

7-dial Inductive Voltage Divider 제작과 그 특성분석

*김한준, *이래덕, *강전홍, **한상옥
*한국표준과학연구원 전자기표준부 전기그룹, **충남대학교 전기공학과

Development and Its Characteristics of 7-dial Inductive Voltage Divider

KIM HAN JUN, LEE RAE DUK, KANG JEON HONG, HAN SANG OK
Korea Research Institute of Standards and Science, Chung Nam National University

Abstract -The 7-dial inductive voltage divider (IVD) which is divided the in put voltage precisely upto 10^{-7} were fabricated by using the toroidal cores made of super-mumetal strips of 0.025 mm thick and special decade switches. The cores are of the initial permeability of 200,000 and magnetic flux density of 0.5 T. The inphase and quadrature ratio errors are evaluated to less than $\pm 4 \times 10^{-7}$ and $\pm 5 \times 10^{-6}$ rad, respectively. The fabrication techniques used are more discussed in this paper.

1. 서 론

Transformer ratio divider 또는 비례변성기라고도 불리우는 Inductive Voltage Divider(이하 IVD)는 decade transformer, range 전환용 transformer 및 1:1, 1:10 ratio transformer 등을 포함하여 말하고 있으나 상용주파수의 전력용 transformer와는 구분하여 부른다. IVD는 투자율이 매우 높은 magnetic toroidal core에 균일하게 권선을 할 때 권선 비가 전압의 비와 같게되는 성질을 이용한 기기로 필요에 따라 권선에 여러 개의 tap을 부착시킴으로써 넓은 range의 전압 비를 얻을 수 있다. 일반적으로 전 권선이 10 혹은 11, 12 section으로 나뉘어져 있어서 1:10, 1:1의 전압비를 얻음으로서 정밀측정용 bridge의 ratio arm으로 쓰여진다. 또한 이렇게 전 권선에 11 혹은 12개의 tap이 만들어진 IVD 수 개를 직렬로 마치 decade resistor나 decade capacitor처럼 만들어서 필요로 하는 전압 비를 이끌어 낼 수 있도록 제작된 IVD를 multi-dial IVD라고 한다. 이러한 IVD 들이 일반적인 임피던스에 의한 ratio보다 우수한 점은

(1) transformer ratio가 권선 비에 고 정도로 일치하고 (2) 온도 및 습도의 변화, 인가전압의 변동 또는 진동등에 대해서 대단히 안정하며 (3) 이러한 전기적 특성의 경년 변화가 아주 미소하고 (4) 입력 임피던스가 높으며 (5) 출력 임피던스가 대단히 작다.⁽¹⁾ 일반적인 제작된 IVD는 수 ppm 혹은 2-stage 방법의 이상적인 방법으로 제작이 되었을 시 10^{-9} order의 error를 지니고 있으므로 audio frequency에서 사용하는 bridge의 ratio arm과 bridge의 balance 전압을 정확하게 공급하기 위한 기기로서 널리 이용되고 있으며⁽²⁾ 이러한 ratio상의 높은 accuracy특성은 최근 capacitance 및 inductance의 고 정밀 측정에서 크게 기여하고 있다. 본 논문에서는 7-dial IVD을 제작하고 제작된 IVD의 ratio error를 교정하여 그 특성을 파악하였다.

2. 본 론

2.1 IVD의 등가회로

저항을 무시할 수 있는 에나멜 구리선을 사용하여

고 투자율을 가진 toroidal core에 균일하게 권선을 한 IVD에서 dial setting이 A인 상태에서 권선 간의 등가 병렬 어드미턴스 c와 G를 포함한 입력력 등가회로는 그림 1과 같이 그려진다.⁽¹⁾

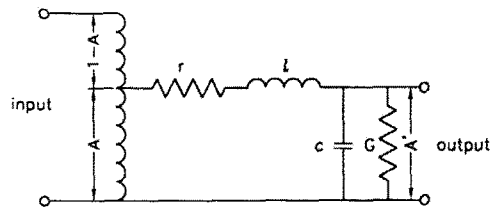


그림 1. IVD의 등가회로

출력의 크기 A' 는

$$A' = A(1 + \omega^2 lc - rG - j\omega cr - j\omega lG) \quad (1)$$

로 나타난다. 여기서 r : 권선저항, l : 누설 임피던스, c : 권선간 유도용량, G : core 손실저항 이다. 만약 c 가 voltage ratio phasor의 동상분에 대한 correction 즉 $A' = A + c$ 이고, q 가 quadrature 성분이라면

$$c \approx A\omega^2 lc - A\omega lG \quad (2)$$

$$q \approx -A\omega cr - A\omega lG \quad (3)$$

으로 나누어 생각할 수 있다. IVD의 출력 임피던스 r , l 은 dial위치설정에 따라 변화되며, c , G 도 dial 설정 위치에 따라 등가 적으로 그림 1의 A 또는 1-A측의 입력단자에 연결된 것처럼 고려되어야 한다. 따라서 IVD의 오차는 이상적인 경우 ratio가 0.5일 때 ratio error 및 phase angle error가 모두 0으로 되고 ratio가 0.25 및 0.75일 때 최대오차가 된다.

2.2 IVD 설계식

좋은 IVD를 제작하기 위해서는 인가전압, 권선 수, 권선 방법 등을 IVD의 사용목적에 적합하도록 디자인 해야한다. 그림 2의 toroidal core 치수에서 인가전압, 권선 수, IVD에 유도되는 인덕턴스는 아래의 식으로 결정이 된다.

$$\text{인가전압: } V = \frac{\omega BAN}{\sqrt{2}} \quad [\text{volt}] \quad (4)$$

$$\text{권선 수: } N = \frac{V}{\omega BA} \quad [\text{turn}] \quad (5)$$

$$\text{인덕턴스: } L = \frac{N^2 \mu_m \mu_0 A}{2\pi a} \quad [\text{H}] \quad (6)$$

여기에서 μ_0 : 투자율, μ_m : 상대투자율, B : 자속밀도 (Tesla), a : toroidal core의 반경(m), A : toroidal core의 단면적(m²)이다.

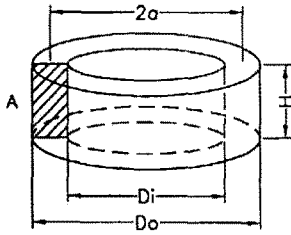


그림 2. IVD 디자인을 위한 toroidal core의 치수.

2.2 IVD 제작

제작된 IVD에 사용된 toroidal core는 super-mumetal 제품으로서 초기투자율이 약 200,000, 자속 밀도가 0.5 T, 두께가 0.025 mm 인 tape로 toroidal core모양으로 감고 염화비닐계 수지로 외관 상자를 만든 것이다. 인가전압과 사용주파수와와의 관계는 $V=0.35f$ 로 설계 값을 잡았으며 주파수는 주로 1 kHz에서 사용하도록 설계하여 최고 인가전압이 1 kHz에서 350 V를 넘지 않도록 하였다. 따라서 식(5)에서 권선수는 약 800회로 계산이 되어 각 tap간은 80회의 권선이 되어야 한다. 제작된 IVD의 회로는 그림 3과 같다.

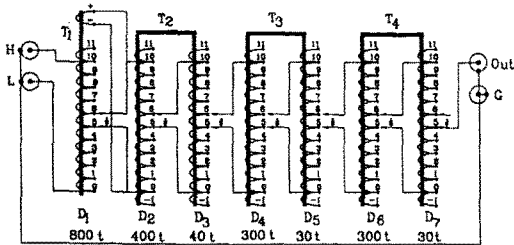


그림 3. 제작된 7-dial IVD의 회로도.

제작된 IVD의 각 dial은 표1과 같은 크기의 toroidal core 및 선과 권선 수로 제작이 되었다.

표 1. 각 dial에 사용된 toroidal core 및 권선수.

dial	core (H-D _i -D _o -t in mm)	사용선과 권선수
D ₁	20-50-70-0.025	D ₁ : Ø 0.6, 80회
D ₂ , D ₃	20-50-70-0.025	D ₂ : Ø 0.6, 40회 D ₃ : Ø 0.6, 4회
D ₄ , D ₅	10-45-60-0.025	D ₄ : Ø 0.6, 30회 D ₅ : Ø 0.6, 3회
D ₆ , D ₇	10-45-60-0.025	D ₆ : Ø 0.6, 30회 D ₇ : Ø 0.6, 3회

한편 권선에 사용된 에나멜 구리선은 균일하게 권선을 하기 위해서 필요한 12가닥을 꼬았으며 bi-filar 방법으로 준비된 toroidal core에 균일하게 권선 하였다. 세 번째까지의 개개 IVD 특성이 전체 IVD의 특성을 결정하기 때문에 첫 번째 IVD에는 가장 큰 toroidal core를 단독으로 사용하였고 두 번째 단과 세 번째 단은 첫 번째 단에 사용된 toroidal core와 같은 것을 사용하였으나 한 개의 core에 두 번째 단의 권선과 세 번째 단의 권선을 함께 하였다. 제작된 개개의 7개 IVD를 rotary switch를 사용하여 그림 4와 같이 각 tap과 연결하였다. 여기에 사용된 rotary switch는 첫 번째 단의 경우는 common 단자를 포함하여 모두 24개의 연결

단자가 있는 것이고 나머지 6개의 dial용 rotary switch는 26개의 연결 단자를 가지고 있는 것이다.

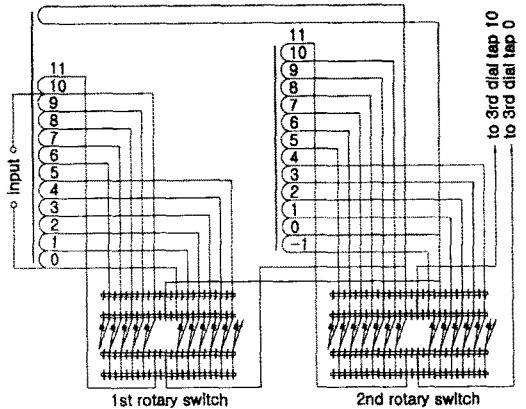


그림 4. 각단의 권선과 rotary switch의 연결.

그림에서처럼 각 tap과 tap사이를 절환 시 회로의 절단현상을 방지하기 위하여 충격 완화 저항 (suppressive resistor)을 연결하였으며 rotary switch의 rotor는 인접한 2개의 접점이 연결된 상태로 절환 될 수 있도록 충분한 넓이가 되도록 제작하였다. 제작된 7-dial IVD는 2층 구조로 2대를 한 개의 상자에 장착하였다.

2.3 제작된 7-dial IVD 교정

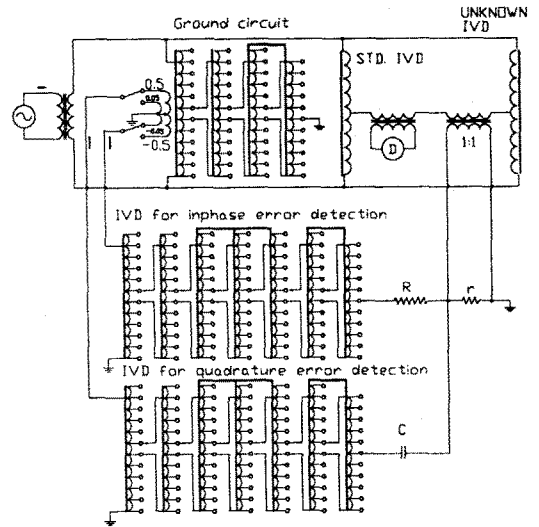


그림 5. 교류전압비 교정 시스템.

제작된 IVD는 한국표준과학연구원에서 표준유지중인 교류전압비 교정 시스템⁽³⁾을 사용(그림 5)하여 중요 dial인 세 번째 dial까지를 교정하였다. 교정에 사용한 bridge의 불확도는 inphase의 경우 5×10^{-9} , quadrature error의 경우 5×10^{-8} 이다. 표 2는 제작된 IVD 중 한 대 만의 교정 값을 보인 것이다. 표 2에서의 quadrature error의 기호 +는 출력전압이 입력전압보다 앞선 것을 표시하고, -기호는 출력전압이 입력전압보다 뒤진 것을 표시한다. 교정불확도는 inphase의 경우 $\pm 10^{-7}$ 이고, quadrature error의 경우는 ± 5

$\times 10^{-7}$ rad이다. 제작된 IVD는 표1에서처럼 입출력간의 전압의 차이는 약 $\pm 4 \times 10^{-7}$ 이내로 측정이 되었고, 입출력전압간의 위상차이는 약 $\pm 5 \times 10^{-6}$ rad 이내로 측정이 되었다.

표 2. 제작된 7-dial IVD의 교정값.

dial setting	inphase	quadrature error ($\times 10^{-6}$ rad)
X00 000 0	-0.999 999 99	+0.16
900 000 0	0.900 000 35	-2.26
800 000 0	0.800 000 33	-2.97
700 000 0	0.700 000 26	-2.22
600 000 0	0.600 000 19	-0.39
500 000 0	0.500 000 08	+1.60
400 000 0	0.399 999 98	+3.40
300 000 0	0.299 999 90	+4.75
200 000 0	0.199 999 88	+5.03
100 000 0	0.099 999 87	+3.84
0X0 000 0	0.099 999 98	+1.04
090 000 0	0.090 000 04	+0.61
080 000 0	0.080 000 07	+0.34
070 000 0	0.070 000 08	+0.23
060 000 0	0.060 000 01	+0.24
050 000 0	0.050 000 00	+0.32
040 000 0	0.039 999 99	+0.40
030 000 0	0.029 999 98	+0.44
020 000 0	0.019 999 98	+0.41
010 000 0	0.009 999 98	+0.26
00X 000 0	0.009 999 98	+0.32
009 000 0	0.008 999 98	+0.31
008 000 0	0.007 999 98	+0.30
007 000 0	0.006 999 98	+0.30
006 000 0	0.005 999 98	+0.29
005 000 0	0.004 999 98	+0.29
004 000 0	0.003 999 98	+0.28
003 000 0	0.002 999 98	+0.28
002 000 0	0.001 999 98	+0.27
001 000 0	0.000 999 98	+0.24
000 000 0	-0.000 000 01	+0.14

3. 결 론

Super-mumetal toroidal core 위에 에나멜 구리선 12가닥을 꼬아서 균일하게 권선을 하고 tap을 만든 IVD 7개를 rotary switch를 이용하여 상단과 하단으로 decade resistor와 비슷한 방법으로 연결하여 줌으로서 입력전압을 10^{-7} 의 분해능으로 분해하여 원하는 출력전압을 얻을 수 있는 7-dial IVD가 개발이 되었다. 개발된 IVD의 입출력간의 전압의 차이는 약 $\pm 4 \times 10^{-7}$ 이내로 측정이 되었고, 입출력전압간의 위상차이는 약 $\pm 5 \times 10^{-6}$ rad 이내로 측정이 되었다. IVD가 가지는 장점으로 인하여 개발된 IVD는 임피던스 정밀측정용 bridge에 ratio arm으로 사용되어질 수 있을 뿐만 아니라 bridge의 평형 전원을 공급하는 기기로 사용되는 등 저주파수 임피던스 측정용 bridge에 핵심 기기로 사용이 된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Singer instrumentation, "Theoretical analysis of accuracy of ratio transformers", Ratiotrans Engineering Bulletins, No. 1, 1962.
- [2] Zhang Zhong-hwa, Zhu Kai "The error of IVD to a magnitude of 10^{-9} within 400 Hz-20 kHz by means of RC network designed by an optimization programme", ACTA Metrologia SINICA, Vol. 4, No.1, 1983.
- [3] 이래덕, 김한준외, "전기용량-저항 변환용 Quad Bridge 개발", KSRI-91-4-IR, p.27-32, 1991.

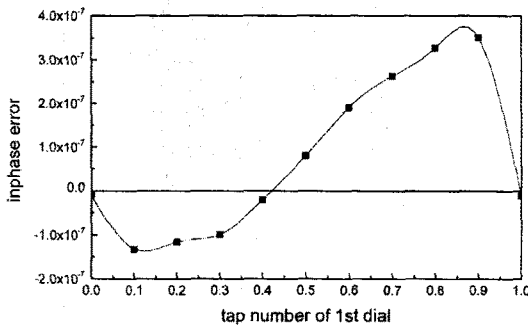


그림 6. 1st dial에서 inphase error.

한편 제작된 IVD의 첫 번째 dial에서의 inphase error 교정 값을 그래프화 한 것을 그림 6에 보였다. 위의 IVD의 등가회로에서 언급한 이상적인 IVD의 곡선보다 전체적으로 +쪽으로 편향된 모습을 보이고 있다. 이것은 권선의 불균일로 인하여 각 tap간에서의 누설임피던스가 균일하지 않은 것으로부터 나타난다.