

전기용량 부담을 이용한 전압변성기 비교 측정 시스템의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가기술

論 文

54C-6-7

Evaluation Technique of Linearity of Ratio Error and Phase Angle Error of Voltage Transformer Comparison Measurement System Using Capacitor Burden

鄭在甲[†] · 金漢俊^{*} · 權聖遠^{**} · 朴榮泰^{***} · 金明壽[§]

(Jae Kap Jung · Han Jun Kim · Sung Won Kwon · Young Tae Park · Myung Soo Kim)

Abstract - Voltage transformer(VT) comparison measurement system is usually used for measurements of ratio error and phase angle error of VT made in industry. Both ratio error and phase angle error in VT are critically influenced by values of burden of VT used. External burden effects on both ratio error and phase angle error in VT are theoretically calculated. From the theoretical calculation, a method of evaluation for linearity of ratio error and phase angle error in VT measurement system have been developed using the standard capacitive burdens, with negligible dissipation factor less than 10^{-4} . These burden consists of five standard capacitors, with nominal capacitance of 1.1 μ F, 1 μ F, 0.1 μ F, 0.01 μ F, 0.001 μ F. The developed method has been applied in VT measurement system of industry, showing in good consistency and linearity within 0.001 % between theoretical and measured values.

Key Words : Voltage Transformer, Ratio Correction Factor, Ratio Error, Phase Angle Error, Capacitive Burdens, Linearity

1. 서 론

실제 전압변성기는 1차 측과 2차 측에서 누설 인덕턴스(leakage inductance)와 권선저항(winding resistance)이 존재하여 전압강하가 일어나고, 또한 자화전류(magnetizing current)와 철손(core loss)의 의해서 오차가 발생한다[1-3]. 전압변성기(voltage transformer)를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 전압변성기의 특성을 평가 또는 교정시험하기 위하여 전압변성기 비교 측정 장치(오차 측정 장치)를 사용하여 피측정 전압변성기의 비오차(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)를 측정한다.

산업체에서 활용되고 있는 전압변성기 비교 측정시스템은 크기가 크고, 무거워서 운반하기가 힘들뿐만 아니라, 제품의 품질관리 및 교정시험용으로 빈번히 사용되기 때문에 이 장치를 교정시험기관으로 운반하여 성능을 평가(교정)받기는 거의 불가능하다. 이러한 이유에서 산업체의 전압변성기 비교 측정시스템의 평가를 위해서는 이동이 용이한 현장용 표준기를 개발하여 이를 산업체로 가져가서 현장에서 직접 전압변성기 측정장치를 평가하는 방법이 절실히 요구된다.

본 연구는 피측정 전압변성기의 2차 측에 걸리는 용량부담(capacitor burden)을 이용하여 전압변성기 비교 측정 장치에서 측정된 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는

기술을 국내최초로 개발했다. 여기서 직선성 평가는 측정 장치 교정(calibration)의 중요한 핵심기술이다. 용량부담은 작고 무게가 가벼워, 이를 산업체로 운송하여 현장에서 측정 장치를 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 기술은 다양한 정격변환비를 갖는 모든 전압변성기에 적용할 수 있는 방법으로서, 이를 이용하여 산업체의 전압변성기 비교 측정 장치의 직선성을 평가했다.

2. 전압변성기의 비오차 및 위상각 오차의 외부부담 효과

2-1. 영부담에서의 전압변성기의 비오차와 위상각 오차의 이론적 고찰

외부부담이 없을 때 즉 영부담(zero burden)일 때 전압변성기의 등가회로는 아래 그림1과 같다[4-5].

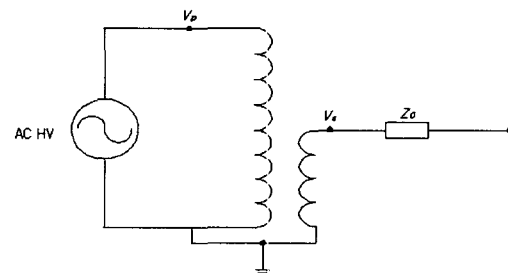


그림 1. 영부담 일때의 전압변성기의 등가회로

Fig. 1. An equivalent circuit for the voltage transformer with zero burden

여기서 Z_0 는 영부담 일때의 전압변성기의 2차측의 누설

[†] 교신저자, 正 會 員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

E-mail : jkjung@kriss.re.kr

^{*} 正 會 員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

^{**} 正 會 員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

^{***} 正 會 員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

[§] 正 會 員 : 한국표준과학연구원 전자기표준부장

接受日字 : 2005年 3月 3日

最終完了 : 2005年 4月 14日

출력 임피던스(leakage output impedance)이고, 전압 변성기의 2차측(Vs)과 1차측(Vp)의 전압벡터의 복소비는 아래와 같다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{-j(\Gamma_s - \Gamma_p)} = \frac{|V_p|}{|V_s|} e^{-j\Gamma_0} = NRCF_0 e^{-j\Gamma_0} \quad (1)$$

여기서 $\Gamma_0 \equiv \Gamma_s - \Gamma_p$ 로 정의되는 위상각 차이로서, 180도 회전된 2차측에 대한 1차측 전압벡터사이의 위상각의 차이이고 N 은 전압변성기의 정격변환비 혹은 권선비(nominal ratio 또는 turn ratio)이다. RCF0 는 영부담 일때의 비보정인자(ratio correction factor)로서 전압변성기의 실제비 변환인자(true ratio correction factor)이다. 비보정인자(RCF)와 비오차(RE)와의 관계는 아래와 같다.

$$RCF = 1 - [RE(\%)/100] \quad (2)$$

2-2. 외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각 오차에 미치는 영향의 이론적 고찰

외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각 오차에 미치는 영향을 살펴보자. 임피던스 Zb인 외부부담 b 가 전압변성기에 연결될 때의 등가회로는 아래 그림2와 같다[4-5].

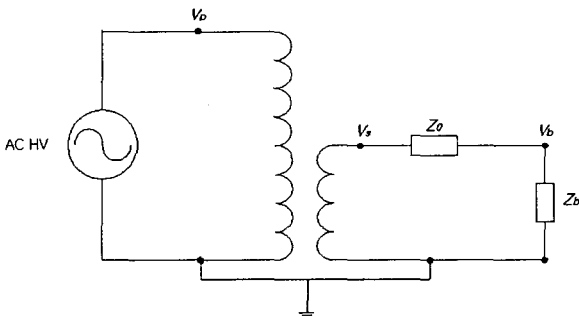


그림 2. 부담 Zb가 있을때의 전압변성기의 등가회로
Fig. 2. An equivalent circuit for the voltage transformer with external burden Zb

그림 2의 전압변성기의 2차측(Vb)에 대한 1차측(Vp)의 전압벡터의 복소비는 식 (1)과 유사하게 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_b} = \frac{|V_p|}{|V_b|} e^{-j\Gamma_b} = NRCF_b e^{-j\Gamma_b} \quad (3)$$

여기서 Γ_b 는 부담 b가 있을 때 2차측에 대한 1차측 전압벡터의 위상각의 차이이고 NRCFb 는 부담 b가 있을 때의 비보정인자이다.

그림 2 에서 Z0 와 Zb 로 흐르는 전류는 같으므로

$$\frac{V_s - V_b}{Z_0} = \frac{V_b}{Z_b}, \quad \frac{1}{V_b} = \frac{Z_0 + Z_b}{V_s Z_b} \quad (4)$$

이고, 식 (4)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_b} = \frac{V_p}{V_s} \left(1 + \frac{Z_0}{Z_b} \right) \quad (5)$$

따라서 식 (5)는 식 (1), (3)을 이용하여 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$RCF_b(1 - j\Gamma_b) \cong RCF_0(1 - j\Gamma_0) \left(1 + \frac{Z_0}{Z_b} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서 Γ_b 와 Γ_0 는 크기가 10⁻⁴ 정도이므로 $e^{-j\Gamma_b}$ 와 $e^{-j\Gamma_0}$ 의 급수전개에서 2 차항 이상은 무시되었다. 식 (6)의 전압변성기의 누설 출력 임피던스 Z0는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (7)$$

2-2-1. 전기용량 부담 효과

그림 2에 외부부담으로서 전기용량기가 연결되어 있을때 외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각 오차에 미치는 영향의 이론적인 고찰을 해보자. 전압변성기 2 차측에 연결된 전기용량으로 이루어진 부담의 임피던스 Zb 는 Rb 와 Xb 가 병렬로 연결되어 있다고 할 수 있으므로 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_b = \frac{1}{\frac{1}{R_b} + \frac{1}{-jX_b}} = \frac{-jR_b X_b}{R_b - jX_b} \quad (8)$$

식 (7), (8)를 식 (6)에 대입하여 다시 쓰면 식 (9)와 같다.

$$RCF_b(1 - j\Gamma_b) \cong RCF_0(1 - j\Gamma_0) \left(1 + \frac{(R_0 + jX_0)(R_b - jX_b)}{-jR_b X_b} \right) \quad (9)$$

식 (9)를 전개하여 실수부만 취하여 부담 b가 있을 때 비보정인자(RCFb)는 식 (10)과 같다.

$$RCF_b \cong RCF_0 \left(1 + \frac{R_0}{R_b} - \frac{X_0}{X_b} + \Gamma_0 \frac{X_0}{R_b} + \Gamma_0 \frac{R_0}{X_b} \right) \quad (10)$$

전압변성기의 Γ_0 의 크기가 10^{-4} 정도이다. 전압변성기의 2차측의 외부부담으로서 정격이 $1.1 \mu\text{F}$, $1 \mu\text{F}$, $0.1 \mu\text{F}$, $0.01 \mu\text{F}$, $0.001 \mu\text{F}$ 인 마이크로 표준용량기를 선택하였다. 마

이카 커패시터의 X_b 는 $X_b = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot C}$ 이므로 각각 $2.41 \text{ k}\Omega$, $2.65 \text{ k}\Omega$, $26.52 \text{ k}\Omega$, $265.3 \text{ k}\Omega$, $2.68 \text{ M}\Omega$ 에 해당되고, 모든 용량기의 손실계수(dissipation factor)가 10^{-4} 보다 작으므로 R_b 가 $24 \text{ M}\Omega$ 이상이다. 따라서 식 (10)의

$\frac{R_0}{R_b}$, $\Gamma_0 \frac{X_0}{R_b}$, $\Gamma_0 \frac{R_0}{X_b}$ 은 크기가 10^{-6} 이내로 작아 충분히 무시 가능하기 때문에 상기 전기용량값을 갖는 부담을 선택하였다. 따라서 식 (10)을 식 (11)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$RCF_b \cong RCF_0 \left(1 - \frac{X_0}{X_b}\right) \tag{11}$$

식 (2)를 이용하여 식 (11)을 비오차에 대한 식으로 바꾸면 식 (12)과 같다.

$$RE_b \cong RE_0 - (RE_0 - 100) \left(\frac{X_0}{X_b}\right) \tag{12}$$

한편 식 (9)를 전개하여 허수부로 나누어 부담 b 가 있을 때 위상각 오차(Γ_b)는 식 (13)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_b &\cong \frac{RCF_0}{RCF_b} \left(\Gamma_0 - \frac{X_0}{R_b} - \frac{R_0}{X_b} + \Gamma_0 \frac{R_0}{R_b} - \Gamma_0 \frac{X_0}{X_b} \right) \\ &\cong \left(1 - \frac{X_0}{X_b}\right)^{-1} \left(\Gamma_0 - \frac{X_0}{R_b} - \frac{R_0}{X_b} + \Gamma_0 \frac{R_0}{R_b} - \Gamma_0 \frac{X_0}{X_b} \right) \\ &\cong \left(\Gamma_0 - \frac{R_0}{X_b} \right) \end{aligned} \tag{13}$$

식 (13)에서 $\Gamma_0 \frac{R_0}{R_b}$, $\frac{X_0}{R_b}$, $\frac{X_0^2}{X_b R_b}$, $\frac{X_0 R_0}{X_b^2}$, $\Gamma_0 \frac{X_0^2}{X_b^2}$

는 Γ_0 와 비교하여 10^{-6} 배 이하로 작아 무시 하였다.

RE_0 , R_0 , Γ_0 및 X_0 가 상수이므로, 식 (12)의 부담이 있을 때의 비오차(RE_b)와 식 (13)의 부담이 있을 때의

위상각 오차(Γ_b)는 부담의 값에 반비례한다($\sim \frac{1}{X_b}$). 즉

RE_b 와 Γ_b 가 $\frac{1}{X_b}$ 에 비례하는 일차함수이다. 따라서

$\frac{1}{X_b}$ 의 값을 변화시켜 가면서 얻은 RE_b 와 Γ_b 를 각각 식

(12)과 (13)에서 $\frac{1}{X_b}$ 의 함수로 프라팅 하여 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있다.

3. 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차 및 위상각 오차의 직선성 평가결과 및 논의

국내 산업체에서 보유하고 있는 전압 변성기 비교 측정 시스템 구성도를 그림 3에 나타내었다. 국내 회사에서 활용하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치는 모두 외국회사의 제품으로 미국 Knopp 사(모델 : 1G2-1), 스위스 Tettex 사(모델 : type 2767), 일본의 Soken 사(모델 : DAC-VCTT-6) 등이다. 기준 전압변성기(reference voltage transformer)와 피측정 전압변성기(test voltage transformer)의 1차측에 동일한 전압을 병렬로 공급하고, 두 전압변성기의 2차측 전압을 전압 변성기 비교 측정 장치를 이용하여 비교한다. 여기서 전압변성기 비교 측정 장치는 비오차와 위상각 오차를 측정하는데, 두 전압 변성기의 2차측 전압을 비교하여 비오차와 위상각 오차 다이얼로 평형을 맞추어 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다.

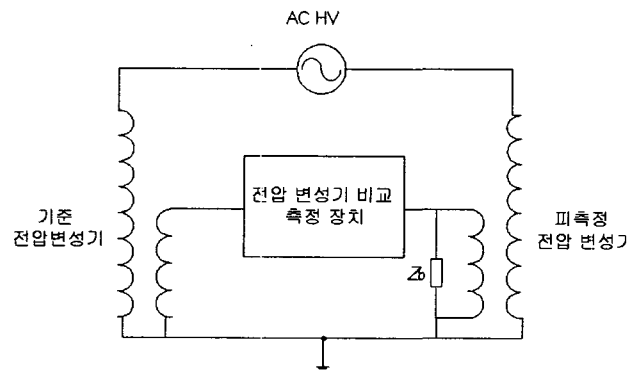


그림 3. 전압변성기 비교 측정 시스템의 구성

Fig. 3. Constitution of voltage transformer comparison measurement system

국내 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치에서 전기용량기로 구성된 부담값을 변화시켜면서(그림 3의 Z_b 를 변화) 피측정 전압변성기의 비오차를 측정하였다. 여기서 사용한 피측정 전압변성기는 일본 Yokogawa사의 모델 2262를 사용하였고, 1차측 전압이 3300 V 이고, 2차측 전압은 110 V 로 유지하면서 측정하였다. 그림 4의 ●와 □는 각각 A 사와 B사의 전압변성기 비교측정 장치에서 측정한 실험결과이고, 두 실선들은 식 (12)을 이용하여 피팅한 결과가

다. 여기서 A 사의 기준 전압변성기와 비교측정 장치의 모델은 각각 Knopp WP-14000-4 와 Knopp KVTs 이다. B 사의 기준 전압변성기와 비교측정장치는 각각 Tettex 4823 와 Tettex 2767 이다. 부담의 전기용량값이 0.001 μF ~ 1.1 μF

($\frac{1}{X_b} = 3.7 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \sim 4.2 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ 에 해당)의 범위에서 비오차의 실험값(●와 □)과 이론값의 차이가 0.0005 % 이내에서 일치한다(삽입한 그림 참조). 삽입된 그림에서 ΔRE_b 는 $\Delta RE_b = \text{실험치} - \text{이론값}$ 이고, 이론값은 식 (12)에 의해 피팅 되는 값이다. 따라서 비오차의 직선성이 0.0005 % 이내에서 잘 유지되어, 비오차 보정이 필요가 없다.

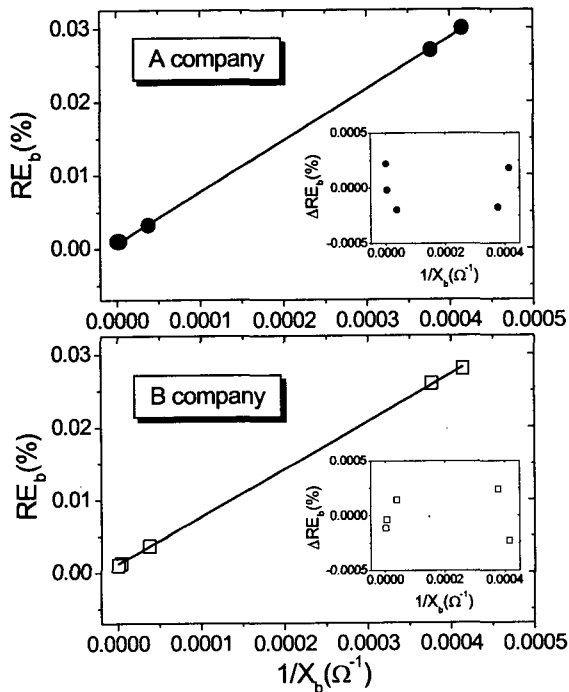


그림 4. 전기용량 부담값에 따른 비오차의 변화
Fig. 4. A change of ratio error as a function of capacitor burden value

그림 5는 국내 2개 회사에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치를 이용하여 전기 용량 부담을 변화시키면서 측정한 피측정 전압변성기의 위상각 오차를 나타낸 것이다. 그림 5에서 ●와 □는 각각 A 사와 B사의 전압변성기 비교 측정 장치에서 측정된 실험결과이고, 두 실선들은 식 (13)을 이용하여 피팅한 결과이다. 부담의 전기용량값이 0.001 μF ~

1.1 μF ($\frac{1}{X_b} = 3.7 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \sim 4.2 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ 에 해당)에서 위상각 오차의 실험값(●와 □)과 이론값의 차이가 0.00001 이내에서 잘 일치한다(삽입한 그림 참조). 삽입된 그

림에서 ΔPAE_b 는 $\Delta PAE_b = \text{실험치} - \text{이론값}$ 이고, 이론값은 식 (13)에 의해 피팅 되는 값이다. 따라서 위상각 오차의 직선성이 0.00001 이내에서 잘 유지되어, 위상각 오차 보정이 필요가 없다.

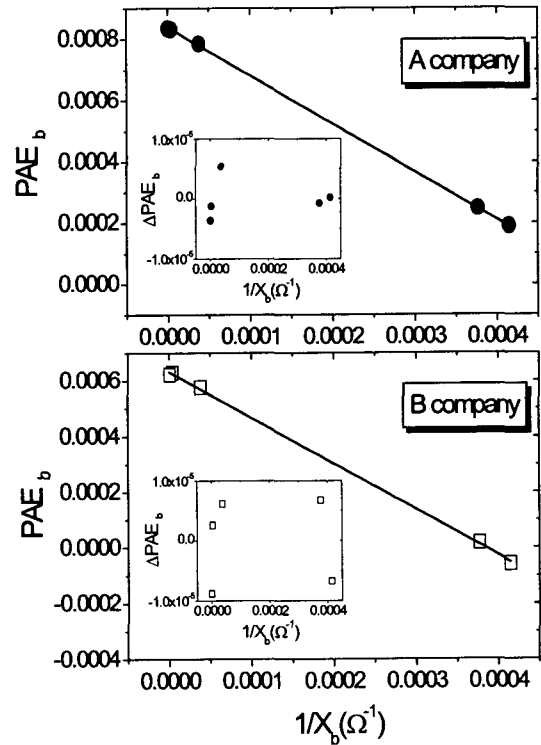


그림 5. 전기용량 부담값에 따른 위상각 오차의 변화
Fig. 5. A change of phase angle error as a function of capacitor burden value

4. 결 론

피측정 전압변성기의 2차측에 걸리는 전기용량으로 구성된 부담을 이용하여 전압변성기 비교 측정 장치의 비오차와 위상각 오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 개발했다. 이 방법은 식 (12)와 (13)에서 얻은 부담효과에 의한 이론값을 실험결과와 비교하여 직선성을 평가하는 새로운 방법이다. 이를 산업체에서 보유하고 있는 전압변성기 비교 측정 장치에 적용한 결과 비오차와 위상각 오차는 각각 0.0005 % 와 0.00001 이내에서 이론값과 측정값이 일치하여 보정이 필요 없다는 것을 알았다. 용량부담은 작고 가벼워 이동하기에 적합하다. 또한 이 기술은 다양한 정격변환비를 갖는 모든 전압변성기에 공통적으로 적용할 수 있는 방법이다. 따라서 추후에 산업체의 전압변성기 비교 측정 장치를 평가하기에 적합할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Settles, W. R. Farber, and E. E. Connor, "The analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics" IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, 79, No. 51, pp. 1213-1218, 1961.
- [2] J. K. Das, "Determination of Characteristics of a Three-Winding Potential Transformer and Predetermination of Errors" I. E. Journal-EL, 51, pp 51-58, 1970.
- [3] D. A. Douglass, "Potential Transformer Accuracy at 60 Hz Voltages above and below Rating and at Frequencies above 60 Hz" IEEE Trans. Power App. and Sys. PAS-100(3), pp 1370-1375, 1981.
- [4] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구" 대한전기학회지, 53C, No. 3, pp 137-142, 2004.
- [5] William E. Anderson "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.

저 자 소 개



정 재 갑 (鄭 在 甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원
 Tel : 042-868-5152, Fax : 042-868-5018
 E-mail : jkjung@kriss.re.kr



김 한 준 (金 漢 俊)

1959년 1월 10일생.
 1984년 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사).
 2004 현재: 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정
 1987~2004 현재: 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기.자기그룹 선임연구원
 Tel : 042-868-5283, Fax : 042-868-5018
 E-mail : hanjun@kriss.re.k



권 성 원 (權 聖 遠)

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대 전자공학과
 1978년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부
 전기자기그룹 책임연구원
 Tel : 042-868-5155, Fax : 042-868-5018
 E-mail : swkwon@kriss.re.kr



박 영 태 (朴 榮 泰)

1952년 10월 31일생. 1997년 국립충남대학교 전기공학과 졸업 박사. 1983년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 책임연구원
 Tel : 042-868-5158, Fax : 042-868-5018
 E-mail : pyt@kriss.re.kr



김 명 수 (金 明 壽)

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과 졸업
 1986년 미국 미주리대 (공학박사)
 1977년~1982년 국방과학연구소
 1987년~현재 한국표준과학연구원 전자기표준부장
 Tel : 042-868-5015, Fax : 042-868-5018
 E-mail : mkim@kriss.re.kr