

40 kA급 로고스키 코일 국가 표준시스템 구축

김윤형*, 한상길*, 정재갑**, 강진홍**, 이상화**, 한상옥*
 충남대학교*, 한국표준과학연구원**

Establishment of National Standard System for 40 kA Rogowski Coil

Yoon-Hyoung Kim*, Sang-Gil Han*, Jae-Kap Jung**, Jeon-Hong Kang**, Sang-Hwa Lee**, Sang-Ok Han*
 Chungnam National University*, Korea Research Institute of Standards and Science**

Abstract - 전력량의 증가로 인한 대전류 측정의 요구와 전력 시스템의 디지털화에 부응하여 대전류 국가 표준 시스템의 측정 범위의 확장 및 전자식 전류변성기의 평가를 위해 구축된 40 kA급 전류변성기 비교 측정 시스템과 전자식 변성기 평가 시스템을 소개하였다. 또한 전자식 변성기 평가시스템의 핵심 장비인 전압-전류 변환기에 대한 비오차 및 위상오차를 평가하였고, 200 A ~ 40 kA 까지의 로고스키 코일을 평가하였다. 마지막으로 로고스키 코일 평가시의 불확도 요인으로 1차 코일의 위치, 대전류 발생 변압기와와의 거리에 따른 측정 불확도를 평가하였다.

1. 서 론

세계적인 전력설비분야의 발전 추이는 디지털 계전 및 보호 기술과 같은 IT 기술이 접목된 기기의 생산부분을 비롯하여 예방 진단 분야와 같은 관리, 운용 및 서비스분야가 중전기산업에서 차지하는 비율이 커질 것이라 전망되고 있다. 현재 운영되고 있는 전력량의 정확한 측정, 설비의 감시 및 보호를 위한 철심형 변성기는 측정 전압, 전류가 커질수록 부피가 커지고 철심의 자속포화로 인한 오차 발생 등의 문제점을 갖고 있다. 이는 전력량이 증가할수록 설비의 거대화를 초래하고, 전력거래시장에서의 정확한 전력 측정에 대한 신뢰성 또한 감소시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 세계적인 추세는 전력설비의 감시 및 보호, 정확한 전력량 측정을 위해 전자식 측정 장치를 도입하고 있다[1].

디지털 계전 및 보호를 위한 대표적인 전자식 측정 장치는 전압의 경우 용량성 또는 저항성 전압 센서, 전류의 경우에는 광 CT, 로고스키 코일(Rogowski coil)과 같은 전자식 전류센서가 있다. 이들 전자식 센서는 기존의 철심형 변성기에 비해 가격이 저렴하고, 설비를 원등히 감소시킬 수 있고, 자속에 의한 포화가 발생하지 않는다. 또한 출력에 낮기 때문에 전력 설비의 디지털화에 부응한 원격 감시 및 제어에 적합하다고 할 수 있다.

현재 세계적인 국제표준기관인 캐나다의 NRC에서는 전자식 전류변성기인 로고스키 코일을 60,000 A의 범위에 대해 불확도 50 ppm 이내로 정확하게 측정하는 시스템을 구축하여 산업체 전자식 변성기 평가에 활용하고 있다. 그러나 국내의 경우 20 kA급의 철심형 전류변성기의 평가 시스템 및 방법에 대한 표준[2]은 확립되어 있으나 대전류 센트, 로고스키 코일등의 전자식 전류변성기에 대한 교정 지원은 해주지 못하고 있는 실정이다. 이에 대전류 표준 시스템의 국제 교류 및 신뢰성 확보, 그리고 국내 중전기 업체들의 해외 수출을 위한 교정, 국내의 대전류 계기용 전류변성기의 수요에 대응하기 위해 전류변성기 국가 표준 시스템의 측정 범위를 확장하여 전자식 전류변성기에 대한 평가 기술의 확립이 요구된다. 따라서 최근 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 대전류 측정 표준 범위를 40 kA급 까지 확장하여 전자식 전류변성기를 평가할 수 있는 대전류 국가 표준 시스템을 구축하였다.

본 논문에서는 40 kA 로고스키 코일을 평가할 수 있는 시스템 및 평가 방법, 불확도 분석 결과에 대해 소개한다.

2. 로고스키 코일의 원리

로고스키 코일은 공심 코어에 코일이 감겨있는 형태이다. 코어의 단면적 S, 단면적의 중심을 기준으로 코일의 길이 l, 균일하게 감긴 코일의 권선수를 n이라할 때 로고스키 코일에서 유도되는 전압 $v(t)$ 는 다음과 같다[3].

$$v(t) = -n \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

여기서 ψ 는 코일의 전체 자속이다. 로고스키 코일의 전체 자속 ψ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\psi = \mu_0 \mu_r n \oint \int \vec{H} d\vec{S} \quad (2)$$

또한 다음과 같은 식이 성립한다.

$$d\vec{S} \parallel d\vec{S} \parallel \vec{l} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 식 (1)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$v(t) = -\mu_0 \mu_r n S \frac{di(t)}{dt} = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에서 M은 다음과 같다.

$$M = -\mu_0 \mu_r n S \quad (5)$$

로고스키 코일의 등가회로는 그림 1과 같다[3].

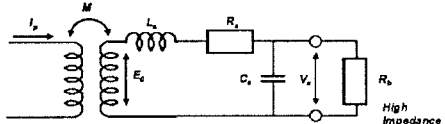


그림 1. 로고스키 코일의 등가회로
 Fig 1. Rogowski coil equivalent circuit

로고스키 코일의 비오차(ϵ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{E_0 - V_0}{E_0} \quad (6)$$

그림 1에서 로고스키 코일의 비오차(ϵ) 및 위상오차(δ)를 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon = 1 - \frac{R_b}{\sqrt{(R_b + R_s)^2 + (\omega L_s)^2}} \approx 1 - \frac{R_b}{R_b + R_s} \approx \frac{R_s}{R_b} \quad (7)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{\omega L_s}{R_b + R_s}\right) \quad (8)$$

3. 로고스키 코일 평가 시스템의 구성

그림 2는 로고스키 코일 평가시스템의 구성도이다. 로고스키 코일 평가 시스템은 전류조정기, 대전류 발생원, 진상 커패시터, 표준 전류변성기, 전류변성기용 부암, 피측정 로고스키 코일, 버퍼, 전압-전류 변환기, 전류변성기 비교기로 구성되어 있다. 동일한 교류 대전류를 표준 전류변성기와 피측정 로고스키 코일의 1차측에 직렬로 공급한다. 로고스키 코일의 출력전압을 전압-전류 변환기를 통해 전류로 변환시키고 전류변성기 비교기에서 표준 전류변성기의 2차 전류와 전압-전류 변환기의 출력 전류를 비교해서 비오차와 위상오차를 측정한다. 여기서 버퍼는 로고스키 코일의 적분기의 출력 임피던스가 커서 로고스키 코일의 출력 전압이 감소가 되는데 이를 방지하기 위해 전압이득(gain)이 1인 버퍼를 사용하였다.

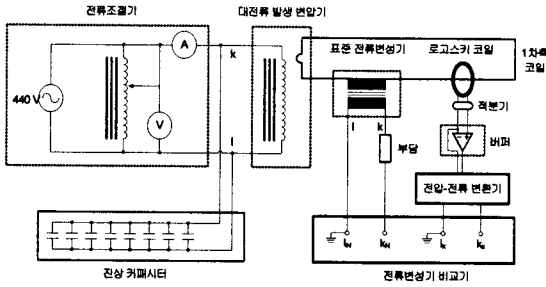
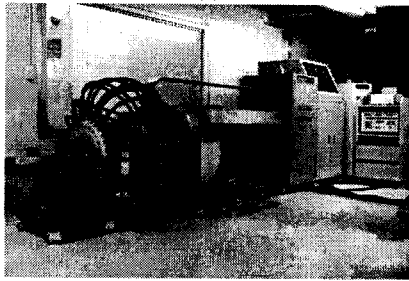


그림 2. 로고스키 코일 평가 시스템의 구성
Fig. 2. The constitution of the rogowski coil evaluation system

본 연구에서는 로고스키 코일의 전류 범위에 따라 세 가지 측정 시스템을 이용하였는데 그림 3에 전류 범위에 따른 측정 시스템의 실물 사진을 나타내었다. 그림 3(a)는 40 kA 까지 교정할 수 있는 시스템이고, 그림 3(b)는 20 kA, 그림 3(c)는 5 kA 까지 교정할 수 있는 시스템이다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 로고스키코일 평가 시스템의 실물 사진 (a) 40,000 A (b) 20,000 A (c) 5,000 A
Fig. 3. The picture of the Rogowski coil evaluation system (a) 40,000 A (b) 20,000 A (c) 5,000 A

4. 피측정 로고스키 코일 두 대의 평가 결과

표 1. 로고스키 코일의 비오차 및 위상오차 평가 결과.
Table 1. Evaluation results for ratio error and phase displacement of rogowski coil.

전류 / 전압비	2차 전류 (%)	오차 측정값		표준기의 오차		VCC의 오차		문정부 값	
		ar [%]	B _r [min]	aN [%]	B _N [min]	avcc [%]	B _{vcc} [min]	ax [%]	B _x [min]
200 / 2	5	-0.13	19.02	0.00	0.00	0.06	8.50	-0.19	10.52
	20	-0.13	19.54	0.00	0.00	0.01	8.10	-0.14	11.44
	100	-0.12	19.31	0.00	0.00	-0.01	8.05	-0.11	11.27
2000 / 2	5	-0.02	22.11	0.00	0.00	0.06	8.50	-0.08	13.81
	20	-0.17	21.96	0.00	0.00	0.01	8.10	-0.18	13.66
	100	-0.19	23.14	0.00	0.00	-0.01	8.05	-0.17	15.10
20000 / 2	5	0.85	9.41	0.00	0.05	0.06	8.50	0.79	0.96
	20	0.53	9.87	0.00	0.07	0.01	8.10	0.51	1.84
	100	0.44	9.98	0.00	0.08	-0.01	8.05	0.45	2.01
40000 / 4	5	0.95	7.73	0.00	0.32	0.08	8.50	0.87	-0.39
	20	0.37	9.63	0.00	0.24	0.01	8.10	0.36	1.77
	90	0.08	7.83	-0.01	0.17	-0.01	8.05	0.08	-0.04

5. 불확도 평가

5.1 1차 코일의 위치에 따른 불확도

이상적인 로고스키 코일은 1차코일의 위치에 관계없이 동일한 전압을 출력해야 한다. 그러나 실제 측정시에 1차 코일의 위치에 따른 비오차 및 위상오차 변화정도를 평가할 필요가 있다. 1차 코일의 위치를 중앙, 상, 하, 좌, 우로 변화시키면서 로고스키 코일의 비오차 및 위상오차를 반복 측정하여 불확도를 평가하였다.

표 2. 1차 코일의 위치에 따른 비오차, 위상오차의 불확도
Table 2. Uncertainty of ratio error and phase displacement of rogowski coil by position variation of primary coil.

1차 전류	2차전류 (%)	평균값		절대불확도	
		RE [%]	PE [min]	RE [%]	PE [min]
200 A	5	-1.1485	19.2770	0.0641	0.3018
	20	-1.2077	18.8460	0.0695	0.1551
	100	-1.2045	17.7070	0.0828	0.3090
2000 A	5	-1.2516	22.2800	0.0597	0.0930
	20	-1.2843	21.6400	0.0606	0.0332
	100	-1.2970	22.6900	0.0605	0.0245
20000 A	5	-0.1634	9.4300	0.0818	0.5700
	20	0.2175	10.1693	0.0673	0.1384
	100	0.3166	10.4779	0.0675	0.0425
40000 A	5	0.9444	8.5585	0.0325	0.2058
	20	0.3566	9.7801	0.0696	0.0376
	90	0.0537	8.1573	0.0905	0.6017

5.2 대전류 발생원과의 거리에 따른 불확도

로고스키 코일과 대전류 발생원과의 거리에 따른 불확도를 평가하기 위하여 대전류 발생 원과의 거리를 20 kA system에서 0, 10, 20, 30, 40, 50 cm로 바꾸면서 로고스키 코일의 비오차 및 위상오차를 반복 측정하여 불확도를 평가하였다.

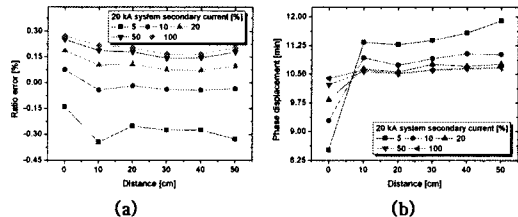


그림 4. 대전류 발생원과의 거리에 따른 (a) 비오차 (b) 위상오차
Fig. 4. Ratio error, phase displacement by distance variation between rogowski coil and high current source.

6. 결 론

본 논문에서 대전류 국가 표준 시스템의 측정 범위의 확장 및 전자식 전류변성기의 평가를 위해 구축된 40 kA급 전류변성기 비교측정 시스템과 전자식 변성기 평가 시스템을 소개하였다. 기존의 철심형 전류변성기와 전자식 전류변성기에 대한 40 kA까지의 국가 표준 시스템을 구축함으로써 국내 중전기기업체의 대전류 장비의 교정 지원에 활용 가능하게 되었다. 특히 전력 시스템이 디지털화, 무인화 되어가는 추세에서 국내 중전기기 업체의 해외 수출 및 품질 신뢰성 확보에도 많은 도움을 주리라고 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] 장용무, "전력기기 디지털화를 위한 전자식 CT-PT 기술동향", 전기의 세계, 2004.
- [2] 정재갑, 이상화, 강전홍, 김병수, 김윤형, 한상길, 한상욱, "20,000 A 전류변성기 국가 표준 시스템 구축", 대한전기학회지, 57P(1호), 6-12, 2008.
- [3] IEEE STD, "IEEE Guide for the Application of Rogowski Coils Used for Protective Relaying Purposes", C37.235, 2007.