

초전도한류기의 신뢰도에 관한 연구

(A Study on the Reliability of Superconducting Fault Current Limiter)

배인수* · 김성열 · 김진오**

(In-Su Bae · Sung-Yul Kim · Jin-O Kim)

Abstract

The failure of cooling system in Superconducting Fault Current Limiter(SFCL) increases the impedance of superconducting device, and due to malfunction of inner switches the SFCL opens the distribution system inadvertently when required to do so. In this paper, the ground fault and short circuit fault were classified as active failure and the open circuit fault was passive failure. A reliability model of SFCL considers the passive failure as well as active failure, and in the case study the reliability indices of distribution system are evaluated. It is possible that the reliability evaluation excluded passive failure makes the customers reliability seem so worse than it really was. Therefore, the reliability models of SFCL must include the active failure and passive failure together to evaluate the reliability of distribution system connected SFCL.

Key Words : Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Reliability, Passive Failure, Active Failure

1. 서 론

배전시스템의 저임피던스화는 배전시스템의 설비용량을 증가시키고 송전손실을 경감시키는 반면, 계통고장시 고장전류가 과도하게 증가한다. 과도한 고장전류 문제를 경감시키기 위한 방안 중 하나로 최근에는 경제적인 측면을 고려하여 초전도한류기(Superconducting Fault Current Limiter, SFCL)가 그 대안으로 제시되고 있다. 초전도한류기는 초전도체에 과전류가 흐를

때만 저항값이 증가하는 개념을 응용한 신개념의 계통설비이다. 초전도한류기는 별도의 부가장치 없이 고장전류에 대한 초고속 감지가 가능하고, 과전류 유입시 고임피던스를 통해 고장전류를 제한한다. 또한 초전도한류기는 고장전류가 유입되지 않는 정상계통 상태에서 임피던스 0인 상태를 유지하므로, 평상시 계통운영에 영향을 주지 않는 무손실 운영이 가능하다는 특징이 있다[1-2].

초전도한류기로 인한 고장전류의 저감은 인근 변압기나 배전선로의 수명과 고장률을 일부 개선할 수 있다. 또한 보호계전설비도 고장전류의 저감으로 인해 수명과 성능의 감쇄를 다소 완화시킬 수 있다. 따라서 초전도한류기 도입으로 수용가의 공급신뢰도가 향상될 것으로 예상하겠지만, 설치 및 운영 경험이 전무한

* 주저자 : 강원대학교 전기공학과 조교수
** 교신저자 : 한양대학교 전기생체공학부 교수
Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2220-1856
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2010년 10월 28일
1차심사 : 2010년 11월 2일
심사완료 : 2010년 11월 30일

설비가 기존 배전계통에 직렬형태로 삽입되므로 수용가의 공급신뢰도는 오히려 악화될 여지도 존재한다. 또한 설치되는 초전도한류기의 구조에 따라 초전도체 외에 냉각장치, 내부 스위치 등 별도의 부가설비를 필요로 하는 경우, 수용가의 공급신뢰도가 향상될지 악화될지를 판단하는 문제는 객관적인 신뢰도 모델과 정량적인 공급신뢰도 비교를 필요로 한다.

본 논문에서는 초전도한류기로 인한 인근 설비의 고장률, 수명, 동작확률 개선효과는 고려하지 않았으며, 초전도한류기 자체의 고장에 대해서만 집중하였다. 초전도한류기의 냉각장치 고장은 초전도체의 임피던스를 비정상적으로 증가시키며, 내부 스위치의 오동작이 발생하면 초전도한류기가 회로를 비정상적으로 개방시킨다[3]. 이와 같은 회로개방 현상은 단락사고 위주의 기존 신뢰도 모델과는 다른 접근이 필요하다. 보호계전설비의 오동작으로 인한 비정상적인 회로개방은 신뢰도 해석에서 이미 별도로 고려하고 있으며, 이를 초전도한류기에 적용할 경우 실제 고장상황과 더 유사한 초전도한류기의 신뢰도 모델을 구성할 수 있다.

2. 본 론

2.1 초전도한류기의 능동고장과 수동고장

송배전선로, 변압기 등 일반적인 계통설비에서 발생하는 고장의 대부분은 지락사고를 포함하는 단락고장에 해당하므로, 현재 대부분의 신뢰도 해석에서는 단선사고와 같은 개방고장은 무시하고 있다. 반면 차단기(circuit breaker), 재폐로기(recloser), 퓨즈와 같은 스위칭 소자는, 자체 고장은 단락고장으로 고려하고 오동작으로 인한 회로 개방시는 개방고장으로 고려하여 신뢰도 해석에 포함한다. 초전도한류기는 기존 계통설비나 스위칭 소자와는 달리 지속적인 관리가 필요하고 구조도 복잡한 냉각장치를 필요로 하는데, 냉각장치의 고장은 초전도체의 임피던스를 증가시켜 전력송전을 감소시킨다. 또한 하이브리드형 초전도한류기는 내부에 1~2개의 스위칭 소자가 별도로 존재하므로 이에 의한 오동작의 가능성도 무시할 수 없다.

즉 초전도한류기는 냉각장치 고장에 의한 비정상적인 한류상태와 내부 스위치의 오동작에 의한 비정상적인 한류상태 혹은 개방상태에 도달할 수 있으며, 이는 비정상적인 회로 개방에 해당한다.

단락고장이 발생하면 차단기는 회로를 개방한다. 고장발생 후 차단기가 회로를 개방하는 단락고장을 신뢰도 해석에서는 능동고장(active failure)이라 하며, 이를 상태공간 다이어그램(state space diagram)으로 표현하면 그림 1의 (a)와 같다. 반면, 개방고장이 발생하면 고장이 발생한 설비는 회로를 개방하지만, 차단기는 별도의 동작을 수행하지 않는다. 고장발생 후 차단기가 회로를 개방하지 않는 고장을 신뢰도 해석에서는 수동고장(passive failure)이라 하며, 이는 그림 1의 (b)에 해당한다[4].

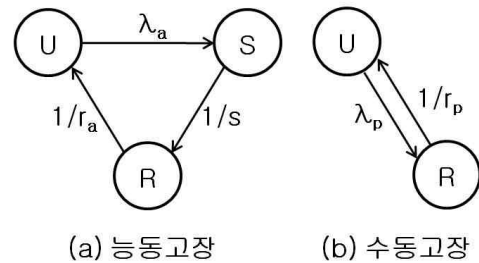


그림 1. 초전도한류기 능동고장과 수동고장의 상태공간 다이어그램

Fig. 1. State space diagram of active failure and passive failure

그림 1에서 상태 U는 정상상태, 상태 S는 고장이 발생했지만 고장지점의 계통분리가 이루어지기 전 상태, 상태 R은 고장지점의 계통분리가 이루어진 상태를 말한다. 또한 λ_a [f/yr], r_a [yr]는 능동고장에 대한 고장률과 수리시간, λ_p [f/yr], r_p [yr]는 수동고장에 대한 고장률과 수리시간, s [yr]는 보호계전설비의 스위칭 시간을 말한다.

초전도한류기의 고장으로 발생할 수 있는 모든 상태를 열거하면 다음과 같다.

- ① 냉각장치 고장으로 인한 초전도한류기의 비정상적인 한류(고장률 λ_1 , 수리시간 r_1)
- ② 내부 스위치 오동작으로 인한 초전도한류기의 개방(고장률 λ_2 , 수리시간 r_2)

- ③ 내부 스위치 오동작으로 인한 초전도한류기의 비정상적인 한류(고장률 λ_3 , 수리시간 r_3)
- ④ 초전도한류기의 모선측 단락(고장률 λ_4 , 수리시간 r_4)
- ⑤ 초전도한류기의 급전선(feeder)측 단락(고장률 λ_5 , 수리시간 r_5)

다섯 종류의 초전도한류기 상태에 대해 능동고장에서 고장률, 수리시간을 구하면 각각 식 (1), (2)와 같고, 수동고장에서의 고장률, 수리시간을 구하면 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$\lambda_a = \lambda_3 + \lambda_4 \tag{1}$$

$$r_a = \frac{\lambda_3 r_3 + \lambda_4 r_4}{\lambda_a} = \frac{\lambda_3 r_3 + \lambda_4 r_4}{\lambda_3 + \lambda_4} \tag{2}$$

$$\lambda_p = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \tag{3}$$

$$r_p = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_3 r_3}{\lambda_p} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_3 r_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \tag{4}$$

초전도한류기 1기에서 두 종류의 고장상태가 존재하므로 두 상태공간 다이어그램을 따로 고려하는 방식보다는 그림 2와 같이 하나의 상태공간 다이어그램으로 표현하는 것이 적용에 편리하다. 단 하나의 상태공간 다이어그램으로 표현하기 위해서는 능동고장의 수리시간 r_a 와 수동고장의 수리시간 r_p 가 r 값으로 서로 동일하다는 가정이 전제되어야 한다.

초전도한류기로 인해 기존 보호계전설비의 고장확률이 개선될 경우 수용가의 신뢰도가 향상될 수 있지만, 직렬로 삽입된 형태의 초전도한류기가 자체 고장을 일으킬 경우는 수용가의 신뢰도가 악화될 수 있다. 그러나 초전도한류기의 능동고장이 다른 급전선에도 영향을 줄 수 있는 반면, 수동고장은 초전도한류기가 설치된 급전선에만 그 영향이 국한된다. 초전도한류기의 고장을 기존 설비의 고장과 동일하게 모두 능동고장으로 고려한다면 수용가의 신뢰도가 더욱 악화되는 결과가 도출될 우려가 있으므로, 초전도한류기의 고장 중 냉각장치나 내부 스위치 오동작은 능동고장

이 아닌 수동고장으로 모의를 해야 그 영향을 정확히 파악할 수 있다[5].

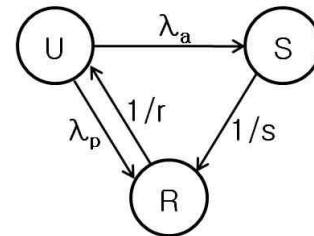


그림 2. 초전도한류기의 상태공간 다이어그램
Fig. 2. State space diagram of SFCL

2.2 수동고장과 수용가의 공급신뢰도

수동고장이 수용가의 공급신뢰도에 미치는 영향이 능동고장의 경우와 어떻게 다른지 설명하기 위해, 그림 3과 같은 2개 급전선, 2개 부하로 이루어진 간단한 배전계통을 예로 들어 설명하도록 한다.

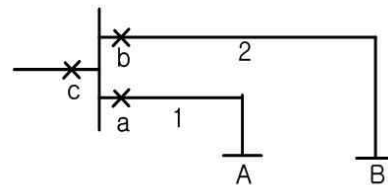


그림 3. 2개 급전선의 예제계통
Fig. 3. Example system of two feeders

능동고장이 수용가의 공급신뢰도에 미치는 영향은 기존 신뢰도 해석기법에서 다루던 내용과 동일하다. 즉 차단기 a에서 능동고장이 발생하면 고장지점과 가장 인접한 상위 차단기 c가 회로를 자동으로 개방하므로, 차단기 c의 동작으로 인해 수용가 A와 수용가 B는 정전을 경험한다. 수용가 A는 차단기 a의 수리가 완료될 때까지 정전을 겪는 반면, 수용가 B는 차단기 a의 계통분리와 차단기 c의 재투입을 통해 스위칭 시간만큼만 정전을 경험한다.

수동고장의 경우는 능동고장과는 그 결과가 다르다. 차단기 a에서 수동고장이 발생하면 차단기 a가 회로를 개방하고 차단기 c는 동작하지 않는다. 따라서 수

용가 B는 정전을 경험하지 않고, 수용가 A는 차단기 a의 수리가 완료될 때까지 정전을 겪는다.

이를 정리하면 차단기의 능동고장은 모선과 연결된 모든 수용가에게 영향을 주지만, 수동고장은 차단기와 직접 연결된 수용가에게만 영향을 준다고 할 수 있다. 즉 모든 고장을 능동고장으로 고려하는 경우에 비해 일부 고장을 수동고장으로 해석하면 수용가의 공급신뢰도가 다소 향상되는 결과를 보이며, 초전도한류기의 경우도 일부 고장을 수동고장으로 해석하면 수용가의 공급신뢰도가 실제보다 더 악화된 결과를 도출하는 오류를 피할 수 있다.

2.3 초전도한류기와 수용가의 공급신뢰도

초전도한류기의 고장이 수용가의 공급신뢰도에 미치는 영향을 앞의 그림 3과 동일한 예제계통을 통해 살펴보도록 한다. 차단기 기준으로 모선측에 초전도한류기를 설치할 경우 초전도한류기의 고장이 모선과 연결된 모든 수용가에게 영향을 준다는 것은 명백하므로, 신뢰도 측면에서 이는 권장할만한 설치위치가 아니다. 따라서 그림 4와 같이 차단기의 급전선측에 초전도한류기가 설치된 예제를 통해 설명하도록 한다.

초전도한류기에서 능동고장이 발생하면 이를 감지한 차단기 b는 회로를 개방한다. 수용가 B는 초전도한류기의 수리가 완료될 때까지 정전을 경험하지만, 수용가 A에서는 정전이 발생하지 않는다. 초전도한류기에서 수동고장이 발생할 경우 차단기 b는 동작하지 않지만 초전도한류기가 급전선 2를 모선에서 분리하므로, 그 결과는 차단기 b가 동작한 경우와 동일하다. 즉 초전도한류기의 능동고장과 수동고장은 수용가의 공급신뢰도 측면에서 동일하다.

그렇지만 이는 차단기가 100[%] 확률로 동작이 확실하다는 가정이 전제되어 있다. 차단기는 동작이 요구되는 상황에서 주어진 동작을 수행하지 못할 확률이 존재하며, 차단기의 부동작은 수용가의 공급신뢰도를 악화시킨다. 차단기의 부동작시, 즉 차단기가 동작하지 않는다고 가정할 경우, 초전도한류기의 능동고장은 수용가 A까지 정전을 경험하게 만든다. 반면 초전도한류기의 수동고장은 차단기의 동작 자체를 요구하

지 않으므로 차단기 부동작과는 무관하고 수용가 A는 정전을 경험하지 않는다.

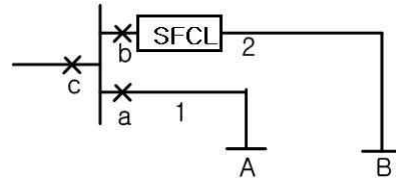


그림 4. 초전도한류기가 연결된 예제계통
Fig. 4. Example system connected with SFCL

초전도한류기로 인한 고장전류의 저감은 차단기의 고장전류 감지를 어렵게 할 수 있는 반면, 반대로 고장전류의 저감이 차단기의 수명과 성능을 향상시킬 수도 있다. 따라서 초전도한류기의 계통연결이 차단기의 부동작 확률을 변하게 하지만, 초전도한류기와 차단기 부동작의 관계는 별도의 연구가 필요한 분야로서, 본 연구에서는 그 둘의 연관성이 없다고 가정하였다.

3. 사례연구

본 논문의 사례연구는 신뢰도 분야에서 많이 인용되고 있는 RBTS(Roy Billinton Test System)의 2번 모선 배전계통을 대상으로 하였다. 1번 급전선에 설치된 초전도한류기와 함께 RBTS 2번 모선의 계통도를 나타내면 그림 5와 같다[6].

사례연구 계통은 급전선 말단끼리 연결된 N/O switch가 없는 대신, 그림 5의 X 표시로 나타난 차단기와 그림에는 표시되어 있지 않은 단로기, 퓨즈가 설치되어 있다. 변압기 고장시 복구시간은 수리시간 대신 예비변압기를 이용한 짧은 교체시간으로 적용하였고, 차단기의 부동작 확률은 0.1로 설정하였으며, 11[kV] 전원측 등가 신뢰도 지수를 같이 고려하였다. 초전도한류기의 실제 운전사례가 아직 존재하지 않기 때문에, 고장률이 낮은 변압기와 동일하다고 가정하였다. 초전도한류기의 고장률과 수리시간이 변압기와 동일하다면, 초전도한류기의 고장률은 0.015[f/yr]로서 약 67년에 1번 고장이 발생한다. 차단기의 능동고

장과 수동고장의 비율은 2:1로 주어져 있다. 차단기는 능동고장의 비율이 더 높지만, 초전도한류기의 경우 냉각장치의 고장이나 내부 오동작에 의한 수동고장의 비율이 더 높을 것으로 예상되므로 능동고장과 수동고장 비율을 차단기 비율의 역인 1:2의 비율로 가정하였다. 언급하지 않는 나머지 데이터는 신뢰도 데이터는 참고문헌[6]에 주어진 값을 그대로 적용하였다.

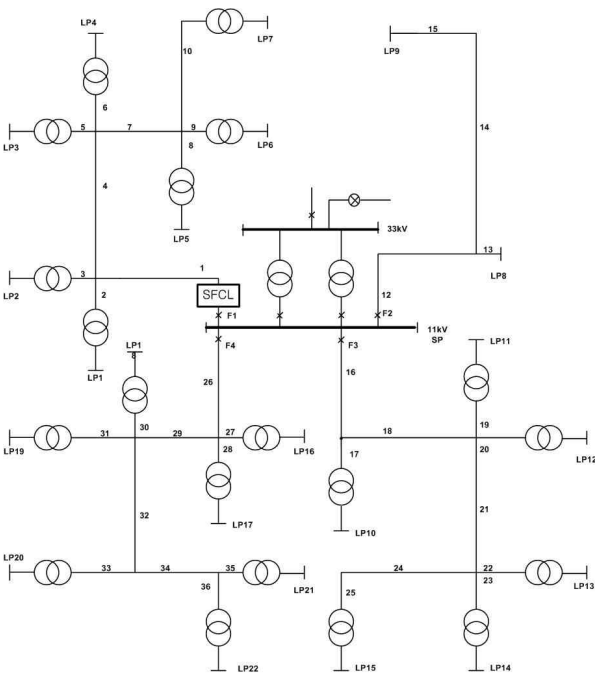


그림 5. 초전도한류기가 연결된 RBTS 2번 모선 배전계통
Fig. 5. RBTS bus 2 distribution system connected with SFCL

우선 차단기 기준으로 모선측에 초전도한류기가 설치될 경우 수용가 공급신뢰도가 더 악화될 수 있다는 것을 입증하기 위해, 초전도한류기가 차단기 기준으로 급전선측에 설치된 경우와 모선측에 설치된 경우에 대해 각각 수용가의 공급신뢰도를 산출하였다. 급전선측에 설치된 경우는 송전측에서부터 모선, 차단기, 초전도한류기, 급전선 순서로 설치되어 있으며, 이는 그림 5와 동일하다. 모선측에 설치된 경우는 송전측에서부터 모선, 초전도한류기, 차단기, 급전선 순서로 설치되며, 그림 5와는 그 연결이 다르지만 따로 다른 그림으로 논문에 삽입하지는 않았다. 다양한 배전계통 신뢰

도 지수 중 SAIFI, SAIDI, ENS를 대상으로 하였을 때, 배전계통의 평균 신뢰도 지수 결과값은 표 1과 같다.

표 1. 초전도한류기 위치와 수용가 공급신뢰도
Table 1. Customer reliability by position of SFCL

	급전선측 설치	모선측 설치
SAIFI [회/호·년]	0.32834	0.33163
SAIDI [시간/호·년]	1.08797	1.09094
ENS [MW/년]	14.3057	14.3446

초전도한류기를 차단기 기준으로 모선측에 설치하는 것은 보호계전 분야에서 기피하고 있으며, 신뢰도 측면에서도 수용가의 공급신뢰도가 악화됨을 알 수 있다.

다음으로 초전도한류기의 신뢰도 모델에 따른 수용가의 공급신뢰도를 살펴보기 위해 다음과 같은 세 종류의 Case를 가정하였다.

Case 1 : 초전도한류기는 고장이 발생하지 않음.(초전도한류기가 연결되지 않은 상황과 동일)

$$\lambda_a + \lambda_p = 0$$

Case 2 : 초전도한류기의 능동고장만 고려

$$\lambda_a = 0.015[\text{f/yr}], \lambda_p = 0$$

Case 3 : 초전도한류기의 수동고장까지 고려

$$\lambda_a = 0.005[\text{f/yr}], \lambda_p = 0.010[\text{f/yr}]$$

세 종류 Case에 대해 배전계통의 평균 신뢰도 지수 결과값을 구하면 표 2와 같다.

Case 1을 다른 Case와 비교하면, 초전도한류기의 계통연결이 수용가 공급신뢰도를 악화시킨다는 것을 알 수 있다. 기존 계통에 새로운 설비가 직렬 형태로 추가될수록 수용가 공급신뢰도가 악화된다는 것은 당연하다 할 수 있다.

그러나 초전도한류기를 기존 설비와 동일하게 취급할 경우 수용가의 공급신뢰도가 실제보다 더 악화될 결과로 나타날 수 있음을 Case 2와 Case 3의 결과값 비교로 알 수 있다. Case 2와 Case 3에서 초전도한류기의 총 고장률은 동일하지만 수동고장이 수용가의 공급신뢰도에 미치는 영향은 능동고장에 비해 미비하

다. 따라서 초전도한류기의 계통영향을 평가하는데 있어서, 신뢰도 측면에서는 초전도한류기의 수동고장을 별도로 고려해야 더 정확한 계통영향 평가가 가능한 것으로 사료된다.

표 2. 초전도한류기 신뢰도 모델과 수용가 공급신뢰도
Table 2. Customer reliability by SFCL reliability model

	Case 1	Case 2	Case 3
SAIFI [회/호·년]	0.32321	0.32834	0.32834
SAIDI [시/호·년]	1.03639	1.08863	1.08797
ENS [MW/년]	13.7546	14.3143	14.3057

4. 결 론

본 논문에서는 지락사고를 능동고장으로 구분하고 회로개방을 수동고장으로 구분하여 초전도한류기의 신뢰도 모델을 설정하였고, 수동고장과 초전도한류기로 인한 수용가의 공급신뢰도 변화를 설명하였다. 또한 사례연구에서는 초전도한류기가 설치된 모의계통을 통해 배전계통 신뢰도 지수를 계산하였다.

사례연구의 분석결과에 따르면 초전도한류기는 수용가의 공급신뢰도를 악화시킬 수 있고, 초전도한류기가 모선 근방에 설치된다면 차단기 기준으로 급전선측에 설치되는 것이 모선측에 설치되는 것보다 신뢰도 측면에서 유리하다. 또한 수동고장을 고려하지 않고 신뢰도를 해석할 경우 수용가의 공급신뢰도가 실제보다 더 악화된 결과를 도출할 수 있으므로, 초전도한류기가 설치된 배전계통에서 수용가의 공급신뢰도를 산출하기 위해서는 능동고장 뿐만 아니라 수동고장까지 같이 고려해야 더 정확한 신뢰도 지수 산출이 가능하다 하겠다.

감사의 글

이 논문은 강원대학교 2009학년도 자체학술연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Lin Ye, LiangZhen Lin and Juengst, K.P., "Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol 12, no. 1, pp. 900-902, 2002.
- [2] 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.
- [3] Lee, B.W. and etc., "Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol 18, no. 2, pp. 624-627, 2008.
- [4] Roy Billinton and Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1996.
- [5] Bae, I.S. and Kim, J.O. "Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, pp. 1416-1422, 2008.
- [6] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel and K.S.So, "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution system Data and Results", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 813-820, 1991.

◇ 저자소개 ◇



배인수(裴引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2008년~현재 강원대학교 전기공학과 조교수.



김성열(金成烈)

1980년 3월 23일생. 2007년 2월 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중.



김진오(金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1993년~현재 한양대학교 전기 제어생체공학부 교수.