

초전도한류기의 신뢰도 모델에 관한 연구

배인수, 김형주, 이상교\*, 김진오\*\*  
강원대\*, 한양대\*\*

A Study on the Reliability Model of Superconducting Fault Current Limiter

In-Su Bae, Hyoung-Ju Kim, Sang-Kyo Lee\*, Jin-O Kim\*\*  
Kangwon National University\*, Hanyang University\*\*

**Abstract** - 초전도한류기(SFCL)는 고장전류에 대한 초고속 감지, 고장전류 제한이 가능하고, 정상계통에서는 무손실 운영이 가능한 신개념의 기기이다. 공급신뢰도 측면에서 SFCL은, 고장전류 저감으로 송전을 지속할 수 있는 장점이 있는 반면, 기존 계통에 직렬연결되므로 자체 고장으로 인해 공급신뢰도를 악화시킬 수도 있다. 특히, 고속스위치를 필요로 하는 하이브리드형 SFCL의 경우 계통연계 이전에 SFCL 자체의 신뢰성이나 주위 계통에 미치는 영향을 미리 검토해야 한다. 본 논문에서는 SFCL의 신뢰도 데이터를 계산하는 기법과 SFCL 인근 설비의 신뢰도 데이터를 갱신하는 방법에 대해 제시하였으며, 이는 SFCL이 연계된 배전계통의 수용가 공급신뢰도를 산출하기 위해 필요한 사전단계에 해당한다.

1. 서 론

배전계통의 저임피던스화와 분산전원의 도입 확산으로 인한 고장전류 문제를 해결하기 위해 보호설비 용량증대, 직렬 리액터 적용, 고임피던스 변압기 채용 등의 방안이 검토되고 있으나, 기술적·경제적인 측면을 고려해볼 때 초전도한류기(SFCL)가 그 대안이 될 수 있다. SFCL은 초전도체에 과전류가 흐를 때만 저항이 발생하는 개념을 응용한 신개념의 계통설비로서, 별도의 부가장치 없이 고장전류에 대한 초고속 감지가 가능하고 켜지되면서 발생하는 고임피던스를 통해 고장전류를 제한한다. 또한, 고장전류가 유입되지 않는 정상계통에서 SFCL은 임피던스 0 인 상태를 유지하므로 계통에 영향을 주지 않는 무손실 운영이 가능하다는 특징이 있다[1].

SFCL 도입을 위해서는, SFCL의 가격 경쟁력 및 보호협조와 같은 문제점 외에도 신뢰도 측면에서의 접근이 필요하다. SFCL의 충분한 고장전류 저감으로 송전을 지속할 수 있는 경우 수용가의 공급신뢰도를 개선할 수 있지만, 새롭게 시도되는 복잡한 설비가 기존 계통에 직렬형태로 삽입되므로 신뢰도를 오히려 악화시킬 수도 있다. 또한, SFCL 구조에 따라 초전도체 외에 별도의 부가설비를 필요로 하는 경우, SFCL 자신의 신뢰성이나 주위 계통에 미치는 영향은 SFCL 계통연계 이전에 미리 검토할 필요가 있다.

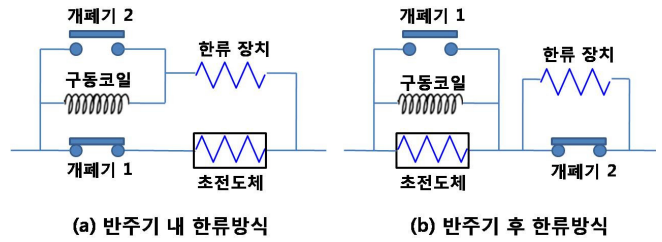
SFCL이 연계된 배전계통의 공급신뢰도를 해석하기 위해서는 기존 계통설비의 신뢰도 데이터(고장률, 수리율) 외에도 SFCL의 신뢰도 데이터가 필요하다. 또한 SFCL의 연계로 인해 인근 설비의 신뢰도 데이터가 바뀔 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 본 논문에서는, 여러 SFCL 구조에 따라 SFCL 자체의 신뢰도 데이터와 인근 설비의 신뢰도 데이터를 계산하는 방법을 제시하며, SFCL의 한류 특성으로 인해 부분 고장을 고려하였다.

2. 본 론

2.1 SFCL 구조

저항형 SFCL은 초전도체가 고장전류 감지와 한류를 동시에 수행하므로 별도의 한류 장치나 스위칭 소자를 필요로 하지 않는 반면, 하이브리드형 SFCL은 초전도체가 고장전류를 감지하면 고속스위치를 통해 한류 장치로 고장전류를 도통시키는 구조다. 하이브리드형 SFCL의 주요 구성요소는 초전도체, 구동코일, 차단기, 한류 장치이며, '반주기 내 한류방식'과 '반주기 후 한류방식'으로 구분하여 두 방식의 스위칭 방식이나 신뢰성은 미묘한 차이를 보인다. 하이브리드형 SFCL의 구조를 간단히 표현하면 그림 1과 같다[2].

저항형 SFCL은 초전도체만으로 구성된 반면, 하이브리드형 SFCL은 기본적으로 2개의 차단기를 사용한다. 그림 1의 상태는 고장전류가 없는 정상계통 상태를 나타낸다. 고장전류가 흐를 경우 단락상태의 차단기는 개방상태로, 개방상태의 차단기는 단락상태로 동작하여, 한류를 수행함과 동시에 초전도체의 회복을 도모한다.



〈그림 1〉 하이브리드형 SFCL 구조

2.2 고속스위치의 신뢰도

선로, 변압기, 발전기 등의 계통설비와 달리 스위칭 소자는 사용 빈도가 매우 낮으므로, 실제 동작이 필요한 상황이 발생하는 경우에만 그 고장을 인지할 수 있다. 따라서, 개폐기나 동작코일 등의 스위칭 소자는 주기적으로 그 고장여부를 점검하여 필요한 상황에서 정상적으로 동작하도록 유지보수를 수행한다. 점검 주기가 짧을수록 스위칭 소자의 동작 실패 확률은 감소하며, 하이브리드형 SFCL의 개폐기, 구동코일의 고장률과 동작실패 확률의 관계는 식 (1)과 같다[3].

$$P_{B1} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} 1 - e^{-\lambda_B t} dt \approx \frac{\lambda_{B1} T_m}{2} \quad (1)$$

$$P_{B2} \approx \frac{\lambda_{B2} T_m}{2}, \quad P_C \approx \frac{\lambda_C T_m}{2}$$

여기서,  $P_{B1}$ ,  $P_{B2}$ ,  $P_C$  는 각각 1번 개폐기, 2번 개폐기, 구동코일의 동작 실패 확률,  $T_m$  은 점검주기[yr],  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$ ,  $\lambda_C$  는 각 스위칭 소자의 고장률[yr]을 말한다.

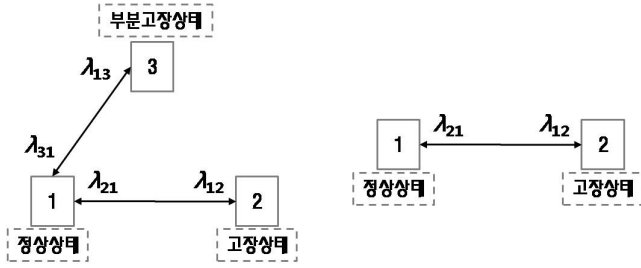
구동코일의 동작실패는 두 개폐기의 동작실패로 귀결되고, 구동코일이 동작에 성공한 경우에는 각 개폐기의 동작실패를 고려해야 한다. 신뢰도 해석에서는 결국 두 개폐기의 동작여부 판별이 중요하므로 각 확률을 계산하면 표 1과 같다.

〈표 1〉 개폐기 동작실패 확률

1번 개폐기	2번 개폐기	확률
동작성공	동작성공	$(1-P_C)(1-P_{B1})(1-P_{B2})$
동작성공	동작실패	$(1-P_C)(1-P_{B1})P_{B2}$
동작실패	동작성공	$(1-P_C)P_{B1}(1-P_{B2})$
동작실패	동작실패	$P_C + (1-P_C)P_{B1}P_{B2}$

2.3 SFCL 신뢰도 모델

고장전류가 SFCL을 도통하고 충분한 한류가 이루어지는 경우 부분적인 송전이 가능하고, 초전도체 고장이나 고속스위치 동작실패의 경우 한류 장치를 통해 부분송전이 가능한 경우도 발생한다. 정상상태, 고장상태 외에 이와 같은 부분고장 상태를 포함한 3-states 모델로 신뢰도를 해석할 때 필요한 SFCL의 신뢰도 데이터는 각 상태 사이의 천이율로 표현되는 고장률과 수리율이다. 3-states 모델의 상태공간은 그림 2(a)와 같으며, SFCL의 신뢰도 데이터를 3-states 기준으로 계산하면 아래와 같다[4].



(a) 3-states 모델 (b) 2-states 모델

〈그림 2〉 신뢰도 모델

① 저항형 SFCL

$$\begin{aligned} \lambda_{SFCL} &= \lambda_{12} = \lambda_{sc} \\ \mu_{SFCL} &= \lambda_{21} = \mu_{sc} \\ \lambda'_{SFCL} &= \lambda_{13} = 0 \\ \mu'_{SFCL} &= \lambda_{31} = 0 \end{aligned}$$

② 하이브리드형 SFCL (반주기 내 한류)

$$\begin{aligned} \lambda_{SFCL} &= \lambda_{12} = \lambda_{sc} \{P_C + (1 - P_C)P_{B2}\} \\ \mu_{SFCL} &= \lambda_{21} = \mu_{sc} \\ \lambda'_{SFCL} &= \lambda_{13} = \lambda_{sc}(1 - P_C)(1 - P_{B2}) \\ \mu'_{SFCL} &= \lambda_{31} = \mu_{sc} \end{aligned}$$

③ 하이브리드형 SFCL (반주기 후 한류)

$$\begin{aligned} \lambda_{SFCL} &= \lambda_{12} = \lambda_{sc} \{P_C + (1 - P_C)P_{B1}\} \\ \mu_{SFCL} &= \lambda_{21} = \mu_{sc} \\ \lambda'_{SFCL} &= \lambda_{13} = \lambda_{sc}(1 - P_C)(1 - P_{B1})(1 - P_{B2}) \\ \mu'_{SFCL} &= \lambda_{31} = \mu_{sc} \end{aligned}$$

여기서,  $\lambda_{SFCL}$ ,  $\mu_{SFCL}$  은 SFCL의 고장률, 수리율,  $\lambda'_{SFCL}$ ,  $\mu'_{SFCL}$  는 SFCL의 부분고장률, 부분수리율을 말한다.  $\lambda_{sc}$ ,  $\mu_{sc}$  는 초전도체의 고장률, 수리율로서 초전도 소자, 연결단자, 냉각장치 등의 고장이 그 원인이 될 수 있다.

위 신뢰도 데이터 값을 살펴보면, 고장률은 SFCL의 구조에 따라 변하지만 수리율(수리시간의 역수)은 모두 동일하게 초전도체의 수리시간에 의해 결정됨을 알 수 있다.

신뢰도 해석에서는 발전기 외에는 그림 2(b)와 같이 2-states 모델을 사용하는 것이 일반적이다. SFCL이 포함된 배전계통의 신뢰도를 해석하는데 있어서 2-states 모델을 사용하는 것은, SFCL의 한류 특성으로 인해 그 정확성은 저해되지만 기존 배전계통 신뢰도 해석기법에 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있다. 위의 3-states 신뢰도 데이터를 2-states 신뢰도 데이터로 변환하는 방식은 다음과 같다.

① 부분고장상태(한류 상태)를 정상상태로 분류할 경우

$$\begin{aligned} \lambda_{SFCL}^{2states} &= \lambda_{SFCL} \\ \mu_{SFCL}^{2states} &= \mu_{sc} \end{aligned}$$

② 부분고장상태를 고장상태로 분류할 경우

$$\begin{aligned} \lambda_{SFCL}^{2states} &= \lambda_{SFCL} + \lambda'_{SFCL} \\ \mu_{SFCL}^{2states} &= \mu_{sc} \end{aligned}$$

#### 2.4 SFCL 인근에 있는 계통설비의 신뢰도 모델

SFCL 자체의 고장은 공급신뢰도를 악화시키지만, 인근 계통설비에서 고장이 발생할 경우 SFCL은 고장전류를 감소시켜 그 고장이 공급신뢰도에 영향을 미치지 않도록 혹은 공급신뢰도가 악화되는 정도를 경감시킨다. 결국, SFCL의 계통연계로 인해 인근 계통설비의 신뢰성은 오히려 향상되는 결과가 도출된다. SFCL이 배전계통에 연계되기 전 인근 계통설비의 고장률과 수리율이 각각  $\lambda_{s1}$ ,  $\mu_{s1}$  라고 가정하면, SFCL의 계통연계로 인해 아래와 같이 신뢰도 데이터가 개선된다.

① 저항형 SFCL 근방의 설비

$$\begin{aligned} \lambda_{s2} &= \lambda_{12} = 0 \\ \mu_{s2} &= \lambda_{21} = 0 \\ \lambda'_{s2} &= \lambda_{13} = \lambda_{s1} \\ \mu'_{s2} &= \lambda_{31} = \mu_{s1} \end{aligned}$$

② 하이브리드형 SFCL (반주기 내 한류) 근방의 설비

$$\begin{aligned} \lambda_{s2} &= \lambda_{12} = \lambda_{s1} [P_C + (1 - P_C) \{P_{B1} + P_{B2} - P_{B1}P_{B2}\}] \\ \mu_{s2} &= \lambda_{21} = \mu_{s1} \\ \lambda'_{s2} &= \lambda_{13} = \lambda_{s1} (1 - P_C) (1 - P_{B1}) (1 - P_{B2}) \\ \mu'_{s2} &= \lambda_{31} = \mu_{s1} \end{aligned}$$

③ 하이브리드형 SFCL (반주기 후 한류) 근방의 설비

$$\begin{aligned} \lambda_{s2} &= \lambda_{12} = \lambda_{s1} [P_C + (1 - P_C) \{P_{B1} + P_{B2} - P_{B1}P_{B2}\}] \\ \mu_{s2} &= \lambda_{21} = \mu_{s1} \\ \lambda'_{s2} &= \lambda_{13} = \lambda_{s1} (1 - P_C) (1 - P_{B1}) (1 - P_{B2}) \\ \mu'_{s2} &= \lambda_{31} = \mu_{s1} \end{aligned}$$

위 신뢰도 데이터 값을 살펴보면, 하이브리드형 SFCL의 경우 반주기 내 한류방식과 반주기 후 한류방식 모두 인근 계통설비의 신뢰도 데이터에 미치는 영향은 동일함을 알 수 있다. 3-states 모델 대신 2-states 모델을 사용할 경우는 SFCL의 신뢰도 데이터와 동일한 방식으로 변환하여 대입한다.

#### 2.5 SFCL 연계계통의 신뢰도 모델

SFCL 계통연계는 공급신뢰도를 향상시킬 수도 있고 악화시킬 수도 있다. 공급신뢰도 변화량을 정확히 산출하기 위해서는 SFCL 연계 전과 연계 후의 공급신뢰도를 실제로 계산하여 비교해야 하지만, SFCL과 인근 계통설비를 하나의 구성요소로 증가화하여 단일 고장률, 수리율로 표현하고 이를 연계 전과 비교하면 정성적인 비교는 가능하다. 또한, 구성요소의 수가 감소하여 신뢰도 해석이 간편해지는 장점도 있다.

SFCL는 직렬형태로 연계되므로, SFCL 연계 후 증가 고장률과 수리율은 한류의 영향을 받는 인근의 모든 계통설비와 SFCL에 대해 식 (2)를 사용하여 산출한다.

$$\begin{aligned} \lambda_e &= \lambda_{SFCL} + \lambda_{s2,1} + \lambda_{s2,2} + \dots \\ \mu_e &= \frac{\lambda_e}{\frac{\lambda_{SFCL}}{\mu_{SFCL}} + \frac{\lambda_{s2,1}}{\mu_{s2,1}} + \frac{\lambda_{s2,2}}{\mu_{s2,2}} + \dots} \end{aligned} \quad (2)$$

#### 3. 결 론

하이브리드형 SFCL은 초전도체의 비유적 문제와 회복특성을 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있지만, 별도의 고속스위치를 필요로 하기에 그 신뢰성과 수용가의 공급신뢰도에 대한 주의가 필요하다. 본 논문에서는 SFCL의 신뢰도 데이터와 SFCL 인근 설비의 신뢰도 데이터를 계산하는 방법에 대해 기술하였으며, 이는 SFCL이 연계된 배전계통의 수용가 공급신뢰도를 산출하기 위해 필요한 사전단계이다. 본 연구에서 제시한 신뢰도 데이터는 기존 신뢰도 평가기법에 그대로 적용할 수 있는 장점이 있는 반면, 수식의 간략화를 위해 많은 가정이 포함되었다. 그렇지만, 차후 정확한 신뢰도 모델링을 위한 기본이론으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

[1] Jiang Yu and etc., "A New Type of Superconducting Fault Current limiter(SFCL)", Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, 2002  
 [2] Lee, B.W. and etc., "Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol 18, no. 2, pp. 624-627, 2008  
 [3] Roy Billinton and etc., "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Plenum Press, 1992  
 [4] Roy Billinton and etc., "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1996