

A Study on current sensor

李 煥*
(Hwan Lee)

Abstract : The item and structure of current detector depends on the current in conductors. The Hall current detector of these detectors is to use the variation of Hall voltage to conductor's current and it is very difficult for the conventional type to detect small current. In this paper we study experimented-method that detect AC current by using the magnetic modulation method the current, 0[mA]~100[mA]. The experiments results in 5percent against the conventional, 20percent in linear error, 0.12[$\Delta mV/\Delta mA$] to conventional type, 50[$\Delta mV/\Delta mA$] in sensitivity.

Key Words : Hall device, magnetic modulation, Linearity error, Sensitivity

1. 서 론

홀소자를 이용한 전류 검출기는 측정회로의 전류크기에 따라 홀전압이 변하는 반도체의 홀 효과를 이용한 것으로 기존의 전류검출 방법에 비해 그 특성이 매우 우수하고 응용분야가 광범위하여 최근에 매우 많이 연구되고 있는 분야이다[1~4].

기존의 전류검출 방법으로써 교류인 경우는 CT방식을 이용하거나 회로에 검출기를 직렬로 연결하는 기법을 주로 이용하여 왔는데 이들 방법은 주파수 변화에 따라 오차가 크고 직류인 경우는 검출할 수 없는 문제점이 있다.

직류인 때는 회로에 저항을 직렬로 연결하여 IR의 전압강하를 이용하는 방법이 있는데 이 경우는 피측정체와 검출기 사이에 절연이 불가능하고, 검출기를 연결할 때 회로를 절단해야 하는 불편이 따르며 IR에 의한 전압강하가 피측정체에 영향을 주게되므로 측정치에 오차가 나타나게 된다.

또한 직류, 교류검출용으로는 열전대의 열기전력을 이용하는 2차적인 방법이 사용되고 있으나 이 방법은 검출전류가 큰 경우 오차가 크고 미소전류는 검출하기가 어려운점 등이 문제점으로 지적되고 있다.

이에 대해 최근에 많이 연구되고 있는 홀소자를 이용한 전류 검출기는 피측정 도체와 검출기간의 신호전달이 전기에너지에서 자기에너지로 바뀐 다음 다시 전기에너지로 바뀌기 때문에 절연이 매우 용이하고 주파수 대역폭이 넓은 특징을 갖게 되므로 도체전류를 직류에서 교류까지 폭넓게 검출 할 수 있는 장점이 있다[5~6]. 특히 홀소자의 특성을 이용한 전류 검출기법은 직류인 경우는 측정전류의 크기는 물론 전류의 방향까지도 알 수 있는 장점도 있어 최근 외국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[7].

홀소자를 이용한 전류검출방법은 직접검출법과 영자속법(Zero Magnetic Flux Methode)을 이용하고 있으나 이 방법들은 철

심의 잔류자기 때문에 감도를 높일수 없어 수밀리 암페어 단위의 전류는 검출하기가 어렵고 또검출이 되어도 피측정 도체의 전류가 50(mA) 이하가 되면 직선성 오차가 갑자기 수십퍼센트 정도로 증가하여 일백밀리 암페어 이하에서는 검출이 어렵고 검출이 되어도 그 검출값이 부정확 하였다. 그래서 본 연구에서는 자기변조법을 이용한 DC 전류검출에[5, 6] 이어서 교류전류도 검출하려고 한다. 기존의 방법으로는 감도가 0.12($\Delta mv/\Delta mA$)인데, 자기변조법을 이용하면50($\Delta mV/\Delta mA$) 이상으로 개선시킬수 있게 된다. 그래서 수밀리 암페어의 AC전류도 검출하고 직선성 오차도 최대 5퍼센트 이하로 감소 시키고자 한다.그리고 AC전류의 검출범위는 수 밀리 암페어 에서 100밀리 암페어의 범위로 정하였다.

2. 자기변조

이 논문에서 자기변조는 반송파 전류에 의해 나타난 고주파 자기에, 도체에 흐르는 AC전류에 의해 나타난 저주파 자기가 중첩된 상태를 말한다. 미소전류 측정시 자기변조를 이용하면 도체의 미소전류도 반송파에 변조되어 있으므로 반송파가 전송되면 변조된 신호파도 같이 전송될수 있고 특히 수십밀리암페어 단위의 약한전류 검출시 나타나는 잔류자기의 영향이 줄어들어 검출기의 직선성이 좋게 된다는 장점이 있다.

이 논문에서 자기변조의 동작은 그림 1과같이 철심에 반송파가 흐를 권선 H를 감고 반송파 전류 i_c 를 흘려주면 홀소자에는 이 i_c 에 비례한 홀전압이 나타나게 된다.

이 때 도체 K에 검출하려는 전류 I_{AC} 가 흐르면 i_c 에 의한 자기파는 I_{AC} 에 의하여 생성된 자기에 의하여 반송파의 진폭은 변함없이 중심축이 이동하게 되어 홀소자에 가해지게 되므로 홀소자에서 나오는 홀전압은 교류자기 (H의 권수 $\times i_c + I_{AC}$)에 비례하는 전압값이 되어 나타나는 현상을 자기 변조라 한다.

자기회로 전체의 자기저항을 R_t 라 하면

$$R_t = \frac{C}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{C_g}{\mu_0 S} = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{C}{\mu_r} + C_g \right) \quad (1)$$

*正 會 員 : 大田産業大 制御計測工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1995年 6月 13日

最終完了 : 1996年 1月 30日

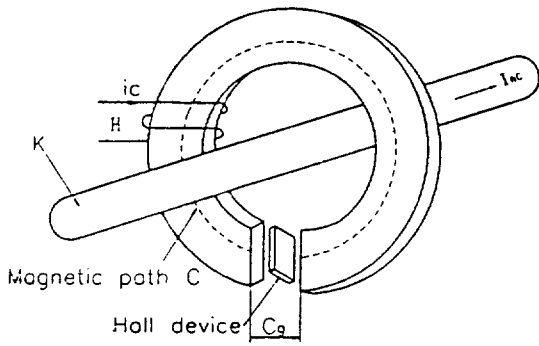


그림 1 자기변조기의 구조
Fig. 1 Structure of magnetic modulator

$\Phi R = NI$ 에서

$$\Phi = \frac{NI}{R_t} = \frac{NI}{\frac{C}{\mu S} + \frac{C_g}{\mu_0 S}} \quad (2)$$

철심의 공극에서 홀소자에 가해질 자속밀도를 구해보면 자속 밀도 B 는

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{NI}{\frac{C}{\mu} + \frac{C_g}{\mu_0}} = \frac{NI}{\mu_0 \mu_r + \frac{C_g}{\mu_0}} = \frac{NI}{\mu_0 \left(\frac{C}{\mu_r} + C_g \right)} \quad (3)$$

홀전압식

$$V_H = K_B B \quad (4)$$

$$V_H = K_B \frac{NI}{\mu_0 \left(\frac{C}{\mu_r} + C_g \right)} \quad (5)$$

그림에서 권선 H 에 흐르는 반송파 전류 i_c 는

$$i_c = I_{m1} \sin(\omega_1 t) \quad (6)$$

의 교류전류이다.

식(3) 에서 I 대신에 식(6) 의 i_c 를 대입하고 또 권선H를 N회 감았다고 하면 이 때 철심의 자속밀도 B_1 은

$$B_1 = \frac{N}{\mu_0 \left(\frac{C}{\mu_r} + C_g \right)} I_{m1} \sin(\omega_1 t) \quad (7)$$

$$K_{B1} = \frac{N}{\mu_0 \left(\frac{C}{\mu_r} + C_g \right)}$$

가 된다.

이 때의 파형은 변조되지 않은 반송파 자기에 의한 홀전압만이 나타나게 된다. 이 때에 도체 K에 검출하려는 전류 I_{AC} 가 흐르면 철심의 자속은 I_{AC} 에 의하여 변조되어 나타난다. 이 때 변조된 자속밀도를 B_2 라 하면

$$I_{AC} = I_{m2} \sin(\omega_2 t)$$

$$B_2 = K_{B1} [I_{m1} \sin(\omega_1 t) + I_{m2} \sin(\omega_2 t)] \quad (8)$$

가 된다.

$$B_2 = K_{B1} I_{m1} [\sin(\omega_1 t) + M \sin(\omega_2 t)]$$

$$M: \frac{I_{m2}}{I_{m1}} \text{ 변조도}$$

$M = 100\%$ 변조

$M > 1$ 과 변조 가 되어 변조하여 검출하는 의미가 없어진다.

$M < 1$ 의 상태에서 검출해야 직선성 오차를 개선할 수 있다.

그러므로 검출할 수 있는 전류의 한계는 $M < 1$ 의 범위 까지이다.

3. 실험

3.1 변조실험

H권선에는 반송파 전류(진폭과 주파수가 일정한 2KHz의 교류정현파)를 흘려주었다. 도체 K는 우리가 검출해야 할 전류가 흐르는 도체이다.

그래서 도체 K에 흐르는 전류의 종류는 정현파, 구형파, 삼각파, 정현파를 다이리스터로 제어시킨파를 따로따로 흘려주었으며 주파수는 상용주파수가 60Hz이므로 60Hz를 택하여 실험하였다. 그림 2는 무변조된 반송파의 모양이다.

그림 3의 A는 반송파와 K도체에 구형파 전류가 흘렀을 때 변

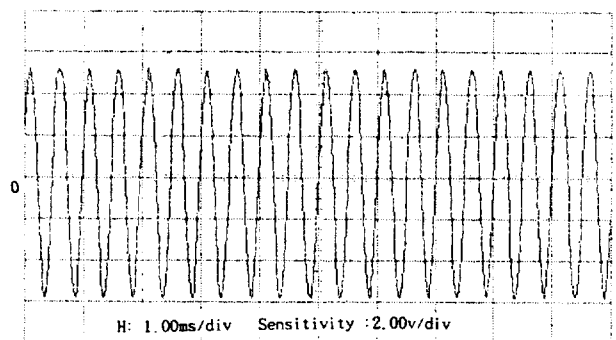


그림 2 무변조된 반송파
Fig. 2 Unmodulated carrier waveform

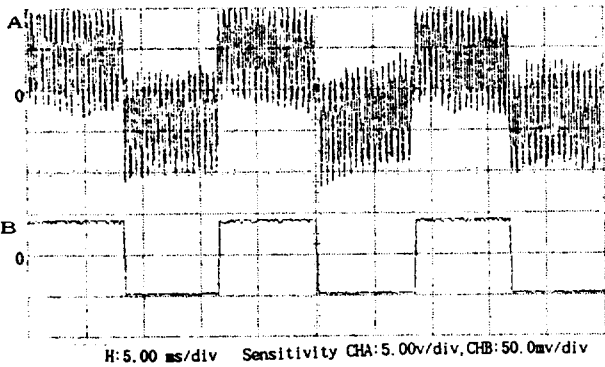


그림 3 자기변조된 파형

- (a) 구형파로 변조된 파형
- (b) 피측정 도체전류파형(구형파)

Fig. 3 Waveforms magnetic modulated by squarewave

- (a) magnetic modulated Waveform
- (b) Conductor current (squarewave)

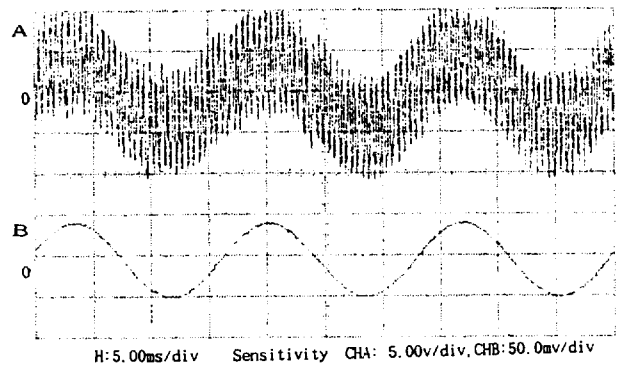


그림 6 자기변조된 파형

- (a) 정현파로 변조된 파형
- (b) 피측정 도체전류파형(정현파)

Fig. 6 Waveforms magnetic modulated by sinewave

- (a) Waveform magnetic modulated by sinewave
- (b) Conductor current (sinewave)

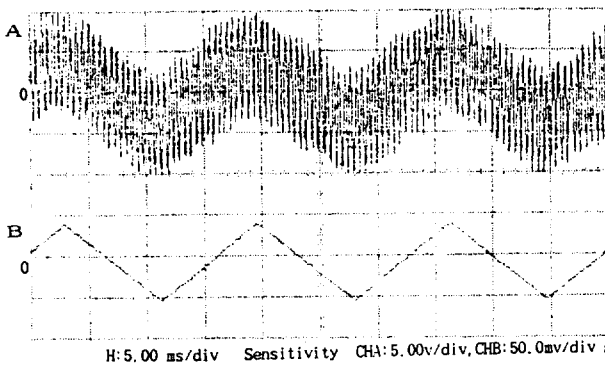


그림 4 자기변조된 파형

- (a) 삼각파로 변조된 파형
- (b) 피측정 도체전류파형(삼각파)

Fig. 4 Waveforms magnetic modulated by triangle

- (a) Waveform magnetic modulated by Triangle
- (b) Conductor current (triangle)

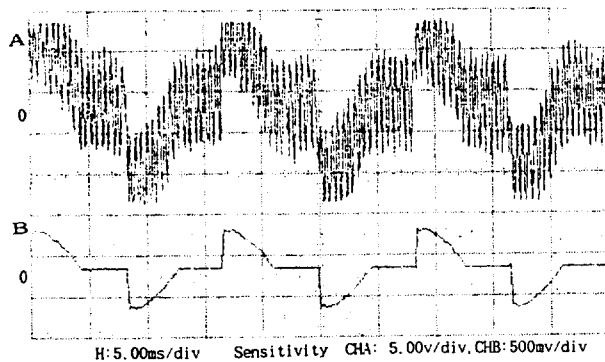


그림 5 자기변조된 파형

- (a) 다이리스터로 제어된 교류로 변조된 파형
- (b) 피측정 도체전류파형(다이리스터로 제어된파)

Fig. 5 Waveforms magnetic modulated by thy.cont.wave

- (a) Waveform magnetic modulated by thy.cont.wave
- (b) Conductor current (thy.cont.wave)

조된 파형이고 B는 K도체에 흐르는 즉 우리가 검출하려는 전류의 파형으로 구형파 에서도 변조가 잘되고 있다.

그림 4의 A는 반송파와 K도체에 삼각파전류가 흘렀을때 변조된 파형이고 B는 K도체에 흐르는 AC전류의 파형으로 신호가 직선적으로 증가 하고 직선적으로 감소하는 파형에서도 변조가 잘되고 있다.

그림 5의 A는 반송파가 K도체의 전류 즉 60Hz의 정현파 전류가 다이리스터에 의해 제어각 83도에서 제어된 전류로 변조된 파형이고 B는 60Hz의 정현파 전류가 다이리스터에 의해 제어각 83도로 제어된 전류의 파형으로 도체의 전류신호에 급격한 증가가 있는 부분도 변조가 잘되고 있음을 보여주고 있다.

그림 6의 A는 반송파가 K도체에 흐르는 60Hz의 정현파에 의해 변조된 파형이고 B는 K도체에 흐르는 60Hz의 정현파 전류이다.

K도체에 흐르는 전류의 종류는 여러가지가 있을 수 있으나 몇종류의 파형으로 실험을 하였는데 도체의 전류를 반송파에 변조시키는 동작은 파형에 관계없이 모두 변조가 잘되었다. 자기변조기의 주파수 특성은 0-4 KHz까지 일정하였기 때문에 중심의 주파수인 2KHz를 반송파 주파수로 정하였다.

3.2 복조실험

복조기는 게르마늄 다이오드로 복조회로를 구성하였다. 복조시킴파는 변조신호와 반송파가 같이 합하여 있으므로 반송파만을 여과장치를 통하여 차단시키면 원래의 신호만이 V_{out} 단자

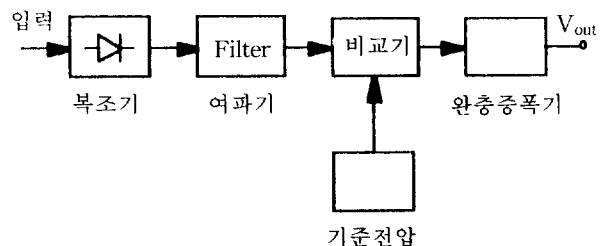


그림 7 복조회로 블록다이아그램

Fig. 7 Dem. Cir. Block Diagram

에 나타나게 된다. 그러면 도체에 흐르는 미소전류가 검출기를 통하여 전압의 형태로 나타나므로 도체의 전류가 파형과 주파수는 변함없이 전류의 크기에 비례하여 전압의 크기로 표시할 수 있게 된다. 비대칭 교류도 검출하기 위하여 역과기에서 DC 분도 통과 시키도록 하였다. 그래서 DC분 잡음이 있을때 이 잡음을 제거시키기 위하여 기준전압과 비교기를 설치하였다.

그림 8의 A는 구형파로 변조된 파를 복조한 파형이고 B는 변조되기전 도체K의 전류인 구형파이다.

그림 9의 A는 삼각파로 변조된 파를 복조한 파형이고 B는 도체K에 흐르는 변조되기 전의 전류파형이다.

그림 10의 A는 60Hz의 정현파를 다이리스터로 제어된 전류로 변조된 파를 복조한 파형이고 B는 K 도체에 흐르는 변조되기 전의 제어된 전류파형이다. 이 실험에서는 다이리스터로 제어된 전류를 많이 흘려주어 파변조 시켰다. 그래서 $(N \times i_c) + I_{AC}$ 전체의 값이 I_{AC} 가 부(-)극성으로 최대치일 때는 $(N \times i_c) + I_{AC}$ 에 의한 전압값이 0(V)이하가 되어 복조기 출력에는 나타나지 않았다.

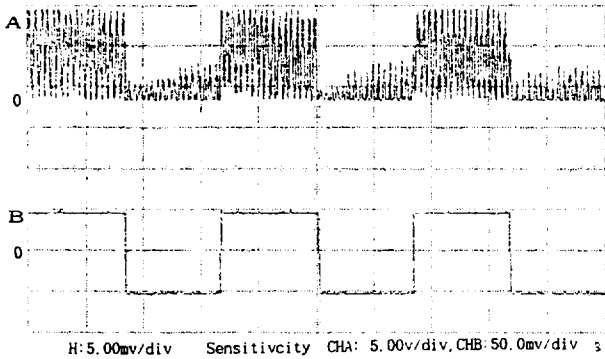


그림 8 복조된 파형
(a) 복조된 파형(구형파)
(b) 피측정 도체전류파형(구형파)

Fig. 8 Demodulated Waveforms
(a) Demodulated Waveform (squarewave)
(b) Conductor current(squarewave)

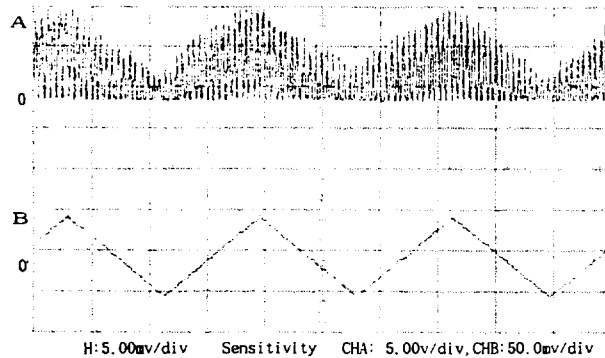


그림 9 복조된 파형
(a) 복조된 파형(삼각파)
(b) 피측정 도체전류파형(삼각파)

Fig. 9 Demodulated waveforms
(a) Demodulated waveform(triangle)
(b) Conductor current(triangle)

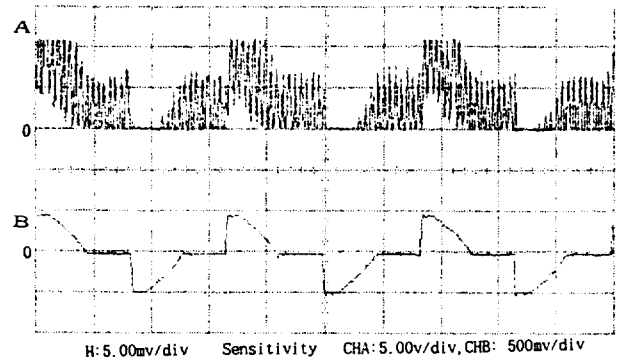


그림 10 복조된 파형
(a) 제어교류 변조파를 복조한 파형
(b) 피측정 도체전류파형(다이리스터로 제어된파)

Fig. 10 Demodulated Waveforms
(a) Demodulated waveform by thy.cont.wave
(b) Conductor current(thy.cont.wave)

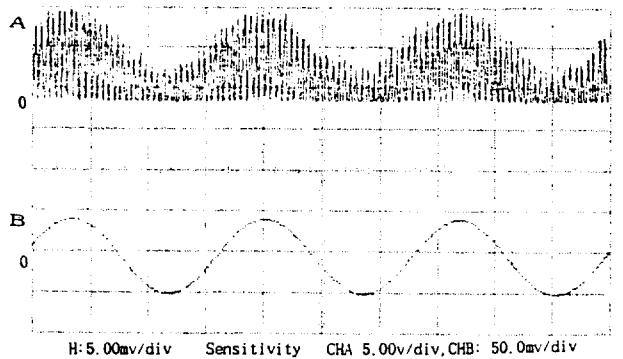


그림 11 복조된 파형
(a) 복조된 파형(정현파)
(b) 피측정 도체전류파형(정현파)

Fig. 11 Demodulated waveforms
(a) Demodulated waveform(sinewave)
(b) Conductor current(sinewave)

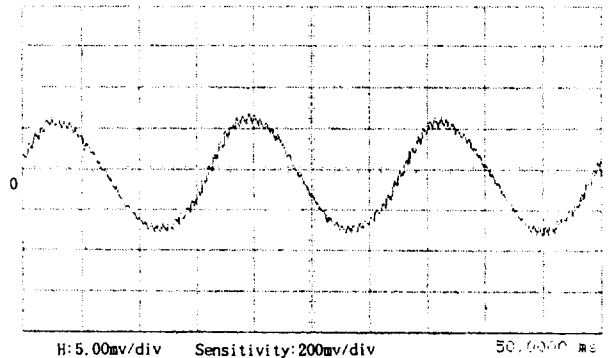


그림 12 검출기 출력전압 파형 (정현파)
Fig. 12 Sensor output waveform(sinewave)

그림 11의 A는 정현파에 의하여 변조된 파를 복조한 파형이고 B는 K도체에 흐르는 60 Hz의 정현파 전류 즉 변조되기 전의 전류파형이다.

그림 12는 그림 11에서 A그림의 파형이 복조회로를 거쳐서 나온 출력단의 파형으로 K 도체에 흐르는 60Hz의 상용주파 전류가 검출기에 검출되어 V_{out} 단자에 전압의 형태로 나타난 것이다. 파형과 주파수는 변하지 않았으나, 반송파의 주파수가 2 KHz로 낮기 때문에 완전하게 여파되지 못하고 60Hz의 정현파가 약간의 반송파 영향을 받고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

반송파로는 정현파를 사용하고 K도체에 흐르는 전류는 구형파, 삼각파, 다이얼리스트로 제어된파, 정현파를 택하여 주었는데 반송파 전체의 윤곽이 K도체에 흐르는 전류의 파형에 따라 변하고 있으므로 파형에 관계없이 변조가 잘되었다.

다이오드로 복조한 파형에서 K도체의 전류파형이 부(-)일 때도 낮은전압의 반송파 신호가 나오는 것은 100 퍼어센트 변조를 시키지 않았기 때문이다.

그림 13은 K도체에 흐르는 전류와 검출기출력 V_{out} 단자의 값

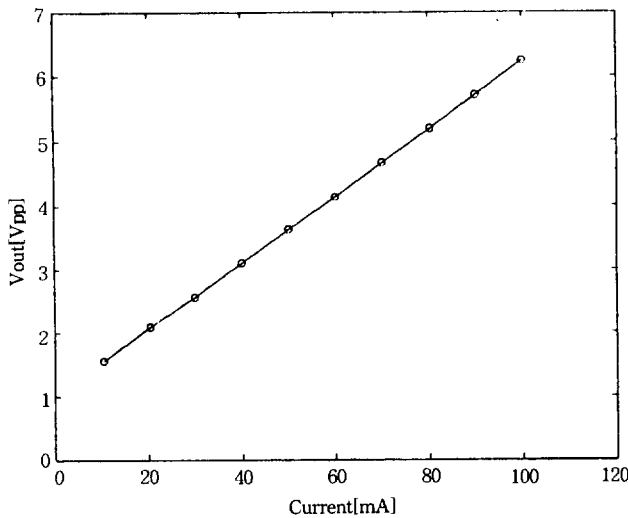


그림 13 AC 전류 대 검출기 출력전압
Fig. 13 AC Current vs. output voltage of current sensor

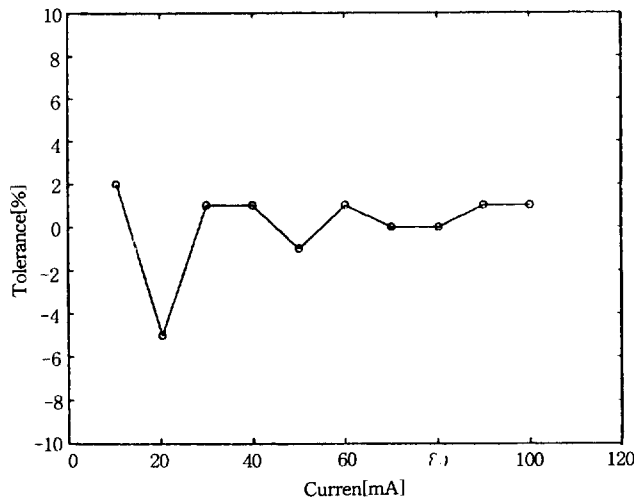


그림 14 직선성 오차곡선
Fig. 14 Linearity Error graph

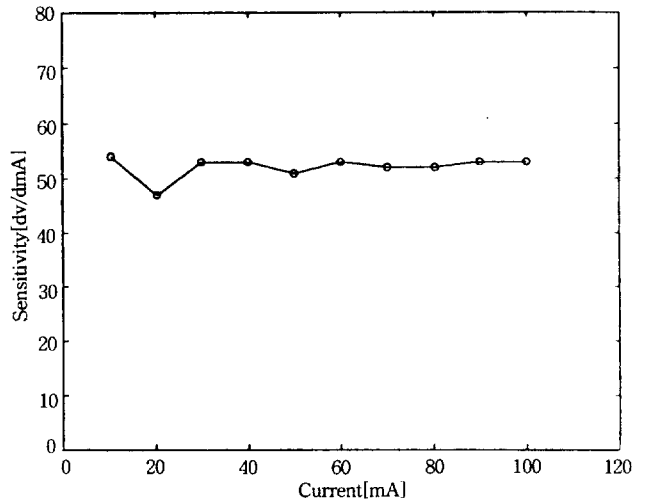


그림 15 감도곡선
Fig. 15 Sensitivity graph

으로 전류와 출력 단자간의 전압이 거의 직선적으로 변하고 있는 것을 알 수 있고, 그림 14는 직선성 오차 곡선으로 0 자속법에서는 50mA 이하로 내려가면 5퍼어센트에서 20mA 일 때는 10 퍼어센트 까지 증가하는데 비하여 이 자기변조법에 의하여 검출한 검출기의 직선성 오차 곡선은 최대 5퍼어센트 이하로 상당히 개선되었다.

그림 15는 감도곡선으로 DC전류를 검출할 때는 복조후 여파기에서 DC분 이외의 성분을 모두 제거 시키기 때문에 AC성분의 잡음은 없었으나 AC전류를 검출할 때는 여파기에서 완전하게 여파시킬 수가 없어 어느정도의 AC성분의 잡음도 포함되기 때문에 출력에 약간의 잡음이 섞여 있었고 특히 10mA 이하에서는 잡음의 크기가 신호크기의 반 이상의 값이 나타나 있었다. 감도 또한 $50[\Delta mV/\Delta mA]$ 이상이 되어 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 전류 검출기의, 감도와 직선성오차에 대한 문제를 제기하고, 이의 해결책으로 자기변조법에 의한 검출방법을 제시하였다.

자기변조법에 의하여 제작된 검출기가 기존방식의 검출기보다 감도가 높고 직선성 오차도 개선 되었음을 실험을 통하여 입증하였다.

피측정도체의 전류를 자기변조법에 의하여 검출하면 피측정도체와 검출기 간의 절연을 유지하면서 100mA이하의 미소전류 검출시 철심의 잔류자기 영향을 줄일수 있어 0자속법보다 직선성 오차를 최대 5퍼어센트 이하로 줄일수 있고 10mA에서는 2퍼어센트로 개선되었다. 그리고 감도 또한 $50[\Delta mV/\Delta mA]$ 이상으로 개선 되었다.

DC전류를 검출할 때 보다 AC전류를 검출할 때의 직선성 오차가 평균 ± 1 퍼어센트 이하로 감소 하는 것을 보아 DC전류인 때는 잔류자기의 영향을 약간 받고 있으며 AC전류인 때는 잔류자기의 영향이 DC전류 때 보다 더적게 받고 있다는 것을 알 수 있다.

앞으로의 연구과제는 비대칭교류, 회로의 잡음 경감 대책, 감

도향상 방법을 찾아 더욱 낮은 전류 검출에 대하여 연구해야할
속제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] THORO HARA, "Highly Linear GaAs Hall Devices Fabricated by Ion Implantation," IEEE TRANS ELECTRON DEV, VOL. ED-29 NO 1, PP. 78-82, 1982.
- [2] AROKIA NATHAN, "The Hall Effect in Integrated Magnetotransistors," IEEE TRANS ELECTRON DEV, VOL. 36. no 1, PP. 108-117, 1989.
- [3] Steven W Smith, "Low-noise Hall probe preamplifier," Rev. sci.instrum, PP. 1440-1441, 1986.
- [4] Paul Galluzzi, "Current monitor uses Hall sensor," Design Ideas, PP. 205, 1987.
- [5] 김한성, 이 환, "DC전류 검출기의 감도개선을 위한 자기변조," 1993 하계 학술대회 논문집(B), pp. 791-793, 1993. 7.
- [6] 김한성, 이 환, "DC 전류검출기의 감도개선을 위한 새로운 자기변조," 전기학회 논문지 제43권 제2호, pp. 268-277, 1994. 2.
- [7] SABURO TAKAMIYA, "Differential Amplification Magnetic Sensor," IEEE TRANS Electron Devices, Vol. ED-19, NO 10, PP. 1085-1090, 1972.

저 자 소 개



이 환 (李 煥)

1944년 12월 21일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1971년~1980년 대진문화방송 TV기술부 근무. 1994년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년 3월 현재 대전산업대 제어계측공학과 교수