

저항형 초전도한류기의 신뢰도 모델을 적용한 배전계통 신뢰도 평가에 관한 연구

논 문
60-3-1

A Study on the Evaluation of Distribution Reliability Considering Reliability Model for a Resistive-Type of Superconducting Fault Current Limiter

김 성 열* · 김 옥 원** · 김 진 오†
(Sung-Yul Kim · Wook-Won Kim · Jin-O Kim)

Abstract - Recently fault currents are increasing in a network. It is caused by increase in electric demand and high penetration of distributed generation with renewable energy sources. Moreover, distribution network has become more and more complex as mesh network to improve the distribution system reliability and increase the flexibility and agility of network operation. Accordingly, the fault current will exceed capacity of circuit breakers soon and all the various rational solutions to solve this problem are taken into account. Under these circumstances, superconducting fault current limiter(SFCL) is a new alternative in the viewpoint of technical and economic aspects. This study presents operation processes for a resistive-type of SFCL, and it proposes reliability model for the SFCL. When a SFCL is installed into a network, the contribution of decreased fault currents to failure for distribution equipments can be quantified. As a result, it is expected that a SFCL makes the reliability of adjacent equipments on existing network improve and these changes are analyzed. We propose a methodology to evaluate the reliability in the distribution network where a SFCL is installed considering a reliability model for resistive-type of SFCL and reliability changes for adjacent equipments which are proposed in this paper.

Key Words : Superconducting fault current limiter, Reliability model, Distribution reliability

1. 서 론

최근 탄소배출량 감축과 관련된 환경 규제가 강화되고 있으며, 신재생에너지 의무 할당제(Renewable Portfolio Standard: RPS)와 같은 발전 규제는 신재생에너지를 포함한 분산형 전원의 보급 확대 및 전원 다원화에 지대한 영향을 미치고 있다. 또한, 배전계통은 급격히 증가하는 전력 부하에 대한 적정성, 전력 공급의 신뢰도 향상 및 계통 운영의 유연성을 위하여 방사 형태를 벗어나 점차 복잡해지고 있다. 이러한 요인들에 따른 설비 증설로 배전계통이 저임피던스화 되면서, 단락 용량 증대 문제뿐만 아니라 고장전류 문제가 더욱 가속화될 전망이다[1].

고장전류 저감을 위한 대책으로서 보호설비의 교체 및 용량 증대, 직렬 리액터 적용, 주변압기의 대용량화 등이 거론되고 있다[2]. 이러한 다양한 대책들 중 기술적·경제적 측면을 고려할 때, 초전도한류기가 그 대안이 될 수 있다.

초전도한류기는 계통에 고장전류가 유입되지 않는 정상상태에서 임피던스가 0인 장점을 지니고, 계통 사고 발생 시 임피던스를 증가시켜 고장 전류를 제한하는 특성을 갖는다. 따라서, 기존 한류기와 비교해서 정상 계통에서 무손실, 무

스위칭의 장점을 갖는다[3]. 이러한 이유로 초전도한류기는 최근 다양한 각도에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 특히 초전도한류기의 동작 및 전류제한 특성에 관한 연구 및 성능 평가에 관한 실증적 연구가 진행되고 있다[4-7]. 그러나, 초전도한류기 자체의 신뢰도 혹은 계통 내 신뢰도 평가와 관련된 연구는 미진한 상태이다. 이에 본 논문에서는 초전도한류기가 계통에 연계되었을 경우, 계통 신뢰도 측면에서 초전도한류기의 영향을 분석하기 위해 초전도한류기 신뢰도 모델을 제안한다. 또한, 고장전류 저감에 따른 인근 보호설비의 고장 개선율을 고려하여 배전계통 신뢰도를 평가하는 기법을 제안한다.

2. 초전도한류기 구조 및 신뢰도 모델링

상전도상태의 어떤 물질이 임계온도 이하에서 전기저항이 급속히 감소하여 0이 되는 현상을 초전도현상이라 하며 이런 물질을 초전도체라 한다[8]. 초전도한류기는 이러한 초전도체의 특성을 이용하여 과전류가 흐를 때 저항을 발생시키는 신개념의 기기이다. 초전도한류기는 별도의 부가장치 없이 고장전류에 대한 초고속 감지가 가능하며, 한류 동작 주체에 따라 크게, 초전도체가 고장 전류 감지 및 한류를 동시에 하는 형태와 스위칭 소자를 이용하여 초전도체는 고장 전류만을 감지하고 별도의 한류 장치를 통해 한류하는 하이브리드형 초전도한류기로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 초전도체가 사고 감지 및 한류를 같이 수행하며, 동작 원리가 간단하고 소형화가 유리한 저항형 초전도한류기를 다루도록 한다.

* 정 회 원 : 한양대 전기공학과 박사과정

** 준 회 원 : 한양대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 한양대 전기공학과 정교수

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 19일

최종완료 : 2011년 1월 17일

2.1 초전도한류기 고장원인 및 결과

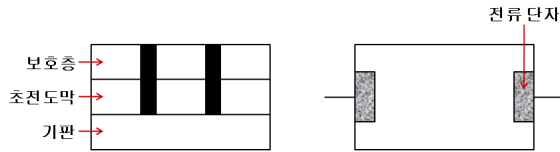


그림 1 박막형 초전도체의 구조
Fig. 1 The structure of a thin film Superconductor

초전도체의 종류에 따라 벌크, 선재, 박막형으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 비교적 가격이 저렴하고 소형화가 가능한 박막형 초전도체를 적용한 저항형 초전도한류기의 신뢰도 모델링에 대해서 기술한다. 다음 그림 1과 같이 박막형 초전도체는 보호층(Buffer Layer), 초전도막, 기판 및 전류 단자로 구성된다.

계통에 고장이 발생할 경우, 저항형 초전도한류기 동작 프로세스는 그림 2와 같다. 'Impedance Zero'인 단계는 계통이 정상인 상태에서 초전도 한류기가 무손실로 계통에 연계된 상태를 의미한다. 저항형 초전도한류기는 초전도체의 한류 이후 회복 단계에 들어가는 반면, 하이브리드형 초전도한류기는 별도의 장치가 한류를 하는 동안 초전도체가 바로 회복 단계에 들어감으로써 고장 원인 해결 후 빠른 계통 연계가 가능하다는 점과 초전도체의 최대 회복 시간 확보를 통해 냉각비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 fuse, drive coil 그리고 fast switch 등이 추가적으로 구성됨으로 다소 구조가 복잡해진다.

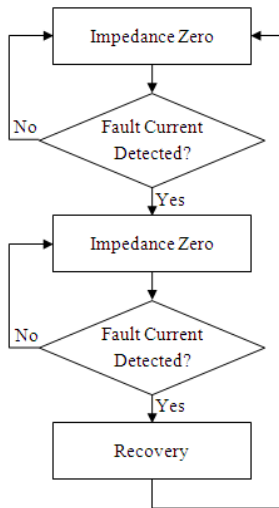


그림 2 저항형 초전도한류기 동작 프로세스
Fig. 2 An operation process for a resistive-type of SFCL

초전도한류기가 계통에 연계되었을 경우, 일반적으로 초전도한류기 자체의 고장은 계통 고장 발생으로 인해 초전도한류기에 과도한 고장 전류가 유입될 경우 발생한다. 이러한 초전도한류기 자체의 고장은 보호층, 초전도막 또는 전류 단자에서 발생하며, 결과적으로 초전도한류기가 계통으로부터 분리되는 원인으로 작용한다. 다음 표는 박막형 초전도체의 고장원인 및 결과를 나타낸다.

표 1 박막형 초전도체의 고장원인 및 결과

Table 1 Causes of a thin film superconductor and the result

고장원인		결과	빈도
초전도 소자 & 모듈	보호층 + 초전도막	Open	1(85%)
	보호층		3(5%)
전류 단자			2(10%)

2.2 초전도한류기 신뢰도 모델

계통이 정상 상태일 경우 초전도한류기의 계통 분리는 대부분 냉각기 점검 등의 인위적인 사건에 의해서 발생하므로, 본 논문에서는 고려하지 않도록 한다. 따라서, 저항형 초전도한류기는 다음의 3-state 모델로 구성할 수 있다.

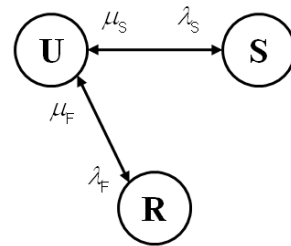


그림 3 저항형 초전도한류기의 3-state 신뢰도 모델
Fig. 3 3-state reliability model for a resistive-type of SFCL

그림 3에서 상태 U는 정상 계통 상태, S는 계통 사고 발생시 초전도한류기의 동작 성공, R은 계통 사고 발생시 초전도한류기의 동작 실패를 의미한다. λ_s 와 λ_f 는 각각 계통 고장 발생 시 초전도한류기가 정상적으로 한류하는 경우와 초전도한류기의 동작 실패로 인해 계통이 개방되는 상태를 의미한다. μ_s 는 계통 고장 원인이 제거된 후, 초전도한류기가 정상적으로 회복되는 것을 의미하며, μ_f 는 초전도한류기의 고장을 포함한 계통 고장 원인이 제거되는 것을 의미한다. 이 때, 각 상태간 천이율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \lambda_s &= (\text{계통의 고장율}) * (\text{상태 S에 있을 확률}) \\
 \mu_s &= 1 / (\text{계통 고장 수리 시간}) \\
 \lambda_f &= (\text{계통의 고장율}) * (\text{상태 R에 있을 확률}) \\
 \mu_f &= 1 / \text{Max}(\text{계통 고장 수리 시간, 초전도한류기 수리 시간})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3 초전도한류기가 연계된 배전계통 신뢰도

일반적으로 새로운 설비가 시스템에 직렬로 연계될 경우, 시스템 신뢰도는 기존과 비교해서 낮아진다. 그러나 초전도한류기가 계통에 연계될 경우, 계통 고장 시 설비에 흐르는 고장 전류가 저감됨으로써, 계통 설비에 과도한 고장 전류 유입 회수가 감소한다. 이는 고장 전류 크기에 민감한 보호설비의 고장율을 향상시킬 것이다[3]. 따라서, 새로운 설비인 초전도한류기가 계통에 연계될 경우, 계통 신뢰도를 평가하기 위해서는 먼저 기존 보호설비 신뢰도의 변화를 평가할 필요가 있다.

3.1 고장 전류에 따른 보호설비의 고장 확률

보호설비의 고장 전류에 따른 고장 확률을 평가하기 위해 다음과 같은 조건부 확률을 정의할 수 있다.

$$\Pr(F_j | I_j^{Fi}) = \frac{\Pr(F_j \cap I_j^{Fi})}{\Pr(I_j^{Fi})} \quad (2)$$

이 때, 보호설비 j 에 흐르는 단위 고장 전류 i 의 크기를 I_j^{Fi} 로 나타내고, 보호설비 j 의 고장을 사건 F_j 로 정의한다. 따라서, 고장 전류에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function: PDF)와 보호설비 j 의 고장 전류에 따른 고장확률 함수를 정의할 수 있다.

보호설비 j 의 고장에 대한 최저, 최대 문턱값을 다음과 같이 정의한다.

$$I_j^{F, \min} = I_j^{Fi} \Big|_{i = \text{Max} \{ i \mid \Pr(F_j | I_j^{Fi}) = 0 \}} \quad (3)$$

$$I_j^{F, \max} = I_j^{Fi} \Big|_{i = \text{Min} \{ i \mid \Pr(F_j | I_j^{Fi}) = 1 \}} \quad (4)$$

즉, 보호설비 j 는 고장 전류 크기가 $I_j^{F, \min}$ 보다 작을 경우 고장없이 동작하지만, 고장 전류가 $I_j^{F, \max}$ 이상 흐를 경우 반드시 고장이 발생하는 것을 의미한다. 또한, $I_j^{F, \text{rating}}$ 은 보호설비 정격을 나타낸다. 따라서 보호설비 j 의 고장 확률은 Total Probability Theorem을 적용하여, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr(F_j) = \sum_{i=1}^N \Pr(I_j^{Fi}) \Pr(F_j | I_j^{Fi}) \quad (5)$$

위의 과정을 그림으로 도식하면 다음과 같다.

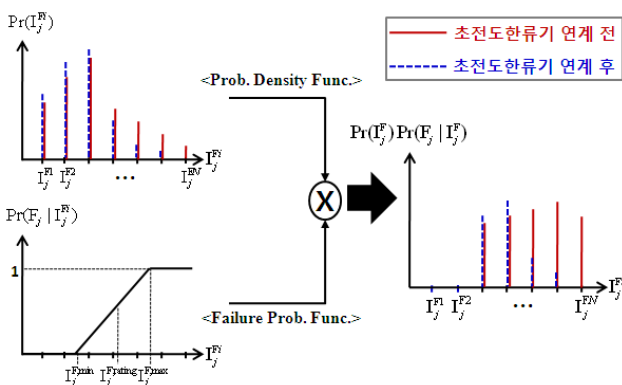


그림 4 보호 설비의 고장확률 계산 과정

Fig. 4 The process for failure probability of a protection device

식 (5)의 discrete한 고장 전류에 대한 보호설비 j 의 고장 확률을 continuous한 고장 전류에 대해서 다시 표현하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\Pr(F_j) = \int_0^{\infty} \Pr(I_j^F) \Pr(F_j | I_j^F) dI_j^F \quad (6)$$

초전도한류기가 계통에 연계될 경우, 계통 내 고장으로 인해 발생하는 고장 전류가 초전도한류기 연계 이전과 비교해서 저감되는 효과를 기대할 수 있다. 따라서, 설비 j 에 유입되는 고장 전류의 PDF가 고장 전류가 비교적 작은 쪽으로 이동하게 되며, 이로 인해 설비 j 의 고장 확률이 감소하게 된다.

3.2 보호설비의 신뢰도

보호설비에 고장을 유발하는 원인으로는 고장 전류, 마모, 아크 등을 들 수 있다. 각 고장 원인을 서로 독립적이라고 가정할 때, 보호설비 j 에 대한 고장율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{0,j} = \lambda_{0,j}^{\text{fault current}} + \lambda_{0,j}^{\text{degraded operation}} + \lambda_{0,j}^{\text{worn}} + \lambda_{0,j}^{\text{arcing}} \dots \quad (7)$$

여기서 0은 초전도한류기가 계통에 설치되기 이전의 상태를 의미한다.

계통 내에 초전도한류기를 설치할 경우, 그 설치 위치에 따라 계통 설비에 유입되는 고장 전류의 저감량이 상이하다. 따라서, 인근 보호설비의 고장을 또한 초전도한류기의 설치 위치에 영향을 받게 된다. 초전도한류기를 계통에 연계하기 이전과 선로 k 에 초전도한류기를 설치했을 경우, 고장 전류에 의한 보호설비 j 의 고장 확률은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\Pr(F_{0,j}) = \int_0^{\infty} \Pr(I_{0,j}^F) \Pr(F_{0,j} | I_{0,j}^F) dI_{0,j}^F \quad (8)$$

$$\Pr(F_{k,j}) = \int_0^{\infty} \Pr(I_{k,j}^F) \Pr(F_{k,j} | I_{k,j}^F) dI_{k,j}^F \quad (9)$$

보호설비의 고장을 유발하는 다양한 원인 중 고장 전류에 의한 보호설비 j 의 고장에 대한 개선율은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\eta_{k,j} = 1 - \Pr(F_{k,j}) / \Pr(F_{0,j}) \quad (10)$$

따라서, 초전도한류기의 설치 위치에 따른 보호설비 j 의 고장율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{k,j} = \lambda_{0,j} - \lambda_{0,j}^{\text{fault current}} \cdot \eta_{k,j} \quad (11)$$

4. 사례 연구

Case 1은 다른 사례에 대한 비교사례로서, 초전도한류기가 연계되기 이전의 배전계통에 대해서 모의하였다. Case 2와 3은 초전도한류기가 연계된 계통을 의미한다. 이 중 Case 2는 이상적인 동작특성 즉, 동작 성공 확률이 1인 초

전도한류기 모델을 적용하였고, Case 3은 본 논문에서 제안한 신뢰도 모델을 적용하였다. 다음 그림은 사례연구 계통을 나타낸다.

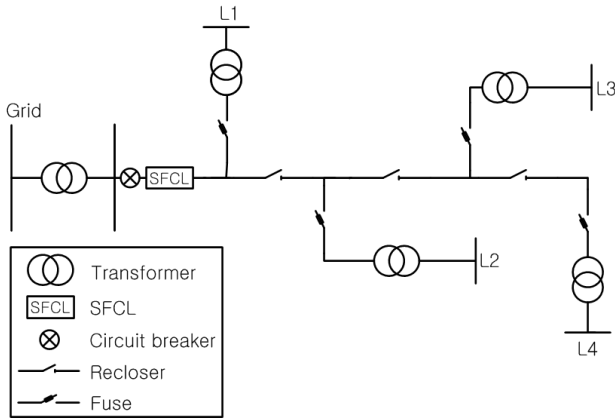


그림 5 사례연구 계통
Fig. 5 Case study system

일반적으로 초전도한류기는 변압기 2차측, 모선 또는 주급전선에 설치한다. 이는 전력이 송전계통망을 통해 배전계통으로 전송되는 구조에 기인한 결과이다. 본 논문에서는 초전도한류기를 주급전선의 circuit breaker 연계 지점에 설치하였다.

본 논문의 사례연구를 수행하기 위한 설비 신뢰도 데이터 및 수용가 정보는 다음과 같다.

표 2 사례계통 신뢰도 파라미터

Table 2 Reliability parameters for system of Fig. 5

설비 구분	설비 번호	길이 [km]	고장율 [f/km yr]	수리시간 [hour]
Feeder	1	2	0.1	4
	2	1		
	3	3		
	4	2		
Lateral	a	1	0.2	2
	b	3		
	c	2		
	d	1		

표 3 보호설비 신뢰도

Table 3 Reliability of protection devices

설비	동작 확률	수리시간 [hour]	스위칭 시간 [hour]
Circuit Breaker	0.9	1	
Recloser	0.9	1	0.01
Fuse	0.9	0.5	

표 4 수용가 정보

Table 4 Customer Data

부하 번호	수용가 수	평균 부하량 [kW]
L1	1000	5000
L2	800	4000
L3	700	3000
L4	500	2000
합계	3000	14000

초전도한류기가 연계되기 이전의 배전계통(Case 1) 신뢰도 결과는 다음 표와 같다.

표 5 Case 1: 배전계통 신뢰도 지수

Table 5 Case 1: Distribution reliability index

SAIFI	SAIDI	CAIDI	ENS
1.25800	2.66510	2.11852	36462

초전도한류기의 상태 S에 있을 확률은 0.9, 인근 보호설비의 고장 개선율은 0.3이라고 가정하였다. Case 1~3의 배전계통 신뢰도를 비교하면 다음 그림과 같다.

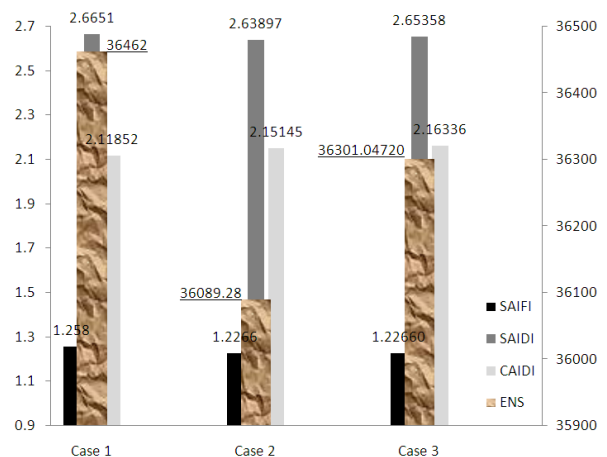


그림 6 Case 1,2,3 배전계통 신뢰도

Fig. 6 Distribution reliability index of Case 1,2,3

초전도한류기 설치 전/후에 SAIFI는 상대적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고장 전류 저감에 따라 계통 설비 신뢰도가 상승하기 때문이다. 또한, 이상적인 초전도한류기의 동작 특성을 반영한 경우(Case 2)가 배전계통 신뢰도 측면에서 가장 높게 평가된다. 반면에 실제적인 초전도한류기 신뢰도 모델(Case 3)을 적용할 경우는 이에 비해 다소 배전계통 신뢰도가 낮게 평가된다. 그러나 초전도한류기가 연계되기 이전에 비해서는 향상되는 것을 확인할 수 있다. 초전도한류기 계통 연계에 따른 보호설비 고장 개선율에 대해서 Case 1~3의 SAIFI(System Average Interruption Frequency Index), SAIDI(System Average Interruption Duration Index), CAIDI(Customer Average Interruption Duration Index), ENS(Energy Not Supplied index)를 도식

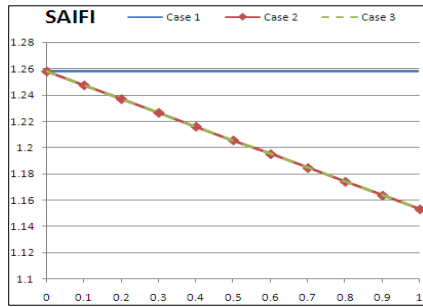


그림 7 Case 1,2,3: SAIFI
Fig. 7 Case 1,2,3: SAIFI

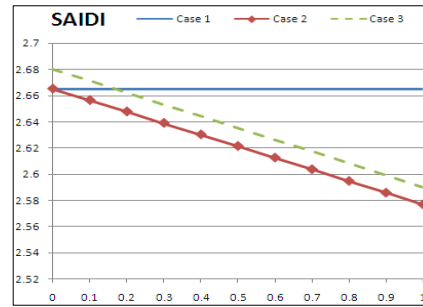


그림 8 Case 1,2,3: SAIDI
Fig. 8 Case 1,2,3: SAIDI

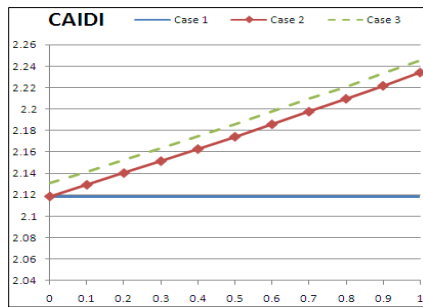


그림 9 Case 1,2,3: CAIDI
Fig. 9 Case 1,2,3: CAIDI

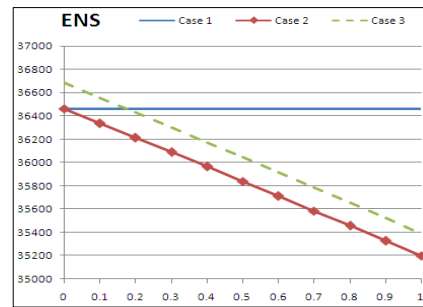


그림 10 Case 1,2,3: ENS
Fig. 10 Case 1,2,3: ENS

하면 그림 7~10와 같으며, 가로축은 인근 보호설비의 고장 개선율을 의미한다.

Case 2와 3의 SAIFI는 동일한 곡선이다. 이는 초전도한류기 자체의 고장은 계통 고장으로 인해 고장 전류가 증가할 때만 발생하는데 기인한다. 또한 Case 2와 3의 SAIFI, SAIDI, ENS는 Case 1과 비교해서 우하향하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 인근 보호설비의 고장율이 개선될수록 배전계통 신뢰도가 향상되는 것을 의미한다. 반면, CAIDI가 우상향하는 이유는 SAIFI의 감소폭에 비해 SAIDI의 감소폭이 작기 때문이다.

본 논문에서 제안한 초전도한류기 신뢰도 모델을 적용할 경우(Case 3), 보호설비 고장 개선율이 0.17이하일 때는 기존의 초전도한류기가 연계되기 이전 계통(Case 1)보다 SAIDI, ENS가 악화되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 보호설비 고장 개선율이 0.17을 초과한다면, 배전계통 신뢰도는 전반적으로 향상된다.

5. 결 론

본 논문은 초전도체의 특성을 이용한 다양한 전력 설비 중, 최근 실용화에 이른 초전도한류기의 신뢰도 모델을 제안하였다. 이는 초전도한류기가 연계된 배전계통의 신뢰도를 정확히 평가하기 위한 과정이다. 또한 초전도한류기 연계에 따른 인근 보호설비의 고장 개선율을 고려함으로써, 초전도한류기를 통한 고장 전류 저감뿐 아니라 설비 신뢰도 및 배전계통 신뢰도에 미치는 영향을 분석하였다.

계통에 신규 설비가 직렬로 연계될 경우, 계통 신뢰도는

연계 이전과 비교해서 일반적으로 악화된다. 그러나 사례연구 결과를 통해서도 알 수 있듯이, 초전도한류기의 계통 연계는 인근 보호설비의 고장율을 개선함으로써, 실제 계통의 신뢰도를 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구는 향후, 하이브리드형 초전도한류기의 신뢰도 모델을 적용한 계통 신뢰도 해석 이론에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-38) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 김성열, 김육원, 배인수, 김진오, "신뢰도 민감도 지수를 이용한 복합배전계통 내 초전도한류기의 최적 위치에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회 논문지, 제24권, 제6호, pp.52-59, 2010.6
- [2] 박동근, 석복열, 고태국, 강형구, "배전급 초전도한류기 및 전력 IT 응용을 위한 실시간 모니터링 시스템 개발", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제57권, 제3호, pp.398-402, 2008.3
- [3] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "비대칭 고장 전류에 따른 초전도 한류기 동작 분석", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제58권, 제3호, pp.450-454, 2009.3
- [4] 고운태, 서훈철, 이상봉, 김철환, 김재철, 현옥배,

"Carrier 신호를 이용한 배전계통의 새로운 재폐로 방식", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제58권, 제11호, pp.2115-2121, 2009.11

- [5] 오금곤, 조용선, 최효상, 오성보, 김덕구, "전력계통의 지락사고에 대한 매트릭스형 초전도 한류기의 동작특성", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제23권, 제10호, pp.14-20, 2009.10
- [6] 유일경, 김진석, 김명후, 김재철, 임성훈, "모의배전계통에 초전도한류기의 도입위치에 따른 전류제한 특성", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제23권, 제12호, pp.90-95, 2009.12
- [7] 홍원표, 김용학, "유도형과 저항형 초전도한류기의 파라메타를 고려한 전력계통도입효과의 분석 및 성능평가에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, 제16권, 제3호, pp.74-83, 2002.5
- [8] 이상봉, 김철환, 김규호, 김재철, 현옥배, "배전계통 초전도 한류기 동작특성에 따른 계통 영향 분석", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제57권, 제7호, pp.1135-1140, 2008.7
- [9] Haghifam, M.R.; Ghaderi, A.; Abapour, M.; "Enhancement circuit breaker reliability by using fault current limiter" Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE pp 1 - 5, 2009

저 자 소 개



김 성 열 (金 成 烈)

1980년 3월 23일생. 2007년 2월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2009년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중



김 옥 원 (金 旭 源)

1981년 6월 6일생. 2008년 8월 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중



김 진 오 (金 鎭 吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수