

유도형 전압 분할기의 비교 교정

김한준*, 이래덕*, 강전홍*, 한상옥**

*한국표준과학연구원 전자기표준부 전기.자기그룹, **충남대학교 전기공학과

The Calibration of Inductive Voltage Dividers

*KIM Han Jun, *LEE Rae Duk, *KANG Jeon Hong, **HAN Sang Ok

*Korea Research Institute of Standards and Science, **Chung Nam National University

Abstract - 잘 교정된 유도성 전압 분할기는 다른 교류 전압 분할기들을 비교 교정하기 위한 전압비의 표준기로서 사용되어질 뿐 만 아니라 각종 임피던스 정밀측정용 브리지의 비례 arm으로서 사용이 되어진다. 이러한 유도성 전압 분할기를 비교교정 하기 위한 교정시스템이 연구제작이 되었다. 본 연구 논문에서는 제작방법, 교정방법, 그리고 오차 등에 대하여 관하여 논의하고 실제 교정결과와 분석된 결과를 비교한다.

으로 하는 지점에 coaxial choke를 사용하여 작지만 문제를 일으키는 loop와 ground 전류를 최소화하였다 [4][5]

1. 서 론

유도형 전압 분할기(이하 IVD)는 처음 제안된 이래 반세기 동안 IVD가 가지는 장점들이 널리 알려지기 시작하면서 전기분야의 정밀측정에서는 없어서는 안 될 강력한 하나의 기기로 자리잡게 되었다. IVD는 고 투자율을 갖는 toroidal형의 core에 균일하게 권선을 하고 균일한 권선비로 tap을 만들어 놓은 인덕터라고 할 수 있다^[1]. 오늘날 아주 고 투자율의 재질들이 개발됨에 따라 지극히 우수한 안정도와 출력전압대 입력전압의 전압비와 위상차이가 약 2×10^{-7} 정도인 IVD는 쉽게 제작이 가능하게 되었다^[2]. 그러나 이것들을 좀더 정확히 사용하기 위해서는 전압비와 위상차를 정확히 교정해 줄 필요가 있다. 이러한 목적을 위하여 한국표준과학연구원 에서 400 Hz~10 kHz의 범위에서 상대 전압비와 위상각을 5×10^{-8} 이내의 불확도로 교정 할 수 있는 시스템이 개발되었다^[3].

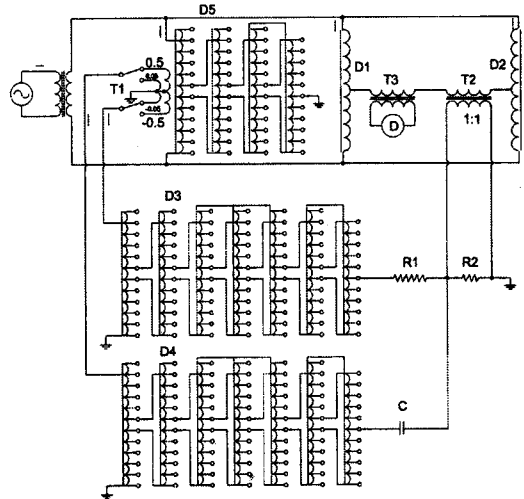


그림 1. IVD 교정 시스템의 회로

2. 비교교정 브리지의 제작

2.1 비교교정 브리지 회로 및 이론

제작된 교정시스템은 그림 1에서처럼 신호의 검출을 위한 null detection transformer와 차이 전압을 인가해 주기 위한 injection transformer의 2개 toroidal transformer를 사용한다. 그림 1에는 차폐방법이 생략된 전체의 회로를 보였다. D_1 과 D_2 는 기준 IVD와 교정되어지는 IVD로서, 전압비와 위상차가 비교되어진다. 이 두 IVD의 입출력 단자는 짧은 동축선을 사용하여 함께 연결되었으며 각각 IVD의 입력단자와 전원공급기 사이를 연결하는 lead선의 임피던스는 매우 작으며 거의 같도록 제작이 되었다. detector회로는 tuned null detector와 측정회로로부터 전기적으로 isolation시키고 임피던스 matching을 위하여 특별히 차폐한 transfor T_3 으로 이루어진다. IVD D_3 와 D_4 는 그림 2에 보인 것과 같은 RC 회로와 transformer T_2 를 통하여 inphase와 quadrature 평형 전압을 IVD D_1 과 D_2 의 출력단자를 연결하고 있는 lead선에 주입시켜주는 역할을 한다. transformer T_1 또한 입력전압 크기의 1/2을 정확하게 공급하기 위해서 특별히 제작된 것이다. 2차 권선의 중간점은 접지하므로써 IVD D_1 과 D_2 의 전압비의 차이에 따라 IVD D_3 와 D_4 의 출력전압이 +, -의 양전극을 공급할 수 있도록 하였다. 또한 5×10^{-8} 의 불확도를 만족시키기 위해서 필

정의에 의하여 분할기의 전압비는 입력단자전압, V_{in} , 혹은 1차권선에서의 출력전압과 출력단자전압, V_{out} , 혹은 2차권선에서의 출력전압과의 비이다. 즉

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

로 된다. 여기서 d 는 IVD의 nominal ratio 혹은 dial setting 값이고, a 는 inphase 편차, β 는 quadrature 편차이다.

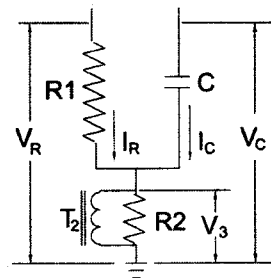


그림 2. R-C 회로.

상대 inphase 편차와 quadrature 편차를 측정하기 위한 방정식은 그림 2로부터 아래와 같이 유도되어진다.

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

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

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

여기서 z 는 transformer T_2 의 임피던스이고 $z \gg R_2$ 이므로 식(4)는 성립한다. V_R 와 V_C 는 D_3 와 D_4 의 출력단자와 접지사이의 전압이다. 식(2)와 (3)의 I_R 과 I_C 를 식(4)에 대입하여 정리하면

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

가 된다. 만약 T_2 의 권선비를 r 이라고 하면 D_1 과 D_2 의 출력단자사이에 주입되어지는 전압은 V_3/r 과 같다. 그리고 V_C 와 V_R 는 D_3 와 D_4 의 다이얼 setting에 따라 d_c 와 d_r 로, V_3 는 d_3 로 각각 표시할 수가 있다. 그림 1에서 detector가 null을 표시한다면

$$d_2(1 + \alpha_2 + j\beta_2) - d_1(1 + \alpha_1 + j\beta_1) = d_3/r \quad (6)$$

여기에서 d_1 과 d_2 는 IVD D_1 과 D_2 의 동일한 다이얼 값에서의 비교이므로 α 와 β 는 10^{-6} 의 값으로 표시가 되어지고 d 로 표시할 수가 있다. d_3 에 대하여 식(5)를 실수부분과 허수부분으로 분리하여 정리하면

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{d_C R_1^2 + d_R X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})}{r d_1 [R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2]} \quad (7)$$

$$\beta_2 - \beta_1 = \frac{R_1 X_C [d_C (1 + \frac{R_1}{R_2}) - d_R]}{r d_1 [R_1^2 + X_C^2 (1 + \frac{R_1}{R_2})^2]} \quad (8)$$

$X_C \approx R_1$, $R_1 \gg R_2$ 이면 식 (7), (8)은 아래와 같이 간단히 되어진다.

$$d_1(\alpha_2 - \alpha_1) \approx \frac{d_R}{r (\frac{R_1}{R_2})} \quad (9)$$

$$d_1(\beta_2 - \beta_1) \approx \frac{d_C}{r (\frac{X_C}{R_2})} \quad (10)$$

2.1. 회로 부품의 제작

T_1 , T_2 , T_3 는 고 투자율의 toroidal core를 사용하여 특별히 실험실에서의 stray field로부터 magnetic의 영향을 최소로 받도록 shield 처리를 하였다. T_1 은 특별히 특성이 좋지 않는 IVD의 경우도 교정이 가능하도록 하기 위하여 1:0.5 와 1:0.05의 권선비를 함께 쓸 수 있도록 제작을 하였다. T_2 transformer는 권선비를 1:1로 제작하였다. detection transformer T_3 는 권선비를 100:1로 하여 detector와의 임피던스 matching 및 신호의 감지 감도를 높일 수 있도록 하였다. 사용된 IVD는 전부 자체 제작⁽²⁾하였으며 교정 결과 inphase error가 2×10^{-7} 이하, quadrature error는 5×10^{-6} 이하로 되어 본 시스템에 사용하기에 충분한 특성을 가진 것으로 판단이 되었다. R-C 회로에 사용된 C는 3-terminal 형의 손실이 아주 작은 전기용량기이며 400 Hz, 1 kHz, 1.6 kHz, 5 kHz, 10 kHz용을 각각 스위치로써 외부에서 선택 연결하여 사용할 수 있도록 하였다. 한편 저항 R_1 과 R_2 는 각각 residual reactance가 매우 작은 10 kΩ과 20 Ω을 사용하였다. 따라서 T_1 에서 0.05 tap을

선택시 D_3 와 D_4 의 첫 번째 다이얼의 한 개의 tap은 10×10^{-6} 으로 된다. 아래의 표1과 2에서의 $d_1 \alpha_1$ 및 $d_2 \alpha_2$ 는 각각 2개의 IVD의 inphase 편차를, $d_1 \beta_1$ 및 $d_2 \beta_2$ 는 각각 2개의 IVD의 quadrature 편차를 나타내며, 1 kHz, 25 V에서 측정된 결과를 나타내었다. 각각 IVD의 $d\alpha$, $d\beta$ 값은 제작된 본 교정시스템과 또 다른 기준용 IVD를 사용하여 교정된 값이다. 상대 편차는 이 결과를 사용하여 계산되어진 것이며 표에 계산값 $d(\alpha_2 - \alpha_1)$, $d(\beta_2 - \beta_1)$ 으로 각각 표시를 하였다. 한편 표의 측정값은 교정된 2개의 IVD를 회로에 연결하여 상대 편차 값을 실제 측정을 한 것으로 계산된 값과 측정된 값의 차이를 비교하므로써 제작된 교정시스템의 측정불확도를 추정할 수 있도록 하였다. 계산된 값과 측정된 값과의 차이가 3×10^{-8} 이 내로 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다. 전압비는

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = d(1 + \alpha + j\beta) \text{으로 정의되고, 위상차는}$$

$$\tan \theta = \frac{\beta}{1 + \alpha} \approx \beta \text{으로 정의된다.}$$

표1. Inphase error 교정결과

D i a l setting(d)	inphase error($\times 10^{-6}$)			
	$d_1 \cdot \alpha_1$	$d_2 \cdot \alpha_2$	계산값 $d(\alpha_2 - \alpha_1)$	측정값 $d(\alpha_2 - \alpha_1)$
.X	+0.07	+0.12	+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	+0.05
.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

표2. Quadrature error 교정결과

D i a l setting(d)	quadrature error($\times 10^{-6}$)			
	$d_1 \cdot a_1$	$d_2 \cdot a_2$	계산값 $d(a_2 - a_1)$	측정값 $d(a_2 - a_1)$
.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	-0.62	+0.09	+0.05
.09	+2.01	-0.56	+0.08	+0.05
.08	+1.70	-0.51	+0.06	+0.04
.07	+1.49	-0.46	+0.05	+0.03
.06	+1.36	-0.41	+0.05	+0.03
.05	+1.26	-0.36	+0.03	+0.02
.04	+1.15	-0.31	+0.03	+0.02
.03	+1.00	-0.26	+0.02	+0.01
.02	+0.78	-0.22	-0.01	+0.00
.01	+0.45	-0.16	-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

3. 결 론

IVD의 상대 전압비와 위상각을 400 Hz~10 kHz 범위에서 고 정확도로 교정할 수 있는 교정시스템이 개발되었다. 개발된 교정시스템의 전체 불확도는 1 kHz에서 5×10^{-8} 보다 작게 측정되었으며 앞으로 한국표준과학연구원에서 IVD의 정밀교정 뿐 만 아니라 전압비의 국가 표준유지 및 보급에 적극적으로 이용이 되어질 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Raymond V. Lisle, Thomas L. Zapf, "Comparison Calibration of Inductive Voltage Divider", ISA Transaction, Vol. 3, pp. 238-242, 1964.
 [2] 김한준, 이래덕, 강진홍, 한상욱, "7-dial Inductive Voltage Divider 제작과 그 특성분석", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 284-286, 1999.

[3] 이래덕 et al, "전기용량-저항 변환용 Quad Bridge 개발", KSRI-91-4-IR, 1991.
 [4] 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.
 [5] Cutkosky, R.D., "Evaluation of the NBS Unit of Resistance Based on Computable Capacitor", J. Res. NBS, Vol. 65A, No. 3, p. 147-158, 1961.