

전기 기본이론

(Basic Theories of Electrical Engineering) - IX

9. 전기안전

글.
이재언 전기기술사 사이버학원 원장

연재목록

1. 전류
2. 전기와 자기
3. 임피던스
4. 발전기
5. 전동기
6. 변압기
7. 전력
8. 접지
9. 전기안전
10. 노이즈
11. 무정전 전원설비

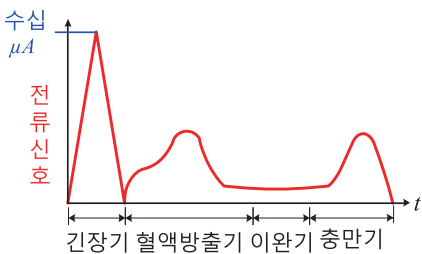
사람이 전기에 감전되어 사망하거나 화상을 입을 수도 있고, 전기로 인한 화재가 발생할 수도 있다. 즉, 전기안전 측면에서 검토해야 할 사항은 감전과 전기화재 두 가지이다. 감전은 인체를 통해서 전류가 흐르기 때문에 발생하는 것이고, 전기화재는 누전 또는 전기회로의 단락이 원인이 되어 발생한다.

인체는 정교한 전자기기이다.

사람의 몸은 지극히 정교한 하나의 **전자기기**이다. 인체가 전자기기라고 하는 것은 인체의 모든 기능이 전류신호에 의해서 작동한다는 것을 말한다. 사람의 심장이 뛰는 것은 심장이 독립적으로 뛰는 것인가? 아니다. 심장은 인체의 자율신경을 컨트롤 하는 **숨골**로부터 그림과 같은 전류신호가 심장에 한 번 전달될 때마다 심장이 한 번씩 뛰는 것이다. 결국 심장은 숨골의 명령에 따라 뛰는 것이다. 그런데 이 전류신호의 크기가 수십 μA 정도로 극히 작은 전류신호이다.

심장뿐 아니라 사람이 잘 때도 숨을 쉬어야 하고, 위장이 움직여서 저녁 먹은 것을 소화시켜야 한다. 이 모든 것들이 모두 **숨골**의 명령에 따라 동작하는 것이다.

개미가 사람의 발가락을 물었을 때 사람은 개미가 무슨 순간 발가락이 따끔한 것을 머리에서 느낀다. 이때 무엇이 발가락에서 머리의 **큰골**까지 따끔한 느낌을 전달한 것인가? 이 또한 수십 μA 정도의 전류신호이다.



음파가 공기를 통해서 귀의 고막에 도달하면 고막이 진동하고 이 진동이 **전류신호**로 바뀌어 **큰골**에 전달되어 사람이 소리를 들을 수 있는 것이다.

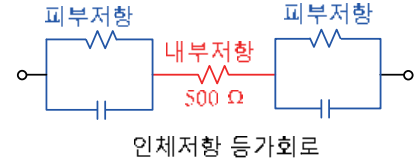
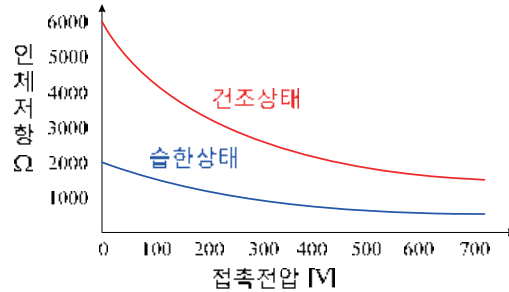
사람이 눈을 뜨고 어떤 물건을 볼 때, 눈의 망막에 맺힌 물체의 상을 수없이 많은 **망막세포**들이 즉시 자신에게 비친 빛의 밝기, 색깔 등을 **전류신호**로 바꾸어서 **큰골**에 전달해 주기 때문에 사람이 물건을 볼 수 있는 것이다. 이러니까 인간의 몸은 **정교한 전자기기**라고 아니할 수 없는 것이다.

인체저항

인체저항이란 사지의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지의 저항이다. 예를 들어 오른손 끝에서 왼발 끝까지의 저항이다. 인체저항은 피부의 건조상태와 인체에 가해지는 전압에 따라 변화하는데, 피부가 건조한 경우와 습한 상태의 경우에는 인체저항이 3배까지 차이가 나고, 가해지는 전압이 높아질수록 인체저항은 감소하는데 이를 그래프로 보면 다음 왼쪽 그림과 같다.

인체저항의 등가회로는 다음 오른쪽 그림과 같은데, 인체의 내부저항은 $500[\Omega]$ 으로 일정하며, 피부저항은 피부가 완전히 젖

어 있을 때는 매우 작아지므로 이때의 인체저항은 500[Ω]으로 볼 수 있다. 물 묻은 손으로 전기 콘센트 등을 만지지 말라는 것은 인체가 물에 젖어 있으면 이와 같이 인체저항이 감소해서 감전되기 쉬운 상태가 되기 때문이다. 보통 상태에서 인체저항은 1000[Ω] 정도로 본다.



감전

감전이란 어떤 원인으로 인체를 통해 전류가 흐르기 때문에 생기는 것이다. 이렇게 인체를 통해 외부로부터 인체에 흐르는 전류를 **감전전류**라고 하는데 감전전류는 인체의 기능을 하는 수십 μA 의 인체 내부의 신호전류보다 매우 큰 전류이다. 도체이기 때문에 인체를 통해 전류가 흐르면 인체 내부의 저항에서

$$P = I^2 R t [J] = 0.24 I^2 R t [cal]$$

의 열이 발생해서 인체의 온도를 상승시킨다. 예를 들어 인체에 3000[V]의 전압이 1분(60초)간 인가되었을 때 흐르는 전류와 발생하는 열량은 다음과 같이 계산된다.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{3000}{1000} = 3[A]$$

$$P = 0.24 I^2 R t = 0.24 \times 3^2 \times 1000 \times 60 = 12,960[cal]$$

이렇게 발생하는 열로 인해 화상을 입거나 심하면 사망하게 된다.

인체를 통해 흐르는 전류의 크기는 전압이 높을수록 커진다. 예를 들어 220[V]에 감전되는 경우는 110[V]에 감전되는 경우의 2배 이상의 전류가 인체를 통해 흐른다. 그런데 왜 우리나라에서는 110[V]를 쓰지 않고 220[V]를 사용하는가? 그 이유는 전력손실을 감소시키기 위한 것이다. 예를 들어 100[kW]의 전력을 단상 110[V] 전압으로 배전할 때 배전선로의 저항이 0.01[Ω]이라고 가정하면 전류의 크기와 전력손실은

$$I_{110} = \frac{100 \times 10^3}{110} = 909.1[A], P_{\ell 110} = I^2 R = 909.1^2 \times 0.01 = 8264.6[W] = 8.264[kW]$$

220[V] 전압으로 배전할 때 배전선로의 저항이 0.01[Ω]이라고 가정하면 전류의 크기와 전력손실은

$$I_{220} = \frac{100 \times 10^3}{220} = 454.5[A], P_{\ell 220} = I^2 R = 454.5^2 \times 0.01 = 2065[W] = 2.065[kW]$$

결국 220[V] 전압을 사용하면 110[V]에 비해 전력손실을 1/4로 감소시킬 수가 있다.

심실세동

사람이 감전으로 사망하는 대부분의 원인은 앞에 설명한 화상보다는 심실세동에 의해 사망한다. **심실세동**이란 전기쇼크로 인해서 심장이 정상적으로 박동하지 못하고 부르르 떨어 버려서 혈액순환을 시켜주지 못하게 되는 상태를 말한다.

사람이 감전되었을 때 감전전류의 극히 일부라도 심장 부근을 통해 흐르면 심장은 숨골에서 오는 수십의 신호전류를 받을 수가

없게 된다. 이는 마치 사람이 조용히 음악을 듣고 있는데 옆에서 대포터지는 소리가 나면 음악을 들을 수 없는 것과 같다. 심장이 숨골로부터 전류신호를 받지 못하면 심장은 어찌할 바를 모르고 부르르 떨어버리게 되는데 이것이 **심실세동**이다. 문제는 심실세동이 되면 혈액순환이 정지된다는 점이다.

인체세포 중에서 팔다리 등에 있는 세포는 산소공급이 중단되어도 최장 24시간까지 견딜 수 있다고 한다. 그러나 뇌세포는 산소공급이 중단되면 5분~10분 사이에 모두 죽어버린다고 한다. 따라서 심실세동이 되어 있는 상태에서 5분~10분 정도만 지나면 사람은 사망하게 된다.

감전전류의 크기에 따른 인체반응

감전전류의 크기에 따른 인체반응은 다음과 같다.

매크로 쇼크	Macro Shock는 정상인이 통상의 감전에서 심실세동을 일으키는 전류에 의한 감전으로 수십~수백 mA 정도의 감전전류를 대상으로 한다
마이크로 쇼크	Micro Shock는 병원의 환자에게 있어서 전류의 유출·유입 점의 어느 하나가 심장 부근에 접하고 있는 경우의 감전을 말하는데, 이때 심실세동의 초기값은 $10\mu A$ 정도이다
심실세동전류	인체를 통과하는 전류치가 수십 mA가 되는 시간이 수초 정도가 되면 심장이 경련을 일으켜 심장 박동이 멎게 되는데 이때의 전류치를 심실세동 전류라고 한다. 미국의 Dalziel은 심실세동전류의 한계 값으로 다음 식을 제안하였다 $I = \frac{116}{\sqrt{t}} [mA]$ 즉 감전시간이 1초이면 116 [mA], 4초이면 58[mA]의 전류가 인체를 통해 흐르면 심실세동이 된다는 것이다. 대부분의 국가에서는 안전기준으로 Dalziel의 식을 적용하고 있다
경련전류	사람이 도체를 잡은 상태에서 전류를 증가시키면 5~20mA 정도에서 경련을 일으키고 도체를 놓을 수 없는 상태가 된다. 이를 불수전류 라고도 하는데 이에 대해 도체를 놓을 수 있는 정도의 전류를 가수전류 라고 한다
감지전류	1mA 정도의 전류가 인체에 흐르면 대부분의 사람들은 자극을 느끼게 되는데 이를 감지전류 라고 한다

전기화재의 발생원인

과전류에 의한 발화

저항 $R [\Omega]$ 의 전선에 전류 $I [A]$ 가 $t [sec]$ 동안 흐르면 Joule의 법칙에 의하여

$$H = I^2 R t [J] = 0.24 I^2 R t [cal]$$

의 열이 발생하여 전선을 가열하여 전선의 온도가 상승한다. 이때 발생하는 열과 방열되는 열량이 평형되는 점에서 전선의 온도가 결정된다. 전선의 온도상승이 정상상태에서는 화재의 원인이 될 수 없으나, 과전류가 흐르거나 회로의 고장 등으로 인해 설계치 보다 큰 전류가 흐르면 과전류로 인해서 발생하는 열이 발화원으로 진전될 수 있다. 전선의 저항은 온도가 올라가면 다음 식에 따라 저항이 커진다.

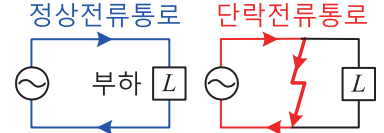
$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)]$$

식에서 R_1 은 초기 저항, R_2 는 온도가 변화한 후의 저항, T_1 은 초기온도, T_2 는 온도가 변화한 후의 온도, α 는 물질의 **저항온도**

계수이다. 따라서 전선의 온도가 상승하면 저항이 커지고 저항이 커지면 발열량이 커지고 발열량이 커지면 온도는 더욱 상승하고...하는 악순환을 거듭하게 된다.

단락에 의한 발화

전선이나 전기기기에 있어서 절연체가 전기, 기계적 원인으로 파괴되면 전류의 통로가 바뀌어서 단락이 일어난다. 단락전류는 배선의 길이, 굵기, 전원의 단락용량 등에 따라 다르나 대체로 정격전류의 5~30배가 된다.



이러한 단락전류는 정격전류에 비해 매우 큰 대전류이므로 이로 인해 발생하는 열이

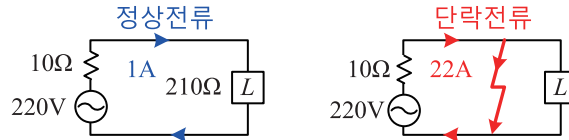
전선피복을 태우거나 주위의 목재, 종이, 비닐 등의 인화물질을 착화시키게 된다. 전원측의 발전기, 변압기, 송배전선로 등도 모두 임피던스를 가지고 있기 때문에 모든 전원에는 **전원 임피던스**가 있다. 그런데 전원임피던스는 부하임피던스에 비해 매우 작다. 예를 들어 다음 왼쪽 그림과 같이 220[V]전원이 219[Ω]의 부하저항에 접속되어 있는 경우, 전원 임피던스가 1[Ω]이라면 이때 흐르는 전류는

$$I = \frac{E}{R} = \frac{220}{10 + 210} = 1[A]$$

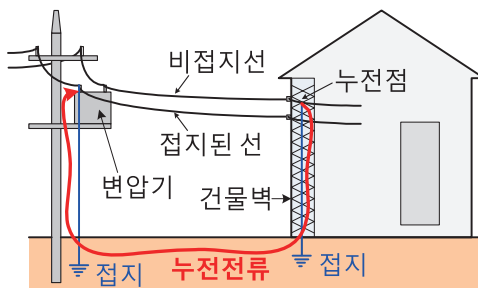
의 정상전류가 흐르지만, 오른쪽 그림과 같이 단락되면 회로에는 10[Ω]의 전원저항뿐이므로 전류는

$$I = \frac{E}{R} = \frac{220}{10} = 22[A]$$

가 되어 정상전류의 22배의 단락전류가 흘러서 이로 인해 발생하는 줄열에 의해 화재가 발생한다.



누전에 의한 발화



누전이란 전기의 정상적인 통로 이외의 곳으로 전류가 흐르는 현상이다. 엄밀한 의미로는 완전 절연체는 지구 상에 존재하지 않으니까 극소 전류라도 누전은 항상 있게 마련이다. 그러나 어느 정도 이하의 누전은 안전상 지장이 없다고 판단하여 문제시하지 않는다. 예를 들어 저압전류의 경우 최대 수전전류의 1/2000 이하의 누전은 문제시되지 않는다. 일반 가정에 들어오는 단상전원의 2선 중에서 하나는 접지된 선이고, 다른 하나는 접지가 되지 않은 비접지선이다.

그림과 같이 비접지선의 절연이 파괴되어 건물 벽 속의 철근 또는 메탈라스 등과 접촉되는 경우 누전전류는 누전지점으로부터 건물의 벽체, 대지 등을 통해서 접지 개소로 흘러간다. 누전전류가 커서 충분한 Joule 열이 발생할 때 근처에 가연물이 있으면 인화되어 화재가 발생한다.

접속부의 과열에 의한 발화

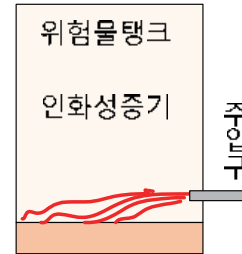
두 도체의 접촉부에는 전류의 흐름이 접촉면에 한정되므로 전류의 통로가 좁아지는데 따른 집중저항과 접촉자 재료의 산화물 유화물 등의 화합물이나 흡착가스의 피막을 통해서 전류가 흐르므로 발생하는 경계저항의 두 가지 저항이 존재하게 되는데 이를 합해서 **접촉저항**이라고 한다.

접촉저항을 계산식에 의해서 구하는 것은 어려운 일이고, 계측상으로 접촉부분에서 전압강하가 관측되기 때문에 이 전압강하를 전류로 나눈 값을 접촉저항이라 한다. 전선과 전선, 전선과 단자, 또는 접촉단자 등에서 접촉상태가 불완전하면 접촉저항이 커져서 발열하여 화재가 발생하기도 한다. 가정에서 많이 사용하는 콘센트에서도 접촉불량으로 발열하여 화재가 발생하는 경우도 있다.

정전기에 의한 발화

정전기는 물질의 마찰에 의하여 발생하는 것으로서, 물체에 대전되어있던 정전기가 방전할 때 발생하는 정전 스파크에 의해서 주위의 가연성가스 및 증기가 인화하게 된다.

정전기는 고체, 액체, 기체상의 어떤 물질에서도 발생한다. 위험물 취급 시에 특히 주의해야 할 것은 액체 위험물 이송 시에 발생하는 정전기이다. 예를 들어 그림과 같이 위험물 탱크를 충전할 때 위험물은 배관 내에서도 관벽과의 마찰에 의해서 대전되지만 유면에서의 마찰에 의해서도 대전된다. 따라서 유면이 주입구의 높이를 지날 때까지는 특히 유의해서 유속을 감소시켜 $1m/sec$ 이하로 해야 한다.



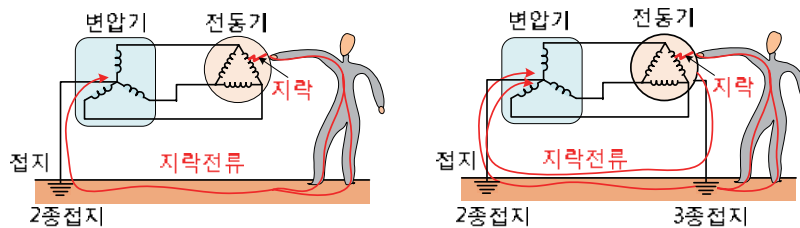
낙뢰에 의한 발화

낙뢰는 정전기가 대전된 구름과 대지 간의 방전현상이다. 낙뢰가 발생하면, 직격뢰에 의한 이상전압의 파고치는 수백 [kV]가 되고 그때의 전류치는 수만[A]에 이르는 것이 보통이므로, 전선로에 이상전압이 유기되어 절연을 파괴시키고 때로는 대전류로 인하여 화재의 원인이 되기도 한다.

전기안전에 대한 대책

보호접지

다음 그림과 같이 전동기 내부에서 충전부의 절연이 파괴되어 충전부가 외함에 전기적으로 접촉되면 지락이 된 것이다. 이렇게 지락이 발생한 경우 왼쪽 그림과 같이 전동기가 접지되어 있지 않으면 지락전류(누전전류)가 모두 인체를 통해 흘러서 감전의 위험이 크다. 그러나 오른쪽 그림과 같이 접지가 되어 있으면, 전류는 저항 크기에 반비례해서 흐르므로 인체저항(1000Ω 이상)은 3중 접지저항(100Ω 이하) 보다 매우 크기 때문에 대부분의 지락전류가 접지선을 통해 흐르게 되므로 감전에 의한 위험이 경감된다.



예를 들어 지락전류가 2[A]라고 하고, 인체저항이 1000[Ω], 3중 접지저항이 100[Ω]이라고 하면 3중 접지가 되어 있지 않은 상태에서는 2[A] 모두가 인체를 통해 흐르겠지만, 3중 접지가 되어있는 경우에 인체를 통해 흐르는 전류와 접지선을 통해 흐르는 전류는

$$\text{인체를 통해 흐르는 전류 } I_1 = 2 \times \frac{100}{1000+100} = 0.182 [A]$$

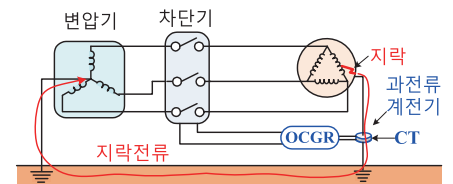
$$\text{접지선을 통해 흐르는 전류 } I_2 = 2 \times \frac{1000}{1000+100} = 1.818 [A]$$

가 되어 인체를 통해 흐르는 전류가 접지하지 않은 경우의 1/10 이하로 감소한다.

이와 같이 감전위험을 줄이기 위해서 행하는 접지를 **보호접지**라고 하는데, 전기설비 기술기준에서는 이를 **제3종 접지**라고 한다. 보호접지를 하는 것 이외에도 손에 **절연고무장갑**을 끼거나, 발에 **절연고무장화**를 신거나, 또는 바닥에 **고무판**을 깔고 사람이 그 위에 서 있도록 하면, 인체저항이 크게 증가하는 결과가 되어, 인체를 통해 흐르는 전류가 극히 적어서 감전위험을 거의 완벽하게 방지할 수 있다.

지락 과전류 차단방식

그림과 같은 중성점 직접접지 방식에서는 지락시 접지선에 큰 전류가 흐르므로 이를 지락 과전류 계전기(OCGR: Over Current Ground Relay)로 검출해서 전원회로를 차단하는 방식이다. 지락 과전류 계전기는 그림과 같이 변류기(CT: Current Transformer)와 과전류 계전기의 조합으로 구성된다. CT가 CT를 관통해서 흐르는 전류의 크기를 검출해서 OCR에 전달해 주면 OCR은 전류의 크기가 설정된 값 이상이 되면 접점을 닫아서 차단기가 트립되도록 한다. 차단기가 트립된다는 말은 차단기 접점이 열려서 그 회로에 흐르는 전류를 차단하는 것을 말한다.

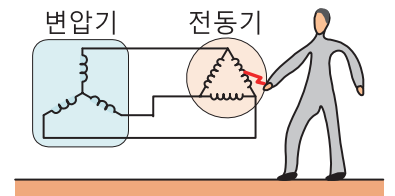


절연변압기를 사용하는 방식

절연변압기는 변압기 중성점을 대지에 접지하지 않은 변압기를 말한다.

전류는 전류가 흐를 수 있는 폐회로가 구성되어야 흐를 수 있다.

절연변압기를 사용했을 때 전동기 등의 부하에서 지락이 발생해도 변압기가 절연되어 있으므로 전류가 흐를 수 있는 통로가 없어서 지락전류가 흐를 수 없으므로 지락된 전동기를 사람이 손으로 만져도 안전하다. 이러한 절연변압기 방식은 병원이나 수영장 등과 같이 감전위험이 큰 장소에 많이 사용된다.

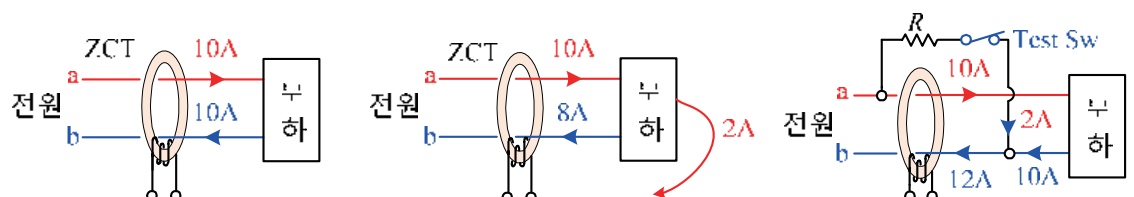


누전차단기 또는 누전경보기를 사용하는 방식

누전차단기(ELCB: Earth Leakage Circuit Breaker)는 영상변류기(ZCT: Zero-phase Current Transformer)를 사용해서 누전을 검출한다.

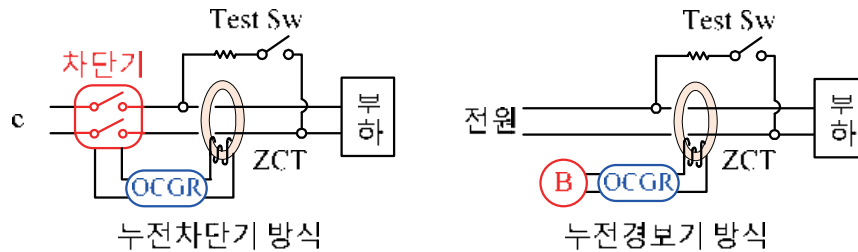
다음 왼쪽 그림과 같이 a선에서 부하로 흘러들어 가는 전류와 b선에서 흘러나오는 전류가 같으면 a선에 흐르는 전류가 만드는 자속과 b선에 흐르는 전류가 만드는 자속의 크기는 같고 방향이 반대방향이기 때문에 서로 상쇄되어 0이 되므로 ZCT 철심에는 자속이 생길 수 없으므로 ZCT 2차 코일에는 전압이 유기기 되지 않는다.

그러나 가운데 그림에서와같이 a선으로 10[A]가 흘러들어 갔는데 부하에서 누전되어 2[A]가 대지로 흘러나가 버리면 b선으로 돌아올 전류는 8[A]가 되므로 각 선에 흐르는 전류가 2[A] 차이가 나서 이 2[A] 전류가 만드는 자속은 상쇄될 수 없으므로 ZCT 2차 코일에는 패러데이의 전자유도법칙에 의한 역기전력이 유기기되어 전류가 흐른다.



앞장의 오른쪽 그림은 누전차단기의 Test Switch를 보인 것이다. Test Switch는 누전차단기가 제대로 동작하는지를 테스트 해보기 위한 것이다. Test Switch를 눌러서 테스트 스위치를 통해 2[A]의 전류가 흐른다면 a선에 흐르는 전류는 10[A]인데 b선으로 흘러나오는 전류는 10+2=12[A]가 되어 두 선에 흐르는 전류에 차이가 생기므로 이 차이에 의해서 앞에 설명한 원리에 따라 ZCT 2차 코일에 전압이 유기되어 누전차단기가 동작한다.

보호방식에서 **누전차단기 방식**은 다음 왼쪽 그림과 같이 ZCT 2차 코일에 전압이 유기되면 이 전압에 의해 OCGR이 동작하도록 하고, OCGR 이 차단기의 트립 메커니즘을 동작시켜 회로를 차단하는 방식이다.



누전이 발생했다고 해도 이를 무조건 즉시 차단하는 것이 오히려 더 위험한 경우도 있다. 예를 들어 어린이 대공원의 롤러코스터 시스템에 누전이 발생했다고 해서 전원을 즉시 차단해 버리면 롤러코스터에 타고 있던 많은 사람들이 다치는 사고가 날 수도 있고, 병원의 수술실에서 대수술을 하고 있는데 그 병원에서 누전이 된다고 해서 모든 전원을 즉시 차단해 버리면 수술받던 환자가 사망할 수도 있다.

그래서 누전이 발생했을 때 전원을 즉시 차단하지 않고 경보만 울리도록 한 것이 **누전경보기**이다. 누전 경보기는 누전 시에 벨이나 부저를 울려서 담당자에게 누전된 사실을 알려주지만 하는 것이다.

정전기에 대한 보호

모든 물질은 일반적으로 정과 부의 등량의 전하를 가지며, 평상시에는 전기적으로 중성이다. 그러나 전기적 중성상태에 있는 두 가지의 상이한 물질이 접촉하면 접촉면에서 전하의 이동이 일어나 한쪽의 물체에는 정(+)의 전하가, 다른 쪽에는 부(+)의 전하가 모이게 되어 계면에서 전기 이중층을 형성하는데 여기에 외력이 가해져서 두 물질을 분리시키면 정전기가 발생된다.

정전기에 대한 보호방식으로는 접지, 전하의 완화 등의 방법이 있다. 인체나 물체에 정전기가 발생했을 때 인체나 물체를 접지하면 정전기가 대지로 방류되어 정전기에 의한 화재위험을 방지할 수 있다.

대전된 전하는 영원히 그대로 있는 것이 아니고 시간 경과와 더불어 완화된다. 초기 대전된 전하량을 Q_0 [C] 이라 하고, 시간 t [sec]가 지난 후에 남아있는 전하량을 Q [C]이라고 하면, 잔류 전하량 Q [C]은 다음식으로 계산된다. 식에서 R 과 C 는 정전기로 대전된 물체와 대지 사이의 저항(Ω)과 정전용량(Farad)이다.

$$Q = Q_0 \exp\left[-\frac{1}{RC}t\right]$$

따라서 주입, 교반, 하역 등 정전기를 발생시키는 작업을 한 후에는, 다음 작업을 하기 전에 어느 정도의 시간간격을 둘 필요가 있다. ⚠