

대전류 측정용 Tubular Coaxial Shunt 특성에 관한 연구

노창일, 나대열, 김선구, 정홍수, 김원만, 이동준
한국전기연구원

The Study of Characteristics of Tubular Type Coaxial Shunt for High Current Measuring System

Chang-il Roh, Dae-Ryeol La, Sun-Koo Kim, Heung-Soo Jung, Won-Man Kim, Dong-Jun Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes the optimal design, construction and performance evaluation of coaxial shunts used in high current testing laboratory for current measuring system.

These shunts, which are of tubular type coaxial shunts, the currents to be measured range from Amperes to several kiloAmperes, and the frequency of the signals has a bandwidth from DC to megaHertz

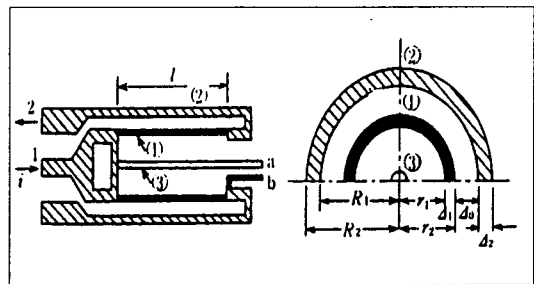
The shunt must have the mechanical strength to support the forces produced by the transient current. above all, the measuring capabilities of shunt are dependent upon short response time and it must be as free as possible of inductive effects.

In this paper presents both characteristic of shunt and design of tubular type coaxial shunt.

2. 본 론

2.1 Shunt 구조

Tubular coaxial shunt는 사용이 간단하고 비교적 측정정밀도가 양호하기 때문에 오래전부터 단락전류측정에 사용하고 있지만 시험전류 커지면 상승시간은 길어진다. 이 shunt의 일반적인 구조는 그림1과 같이 전류를 통전하는 입력과 출력으로 구분되는 주회로와 저항체를 주회로와 접속하여 전압을 측정하기 위한 측정회로로 나누어져 있다.



1-2 주회로단자, l : 도체길이 $\Delta_1 \ll r_1$
a-b : 측정단자, ① : 저항체 $\Delta_2 \ll R_1$
② 외부원통 1차 전류통전회로 ③ : 측정리드선 $\Delta_0 \ll r_1$

그림1. Tubular coaxial shunt 구조

측정회로의 측정단자전압은 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_m = V_r + V_\Phi \quad (1)$$

* V_r : 측정단자사이의 전위차, 전류 $I(t)$ 통전시 저항 R에 의한 전압 강하

V_Φ : Magnetic flux 에 의한 유기전압

Shunt 저항은

- a) 피크전류(I_p),
- b) 전류통전주기 및 측정파형크기
- c) 측정전압의 최대 값(V_m)

등을 고려하여야 하며 저항은 V_m/I_p 로서 정해진다.

전류측정을 위한 저항체가 주회로에 밀착하여 자계에 영향이 없는 경우는 식(1)의 2항의 출력 값은 '0'으로 되지만 식(1)의 1항에서 전류가 변화하면 자계의 영향이 없더라도 표피효과에 의하여 영향을 받게 되기 때문에 측정회로의 전압측정용 저항은 최대한 주회로 밀착하여서 인덕턴스를 감소시키고 표피효과를 억제시키기 위하여 저항율이 큰 두께가 얇은 저항체를 사용하여야 한다.

1. 서 론

전력기기의 차단 및 투입능력을 검증하기 위한 단락시험은 A~수십kA의 전류로 실시되고 있다 특히 고압 대전류 측정에 사용하고 있는 분류기는 시험전류의 정밀한 측정이 가능하도록 tubular type coaxial shunt를 사용하고 있으며 이 shunt는 비교적 출력전압이 높고 저 impedance 특성, DC 및 megaHertz의 출력이 가능한 주파수 특성을 가지는 장점이 있으나 1차 입력회로에 연결하여 회로를 구성하므로써 반드시 접지점에서 측정이 가능하며 저항체이기 때문에 손실폭이 크고 전류용량에 따라서 크기가 커지는 단점을 가지고 있다. 또한 정밀한 측정이 가능하도록 저저항으로 제작이 되면 응답속도는 양호하나 대전류에 대한 열적성능에 영향을 미칠 수 있으며 고저항으로 제작이 되면 응답특성의 저하로 정밀한 측정이 불가능한 양립성 특성을 가지고 있으므로 shunt의 제작에 여러 요소를 고려해야만 하는 문제점을 가지고 있다.

특히 이 shunt를 사용하여 대전류를 측정하기 위해서는

- 단락전류에 포함된 직류분 전류에 대한 정밀한 측정이 가능
- 전류영점에서 전류의 왜곡현상이 발생하지 않고 응답시정수가 빠름
- 전자기계력 및 열적인 내구성을 보유
- 전자 및 정전유도 노이즈에 영향이 없음

등의 여러 특성요소를 반드시 구비하여야 한다.

이러한 특성요소에 적합한 shunt를 제작하기 위해서는 주파수 및 직각과 응답특성, 인덕턴스, 저항체의 재질등을 분석하여 최적의 조건으로 shunt를 설계할 수 있도록 이론적인 내용을 본 논문에서 검토하고자 한다.

2.2 주파수 응답특성

Shunt 측정의 기본적 회로는 그림2와 같이 구성한다.

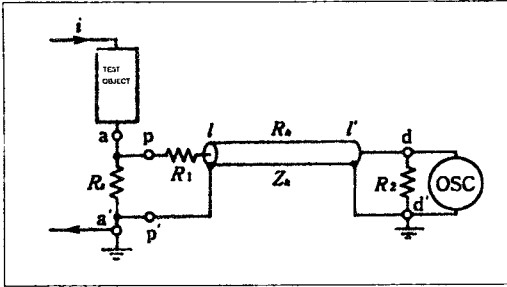


그림2. shunt 측정회로

aa'를 입력단자, dd'를 출력단자라 하면 shunt회로는, 전류비와, 응답특성에 의하여 측정값이 측정된다. 전류비는 aa'를 통해 흐르는 전류파고치를 dd'에 출력되는 전압파고치를 제외하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_i = \frac{R_s + R_1 + Rk + R_2}{R_s R_2} \quad (2)$$

$R_s, Rk \ll R_1, R_2, R_1 = R_2$ 가 되므로 $m_i \approx \frac{2}{R_s}$ 가 된다.

측정전압의 파고치를 제외하면 m_i 로서 shunt에 흐르는 전류를 구할 수 있다. 각 일정한 진폭의 정현파 전류가 흐르는 경우 출력단자의 전압의 진폭은 저주파인 경우 1이 되나 차단주파수 F(MHz)인 경우 상승시간 $Tr(\mu s)$ 사이는 다음의 식과 같이 된다

$$Tr \approx \frac{0.35}{F} \quad (3)$$

그림1에서 tubular coaxial shunt에서 외부는 주회로를 구성하는 도체이며 내부는 전압 측정을 위한 저항체로 구성되어 있다. 이와 같은 회로구성의 경우 실험 impedance 주파수 특성은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$Z = \frac{\rho l}{2\pi ab} \cdot \frac{1}{I_1(\sqrt{jk}b)K_1(\sqrt{jk}a) - I_1(\sqrt{jk}a)K_1(\sqrt{jk}b)} \quad (4)$$

a: 저항체 내경(m), l: 저항체 길이(m), b: 저항체의외경(m)

ρ : 저항체 저항율($\Omega \cdot m$), ω : 전류의 각 주파수

μ_0 : 투자율, 비자성 저항체 = $4\pi \times 10^{-7} H/m$

$k = \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho}}$, I_1, K_1 : 변형 vessel의 관계가 되며

$I_n(Z), K_n(Z)$ 는 $|Z| \gg 1$ 의 조건으로서

$I_1(Z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi Z}} e^z, K_1(Z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2Z}} e^{-z}$ 로 주파수가 높고

두께가 얇은 저항체에 대한 근사식은 다음과 같다.

$$Z \approx R_0 \delta \cdot \left[\frac{(\sin\delta \cosh\delta + \cos\delta \sinh\delta) + j(\cos\delta \sinh\delta - \sin\delta \cosh\delta)}{(\sin\delta \cosh\delta)^2 + (\cos\delta \sinh\delta)^2} \right] \quad (5)$$

여기서 $R_0 = \frac{\rho l}{2\pi d \sqrt{ab}}$ (R_0 : 저항체의 직류저항, d: 저항

체 두께), $\delta = \sqrt{\frac{w\mu_0}{2\rho}}(b-a)$, 저항체의 반경을 r로 표시하

면 $a \approx b \approx r$ 이 되어 $R_0 = \frac{\rho l}{2\pi dr}$ 이 된다.

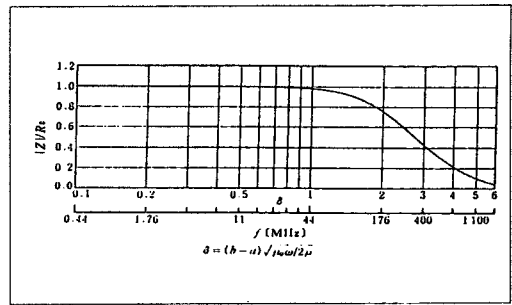


그림3. δ, f 와 $|Z|$ 와의 주파수 특성

그림3은 δ 에 대한 $|Z|$ 의 변화를 나타낸 식 (5)의 근사식으로 표시한 결과이며 δ 는 저항율의 평방근에 반비례하고 주파수의 평방근과 저항체 두께의 곱에 비례한다. 따라서 주파수 특성을 향상시키기 위해서는 두께가 얇고 저항율이 높은 저항체를 사용하여야 한다

2.3 직각파 응답특성

Tubular coaxial shunt의 경우 출력전압 $V_o(t)$ 는 직각파 전류 I_0 가 흐르는 경우

$$V_o(t) = I_0 R_0 \left\{ 1 + 2 \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^K \exp(-K^2 \pi^2 t / L_0 / R_0) \right\} \quad (6)$$

로 나타내며 $R_0 = \frac{\rho l}{\pi(b^2 - a^2)} \approx \frac{\rho l}{2\pi r d}$ 이다.

응답시간은 $T = \int_0^{\infty} \{1 - V_o(t)\} dt$ 는 식(6)을 이용하면

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{L_0}{\rho} \text{ (s)} \quad (7)$$

가 된다. 저항체로서 비 자성체 재료를 사용하기 때문에 μ_0 : 투자율, 비자성 저항체 = $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 를 이용하면

$$T = 2.09 \cdot \frac{d^2}{\rho} \times 10^{-7} \text{ (s)} \quad (8)$$

가 되며. 규약원점 O_1 을 기준으로 응답시간을 구하면

$$T = \frac{1}{8} \cdot \frac{L_0}{\rho} \text{ (s)} \quad (9)$$

이 된다. 직각파 응답특성은 그림4와 같이 표시할 수 있으며 응답시간은 저항체의 두께가 얇고 저항율이 높으면 상승시간이 짧아지는 특성을 가지고 있다.

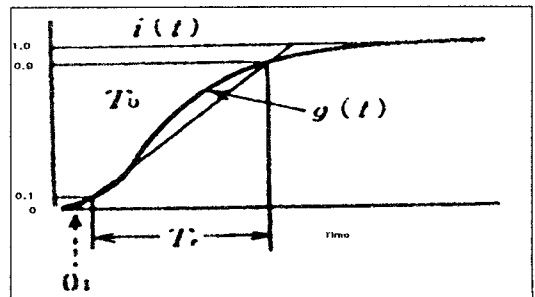


그림4. 직각파 응답특성

2.4 인덕턴스 특성

Tubular coaxial shunt의 인덕턴스는 외부 원통 전류 회로의 내부자계에 의한 성분(L_{2i}), 저항체의 내부 자계 및 외부 자계에 의한 성분(L_{1i} , L_{1e}), 서로간의 상호 인덕턴스(M_{12}), 저항체와 측정리드선의 인덕턴스(M_{13})으로 나눌 수 있다

전류단자로 부터의 전체 인덕턴스는 $L = L_{1i} + L_{1e} - M_{12} + L_{2i} + M_{21}$ 로 되어서 다음 식으로 된다.

$$\approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\frac{\Delta_1}{3r_1} + \frac{\Delta_0}{r_2} + \frac{\Delta_2}{3R_1} \right) \quad (10)$$

측정단자 a-b의 잔류인덕턴스 M_{ab} 는

$$M_{ab} = L_{1i} - M_{31} \approx -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\frac{\Delta_1}{6r_1} \right) \text{이며}$$

저항체의 저항치 $R = \frac{l}{2\pi r_1 \Delta_1 \sigma}$ 라 하면 응답시정수를 식

으로 표시하면

$$T_{ab} = \frac{M_{ab}}{R} \approx \frac{\mu_0 \sigma \Delta_1^2}{6} \quad (11)$$

로 된다.

응답시정수는 저항체의 두께 Δ_1 에만 관계하여 응답시정수와 통전능력과는 반대되는 특성을 가지고 있다.

2.5 저항체의 재질

전압측정을 위한 저항도체의 재질은 저항률이 크고 저항의 온도계수와 열기전력이 작아야 하며 기계적 강도는 크고 화학적으로 안정되어야 한다. 현재 정밀저항재료로 망가닌, 구리-니켈, 니크롬, 금-크롬, 은-망간 등의 재료가 이용되고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 단락전류에 대한 정밀한 측정이 가능하게 shunt를 제작하기 위하여 고려될 요소로 주파수 응답 특성, 직각파 응답특성, 인덕턴스특성, 저항체의 재질등에 대하여 검토하였다. 추후과제는 저항체의 재질에 따른 기계적 강도 및 전기적 특성을 연구하여 현재 수입에만 의존하고 있는 tubular coaxial shunt를 측정정밀도 및 소급성이 확보된 측정기기로 자체개발하여 고압 단락 시험의 대전류 측정에 사용하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 原田 達哉 外 “大電流工學 핸드ブック” コロナ社, pp. 257-271. 1994
- [2] Lou van der Sluis. "Transient in power system" pp. 189-193. 2001
- [3] Ryszard Malewski "An improvement the tubular shunt"
- [4] O. B. Oliverira "design, construction and performance evaluation of shunt for the measurement of high impulsive current". 1991.