

유도형 전압 분할기의 비 교정용 브리지 개발

Development of a Ratio Calibration Bridge for Inductive Voltage Dividers

金 漢 俊[†] · 姜 銓 洪^{*} · 韓 相 玉^{**}

(Han Jun Kim · Jeon Hong Kang · Sang Ok Han)

Abstract - A inductive voltage divider(IVD) is widely used as a ratio arm of precise impedance measurement bridges at low frequencies of audio frequency range and a well fabricated IVD has ratio error of 10^{-7} order without any calibration. Recently, the order of 10^{-8} of the best measurement uncertainty is needed for calibration and maintenance of impedance standards as national standards. In order to achieve that uncertainty, the IVD which is used for a ratio arm of precise impedance measurement bridge should be calibrated within the uncertainty of order of 10^{-8} . For this purpose, a ratio calibration bridge for IVDs has been developed. The measurement uncertainties of both inphase and quadrature of the bridge are analyzed less than 3×10^{-8} respectively at 1 kHz and 25 V.

Key Words : IVD(Inductive Voltage Divider), Totoidal Core, 권선, Inphase, Quadrature Error, 전압 비 교정, Bridge

1. 서 론

유도형 전압 분할기(Inductive voltage divider: 이하 IVD)는 처음 제안된 이래 반세기 동안 IVD가 가지는 장점들, 즉 전압 비가 권선 비에 고 정도로 일치하고, 온도 및 습도의 변화, 인가전압의 변동 또는 기계적 진동 등에 대하여 대단히 안정하며, 전기적 특성의 경년변화가 아주 미소하고, 입력 임피던스가 높으며 출력임피던스가 대단히 낮은 특성 [1][2]으로 인하여 전기분야의 정밀측정에서 없어서는 안 될 기기이다. IVD는 고 투자율을 갖는 환상형 코어(toroidal core)에 균일하게 권선을 하고 균일한 권선 비로 탭(tap)을 만들어 놓은 인덕터라고 할 수 있다. 일반적으로 한 개의 환상형 코어에 권선한 전체의 권선 수를 10 혹은 11, 12 부분(section)으로 나누어 탭을 만들어 1:10, 1:1의 전압 비를 얻을 수 있게 제작된 단일 IVD는 임피던스 정밀측정용 브리지의 비례 팔(ratio arm)로 사용된다. 또한 이렇게 만들어진 단일 IVD 여러 개를 직렬로 연결하여 마치 계단식 저항기나 계단식 용량기처럼 만들어서 필요로 하는 입력전압 대 출력전압의 비를 인출할 수 있게 제작된 것을 다단(multi-dial) IVD라고 하며, 입력전압을 고 분해능으로 분할할 수 있는 기능과 장점으로 인하여 정밀측정용 브리지의 불평형 전압만큼의 브리지 평형전압을 브리지 평형회로에 인가하여 브리지 평형을 이루게 할 때 많이 사용된다[3]. 오늘날 아주 고 투자율의 재질들이 개발됨에 따라 지극히 우수한 안정도

와 출력전압 대 입력전압의 전압비와 위상차이가 약 5×10^{-7} 정도인 IVD는 별다른 특수 기법을 사용하지 않더라도 쉽게 제작이 가능하다[3]. 그러나 각 나라 국가대표 측정기관들(NMI: National Metrology Institutes)의 측정능력을 정리해 놓은 BIPM(Bureau International des Poids et Mesures)의 CMC(Calibration and Measurement Capabilities of NMI) 표[4]에서 알 수 있듯이 현재 임피던스 최고측정능력은 주파수 1 kHz에서 측정 불확도($k=2$, 신뢰도 약 95 %로 추정)가 10^{-8} 급(order) 초반에 이르고 있다. 따라서 임피던스 분야의 국가 표준을 유지하고 보급하는데 사용되는 측정브리지는 측정 불확도가 10^{-8} 급은 되어야만 한다. 그러므로 임피던스 측정용 브리지의 핵심 구성품인 비례 팔 및 브리지 평형에 사용되는 다단의 IVD들은 상기의 측정 불확도를 만족할 수 있는 정도로 전압 비와 위상차를 정확히 교정해 주어야만 한다. IVD의 비 교정은 IVD가 가지고 있는 탭 수만큼의 아주 안정한 교류저항표준기 혹은 전기용량 표준기를 사용하여 순차치환(permutation)하는 방법으로 교정하였다.[5][6] 그러나 순차치환의 경우는 측정시간이 많이 소요됨으로 측정주위의 환경변화가 측정불확도에 직접적으로 영향을 미치는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 IVD 제작시에 부가(dummy)의 권선을 하고 부가 권선과 IVD의 탭들을 직접비교하여 교정하는 자체교정(self-calibration) 방식을 취하게 되었다. 다만 IVD의 경우도 상기한 방법으로 교정이 이루어지나 교정이 필요한 단수에 따라서 시간은 그 만큼 늘어날 수밖에 없을 뿐만 아니라 하단을 교정하기 위해서는 상단을 분리하여야 하며, 상업화된 IVD의 경우는 교정을 위한 특별부가 기능을 추가하지도 않고 있다. 한편 IVD의 특성상 표준기급으로 잘 제작된 것은 강한 기계적 충격으로 권선의 위치가 움직이지 않는 한 그 전압 비는 매우 안정적이다. 따라서 교정이 되어 정확한 전압 비를 알고 있는 표

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣部 先任研究員
E-mail : hanjun@kriss.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國標準科學研究院 電磁氣部 先任研究員

^{**} 正會員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 12月 24日

最終完了 : 2005年 3月 14日

준기급 IVD는 다른 피 교정 IVD를 교정하기위한 기준용 IVD로 사용될 수 있다. 2-stage 8 다이얼의 표준기급 IVD를 기준용 IVD로 사용하여 400 Hz ~ 10 kHz 범위에서 임피던스 측정용 브리지의 비례 팔로 주로 사용되는 단일 IVD 뿐만 아니라 다단의 IVD도 상기에 언급한 어려움 없이 피 교정 IVD의 입력 전압과 출력전압 비와 위상차를 비교 교정 할 수 있는 브리지를 개발하였다.

2. IVD 비교교정 브리지 제자

2.1 IVD 비교교정 브리지 회로 및 이론

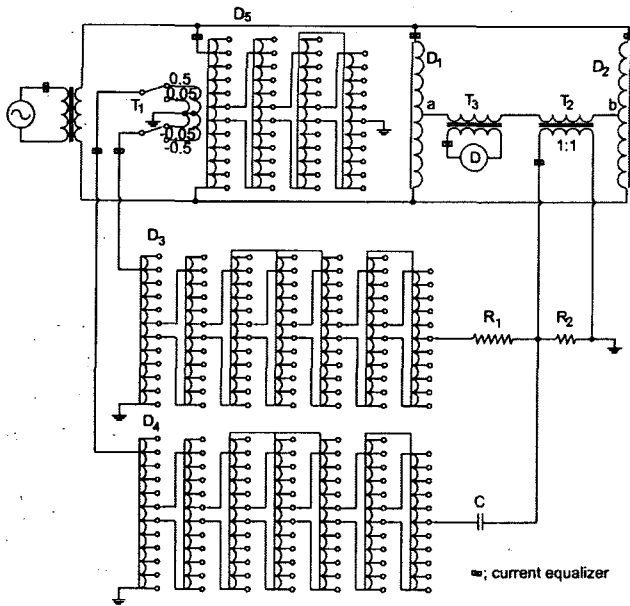


그림 1 IVD 교정 시스템의 회로
Fig. 1 Circuit of a calibration system for IVDs

제작된 IVD 교정시스템의 전체 회로를 그림 1에 보였다. 그림에서 각각 부품들은

- D₁: 기준용 IVD
 - D₂: 피 교정 IVD
 - D₃: 동상분(inphase) 전압공급 조절용 IVD
 - D₄: 직각상분(quadrature) 전압공급 조절용 IVD
 - D₅: 와그너 접지(Wagner ground) 조절용 IVD
 - T₁: 전압 주입용(voltage injection) 주 변압기
 - T₂: 브리지 평형 전압 주입용(voltage injection) 변압기
 - T₃: 브리지 평형검출기(balance detector)용 변압기
- 이다.

피 교정 IVD D₂는 그림 1에서처럼 기준용 IVD D₁과의 비교에 의해서 교정된다. 기준용 IVD와 피 교정 IVD와의 비교 측정점 a, b 사이에는 비 차이가 발생하고, 이 비의 차이에 상응하는 전위차와 위상차가 발생된다. 이 전위차와 위상차에 해당되는 만큼의 전압을 T₁ 변압기와 D₃, D₄ IVD, RC회로, T₂ 변압기를 통하여 IVD D₁과 D₂의 출력단자 사이에 주입해 줌으로서 브리지의 평형이 이루어진다. 브리지

평형이 이루어졌을 때의 브리지 평형전압은 T₁의 권선 비, D₃과 D₄의 다이얼 값, RC 회로의 비, T₂의 권선 비에 의해서 계산된다. 기준 IVD와 피 교정 IVD의 입력단자와 전원 공급기 사이를 연결하는 동축선은 길이를 가능한 짧게 하되, 같은 길이로 하여 전원공급기로부터 각각의 IVD 입력단자로 분리하여 연결하였고 출력단자들은 짧은 동축선을 사용하여 연결하였다. 평형감지회로는 동조형 영전위 검출기(tuned null detector)와 측정회로로부터 검출기를 전기적으로 격리(isolation)시키고 임피던스 정합(matching)을 위하여 변압기 T₃를 제작하여 사용하였다. IVD D₃과 D₄는 그림 2에 보인 것과 같은 RC회로와 변압기 T₂를 통하여 동상분과 직각상분의 평형 전압을 IVD D₁과 D₂의 출력단자를 연결하고 있는 선에 주입시켜주는 역할을 한다. 변압기 T₁은 입력전압 크기의 1/2를 정확하게 공급하기 위해서 특별히 제작된 것으로 권선의 중간점을 접지함으로써 IVD D₁과 D₂의 전압비의 차이에 따라서 이에 대응되는 IVD D₃과 D₄의 출력전압도 +, -의 전압을 공급할 수 있도록 하였다. 10⁻⁸급의 불확도를 만족시키기 위해서 필요로 하는 지점에 전류 등화기(current equalizer)를 사용하여 작지만 문제를 일으키는 루프(loop)와 그라운드(ground) 전류를 최소화하였다[7][8].

정의에 의하여 분할기의 전압 비는 입력단자전압 혹은 1차 권선에서의 입력전압, V_{in},과 출력단자전압 혹은 2차 권선에서의 출력전압, V_{out}, 과의 비이다. 즉

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = d(1 + a + j\beta) \quad (1)$$

로 된다. 여기서 d는 IVD의 명목 비(nominal ratio) 혹은 다이얼 설정(dial setting) 값이고, ad는 동상분 편차, βd는 직각상분 편차이다.

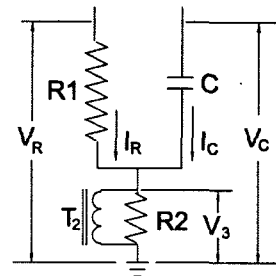


그림 2 RC 회로
Fig. 2 RC circuit

동상분 편차와 직각상분 편차를 측정하기 위한 방정식은 그림 2로부터 아래와 같이 유도되어진다.

$$V_R = I_R R_1 + V_3 \quad (2)$$

$$V_C = -I_C X_C + V_3 \quad (3)$$

$$V_3 = (I_C + I_R) \frac{R_2 z}{R_2 + z} \approx (I_C + I_R) R_2 \quad (4)$$

여기서 z는 변압기 T₂의 임피던스이고 z ≫ R₂이므로 식 (4)는 성립한다. V_R와 V_C은 D₃과 D₄의 출력단자와 접지사이의 전압이다. 식(2)와 (3)의 I_R과 I_C를 식 (4)에 대입하여 정리하면

$$V_3 = \frac{V_C R_1^2 + V_R X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})}{R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2} + j \cdot \frac{X_C R_1 [V_C (1 + \frac{R_1}{R_2}) - V_R]}{R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2} \quad (5)$$

가 된다. 만약 T_2 의 권선 비를 r 이라고 하면 D_1 과 D_2 의 출력단자 사이에 주입되어지는 전압은 V_3/r 이다. 그리고 V_C 와 V_R 은 D_3 과 D_4 의 다이얼 설정에 따라 d_C 와 d_R 로, V_3 은 d_3 으로 각각 표시할 수 있다. 그림 1에서 검출기가 브리지자 평형이 이루어졌음을 표시한다면

$$d_2(1+a_2+j\beta_2) - d_1(1+a_1+j\beta_1) = d_3/r \quad (6)$$

으로 쓸 수 있다. 여기에서 d_1 과 d_2 는 IVD D_1 과 D_2 의 동일한 다이얼 값에서의 비교이므로 차이 값 a 와 β 는 일반적으로 매우 작게 나타나서 10^{-6} 의 값으로 표시되고 d 로 표시할 수 있다. d_3 에 대하여 식(5)를 실수부분과 허수부분으로 분리하여 정리하면

$$d(a_2 - a_1) = \frac{d_C R_1^2 + d_R X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})}{r d [R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2]} \quad (7)$$

$$d(\beta_2 - \beta_1) = \frac{R_1 X_C [d_C (1 + \frac{R_1}{R_2}) - d_R]}{r d [R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2]} \quad (8)$$

로 된다.

2.2. 회로 부품 제작

T_1, T_2, T_3 는 고 투자율의 환상형 코어를 사용하여 권선 하였으며 실험실의 부유 전자계로부터 영향을 최소화 받도록 전자계 차폐를 하였다. 전자계 차폐처리하는 환상형 코어위에 1차권선을 한 후 1 mm 두께의 구리상자와 0.2 mm 두께의 super mu-metal 판을 사용하여 정전차폐, 자기차폐 다시 정전차폐의 순으로 차폐를 하되 차폐상자가 환상형으로 완전히 밀폐될 경우 1회만 권선 된 현상이 나타나므로 환상형 상자 바깥지름부분에 0.5 mm의 좁은 틈(gap)을 만들고, 그 위에 2차권선을 하여 외부로 부터의 정전잡음과 자기잡음을 차단하였다. T_1 은 특별히 특성이 좋지 않는 IVD의 경우도 교정이 가능하도록 하기 위하여 1:0.5와 1:0.05의 권선 비를 함께 쓸 수 있도록 제작하였다. T_2 변압기는 권선 비를 1:1로 제작하였다. 검출기용 변압기 T_3 은 권선 비를 100:1로 하여 검출기와 임피던스 정합 및 신호 감지 감도를 높일 수 있도록 하였다. 사용된 IVD는 전부 자체 제작[3]하였으며 교정결과 동상분 오차가 2×10^{-7} 이하, 직각상분 오차는 5×10^{-6} 이하로 되어 본 시스템에 사용하기에 충분한 특성을 가진 것으로 판단되었다. RC 회로에 사용된 전기용량기, C,는 세라믹 부품들을 사용하여 필요한 전기용량값에 맞추도록 정밀조절 하였으며, 손실계수도 부가의 전기용량기 1개와 2개의 저항으로 구성된 T회로를 사용하여 10^{-5} 이내로 조절 하였으며, 400 Hz, 1 kHz, 1.6 kHz, 5 kHz, 10 kHz용을 각각 스위치로써 외부에서 선택 연결하여 사용할 수 있도록 하였

다. 한편 저항 R_1 과 R_2 는 후막 증착 기법으로 제작된 상용의 무 유도성의 것으로 각각 잔류 리액턴스(residual reactance)가 매우 작은 10 kΩ과 20 Ω을 사용하였다. 따라서 T_1 에서 0.05 탭을 선택 시 D_3 과 D_4 의 첫 번째 다이얼의 한 개의 탭은 분해능이 10×10^{-6} 으로 된다.

3. 측정 및 불확도 산정

개발된 브리지 시스템의 전압 비 교정 측정불확도는 동상분은 식(7), 직각상분은 식(8)을 각각 수학적 측정모델식으로 하여, 측정 모델식에서 측정불확도에 영향을 미치는 변수들에 대하여 각각 편미분하여 각각의 변수들이 불확도에 미치는 크기를 계산하는 과정을 거쳐서 계산된다[9][10]. 그러나 본 IVD 비교교정 브리지와 같이 분석이 되어야 할 부품과 장비들의 수가 많은 경우에는 측정주파수 및 환경변화에 대하여 일일이 분석하기가 간단치 않다. 또한 현재 우리나라의 경우 교류저항 측정분야는 국가가 유지 및 보급하는 단위로부터 아직 보급이 불가능한 분야로 남아있기 때문에 상기에 언급한 과정을 거치는 측정불확도의 분석은 불가능하다.

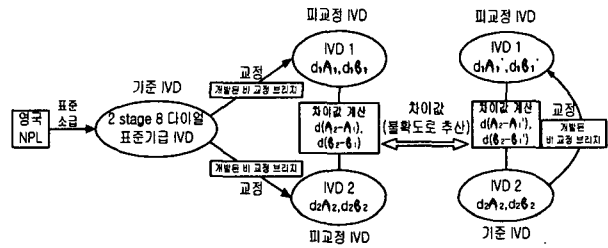


그림 3 측정 불확도 산정을 위한 블록도
Fig. 3 Block diagram of procedure for evaluation of measurement uncertainty of the bridge

이와 같이 정해진 절차에 의한 계산방법으로 측정불확도 분석이 불가능한 경우 첫째로 다른 국가와 직접 상호 비교하는 방법과 둘째로 다른 국가에서 교정된 기기를 사용한 간접 비교의 방법이 있다. 본 연구에서 개발된 브리지의 측정불확도를 평가하기위해서 후자의 방법을 이용하였다. 즉 그림3에서와 같이 첫째로 표준기급 IVD인 2-stage 8-다이얼 IVD(Tinsley사, type 5560K)를 영국의 국가 표준기관인 NPL(National Physics Laboratory)에서 교정(교정불확도: 동상분, 직각상분 공히 1×10^{-8} 이하, $k=2$)을 받고, 둘째로 교정된 2-stage 8-다이얼 IVD를 기준 IVD로 하여 개발된 비 교정 브리지를 사용하여 제작된 IVD 1과 2, 2대를 각각 교정하고[3], 셋째로 교정된 IVD 2를 다시 기준용 IVD로 사용하여 IVD 1을 교정하였다. 그리고 상기 둘째단계에서 교정된 IVD 1, 2의 차이값과 셋째단계에서 교정된 IVD 1, 2의 차이 값을 상호 비교하여 그 차이 값을 비 교정 브리지 시스템의 측정 불확도로 추산하였다.

표 1 동상분 교정결과

Table 1 Calibration results of inphase error

다이얼 setting(d)	동상분 오차($\times 10^{-6}$)			
	$d_1\alpha_1$	$d_2\alpha_2$	계산값 $d\alpha_2 - \alpha_1$	측정값 $d\alpha_2 - \alpha_1$
.X	+0.07	+0.11	+0.04	+0.03
.9	+0.62	+0.60	-0.02	-0.01
.8	+0.63	+0.58	-0.05	-0.03
.7	+0.58	+0.49	-0.03	-0.02
.6	+0.40	+0.39	-0.01	+0.02
.5	+0.23	+0.23	-0.00	+0.03
.4	+0.07	+0.08	+0.01	+0.03
.3	-0.09	-0.07	+0.02	+0.04
.2	-0.22	-0.13	+0.09	+0.11
.1	-0.21	-0.16	+0.05	+0.06
.0X	-0.71	-0.62	+0.09	+0.06
.09	-0.64	-0.56	+0.08	+0.05
.08	-0.57	-0.51	+0.06	+0.04
.07	-0.51	-0.46	+0.05	+0.03
.06	-0.46	-0.41	+0.05	+0.03
.05	-0.39	-0.36	+0.03	+0.02
.04	-0.34	-0.31	+0.03	+0.02
.03	-0.28	-0.26	+0.02	+0.01
.02	-0.21	-0.22	-0.01	+0.00
.01	-0.15	-0.16	-0.01	-0.01
.00X	-0.15	-0.17	-0.02	-0.02
.009	-0.15	-0.17	-0.02	-0.02
.008	-0.14	-0.16	-0.02	-0.02
.007	-0.13	-0.15	-0.02	-0.02
.006	-0.12	-0.15	-0.03	-0.02
.005	-0.11	-0.14	-0.03	-0.02
.004	-0.10	-0.13	-0.03	-0.02
.003	-0.10	-0.12	-0.02	-0.01
.002	-0.09	-0.12	-0.03	-0.01
.001	-0.08	-0.11	-0.03	-0.01

표 1과 2에서의 $d_1\alpha_1$ 및 $d_2\alpha_2$ 는 2-stage 8-다이얼 IVD를 기준으로 하여 교정된 IVD 1과 2의 동상분 편차를, $d_1\beta_1$ 및 $d_2\beta_2$ 는 직각상분 편차를 나타내었으며, 1 kHz, 25 V에서 측정된 결과를 보였다. 교정되어진 2개 IVD의 상대 편차는 이 결과를 사용하여 계산되어진 것이며 표에 계산 값 $d\alpha_2 - \alpha_1$, $d\beta_2 - \beta_1$ 으로 각각 표시를 하였다. 한편 표1과 2에서의 측정값은 교정된 IVD 2를 기준으로 하여 개발된 비 교정 브리지 회로에 연결하여 IVD 1을 교정하여 상대 편차 값을 측정한 것, 즉 $d\alpha_2 - \alpha_1$, $d\beta_2 - \beta_1$ 이다. 계산된 값과 측정된 값과의 차이가 3×10^{-8} (절대불확도) 이내로 잘 일치

하고 있음을 알 수 있다. 전압 비는 $\frac{V_{out}}{V_{in}} = d(1 + \alpha + j\beta)$ 로 정의되고, 위상차는 $\tan\theta = \frac{\beta}{1 + \alpha} \approx \beta$ 로 정의된다.

표 2 직각상분 오차 교정결과

Table 2 Calibration results of quadrature error

다이얼 setting(d)	직각상분 오차($\times 10^{-6}$)			
	$d_1\beta_1$	$d_2\beta_2$	계산값 $d\beta_2 - \beta_1$	측정값 $d\beta_2 - \beta_1$
.X	+0.12	+0.14	+0.02	+0.02
.9	-1.56	-1.39	+0.17	+0.18
.8	-1.93	-1.99	-0.06	-0.09
.7	-1.06	-1.36	-0.30	-0.31
.6	+0.66	+0.18	-0.48	-0.50
.5	+2.57	+1.94	-0.64	-0.64
.4	+4.30	+3.59	-0.71	-0.71
.3	+5.38	+4.74	-0.64	-0.63
.2	+5.35	+4.91	-0.44	-0.43
.1	+3.89	+3.78	-0.11	-0.14
.0X	+2.52	+2.61	+0.09	+0.06
.09	+2.01	+2.09	+0.08	+0.05
.08	+1.70	+1.76	+0.06	+0.04
.07	+1.49	+1.54	+0.05	+0.03
.06	+1.36	+1.41	+0.05	+0.03
.05	+1.26	+1.29	+0.03	+0.02
.04	+1.15	+1.18	+0.03	+0.02
.03	+1.00	+1.02	+0.02	+0.01
.02	+0.78	+0.77	-0.01	+0.00
.01	+0.45	+0.44	-0.01	-0.01
.00X	+0.55	+0.55	+0.00	+0.01
.009	+0.49	+0.49	+0.00	+0.01
.008	+0.42	+0.42	+0.00	+0.01
.007	+0.36	+0.36	+0.00	+0.01
.006	+0.29	+0.30	+0.01	+0.01
.005	+0.23	+0.24	+0.01	+0.01
.004	+0.17	+0.18	+0.01	+0.01
.003	+0.12	+0.13	+0.01	+0.01
.002	+0.07	+0.08	+0.01	+0.00
.001	+0.03	+0.04	+0.01	+0.01

한편 400 Hz에서의 비 교정 브리지의 측정불확도는 공급 전압 25 V에서 동상분, 직각상분 공히 1 kHz에서와 같은 3×10^{-8} 이하로 측정되었고, 10 kHz에서는 동상분이 15×10^{-8} , 직각상분이 21×10^{-8} 으로 측정되었다. 그러한 결과는 측정주파수가 높아짐에 따라 브리지에 사용된 변압기들의 권선에 서 나타나는 권선간 부유 전기용량의 증가, 표피효과에 의한 권선저항의 증가 및 사용된 저항 부품의 순수저항성분과 리액턴스 성분의 변화에 기인되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

IVD의 전압 비와 위상각을 400 Hz ~ 10 kHz 주파수 범위에서 고 정확도로 교정할 수 있는 비 교정브릿지가 개발

되었다. 피 교정 IVD의 교정방법은 개발된 브리지와 기준용 IVD를 사용하여, 기준용 IVD와 피 교정 IVD와의 전압차이를 측정함으로써 이루어진다. 개발된 브리지 시스템의 측정 불확도는 제작된 브리지와 기준용 IVD를 사용하여 피 교정 IVD 2대를 먼저 교정하고, 다음 교정된 2대의 IVD를 브리지의 기준용 IVD와 피 교정용 IVD 위치에 연결하여 교정된 IVD 하나로서 교정된 또 하나의 IVD를 피 교정 IVD로 보아 다시 비교 교정하여 그 차이 값을 시스템 불확도로 추산하는 삼각측정 불확도 추산법을 사용하였다. 개발된 교정 시스템의 총합 측정 불확도는 400 Hz와 1 kHz에서 동상분과 직각상분 각각 3×10^{-8} (절대불확도)보다 작게, 10 kHz에서는 동상분이 15×10^{-8} , 직각상분이 21×10^{-8} 보다 작게 측정되었다. 개발된 IVD 비 교정 브리지시스템은 국가교정기관에서 임피던스 정밀측정용 브리지의 비례 압 및 IVD의 정밀 교정 뿐 만 아니라 전압비의 국가 표준유지 및 보급에 적극적으로 이용이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Singer instrumentation, "Theoretical analysis of accuracy of ratio transformers", Ratio-trans Engineering Bulletins, No. 1, 1962.
- [2] Raymond V. Lisle, Thomas L. Zapf, "Comparison Calibration of Inductive Voltage Divider", ISA Transaction, Vol. 3, pp. 238-242, 1964.
- [3] 김한준, 이래덕, 강전홍, 한상옥. "저 주파수용 7-dial Inductive Voltage Divider 제작과 특성분석", Trans. KIEE., Vol. 53B, No. 5, pp. 305-308, May, 2004.
- [4] <http://kcdb.bipm.fr/appendixC/>
- [5] R. D. Cutkosky, J. Q. Shield, "The Precision Measurement of Transformer Ratios", IRE trans. on Instrumentation, Vol. I-9, Number 2, September, 1960.
- [6] J. J. Hill, A. P. Miller, "A Seven-decade adjustable-ratio inductively coupled Voltage Divider with 0.1 part per Million Accuracy", Proc. Instn Elect. Engrs(GB), 109B, pp. 157-62, 1962.
- [7] Thompson, A.M., "A.C. Bridge Method for the Measurement of Three Terminal Admittance", IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. IM-13, No. 4, pp. 189-197, December, 1964.
- [8] Cutkosky, R.D., "Evaluation of the NBS Unit of Resistance Based on Computable Capacitor", J. Res. NBS, Vol. 65A, No. 3, pp. 147-158, 1961.
- [9] 이래덕, "측정불확도 평가 및 표현방법 -전기분야-", 한국표준과학연구원, KRISS-99-079-ET, 1999.
- [10] European cooperation for Accreditation, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration", Publication Reference EA-4/02, December, 1999.

저 자 소 개



김한준 (金漢俊)

1959년 1월 10일생. 1984년 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).
 2005 현재: 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정
 1987~2004 현재: 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기.자기그룹, 선임연구원
 Tel : 042-868-5283, Fax : 042-868-5018
 E-mail : hanjun@kriss.re.kr



강전홍 (姜鎔洪)

1963년 2월 8일생, 1998년 대전한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사),
 2005년 충남대학교 전기공학과 박사과정, 1988년~2005년 현재: 국표준과학연구원 전자기표준부 전기.자기그룹, 선임기술원
 Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018
 E-mail : jhkang@kriss.re.kr



한상옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업.
 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박).
 1985년 독일 하노버대 객원교수, 1989년 일본 나고야대 객원교수, 현 충남대학교 전기공학과 교수,
 Tel : 042-821-5655
 E-mail : sohan@cnu.ac.kr