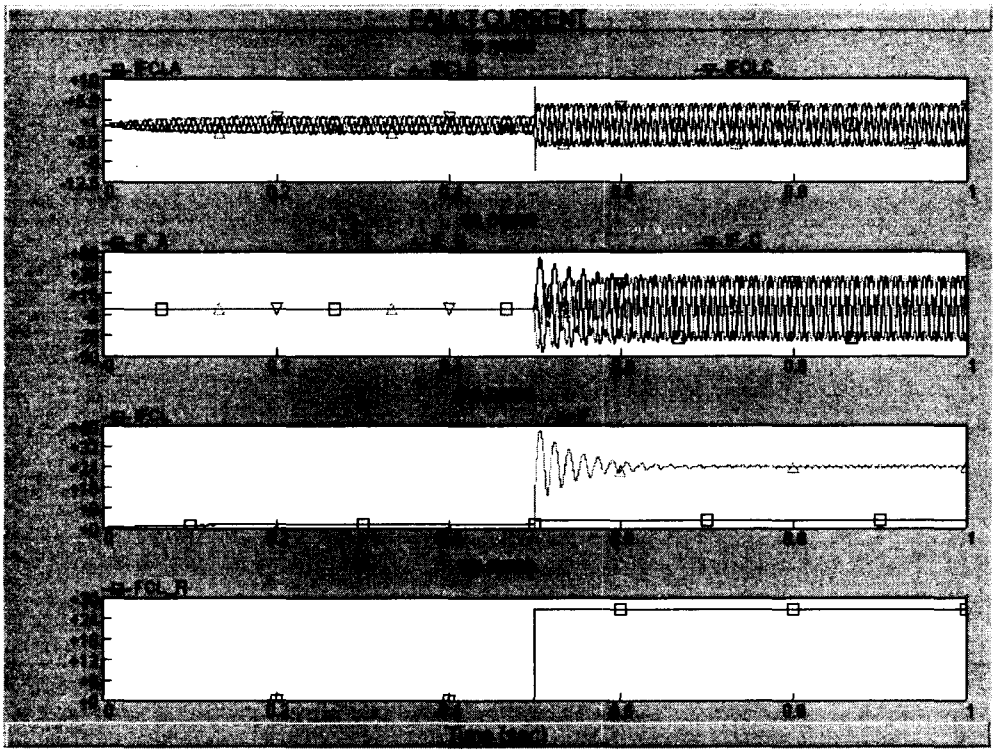
○ 동작개시전류 : 5 ≤ Iop ≤ 10 (kA)

<표 5.1> 기본 해석 Case 해석결과

해석 CASE	최적파라메터	해 석 결 과			비 고
		IF(kA) (전체고장전류)	IFCL(kA) (한류기고장전류)	FCL_R (최종저항)	
T_{FCL}=0.002 (sec)	R_{FIN} = 57.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.3	3.31	27.1(Ω)	Sequential (51,6)
T_{FCL}=0.002 (sec)	R_{FIN} = 56.1(Ω) I_{op} = 5.07(kA)	24.3	3.37	26.6(Ω)	Normal-Random(51,6)
T_{FCL}=0.002 (sec)	R_{FIN} = 57.3(Ω) I_{op} = 5.00(kA)	24.3	3.30	27.2(Ω)	R_FIN:Random(1000) I_OP:Sequential(6)



(a) 시간제어 스위치, 전체 고장전류 및 한류기 전류 실효치, 한류기 최종 저항값 (한류기 1j)



(b) 전체 고장전류, 한류기 전류 순시치/실효치및 한류기 최종 저항값 (한류기 $1j$)

<그림 5.2> 초전도한류기 유무에 따른 기본 케이스 고장해석 결과 (T=0.5sec 고장발생)

5.2.2. Case study

위의 기본 해석케이스를 기준으로 하여 한류기의 동작시간을 변동하면서 동일한 파라메터 변동범위를 사용하여 지속 고장전류 값을 확률해석 하였다. 입력파라메터를 순차적으로 증가시키면서 확률해석한 결과를 나타내면 표 5.2와 같으며, 표 5.3은 입력파라메터를 임의의 난수(random varisablbe)로 발생시킨 경우이다. 표 5.2에서 고장전류가 최소화되는 최종 저항값은 반드시 60(Ω)이 아니며, 경우에 따라서 값이 변하는 것을 알 수 있다. 또한, 최종저항값과 동작개시전류 및 한류기 동작시간이 종합적으로 연관되어 나타나는 한류기 실제 저항값은 20.4~29.5(Ω)을 나타내었다. 이는 한류기의 설계저항값(최종저항값)이 지나치게 높은 경우 동작개시전류 이하로 한류기전류가 감소하므로 한류기의 실제 저항값이 낮아지기 때문인데, 결과적으로 한류기의 각종 파라메터를 고려한 최적 설계가 필요함을 의미한다. 표 5.3의 해석결과는 입력파라메터의 발생방법이 상이하므로 표 5.2와 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

<표 5.2> 최종저항값 변동에 따른 Case study 해석결과 (입력 파라메터 Sequential 증가)

해석 CASE	최적파라메터	해 석 결 과			비 고
		IF(kA) (전체고장전류)	IFCL(kA) (한류기고장전류)	FCL_R (한류기저항)	
T_{FCL}=0.001(sec)	R_{FIN} = 59.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.18	3.05	29.5(Ω)	
T_{FCL}=0.0015(sec)	R_{FIN} = 56.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.26	3.21	28.0(Ω)	
T_{FCL}=0.003(sec)	R_{FIN} = 56.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.44	3.56	25.2(Ω)	
T_{FCL}=0.004(sec)	R_{FIN} = 60.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.53	3.73	24.0(Ω)	
T_{FCL}=0.005(sec)	R_{FIN} = 59.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.61	3.89	23.0(Ω)	
T_{FCL}=0.01(sec)	R_{FIN} = 60.0(Ω) I_{op} = 5(kA)	24.89	4.38	20.4(Ω)	

<표 5.3> 최종저항값 변동에 따른 Case study 해석결과
(입력 파라메터 정규분포에서 Random Variable로 선택)

해석 CASE	최적파라메터	해 석 결 과			비 고
		IF(kA) (전체고장전류)	IFCL(kA) (한류기고장전류)	FCL_R (한류기저항)	
T_{FCL}=0.001(sec)	R_{FIN} = 59.9(Ω) I_{op} = 5.0(kA)	24.16	3.00	29.96(Ω)	
T_{FCL}=0.0015(sec)	R_{FIN} = 51.4(Ω) I_{op} = 5.25(kA)	24.29	3.27	27.4(Ω)	

6. 결 론

본 논문에서는 확률해석 방법을 사용한 저항형초전도한류기의 최적 파라메터 설계방안을 제안하고 이를 국내계통 조건과 유사한 모의계통에 적용하여 확률해석을 시행함으로써 그 효용성을 검증하였다. 본 연구결과를 종합하여 기술하면 다음과 같다.

○ 본 연구에서는 일반적인 저항형초전도한류기의 동작특성을 분석하고 설계 파라메터를 설정하였다. 그리고, 일정한 범위 내에서 설계 파라메터를 임의로 가변시키는 확률해석을 시행하여 최적 파라메터를 설계하였다.

○ 본 논문에서 제안한 저항형초전도한류기의 최적 설계방안을 모의계통에 적용한 결과 개별 파라메터 상호간의 복합 작용에 따라서 고장전류 값이 차이를 나타냄을 알 수 있었으며, 이는 관련 파라메터의 가변성에 따라서 확률적인 분석을 할 필요성이 있음을 의미하고 있다. 즉, 개별 파라메터의 상호 관련성을 종합한 최적 파라메터 설계방안의 유용성을 확인할 수 있었다.

○ 본 연구에서는 지속고장전류 최소화를 위한 저항형초전도한류기의 최적 파라메터 설계를 검토하였는데 향후 지속고장전류 뿐만 아니라 차단기 투입전류 측면을 포함한 최적 파라메터 설계를 검토할 필요성이 있다. 또한, 실 계통과 저항형초전도한류기의 파라메터에 대한 세부 검토와 본 연구 대상인 저항형외에 유도형초전도한류기에 대한 분석과 상호 비교도 필요할 것으로 사료된다.

<참고문헌>

[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"

[6] 한밭대, "초전도한류기 파라메터 검토", 200. 6

[7] H. Kameda, "Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection" IEEE Transactions on applied superconductivity, June 1999

[8] Charles A. Gross, "Power System Analysis", 1986

[9] EMTDC Manual, Custum Model

[10] 윤재영, "저항형초전도한류기 과도특성을 고려한 EMTDC 모델개발"