

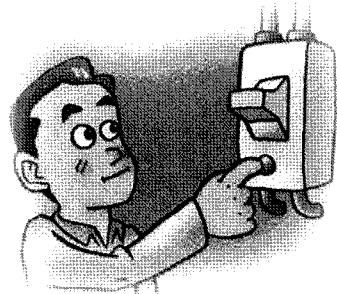
누전차단기(RCD)의 작동원리 및 소손 상태 분석



최 중 석
전주대학교 소방안전공학과 교수

1. 서론

정부는 1967년부터 2차 배전전압을 단상 100V에서 220/380V 3상4선식으로 승압하기 위한 연구를 시작하였다. 전로 전압이 220V가 되어 인체감전의 위험이 크게 증가하기 때문에 정부는 1969년 서울대학교 공과대학 응용과학연구소에 '220/380V 2차 배전계통에 대한 보안대책' 연구를 의뢰하였다. 그 결과 (i) 전기기기는 2중 절연 기기로 하여 외함을 접지하지 않고 사용하며, (ii) 전기기기의 절연열화 또는 인체의 충전부 접촉으로 인한 감전 사고를 방지하기 위하여 전로에는 정격감도전류 30mA, 동작시간 30ms의 누전차단기(RCD 또는 ELB)를 설치하도록 하였다.



1970년대 초에는 상기의 누전차단기를 제작할 기술이 부족하여 이 보다 감도가 낮은 누전차단기를 사용하기 시작하였다. 1978년에 한국전력공사가 천안시의 주택 6,000호를 승압 공사하여 정격감도전류 30mA, 동작시간 0.1sec의 누전차단기를 설치하였다. 1979년에는 전기설비기술기준을 개정하여 정격감도전류 15mA 이하, 동작시간 0.1sec 이하의 누전차단기를 설치하는 경우 전기기기 외함의 접지를 생략할 수 있게 하였다. 1979년에 공업진흥청 고시로 인체감전보호용 누전차단기의 규격이 정격감도전류 30mA 이하, 동작시간 30ms 이하로 개정되었고, 1988년에 전기설비기술기준이 인체감전보호용 누전차단기로 상기의 누전차단기를 채택하였고 현재에 이르고 있다. 그런데 누전차단기가 설치되어 있더라도 사용 환경이 부적절

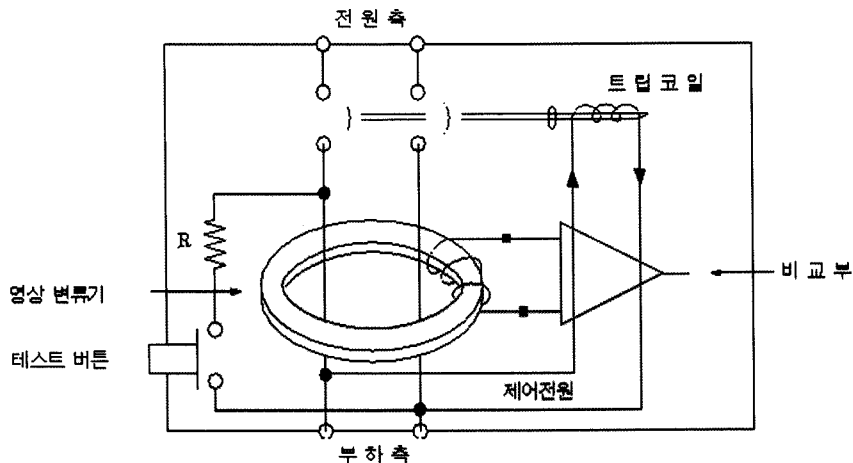
하거나 기기의 근본적인 결함 등이 있을 경우 전기재해를 예방할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 현재 시판되고 있는 누전차단기의 구성 요소를 제시하고 소손된 차단기의 잔해를 보고 작동 상태를 판단하는 기술을 제시하고자 한다.

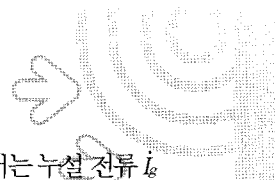
2. 누전차단기의 작동 원리

한국산업규격(KS C 4613)의 누전차단기에 대한 규정은 60Hz, 교류 600V 이하인 전로의 지락보호에 사용하는 정격전류 2,500A 이하의 전류동작형 누전차단기를 대상으로 한다. 이에 따르면 누전차단기는 전기방식 및 극수에 따라 단상 2선식 2극, 단상 3선식 3극, 3상 3선식 3극, 3상 4선식 4극으로 구분하고, 보호목적에 따라 지락보호전용, 지락보호 및 과부하보호 겸용, 지락보호와 과부하보호 및 단락보호 겸용으로 구분한다. 또한, 동작시간에 따라 고감도(정격감도전류 30mA 이하), 중감도(300mA 초과 1,000mA 이하), 저감도(1,000mA 초과 20A 이하)로 구분하며, 전원과 부하와의 접속방식에 따라 단자접속식, 끼움접속식 등으로 구분한다.

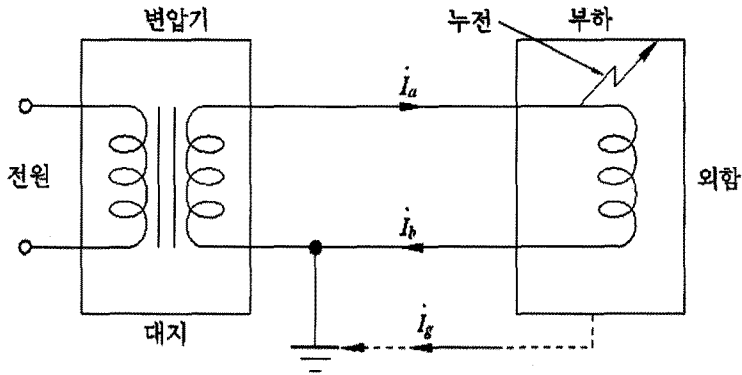
단상 3선식으로 전원을 공급받는 주택에서 주로 사용하는 정격전류 30A, 최소감도전류 30mA, 최소동작 시간 0.03sec의 저압용 전류동작형 전자식, 열동형 과부하겸용 누전차단기는 정격전류의 1배 전류에서 동작하지 않고 1.25 또는 2배의 전류를 통할 경우 각각 60분 또는 2분 이내에 동작해야 한다. 누설전류를 검출하기 위한 영상변류기(Zero Phase Current Transformer; ZCT)의 출력을 감전안전 한계에서 정해진 기준치(基準値)와 비교하는 비교부(比較部), 비교치의 출력에 의해 전로를 차단하는 차단부(遮斷部)로 구성되며 기본구조는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 전류동작형 누전차단기의 구성도



(그림 2)는 전기 설비 누전 경로를 설명하기 위하여 나타낸 것으로 누전이 없는 상태에서는 누설 전류 I_b 는 흐르지 않고, 선전류 I_a 와 I_b 은 같은 값이다. 그러나 회로에 누전이 발생하면 $I_b = I_a - I_g$ 가 되어 I_b 는 I_a 보다 작아지게 되어 검지기에서 검지된 신호를 증폭하여 회로를 차단하거나 경보를 하게 되어 있다.



(그림 2) 회로의 누설 전류 경로

전류동작형 누전차단기는 차단동작 방법에 의해 영상변류기의 출력신호를 변환하지 않고 사용하는 電磁式(electromagnetic type)과 반도체 증폭기에 의해 증폭하여 사용하는 電子式(electronic type)으로 구분하며 이들의 특징을 비교하면 <표 1>과 같다.

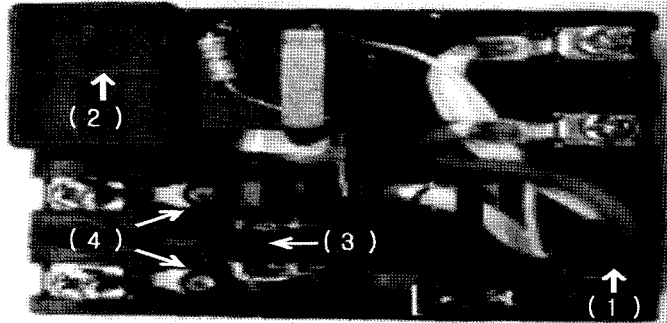
<표 1> 누전차단기 트립기구 동작 방법에 의한 비교

	電磁式(electromagnetic-type)	電子式(electromagnetic-type)
구 성	영상변류기의 출력을 직접 트립 기구에 보내 회로를 차단하는 방식	영상변류기의 출력을 증폭기에 보내 증폭시킨 후 트립 코일을 작동하여 차단하는 방식
장 점	<ul style="list-style-type: none"> 극간 절연저항의 측정 가능 결상시에도 지락전류가 흐르면 동작함 제어전원이 불필요 서지에 의한 오동작, 고장이 없음 온도의 영향이 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 고감도, 대용량의 제작이 가능 소형화, 시연형, 반한시형으로 제작가능 감도전류의 안정성이 우수 동작시간의 설정이 용이 반도체 부품의 물드화에 의해 성능이 안정
단 점	<ul style="list-style-type: none"> 고감도 릴레이의 환경영향이 많음 고감도, 대용량의 제작이 어려움 동작시간의 설정이 어려움 영구자석의 흡착력으로 가동철편을 흡착하고 있으므로, 이물질이 부착 되면 안정성이 저하됨 	<ul style="list-style-type: none"> 전원이 필요 없어 개폐시나 뇌 발생 시의 서지전압 등의 영향을 많이 받음 제어전원이 필요함 결상시(무전압, 저전압)에서는 지락이 발생해도 동작하지 않음^{주1)} 온도의 영향을 많이 받음

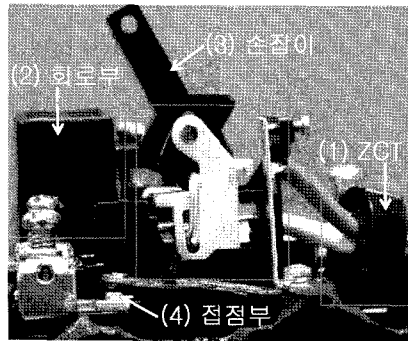
주1) 3상용은 대책을 세운 것도 있음

3. 누전차단기의 실제 사진 및 분석

〈그림 3〉는 누전차단기의 평면도를 나타낸 것이고, 〈그림 4〉는 측면도를 나타낸 실제사진이다. 제품의 구성은 영상변류기, 회로부, 작동손잡이, 기구부, 접점부 등으로 되어있고 일정한 형태의 페놀수지 용기에 수납되어 있다.



〈그림 3〉 누전차단기의 평면도



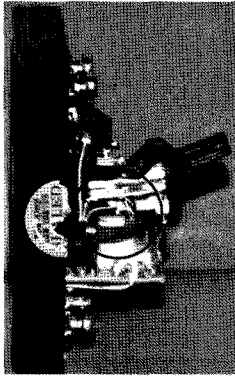
〈그림 4〉 누전차단기의 측면도

〈그림 5〉는 누전차단기를 수직으로 설치하고, 덮개를 제거한 상태의 실제사진이다. 작동손잡이는 커짐(ON)의 위치 즉 상부를 향하고 있고 내부 기구부의 ㄷ자형 작동핀(○)이 아래쪽으로 기울어져 있다. 대부분의 누전차단기의 외함 및 작동손잡이는 페놀수지를 사용하여 제작하기 때문에 열적 스트레스뿐만 아니라 전기적 스파크에 의해 손상이 쉽게 되는 특징이 있다. 페놀수지는 열경화성 물질이며 약 450~550℃의 열에 탄화되는 성질이 있다. 그리고 한번 변형이 발생되면 최초의 상태로 복원이 불가능하고 전기적 특성도 현저하게 떨어지는 단점이 있지만 가격이 저렴하여 많은 기기의 재료로 사용되고 있다.

〈그림 6〉은 일반화염에 의해 소손된 누전차단기의 실제사진을 나타낸 것으로 외형만으로 판단할 때 작



손잡이는 물론 내부에 수납되어 있는 구성 부품의 식별이 불가능하다. 따라서 사고 당시 누전차단기를 통해서 전원이 공급되었는지 아닌지 구분이 쉽지 않다. 그런데 기구부의 ㄷ자형 작동핀(○)의 용융온도는 대략 1,500℃ 이상으로 일반화염의 최성기 온도 약 1,200℃ 보다 높기 때문에 변형 또는 용융이 발생하지 않는다. 그러므로 기구부의 ㄷ자형 작동핀(○)의 방향이 어느 쪽을 향하고 있는가의 분석을 통해서 누전차단기가 켜짐(ON) 상태에 있음을 판정할 수 있다.

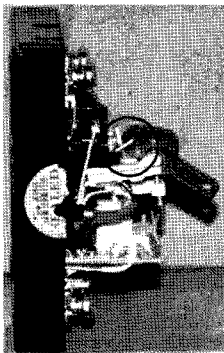


〈그림 5〉 정상제품(켜짐)

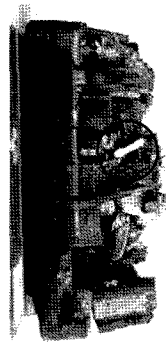


〈그림 6〉 소손제품(켜짐)

〈그림 7〉은 누전차단기의 꺼짐 상태를 나타낸 실체사진이다. 작동손잡이는 아래를 향하고 있으나 내부 기구부의 ㄷ자형 작동핀(○)이 위쪽으로 기울어져 있음을 알 수 있다. 〈그림 8〉은 일반화염에 의해 소손된 누전차단기의 실체사진을 나타낸 것으로 대부분의 수지 및 PCB 등은 소손되어 형태의 식별이 불가능하다. 그런데 기구부의 ㄷ자형 작동핀(○)의 형태 분석에서 핀의 방향이 위쪽을 향하고 있는 것으로 보아 사고 당시 누전차단기는 꺼짐(OFF) 상태에 있었음을 알 수 있다. 즉 화재로 소손된 누전차단기라 하더라도 탄화물에 물리적인 스트레스를 주지 않고 수거하여 분석하면 사고 당시의 작동 상태의 판정이 가능하다.

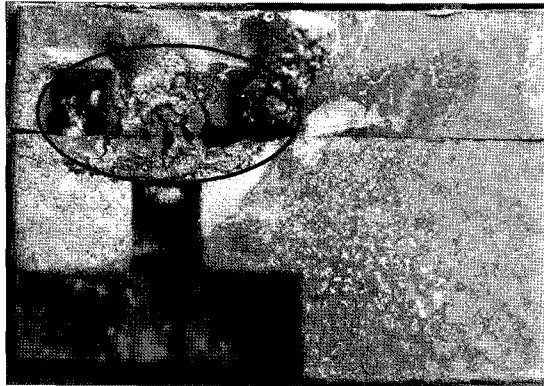


〈그림 7〉 정상제품(꺼짐)



〈그림 8〉 소손제품(꺼짐)

〈그림 9〉는 누전차단기 전원부의 극간 사이에 이물질이 유입되어 트래킹에 의해 소손된 실체사진을 나타낸 것이다. 220V 저압용 누전차단기의 두 전극 사이의 간격은 약 19mm로 안전한 이격거리를 유지하고 있으나 물기, 먼지 등이 유입되어 표면에 누설전류가 흐르면 최단거리의 경로를 형성하며 트래킹(tracking)은 더욱 활성화된다. 이와 같은 현상이 일정 시간 반복적으로 발생하면 열의 크기는 커지고 절연이 파괴되고 화염을 동반하는 사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 누전차단기가 이물질에 노출되지 않는 설치 및 관리가 요구된다.



〈그림 9〉 트래킹에 의해 소손된 누전차단기

4. 결론

저압용 고감도형 누전차단기의 구성 요소 및 실체사진 등을 제시하고 소손된 누전차단기의 작동 상태를 판정하는 방법을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 한국산업규격(KS C 4613)의 누전차단기에 대한 규정은 60Hz, 교류 600V 이하인 전로의 지락보호에 사용하는 정격전류 2,500A 이하의 전류동작형 누전차단기를 대상으로 한다. 또한, 동작시간에 따라 고감도(정격감도전류 30mA 이하), 중감도(300mA 초과 1,000mA 이하), 저감도(1,000mA 초과 20A 이하)로 구분하며, 전원과 부하와의 접속방식에 따라 단자접속식, 꺾음접속식 등으로 구분한다.
- (2) 단상 3선식으로 전원을 공급받는 주택에서 주로 사용하는 정격전류 30A, 최소감도전류 30mA, 최소 동작시간 0.03sec의 저압용 전류동작형 전자식, 열동형 과부하검용 누전차단기는 정격전류의 1배 전류에서 동작하지 않고 1.25 또는 2배의 전류를 통할 경우 각각 60분 또는 2분 이내에 동작해야 한다.
- (3) 누전차단기가 일반화염에 의해 소손되었을 경우 기구부의 D자형 작동편이 어느 쪽을 향하고 있는지를 확인함으로써 사고 당시의 차단기의 작동 상태 분석이 가능하다. 또한, 차단기 전원부의 극간 사이에 이물질이 유입되면 트래킹에 의해 화재가 발생할 수 있음을 알 수 있다.