

Establishment of Evaluation System for 40,000 A Rogowski Coil

김윤형* · 한상길** · 정재갑† · 강전홍*** · 이상화§ · 한상옥§§
 (Yoon-Hyoung Kim · Sang-Gil Han · Jae-Kap Jung · Jeon-Hong Kang ·
 Sang-Hwa Lee · Sang-Ok Han)

Abstract - Evaluation system for calibrating Rogowski coil(RC) up to primary current of 40,000 A have been established. The system consists of 40,000 A AC high current source, current transformer(CT) comparator, standard CT, RC under test, voltage to current convertor(VCC), buffer and CT burden. An AC high current is applied to the primary windings of both the standard CT and the RC under test, and then the CT comparator measures the ratio error and the phase displacement by comparing the secondary current of the standard CT with output current of VCC. For testing of RC, we have evaluated two RCs under test of primary current ranges of 0 A ~ 2,000 A and 0 A ~ 40,000 A with the accuracy class of 1 %. The extended uncertainty is 0.02 % ~ 0.23 % for ratio error and 0.29 min ~ 1.93 min for phase displacement in the primary current ranges of 10 ~ 40,000 A.

Key Words : Rogowski Coil, Current Transformer, Voltage to Current Convertor, CT Test System, Current Comparator

1. 서 론

전력설비 분야에서 전력량의 정확한 측정, 설비의 감시 및 보호를 위해 사용되고 있는 철심형 변성기는 측정 전압, 전류가 커질수록 부피가 커지고 철심의 자속포화로 인한 오차 발생 등의 문제점을 갖고 있다. 이로 인해 전력량이 증가할수록 설비의 거대화를 초래하고, 전력거래시장에서의 정확한 전력 측정에 대한 신뢰성이 감소될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 세계적인 추세는 전력설비의 감시 및 보호, 정확한 전력량 측정을 위해 전자식 변성기를 도입하고 있다. 전자식 변성기는 디지털 계전 및 보호 기술과 같은 IT(information technology) 기술과 접목하여 기기의 생산부분을 비롯하여 예방 진단 분야와 같은 관리, 운용 등의 중전기기산업에서 차지하는 비율이 커질 것이라 전망되고 있다 [1]. 디지털 계전 및 보호를 위한 대표적인 전자식 전력 측정 장치는 전압의 경우 용량형 또는 저항형 전압 센서, 전류의 경우에는 광 CT(current transformer), 로고스키 코일(rogowski coil)과 같은 전자식 전류센서가 있다. 이들 전자식 센서는 기존의 철심형 변성기에 비해 가격이 저렴하고, 설비를 월등히 감소시킬 수 있고, 자속에 의한 포화가 발생

하지 않는다. 또한 출력이 낮기 때문에 전력 설비의 디지털화에 부응한 원격 감시 및 제어에 적합하다고 할 수 있다.

고전압 대전류 분야에서 세계적인 국가표준기관인 캐나다의 NRC(national research council)에서는 대전류 측정 분야에서 전자식 변류기인 로고스키 코일을 60 kA의 범위까지 불확도 0.005 % 이내로 정확하게 측정하는 시스템을 구축하여 산업체 전자식 변류기 평가에 활용하고 있다. 그러나 국내의 대전류 측정 표준의 경우 20 kA 급의 철심형 변류기 평가 시스템을 구축하여 산업체에 교정지원을 해주고 있으나, 대전류 선트, 로고스키 코일 등의 전자식 변류기에 대한 교정 지원은 해주지 못하고 있는 실정이다[2]. 이러한 국제적인 추세에서 국내 중전기 업체들의 해외 수출을 위해서는 국제적인 신뢰도 확보가 필수적이다. 이를 위해 국가 표준 시스템의 전력 측정 범위의 확장과 측정 정확성이 요구되며, 특히 대전류 측정 분야에 있어서 현재까지 국내에는 확립되지 않은 전자식 변류기에 대한 정확도 평가 기술의 개발이 요구된다.

본 논문은 전자식 변류기를 평가할 수 있는 평가 시스템을 구성하고, 실제 전자식 변류기 평가에 적용하기 위한 평가 기술의 확립과 평가 결과의 유효성 검증을 위한 불확도 분석을 목표로 한다. 이를 위해 대표적인 전자식 변류기인 로고스키 코일을 60 Hz의 상용주파수 대전류 40 kA의 범위까지 평가할 수 있는 시스템을 구축하여 로고스키 코일을 평가하는 방법을 연구하였다. 국내의 경우 로고스키 코일의 비오차를 평가할 수 있는 시스템은 활용되고 있으나, 위상각 오차를 평가할 수 있는 시스템이 전무한 상태에서 본 연구를 통해 비오차뿐만 아니라 위상각 오차까지 평가가 가능해졌다. 최종적으로 본 논문에서 구축한 시스템의 유효성을 검증하기 위해 측정 불확도를 분석하였다.

† 교신저자, 정회원 : 한국표준과학연구원 책임연구원 · 이박
 E-mail : jkjung@kriss.re.kr

* 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정

** 준 회 원 : 한국표준과학연구원 위촉연구원

*** 정 회 원 : 한국표준과학연구원 선임연구원 · 공박

§ 정 회 원 : 한국표준과학연구원 선임연구원

§§ 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2008년 10월 20일

최종완료 : 2009년 3월 4일

2. 로고스키 코일 평가 시스템의 구성

그림 1은 40 kA급 로고스키 코일 평가시스템의 구성도이다.

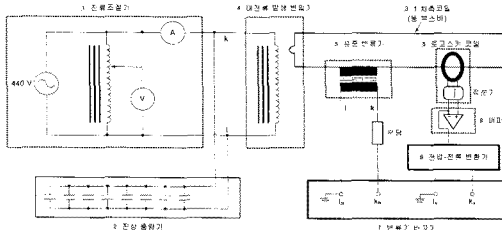


그림 1 40 kA 로고스키 코일 평가 시스템의 구성
Fig. 1 Constitution of 40 kA Rogowski coil evaluation system

로고스키 코일 평가시스템은 전류조절기, 대전류 발생 변압기, 동 부스바, 진상 용량기, 표준 변류기, 표준 변류기용 부담, 변류기 비교기로 구성된 변류기 평가 시스템과 이에 추가로 피측정 로고스키 코일, 적분기, 버퍼, 전압-전류 변환기로 구성되어 있다. 전류 조절기를 통해 최대 100 kVA의 전력을 대전류 발생 변압기의 2차측에 공급하면 대전류 발생 변압기의 1차측에서 대전류가 발생한다. 이 때 변압기 코일의 유도성 리액턴스 성분에 의한 지상전류를 상쇄시켜 역률을 개선하기 위해 대전류 발생 변압기의 2차측에 진상 용량기를 병렬로 연결한다. 진상 용량기는 역률이 1에 가까워지도록 커패시턴스 값을 조절하여 변압기의 효율을 높일 수 있는 최적의 조건을 찾아야 한다. 대전류 발생 변압기의 1차측에서 발생하는 교류 대전류는 저항이 약 300 $\mu\Omega$ 인 동 부스바를 통해 표준 변류기와 피측정 로고스키 코일의 1차측에 직렬로 동일하게 공급된다. 동 부스바는 동판간의 접촉 면적을 크게 하기위해 원형의 프렌지를 사용하였고, 접촉부분에는 온도극을 하여 접촉저항을 줄였다. 로고스키 코일은 1차측에 대전류가 흐르면 2차측에 전압이 출력된다. 출력 전압을 적분기를 통해 1차 전류와 동위상을 만들고, 버퍼를 거쳐 전압-전류 변환기를 통해 전류로 변환시킨다. 여기서 버퍼는 전압-전류 변환기의 입력 임피던스에 대해 로고스키 코일의 적분기의 출력 임피던스가 커서 발생하는 로고스키 코일의 출력 전압 강하를 보상해 주기 위해 전압 이득(gain)이 1인 버퍼를 사용하였다. 최종적으로 변류기 비교기에서 표준 변류기의 2차 전류와 전압-전류 변환기의 출력 전류를 비교해서 로고스키 코일의 비오차와 위상각 오차를 측정한다.

본 연구에서 구축한 로고스키 코일 평가 시스템은 1차 전류의 최대 크기에 따라 5 kA, 20 kA, 40 kA 시스템의 세 가지로 나뉘고, 기존의 철심형 변류기의 평가에도 활용할 수 있다. 그림 2는 전류 측정 범위가 20 kA ~ 40 kA로 가장 큰 40 kA 시스템의 실물사진이다.

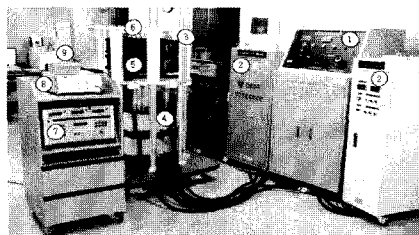


그림 2 40 kA 로고스키 코일 평가 시스템의 실물 사진
Fig. 2 Photo of 40 kA Rogowski coil evaluation system

3. 로고스키 코일의 평가 이론

그림 1의 로고스키 코일 평가 시스템에서 표준 변류기의 2차 전류와 전압-전류 변환기의 출력 전류를 변류기 비교기를 이용하여 비교하여 로고스키 코일의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 이 때 변류기 비교기에서 측정되는 오차는 다음과 같다.

$$\alpha_r = (\alpha_{rc} + \alpha_{vcc}) - \alpha_N \quad (1)$$

$$\beta_r = (\beta_{rc} + \beta_{vcc}) - \beta_N \quad (2)$$

여기서, 각 인자들은 다음과 같다.

α_r, β_r : 변류기 비교기에서 측정되는 로고스키 코일의 비오차, 위상각 오차

α_{rc}, β_{rc} : 로고스키 코일의 비오차, 위상각 오차

$\alpha_{vcc}, \beta_{vcc}$: 전압-전류 변환기의 비오차, 위상각 오차

α_N, β_N : 표준 변류기의 비오차, 위상각 오차

식 (1)과 식 (2)와 같이 변류기 비교기에서 측정되는 오차는 로고스키 코일의 오차에 전압-전류 변환기, 표준 변류기의 오차가 포함되어 있다. 따라서 최종적인 로고스키 코일의 비오차와 위상각 오차평가를 위해서는 표준 변류기, 전압-전류 변환기의 오차를 반드시 평가해야 한다.

4. 로고스키 코일의 평가 결과

본 연구에서는 제조사에서 제시하고 있는 정확도가 1 %인 로고스키 코일인 Chauvin Arnoux사의 A100(최대 1차 전류 : 200 A, 2 kA)과 PEM사의 CWT300B(최대 1차 전류 : 60 kA)를 평가하였다. 정확도 1 %는 비오차의 경우 1 % 이내, 위상각 오차의 경우는 34.38 min(또는 1 crad)이내의 오차를 만족함을 의미한다. 로고스키 코일의 오차는 9회의 반복 측정에 의한 평균값을 취하였다. 표 1은 1차 전류 범위에 따른 로고스키 코일의 비오차 평가 결과이다. 표 1의 네 번째 열은 변류기 비교기에서 측정되는 로고스키 코일의 비오차, 다섯 번째 열은 전압-전류 변환기의 비오차, 여섯 번째 열은 표준 변류기의 비오차이다. 표준 변류기의 오차 평가는 선행 연구되었던 변류기의 절대평가 기술과 2차 전류 범위 확장 기술을 이용하여 자체 평가하였다[3-5]. 표 1의 마지막 열은 식 (1)을 이용하여 얻은 로고스키 코일의 비오차의 최종 평가 결과이다.

표 1에서 보인바와 같이 1차 전류 200 A, 2 kA 이하의 낮은 범위를 갖는 피측정 로고스키 코일의 비오차 평가 결과는 1차 전류 200 A 이하의 경우는 -0.1873 % ~ -0.1100 % 이고, 1차 전류 2 kA 이하의 경우는 -0.1833 % ~ -0.0777 % 이다. 1차 전류가 60 kA 이하의 높은 범위를 갖는 피측정 로고스키 코일의 비오차 평가 결과는 1차 전류 20 kA 이하의 경우는 0.4519 % ~ 0.7897 % 이고, 1차 전류 40 kA 이하의 경우는 0.0823 % ~ 0.8679 % 이다. 두 로고스키 코일에 대한 비오차 평가 결과는 제조사에서 제시하고 있는 비오차 정확도가 1 % 이내인 점을 고려하면, 제조사의 사양을 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 2는 1차 전류 범위에 따른 로고스키 코일의 위상각 오차 평가 결과이다. 표 2의 네 번째 열은 변류기 비교기에서 측정

표 1 1차 전류 범위에 따른 로고스키 코일의 비오차 평가 결과

Table 1 Evaluated result for ratio error of Rogowski coil versus primary current

제조사 /모델명	1차 전류	2차 전류 (%)	변류기	전압-전류	표준	로고스키
			비교기의 측정값	변환기의 비오차	변류기의 비오차	코일의 비오차
			α_r (%)	α_{vcc} (%)	α_N (%)	α_{rc} (%)
Chauvin Arnoux /A100	200 A	5	-0.1273	0.0600	0.0000	-0.1873
		10	-0.1331	0.0000	0.0000	-0.1331
		20	-0.1270	0.0100	0.0000	-0.1370
		50	-0.1250	-0.0040	0.0000	-0.1210
		100	-0.1230	-0.0130	0.0000	-0.1100
	2 kA	5	-0.0177	0.0600	0.0000	-0.0777
		10	-0.1743	0.0000	0.0000	-0.1743
		20	-0.1733	0.0100	0.0000	-0.1833
		50	-0.1798	-0.0040	0.0000	-0.1758
		100	-0.1850	-0.0130	0.0000	-0.1720
FEM /CW1300B	20 kA	5	0.8520	0.0600	-0.0023	0.7897
		10	0.6295	0.0000	-0.0011	0.6284
		20	0.5253	0.0100	-0.0006	0.5147
		50	0.4607	-0.0040	0.0000	0.4647
		100	0.4387	-0.0130	0.0002	0.4519
	40 kA	5	0.9515	0.0800	-0.0036	0.8679
		10	0.5682	0.0400	-0.0029	0.5253
		20	0.3689	0.0050	-0.0021	0.3618
		50	0.2513	-0.0060	-0.0034	0.2539
		100	0.0817	-0.0120	-0.0114	0.0823

표 2 1차 전류 범위에 따른 로고스키 코일의 위상각 오차 평가 결과

Table 2 Evaluated result for phase displacement of Rogowski coil versus primary current

제조사 /모델명	1차 전류	2차 전류 (%)	변류기	전압-전류	표준	로고스키
			비교기의 측정값	위상각 오차	변환기의 위상각 오차	변류기의 위상각 오차
			β_r (min)	β_{vcc} (min)	β_N (min)	β_{rc} (min)
Chauvin Arnoux /A100	200 A	5	19.022	8.500	0.000	10.522
		10	19.356	8.275	0.000	11.081
		20	19.540	8.100	0.000	11.440
		50	19.411	8.070	0.000	11.341
		100	19.311	8.045	0.000	11.266
	2 kA	5	22.111	8.500	0.000	13.611
		10	22.000	8.275	0.000	13.725
		20	21.956	8.100	0.000	13.856
		50	22.467	8.070	0.000	14.397
		100	23.144	8.045	0.000	15.099
FEM /CW1300B	20 kA	5	9.412	8.500	0.047	0.958
		10	9.692	8.275	0.073	1.490
		20	9.873	8.100	0.071	1.843
		50	9.988	8.070	0.050	1.968
		100	9.980	8.045	0.078	2.013
	40 kA	5	7.793	8.500	0.315	-0.392
		10	7.187	8.275	0.280	-0.808
		20	9.630	8.100	0.237	1.767
		50	9.943	8.070	0.162	2.035
		100	7.835	8.045	0.174	-0.037

되는 로고스키 코일의 위상각 오차, 다섯 번째 열은 전압-전류 변환기의 위상각 오차, 여섯 번째 열은 표준 변류기의 위상각 오차이다. 표 2의 마지막 열은 식 (2)를 이용하여 얻은 로고스키 코일의 위상각 오차의 최종 평가 결과이다.

표 2에서 보인바와 같이 1차 전류 200 A, 2 kA 이하의 낮은 범위를 갖는 피측정 로고스키 코일의 위상각 오차 평가 결과는 1차 전류 200 A 이하의 경우는 10.552 min ~ 11.440 min 이고, 1차 전류 2 kA 이하의 경우는 13.611 min ~ 15.099 min 이다. 1차 전류가 60 kA 이하의 높은 범위를 갖는 피측정 로고스키 코일의 위상각 오차 평가 결과는 1차 전류 20 kA 이하의 경우는 0.958 min ~ 2.013 min 이고, 1차 전류 40 kA 이하의 경우는 -0.808 min ~ 2.035 min 이다. 두 로고스키 코일에 대한 위상각 오차 평가 결과는 제조사에서 제시하고 있는 위상각 오차 정확도가 34.38 min 이내인 점을 고려하면, 제조사의 사양을 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 로고스키 코일 평가의 유효성 검증

본 연구에서 설명한 로고스키 코일의 오차 평가 결과에 대한 유효성을 검증하기 위해 로고스키 코일의 오차 평가에 대한 측정 불확도를 분석하였다. 표 3은 로고스키 코일 평가의 비오차 및 위상각 오차의 불확도 분석의 한 예로 1차 전류가 20 kA, 2차 전류가 1 A 일 때의 불확도 총괄표이다.

표 3 로고스키 코일 평가의 비오차 및 위상각 오차의 불확도 분석의 예, $I_p/I_s = 20$ kA/1 A, $I_s = 100$ %
Table 3 Example of uncertainty analysis of rogowski coil evaluation for ratio error and phase displacement, $I_p/I_s = 20$ kA/1 A at 100 % of I_s

불확도 요인	비오차 (%)	위상각 오차 (min)
- 반복측정에 의한 A형 표준 불확도, u_A	0.0708	0.152
- 변류기 비교기의 표준 불확도[6, 7], u_{B1}	0.0020	0.064
- 표준 변류기의 표준 불확도, u_{B2}	0.0050	0.200
- 1차 코일의 배치에 따른 표준 불확도, u_{B3}	0.0675	0.043
- 로고스키 코일과 대전류 발생 변압기와의 거리에 따른 표준 불확도, u_{B4}	0.0159	0.043
합성 표준 불확도, u_c	0.0993	0.266
유효자유도, ν_{eff}	31600	4010
포함인자, k	2.000	2.000
확장 표준 불확도, $U = k \cdot u_c$	0.1985	0.532

로고스키 코일의 비오차와 위상각 오차의 측정에서 A형 표준불확도와 B형 표준불확도가 합성 표준 불확도에 기여한다. A형 표준불확도는 반복측정에 의한 것이고, B형 표준 불확도는 시스템의 불확도 요인에 의한 것이다.

로고스키 코일 평가시의 불확도 요인별 표준 불확도로부터 로고스키 코일 평가의 합성 표준불확도(u_c)는 각각의 표준 불확도 요인이 서로 상관관계가 없어 독립적이고, 감도계수가 1 이므로 식 (3)과 같이 각 요인별 표준 불확도의 제곱합제곱근으로 구해진다[8].

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2} \tag{3}$$

합성 표준 불확도(u_c)에 대한 유효자유도(ν_{eff})를 구하여 t-분포표에서 신뢰수준에 대한 포함인자(k)를 찾아야 한다. 비오차와 위상각 오차의 B형 표준 불확도의 자유도는 직각 분포를 가지므로 무한대로서 가정하였다. 따라서 유효자유도는 9회 반복 측정된 A형 표준 불확도에 의해 결정된다. 최종적으로 로고스키 코일 평가의 확장 표준 불확도(U)는 합성 표준 불확도(u_c)와 포함인자(k)의 곱으로 얻어진다. 로고스키 코일 평가의 비오차 및 위상각 오차에 대한 불확도 총괄표를 표 4와 표 5에 정리하였다.

표 4에 보인바와 같이 로고스키 코일의 비오차에 대한 불확도 평가 결과가 1차 전류 범위 10 A ~ 40 kA 까지 0.0211 % ~ 0.2304 % 이다. 이는 비오차 정확도 1 % 급의 로고스키 코일을 불확도 0.23 % 이내로 평가할 수 있음을 보여준다.

표 5에 보인바와 같이 로고스키 코일 평가의 위상각 오차에 대한 불확도 평가 결과가 1차 전류 범위 10 A ~ 40 kA 까지 0.292 min ~ 1.930 min 이다. 이는 위상각 오차 정확도 1 % (34.38 min) 급의 로고스키 코일을 불확도 1.93 min 이내로 평가할 수 있음을 보여준다.

표 4 로고스키 코일의 비오차 평가의 불확도 총괄표
Table 4 Uncertainty budget of Rogowski coil evaluation for ratio error

1차 전류	2차 전류 [%]	불확도 요인별 비오차 표준 불확도 (%)					합성 표준 불확도 u_c	유효 자유도 ν_{eff}	포함인자 k	확장 표준 불확도 U
		u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}				
200 A	5	0.0103	0.0020	0.0010	0.0641	0.0650	46173433	2.000	0.1299	
	10	0.0103	0.0020	0.0010		0.0105	7491669	2.000	0.0211	
	20	0.0145	0.0020	0.0010	0.0695	0.0710	12854941	2.000	0.1421	
	50	0.0127	0.0020	0.0010	0.0752	0.0763	23463144	2.000	0.1526	
	100	0.0122	0.0020	0.0010	0.0828	0.0375	33128496	2.000	0.1835	
2 kA	5	0.0173	0.0020	0.0010	0.0597	0.0622	5554822	2.000	0.1244	
	10	0.0185	0.0020	0.0010		0.0186	1272695	2.000	0.0373	
	20	0.0174	0.0020	0.0010	0.0606	0.0631	5506062	2.000	0.1262	
	50	0.0173	0.0020	0.0010	0.0611	0.0635	5674947	2.000	0.1271	
	100	0.0171	0.0020	0.0010	0.0605	0.0629	5886061	2.000	0.1258	
20 kA	5	0.0716	0.0020	0.0050	0.0818	0.0297	0.1128	34343	2.000	0.2256
	10	0.0709	0.0020	0.0050	0.0697	0.0190	0.1014	32092	2.000	0.2027
	20	0.0709	0.0020	0.0050	0.0673	0.0173	0.0994	31476	2.000	0.1988
	50	0.0703	0.0020	0.0050	0.0671	0.0161	0.0987	32314	2.000	0.1973
	100	0.0708	0.0020	0.0050	0.0675	0.0159	0.0993	31600	2.000	0.1985
40 kA	5	0.0200	0.0020	0.0100	0.0325	0.0395	1975000	2.000	0.0790	
	10	0.0351	0.0020	0.0100	0.0591	0.0695	366254	2.000	0.1390	
	20	0.0414	0.0020	0.0100	0.0696	0.0816	222277	2.000	0.1632	
	50	0.0437	0.0020	0.0100	0.0732	0.0859	188345	2.000	0.1717	
	100	0.0706	0.0004	0.0100	0.0905	0.1152	37101	2.000	0.2304	

- u_A : 반복측정에 의한 A형 표준불확도
- u_{B1} : 변류기 비교기의 표준불확도[6]
- u_{B2} : 표준 변류기의 표준불확도
- u_{B3} : 로고스키 코일에 대한 1차 코일의 배치에 따른 표준불확도
- u_{B4} : 로고스키 코일과 대전류 발생 변압기와의 거리에 따른 표준불확도

표 5 로고스키 코일의 위상각 오차 평가의 불확도 총괄표
Table 5 Uncertainty budget of Rogowski coil evaluation for phase displacement

1차 전류	2차 전류 [%]	불확도 요인별 위상각 오차 표준 불확도 (min)					합성 표준 불확도 u_c	유효 자유도 ν_{eff}	포함인자 k	확장 표준 불확도 U
		u_A	u_{B1}	u_{B2}	u_{B3}	u_{B4}				
200 A	5	0.458	0.123	0.050	0.302		0.564	163	2.000	1.129
	10	0.063	0.123	0.050			0.147	75545	2.000	0.294
	20	0.034	0.123	0.050	0.155		0.207	1210555	2.000	0.414
	50	0.015	0.123	0.050	0.144		0.196	31824018	2.000	0.392
	100	0.023	0.123	0.050	0.309	0.054	0.341	9758519	2.000	0.683
2 kA	5	0.131	0.123	0.050	0.093		0.208	5662	2.000	0.417
	10	0.077	0.123	0.050			0.153	34930	2.000	0.307
	20	0.068	0.123	0.050	0.033		0.153	58478	2.000	0.305
	50	0.167	0.123	0.050	0.012		0.213	2211	2.000	0.427
	100	0.056	0.123	0.050	0.025		0.146	122234	2.000	0.292
20 kA	5	0.270	0.064	0.200	0.570	0.504	0.834	1249	2.000	1.669
	10	0.148	0.064	0.200	0.298	0.277	0.481	8063	2.000	0.962
	20	0.123	0.064	0.200	0.138	0.146	0.316	11064	2.000	0.631
	50	0.137	0.064	0.200	0.063	0.066	0.267	6659	2.000	0.534
	100	0.152	0.064	0.200	0.043	0.043	0.266	4010	2.000	0.532
40 kA	5	0.437	0.064	0.500	0.206		0.698	153	2.000	1.397
	10	0.258	0.064	0.500	0.392		0.688	1247	2.000	1.377
	20	0.065	0.064	0.500	0.038		0.510	225625	2.000	1.019
	50	0.067	0.064	0.500	0.055		0.511	206723	2.000	1.023
	100	0.541	0.064	0.500	0.602		0.953	89	2.025	1.930

- u_A : 반복측정에 의한 A형 표준불확도
- u_{B1} : 변류기 비교기의 표준불확도[7]
- u_{B2} : 표준 변류기의 표준불확도
- u_{B3} : 로고스키 코일에 대한 1차 코일의 배치에 따른 표준불확도
- u_{B4} : 로고스키 코일과 대전류 발생 변압기와의 거리에 따른 표준불확도

6. 결 론

본 논문에서는 전력시장의 세계적인 추세와 국내 중전기기 수출업체의 국제 신뢰도 확보를 위해 필수적인 대전류 측정에 대한 평가 설비 구축 및 평가 방법을 제시하고, 이에 대한 유효성을 검증하였다. 또한 전력량의 증가에 따른 대전류 측정의 요구에 대응하여 대전류 측정 범위를 기존 20 kA에서 40 kA급으로 확장하였고, 이는 기존의 침심형 변류기의 평가뿐만 아니라 전력 시스템의 디지털화에 적합한 전자식 변류기의 평가가 가능하다. 대표적인 전자식 변류기인 로고스키 코일의 평가를 위해 40 kA 급 침심형 변류기 평가 시스템에 적분기, 버퍼, 전압-전류 변환기 등의 장비를 추가하여 로고스키 코일의 비오차 뿐만 아니라 위상각 오차를 측정할 수 있다. 또한 로고스키 코일 평가 시스템을 구성하고 있는 표준 변류기, 변류기 비교기, 전압-전류 변환기를 함께 평가하여 최종적인 로고스키 코일의 오차를 얻는 방법을 개발하였다. 이를 활용한 로고스키 코일 평가로 정확도 1 % 급의 로고스키 코일을 40 kA까지 평가하였고, 측정결과는 0.08 ~ 0.87 %로 나타났다. 여기에 각각의 구성장비에 대한 불확도와 로고스키 코일 평가시의 불확도 요인들을 분석하여 로고스키 코일 평가 시스템의 확장 불확도를 산출하여 그 유효성을 검증하였다. 로고스키 코일 평가 시스템을 이용하여 대전류 40 kA까지 정확

도 1 % 인 로고스키 코일의 오차 평가시의 불확도는 비오차의 경우는 0.02 % ~ 0.23 % 이고, 위상각 오차의 경우는 0.29 min ~ 1.93 min 이다. 이는 정확도 사양 1 % 인 로고스키 코일을 최대 0.23 % 이내의 불확도로 평가가 가능함을 확인할 수 있다.

추후 연구 내용으로 동일한 로고스키 코일에 대한 해외 표준 기관의 평가 결과와의 비교가 필요할 것으로 판단되며, 정확도가 1 % 급 이상인 높은 등급의 로고스키 코일을 평가하고 그에 대한 불확도 분석 또한 필수적인 것이다. 본 연구를 통해 기존의 철심형 변류기와 전자식 변류기에 대한 40 kA 까지의 대전류 측정이 가능해져서 철심형 변류기를 비롯한 대전류 선트, 로고스키 코일 등 국내 중전기기업체의 대전류 측정 장비의 교정 지원에 활용 가능할 것이라 판단된다. 특히 전력 시스템이 디지털화되어가는 추세에서 전자식 변류기의 평가가 가능해져서 국내 중전기 기업체에서 제조하는 전자식 변류기에 대한 해외 수출 및 국제 신뢰성 확보에도 많은 도움을 주리라고 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] 장용무, "전력기기 디지털화를 위한 전자식 CT·PT 기술동향", 전기의 세계, 53-1, 2004.
- [2] 정재갑, 이상화, 강전홍, 김명수, 김윤희, 한상길, 한상욱, "20,000 A 전류변성기 국가 표준 시스템 구축", 대한전기학회지, 57P(1호), 6-12, 2008.
- [3] 김윤희, 정재갑, 한상길, 구경완, 한상욱, "전류변성기의 비오차와 위상오차의 절대 평가 기술", 대한전기학회지, 57P(2호), 153-159, 2008.
- [4] 김윤희, 한상길, 정재갑, 한상욱, "철심형 전류변성기의 비오차 및 위상오차 절대 평가 기술의 확장 : 1차 전류 = 5 kA ~ 40 kA", 대한전기학회지, 57P(4호), 431-436, 2008.
- [5] 김윤희, 한상길, 정재갑, 한상욱, "전류변성기 두 대와 절대 평가 기술을 이용한 2차 전류 범위 확장", 대한전기학회지, 58P(1호), 72-78, 2009.
- [6] 김윤희, 한상길, 정재갑, 한상욱, "전류변성기 비교기의 비오차 평가 기술", 대한전기학회지, 57P(3호), 291-295, 2008.
- [7] 김윤희, 한상길, 정재갑, 한상욱, "전류변성기 비교기의 비오차 및 위상오차 평가 기술", 대한전기학회지, 57P(4호), 437-443, 2008.
- [8] 한국표준협회, "측정 결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침", KS A 3000, 2005.

저 자 소 개



김 윤 형 (金潤亨)
 1981년 10월 15일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정.
 Tel : 042-821-7604
 Fax : 042-821-8895
 E-mail : yoonhyoung@cnu.ac.kr



한 상 길 (韓相吉)
 1981년 11월 23일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2009년~현재 한국표준과학연구원 위촉연구원.
 E-mail : sanggilhan@cnu.ac.kr



정 재 갑 (鄭在甲)
 1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업(박사). 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 책임연구원.
 Tel : 042-868-5759
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : jkjung@kriss.re.kr



강 전 홍 (姜鎡洪)
 1963년 2월 8일생, 1988년 대전한밭대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원
 Tel : 042-868-5152
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : jhkang@kriss.re.kr



이 상 화 (李相和)
 1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 충남대학교 전기공학과 석사 과정. 1986년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전기자기센터 선임연구원
 Tel : 042-868-5151
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : shlee@kriss.re.kr



한 상 옥 (韓相玉)
 1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.
 Tel : 042-821-5655
 Fax : 042-821-8895
 E-mail : sohan@cnu.ac.kr