

The New Residual Current Protective Devices Operating by Resistive Leakage Current

咸承珍* · 韓松曄** · 高彰燮†

(Seung Jin Ham · Song Yop Hahn · Chang Seop Koh)

Abstract - The conventional Residual Current Protective Devices (RCD, or earth leakage circuit breaker, ELB) operates depending on the total leakage current which is the vector-sum of resistive and capacitive components of a leakage current. However, the electric disaster such as electric shock or fire is mainly caused by the resistive component. Therefore, in this view point, the RCD is more realistic when it operates by the resistive component of the leakage current. In this paper, a new algorithm for measuring the resistive leakage current from the total leakage current is suggested, and is realized to an actual circuit. According to the suggested algorithm, the resistive component of the leakage current can be found by integrating the total leakage current over only a half cycle of the line voltage, and it is realized by using analog switches and resettable integrators. It is confirmed through experiments that the suggested algorithm detects, within maximum average error of 6.74%, the resistive leakage current from the total leakage current, and the RCD employing the suggested algorithm brakes the circuit within the regular interrupt time (30msec).

Key Words : Residual Current Protective Devices(RCD), Earth Leakage Circuit Breaker (ELB), Resistive Leakage Current, Capacitive Leakage Current

1. 서 론

누전차단기(漏電遮斷器, Residual Current Protective Devices, RCD)는 누전전류에 의한 전기화재 또는 인체 감전사고 등을 방지하기 위하여 기준치 이상의 누전전류가 흐르는 경우 회로를 차단하는 장치로 모든 전선로에 의무적으로 설치하도록 규정하고 있다[1,2]. 전선로에 흐르는 누전전류는 그림 1과 같이 저항성 누전전류(Resistive leakage current, I_R)와 용량성 누전전류(Capacitive leakage current, I_C)로 구성 된다. 저항성 누전전류는 전원전압과 동상인 성분으로 전선로 또는 전선로에 연결된 부하의 대지 절연저항의 열화가 주된 요인이다. 저항성 누전전류가 흐르면 발열량($Q=0.24 I_R^2 R t [kcal]$)에 의하여 주변온도가 높아지고, 선로 주변에 발화점이 낮고 폭발의 위험성이 있는 분진, 가스(Gas) 등의 인화성물질이 존재 하는 경우에는 화재 등 전기 재해를 일으키게 되며, 특히 저항성 누전전류가 인체를 통하여 흐르는 경우에는 인명사고를 유발하게 된다[3,4]. 한편 용량성 누전전류는 전원전압보다 위상이 90° 빠른 성분으로 전선로 또는 전선로에 연결된 부하와 대지간의 정전용량으로 인하여 흐르게 된다. 특히 접지된 금속관 내부에 전선로가

설치되는 경우와 같이 전선로의 대지 정전용량이 큰 경우에는 비교적 많은 양의 용량성 누전전류가 흐르게 된다. 그러나 용량성 누전전류는 저항성 누전전류와는 달리 변위전류(Displacement current)의 형태로 흐르고, 따라서 전기화재와 같은 재해를 유발하지 않는 성분이라 할 수 있다.

그림 2는 현재 널리 보급되어 있는 가정용 단상 누전차단기를 나타낸 것으로 크게 누전전류 검출부, 제어회로, 개폐기구로 구성된다. 누전전류가 흐르지 않는 경우 영상변류기 내부에서는 두 전류(i_{in}, i_{out})에 의한 자장이 서로 상쇄되어 영상변류기 2차측의 출력은 영이 된다. 그러나 전선로에 누전전류가 흐르면 전류의 균형이 붕괴되어, 영상변류기 2차측에는 두 전류의 차이에 비례하는 신호가 출력되고, 일정 이상의 누전전류가 흐르면 차단기가 동작하여 선로를 개방시킨다. 즉, 그림 2의 현재 이용 중인 누전차단기는 저항성 누전전류는 물론 용량성 누전전류에 의해서도 동작하여 회로

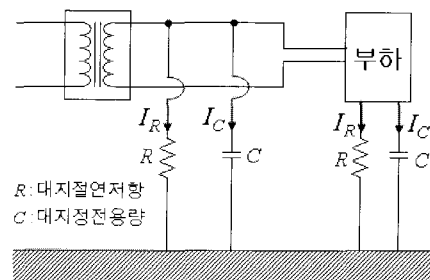


그림 1 누전전류 성분
Fig. 1 Components of leakage current

† 교신저자, 正會員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授
E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

* 學生會員 : 忠北大 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 서울大 名譽教授

接受日字 : 2007年 10月 25日

最終完了 : 2007年 1月 3日

를 차단하게 됨을 알 수 있다. 따라서 용량성 누전전류가 아주 작은 경우에는 그 동작에 별 문제가 없지만, 전선로가 금속성 보호관 내에 설치되는 경우와 같이 용량성 누전전류가 많이 흐르는 경우에는 저항성 누전전류가 아주 작은 경우에도 회로를 차단하게 된다. 이는 엄밀한 의미에서는 누전차단기의 오동작에 의하여 회로가 차단됨을 의미하여, 이로 인하여 많은 문제들이 야기되고 있다 [5-7]. 특히 누전전류로 인한 전기재해를 방지하기 위하여 누전 감도전류를 현행 30mA에서 15mA 등으로 낮추는 경우에는 더욱 심각해진다. 이러한 점들을 고려할 때 누전전류에 의한 전기재해를 방지한다는 관점에서 보면 누전차단기는 마땅히 저항성 누전전류에 의하여 동작하여야 한다.

이러한 필요성으로 합성 누전전류로부터 저항성 누전전류를 분리 검출하기 위한 몇몇 방법들이 개발되고 있으며 [8-10], 각 방법들의 장단점은 문헌 [11]에서 소상히 비교하였다. 저항성 누전전류 검출법이 동작시간 규정치가 30ms인 누전차단기에 적용되기 위해서는 현재 이용 중인 개폐기구의 동작시간 (대략 6ms)을 감안할 때, 저항성 누전전류의 검출시간은 대략 24ms 이하하여야 한다. 그러나 문헌 [8-10] 및 [11]에서 제안된 방법들은 저항성 누전전류 검출 시간이 과다하여 대부분 누전차단기에 적용하기에는 부적합하다.

본 논문에서는 문헌[11]에서 제안된 방법을 기초로 저항성 누전전류 검출시간이 이론상 최대 16.67ms이하인 새로운 누전전류 검출기법을 제안하고, 이를 기존의 개폐기구와 결합하여 법규에 규정된 차단시간을 만족하는 저항성 누전전류에 의하여 동작하는 누전차단기를 개발하였다. 개발된 누전차단기는 저항성 누전전류의 검출시간이 짧고 저렴하게 구현할 수 있음을 확인하였으며, 다양한 경우의 누전전류에 대한 실험과 PSIM 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 종래의 저항성 누전전류 산출방법의 문제점

그림 3은 문헌[11]에서 제안된 저항성 누전전류 검출기의 구성도로서 합성 누전전류 검출부, 동기신호 발생부, 아날로그 스위치 및 저역통과 필터 등으로 구성되어 있다. 그림에서 아날로그 스위치의 출력(P)은 기본적으로 DC 성분과 기본 주파수가 120Hz인 신호의 합으로 구성되며, 저항성 누전전류(I_R)는 신호(P)의 DC 성분 즉, 평균값에 해당 된다[11]. 따라서 그림 3의 회로를 이용하여 저항성 누전전류를 검출하기 위해서는 DC성분을 제외한 모든 성분이 완전히 제거될 수 있도록 cut-off 주파수가 충분히 낮은 저역통과필터가 설계되어야 한다. 예를 들면 저항성 누전전류의 검출오차가 5%이내이기 위해서는 R과 C의 값이 각각 200kΩ과 0.2μF 정도로 설계되어야 한다. 이 경우 설계된 저역통과 필터의 시정수(τ)는 40ms가 되고, 따라서 정확한 저항성 누전전류의 99% 및 99.97%의 출력을 얻기 위해서는 각각 5τ(=200ms)와 8τ(=320ms)의 시간이 소요됨을 알 수 있다.

따라서 현행 규정에 따른 누전차단기의 정격 차단시간(30ms)을 감안하면, 문헌 [11]에서의 기법은 저항성 누전전류 측정 장치에는 사용할 수 있으나, 현재 이용중인 누전차단기에는 적용할 수 없음을 알 수 있다.

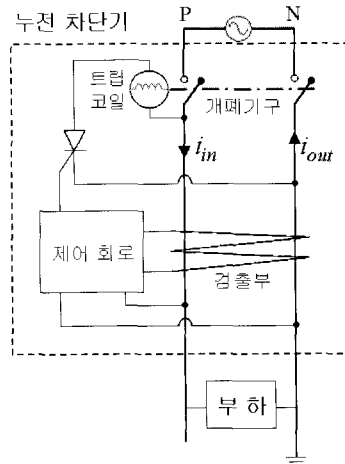


그림 2 단상 누전차단기 구조
Fig. 2 Configuration of a single phase RCD

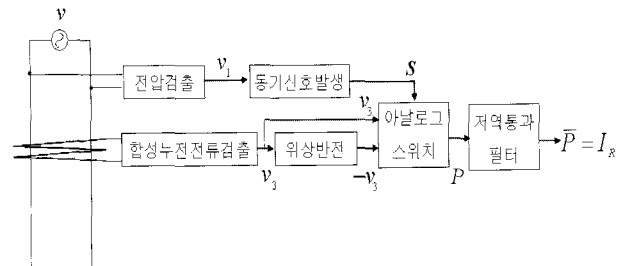


그림 3 문헌[11]에서 제안된 저항성 누전전류산출 회로
Fig. 3 Detection circuit of the resistive leakage current suggested in [11].

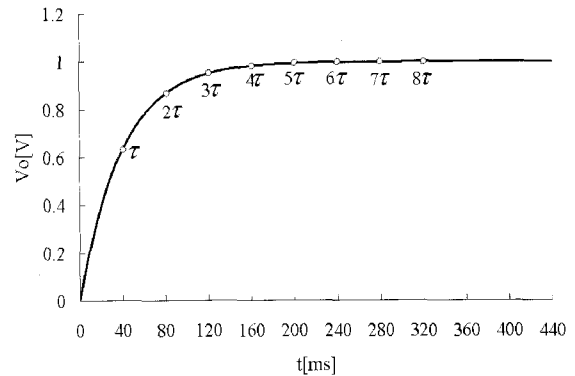


그림 4 설계된 저역통과필터의 응답 특성
Fig. 4 Response characteristic of the designed LPF

3. 제안된 저항성 누전전류 산출 원리

이론적으로 볼 때 문헌[11]에서 제안된 방법에 의하면 저항성 누전전류는 합성 누전전류를 전원전압의 한주기에 대해 적분을 하거나 또는 적분된 신호의 평균치 계산을 통하여 산출 할 수 있다. 본 논문에서는 이에 기초하여 이론적인 검출시간이 최대 16.67ms 이하인 새로운 저항성 누전전류의 검출기법을 제안하였다.

전로에 흐르는 합성 누전전류의 순시치 $i_G(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$i_G(t) = \sqrt{2} I_G \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

여기서 I_G 는 합성 누전전류의 실효치로써 저항성 누전전류 실효치(I_R)와 용량성 누전전류 실효치(I_C)와는 다음과 같은 관계를 가지며,

$$I_G = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}, \quad I_R = I_G \cos \theta \quad (2)$$

θ 는 전원전압과 합성 누전전류(i_G)와의 위상차이다. 이로부터 저항성 누전전류(I_R)를 구하기 위하여, $i_G(t)$ 를 전원전압의 한주기에 대하여 적분한 것을 P_f , 그리고 이의 평균치를 $\overline{P_f}$ 라고 하면 이들은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$P_f = \int_0^\pi i_G dt - \int_\pi^{2\pi} i_G dt = 4\sqrt{2} I_R \quad (3-a)$$

$$\overline{P_f} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_R \quad (3-b)$$

여기서 식(3-b)는 문헌[11]에서 제안된 것으로써, 이는 적분 연산과 평균연산을 분리하여 수행하지 않고 저역통과필터를 이용하여 DC성분(평균치)을 직접 검출할 수 있음을 의미한다. 그러나 이 방법은 앞서 기술했듯이 검출시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 검출시간을 단축하기 위해 본 논문에서 제안한 검출이론은 아래와 같은 식으로 표현되며,

$$P_{H1} = \int_0^\pi i_G dt = 2\sqrt{2} I_R$$

or

$$P_{H2} = - \int_\pi^{2\pi} i_G dt = 2\sqrt{2} I_R \quad (4)$$

이는 반주기에 대한 적분만으로도 저항성 누전전류를 검출할 수 있음을 의미한다. 통상 이 과정은 연산증폭기(OP-AMP)와 커패시터(capacitor)를 이용하여 쉽게 구현될 수 있으며, 이 연산과정에서 처음 반주기 동안의 적분연산이 종료되면 다음 반주기 신호가 입력되기 전에 반드시 적분기를 초기화 시켜야 한다. 왜냐하면 초기화 과정이 없으면 적분된 결과가 누적되어 연산증폭기의 포화전압으로 포화되기 때문이다. 따라서 적분기를 초기화시키기 위한 초기화 신호가 별도로 필요하며, 이것은 전원전압 신호로부터 얻을 수 있다.

또한 반주기 동안의 적분연산 후 출력된 신호 중 저항성 누전전류(I_R)에 해당하는 부분은 적분연산이 종료되는 시점에서 적분기가 초기화되는 순간까지만 출력되기 때문에, 이 시간동안에 신호를 취득하기 위해서는 별도의 샘플링 회로를 이용해야 한다. 본 논문에서는 전원전압 신호로부터 샘플링 신호를 구하였다.

그림 5는 본 논문에서 제안된 저항성 누전전류 산출 알고

리즘을 나타낸 것으로, 전원 전압으로부터 각종 신호들을 만들어 내는 부분, 각 신호들로부터 저항성 누전전류의 산출을 위한 적분을 수행하는 부분, 그리고 적분결과를 샘플링하여 최종적인 저항성 누전전류를 출력하는 부분으로 구성된다. 또한 그림 6은 본 논문에서 제안된 알고리즘을 구현한 회로도를 나타내며, 각 부분에 해당되는 신호의 파형은 그림 7과 같다. 그 구체적인 동작원리는 다음과 같이 설명된다.

3.1 전원전압 검출 및 동기신호발생

전원 전압(220V)으로부터 저항으로 구성된 분압회로를 이용하여 얻어지는 $\pm 10V$ 수준의 전압(v_1)은 그림 7(a)에 나타낸 바와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$v_1(t) = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

여기서 V_1 은 전압(v_1)의 실효치이다. 동기신호 $S(t)$ 는 그림 7(b)와 같이 전원 전압(v_1)의 부호를 나타내는 신호로 연산증폭기(OP1)를 이용하여 얻어지고, 그 크기는 연산증폭기(OP1)의 포화전압 $\pm V_s$ 에 해당한다. 동기신호 $S(t)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$S(t) = \begin{cases} +V_s & 0 < \omega t < \pi \\ -V_s & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

3.2 초기화 가능 적분기를 이용한 저항성 누전전류 검출

본 논문에서는 전원전압의 반주기에 대한 적분연산으로 저항성 누전전류를 검출하기 위하여 초기화 가능 적분기(resettable integrator)를 도입하였으며, 이는 그림 6의 OP10, OP11과 같이 연산증폭기와 트랜지스터를 이용하여 구현된다. 저항성 누전전류를 계산하기 위해 즉, 식(4)의 적분을 수행하기 위하여, 아날로그 스위치(AS1)과 아날로그 스위치(AS2)는 각각 $0 < \omega t < \pi, \pi < \omega t < 2\pi$ 인 구간에서만 입력된 신호가 통과하도록 하므로, 초기화 가능 적분기(1)과 초기화 가능 적분기(2)는 각각 $0 < \omega t < \pi, \pi < \omega t < 2\pi$ 인 구간에서 식(4)의 P_{H1} 과 P_{H2} 를 계산하여 각각 저항성 누전전류를 산출하게 된다. 이 과정에서 필요한 아날로그 스위치의 동작 및 적분기 초기화 신호 발생과정과 적분기의 구체적인 동작 원리는 다음과 같이 설명된다.

3.2.1 적분기의 초기화(reset) 신호

적분기 초기화 신호(v_2)는 전원 전압(v_1)신호의 위상을 90° 지연시킨 후 연산증폭기(OP3)를 이용하여 출력된 구형파 신호에서 동기신호 $S(t)$ 를 감산하여 얻을 수 있는데, 본 논문에서는 연산증폭기(OP5)로 구현된 감산기를 이용하였다. 초기화 신호(v_2)는 그림 7(c)에 나타낸 바와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$v_2(t) = +V_s \quad 3\pi/2 < \omega t < 2\pi \quad (7-a)$$

$$v_2'(t) = +V_s \quad 5\pi/2 < \omega t < 3\pi \quad (7-b)$$

$$v_3(t) = K i_G \quad (8)$$

여기서 v_2 와 v_2' 는 서로 180° 위상차를 가지며, v_2 와 v_2' 는 각각 초기화 가능 적분기(OP10)와 초기화 가능 적분기(OP11)의 트랜지스터에 입력된다.

여기서 K 는 영상변류기의 변류비와 연산증폭기(OP8)의 이득상수를 포함하는 상수이다.

동기신호 $S(t)$ 가 양(+)인 구간에서의 적분연산은 다음과 같이 수행된다.

아날로그 스위치(AS1)를 이용하여, 동기신호 $S(t)$ 가 양(+)인 구간에 신호 $v_3(t)$ 를 통과되도록 하면, 아날로그 스위치(AS1)의 출력 $v_4(t)$ 는 그림 7(e)와 같이 다음 식으로 표현된다.

3.2.2 적분연산을 통한 저항성 누전전류 산출

선로에 합성 누전전류 i_G 가 흐를 때, 영상변류기(ZCT)의 출력전압은 통상의 경우 수 mV 수준이고, 이를 연산증폭기(OP8)로 증폭하여 얻어지는 출력신호(v_3)는 그림 7(d)와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$v_4(t) = \begin{cases} K i_G(t) & 0 < \omega t < \pi \\ 0 & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

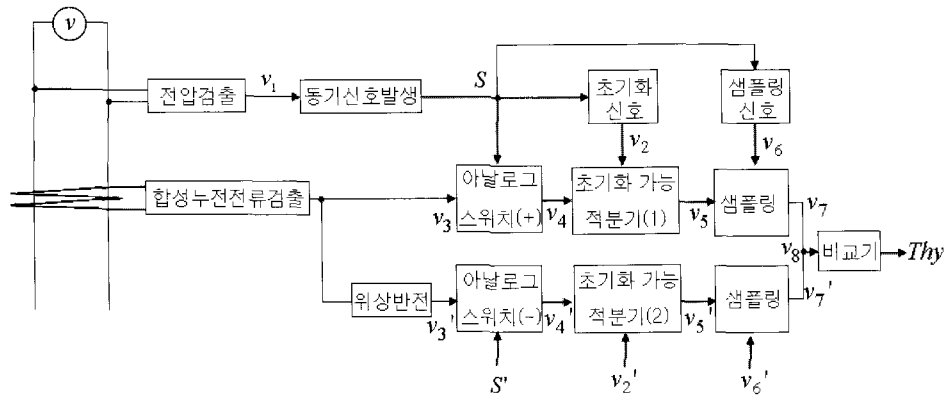


그림 5 제안된 저항성 누전전류 산출방법
Fig. 5 Proposed detection method for resistive leakage current

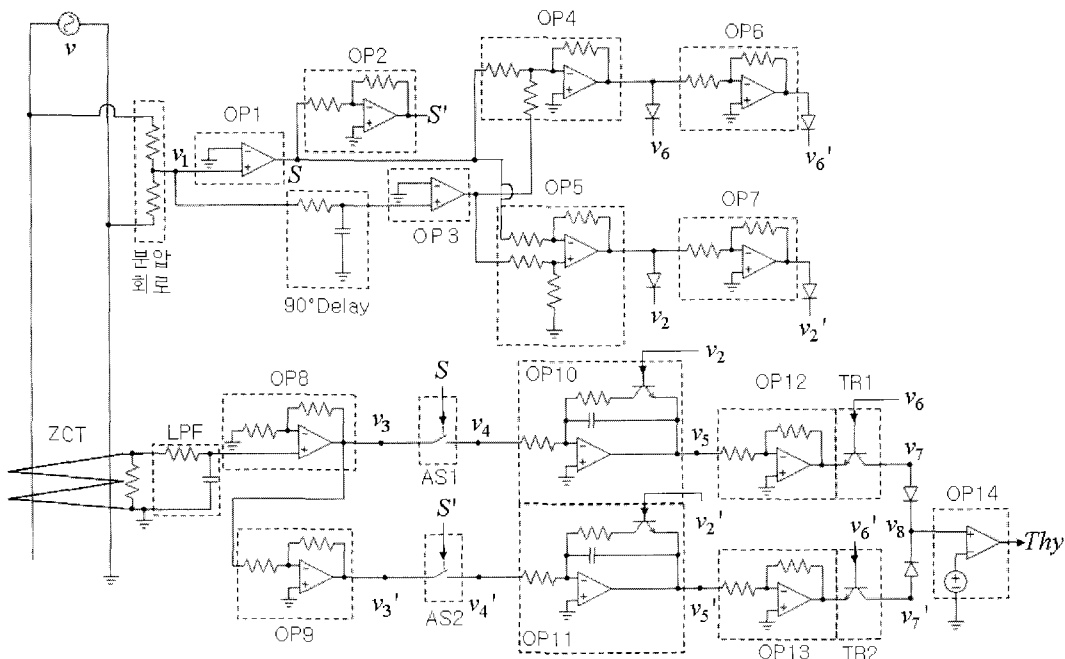


그림 6 제안된 저항성 누전전류 산출회로
Fig. 6 Circuit for the proposed resistive leakage current detection

아날로그 스위치(AS1)의 출력 $v_4(t)$ 를 연산증폭기(OP10)를 이용하여 적분 연산된 출력 $v_5(t)$ 는 그림 7(f)와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$v_5(t) = K \int_0^{\pi} i_G dt = -2\sqrt{2} KI_R \quad (10)$$

여기서 그림 6(f)에서 알 수 있듯이, 아날로그 스위치(AS1)의 출력 신호(v_4)는 $\pi < \omega t < 2\pi$ 구간에서는 그 크기가 영이 된다. 따라서 연산증폭기(OP10)는 $0 < \omega t < \pi$ 에 입력되는 신호에 대해서만 적분연산을 수행하고 나머지 구간($\pi < \omega t < 2\pi$) 동안에는 그 입력이 영이므로, 결국 저항성 누전전류에 해당하는 부분은 적분연산이 종료되는 시점(π)부터 다음 적분을 수행하기 위하여 적분기가 초기화되는 순간($3\pi/2$)까지 출력됨을 알 수 있다.

또한 통상 연산증폭기로 구현되는 적분기는 그 출력이 반전된 신호 이므로, 이득이 -1인 연산증폭기(OP12)를 이용하여 $v_5(t)$ 를 반전시켜 양(+의) 부호를 갖는 신호를 얻게 된다.

한편, 동기신호 $S(t)$ 가 음(-)인 구간에서의 적분연산은 그림 5 및 그림 6에서와 같이 아날로그 스위치(-)와 초기화 가능 적분기(2)를 이용하여 동일한 방법으로 수행된다.

3.3 샘플링 회로

초기화 가능 적분기의 출력신호 중 저항성 누전전류에 해당하는 신호는 반주기 적분연산이 종료되는 시점으로부터 초기화 신호가 입력되는 순간까지의 신호로써 이 시간($\pi/2$) 동안에 DC전압형태로 출력되며, 이는 저항성 누전전류의 실효치에 비례하는 신호이다. 따라서 그 신호만을 획득할 필요가 있으며 이를 위해 본 논문에서는 샘플링(sampling)회로를 이용하였고, 트랜지스터를 이용하여 구현하였다. 따라서 샘플링 회로를 활성화시키기 위한 샘플링 신호가 필요하며, 이는 전원전압 신호를 이용하여 만들어 진다.

3.3.1 샘플링회로의 샘플링(sampling) 신호

샘플링 회로의 샘플링 신호(v_6)는 전원 전압(v_1)신호의 위상을 90° 지연시킨 후 연산증폭기(OP3)를 이용하여 출력된 구형파 신호와 동기신호 $S(t)$ 를 가산 연산하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 연산증폭기(OP4)로 구현된 가산기를 이용하였다. 샘플링 신호(v_6)는 그림 7(g)에 나타낸 바와 같이 다음 식으로 표현된다.

$$v_6(t) = +V_S \quad \pi < \omega t < 3\pi/2 \quad (11-a)$$

$$v_6'(t) = +V_S \quad 2\pi < \omega t < 5\pi/2 \quad (11-b)$$

여기서 v_6 와 v_6' 는 서로 180° 위상차를 가지며, v_6 는 샘플링회로(TR1)에 입력되고, v_6' 는 샘플링회로(TR2)에 입력된다.

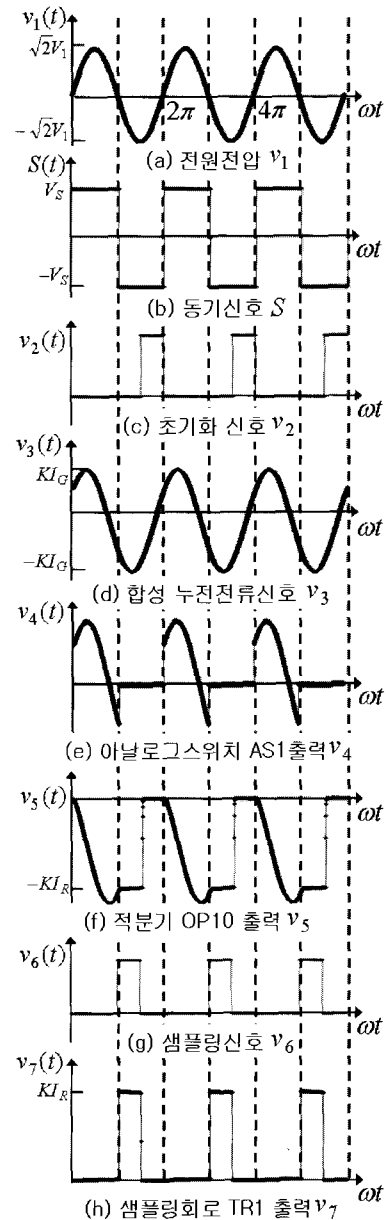


그림 7 그림 6에서 각 노드의 시뮬레이션된 전압파형(I_R 및 I_C 투입시점이 0° 인 경우)

Fig. 7 Simulated voltage wave forms at nodes of Fig. 6(when the putting time of I_R and I_C is zero degree)

3.3.2 샘플링에 의한 저항성 누전전류의 검출

연산증폭기 OP12와 OP13으로부터 출력된 신호는 각각 샘플링회로 TR1과 TR2로 입력된다. 샘플링회로는 이 입력된 신호 중 샘플링 신호 v_6 , v_6' 에 의해 활성화되는 시간동안에 해당하는 신호만을 출력하며, 이 신호가 저항성 누전전류에 해당하는 신호이다. 두 샘플링회로의 출력 v_7 , v_7' 은 모두 저항성 누전전류의 실효치(I_R)에 비례하며, 최종적으로 저항성 누전전류는 그림 7(h)와 같이 다음과 같은 식으

로 표현된다.

$$I_R = \begin{cases} \frac{v_7}{2\sqrt{2}K} & \pi < \omega t < 3\pi/2 \\ \frac{v_7'}{2\sqrt{2}K} & 2\pi < \omega t < 5\pi/2 \end{cases} \quad (12)$$

그림 6에서 알 수 있듯이 연산 증폭기 OP2, OP6, OP7, OP9들은 입력된 신호를 180° 위상 반전시키는 회로이며, 따라서 각 노드의 신호 S와 S', v₂와 v₂', v₃와 v₃', v₄와 v₄', v₅와 v₅', v₆와 v₆', v₇와 v₇'는 각각 서로 180°의 위상차를 가진다.

저항성 누전전류(I_R)의 실효치에 비례하는 신호(v₇)와 신호(v₇')는 서로 180°의 위상차를 두고 노드(v₈)에 교대로 출력되며 이 신호는 연산증폭기(OP14)로 구현된 비교기로 입력된다.

따라서 본 논문에서 제안된 저항성 누전전류 검출 방법은 이론적으로는 합성 누전전류를 전원전압의 반주기에 대한 적분만으로도 계산 될 수 있기 때문에 전체적인 검출시간이 단축되는 장점을 가짐을 알 수 있다.

4. 저항성 누전전류 산출 실험 및 차단 시간 측정

4.1 누전실험 회로 및 출력파형

본 논문에서 제안된 저항성 누전전류 검출 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 다양한 경우의 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 동시에 흐르는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 8은 저항성 누전전류와 용량성 누전전류를 다양하게 조절할 수 있도록 본 논문에서 고안한 실험회로를 나타낸다. 그림에서와 같이 단상 220V, 60Hz 선로를 대상으로 하였으며, 저항성 누전전류(I_R)의 크기는 50KΩ 가변저항을 이용하여 조절할 수 있도록 하였고, 용량성 누전전류(I_C)는 0.68μF의 콘덴서와 100Ω의 저항부하를 접속한 후 그 사이의 노드에 1KΩ가변저항을 연결하여 사용함으로써 그 양을 조절할 수 있도록 하였고, 전류계를 분리 설치하여 각각의 누전전류 성분과 합성 누전전류를 측정하였다. 또한 실험 중 단락전류가 흐르는 것을 방지하기 위하여 5KΩ의 저항을 삽입하였다.

그림 9는 누전 실험을 위해 제작된 실험장치로서 그림 (a)는 전체적인 모습을, (b)는 제작된 회로, (c)는 부하회로를 나타내는 것으로, 제작된 저항성 누전전류 검출 회로 및 전원공급 장치 그리고 누전 전류가 흐를 수 있도록 하기 위한 저항과 콘덴서, 스위치 등을 포함하고 있다. 그림 10은 제작된 회로의 연산과정을 확인하기 위하여 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 동시에 흐르는 경우에 대하여 측정된 전압파형을 나타낸 것으로 그림 7과 비교할 때 그 결과가 시뮬레이션에 의한 파형과 거의 일치함을 알 수 있다.

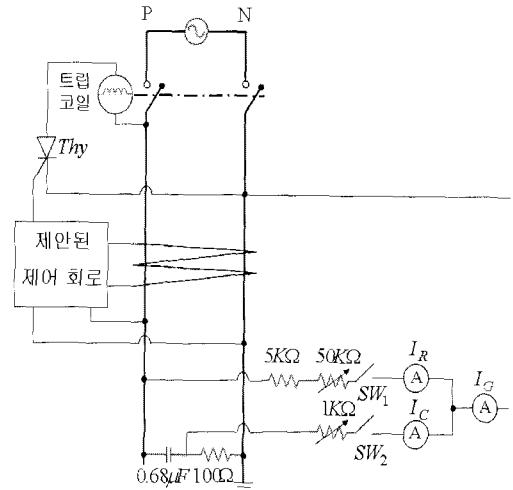
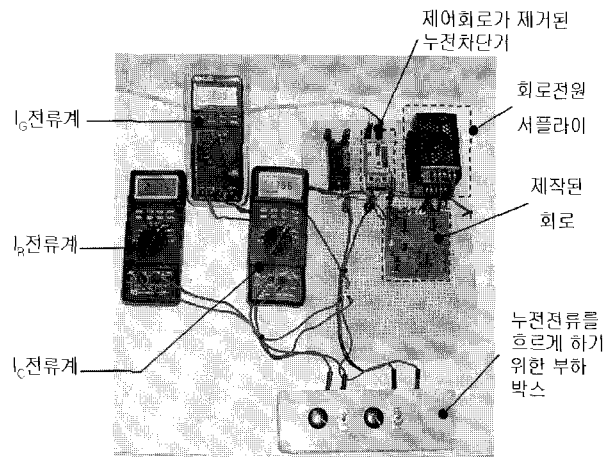
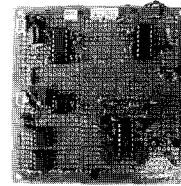


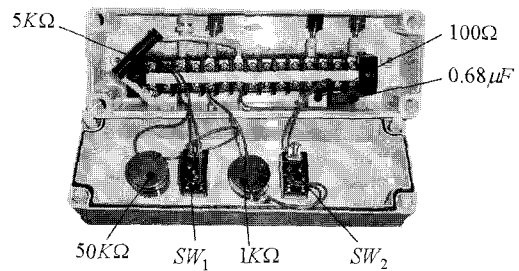
그림 8 누전실험 회로의 구성
Fig. 8 Leakage current test circuit



(a) 전체구성



(b) 제작된 회로



(c) 부하회로

그림 9 제작된 실험장치
Fig. 9 Experiment apparatus

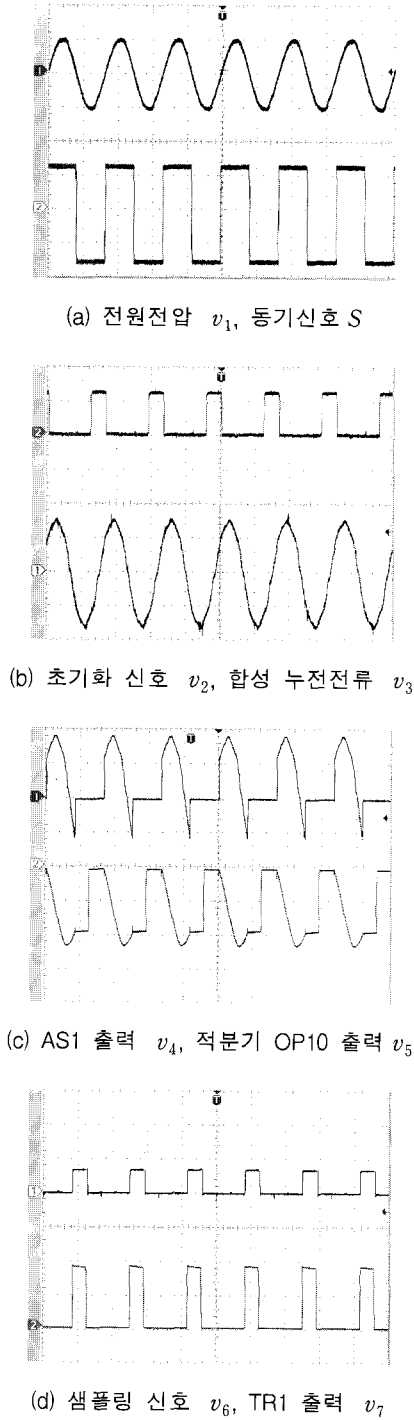


그림 10 그림 6의 각 노드에서의 실제 전압 파형
 Fig. 10 Experimental voltage wave forms at nodes of Fig. 6

4.2 저항성 누전전류만 흐르는 경우의 회로 출력

선로에 저항성 누전전류(I_R)만 흐르는 상태에서 I_R 의 크기의 변화에 따른 저항성 누전전류 검출회로의 출력(v_8)을 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 이를 위하여 그림 8의 스위치 SW_2 개방하고, SW_1 는 투입한 상태에서 가변저항

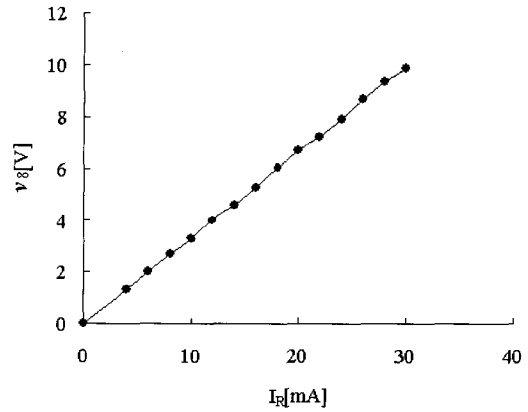
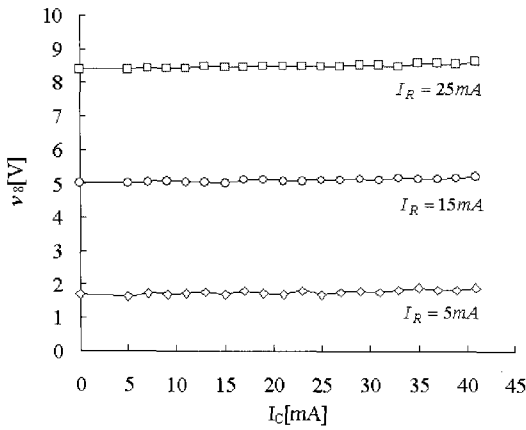


그림 11 저항성 누전전류 I_R 변화에 따른 회로 출력 v_8
 Fig. 11 Output voltage v_8 according to the variation of I_R

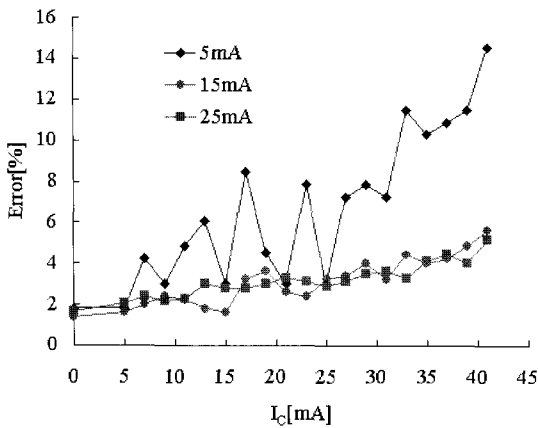
을 조절하여 저항성 누전전류(I_R)가 5mA에서 30mA까지 변화하도록 하였다. 본 실험에서는 저항성 누전전류(I_R)의 크기가 1mA일 때 회로의 출력(v_8)이 0.33V가 되도록 이득 상수 K 를 고정하여 실험을 수행하였다. 그 결과 그림 11과 같이 저항성 누전전류(I_R)가 증가함에 따라 검출회로의 출력 신호(v_8)가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 본 논문에서 제안한 검출회로를 이용하여 다양한 크기의 저항성 누전전류를 정확히 측정할 수 있음을 의미한다.

4.3 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 동시에 흐르는 경우 회로 출력

선로에 용량성 누전전류(I_C)와 저항성 누전전류(I_R)가 동시에 흐르는 경우, 제안된 검출회로가 저항성 누전전류(I_R)를 정확하게 검출하는지 확인하였다. 이를 위하여 스위치 SW_1, SW_2 를 모두 투입한 후 50K Ω 가변저항을 조절하여 각각 5mA, 15mA, 25mA의 저항성 누전전류가 일정하게 흐르도록 한 상태에서 1K Ω 의 가변저항을 조절하여 용량성 누전전류(I_C)를 5mA에서 41mA까지 변화시키면서 검출회로의 출력전압(v_8)을 측정하였다. 그 결과 그림 12(a)와 같이 용량성 누전전류가 0mA에서 41mA까지 크게 변하는 경우에도 제안된 검출회로의 출력(v_8)은 거의 일정하게 측정되었다. 이는 용량성 누전전류가 크게 변하는 경우에도 저항성 누전전류만을 분리 검출할 수 있음을 의미하며, 그 오차는 그림 12(b)와 같이 저항성 누전전류가 5mA, 15mA, 25mA인 경우에 대하여 각각 평균 6.74%, 3.12% 및 3.11% 이하임을 확인하였다. 특히 저항성 누전전류 검출 오차가 14.54%로 최대인 경우는 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 각각 5mA와 41mA로 저항성 누전전류에 비하여 용량성 누전전류가 과도하게 흐르는 경우로, 실제의 선로에서는 거의 발생하지 않는 경우임을 감안하면 본 논문에서 제안된 저항성 누전전류 검출기법은 매우 정확하게 저항성 누전전류를 검출할 수 있음을 알 수 있다. 가령, 그림 12(b)에서 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 각각 15mA, 41mA인



(a) 검출회로의 출력전압



(b) 저항성 누전전류 검출 오차

그림 12 용량성 누전전류 I_C 변화에 따른 회로출력 v_8

Fig. 12 Output voltage v_8 according to the variation of I_C

경우를 보면, 회로의 이론적인 출력은 4.95V이어야 하나 약 5.3V로 증가함을 알 수 있다. 이 경우, 제작된 회로를 정격 누전감도전류가 15mA인 누전차단기에 적용하면 즉, 회로출력이 4.95V에서 차단되도록 설정된 누전차단기에 적용되면, 저항성 누전전류가 약 14mA에서 동작하여 회로가 차단된다. 이는 현재 사용 중인 누전차단기들이 통상 감도전류의 75%이상에서 동작하고 있음을 감안할 때 충분히 오차범위 내에서 동작함을 알 수 있다.

4.4 누전전류 차단시간 측정

4.4.1 차단기 동작시간 고찰

실제로 선로에 용량성 누전전류가 흐를 경우 영상변류기로부터 얻어진 합성 누전전류신호에는 많은 고조파가 포함되어 있어, 적분연산 결과에 오차를 줄 수 있다. 한편 100%의 저항성 누전전류가 흐를 경우에는 영상변류기로부터 얻어진 신호는 전원전압과의 위상이 동상이어야 하나 영상변류기의 2차권선 인덕턴스로 인하여 그 출력은 전원전압에

비해 약 10° 정도 위상차(leading)를 가진다. 따라서 제작된 회로는 고조파 제거 및 위상보정을 위해 그림 6에 나타낸바와 같이 영상변류기 2차측과 연산증폭기(OP8)사이 시정수 $\tau = 0.4ms$ 로 설계된 R-C 저역통과필터(Low pass filter)를 삽입 하였다. 즉, 합성 누전전류 신호는 정상상태(99.9%)까지 약 4ms(1/4주기)의 과도시간을 가짐을 알 수 있다. 또한 같은 크기의 누전전류라도 시작하는 시점에 따라서 적분연산 결과에 차이를 주게 되므로 결국 저항성 누전전류 검출 시간은 누전사고 발생 시점에 따라 좌우 된다.

예를 들면, 지금 30mA의 저항성 누전전류가 전원전압에 대하여 약 100°에서 흐르기 시작한다고 할 때, 처음 반주기와 두 번째 반주기의 적분연산 결과는 영상변류기 출력신호가 과도상태이기 때문에 그 크기가 30mA에 미치지 못하는 결과를 내게 되고, 결국 세 번째 반주기의 연산에 의해 누전차단기가 동작하게 된다. 그러나 여기서 누전차단기는 약 6ms 정도의 기계적 동작시간을 가지고 있기 때문에, 최초 누전전류가 흐리기 시작하여 선로가 차단되기까지의 시간은 총 26.6ms가 소요된다. 반면 저항성 누전전류가 각각 90°와 270°에서 흐리기 시작한다면, 영상변류기 출력신호의 과도상태는 90°~180°, 270°~360°에만 영향을 미치므로 다음 반주기 즉, 180°~360°, 360°~540°에서의 연산에 의해, 두 경우 모두 12.5ms에서 저항성 누전전류가 구해진다. 따라서 이들 경우에 누전 차단기는 약 18.5ms에서 동작됨을 알 수 있다. 결국 차단시간은 누전시점에 따라 최소 18.5ms에서 최대 26ms로 차이가 있다.

4.4.2 차단기 동작시간 및 신뢰성 테스트

기존의 합성 누전전류방식 누전차단기 내의 제어회로를 제거한 후 본 실험에서 제작된 저항성 누전전류 검출회로를 접속하여, 실제 선로에 용량성 누전전류(I_C)가 흐르는 상태에서 저항성 누전전류가 기준치 이상으로 흐를 경우 제작된 검출회로에 의한 선로의 차단시간을 측정하였다. 예를 들면, 40mA의 용량성 누전전류(I_C)가 흐르고 있는 상태에서 임의의 시간에 30mA의 저항성 누전전류(I_R)가 흐를 때, 합성 누전전류 신호와 제작된 회로의 출력 v_8 을 오실로스코프로 측정하여 그림 13에 나타내었다. 스위치(SW_1)이 투입되기 전 용량성 누전전류(I_C)가 흐르는 동안에는 회로의 출력 v_8 이 정확히 영이 됨을 확인할 수 있다. 그리고 스위치(SW_1)가 투입된 후 저항성 누전전류(I_R)가 흐르면서부터 그림 13에서 저항성 누전전류(I_R)를 검출하기 시작함을 알 수 있다. ch.1은 영상변류기로부터 출력되어진 합성 누전전류신호를 증폭한 파형으로써 연산증폭기(OP8)의 출력이며, ch.2는 회로출력 v_8 로서, 세 개의 출력 중에 세 번째에 의해 차단기가 동작했음을 볼 수 있다. 즉, 첫 번째 출력과 두 번째 출력은 합성 누전전류신호가 LPF의 과도현상에 영향을 받아 실제로 30mA의 저항성 누전전류가 흐르고 있음에도 불구하고 그 크기가 30mA에 미치지 못하는 결과를 냈다. 반면 세 번째 출력은 합성 누전전류 신호의 과도현상에 아무런 영향을 받지 않았으므로 정상적으로 30mA의 저항성 누전전류량에 해당하는 신호로 출력되었다. 즉, 이 신호에 의

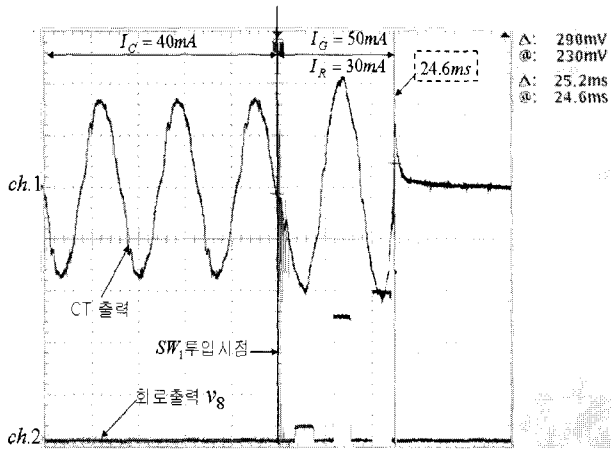


그림 13 차단시간 측정
Fig. 13 Interruption time test

해 비교기(OP14)는 출력을 내었고, 차단기의 기계적 동작시간(약6ms)이 지난 후 24.6ms에서 선로가 완전히 차단되고 있음을 알 수 있다. 그러나 최종적으로 이러한 지연오차를 보임에도 불구하고 차단시간은 누전차단기의 규정차단시간 30ms를 만족하였다.

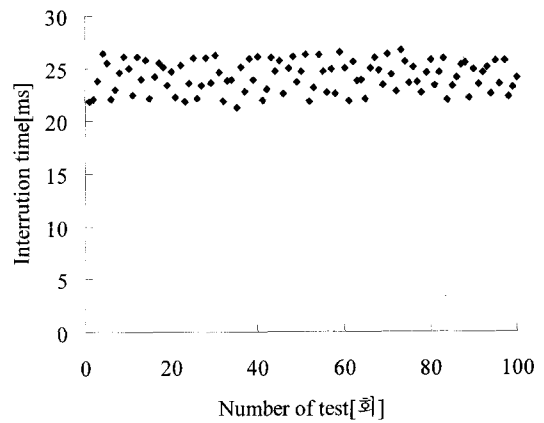
그림 14는 각각의 누전전류가 흐를 때 위와 같은 실험을 총 100회씩 실시하여 그 차단시간을 측정된 결과로써 300회 모두 30ms이내에 동작하였음을 보여준다.

이상의 고찰로부터 제작된 회로는 어떠한 경우에도 용량성 누전전류량과 저항성 누전전류량의 크기에 상관없이 차단기가 규정시간 내에 동작됨을 알 수 있으며, 더불어 본 연구에서 제안된 검출회로를 이용하면 선로에 용량성 누전전류(I_C)가 흐를 경우 이로 인한 누전차단기의 오동작 현상을 완벽하게 제거할 수 있음을 알 수 있다.

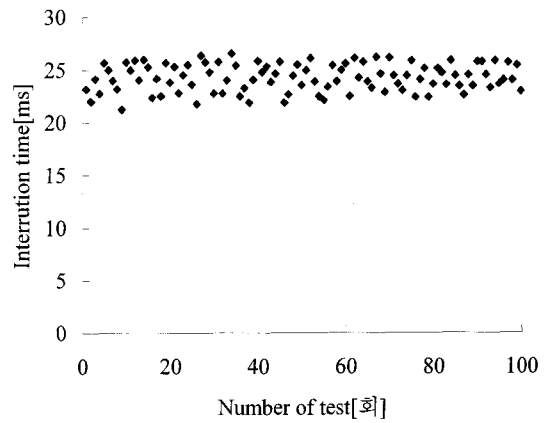
5. 결 론

본 논문에서는 선로에 흐르는 합성 누전전류를 전원전압의 반주기에 대하여 적분함으로써 저항성 누전전류를 분리 측정할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하고, 이를 아날로그 스위치, 초기화 가능 적분기와 샘플링회로를 도입하여 구현하였다. 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 다양하게 혼합되어 흐르는 여러 가지 경우에 대하여 실험한 결과, 제안된 저항성 누전전류 측정 알고리즘은 저항성 누전전류만 흐르는 경우는 물론 저항성 누전전류와 용량성 누전전류가 다양하게 혼합되어 동시에 흐르는 여러 가지 경우에도 합성 누전전류로부터 저항성 누전전류를 6.74% 정도의 최대 평균 오차범위 내에서 정확하게 산출함을 확인하였다. 또한 제작된 회로를 실제 누전차단기에 적용하여 누전차단 실험을 한 결과, 선로에 존재하는 용량성 누전전류로 인한 차단기의 오동작을 근본적으로 제거할 수 있음을 확인하였고, 동작시간은 어떠한 경우에도 규정 차단시간(30ms)내에 동작함을 보였다.

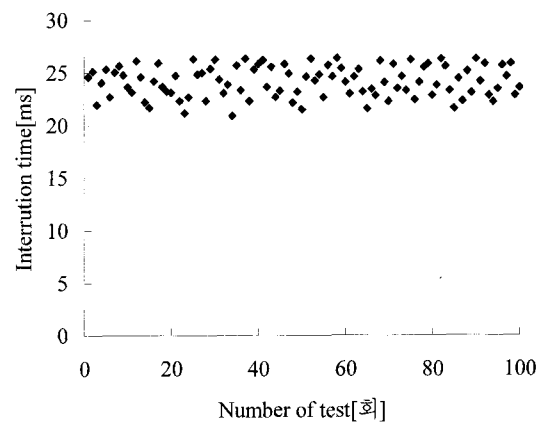
본 논문에서 제안한 저항성 누전전류 검출 알고리즘은 연산증폭기와 트랜지스터, 아날로그소자 등 가격이 저렴한 소자들만을 이용하여 간단하게 구현될 수 있기 때문에, 문헌



(a) $I_R=30mA, I_C=40mA$



(b) $I_R=15mA, I_C=10mA$



(c) $I_R=10mA, I_C=10mA$

그림 14 차단시간의 분포
Fig. 14 Distribution of the Interruption time

[8]-[10]에서 제안한 마이크로프로세서, 기억소자, A/D변환 장치 등 고가의 소자를 이용하여 구현되는 종래의 방법보다는 저렴하게 구현될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력 양성사업의 연구결과로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] LS산전, 누전차단기 기술자료
- [2] 전기설비 기술기준, 제14조, 제57조
- [3] 홍성호, 김두현, “누전차단기로 보호되는 저압선로에서의 발화위험성”, 한국산업안전학회지, Vol. 15, No. 1, pp. 93-99
- [4] 기사회원을 위한 이론과 실무, “누전에 의한 감전재해와 누전차단기”, 대한전기협회지, 1987. 5
- [5] 유재근, 이상익, 전정채, “자가용 수용가에서 배선용 및 누전차단기 오동작에 대한 조사연구”, 한국조명·전기설비학회, Vol. 19, No. 2, pp. 87-93, 2005. 03
- [6] 이재복, 명성호, 조연규, 장석훈, 김점식, “누전차단기의 뇌썩지 동작특성 분석 및 오동작 대책”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51C, No. 10, pp. 479-484, 2007.
- [7] 이상익, 유재근, 정종욱, 임용배, 전정채, “사무용 빌딩에서의 누전차단기 오동작과 전력품질 분석”, 한국조명전기설비학회 학술대회 논문집, pp. 211-216, 2004. 11
- [8] 다까까모나오히로, 사까이구니요시, 데라까미요시카즈, “저항 측정 방법”, 대한민국특허청, 공개번호 10-2004-0071673, 2004. 08. 12
- [9] 오노다께미, “누전전류차단 및 방법”, 국제특허, 국제공개번호 WO2006/035519, 2006.04.06
- [10] 김보경, “저압 선로의 활선 절연 감시장치”, 대한민국특허청, 공개번호 20-0401675, 2005. 11. 14
- [11] 함승진, 한송엽, 고창섭, “새로운 저항성 누전전류 측정 방법”, 대한전기학회 논문지, Vol. 56, No. 8, pp. 1397-1404, 2007. 08
- [12] 한국공업규격, KSC4613, 한국표준협회

저 자 소 개



함 승 진 (咸 承 珍)

1980년 4월 2일생. 2006년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 충북대학교 대학원 전기공학전공 석사과정.

Tel : 043-274-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : hsj1234@chungbuk.ac.kr



한 송 엽 (韓 松 曄)

1963년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1967년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1985년~1986년 프랑스 그레노블대학 방문교수. 1995년~1998년 한국전기연구원 이사. 1994년~1998년 한국전력공사 이사. 1968년~2004년 서울대학교 공과대학 전기공학과 교수. 2004년~현재 서울대학교 명예교수.

Tel : 02-880-7646

Fax : 02-883-0827

E-mail : syhahn@snu.ac.kr



고 창 섭 (高 彰 燮)

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터공학과 객원 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 2003년 2월~2004년 1월 미국 Texas A&M University, 전기컴퓨터공학과 객원 교수, 1996~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수.

Tel : 043-261-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : Kohcs@chungbuk.ac.kr