

포화자성코어를 이용한 직류전류측정 트랜스듀서

박영태* · 정재갑 · 강전홍 · 유권상 · 유광민

한국표준과학연구원, 전자기표준부

(2004년 6월 14일 받음, 2004년 7월 5일 최종수정본 받음)

본 연구는 누설전류와 같은 직류 저 전류를 측정하기 위한 센서 개발에 관한 것이다. 2개의 동일한 링 형태의 자성체 코어를 이용하여 전류센서를 개발하였으며 센서에 대한 특성과 불확도에 대하여 기술하였다. 이 트랜스듀서는 변성기형의 센서, 피크검출기, 기준저주파발전기 그리고 고조파를 함유한 센서의 출력을 측정할 수 있는 정밀 측정회로들로 구성되며 DC 2A까지 측정할 수 있다. 분해능과 감도는 0.1 mA, 10 mV/mA로 각각 평가되었다.

주제어 : 피크검출기, 변성기, 기준저주파발전기, 고조파, 분해능, 감도

I. 서 론

직류전류를 사용하는 전기기기에 흐르는 누설전류의 정밀 측정은 측정방법과 사용소자의 성능에 따라 다르다. 대부분 직류전류 측정은 홀 소자를 이용하여 측정하고 있다[1]. 홀 소자를 이용할 경우 온도 특성이 나빠지며 저 전류 측정에는 선형도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 근래에는 홀 소자에 비하여 선형도가 나은 아몰포스 리본을 저 전류와 대 전류의 측정 소자로 사용하고 있다[2, 3]. 전류측정 센서로 이용하고 있는 자기센서들은 강한 바이어스 자기장이 필요하며, 우수한 측정 감도에 비해 측정 범위가 좁고 바이어스 전류 주파수를 수백 kHz에서 수 MHz 까지 공급해야 한다. 높은 주파수의 공급은 신호처리회로 구성을 복잡하게 하고 신호의 정밀 측정을 위한 전자소자들의 선택을 어렵게 한다.

일반적으로 전류측정에 사용되는 자기센서들은 강한 자기장에서 많이 활용되지만 센서를 동작시키기 위하여 수백 kHz 이상의 바이어스 전류를 공급해야하고 성능 면에서 변압기형 CT(current transformer) 보다 떨어지는 단점을 가지고 있다. 계기용 CT는 변압기형의 교류전류를 측정하는 소자로 사용되며 홀 소자와 결합하여 직류전류를 측정한다. 대 전류 직류전류측정에 홀 소자와 같은 자기센서를 사용하지 않고 쌍으로 구성된 자성체 코어 출력의 비대칭 특성을 이용한 계기용 CT를 사용한다[4, 5]. E. So에 의한 CT형의 센서는 자성체 코어 속에 코어를 삽입하여 직류 대 전류 측정에서의 정밀도는 개선했지만 제작이 까다롭고 저 전류측정에서 선형도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다. T. Watanabe의 경우도 직류 대 전류측정을 위하여 4개의 코어를 쌍으로 만들어 각 쌍으로 된 코어에 교류전압 40 V를

병렬로 공급하는 구성으로 되어있다. 각 쌍에서 출력된 신호를 브리지 다이오드와 캐패시터로 정류하여 서로 비교한 후 다른 한 쌍의 코어에 피드백 시켜 출력을 얻도록 하고 있다. 직류를 측정하기 위하여 4개의 자성체 코어와 교류 40 V공급, 그리고 수동소자에 의한 정류회로 등은 저 전류 측정 용도에 적합하지 않다.

본 연구에서는 센서의 출력회로를 간편화한 저 전류 직류 전류를 감지할 수 있는 전류센서를 개발하고 특성에 대한 내용을 기술하였다. 센서는 특성과 형태가 동일한 2개의 트로이달(troidal) 형 자성체 코어를 사용하였다. 트로이달 형 자성체 코어를 계기용 CT형태로 감고 자성체 코어의 포화 현상을 이용한 비대칭 특성을 이용한다. 자성체 코어의 비대칭 특성은 교류신호를 발생시키는 변조기(modulator)에 의하여 자기포화에 의해 만들어진다. 자기포화는 자성체 코어의 재질과 교류신호를 발생시키는 변조기의 진폭, 그리고 주파수에 의존한다. 신호처리를 위한 회로에서 센서를 포화시키는 전류와 회로에서 소비되는 소비전류의 최소화, 경제성을 생각한 저가의 전자부품 사용, 그리고 회로의 소형화 등과 같은 많은 제약을 해결했다.

직류전류는 저주파 기준신호 발전기로 제작된 저주파 발진신호와 자화전류에 의해 변조된 출력전류로부터 측정하였다. 자화 전류가 대칭일 때 출력을 zero로 만들기 위하여 쌍으로 된 2개의 피크검출기(peak value detector), CT 형의 센서, 변조신호 발전기로 제작된 저주파 발진신호와 동기된 신호를 이용하여 많은 고조파가 함유된 신호를 정밀직류전압으로 측정하기 위한 위상검파(phase sensitive detector) 회로 등을 개발하였다. 이 센서는 2A 미만의 직류누설전류를 측정하는데 사용하고자 하며 분해능은 0.1 mA, 감도 10 mV/mA의 특성을 가지고 있다.

*Tel: (042) 868-5158, E-mail: pyt@kriss.re.kr

II. 센서 및 회로구성

2.1. 전류측정 센서의 구성

전류 측정 센서는 트로이달 형태의 두 쌍으로 구성되어 있다. 센서의 직경은 22 mm이고 두께는 약 12 mm, 폭 16 mm 정도가 된다. 1차 코일과 2차 코일들이 감겨진 자성체 코어가 2단으로 포개진 것과 같은 대칭 형태로 이루어져 있다. 센서를 구성하고 있는 코어와 권선 형태를 Fig. 1에 나타내었다. T1, T2는 자성체 코어를 나타내고 W1은 측정하고자 하는 전류의 권선인 1차측 권선을 나타내며 권선 수는 1회이다. 자성체 코어 T1에 감겨진 권선 W3과 자성체 코어 T2에 감겨진 권선 W4는 T1, T2의 코어를 겹쳐 동시에 코일을 감은 W2와 함께 2차측 권선으로 구성된다. 이때 2차측 권선 수는 모두 동일하게 감는다.

2.2. 센서의 동작 원리

측정전류가 없을 때 센서의 출력은 동일한 형태의 두 쌍으로 이루어진 코어가 대칭으로 zero 출력을 유지한다. 측정전류가 W1으로부터 공급되면 입력전류의 방향에 따라 한쪽 코어가 포화상태를 이루어 대칭의 상태에서 차가 발생하는데 입력전류의 크기에 비례하는 값으로 나타난다. 두 코어의 재료는 퍼멀로이를 사용한다. 권선 W3과 W4에 자화전류를 발생시키기 위하여 교류 변조신호를 공급한다. 변조신호는 저주파수의 안정된 저주파 기준신호 발진기이며 양 쪽 권선 W3, W4의 한 쪽에 같이 연결된다. 두 코어에서 발생하는 자속은 변조기의 저주파 기준신호 발진기에서 공급하는 자화전류의 크기와 주파수에 따라 달라진다. 코어에 연결된 저주파 기준신호 발진기에 의하여 발생하는 변조전류는 양 코어가 동일한 특성을 가지고 있기 때문에 변조전류에 의하여 유도된 전류는 상쇄되어 측정에는 영향을 미치지 못한다. 저주파 기준신호 발진기에서 발생하는 변조 신호는 순수한 사인파를 사용하거나 사각파를 사용하는데 여기에서는 사각파를 사용한다. 권선 W2 양단에 발생하는 전압의 크기와 극성은 코어의 포화 상태와 입력 직류전류의 방향에 따라 바뀐다.

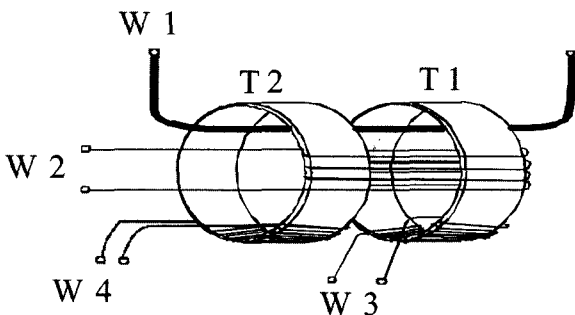


Fig. 1. 센서의 구조.

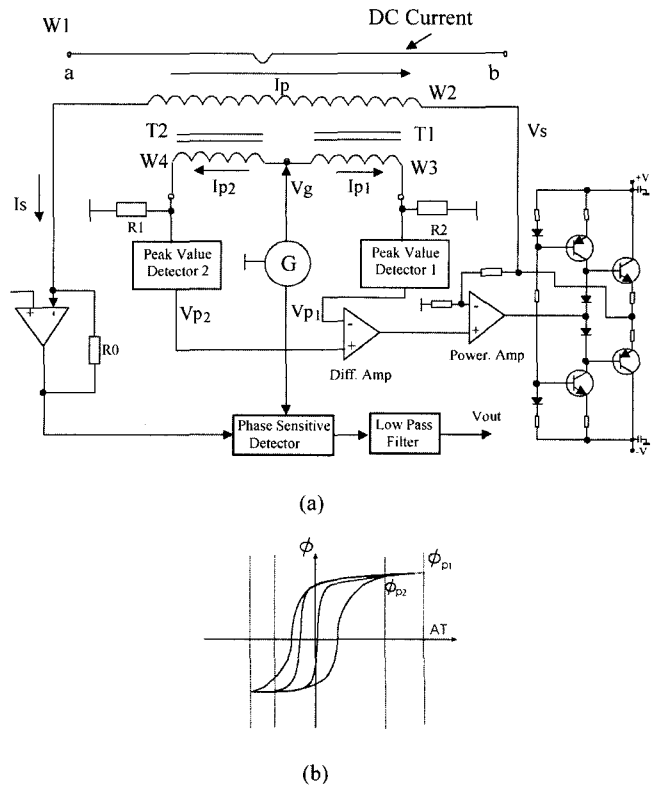


Fig. 2. 전체회로의 블록다이어그램과 센서의 자화전류형태 (a) 센서와 전체 전자회로 블록다이어그램, (b) ϕ_{p1} 은 I_p 와 I_{p1} 이 같은 방향, ϕ_{p2} 는 I_p 와 I_{p2} 는 다른 방향일때 센서의 자화전류 형태.

전류를 측정하는 자세한 원리를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 센서와 전체회로의 블록다이어그램으로 나타내었다. 측정전류 I_p 가 코일 W1을 통하여 a에서 b로 흐른다고 하면 사각파를 발생하고 있는 저주파 기준신호 발진기, G의 신호에 의해 자성체 코어 T1과 T2는 측정 직류전류 흐름의 방향에 따라 Fig. 2(b)에 나타낸 자화전류의 형태와 같은 특성을 나타낸다. 즉, 직류전류 흐름의 방향과 같은 방향일 경우 I_p 과 저주파 기준신호전류 I_{p1} 에 의하여 ϕ_{p1} 와 같은 특성을 가지며, 반대 방향일 경우 I_p 과 저주파 기준신호전류 I_{p2} 에 의하여 ϕ_{p2} 와 같은 자화전류의 형태를 가진다. 측정전류인 직류전류가 없을 때 저주파 기준신호 발진기의 신호에 의하여 W3과 W4의 코일을 통하여 나타나는 신호는의 자속과 동일한 전압이 R_1 과 R_2 에 나타난다. 이때 W1을 통하여 측정 직류전류가 공급되면 공급의 방향과 같은 T1의 자화 형태는 ϕ_{p1} 의 형태를 가지게 되며 직류전류의 방향과 반대인 T2의 자화 형태는 ϕ_{p2} 에 나타낸 모양을 가진다. 따라서 부하저항 R_1 과 R_2 에 나타나는 신호의 크기는 비대칭을 이루며 비대칭의 크기는 측정 직류전류의 크기에 비례한다.

직류 입력전류가 W1을 통하여 공급되면 G에 의하여 공급

되는 전류에 의해 한쪽 코어에서 가파른 포화 방향으로 기울어지는 자화곡선과 함께 자화전류는 갑자기 코어의 포화지역에서 증가하게 되는데 이것은 2차 권선의 자기유도가 급격히 떨어지는 현상으로 나타나기 때문이다. 만약 자화전류가 대칭이라면 정(+)과 부(-)의 주기는 동일한 모양을 가진다. 반주기의 피크값 정류와 이론적으로 정류된 신호의 합이 대칭일 경우 피크검출기 출력신호는 zero가 된다. 그러나 자화전류가 대칭이 아닐 경우, 반주기 동안의 정류된 신호와 합에 의한 출력 신호는 zero가 되지 않는다. 출력신호의 극성과 크기는 자화의 크기와 방향에 대응된다.

저주파 기준신호 발진기에 의하여 발생하는 비대칭 자화전류는 피크 검출기를 사용하여 검출한다. 부하저항 R_1 과 R_2 에 나타나는 신호는 사인파나 사각파가 아닌 고조파가 함유된 왜곡된 신호이므로 일반적인 방법으로 측정하면 큰 오차를 일으킨다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 R_1 과 R_2 에 나타나는 신호의 피크 값을 측정 후, 두 신호의 차를 피드백 권선인 W2로 공급하여 측정하는 방법을 사용한다.

피크 검출기의 사용은 고조파를 검출하는 데 장점을 가지고 있다. 그리고 고조파 뿐만 아니고 저주파 기준신호 발진기와 함께 발생하는 자신의 자화전류가 대칭을 통하여 상쇄된다. 이것은 정확하게 사인파, 혹은 사각파 모양의 저주파 기준신호 발진기를 얻기 위하여 저가의 밴드 필터, 동기 정류기와 부가의 회로를 사용할 수 있다는 의미이다. 그러나 피크 검출기와 함께 사용된 회로의 단점은 실제로 순수하게 대칭 자화전류의 경우에도 항상 저주파 기준신호 발진기의 주파수와 동일한 주파수를 가진 리플 전압이 발생된다. 이 리플 전압의 크기는 회로의 응답시간에 의하여 결정된다. 빠른 응답 특성을 얻기 위하여 피크 검출기는 가능한 작은 시정수를 가져야 한다. 이것은 피크 검출기에 저장되는, 그리고 자화전류의 피크 값에 비례하는 전하가 상대적으로 급히 방전되어야 함을 의미한다. 그러나 이것은 출력에 리플을 증가시키는 결과를 가져온다.

저주파 기준신호 발진기에 의하여 발생하는 비대칭 자화전류와 출력에 나타나는 리플 전압을 개선하기 위하여 W3의 출력에 2개의 피크 검출기를 사용하였다. 한 주기 동안 정(+)과 부(-)의 신호를 각각 2개의 피크 검출기에 공급하고 검출기의 출력신호를 합하여 차동 증폭기의 한쪽 입력신호로 사용한다. W4의 출력도 같은 방법을 통하여 차동 증폭기의 다른 한쪽 입력신호로 사용한다.

대칭 자화전류와 함께 2개의 피크 검출기의 출력신호는 정확하게 동일하면 이들 신호의 차 신호에는 어떠한 리플도 포함되지 않는다. 1차 권선에 유도되는 전류를 제거하기 위하여 두 개의 코어는 저주파 기준신호 발진기에 의하여 반대 방향으로 자화되거나 이 코어들을 통과하는 자화전류, 혹은

2개의 피크 검출기의 출력신호가 180°까지 상호간에 위상변이를 일으킨다.

2개의 피크 검출기의 출력신호는 차동 증폭기에서 차를 검출하여 이 신호를 다시 트랜지스터를 사용한 전류 증폭기에서 증폭한 후 권선 W2에 피드백되어 공급된다. 만약 저항에 걸리는 전압, 저항 R_2 에 걸리는 전압이 피크 검출기의 출력에 비례한다고 하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{p1} \approx R_1 I_{p1}, \quad V_{p2} \approx R_2 I_{p2} \tag{1}$$

여기서 $R_1 = R_2$ 가 되게 하고 동일한 특성을 가진 자성체와 동일한 권선을 했을 경우 $I_{p1} = I_{p2}$ 가 된다. 이러한 조건에서 피크 검출기의 출력 $V_{p1} = V_{p2}$ 가 된다. 따라서 두개의 피크 검출기의 출력차를 권선 W2에 피드백 시키는 전압 V_s 는 다음과 같이 나타낸다.

$$V_s = k V_p = k(V_{p2} - V_{p1}) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)(V_{p2} - V_{p1}) \tag{2}$$

여기서 k 는 증폭기의 게인을 나타낸다. 또 $V_p = V_{p2} - V_{p1}$ 을 나타낸다. 여기서 측정입력전류에 의하여 $I_{p2} > I_{p1}$ 이 되면 식 (2)는 아래와 같이 표현된다.

$$V_s = +k V_p \tag{3}$$

또 측정입력전류에 의하여 $I_{p2} < I_{p1}$ 이 되면 식 (2)는 아래와 같이 표현된다.

$$V_s = -k V_p \tag{4}$$

이것은 전류센서에 흐르는 측정 전류의 방향과 크기를 나타내는 것으로 전류의 방향에 따라 "Polarity +"와 "Polarity -"로 나타낸다. 우수한 센서일수록 방향에 의한 크기의 차가 없어야 한다.

식 (2)의 전압 V_s 는 W2의 임피던스에 의해 1차 권선에 공급되는 측정 직류전류에 비례한 전류 I_s 가 흐르며 부하저항 R_0 을 통하여 측정 직류전류에 비례한 전압으로 측정된다. W2를 통과한 전류 I_s 는 직류 전압과 고조파가 함유되어 있어서 교류전류를 측정하는 경우와 같이 true rms converter를 사용하면 오차가 많으므로 잡음을 제거하는 방법을 사용한다. 잡음이 많이 섞여 있는 신호를 검출할 때 신호와 동기된 신호를 가하여 위상 차에 비례한 출력을 얻는 위상 검파(PSD: phase sensitive detection) 방법을 사용하였다. 저주파 발진 주파수 발진기 G는 이날로그 스위치를 컨트롤하는 신호로 사용한다. G의 주파수와 잡음이 섞인 전류 I_s 신호 주파수와 동기시켜 잡음을 제거한다. 위상검파회로를 통과한 신호는 저역필터를 통과하면 잡음이 제거된 깨끗한 직류신호를 얻을 수 있다. 이 방법은 잡음이 많이 섞여 있는 신호, 혹은 crest factor

가 큰 신호를 검출하는데 큰 장점을 가진다.

III. 특성시험 및 결과

시험을 위하여 직류전류공급원으로 Fluke 5520A를 기준이 되는 표준기로 사용하였으며 측정 전류는 0.001 A에서 2 A까지 측정하였다. 저역통과 필터를 거쳐 나오는 출력 전압은 디지털 정밀전압계(Wavetek 1281)로 측정하였다. 측정의 결과는 Table 1에 나타내었다.

“Polarity +”와 “Polarity -”는 전류센서에 흐르는 측정 전류의 방향을 나타내는 것으로 전류의 방향에 따라 나타나는 최대 차이는 2 mV를 넘지 않았다. 전자증폭기의 오프셋 전압을 고려한다면 실제 측정전류 방향에 의한 차이는 매우 적은 것으로 판단된다. 그리고 직류전류 측정센서의 선형도는 온도 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 습도 $55 \pm 5\%$ R.H에서 우수한 특성을 나타내었으며 Fig. 3에 측정전류를 변화시키면서 “Polarity +”와 “Polarity -”에 대한 오차를 나타내었다.

Table 1. 직류전류 측정의 특성

Input current (A)	Measured value (A)	
	Polarity (+)	Polarity (-)
0.001	0.001	-0.0009
0.010	0.009	-0.010
0.050	0.049	-0.050
0.100	0.099	-0.100
0.200	0.199	-0.200
0.300	0.300	-0.300
0.400	0.400	-0.401
0.500	0.500	-0.501
0.600	0.600	-0.601
0.700	0.700	-0.701
0.800	0.800	-0.801
0.900	0.900	-0.901
1.000	1.000	-1.001
1.100	1.100	-1.101
1.200	1.200	-1.201
1.300	1.300	-1.300
1.400	1.400	-1.400
1.500	1.500	-1.500
1.600	1.600	-1.600
1.700	1.700	-1.699
1.800	1.800	-1.799
1.900	1.900	-1.898
2.000	2.000	-1.998

Fig. 4는 실제의 센서와 신호변환장치를 나타내었다.

Table 2는 센서와 센서의 출력을 감지하는 회로인 트랜스듀서의 특성을 분석하기 위하여 사용한 기기들과 트랜스듀서의 반복측정에 의한 불확도를 나타내었다. 불확도에 대한 기준은 국제표준화기구 ISO가 1993년에 발행한 측정불확도 표현지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)를 적용하였다.

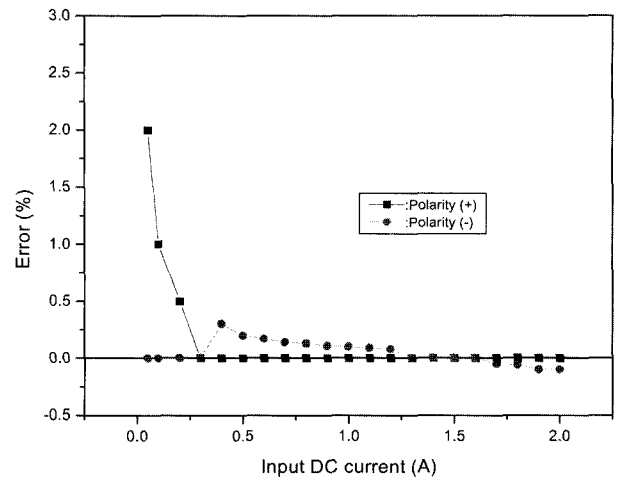


Fig. 3. 입력 직류전류에 대한 측정오차.

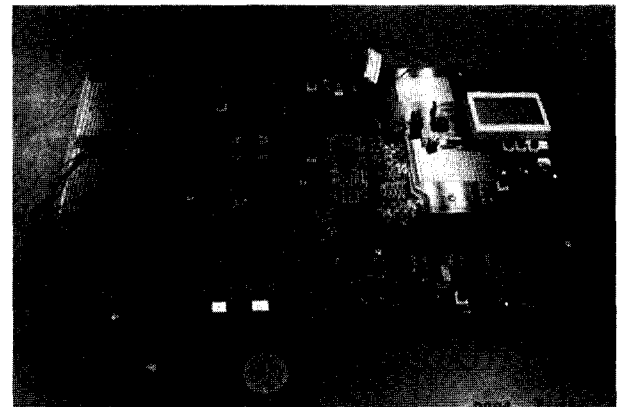


Fig. 4. 전류센서와 신호변환장치.

Table 2. 트랜스듀서(센서와 신호변환회로)의 특성을 분석하기 위하여 사용된 시스템에 대한 불확도

번호	측정요소	불확도(Uncertainty)
1	반복측정에 의한 불확도	0.015%
2	시험공급원의 불확도	0.015%
3	시험공급원의 안정도	0.006%/h
4	디지털볼트미터의 불확도	0.005%
	합성표준불확도	0.023%
	확장불확도(신뢰수준, k=2)	0.046%

IV. 고 찰

직류전류 측정 트랜스듀서는 센서 구조가 간단하고 신호처리 회로가 복잡하지 않는 형태로 구성되는 것이 최적이다. 이와 같은 조건을 만족시킬 수 있는 센서는 자기효과를 이용하는 것이 가장 장점이 있다고 생각된다. 그러나 저 전류를 측정하는 경우, 특히 누설전류와 같은 저 전류를 자기센서로 사용하여 측정할 경우 선형도가 나빠 정밀 측정에 사용될 수 없다. 일반적으로 홀센서를 사용할 경우 선형도가 1%인 반면 CT를 이용할 경우 홀센서보다 더 나은 결과를 얻을 수 있다고 생각된다. 그러나 CT를 이용하여 직류를 측정할 때 신호 처리를 위하여 사용되는 피크검출기, 변조신호 발전기, 위상 검파 회로 등이 필요한 단점도 가진다.

V. 결 론

본 연구에서 직류 저 전류 측정에 사용하고 측정의 정밀도가 높은 전류 트랜스듀서를 개발했다. 동일한 2개의 트로이덜형 자성체 코어의 포화 현상을 이용하여 직류전류를 감지할 수 있는 전류센서와 센서의 출력을 충실히 감지할 수 있는

회로 등을 제작하여 특성과 불확도에 대한 평가 내용을 기술하였다. 이 트랜스듀서는 분해능 0.1 mA, 감도 10 mV/mA, 2 A까지의 측정 범위를 가지며 자동차 엔진의 전기공급부의 누설전류와 직류전류를 사용하는 소형 전기기기의 전류를 측정하는데 사용된다. 최근 들어 전기를 사용하는 전기부하의 용량들이 증가하고 있어 향후 자성체 코어의 크기와 변조기의 출력 전압을 변화시켜 측정범위 20 A로 확장시키는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Suzuki, A. Hirabayashi, and K. Yamasawa, *IEEE Trans. Mag.*, **29**(6), 3183(1994).
- [2] Y. Yoshida and A. Tayaoka, *IEEE Trans. Mag.*, **29**(6), 3180(1993).
- [3] Y. Kashiwagi, T. Kondo, and K. Mitsui *IEEE Trans. Mag.*, **26**(5), 1566(1990).
- [4] E. So, S. Ren, and D. A. Bennett, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **42**(2), 571(1993).
- [5] T. Watanabe and T. Aizawa, *電氣檢定研技報*, **25**(4).

DC Current Transducer Using Saturable Magnetic Cores

Young Tae Park*, Jae Kap Jung, Jeon Hong Gang, Kwon Sang Ryu, and Kwang Min Yu
Korea Research Institute of Standards and Science, Electromagnetic Metrology Division

(Received 14 June 2004, in final form 5 July 2004)

Uncertainty and characteristics of the developed current sensor by means of two identically wound magnetic cores forming a ring like for measurement of a low DC current such as leakage current was described in this paper. This transducer consists of a sensor type of a current transformer, peak value detectors, a reference alternating low frequency voltage oscillator, precision measuring circuits to measure the output signals of sensor with harmonics, and can be measured up to 2 A at DC current. The resolution and sensitivity of the sensor were 0.1 mA and 10 mV/mA, respectively.

Key words : peak value detector, a current transformer, reference alternating low frequency voltage oscillator, harmonics, resolution, sensitivity