

漏電遮斷機의 設計와 製作

Ground Fault Circuit Interrupter Design

薛 承 基* · 指導教授 朴 旻 鎬**
(Seung-Gi Sul, Min-Ho Park)

Abstract

The hazards of electrical shock are well known. but the conventional ground fault circuit breakers did not provide the satisfactory safety for human body.

Thus this paper considers the standards of performance that they must meet, and describes the new tripping mechanism the operations and the improvements.

The experiment et new G.F.C.I. indicates maximum tripping time 25msec minimum sensitive leakage current 25mA and maximum nonoperation leakage current 15mA

目 次

- I. 서 론
- II. 설계시 고려할 사항
 - 1. 누전차단기의 형식
 - 2. 보호의 대상과 그에 따른 감도전류, 차단시간의 결정
 - 3. 외부 잡음에 대한 대책
- III. 제이트 제어회로의 설계 및 시험
- IV. 차단기구의 설계와 실험
- V. 차단 실험 및 부동작 실험
- VI. 회로의 변경 및 개선
 - 1. 써어지와 스카이크성 잡음, 부하전류의 급증에 관한 대책
 - 2. 감도전류의 조정과 증폭
 - 3. 차단시간의 단축
- VII. 결 론

I. 서 론

최근 가정용 전기 기기의 폭넓은 사용과 함께 감전, 누전사고의 발생 위험이 크게 증대되고 있고, 배전전압의 220Volt승압과 함께 감전시 치명적인 사고를 불러일으킬 수 있게 되었다. 이에 따라 누전전류가 설정

치 이상임을 탐지했을 때는 신속히 전원을 차단하는 장치가 요망되고 있는데, 이러한 장치는 인간의 생명을 다루기 때문에 신뢰성, 신속성, 경제성이 특히 요구된다. 본 논문에서는 간단하면서도 동작이 확실하고 신속한 차단이 가능한 누전차단기를 설계하고 그 결과를 분석하였다. 한 통계에서는 누전차단기를 설치하면 가정에서 일어나는 감전사고의 80%를 방지할 수 있다고 한다(ref. [1])

지락사고에 대한 보호는 그 대상과 전류의 크기에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다(ref. [3])

1) 전기기기의 지락전류에 대한 보호—대개한 지락전류로부터 전기기기의 손상을 방지하기 위해, 대개 수 암페어의 감도를 가지는 차단기를 사용한다.

2) 인체의 보호를 목적으로 한 차단기는 한국공업규격에서는 감도전류 30mA 최대차단시간 100msec로 요구하고 있으나 미국에서는 A급 5mA, B급은 20mA로 규정하고 있으며, 차단시간은 30m sec로 규정되어 있다. (ref. [3])

3) 병원에서 전기의료기구의 사용증가와 더불어 전기 충격에 대해 환자와 병원직원을 보호하기 위한 차단장치로 대개 μA 단위의 감도를 가진다.

본 논문에서는 두번째 경우를 위주로하여 체중 10kg

* 正會員 : 서울大 大學院 電氣工學科 在學

** 正會員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

의 어린이에 대한 보호까지도 고려하여 설계하기로 한다.

II. 설계시 고려할 사항

1. 누전차단기의 형식

누전차단기의 형식은 누전전류의 탐지방법에 따라 전류동작방식과 전압동작방식으로 나누어지는데 전압동작방식은 보조접지선이 필요하므로 설치가 불편하여 대개 전류동작방식이 사용된다. 또 차단기구의 에너지원에 따라 직접식, 간접식이 있는데 직접식은 차단기의 모든 에너지를 누전전류, 그 자체로부터 얻고, 간접식은 누전전류의 에너지를 축적 이용하거나 누전전류를 별도의 전원을 이용하여 증폭 이용한다. 직접식은 간접성과 신뢰성의 장점이 있으나 고투자율의 재료가 필요하고, 동작감도전류의 한계가 30mA 정도라는 단점이 있다. 일반적으로 널리 사용되는 증폭식은 증폭용 소자의 바이어스 전압이 필요하고 차단기구의 동작을 위한 전원이 따로 필요하므로 회로가 복잡해지나 다양한 설계를 할 수 있고 외부조건에 안정된 기기를 설계할 수 있으며 외부전원의 강력한 힘으로 차단을 신속, 확실하게 할 수 있다. 본 논문에서는 전류 동작형 증폭식에 대해 설계하기로 한다.

2. 보호의 대상과 그에 따른 감도전류 차단시간의 결정

한국공업규격의 30mA, 100m sec의 기준은 100Volt의 배전전압하에서 일반성인에 대해서는 충분한 보호가 될 수 있으나, 어린이에 대한 보호와 배전전압의 승압을 고려할 때보다 고감도, 고속의 차단기가 요구된다 하겠다. 미국의 U.L.규격에 의하면 몸무게 9kg의 어린이에 대한 보호도 고려대상으로 하고 있는데, 전기감전사고의 위험은 어린이에게도 있으므로 U.L.규격이 합리적이라 하겠다. 인체를 통과하는 전류에 대한

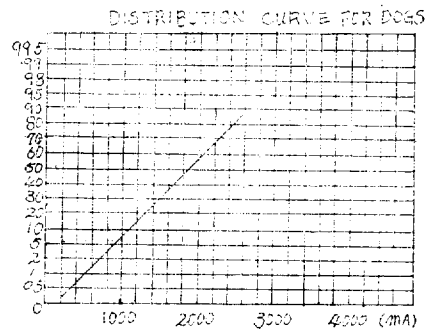


그림 1. 충격(Shock) 지속시간 83.3ms.
 Fig. 1. Minimum fibrillating current distribution curve for dogs, 83.3ms shocks
 $I_{1/2} = 240mA, I_{50\%} = 1800mA, I_{99.5} = 2040mA..$

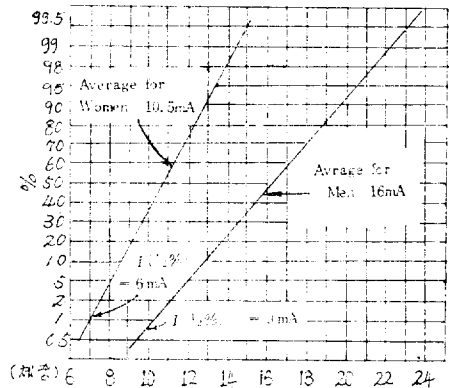


그림 2. 성인 남녀에 대한 상용주파수에 대한 이탈전류(let-go current)
 Fig. 2. Let-go Current distribution curve for men and women, 60Hz Commercial alternating current.

인체의 생리현상에 관해서는 여러가지 실험이 있으나 Dalziel씨의 실험을 참고로 하자. (ref. [4]) 전기충격

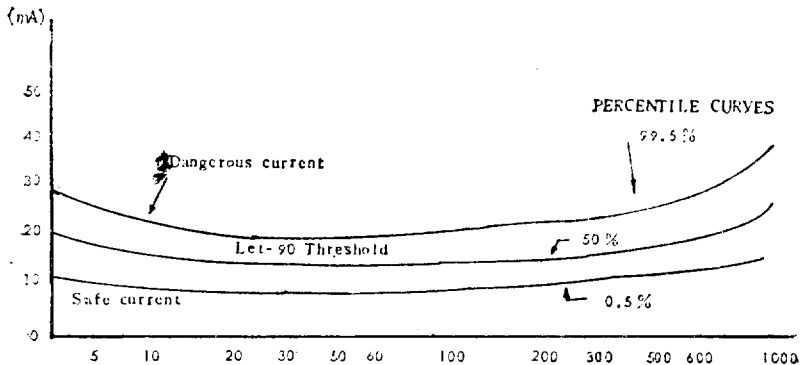


그림 3. 성인 남자에 대한 주파수변화에 따른 let-go-current의 변화
 Fig. 3. Effect of frequency on let-go-current for men.

에 의한 사망의 가장 큰 원인은 심실세동(Ventricular fibrillation)인데 50kg성인을 기준으로 한 통과전류와 통과시간의 식은 사망의 확율을 0.5%로 할때 $I=116/\sqrt{T}$ 인데 여기서 전류는 mA단위이고 시간은 sec 단위이다. 적용범위는 시간이 8msec~5sec까지이다. 심실세동에 대한 실험결과는 그림 1과 같다.

전기충격의 또 한가지는 let-go-current인데 이것은 전기도체에 접촉한 사람이 견딜 수 있고 전기충격에 의한 근육의 동작으로 도체에서 스스로 떨어질 수 있으며, 그 후 인체에 별다른 이상현상이 나타나지 않는 최대전류이다. 인체에 대한 let-go-current는 그림 3과 같은데 이러한 전류는 인체에 치명적인 영향을 주지는 않지만 상당히 고통스러우며, 경우에 따라서는 위험을 줄 수도 있으므로 특별한 경우에는 고려의 대상이 될 수 있으나 본 논문에서는 심실세동의 방지만을 고려하기로 한다.

체중과 심실세동과의 관계는 그림 4와 같은데 이는

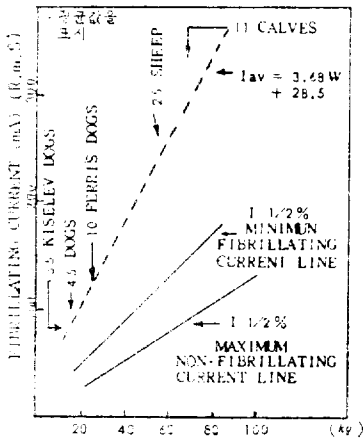


그림 4. 동물실험을 토대로한 체중과 심실세동 전류와의 관계

Fig. 4. Relation of fibrillating current to body weight for various animals 3.00-second shocks.

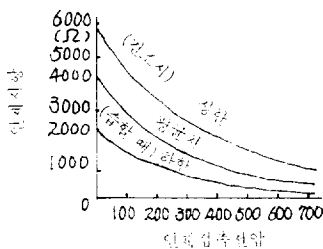


그림 5. 성인남자를 기준으로 한 인체접촉 전압과 인체저항과의 관계

Fig. 5. Effect of Voltage on body resistance for men

동물실험을 근거로 한 것이다. 그러므로 인체에 대해서는 약간의 오차가 있을 수 있지만 이를 무시한다면 체중과 심실세동전류는 비례관계에 있으므로 50kg에 대한 위의 실험식은 체중 10kg의 어린이에 대해서는 전류를 1/5로 줄이든지, 차단시간을 빨리 해야 한다. 이에 따른 U.L.A급 규격이 요구하는 식은 $T=(20/I)^{1.43}$ 이다. 단 전류는 mA단위, 시간은 초단위, 적용범위는 5~264mA까지이다. 인체저항과 접촉전압과의 관계는 그림 5와 같은데 이것은 성인남자의 경우이므로 배전전압을 100V, 선로저항을 1Ω, 접지저항을 10Ω이라 두고 체중 10kg의 어린이에 대해서 계산된 통과전류는 주위환경에 따라 100~200mA정도이고, 체중 50kg의 성인에 대해서는 대개 20~50mA정도이다. 200mA일때에 U.L.A급 규격의 식에 대입하여 계산하면 약 37msec정도가 되고 220Volt로 승압된다. 면 통과전류의 값은 2배 이상이 되어 최악의 경우 200mA를 넘어 설 수도 있으므로 30m sec이내의 차단이 필요하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 100V의 배전전압에서 10kg의 어린이에 대한 보호를 고려하여 최대차단시간을 30msec이내로 하여 설계한다. 감도전류의 설정은 심실세동을 일으키지 않는 범위에서 결정해야 하는데 성인의 경우 심실세동을 일으킬 수 있는 최소전류는 50mA이고 체중 10kg에 대해서는 25mA정도임을 그림 4에서 알 수 있다.

또, 최대부동작전류는 정상상태에서도 있을 수 있는 대기 충전전류, 정상적인 누설전류등에 대해서 차단기가 부동작함을 뜻하는데, 설비기준 15조에 따르면 정상누설전류는 최대부하전류의 1/2,000이하로 규정하고 있으므로 부하전류의 최대치가 30A라면 15mA의 누설전류를 인정하므로 최대부동작전류는 부하전류가 30A일때 15mA이상이어야 한다. 본 논문에서는 최소감도전류 25mA, 최대부동작전류 15mA를 기준으로 설계하기로 한다.

3. 외부 잡음에 대한 대책

전원전압의 급격한 변동, 부하전류의 급증, 썬어지(Switching Surge), 스파이크성 잡음(Spike Noise)등에 대해 차단기가 오동작하지 않아야 한다.

본 논문에서는 전원전압의 급변, 가정에서 생길 수 있는 여러가지 썬어지등에 대한 오동작의 방지를 기준으로 설계하였다.

그의 온도, 습도의 변화에 대한 안정이 고려되어야 한다. (기타 자세한 내용은 ref.[2]를 참고)

III. 게이트 제어회로의 설계 및 시험

전체 회로는 그림 6과 같다. 차단용 회로에 S.C.R.

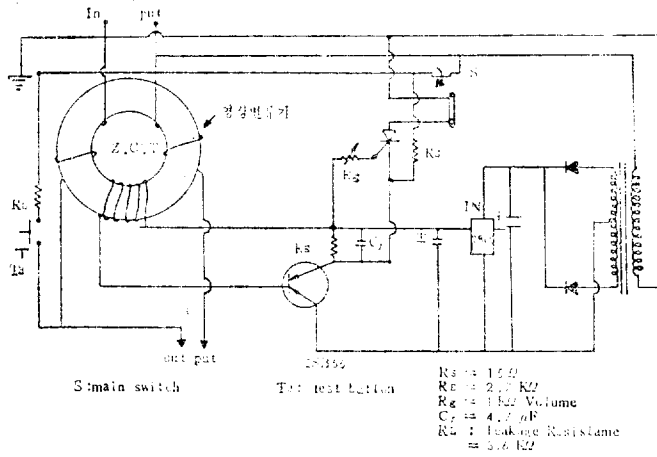


Fig. 6. Experimental circuit of G.F.C.I.

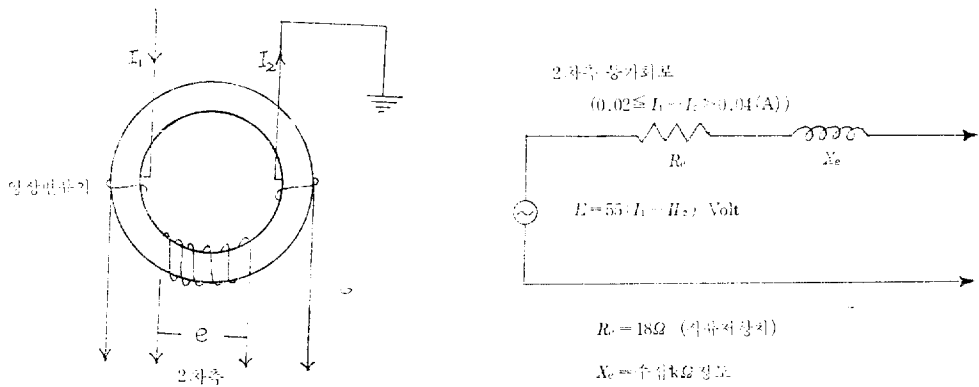
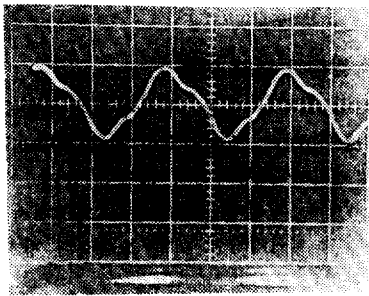


그림 7. 영상변류기(Zero Current Transformer)등가 회로
Fig. 7. Equivalent circuit for zero current transformer



종축 22volt/div, 횡축 5msec/div.

그림 8. 누설전류 그림 7에서 ($I_1 \sim I_2$)의 값이 30mA 일때 영상변류기 2차측 파형
Fig. 8. Voltage waveform of zero current transformer for leakage current

을 사용하므로 게이트(gate)회로가 필요한 데 영상 변류기(Z.C.T)의 출력 임피던스가 크기 때문에 버퍼(Buffer)회로를 사용하였고, 버퍼회로의 바이어스전압을 위해 5Volt정전압 회로를 이용하였다. 본 논문에서 제작한 차단기의 영상 변류기는 제작이 곤란하여 기존 제품을 구입하였는데, 그 등가회로는 그림 7과 같고, 누설전류가 30mA인 무부하일 때 파형은 그림 8과 같다. 주파수가 높은 썬어지나 스파이크성 잡음은 대개 트랜지스터의 캐패시턴스(capacitance)와 C_1 (그림 6)에 의해 차단되어 게이팅에 영향을 주지 않는다. 저항 R_8 는 에미터 저항의 역할과 함께 C_1 에 지류성분의 누적을 막아준다. 만약 외부잡음이 심할 경우에는 회로의 개선이 요망된다. 트랜지스터의 에미터 양단의 파형과 게이트 파형은 그림 9와 같다.

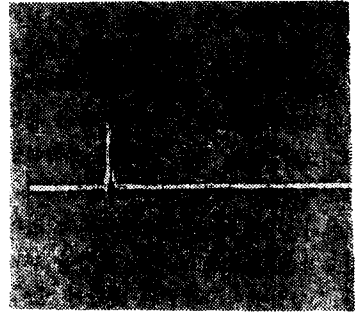
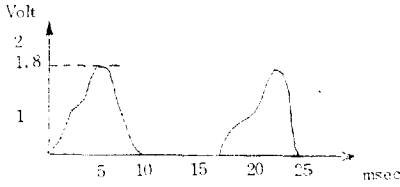


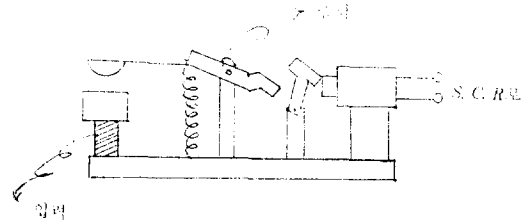
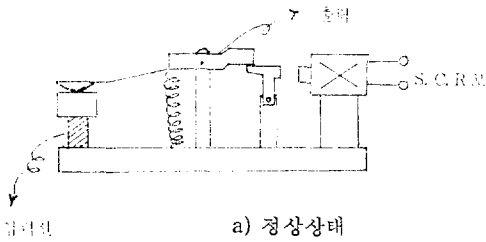
그림 9. a) 누설전류 30mA에서 Tr의 Emitter 양단출력(gate회로를 연결만 했을때)

중축 0.5volt/div, 횡축 50msec/div
b) 트랜지스터(Transister)의 출력을 게이트 연결시 게이팅(gating)파형

Fig. 9. a) Voltage waveform of R_E for leakage current 30mA (without gating circuit)

b) Voltage waveform of gating

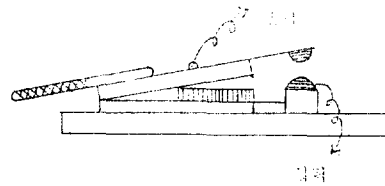
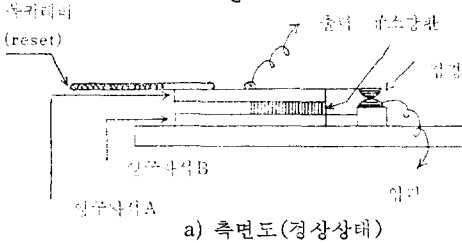
IV. 차단기구의(Trip mechanism) 설계와 실험



a) 정상상태

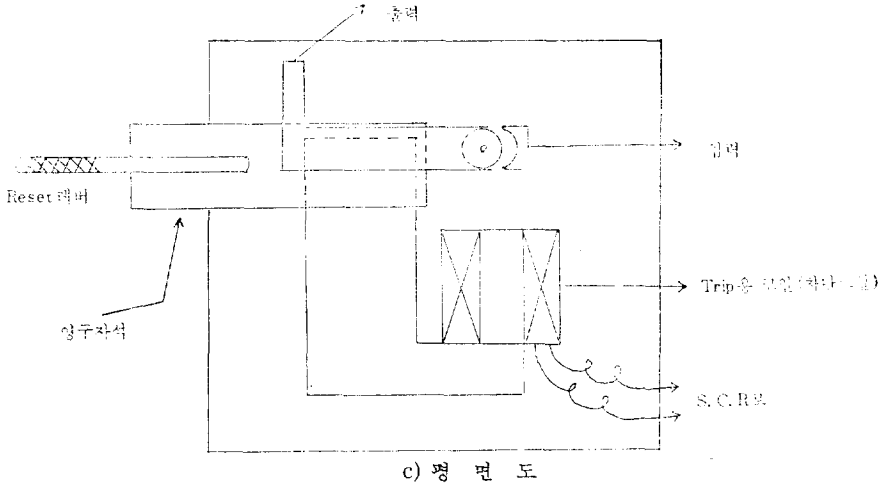
b) 차단후의 상태

그림 10. 종래의 차단기구(Trip Mechanism)의 동작원리
Fig. 10. Conventional Trip Mechanism.



a) 측면도(정상상태)

b) 측면도(차단후)



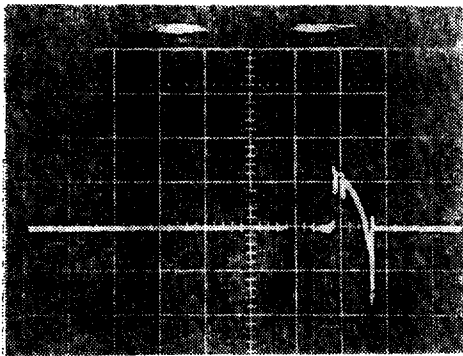
c) 평면도

그림 11. 차단기구의 구조

Fig. 11. New Trip Mechanism.

차단기구가 가져야할 특성은 동작시간의 고속화, 통전부분의 확실성등이 있다. 그림 10과 같은 종래의 방식은 통전은 확실하나 전자석이 여자되어 방아쇠를 열 때까지의 시간이 걸려 고속동작에 불리하다. 그 개선책으로 그림 11과 같은 장치를 제작하였고, 차단기구의 동작시간은 그림 12의 파형에서와 같이 약 5msec 정도이다. 또 차단시 전원측에서 접지된 선은 차단할 필요가 없으므로 대지와 전압을 나타내는 선(Hot Line)만 차단하였다. 외국의 전단기 중에는 활선(Hot Line)만을 차단하는 것도 있으나 한국공업규격에서는 두 선의 차단을 요구하고 있다.(ref. [2], ref. [3])

차단기구의 동작원리는 그림 11에서 처럼 영구자석 A와 B는 서로 흡인력을 발생하는데 영구자석 A의 아랫면이 N극 영구자석 B의 윗면이 S극—규소강판 쪽의 자기저항이 공극쪽보다 월등히 적으므로 규소강판 쪽에 자속이 월등히 많아서 규소강판 쪽의 흡인력이 공극의 흡인력보다 크므로, 정상상태에서는 규소강판 쪽과 공극쪽의 흡인력의 차이에 의하여 접점이 도통된다. 사고시 S.C.R.에 전류가 통하여 차단용 코일이 여자되면 영구자석과 접촉한 규소강판은 N극의 극성을 나타내어 영구자석 A를 반발하게 함과 동시에 영구자석 A, B의 자속이 규소강판을 통과하지 못하도록 하여 공극쪽의 흡인력에 의해 접점이 서로 떨어진다.



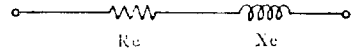
종축 20volt/div. 횡축 5msec/div.

그림 12. 차단기구의 차단특성 파형(위 파형은 회로도 그림 6)의 R_s 양단에 걸리는 전압파형

Fig. 12. Voltage waveform of R_s in tripping

V. 차단 실험 및 부동작 실험

차단 실험의 결과는 표(1)에 나타나 있고 대표적 파형은 그림 (14)에 표시하였다. 부동작 실험은 써어지 발생장치나 충격과 시험장치를 이용할 수 없어 누전차단기를 전원에 연결한 후 여러가지 상태에 대해서 부동작을 확인했다. 실험결과는 표(2)와 같다.



$$R_e = 3\Omega, X_e = 5\Omega$$

그림 13. Trip용 Coil의 등가회로
Fig. 13. Equivalent circuit of Trip coil

표 1. 누전전류에 따르는 R_L 에 전압이 인가되는 시간의 변화

누전 전류 30mA		누전 전류 25mA	
실험횟수	차단시간 msec	실험횟수	차단시간 msec
1	17	1	14
2	8	2	21
3	14	3	12
4	12	4	22
5	8	5	15
6	12	6	22
7	6	7	8
8	12	8	9
9	7	9	22

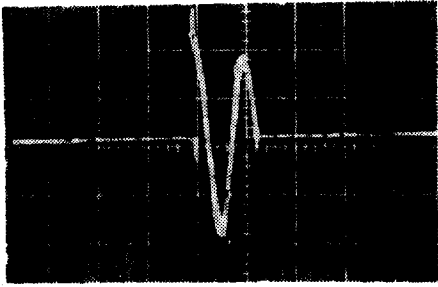
표 2. 부하와 전원의 상태에 따른 동작

시험상태	누설전류		
	0mA	10mA	15mA
전 원 전 압 변 동	×	×	×
전 원 의 개 폐	×	×	×
형 광 등 부 하 개 폐	×	×	×
전 구 부 하 의 개 폐	×	×	×
정 류 자 전 동 기 개 폐	×	×	○

※ 동작 : ○, 부동작 : ×

누전전류에 따른 동작

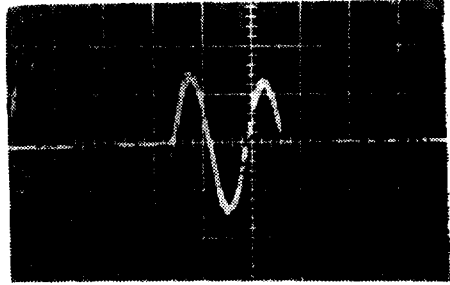
누전전류 mA	차단기 동작 여부
17.5	×
21.5	×
23.0	×
25.0	○
26.0	○



종축 20volt/div, 횡축 16msec/div.

그림 14. 그림 6의 회로에서 Test button을 눌렀을때 R_L 일부에 걸리는 전압파형사고시 인체에 흐르는 전류의 파형

Fig. 14. Current waveform which passes the body in Ground fault.



종축 20volt/div, 횡축 10msec/div.

그림 15. 써어지 흡수기

Fig. 15. G.F.C.I with surge absorber

VI. 회로의 변경 및 개선

1. 써어지와 스파이크성 잡음, 부하전류의 급증에 관한 대책

부하쪽에서 써어지가 심하게 발생할 때는 부하쪽에 적당한 써어지 흡수기(surge absorber)를 부착한다. (그림 15참고) 전압의 스파이크 현상에 의한 S.C.R.의 오

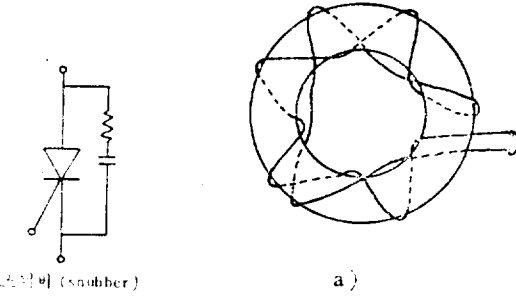
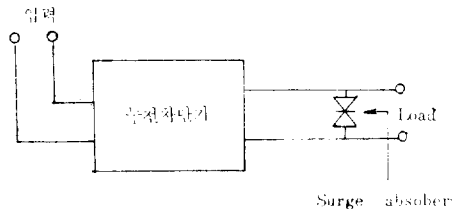


그림 16. 스누버
Fig. 16. Snubber circuit

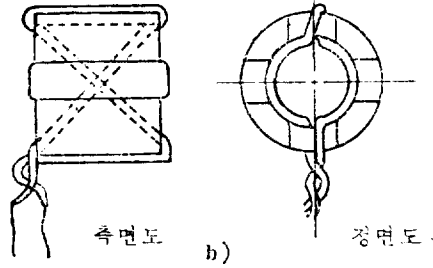


그림 17. 영상변류기의 개선
Fig. 17. Improvement of zero current transformer.

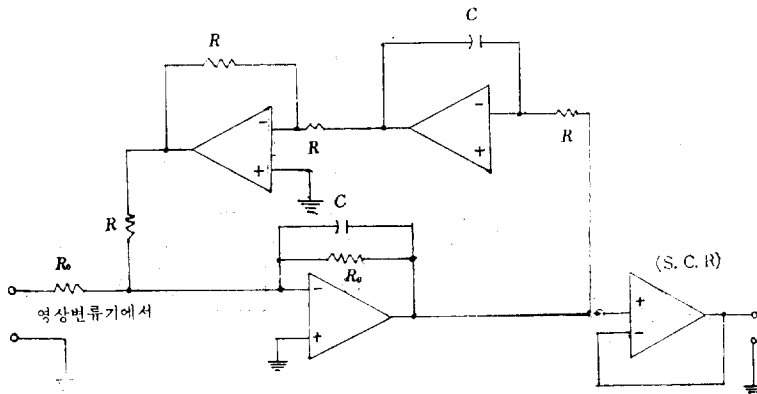


그림 18. 대역통과기(band pass filter)회로
Fig. 18. Band pass filter for noise blocking

동작을 방지하기 위해서는 적당한 저항과 콘덴서를 적절한 회로를 S.C.R.과 병렬 연결하는 스너퍼(snubber) 회로가 이상적이다. 외부의 자기의 영향에 의해; 영상 변류기에 전압이 유기될 위험이 있다면, 영상 변류기를 양도체를 차폐시키는 것이 효과적이다. 또 부하전류의 급증으로 영상 변류기에 감지 권선의 불균형으로 전압이 유기되는 경우에는 그림 17의 a와 같이 2차측 권선을 감을 때 서로 반대방향으로 두 권선을 균등히 분포시켜 그 두 권선 수의 차이가 희망하는 권선 수가 되도록 하고, 2차 권선을 환상 철심의 내벽에 나선상으로 감으면 효과적이다. (그림 17의 b)와 ref. [5]참고)

또 다양한 주파수의 외부 잡음이 정상상태에서도 영상 변류기의 2차측에 나타난다면 그림 (18)과 같은 Q (Quality factor) 값이 상당히 높은 대역통과기(band pass filter)를 부착한다면 효과적이다. (ref. [6]) 실제로 그림 18과 같은 회로를 사용하여 그 입력에 펄스 발생기를 이용하여, 피크(peak)전압이 약 5volt되는 다양한 주파수의 잡음을 발생시켰을 때도 게이트에 신호가 전달되지 않음을 관찰하였다.

2. 감도전류의 조정과 증폭

감도전류를 15mA, 혹은 그 이하로 낮출 필요가 있을 때는 증폭회로를 영상변류기의 출력측에 연결하면 되는데, 이때는 외부잡음의 차단을 위해서 캐패시턴스를 이용한 순간 지연장치를 같이 설치하도록 해야 한다.

3. 차단시간의 단축

특별히 차단시간의 단축이 요구되는 경우라면 차단기구의 동작시간은 5msec정도이므로, 차단용 S.C.R.의 게이트에 신호전달시간을 줄이면 된다.

우선 그림 19의 a)와 같은 전파정류회로를 이용하여 영상변류기의 출력의 정부방향, 모두가 트랜지스터를

은(mn)시킬 수 있도록 하고 차단기구용 코일을 구동시키는 S.C.R.은 그림 19의 b)와 같이 연결한다면, 지락사고가 교류의 평·부방향 어느 쪽에서 발생하더라도 즉시 차단이 가능하다. 이런 회로를 사용한다면 차단시간을 15msec 이하로 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 이 경우 특별히 외부잡음에 대해서 신경을 써야한다.

여유 많은 차단을 위해서는 기계적인 차단기구를 사용하지 않고 순전히 전자식으로 S.C.R.을 이용하여 제작할 수 있으나, 제작 원가가 비싸게 되고 부하전류가 S.C.R.의 홀딩 전류(holding current)이하 일때는 사용이 불가능하다는 점등이 있어 가정용으로는 적합치 못할 것 같다. (ref [7]참고)

전원 전압의 변동이 심하지 않을 때에는 정전압 소자로써 제너(zener) 다이오드를 사용해도 충분할 것으로 생각되며 주위온도의 변화에 대해서도 정상동작을 유지할 수 있는 회로가 병설된다면 바람직하겠다.

VII. 결 론

이상에서와 같이 설계, 제작한 누전차단기는 설계시 설정한 최소감도전류 25mA, 최대차단시간 30m sec를 잘 만족시키지만, 최대부동작전류가 10mA로 나타나서 최대부동작전류의 크기를 증대시킬 수 있는 개선책이 요망된다. 또 가정에서 발생할 수 있는 모든 잡음에 대해 비교적 안정함을 알 수 있었다. 회로요소의 적정화, 누전사고시 누전을 표시할 수 있는 장치의 부착, 차단뒤 다시 접점을 도통시킬 수 있는 복귀(reset) 장치의 개선등이 이루어지면 실용상에 별 문제점이 없겠다고 생각되며, 실용성을 더욱 높이기 위해서는 과전류를 탐지하고 게이트 신호를 발생시킬 수 있는 장치의 병설이 바람직하다고 하겠다.

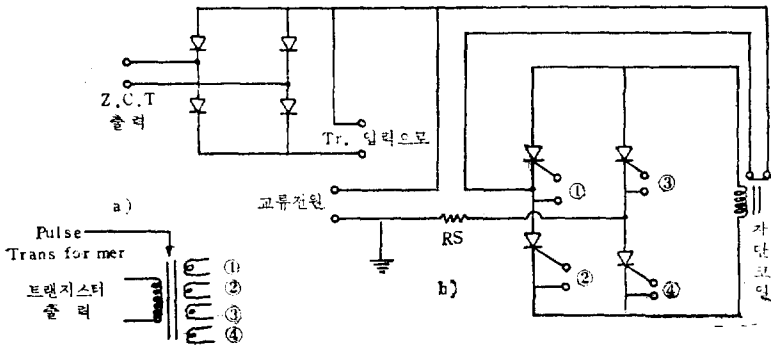


그림 19. 차단기간 단축을 위한 회로 개선
Fig. 19. Circuit improvement for shortening the tripping time.

참 고 문 헌

1. Arnold W. Smoot; "G.F.G.I. Application and Alternatives". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-11, No. 1, pp.56~61. Jan./Feb. 1975.
2. 한국공업규격; "누전차단기", KSC 4613. 제정 1976-12-07.
3. Richard C. Quick; "Ground Fault Interrupter-Design and Operating Characteristics". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-11, No. 1, pp.50~55. Jan./Feb. 1975.
4. Charles F. Dalziel; "Reevaluation of Lethal Electric Currents". IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol IGA-4, No. 5, pp.467~476 Sep./Oct. 1968.
5. Koreyuki Taketani, Ryoji Ozaki, Masahide Isikawa; "New Series BSV Type Earth-leakage Breakers", 富士時報 Vol. 43, No. 4, pp.36~44, 1970.
6. Aram Budak; "Passive and Active Network Analysis and Synthesis". pp.373~390, Houghton Mifflin Co. 1974.
7. 박민호, 심재명; "Thyrister를 이용한 교류차단에 관한 연구". 전기학회지, Vol. 28, No. 7, pp. 49~55, 1979.
8. W.C. Kotheimer; "The Source and Nature of Transient Surges". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, No. 6, pp. 501~503, Nov./Dec. 1977.
9. 宮武 修; "電氣から人體れ護る", 産業と電氣 No. 225, pp.9~14, 1971.
10. 박민호; "전력전자공학", 신흥출판사, 1978.
11. Millman and Halkias; "Integrated Electronics". McGraw-Hill, 1972.