

교류저항 측정시스템 개발

김한준*, 유광민*, 강전홍* 한상옥**
 한국표준과학연구원*, 충남대**

Development of AC Resistance Measurement System

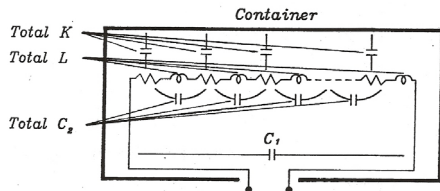
Kim Han Jun*, Yu Kwang Min*, Kang Jeon Hong*, Han Sang Ok**
 Korean Research Institute of Standards and Science*,
 Chung Nam National University**

Abstract - The resistance is frequency dependent by the Seebeck effect, loading effect, Eddy current loss, uniformly distributed inductance of the resistance element and uniformly distributed self-capacitance of the resistance element and capacitance between resistance element and its box. A precise ac resistance measurement system has been developed for using as maintaining and dissemination of national ac resistance standards. The developed resistance measurement system can be used as an instrument of national ac resistance standards at frequency less than 10 kHz and its measurement accuracy was $0.23 (\mu\Omega/\Omega)+4.2 \mu\Omega$ at 1592 Hz and 20 V.

1. 서 론

저항은 몇 가지 인자들에 의해서 주파수에 따라 저항 값이 변하게 되며, 그 인자들은 아래와 같은 것들을 들 수 있다.^[1]

- (1) Seebeck effect: Peltier 효과와 Thomson 효과로 인해 저항양단에 발생하는 온도차에 의한 thermal EMF's.
- (2) Loading effect: 교류전류가 저항을 통하여 흐름으로서 저항에 열을 발생시키게 되고, 발생되는 열에 의해서 저항값이 증가 혹은 감소하게 되는 효과.
- (3) Eddy current loss: 저항선 자체의 표피효과 (skin effect)와 그 선을 둘러싸는 금속 case에서의 와전류 손실.
- (4) Inductance: 저항소자 사이에 분포되는 등가 인덕턴스.
- (5) Distributed capacitance: 저항선 자체의 분포용량과 저항선과 case 사이의 분포용량. 저항을 둘러싸고 있는 이러한 전기적 주위환경에 영향을 받지 않는 양질의 저항을 제작하기 위해서는 일반적으로 어떤 전위를 갖는 도전체 상자 내에 저항 element를 넣어서 주위의 전기적 영향으로부터 guarding을 해 주는 것이다. 실제 사용에는 이 상자를 저항 element의 한쪽 터미널에 연결하는 방법과 상자를 저항 element의 한쪽 터미널에 연결하지 않고 저항의 한 개 터미널처럼 어떤 전압을 인가할 수 있도록 하는 방법이 있다. 실제 교류저항값은 상기한 두 경우에서도 어느 정도 주파수에 따라 그 값이 변화한다. 주파수에 따라 변화하는 정도는 상기 두 경우 각각 다르기 때문에 저항의 교정과 측정법은 교정과 측정에 사용된 연결방법에 따라 달라져야 한다. 상자 내에 있는 저항 element는 상자와의 사이에 유도되는 residual admittance를 고려하면 그림 1처럼 나타낼 수가 있다.

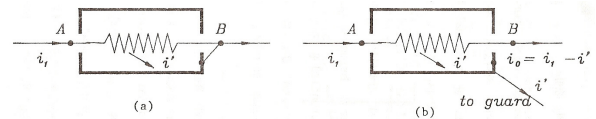


〈그림 1〉 An ac resistor in a conducting container with its associated residual admittance.

그림에서

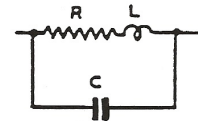
- C₁: 터미널(전류와 전압)에서 나타나는 전기용량, 터미널에서 저항 element까지의 lead 선에서 나타나는 전기용량을 포함한 저항의 2개 터미널 사이에서 유도되는 실제 전기용량 (actual capacitance)
- C₂: 저항 element에 일정하게 분포된 self-capacitance의 합
- K: 상자와 저항 element 사이에 일정하게 분포된 전기용량의 총합
- L: 저항 element에 일정하게 분포된 인덕턴스 총합

저항은 측정회로 내에서 저항상자를 어떻게 터미널과 연결하느냐에 따라 2가지 방법 중 어느 하나로 사용되어진다.



〈그림 2〉 Two method of using resistor in bridge circuit.

즉 그림 2 (a)는 저항 element의 어느 한 터미널이 상자에 연결된 것이다. 이러한 것은 터미널 B를 흐르는 전류와 터미널 A를 흐르는 전류의 크기는 같다. 그러므로 임피던스는 V/i_1 로서 정의된다. 여기서 전압 V는 터미널 A와 B사이에서 강해지는 전압이다. 또 한 방법은 그림 2 (b)처럼 저항상자가 측정기 (일반적으로 bridge)의 guard arm에 연결되어 A나 B터미널과 같이 전압을 갖는 하나의 터미널로 사용되는 것을 말한다. 이 경우 터미널 B에서의 출력전류크기 i_0 는 입력 터미널 A의 전류크기 i_1 과는 차이가 있고 임피던스는 V/i_0 으로 정의된다.



〈그림 3〉 Effects of C₁, C₂ and K represented by a capacitance C across the terminals.

그림 2와 같이 저항 element를 연결하여 사용한다면 그림 1에서 K는 효과적으로 self-capacitance C₁과 C₂에 등가 전기용량으로 더해질 수 있다. 그렇게 하여 C₁, C₂와 K의 효과가 그림 3처럼 터미널 사이의 용량 C로 나타내면 주파수 ω에서 임피던스는

$$Z_{\omega} = R[1 - \omega^2(C^2 R^2 - 2LC + \omega^2 L^2 C^2) + j\omega(\frac{L}{R}(1 - \omega^2 LC) - CR)] \quad (1)$$

따라서

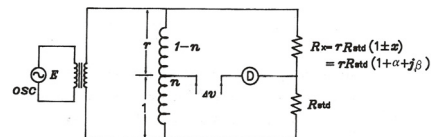
$$R_{\omega} \approx R(1 - \omega^2 C^2 R^2 + 2\omega^2 LC) \quad (2)$$

$$\tau \approx \frac{L}{R} - CR \quad (3)$$

이 되고, 여기서 R_ω는 교류저항이고 τ는 시정수이다.

2. 교류저항 측정 시스템 제작

2.1 기본설계 이론



〈그림 4〉 Basic circuit of ac resistance bridge.

그림 4는 교류저항을 상호비교 측정하기위한 간략화한 그림으로 2-stage transformer, C, R 및 decade IVD 등을 이용한 브리지 평형회로로 구성이 되며, 표준저항 R_s와 측정하고자 하는 피 측정 저항 R_x와의 차이 값에 의해 나타나는 브리지 불평형 전압에 대응되는 injection voltage Δv를 브리지에 공급함으로써 브리지 평형을 이룰 수 있도록 된 것이다. 여기서 각각의 기호는

E: 입력전압

R_{std} : standard ac resistance

R_x : unknown ac resistance

Δv : injection voltage

r : 측정하는 권선비

x : R_{std} 와 R_x 의 교류 저항 값 차이

α : R_{std} 와 R_x 의 inphase 차이 값 ($\mu\Omega/\Omega$)

β : R_{std} 와 R_x 의 quadrature 차이 값 ($\mu\Omega/\Omega$) 이다.

브리지 평형이 이루어졌을 때에 공급된 injection 전압 Δv 와 R_s , R_x 값에 대한 상관관계로부터 브리지 평형식을 이끌어내고 이것을 브리지의 inphase 및 quadrature 평형회로에 전기전자 소자 및 IVD로 적용함으로써 R_s 와 R_x 값의 차이를 직접 읽을 수 있으므로 그림 4에서 R_s 에 비교되는 교류저항 R_x 와 R_s 의 저항비 R_x/R_s 를 r 이라하면 브리지 평형식은 아래와 같이 된다.

$$\frac{\frac{r \cdot E}{r+1} \pm \Delta v}{\frac{E}{r+1} \mp \Delta v} = \frac{r \cdot R_s \cdot \{1 \pm (\alpha + j\beta)\}}{R_x} \quad (4)$$

$\alpha + j\beta = x$ 라고 하면, 식 (4)는

$$\frac{r \cdot E \pm \Delta v(r+1)}{E \mp \Delta v(r+1)} = r(1 \pm x) \quad (5)$$

Δv 에 대하여 정리하면

$$\Delta v = \frac{r \cdot E}{(1+r)^2 \pm r \cdot x(1+r)} \cdot x \quad (6)$$

식 (6)에서 알 수 있듯이 교류저항 브리지의 inphase 및 quadrature 평형회로의 출력전압 즉, injection voltage가 입력전압 E 의

$\frac{r}{(1+r)^2 \pm rx(1+r)}$ 배가 되도록 평형회로의 회로상수를 결정해주면

피측정저항 R_x 와 표준저항 R_s 와의 차이 값 x 를 inphase 및 quadrature 평형회로에 사용하는 IVD의 reading 값으로 R_s 의 교류 저항값을 쉽게 알 수가 있는 것이다. 한편 식 (6)에서 분모항의 $\pm rx(1+r)$ 은 측정하고자하는 R_s 와 R_x 의 차이 값인 x 항이 포함되어 있기 때문에 실제적으로 브리지 회로에 적용시키기가 어렵다. 따라서 식(6)을 간략히 하면

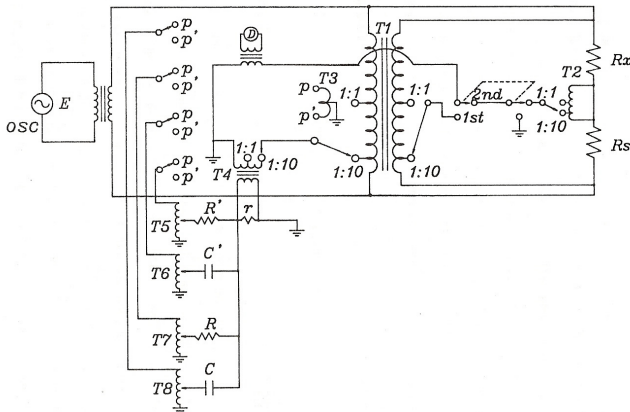
$$\Delta v \approx \frac{r \cdot E}{(1+r)^2} x \quad (7)$$

로 쓸 수 있고, 측정비를 1:1, 1:10 2가지로 할 때 각각 $\Delta v = \frac{1}{4} E \cdot x$,

$\Delta v = \frac{10}{121} E \cdot x$ 로 된다. $\pm rx(1+r)$ 이 생략됨으로 나타나는 측정오차는 계산에 의하면 1:1 측정 시 x 값이 $\pm 500 \mu\Omega/\Omega$ 의 경우 $\pm 1.24 \times 10^{-7}$, 10:1 측정 시 x 값이 $\pm 1,000 \mu\Omega/\Omega$ 의 경우 $\pm 9.1 \times 10^{-8}$ 의 측정오차가 발생하게 된다. 따라서 1:1 측정 시 R_s 와 R_x 차이 값이 $\pm 500 \mu\Omega/\Omega$, 10:1 측정 시에는 차이 값이 $\pm 1,000 \mu\Omega/\Omega$ 이하이면 오차 값을 무시할 수가 있다.

2.2 교류저항 브리지 제작

그림 5는 식 (7)에 의해서 측정하고자 하는 교류 저항 값을 저항표준기 R_s 의 교류저항 값과 비교하여 저항 값 차이에 따라 발생하는 브리지 불평형을 브리지 inphase 평형조절용 IVD T_7 과 quadrature 평형조절용 IVD T_8 의 다이얼 reading 값을 읽음으로서 피 측정 교류저항 값을 측정할 수 있는 제작된 교류저항 측정용 브리지의 회로이다.



<그림 5> Circuit of the fabricated ac resistance bridge.

동일한 명목 값의 저항 값들을 상호 비교할 때는 즉 상호 비교하는 교류저항비가 1:1과 1:10일 때는 injection voltage Δv 는 식 (7)에 의해서 각각

$$\Delta v = \frac{1}{4} \cdot E \cdot x \quad (8)$$

$$\Delta v = \frac{10}{121} \cdot E \cdot x \quad (9)$$

로 된다. 식 (8)과 식 (9)의 의미는 x 만큼의 저항 값 차이를 브리지에서 평형 시키기 위해서는 Δv 만큼의 전압을 IVD^[2] T_4 를 통하여 브리지에 공급해 주면 된다는 뜻이다. 이때 Δv 의 공급량을 x 의 양으로 읽기 위해서는 브리지 회로 내에서 저항 비 1:1을 측정할 때에는 $1/4 \cdot E$ 의 회로상수를 만들어주어야 하고, 10:1의 경우는 $10/121 \cdot E$ 의 회로상수를 만들어 주어야 한다. 이렇게 되면 두 저항의 값 차이가 IVD의 reading 값과 같이 되어 direct reading이 가능하게 된다.

그림 5에서 (T_3 의 권선비 $\times \frac{1}{R} \times r \times T_4$ 의 권선비)가 1:1 측정 시 1/4,

10:1 측정 시 10/121이 되도록 T_3 , T_4 의 권선비와 R , C , r 의 값을 적당히 선택하면 decade IVD T_7 , T_8 의 reading 값이 저항 R_s 와 R_x 의 inphase 및 quadrature 차이 값 x 가 되는 것이다. 제작된 브리지에서는 $R=1 \text{ M}\Omega$, $r=11 \Omega$, T_3 의 권선 비는 45/198로, T_4 의 권선 비는 363/363과 120/363의 2종류를 선택할 수 있도록 하여 1:1 측정 시에는 decade IVD T_7 과 T_8 의 첫 번째 다이얼이 100 $\mu\Omega/\Omega$ 자리수가 된다. 10:1 측정에서도 같은 방법으로 하여 T_7 과 T_8 의 첫 번째 다이얼이 100 $\mu\Omega/\Omega$ 의 자리수임을 알 수 있다. 또 quadrature 평형을 위하여 C 의 값은 1592 Hz에서 측정 시 0.1 μF 이 연결되도록 하였다.

2.3 교류저항 브리지의 불확도

제작된 교류저항 브리지의 주파수 1592 Hz, 20 Vrms에서 분석한 불확도는 표 1과 같다.^[3]

<표 1> Uncertainty budget of the ac resistance bridge.

항 목	불 확 도
(1) main transformer 교정불확도	1×10^{-7}
(2) Detector 불확도	5×10^{-8}
(3) T_3 비 오차에 의한 불확도	5×10^{-9}
(4) T_4 비 오차에 의한 불확도	5×10^{-9}
(5) T_5 , T_6 , T_7 , T_8 비 오차에 의한 불확도	3×10^{-10}
(6) r/R 의 비 오차에 의한 불확도	2×10^{-7}
(7) T_2 의 비 오차에 의한 불확도	4.2 $\mu\Omega$
Total uncertainty(RSS), $k=1$	0.23 $\mu\Omega/\Omega + 4.2 \mu\Omega$

3. 결 론

10 kHz이하에서 교류 저항을 정밀하게 측정할 수 있는 시스템이 개발되었다. 개발된 교류저항 측정시스템은 표준저항값과 피측정저항값의 차이가 direct reading이 가능하도록 설계가 되었으며, 분석결과 주파수 1592 Hz, 전압 20 V_{RMS}에서 측정불확도가 0.23 ($\mu\Omega/\Omega$)+4.2 $\mu\Omega$ 으로 나타났다. 개발된 측정시스템은 교류저항 국가표준유지에 사용되어진다.

[참 고 문 헌]

[1] T. A. Deacon, *Properties and measurement of resistance on alternating current in the power/audio frequency range*, NPL Report DES 31, National Physical Laboratory, Division Electrical Science, Sept., 1975.

[2] 김한준, 이래덕, 강전홍, 한상욱, "저 주파수용 7-dial Inductive Voltage Divider 제작과 특성분석", Trans, KIEE., Vol. 53B, No. 5, May, 2004.

[3] 김한준, 이래덕, Yu. P. Semenov, *Impedance Scaling System* 연구, 한국계량측정협회, Dec., 2006.