

병렬아크의 고속차단에 관한 연구

(A Study on the High Speed Interruption of Parallel Arcing)

길경석* · 지홍근 · 박대원 · 김일권 · 김영일 · 조영진

(Gyung-Suk Kil · Hong-Keun Ji · Dae-Won Park · Il-Kwon Kim · Young-Il Kim · Young-Jin Cho)

요 약

기존의 누전차단기는 병렬아크에 대해서 차단을 실패하거나 차단시간이 길어지는 결함이 있었다. 본 논문에서는 저압 옥내배선 계통에서 병렬아크를 모의하여 기존 누전차단기의 차단특성을 분석하고, 병렬아크 검출에 적합한 공기심형 전류센서와 신호변환회로를 설계하여 기존 방식의 누전차단기에 적용하였다.

제안한 방식은 병렬아크의 발생위치와 관계없이 누전차단기를 동작시켰으며, 차단시간은 아크가 발생한 위상에 따라 1.74~8.3[ms]의 범위로 기존 차단기에 비해 약 5배 빠른 특성이다.

Abstract

Conventional Earth Leakage Circuit Breakers (ELCBs) have defects of a breaking failure or a long breaking-time against parallel arc current. In this paper, breaking characteristics of conventional ELCBs were analyzed by simulation of parallel arc in a low-voltage indoor wiring system, and an air-core current sensor and a signal converter being most available for parallel arc detection were developed and applied to a conventional ELCB.

The proposed tripped the ELCB regardless of the location of parallel arc. The breaking-time was in ranges of 1.74~8.3[ms] depending on the phase of arc generation, which is about 5 times as fast as conventional ELCBs with the breaking-time of 50[ms].

Key Words : Earth leakage circuit breakers(ELCBs), Parallel arc, Low-voltage indoor wiring system, Air-core current sensor, Signal converter

1. 서 론

저압 옥내배선에서 병렬아크는 전원선간 또는 선과 대지간 단락시 부하를 통하지 않고 발생하는 것으로, 아크저항에 의해 전류가 제한된다. 따라서 저압용 차단기가 차단실패하거나 차단시간이 길어지는 문제가 발생하며, 이는 전기화재의 주요 발생원인이다. 여기서 단락은 전선로가 부하 또는 임피던

* 주저자 : 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
접수일자 : 2008년 8월 12일
1차심사 : 2008년 8월 21일
심사완료 : 2008년 8월 29일

스를 거치지 않고 선간 또는 대지(접지)와 직접 연결되어 대전류가 흐르는 현상이며, 병렬아크는 단락이 발생하는 과정 또는 발생 이전에 강한 빛과 열을 동반한 방전현상이다.

2005년도 전기재해 통계분석에 따르면 전기화재의 발생 건수는 해마다 10,000여건을 유지하고 있으며, 특히 단락과 누전사고는 전기화재 발화의 원인 중 가장 높은 비율인 68.8%를 차지하고 있다. 전기화재는 재산의 손실뿐만 아니라 인명피해를 동반하는 재해이기 때문에 전기화재의 징후를 조기에 발견하고 방지할 수 있는 대책이 시급히 요구되고 있다[1].

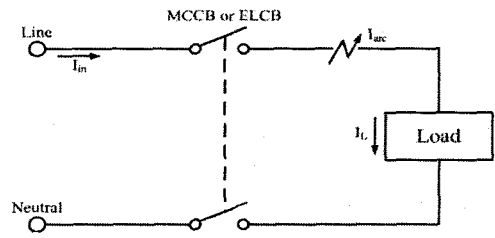
일반적으로 퓨즈나 차단기와 같은 보호장치는 옥내 배전선로를 보호하기 위하여 사용되며, 과부하 또는 단락을 차단함으로써 배선의 과열로 인한 화재의 위험을 감소시킨다[2]. 그러나 이러한 장치는 병렬아크와 같이 짧은 시간에 국부적으로 고열을 방출하는 경우에 대해서는 즉시 제거하지 못한다[3-5].

따라서 본 논문은 저압 옥내배선에서 발생하는 병렬아크에 대응하여 수 [ms] 이내로 동작할 수 있는 차단방법에 대하여 기술하였다. 아크전류를 검출하기 위하여 과도전류에 포화되지 않는 공심형 변류기를 적용하고 기존의 누전차단기 트립회로를 개선하여 보호협조 하도록 구성함으로써 병렬아크 발생시 수 [ms]의 짧은 시간에 차단할 수 있음을 확인하였다.

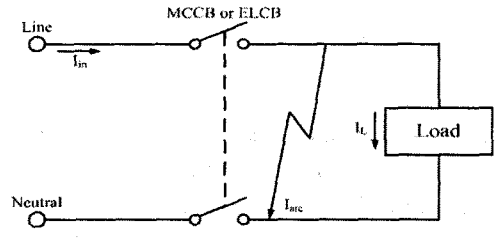
2. 아크의 특성

아크는 전기회로에서 발생하는 고장전류의 경로에 따라 크게 직렬아크와 병렬아크로 나눌 수 있다. 직렬아크는 열화된 전선을 잡아당기거나 콘센트의 접속이 느슨하게 고정된 경우 또는 금속성 물체에 전선이 찢겨진 경우에 발생한다. 또한 잦은 진동에 의해 전선의 소선이 일부 절단된 경우와 같이 단일도체의 불완전한 연결부위에서도 발생한다. 이는 그림 1 (a)와 같이 부하와 전기적으로 직렬연결이기 때문에 아크전류가 부하에 의해 제한되므로 병렬아크에 비해 에너지 레벨이 작아 단시간에 발화원이 되지 않는 것이다.

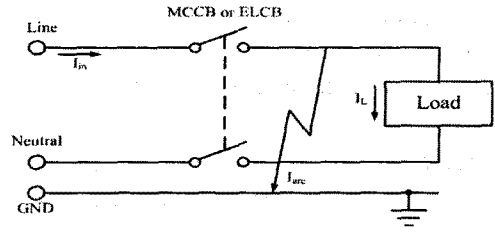
그림 1 (b)는 병렬아크, 그림 1 (c)는 병렬아크의 일종인 접지아크를 나타낸 것으로서 각각 상도체와 중성선 또는 상도체와 접지간에 절연과피 또는 의도하지 않은 도전경로가 형성되었을 경우 발생한다. 이 때의 아크전류는 선로 및 아크 저항에 의해 결정되며, 수 백 [A] 이상의 과도전류가 흐른다. 이는 차단기가 동작하기 전에 일시적으로 강한 아크열을 발생시켜 화재를 유발하게 된다.



(a) 직렬아크



(b) 병렬아크(L-N)



(c) 접지아크(L-G)

그림 1. 아크발생 모드
Fig. 1. Modes of arc generation

3. 실험계의 구성

병렬아크 발생시 흐르는 고장전류를 제한할 수 있는 요소는 아크저항과 선로의 임피던스이다. 본 연구의 대상인 옥내배선은 가령, 아파트를 예로 든다

면, 옥내 인입선이 변전실로부터 최소 수 십 [m] 떨어진 거리에 위치하며 배선용차단기 또는 누전차단기도 말단 부하까지는 최대 30[m] 정도의 거리를 갖는다. 따라서 병렬아크 발생에 대한 차단실험은 선로의 임피던스에 따른 즉, 선로의 길이 변화에 대한 아크전류의 특성분석에 중점을 두었다. 대부분 병렬아크 전류의 크기는 차단기의 정격보다 크다. 심지어 간헐적인 발생에 대해서도 평균전류가 열동식 차단기 또는 전자식 차단기의 트립 레벨을 넘어설 만큼 충분히 크다. 그러나 옥내배선의 길이가 연장되어 선로의 저항이 증가하게 되면 이 전류는 차단기의 동작레벨 부근으로 제한될 수 있다. 이러한 경우, 병렬아크가 발생하더라도 종래의 배선용 차단기 또는 누전차단기는 최종 차단까지 상대적으로 많은 시간이 소요되며, 심지어 도선의 발열에 의해 화재가 발생할 때까지 차단기가 동작하지 않을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 30[A]급의 다양한 옥내용 차단기에 대해 선로의 길이에 따른 트립특성을 분석하였으며, 이를 기준으로 병렬아크를 검출하기 위한 아크전류의 레벨을 선정하였다.

그림 2에 누전차단기(ELCB)를 대상으로 병렬아크 차단특성을 측정·분석하기 위한 실험계의 구성을 나타내었다.

차단기와 부하는 직렬로 연결하고, 아크발생장치를 부하에 병렬로 접속하였다. 본 연구에서 아크발생장치는 실제 옥내배선에서 발생하는 병렬아크를 모의하기 위하여 방폭형 다이캐스팅 외함내에서 1.6[mm] 비닐절연전선을 강제로 접촉시켰다. 이 때 전압과 전류파형은 디지털 오실로스코프로 측정된다.

병렬아크는 상도체와 중성선 또는 상도체와 접지 경로에 단락과 같은 고장이 발생한 경우이므로 이러한 사고시 급격한 전류가 흐르게 되며, 이 전류를 검출 파라미터로 사용한다면 병렬아크를 쉽게 검출할 수 있다. 따라서 병렬아크를 검출하는 것은 직렬아크와는 달리 대전류 영역에서 포화되지 않는 변류기의 선정과 검출레벨을 결정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

전술한 바와 같이 병렬아크전류를 제한할 수 있는 요소는 오직 고장점의 임피던스와 선로의 임피던스 뿐이다. 따라서 본 실험은 옥내배선의 길이를 고려

하여 병렬아크가 발생한 상황을 모의하였다. 일반적으로 옥내 분전반에서 말단 부하까지 배선의 길이는 대략 30[m]이므로 이 범위 내에서 케이블 길이에 따른 병렬아크의 차단실험을 하였다.

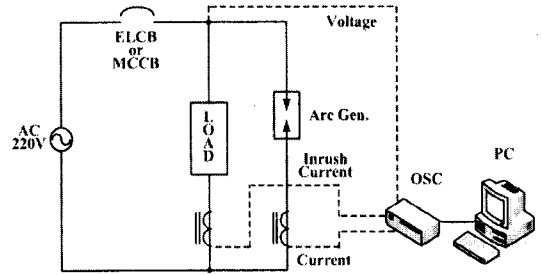


그림 2. 실험계의 구성
Fig. 2. Configuration of the experimental system

4. 기존 누전차단기의 특성

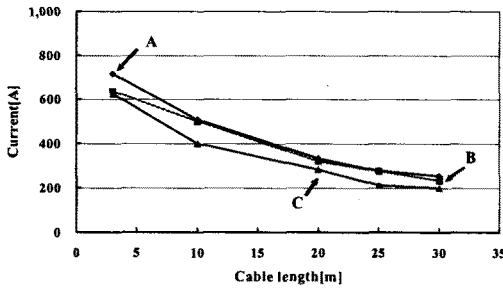
누전차단기의 특성을 분석하기 위하여 케이블 길이(3[m], 10[m], 20[m], 25[m], 30[m])에 따른 실험을 수행하였다. 동일한 정격을 갖는 차단기에 대하여 제조사가 다른 3사의 제품을 대상으로 선정하여, 병렬아크 발생에 따른 차단전류와 차단시간을 측정하여 특성을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 차단전류의 크기는 케이블이 길어짐에 따라 감소하지만 그 크기는 200~700[A]가 검출되었다. 따라서 병렬아크를 검출하는 센서는 이러한 대전류 영역에서도 충분히 검출할 수 있는 특성을 가져야 한다. 그리고 차단기의 트립시간 즉 차단기의 동작시간은 케이블 길이에 비례하여 증가하였다. 샘플 A를 제외한 B, C는 최대 60[ms] 이내에서 고장 전류를 차단하는 비교적 양호한 결과를 나타내었으나, 전기화재를 예방하기 위해서는 병렬아크를 가능한 한 수 [ms]이내의 짧은 시간으로 차단할 필요가 있다.

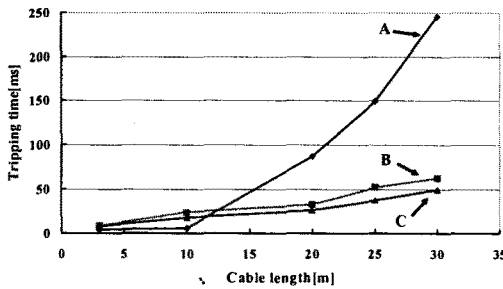
5. 고속 차단외로

일반적으로 전류를 검출하기 위하여 변류기(CT), 분류기(Shunt) 및 로고우스키 코일 등을 이용하고 있다. 로고우스키 코일은 범용 CT와는 달리 공심 또

병렬아크의 고속차단에 관한 연구



(a) Arc current



(b) Tripping time

그림 3. 케이블 길이에 따른 아크전류와 누전차단기의 동작시간

Fig. 3. Arc current and tripping time as a function of cable length

는 비자성재료를 코어로 사용하기 때문에 자기적으로 포화되지 않는 장점이 있으며, 센서 및 검출회로에 따라 검출감도 및 주파수대역을 조절할 수 있는 특징이 있다[6-7].

로고우스키 코일은 1, 2차 코일간의 상호인덕턴스를 이용하여 전류를 측정하는 센서로서 코일 양단에 유기되는 전압은 다음과 같다.

$$v(t) = \mu_0 \cdot n \cdot S \cdot \frac{di}{dt} [V] \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공기의 투자율, n 은 단위 길이당 코일의 턴 수, S 는 공심 코어의 단면적이다. 본 논문에서는 병렬아크에 의해 발생하는 전류를 측정하기 위한 센서로서 순시 대전류에도 자기적으로 포화되지 않는 로고우스키 코일을 사용하였다. 또한 그림 3의 실험결과를 통해 기존의 누전차단기에서는 병렬아

크가 발생하였을 경우 최대 60[ms] (샘플 A제외)의 시간 내에 고장상태를 차단하지만, 이는 전기화재로 확대되는 것을 방지하기에는 충분하지 않다. 이러한 이유로 수 [ms]의 짧은 시간 내에 차단할 수 있는 부가회로가 요구된다.

현재 사용되고 있는 누전차단기는 트립코일에 아크방전전류가 인가되면 기차력으로 차단하는 방식을 적용하고 있지만, 선로의 임피던스에 의해 전류가 제한되어 동작범위 이내에서 고장 전류가 흐를 경우, 동작하지 않는 구간이 존재하거나 차단시간이 늘어나는 문제점을 가지고 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 차단기의 고장전류 검출회로에서 SCR (Silicon Controlled Rectifier)을 이용하여, 이를 해결하고자 한다.

그림 4는 제안한 누전차단기의 트립회로부를 나타낸 것으로, 로고우스키 코일의 출력 신호는 누전차단기의 트립코일을 구동하기 위하여 SCR 게이트단자에 직접 연결하였다. 병렬아크 등에 의한 정 (+)·부(-)의 급준파 대전류가 로고우스키 코일에 검출되면 출력 신호는 전파정류 및 평활 콘덴서 C2를 거쳐 항상 양의 직류 전압으로 SCR 게이트단자에 인가된다.

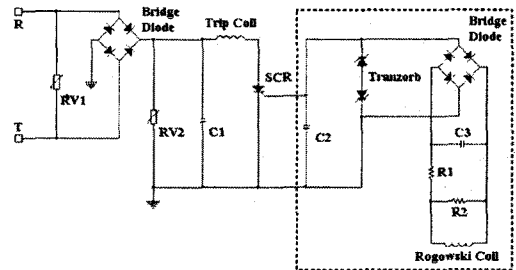
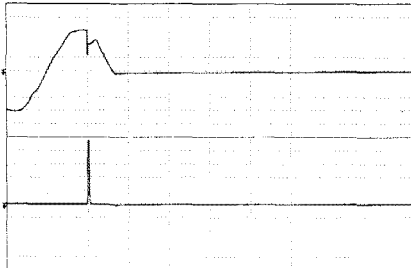


그림 4. 고속 차단회로
Fig. 4. High speed circuit breaker

기존 누전차단기의 차단시간을 해결하기 위한 방법으로, 앞에서 제안한 트립회로(그림 4의 점선부분)를 누전차단기 차단회로와 병렬로 설치하여 병렬아크에 대한 차단특성을 평가하였다. 그림 5는 병렬아크에 대한 개선된 고속 차단기의 차단특성을 나타낸 파형이다. 그림에서와 같이 병렬아크가 발생하여 길이에 따라 483.3[A], 211.7[A], 420.1[A]의 펄스성 전

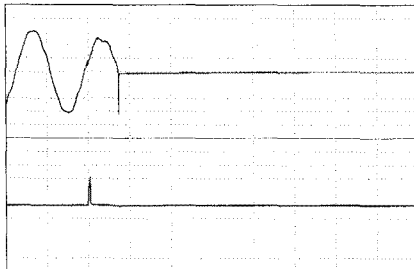
류가 흘렀으며, 이러한 병렬아크 방전신호를 SCR에 직접 인가함으로써 3.5[ms], 6.9[ms], 5.25[ms]로 차단되어 선로의 길이에 상관없이 한 사이클 이내의 고속 차단이 가능함을 확인하였다.

또한 차단특성 실험결과 병렬아크 발생에 따른 차



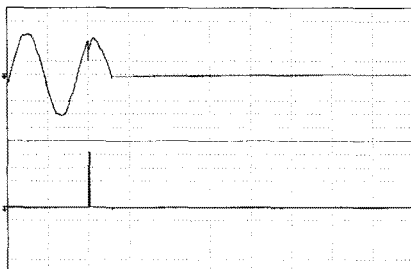
Upper : Load voltage (100V/div, 5ms)
Lower : Load current (100A/div, 5ms)

(a) 3(m)



Upper : Load voltage (100V/div, 10ms)
Lower : Load current (100A/div, 10ms)

(b) 20(m)



Upper : Load voltage (100V/div, 10ms)
Lower : Load current (100A/div, 10ms)

(c) 30(m)

그림 5. 개선된 차단기의 특성
Fig. 5. Characteristic of the improved circuit breaker

단시간은 전원전압의 위상에 따라 트립회로의 동작 시간이 달라짐을 확인할 수 있었다. 그림 6은 SCR 게이트에 트리거 신호를 줄 때, 전원전압의 위상에 따른 차단시간을 분석한 것으로, 총 160회에 걸쳐 수행하였다. 전원전압의 위상이 70[°]에서 123[°]까지의 범위에서는 차단시간이 2[ms]에서 3[ms]이며, 특히 최소 차단시간은 위상 136.65[°]에서 1.74[ms]였다. 전체 전압위상에서 아크가 발생하는 위상에 따라 차단시간이 최대 8.3[ms]로써 아크발생점까지의 거리에 관계없이 전압위상의 한 사이클 이내로 고속 차단이 가능하였다.

이상의 실험결과로부터 병렬아크가 발생할 경우, 정상상태와 확연히 구분되는 펄스성 대전류가 흐르는 것을 확인하였으며, 이러한 특징을 이용하여 일정 레벨을 넘는 전류를 검출하는 방법을 적용하면 쉽게 병렬아크의 발생유무를 판단할 수 있다.

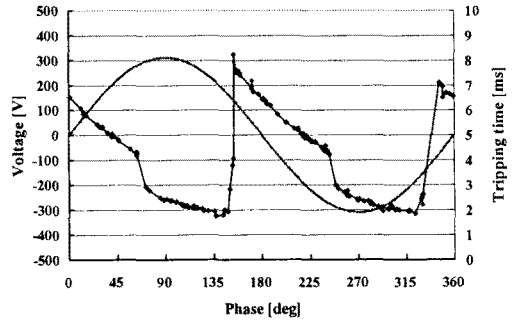


그림 6. 전원전압의 위상에 따른 트립시간
Fig. 6. Tripping time as a function of the phase of power system voltages

특히, 제안한 로고우스키 코일을 검출센서로 이용하여 출력신호를 차단기의 트립신호로 적용함으로써, 누전차단기의 성능을 크게 향상시켜 전기화재 예방에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

6. 결 론

본 논문에서는 저압 옥내배선에서 전기화재의 원인이 되는 아크를 검출하기 위하여, 실제 배선에서 발생할 수 있는 단락상황을 모의하였다. 병렬아크는

병렬아크의 고속차단에 관한 연구

다이캐스팅 외함에서 선로를 강제 단락시키는 방법을 이용하여 임의적으로 발생시켰으며, 검출 레벨을 결정하기 위하여 선로의 길이에 따른 병렬아크 전류를 측정하였다.

선로 길이에 따른 병렬아크의 발생에 대하여 누전차단기의 트립특성 실험으로부터 병렬아크의 발생 후 차단되기까지 수 십~수 백 [ms] 시간이 소요 되는 것을 확인하였다. 비교적 짧은 시간이지만, 병렬아크가 발생하면 동반된 아크열에 의한 화재의 원인이 될 수 있기 때문에, 이를 차단하기 위하여 병렬아크를 검출할 수 있는 트립회로를 설계하였다. 설계한 누전차단기의 트립회로에서 사용한 로고우스키 코일은 정상부하의 초기 기동시 나타나는 돌입전류 및 정상전류에 대해 출력을 나타내지 않지만, 병렬아크 발생시 빠른 상승률을 갖는 대전류에 대해 로고우스키 코일의 출력단에서 펄스전압을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 방식으로 병렬아크의 발생위치와 관계없이, 전원전압의 위상에 따라서 최소 1.74[ms]에서 최대 8.3[ms]에 차단함으로써 기존 차단기 평균 차단시간 50[ms]보다 약 5배 이상 빠른 차단특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지역혁신 인력양성 사업의 연구 결과로 수행되었음.

References

- (1) KESCO, "A Statistical Analysis on the Electric Accident", KESCO Report, Vol. 15, p. 7, 2006.
- (2) George D. Gregory, and Gary W. Scott, "The Arc-Fault Circuit Interrupter : An Emerging product", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp. 928-933, 1998.
- (3) Chunlin Li, Francis Dawson, Hassan Kojori, Chris Meyers, and Edwin Yue, "Arc Fault Detection and Protection-Opportunities and Challenges", SAE Technical Papers, 2003-01-3037, pp. 590-597, 2003.
- (4) George D. Gregory, Kon Wong, and Robert F. Dvorak, "More About Arc-Fault Circuit Interrupters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, p. 1006, 2004.
- (5) Underwriters Laboratories, "UL1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters", 2006.
- (6) V. Dubickas, H. Edin, "High-Frequency Model of the Rogowski Coil With a Small Number of Turns", IEEE

Trans. on Instrumentation and Measurement, vol 56, no. 6, pp. 2284-2288, 2007.

- (7) Kin-Lu Wong, "New structure for a slow-wave Rogowski coil", IEEE Trans. in Plasma Science, vol. 19, no. 6, pp. 1290-1291, 1991.
- (8) 유재근, 이상익, 전정재, "자가용 수동가에서 배전용 및 누전차단기 오동작에 대한 조사연구", 한국조명전기설비학회, Vol. 19, No. 2, pp.87-93, 2005.

◆ 저자소개 ◆

김경석 (吉曠碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 2월 영국 카디프대학 방문교수. 1996년~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수.

E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

지홍근 (池弘根)

1983년 10월 24일생. 2008년 한국해양대학교 전기전자공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 석사과정.

E-mail : adonis1024@hhu.ac.kr

박대원 (朴大元)

1977년 12월 28일생. 2003년 한국해양대학교 전기시스템과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 박사과정.

E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr

김일권 (金一權)

1974년 1월 24일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2008년~현재 (주)케이디파워 중앙연구소 선임연구원.

E-mail : kkony@bada.hhu.ac.kr

김영일 (金榮日)

1952년 10월 27일생. 1972년 건국대학교 문리대. 1983년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1985년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1989년 동 대학원 전기공학과 (박사), 1992년~현재 대림대학 전기과 교수.

E-mail : yikim@dealim.ac.kr

조영진 (趙泳晉)

1972년 4월 20일생. 1998년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 한국해양대학교 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 국립과학수사연구소 연구사.

E-mail : yjchoo@nisi.go.kr