

A Study on the Reliability of Superconducting Fault Current Limiter and Adjacent Distribution Equipments

배인수* · 김성열** · 김진오†
(In-Su Bae · Sung-Yul Kim · Jin-O Kim)

Abstract - This study presents the failure rate and repair rate of Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) and adjacent distribution equipments. When the fault current penetrated SFCL, the supply of electric power to the customers can be partly continued. It is expected that SFCL makes to improve the reliability index of customers. Contrary to the expectations, the series connection between SFCL and distribution system could deteriorate the reliability index. To evaluate the reliability index in the distribution system including SFCL, the failure rate and repair rate of SFCL are required as well as that of distribution equipments. Also, the insertion of SFCL makes to change the failure rate and repair rate of adjacent equipments. This study proposes a method to calculate the failure rate and repair rate of a component combining SFCL and adjacent equipments.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Reliability, Failure rate, Repair rate, Failure of Switch

1. 서론

배전계통의 저임피던스화, 분산전원의 배전계통 연계는 배전계통의 설비용량과 송전손실을 경감시키는 반면, 계통사고시 고장전류가 과도하게 증가하는 단점이 있다. 이와 같은 고장전류 문제를 해결하기 위해 보호설비 용량증대, 직렬 리액터 적용, 고임피던스 변압기 채용 등의 방안이 적용되고 있으며, 최근에는 기술적·경제적인 측면을 고려하여 초전도한류기(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)가 그 대안으로 제시되고 있다. SFCL은 초전도체에 과전류가 흐를 때만 저항값이 증가하는 개념을 응용한 신개념의 계통설비이다. SFCL은 별도의 부가장치 없이 고장전류에 대한 초고속 감지가 가능하고, 켜치되면서 발생하는 고임피던스를 통해 고장전류를 제한한다. 또한 SFCL은 고장전류가 유입되지 않는 정상계통 상태에서 임피던스 0인 상태를 유지하므로, 평상시 계통운영에 영향을 주지 않는 무손실 운영이 가능하다는 특징이 있다[1,2].

계통사고로 인한 고장전류가 SFCL을 도통하는 경우, 고장전류는 저감되고 수용가에 대한 전력공급은 부분적으로 지속할 수 있다[3]. 따라서 SFCL에 의해 수용가의 공급신뢰도가 향상될 것으로 예상할 수 있지만, 새롭게 도입되는 복잡하고 정교한 설비가 기존 계통에 직렬형태로 삽입되므로 공급신뢰도를 오히려 악화시킬 여지도 있다. 또한 설치되는

SFCL의 구조에 따라 초전도체 외에 별도의 부가설비를 필요로 하는 경우, 공급신뢰도가 향상될지 악화될지를 판단하는 문제는 객관적인 신뢰도 모델과 정량적인 공급신뢰도 비교평가를 필요로 한다.

SFCL이 연계된 배전계통에서 수용가의 공급신뢰도를 산출하기 위해서는 기존 계통설비의 신뢰도 데이터(고장률, 수리율) 외에도 SFCL의 신뢰도 데이터가 필요하다[4]. 또한 SFCL의 연계로 인해 인근 배전설비의 신뢰도 데이터가 변동될 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 본 논문에서는 세 가지 SFCL 구조에 따라 SFCL의 신뢰도 데이터와 인근 설비의 신뢰도 데이터를 산출하는 기법을 제시하였으며, SFCL과 인근 설비를 단일요소로 등가화하여 신뢰도 해석에 활용하는 방법에 대해 논하였다. 또한 SFCL의 한류 특성으로 인해, 부분고장에 관한 고장률, 수리율의 개념을 도입하여 기존 신뢰도 해석에서 주로 사용하던 2-states 모델을 부분고장까지 고려하는 3-states 모델로 확장하였다.

2. 본론

2.1 SFCL 구조

저항형 SFCL은 초전도체가 고장전류에 대한 감지와 한류를 동시에 수행하므로 별도의 한류 장치나 스위칭 소자가 필요하지 않은 구조이다. 반면 하이브리드형 SFCL은, 초전도체가 고장전류를 감지하면 고속스위치를 통해 한류 장치로 고장전류를 도통시키는 구조다. 하이브리드형 SFCL의 주요 구성품으로는 초전도체, 구동코일, 개폐기, 한류장치가 있고, 고장전류가 유입된 시점에서부터 한류를 시작하는 타임에 따라 (1/120)[sec]를 기준으로 ‘반주기 내 한류방식’과 ‘반주기 후 한류방식’으로 구분한다. 두 방식의 내부구조

† 교신저자, 정희원 : 한양대 전기생체공학부 교수 · 공박
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

* 정희원 : 강원대 전기제어공학부 전임강사 · 공박

** 정희원 : 한양대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2009년 7월 1일

최종완료 : 2009년 10월 6일

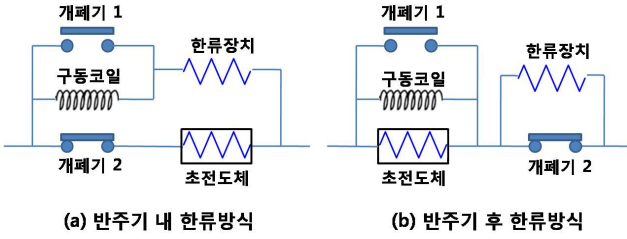


그림 1 하이브리드형 SFCL 구조
Fig. 1 Structure of hybrid SFCL

와 스위칭 순서는 미묘한 차이를 보이며, 이를 간단히 표현하면 그림 1과 같다[5,6].

저항형 SFCL은 초전도체로만 구성된 반면, 하이브리드형 SFCL는 기본적으로 2개의 개폐기를 사용한다. 그림 1은 대표적으로 고장전류가 없는 정상계통 상태를 나타내고 있다. 고장전류가 흐를 경우에는 단락상태의 개폐기는 개방상태로 개방상태의 개폐기는 단락상태로 동작하여, 한류장치는 고장전류에 대한 한류를 수행하고 초전도체는 재투입을 위한 회복을 도모한다.

2.2 고속스위치의 신뢰도

선로, 변압기, 발전기 등의 일반적인 계통설비와는 달리, 스위칭 소자는 사용 빈도수가 매우 낮으므로 실제 동작이 요구되는 상황에서만 그 고장을 인지할 수 있다. 따라서 개폐기나 구동코일 같은 스위칭 소자는, 주기적으로 그 고장여부를 점검하여 동작이 필요한 상황에서 정상적으로 개폐동작을 수행할 수 있도록 운영해야 한다. 즉, 점검주기가 짧을수록 스위칭 소자의 동작실패 확률은 감소한다.

개폐기, 구동코일의 고장률, 점검주기와 동작실패 확률의 관계는 식 (1)과 같다[7].

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

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

여기서, P_{B1} , P_{B2} , P_C 는 각각 1번 개폐기, 2번 개폐기, 구동코일의 동작실패 확률, T_m 은 점검주기[yr], λ_{B1} , λ_{B2} , λ_C 는 각 스위칭 소자의 고장률[f/yr]을 말한다.

구동코일의 동작실패는 두 개폐기의 동작실패로 귀결되고, 구동코일이 동작에 성공한 경우에만 각 개폐기의 동작실패를 고려한다. 신뢰도 해석에서는 결국 두 개폐기의 동작여부를 판별하는 것만 필요하므로 각 확률을 계산하면 표 1과 같다.

표 1 개폐기 동작실패 확률
Table 1 Probability of failing to operate switch

1번 개폐기	2번 개폐기	확률
동작 성공	동작 성공	$(1-P_C)(1-P_{B1})(1-P_{B2})$
동작 성공	동작 실패	$(1-P_C)(1-P_{B1})P_{B2}$
동작 실패	동작 성공	$(1-P_C)P_{B1}(1-P_{B2})$
동작 실패	동작 실패	$P_C + (1-P_C)P_{B1}P_{B2}$

2.3 SFCL의 신뢰도

SFCL의 구조상, 한류장치는 저항이나 인덕터의 간단한 구조이므로 그 고장은 없다고 가정하고 초전도체의 고장만 고려한다. 저항형 SFCL은 초전도체에서 고장이 발생할 경우 부분송전도 불가능하지만, 하이브리드형 SFCL은 초전도체 외에 한류장치를 통한 부분송전이 가능하다. 물론 하이브리드형 SFCL의 부분송전은 개폐기의 동작여부에 영향을 받는다.

그림 2(a)와 같이 정상상태, 고장상태로 구성된 2-states 모델에 부분고장상태를 포함하면 그림 2(b)와 같이 3-states 모델로 상태공간을 구성할 수 있다. 2-states에서는 2개의 천이율이 각각 고장률, 수리율을 의미한다.

수용가 공급신뢰도를 해석할 때 필요한 SFCL의 신뢰도 데이터는, 2-states의 경우 고장률, 수리율이고 3-states의 경우 고장률, 수리율, 부분고장률, 부분수리율이다. 우선, SFCL의 신뢰도 데이터를 3-states 모델 기준으로 계산하면 SFCL의 세 가지 구조에 따라 식 (2)~(4)와 같다[8].

① 저항형 SFCL

$$\lambda_{SFCL} = \lambda_{12} = \lambda_{sc} \quad (2)$$

$$\mu_{SFCL} = \lambda_{21} = \mu_{sc}$$

$$\lambda'_{SFCL} = \lambda_{13} = 0$$

$$\mu'_{SFCL} = \lambda_{31} = \mu_{sc}$$

② 하이브리드형 SFCL(반주기 내 한류)

$$\lambda_{SFCL} = \lambda_{12} = \lambda_{sc}\{P_C + (1-P_C)P_{B1}\} \quad (3)$$

$$\mu_{SFCL} = \lambda_{21} = \mu_{sc}$$

$$\lambda'_{SFCL} = \lambda_{13} = \lambda_{sc}(1-P_C)(1-P_{B1})$$

$$\mu'_{SFCL} = \lambda_{31} = \mu_{sc}$$

③ 하이브리드형 SFCL(반주기 후 한류)

$$\lambda_{SFCL} = \lambda_{12} = \lambda_{sc}\{P_C + (1-P_C)P_{B1}\} \quad (4)$$

$$\mu_{SFCL} = \lambda_{21} = \mu_{sc}$$

$$\lambda'_{SFCL} = \lambda_{13} = \lambda_{sc}(1-P_C)(1-P_{B1})(1-P_{B2})$$

$$\mu'_{SFCL} = \lambda_{31} = \mu_{sc}$$

여기서, λ_{SFCL} , μ_{SFCL} 은 SFCL의 고장률, 수리율, λ'_{SFCL} , μ'_{SFCL} 는 SFCL의 부분고장률, 부분수리율, λ_{sc} , μ_{sc} 는 초전도체의 고장률, 수리율이다.

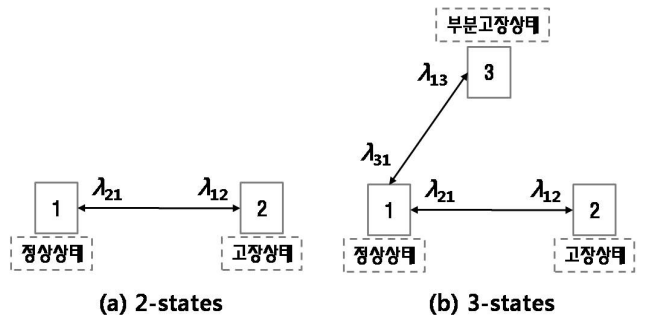


그림 2 상태공간 다이어그램
Fig. 2 State space diagram

식 (2)~(4)의 SFCL 신뢰도 데이터를 살펴보면, 고장률은 SFCL의 구조에 따라 변동하지만 수리율(= 수리시간의 역수)은 모두 초전도체의 수리율과 동일하다.

신뢰도 해석에서는 발전기 외에는 그림 2(a)의 2-states 모델을 주로 사용한다. SFCL이 포함된 배전계통의 공급신뢰도를 산출하는데 있어서 2-states 모델을 사용하는 것은, SFCL의 한류 특성으로 인해 그 정확성은 저해되지만 기존 신뢰도 해석기법에 간단히 적용할 수 있다는 장점이 있다. 위의 3-states 신뢰도 데이터를 2-states 신뢰도 데이터로 변환하는 방식은 식 (5)~(7)과 같이 세 종류가 있으며, 신뢰도 평가자의 관점에 따라 선택할 수 있다.

① 부분고장상태를 정상상태로 분류할 경우

$$\lambda_{SFCL}(2) = \lambda_{SFCL}(3) \quad (5)$$

$$\mu_{SFCL}(2) = \mu_{sc}$$

② 부분고장상태를 고장상태로 분류할 경우

$$\lambda_{SFCL}(2) = \lambda_{SFCL}(3) + \lambda'_{SFCL}(3) \quad (6)$$

$$\mu_{SFCL}(2) = \mu_{sc}$$

③ 가중치로 결합

$$\lambda_{SFCL}(2) = \lambda_{SFCL}(3) + W_{partial} \times \lambda'_{SFCL}(3) \quad (7)$$

$$\mu_{SFCL}(2) = \mu_{sc}$$

여기서, $W_{partial}$ 은 부분고장률의 가중치이고, 변수 우측의 (2), (3)은 각각 그 변수가 2-states, 3-states의 값을 의미한다.

2.4 인근 배전설비의 신뢰도

SFCL의 고장은 공급신뢰도를 악화시키지만, 고장전류가 SFCL를 도통하면서 한류가 이루어지는 경우에는 부분적인 전력공급이 가능하다. 즉, 인근 설비에서 고장이 발생할 경우 SFCL은 고장전류를 감소시켜 그 고장이 공급신뢰도에 영향을 미치지 않도록 혹은 공급신뢰도가 악화되는 정도를 부분적으로 경감시킨다. 결국 SFCL의 계통연계로 인해 인근 배전설비의 신뢰도 데이터는 오히려 향상되는 것과 동일하다.

여기서 인근 설비라 함은, 그 설비의 고장으로 인한 고장 전류가 SFCL을 도통하여 흐르는 배전설비를 말한다. 따라서 단방향 조류의 배전계통에서 SFCL과 바로 연결된 양측 배전선로의 경우, 전원측 방향의 배전선로는 인근 배전설비에 해당하지 않는다.

SFCL이 배전계통에 연계되기 전 인근 설비의 고장률과 수리율이 각각 λ_{s1} , μ_{s1} 라고 하면, SFCL가 연계된 경우는 3-states 모델 기준으로 식 (8)~(10)과 같이 신뢰도 데이터를 변경하여 신뢰도 해석기법에 적용한다.

① 저항형 SFCL 근방의 배전설비

$$\lambda_{s2} = \lambda_{12} = 0 \quad (8)$$

$$\mu_{s2} = \lambda_{21} = \mu_{s1}$$

$$\lambda'_{s2} = \lambda_{13} = \lambda_{s1}$$

$$\mu'_{s2} = \lambda_{31} = \mu_{s1}$$

② 하이브리드형 SFCL(반주기 내 한류) 근방의 배전설비

$$\lambda_{s2} = \lambda_{12} = \lambda_{s1} [P_C + (1 - P_C)P_{B1}] \quad (9)$$

$$\mu_{s2} = \lambda_{21} = \mu_{s1}$$

$$\lambda'_{s2} = \lambda_{13} = \lambda_{s1}(1 - P_C)(1 - P_{B2})$$

$$\mu'_{s2} = \lambda_{31} = \mu_{s1}$$

③ 하이브리드형 SFCL(반주기 후 한류) 근방의 배전설비

$$\lambda_{s2} = \lambda_{12} = \lambda_{s1} \left[P_C + (1 - P_C) \times \{P_{B1} + P_{B2} - P_{B1}P_{B2}\} \right] \quad (10)$$

$$\mu_{s2} = \lambda_{21} = \mu_{s1}$$

$$\lambda'_{s2} = \lambda_{13} = \lambda_{s1}(1 - P_C)(1 - P_{B1})(1 - P_{B2})$$

$$\mu'_{s2} = \lambda_{31} = \mu_{s1}$$

3-states 모델 대신 2-states 모델을 사용할 경우는 식 (5)~(7)과 동일한 방식으로 변환하여 대입한다.

2.5 SFCL 연계계통의 신뢰도

SFCL의 계통연계는 수용가에 대한 공급신뢰도를 향상시킬 수도 있고 악화시킬 수도 있다. 공급신뢰도 변화를 정확히 산출하기 위해서는 SFCL 연계 전과 연계 후의 공급신뢰도를 실제로 산출하여 비교해야 한다. 그렇지만 SFCL과 인접 설비를 그림 3과 같이 하나의 구성요소로 등가화하면, 단일 고장률, 단일 수리율로 표현하고 이를 연계 전과 비교하여 정성적인 평가가 가능하다. 또한, 단일 구성요소로의 축약은 구성요소의 수를 감소시켜 신뢰도 해석이 간편해지는 장점도 있다.

SFCL은 그림 3과 같이 직렬형태로 기존 배전계통에 삽입되므로, SFCL 연계 후 축약된 단일 구성요소의 고장률과 수리율은 2-states, 3-states(부분고장률, 부분수리율도 동일) 모두 식 (11)을 사용하여 산출한다.

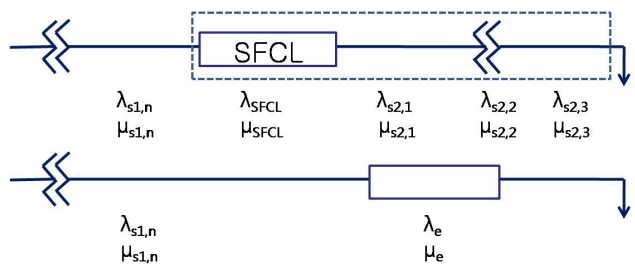


그림 3 단일 구성요소로 축약
Fig. 3 A combination of system components

$$\lambda_e = \lambda_{SFCL} + \lambda_{s2,1} + \lambda_{s2,2} + \dots \quad (11)$$

$$\mu_e = \frac{\lambda_e}{\frac{\lambda_{SFCL}}{\mu_{SFCL}} + \frac{\lambda_{s2,1}}{\mu_{s2,1}} + \frac{\lambda_{s2,2}}{\mu_{s2,2}} + \dots}$$

3. 사례 연구

3.1 3-states 신뢰도 데이터

간단한 사례연구를 위해 SFCL 1기와 인근 배전선로 1회선만 고려하였다. 개폐기와 구동코일은 평균 20년에 1번, 초전도체는 10년에 1번, 인근 배전선로는 2년에 1번 고장이 발생한다고 가정한다. 스위칭 소자는 6개월에 1번씩 점검하고, 고장시 초전도체의 수리시간은 4시간, 인근 배전선로의 수리시간은 2시간이다. 이를 정리하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{B1} &= \lambda_{B2} = \lambda_C = 0.05 [f/yr] \\ T_m &= 0.5 [yr] \\ \lambda_{sc} &= 0.1 [f/yr] \\ \mu_{sc} &= 2190 [f/yr] \\ \lambda_{s1} &= 0.5 [f/yr] \\ \mu_{s1} &= 4380 [f/yr] \end{aligned} \quad (12)$$

3-states 모델을 기준으로 세 가지 구조에 따라 SFCL 신뢰도 데이터를 구하면 표 2와 같으며, 인근 배전선로의 변경되는 신뢰도 데이터는 표 3과 같다.

표 2 SFCL의 신뢰도

Table 2 Reliability of SFCL

[f/yr]	저항형	하이브리드형 (반주기 내)	하이브리드형 (반주기 후)
고장률	0.1	0.002484	0.002484
수리율	2190	2190	2190
부분고장률	0	0.097516	0.096297
부분수리율	2190	2190	2190

표 3 인근 배전설비의 신뢰도

Table 3 Reliability of adjacent equipments

[f/yr]	저항형	반주기 내	반주기 후
고장률	0	0.012422	0.018517
수리율	4380	4380	4380
부분고장률	0.5	0.487578	0.481483
부분수리율	4380	4380	4380

표 2에 따르면, 저항형 SFCL에 비해 하이브리드형 SFCL은 고장률이 낮은 대신 부분고장률은 높은 것을 알 수 있다. 저항형 SFCL의 고장률은 초전도체 고장률 0.1[f/yr]과 완전히 동일한 반면, 하이브리드형 SFCL은 초전도체의 고장을 부분고장으로 전환시킬 수 있는 구조이다.

배전설비의 용량이 충분하여 부분고장상태에서도 수용가에 대한 전력공급에 지장이 없는 계통의 경우, 하이브리드형 SFCL의 초전도체 고장은 무시할 수 있는 수준이다. 반면, 배전설비의 용량에 여유가 없는 경우, 저항형 SFCL이나 하이브리드형 SFCL이나 공급신뢰도 측면에서는 별반 차이가 없다.

SFCL이 연계되기 전 인근 배전선로의 고장률이 0.5[f/yr]인 것과 표 3을 비교하면, SFCL이 연계된 후 대부분 부분

고장으로 전환된 것을 알 수 있다. 저항형 SFCL의 경우 인근 배전설비의 고장을 완벽히 부분고장으로 전환시킨다. 반면 하이브리드형 SFCL은 고속스위치 동작실패로 인해, 반주기 내 한류방식은 약 2.5%, 반주기 후 한류방식은 약 3.7%의 설비고장에 대해 제대로 한류를 수행하지 못한다.

고장률 0.5[f/yr], 수리율 4380[f/yr]인 배전선로와 고장률 0.1[f/yr], 수리율 2190[f/yr]인 SFCL을 하나의 구성요소로 결합할 경우 신뢰도 데이터는 표 4와 같다.

표 4 결합 구성요소의 신뢰도

Table 4 Reliability of combined component

[f/yr]	저항형	반주기 내	반주기 후
고장률	0.1	0.014906	0.021001
수리율	2190	3754.36	3916.73
부분고장률	0.5	0.585094	0.577780
부분수리율	4380	3754.28	3754.28

저항형에 비해 하이브리드형이 공급신뢰도 측면에서 유리하며, 하이브리드형 중에서도 반주기 내 한류방식이 더 좋은 신뢰도 데이터를 갖는다. 반면 수리율의 역수인 평균 고장시간에 있어서는, 반주기 후 한류방식이 약 0.1시간 더 짧다.

3.2 점검주기에 따른 3-states 신뢰도 데이터

표 2~4는 점검주기 6개월에 해당하는 결과이다. 평균 20년에 1번 고장이 발생하는 스위칭 소자에 대해 0 부터 최대 10년까지 점검주기의 변화에 따른 신뢰도 데이터를 그래프로 표현하면 그림 4, 5와 같다.

그림 4의 SFCL 고장률 중 반주기 내 한류방식과 반주기 후 한류방식의 곡선은 서로 동일하므로, 그래프에 두 곡선은 서로 겹쳐서 하나의 그래프로 보이고 있다. 또한, 저항형 SFCL은 스위칭 소자와 무관하므로 그림 4의 저항형 SFCL 고장률과 부분고장률, 그림 5의 인근 배전선로 고장률과 부분고장률은 모두 점검주기와 무관한 평행 직선이다.

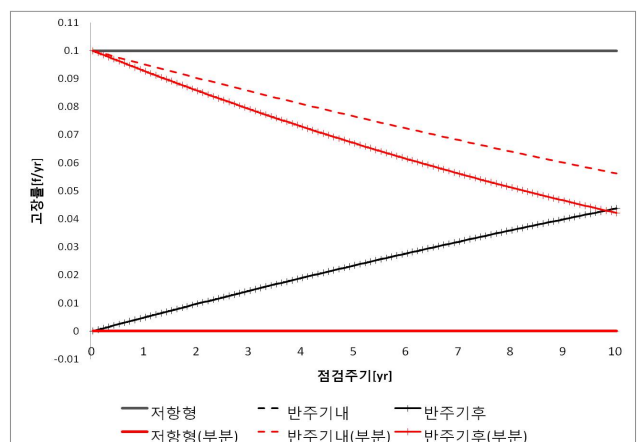


그림 4 점검주기가 SFCL 신뢰도 데이터에 미치는 영향
Fig. 4 Effect of inspection interval on SFCL's reliability

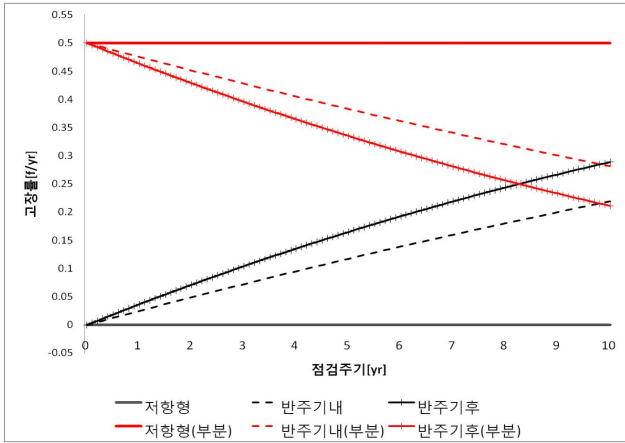


그림 5 점검주기가 인근설비 신뢰도 데이터에 미치는 영향
Fig. 5 Effect of inspection interval on adjacent equipments' reliability

그림 4를 보면, 점검주기가 길어질수록 SFCL의 고장률은 점차 증가하고 SFCL의 부분고장률은 점차 감소한다. 즉, 점검주기가 길어질수록 초전도체 고장이 발생할 때 고속스위치 동작실패가 자주 발생하여, 부분고장으로 귀결될 상황이 고장상태로 악화된다. 그림 5의 인근 배전선로 고장률도 점검주기가 길어질수록 고장률은 증가하고 부분고장률은 감소한다. 결국, 고속스위치의 동작실패는 SFCL의 고장률과 인근 배전선로의 고장률을 모두 증가시킨다.

3.3 점검주기에 따른 결합 구성요소의 등가고장률

점검주기가 0 부터 10년 사이일 때, SFCL과 인근 배전선로를 결합한 단일 구성요소의 등가고장률을 그래프로 표현하면 그림 6과 같다. 단, 배전선로의 충분한 여유용량으로 인해 부분고장상태도 정상상태로 분류할 수 있다고 가정하여, 3-states의 고장률과 부분고장률을 2-states 고장률로 식 (5)를 사용하여 결합하였다.

SFCL과 인근 배전설비를 결합한 단일 구성요소의

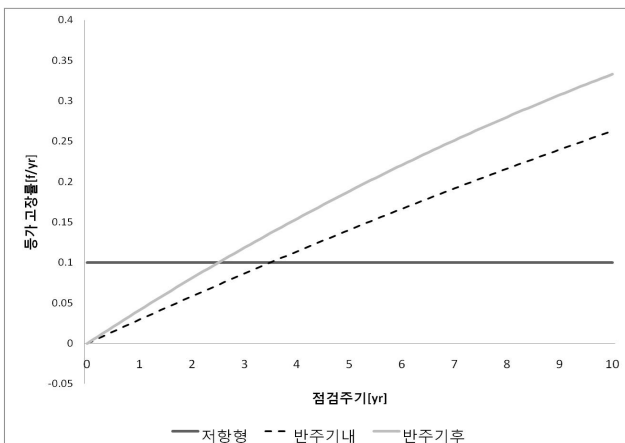


그림 6 점검주기가 등가고장률에 미치는 영향
Fig. 6 Effect of inspection interval on equivalent failure rate

2-states 고장률은, SFCL과 공급신뢰도의 관계를 가장 직관적으로 관찰할 수 있는 신뢰도 데이터이다.

점검주기 1년 미만의 정상적인 계통운영에서는 하이브리드형 SFCL이 신뢰도 측면에서 유리하고, 그 중 반주기 내 한류방식이 더 유리함을 그림 6을 통해 알 수 있다. 반면, 스위칭 소자의 점검에 너무 소홀할 경우 하이브리드형 SFCL은 오히려 공급신뢰도에 악영향을 미칠 수 있으며, 특히 반주기 후 한류방식은 점검주기에 보다 민감한 것을 알 수 있다.

3.4 초전도체 고장률에 따른 결합 구성요소의 등가고장률

초전도체 고장률이 0 부터 1[f/yr] 사이일 때, SFCL과 인근 배전설비를 결합한 단일 구성요소의 등가고장률을 그래프로 표현하면 그림 7과 같다.

초전도체의 고장은 주로 초전도 소자, 연결단자, 냉각장치의 고장으로 인해 발생한다. 완벽한 관리를 통해 초전도체 고장률을 10^{-3} 단위로 낮출 수 있다면 저항형 SFCL이 오히려 공급신뢰도 측면에서 유리하겠지만, 복잡한 설비로 인해 초전도체 고장률이 필연적으로 증가한다면 하이브리드형 SFCL을 설치하는 것이 유리하다. 반주기 내 한류방식이 반주기 후 한류방식에 비해 공급신뢰도에 조금 더 유리하지만, 초전도체 고장률과 무관하게 두 한류방식의 차이는 거의 일정하다.

3.5 인근 설비 고장률에 따른 결합요소의 등가고장률

인근 배전선로의 고장률이 0 부터 10[f/yr] 사이일 때, 단일 구성요소의 등가고장률을 그래프로 표현하면 그림 8과 같다.

정상적인 계통운영에서는 하이브리드형 SFCL이 공급신뢰도 측면에서 유리하지만, 비정상적으로 높은 고장률의 배전설비 근방에 설치된 하이브리드형 SFCL은 오히려 공급신뢰도를 악화시킬 수 있다. 즉, 인근 배전설비에서 고장이 자주 발생하거나 SFCL이 여러 설비의 고장전류를 한류할 경

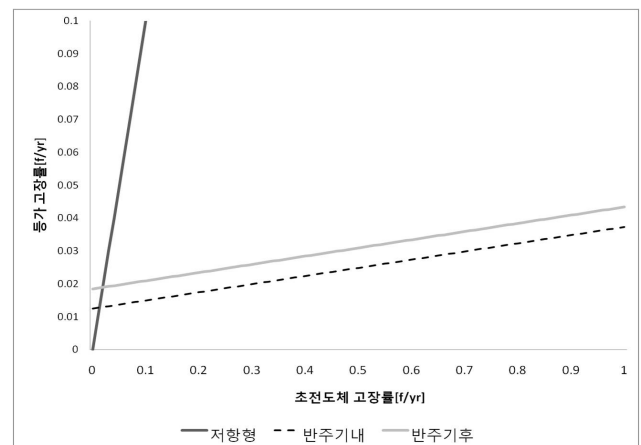


그림 7 초전도체 고장률이 등가고장률에 미치는 영향
Fig. 7 Effect of superconductor's failure rate on equivalent failure rate

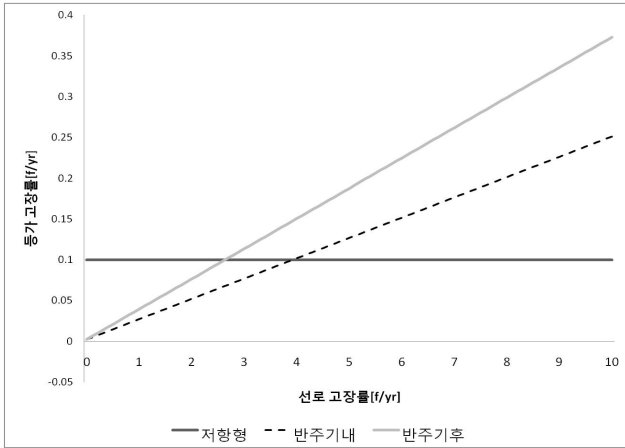


그림 8 인근 배전설비 고장률이 등가고장률에 미치는 영향
Fig. 8 Effect of adjacent equipments' failure rate on equivalent failure rate

우, 하이브리드형의 스위칭 동작실패는 수용가의 전력공급에 지장을 초래할 우려가 있다. 인근 배전설비의 고장률이 높을 경우, 스위칭 소자에 대한 잦은 점검을 통해 하이브리드형 SFCL의 정상동작 확률을 높이는 것이 필요하다. 특히, 반주기 후 한류방식은 인근 배전설비의 고장률에 보다 민감하다.

4. 결 론

하이브리드형 SFCL은 저항형 SFCL의 초전도체 비용문제와 회복특성을 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있지만, 별도의 고속스위치를 필요로 하기에 그 동작 신뢰성과 수용가의 공급신뢰도에 대한 주의가 필요하다. 본 논문에서는 SFCL의 신뢰도 데이터와 SFCL 인근 배전설비의 신뢰도 데이터를 계산하는 방법에 대해 기술하였으며, 이는 SFCL이 연계된 배전계통의 수용가 공급신뢰도를 산출하기 위해 필요한 사전단계이다.

본 연구에서 제시한 기법은 기존 공급신뢰도 해석기법에 그대로 적용할 수 있는 장점이 있는 반면, 수식의 간략화를 위해 몇몇 가정이 포함되었다. 여러 수준의 부분송전을 모두 동일한 부분고장이라고 가정하였으며, 초전도체와 인근 배전설비의 동시발생 고장은 무시하였다. 그렇지만 차후 SFCL의 정확한 신뢰도 모델과 수용가 공급신뢰도 해석을 위한 기본이론으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 이승렬, 김종율, 최흥관, 윤재영, “국내 실계통에서의 154kV 초전도한류기 계통적용 가능성 검토”, 대한전기학회논문지, vol. 53, no. 12, pp 661-669, 2004.
 [2] 박동근, 석복열, 고태국, 강형구, “배전급 초전도한류기 및 전력 IT 응용을 위한 실시간 모니터링 시스템 개

발”, 대한전기학회논문지, vol. 57, no. 3, pp 398-402, 2008.

[3] Lin Ye, LiangZhen Lin and Juengst, K.P., “Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol 12, no. 1, pp. 900-902, 2002.
 [4] Bae, I.S. and Kim, J.O. “Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1416-1422, 2008.
 [5] Jiang Yu and Xianzhong Duan, “A New Type of Superconducting Fault Current limiter (SFCL)”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific IEEE/PES, vol 3, pp. 2322-2325, 2002.
 [6] 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.
 [7] Roy Billinton and Ronald N. Allan, “Reliability Evaluation of Engineering Systems”, Plenum Press, 1992.
 [8] Roy Billinton and Ronald N. Allan, “Reliability Evaluation of Power Systems”, Plenum Press, 1996.

저 자 소 개



배 인 수 (裴 引 洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 강원대 공학대학 전기제어공학부 전임강사
 E-mail : isbae@kangwon.ac.kr



김 성 열 (金 成 烈)

1980년 3월 23일생. 2007년 2월 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중
 E-mail : psl@hanyang.ac.kr



김 진 오 (金 鎭 吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공박). 현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.
 Tel : 02-2290-0347
 E-mail : jokim@hanyang.ac.kr