

## 초정밀 전기용량 측정 브리지 개발에 관한 연구

김한준<sup>1</sup>, 강전홍<sup>1</sup>, 한상옥<sup>2</sup>  
한국표준과학연구원, 충남대학교<sup>2</sup>

### A Study on the Development of a Precision Capacitance Measurement Bridge

Kim Han Jun<sup>1</sup>, Kang Jeon Hong<sup>1</sup>, Han Sang Ok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Research Institute of Standards and Science, <sup>2</sup>Chung Nam Univ.

**Abstract** - A high precision transformer bridge system for comparison of primary capacitance standards at low frequencies was developed. Its main transformer was constructed by special winding techniques and has the inphase and quadrature error of  $0.073 \times 10^{-6}$  and  $0.14 \times 10^{-6}$  at 1592 Hz ( $\omega = 10^4$ ) respectively. But the measurement uncertainty of this bridge system can be achieved  $0.03 \times 10^{-6}$  by using some substitution method.

#### 1. 서 론

전기용량분야의 국가표준을 유지하기 위해서 primary급으로는  $10 \text{ pF}$ 에서  $1000 \text{ pF}$ 의 전기용량 표준기를 적절한 환경에서 유지하고 주기적으로 교정 및 측정하게 된다. 상기 범위의 전기용량표준기의 경우 임피던스가 매우 크기 때문에 일반적인 LCR meter류의 측정기로서는 정밀하게 측정을 할 수가 없다. 따라서 국가표준을 유지 보급하는 기관에서는 국가표준유지의 목적에 적합한 성능을 갖는 측정 브리지를 제작하여 쓰고 있다. 한편 브리지의 비례팔에 사용되는 비례변성기는 투자율이 매우 높은 토로이달 코어(toroidal core)에 균일하게 권선을 할 때 권선 비가 전압의 비와 같게 되는 성질을 이용한 것으로, 필요에 따라서 권선에 여러 개의 단자(tap)를 부착 시킴으로서 넓은 범위의 전압 비를 얻을 수 있다. 일반적으로 전체 권선을 10 혹은 11, 12 부분(section)으로 나눔으로 1:10, 1:1의 전압 비를 얻을 수 있도록 제작하고 있다. 이러한 비례변성기가 다른 임피던스, 즉 저항이나 전기용량기에 의한 전압 분할기보다 우수한 점은 전압 분할기가 권선 비에 고정도로 일치하고, 온습도의 변화, 인가전압의 변동 또는 진동 등에 대해서 대단히 안정하며, 전기적 특성의 경년 변화가 아주 미소하고 입력 임피던스가 높으므로 출력 임피던스가 대단히 작다 [1]인 것이다. 이러한 여러 가지 장점을 갖고 있기 때문에 100 kHz 미만의 주파수에서 임피던스 정밀측정용 브리지의 비례 팔 (ratio arm)로 널리 사용이 되고 있다. 그러나 leakage inductance, 권선저항, 권선간의 분포용량 및 core loss resistance의 영향에 의해서 권선 비에 오차가 발생하게 되고, 일반적인 방법으로 제작된 비례변성기의 10:1에서의 비 오차 (ratio error)는 1 kHz 주파수에서 측정 시 수 ppm 정도가 발생한다. 본 연구에서는 특수한 권선방법을 사용하여 1:1, 1:2, ..., 1:9 및 1:10 의 권선 비를 갖는 초정밀 전기용량 측정용 브리지를 제작하였다.

#### 2. 브리지 시스템 제작 및 구성

제작된 전기용량브리지 시스템의 전체 회로도는 그림 1과 같다. 브리지는 비례팔로 사용되는 주 비례변성기, 그 값을 알고 있는 reference 전기용량표준기, 피 측정 전기

용량기, 비례팔용 변성기, inphase, quadrature 평형조절용 multi-dial 변성기 2대, 평형전압 주입용 1000:1변성기 및 quadrature network로 이루어져 있다. 한편 브리지의 동작은 브리지에 연결된 2개 전기용량기의 전기용량값 차이에 의해서 불평형 전압이 발생이 되고, 이 불평형 전압만큼의 전압을 브리지의 "-1" 단자에 주입시켜줌으로서 브리지 평형이 이루어진다.

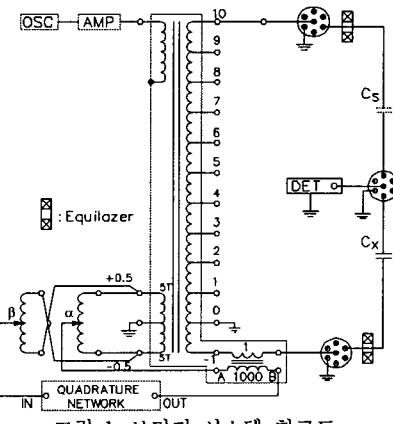
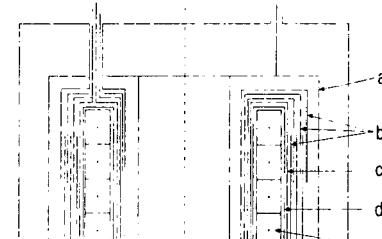


그림 1. 브리지 시스템 회로도.

#### 2.1 주 비례변성기 제작



- a: 10 turn secondary winding supported on polyethylene former,
- b: copper-m-metal-copper shield,
- c: primary wing,
- d: teflon tape,
- e: supermalloy toroidal core

그림 2. 비례 팔로 사용되는 주 비례변성기의 단면모습.

주 비례변성기에 사용된 토로이달 코어는 초기투자율이 60,000인 supermalloy 코어 4개를 그림 2와 같이 격충하여, mylar 테이프로 주변을 감고 층면에 중심에서 방사

선 상으로 100회의 홈이 파여진 도너츠 모양의 판을 부착하고 B&S #22선을 사용하여 권선 간의 분포자기용량(distributed self-capacitance)을 줄이기 위해 bootlace 권선방식[2]으로 1차 권선을 균일하게 100회 하였다. 그 윗면을 다시 mylar tape로 감고 teflon sleeve 및 copper tape를 통하여 1차 권선의 끝부분을 외부로 뽑아내었다. 1차 및 2차권선 사이의 잔여누설자속(residual leakage flux)을 감소시키기 위하여 1차권선과 코어둘레를 정전 및 자기적으로 완전차폐를 시키기 위해서 copper, mu-metal, copper의 순으로 1차권선과 코어주변을 도너츠 형태로 차폐시켰으며 각 차폐판이 완전한 폐회로로 구성되지 않도록 외부 축 간격사이를 테프론 sheet 및 mylar tape를 사용하여 절연시켰다.

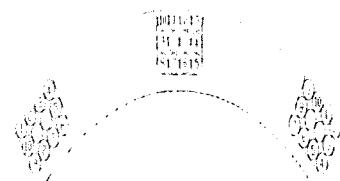


그림 3. 주 비례변성기의 2차 권선방법.

2차권선은 누설임피던스와 분포용량, 권선간의 상호 임피던스의 결합으로 인한 비오차를 감소시키기 위하여 새로운 권선방법을 택하였다. 즉 그림2와 같이 주변에 나선형 홈을 기계 가공한 폴리에틸렌 외부형틀(outer former)을 그림 3의 최외각 차폐상자 주변에 고정시키고 동시에 내부에는 폴리에틸렌 쇄기(wedges)와 권선면적을 정해주는 목재 spacer를 설치하였다. 직경 0.37 mm 가닥으로 꼬아진 2.4 mm의 teflon tinned copper wire group을 core 주변에 그림 3과 같이 나선형 홈을 따라 3층으로 적층 권선하되, 권선위치를 동일조준으로 하기 위하여 선의 위치를 교체를 가끔은 후 12개의 권선을 한쪽 축면으로 모아 고정한 후 내부 1상의 권선을 "-1" 층에, 외부 10개의 권선을 1에서부터 10까지 차례로 상자에 부착된 BPO(British Post Office) connector에 용접하였다. 2차권선한 12개의 선들은 내부에 있는 한쌍의 선에 대하여 10개의 외부층 선들이 동축선의 역할을 하기 때문에 내부선에 대한 외부층 10개 권선들의 누설인력턴스는 거의 0이다.

## 2.2 1000:1 비례변성기

TELCON사의 mu-metal core 양 축면에 100개의 홈이 방사선 상태로 파여진 도너츠 모양의 end cheers를 부착하고 직경 0.0089 mm의 5 strand wire rope를 사용하여 1층과 2층으로 각각 100회 권선한 다음 teflon tape와 aluminized tape로 둘러쌌다. 금도금된 얇은 금속판을 aluminized tape 위에 올려놓고 접지선을 용접한 후 테프론 테이프로 다시 주변을 감아 줌으로서 1차와 2차권선 사이를 차폐시켰다. 1회의 2차권선은 10/0.254 mm의 PVC선을 1차권선 된 코어위에 균등 분포된 자제를 평균하여 sampling 하기 위하여 90° 간격으로 4곳에서 1회권선한 다음 병렬로 연결하여 양쪽 끝을 주 비례변성기의 "-1" tap과 BPO 커넥터에 연결하였다.

## 2.3 Quadrature network

Quadrature 회로는 전기용량값 비교 시 quadrature 성분과 inphase 성분으로부터 분리하기 위한 회로로서 제작된 브리지의 사용목적이 저주파수에서 전기용량 표준기들을 비교 측정하고자 하는 것이고 비교되는 전기용량 표준기들의 특성은 아주 우수하여 quadrature 성분이 최대  $\pm 10 \text{ mrad}$  이내의 차이를 보이므로 quadrature 평형조절 IVD의 첫 번째 다이얼이  $2 \times 10^{-6} \text{ mrad}$  되도록 설계하였다.

1 kHz에서 사용하도록 제작된 회로를 그림 4에 보았다.

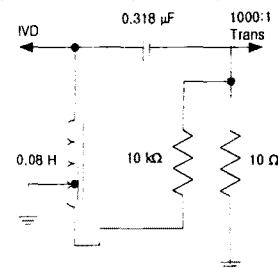


그림 4. 1 kHz용 quadrature 회로.

## 2.4 브리지 평형 방정식

그림 1처럼 구성된 브리지 회로에서 inphase 및 quadrature 조절용 변성기의 지시치를 각각  $\alpha$ ,  $\beta$ 라 하면 1000:1 비례변성기의 단자 A, B에서의 전압은

$$V_A = (\alpha - 0.5) \quad (1)$$

$$V_B = -J0.02(\beta - 0.5) \quad (2)$$

이 된다. 여기서 식 (2)의 0.02는 그림 4의 quadrature 회로에서 병렬저항  $R_P$ 와 사용주파수  $\omega$ , 전기용량  $C$ 의 관계인

$$R_P = \frac{\rho}{\omega C} \quad (3)$$

에서 정해진 값을 의미한다. 이 두 전압이 1000:1 비례변성기에 의해서 브리지 "-1" 단자에 주입되는 전압을  $V_0$ 라고하면

$$V_0 = -[1 + (\alpha - 0.5) \times 10^{-3} + J0.02(\beta - 0.5) \times 10^{-3}] \quad (4)$$

가 된다. 그림 5는 비교 측정하고자 하는 전기용량의 비가  $1 \leq n \leq 10$  일 때 치환법에 의해 전기용량을 측정하기 위한 방법이다.

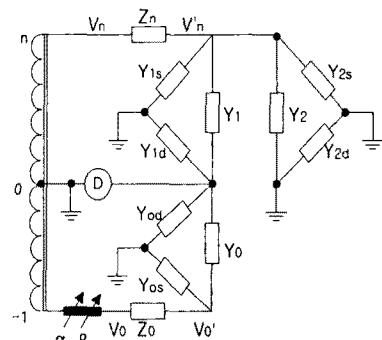


그림 5. 단자 n에서의 치환측정.

그림 5에서 브리지가 평형이 되었다면

$$V'_n Y_1 = V_0' Y_0 \quad (5)$$

이 된다. 또한

$$V'_n = V_0 \cdot \frac{1}{1 + Z_0(Y_0 + Y_{OS})} \quad (6)$$

이 되므로

$$V'_n Y_0 = V_0 \cdot \frac{Y_0}{1 + Z_0(Y_0 + Y_{OS})} = V_0 Y'_0 \quad (7)$$

여기서

$$Y'_0 = \frac{Y_0}{1 + Z_0(Y_0 + Y_{OS})} \quad (8)$$

인데 브리지 평형과정에서  $Y'_0$ 의 참값이 얼마인지 알고자 할 필요 없이 다만 이러한 치환법 측정 과정 중에 일정하게 유지되기만 하면 된다. 단  $Y_2$  측정 시  $V'_n$ 은  $Y_1$  측정 시와 반드시 같아야 된다. 이것은 그림 5와 같이 주 비례변성기의 어느 한 단자에  $Y_1$ 과  $Y_2$ 의 한쪽 lead

선을 고정하고 detector 쪽 lead 선만을 detector 단자 또는 ground로 서로 교체함으로서  $V_n'$ 의 변화 가능성을 피할 수 있다. 따라서 두 개의 어드미턴스  $Y_1$ 과  $Y_2$ 의 비교에서

$$V_n' Y_1 = V_0(1) Y_0', \quad V_n' Y_2 = V_0(2) Y_0' \quad (9)$$

가 되며 여기서  $V_0(1)$ 과  $V_0(2)$ 는 두 가지 평형조건을 의미하며 실제적으로 두 개의 가변비례변성기의 지시치인 ( $\alpha_1, \beta_1$ )과 ( $\alpha_2, \beta_2$ )로서 나타나게 된다. 측정하고자하는  $Y_2$ 는 식 (9)로부터

$$Y_2 = \frac{V_0(2)}{V_0(1)} \cdot Y_1 \quad (10)$$

이 되며 식 (4)를 사용하여 좀 더 구체적으로 표시하면

$$Y_2 = \frac{[1 + (\alpha_2 - 0.5) \times 10^{-3} + j0.02(\beta_2 - 0.5) \times 10^{-3}]}{[1 + (\alpha_1 - 0.5) \times 10^{-3} + j0.02(\beta_1 - 0.5) \times 10^{-3}] \cdot Y_1} \quad (11)$$

이 된다. 분자 분모의 험수항이  $10^{-4}$ 에서  $10^{-6}$  정도로 작기 때문에 quadrature 항은 무시가능하며  $Y_1$ 과  $Y_2$ 가 서로 비교 측정되는 것이 전기용량이므로

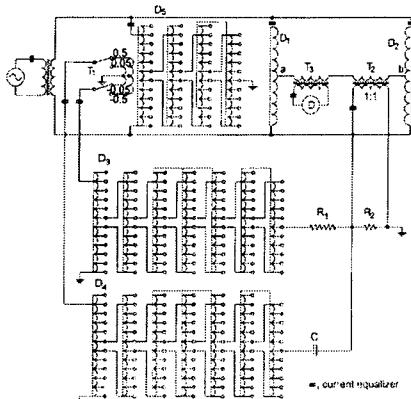
$$C_2 = \frac{[1 + (\alpha_2 - 0.5) \times 10^{-3}]}{[1 + (\alpha_1 - 0.5) \times 10^{-3}] \cdot C_1} \quad (12)$$

으로 간단히 표시된다. 여기서  $C_1$ 은 reference 전기용량 표준기이고,  $C_2$ 는 피측정 전기용량표준기이다. 이때  $C_1$ 과  $C_2$ 의 전기용량은 거의 비슷한 명목치로서 비교되기 때문에 식 (12)를 더욱 간단하게 정리하는 과정에서  $(\alpha_2 - \alpha_1) \times 10^{-3} < 10^{-5}$ 이 되고 분모의 전개식 중 2번 째 오차항은  $(\alpha_2 - \alpha_1) \times (\alpha_1 - 0.5) \times 10^{-6} < 10^{-8}$ 이 된다. 그러므로

$$C_2 = [1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \times 10^{-3}] \cdot C_1 \quad (13)$$

으로 표시되며 이를 브리지 평형식으로 사용하였다.

## 2.5 비 오차 측정



$D_1$ : 기준용 비례변성기

$D_2$ : 피 고정 비례변성기

$D_3$ : 동상분(inphase) 전압공급 조절용 비례변성기

$D_4$ : 직각상분(quadrature) 전압공급 조절용 비례변성기

$D_5$ : 와그너 접지(Wagner ground) 조절용 비례변성기

$T_1$ : 전압 주입용(voltage injection) 주 변압기

$T_2$ : 브리지 평형 전압 주입용(voltage injection) 변압기

$T_3$ : 브리지 평형검출기(balance detector)용 변압기

그림 6. Circuits of a calibration system for a ratio transformer.

피 고정 비례변성기 즉 브리지의 주 비례변성기는 상기 회로의  $D_2$  자리에 연결되어 기준용 비례변성기  $D_1$ 과의 비교에 의해서 고정된다. 기준용 비례변성기와 피 고정 비례변성기의 비교 측정점  $a, b$  사이에는 비 차이가

발생하고, 이 비의 차이에 상응하는 전위차와 위상차가 발생된다. 이 전위차와 위상차에 해당되는 만큼의 전압을  $T_1$  변압기와  $D_3, D_4$  IVD, RC회로,  $T_2$  변압기를 통하여 IVD  $D_1$ 과  $D_2$ 의 출력단자 사이에 주입해 줌으로서 브리지의 평형이 이루어진다. 제작된 주 비례변성기는 그림 6과 같은 비 오차 측정브리지[3]를 사용하여 1.6 k Hz에서 측정이 되었으며, 측정결과 10:1에서의 비 오차는 동상분이  $0.073 \times 10^{-6}$ , 직각상분이  $0.14 \times 10^{-6}$ 으로 측정이 되었다. 그러나 실제 임피던스 측정에서 비례 암으로 사용 시에는 상기 비 오차는 보상하여 사용하기 때문에 비 오차 측정브리지의 측정불확도 즉  $3 \times 10^{-8}$ 가 전기용량의 측정불확도가 된다.

## 3. 결 론

측정불확도가 변성비 10:1에서  $3 \times 10^{-8}$ 인 초정밀 변성비 전기용량브리지가 개발되었다. 이 변성비 전기용량브리지는 주 비례변성기, 1000:1 비례변성기, quadrature 회로, 전원공급기, detector 및 브리지 평형전압 공급용 가변비례변성기로 구성이 되었으며 전기용량을 비교 측정할 수 있도록 “-1”에서 “10”까지의 12개 단자를 갖도록 구성하였다. 주 비례변성기는 특수한 권선기술을 사용하여 제작하였으며 측정주파수 1592 Hz에서 변성비 10:1의 비오차가 inphase 성분이  $0.073 \times 10^{-6}$ , quadrature 성분이  $0.14 \times 10^{-6}$ 으로 측정이 되었으나 실제 측정시 치환법을 사용하면 비오차는 보상값으로 처리되고 단지 비오차 교정시스템의 측정 불확도만이 포함되므로  $3 \times 10^{-8}$ 의 측정불확도로 전기용량을 측정할 수가 있다. 한편 피 측정 전기용량기와 reference 전기용량 표준기의 명목치에 따라서 명목치 1에서 9까지의 값을 비교 측정할 수도 있을 뿐만 아니라 10:1 변성비를 이용하여 전기용량값을 10:1로 step-up, step-down 할 수도 있다. 개발된 전기용량측정 브리지는 전기용량분야의 국가표준 유지 및 보급에 적극 사용되어질 것이다.

## [참 고 문 헌]

[1] 김한준, 이래덕, 강전홍, 한상옥, “저 주파수용 7-dial Inductive Voltage Divider 제작과 특성분석”, KIEE, Vol. 53B, No. 5, pp. 305-308, May, 2004.

[2] B. P. Kibble, G. H. Rayner, “Coaxial Bridges”, Adam Hilger Ltd., 1984.

[3] 김한준, 강전홍, 한상옥, “유도형 전압 분할기의 비교정 브리지 개발”, KIEE, Vol. 54B, No. 5, pp. 217-222, May, 2005.