

넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술

論 文
54B-2-3

Evaluation Technique for Linearity of Ratio Error of Instrument Transformer Comparator Using Voltage Transformer with Wide Range of Error Ratios

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

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

Abstract - Linearity of ratio error of instrument transformer comparator has been tested using wide ratio error voltage transformer(VT) with the ratio errors in the range of -3 % to 3 %. The technique is the method for evaluation of the linearity for instrument transformer comparator by comparing both the theoretical and experimental values in wide ratio error VT. The developed method has been successfully applied for calibration and correction in instrument transformer comparator belonging to industry..

Key Words : Voltage Transformer, Wide Ratio Error Voltage Transformer, Instrument Transformer Comparator, Ratio Error Phase Angle Error, Linearity

1. 서 론

실용되는 전압변성기(voltage transformer, VT)는 철심의 자기 포화 현상과, 1차측과 2차측에 누설 임피던스가 발생하여 전압강하가 일어나기 때문에 VT 자체의 오차를 가지고 있다. VT를 생산하는 산업체나 교정시험기관에서는 계기용 변성기(instrument transformer) 비교 측정 장치(오차 측정 장치)를 사용하여 VT의 비오차(ratio error)와 위상각 오차(phase angle error)를 측정한다[1].

VT는 오차의 등급에 따라 0.1 급, 0.2 급, 0.5 급, 1급 및 3급의 총 5개 등급으로 나누고 있으며, 등급에 따라 허용되는 비오차는 정격 100 %의 입력전압에서 $\pm 0.1 \%$, $\pm 0.2 \%$, $\pm 0.5 \%$, $\pm 1 \%$ 및 $\pm 3 \%$ 이다[2]. 계기용 변성기 비교 측정 장치는 앞서 언급한 $\pm 3 \%$ 오차 범위까지 비오차를 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 계기용 변성기 비교 측정 장치는 일반적으로 0.2 % 이내의 작은 범위의 오차를 갖는 피측정 VT의 비오차는 비교적 정확하게 측정할 수 있는데 반해, 0.2 % 이상의 큰 범위의 오차에서는 비오차 측정 눈금이 약간 벗어나 있는 경우 정확한 측정이 어렵다. 이를 위해서 계기용 변성기 비교 측정 장치에서 측정된 작은 범위의 비오차 측정값이 넓은 범위까지도 직선성을 그대로 유지하고 있는가를 평가하는 것은 아주 중요하다.

본 논문은 의도적으로 -3 % ~ +3 %까지 넓은 범위의 비오차를 갖도록 제작한 전압변성기(wide ratio error VT)를

이용하여 -3 % ~ +3 %의 넓은 범위까지 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성을 평가할 수 있는 측정기술의 개발에 관한 것이다. 이는 wide ratio error VT의 권선비에 의한 비오차 측정값과 이론적인 계산값 사이의 일치도를 측정, 분석함으로써 넓은 범위에 대한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성을 평가하는 방법으로서, 이는 곧 비교측정 장치의 교정(calibration)에서 중요한 핵심기술이다. 이 방법을 이용한 비오차의 직선성 평가는 본 연구에서 최초로 시도하는 측정기술이다.

산업체 등에서 활용되고 있는 계기용 변성기 비교 측정 시스템은 크기가 크고, 무거워서 운반하기가 힘들뿐만 아니라, 제품의 품질관리 및 교정시험용으로 빈번히 사용되기 때문에 이 시스템을 교정시험기관으로 운반하여 성능을 평가(교정)받기는 거의 불가능하다. 그러나 개발된 wide ratio error VT를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성 평가기술은, wide ratio error VT가 작고 무게가 가벼워서 이를 산업체로 운송하여 현장에서 측정시스템을 평가할 수 있는 장점이 있다.

2. 전압변성기의 비오차 이론

전압변성기는 철심에 1차 코일과 2차 코일을 감은 변압기의 일종으로서, 등가회로를 그림 1에 나타내었다.

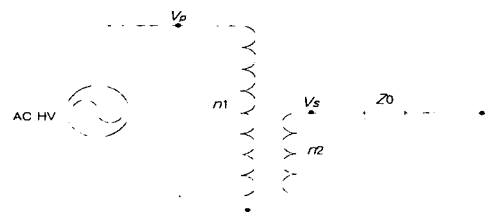


그림 1. 전압변성기의 등가회로

Fig. 1. An equivalent circuit for the voltage transformer

† 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

E-mail : jkjung@kriss.re.kr

* 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

** 正會員 : 한국표준과학연구원 선임연구원

*** 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

§ 正會員 : 한국표준과학연구원 전자기표준 부장

接受日字 : 2004年 3月 22日

最終完了 : 2004年 12月 9日

Z_0 는 전압변성기의 누설 출력 임피던스(leakage output impedance)이다. 전압 변성기의 2차측 저전압(V_s)에 대한 1차측 고전압(V_p)의 비는 2차측 권선수(n_2)에 대한 1차측 권선수(n_1)의 비와 같으므로 아래와 같이 쓸 수 있다[3-4].

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

식 (1)은 오차가 없는 이상적인 변압기에 해당되고, 실제로는 VT가 오차(error)(δ)를 가지고 있기 때문에 식 (2)와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta \quad \text{혹은} \quad V_p = V_s \left(\frac{n_1}{n_2} + \delta \right) \quad (2)$$

한편 전압변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left[\frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] [\%] \quad (3)$$

여기서 N 은 전압변성기의 정격 변환비(nominal ratio)이다. 식 (2)의 오른쪽편의 수식을 이용하여 식 (3)을 다시 쓰면

$$RE \equiv 100 \cdot \left(\frac{N - \frac{n_1}{n_2} - \delta}{\frac{n_1}{n_2} + \delta} \right) \cong \epsilon_t + \epsilon_s \quad [\%] \quad (4)$$

이다. 상세한 수식의 전개는 부록에 나타내었다. 식 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 권선비에 의한 비오차이고 두 번째 항은 자체 비오차로서 각각 아래와 같다.

$$\text{권선비에 의한 비오차 : } \epsilon_t = 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) \quad (5)$$

$$\text{자체 비오차 : } \epsilon_s = 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \quad (6)$$

식 (4), (5), (6)에서와 같이 정격 변환비(N)와 권선비(turn ratio)가 동일한 경우, $N = \frac{n_1}{n_2}$ 일때의 비오차는 자체 비오차만을 가지고 있으나, 정격변환비와 권선비가 다를 경우에는 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차를 함께 포함하고 있음을 알 수 있다.

3. 계기용 변성기 비교 측정 장치의 시스템 구성

국내 산업체에서 보유하고 있는 계기용 변성기 비교 측정

시스템 구성도를 그림 2에 나타내었다. 기준 전압변성기(reference voltage transformer)와 피측정 전압변성기(test voltage transformer)의 1차측에 동일한 전압을 병렬로 공급하고, 두 전압변성기의 2차측 전압을 계기용 변성기 비교 측정 장치를 이용하여 오차를 측정한다. 여기서 비교 측정 장치는 비오차와 위상각 오차를 측정하는 기능을 각각 가지고 있는데, 두 전압변성기의 2차측 전압을 비교하여 비오차와 위상각 오차 조정기로 평형을 맞추어 피측정 전압변성기의 비오차와 위상각 오차를 측정한다. 이 측정 장치에서는 비오차가 0.1 % 이하인 아주 작은 이상적인 VT가 기준 전압변성기로 사용된다. 국내의 산업체에서 활용하고 있는 계기용 변성기 비교 측정 장치는 미국의 Knopp 사, 스위스의 Tettex 사, 일본의 Soken 사의 제품으로서, 측정원리와 방법은 서로 유사하다.

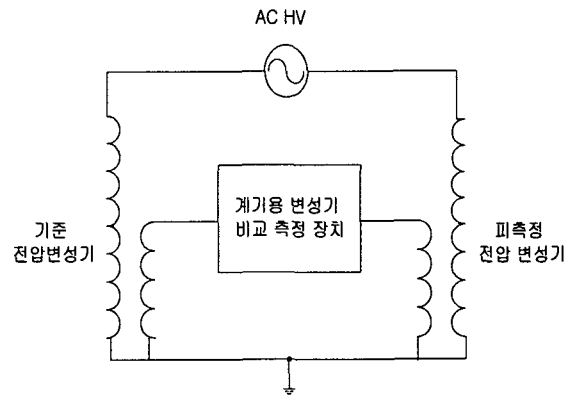


그림 2. 계기용 변성기 비교 측정 장치의 구성
Fig. 2. Block diagram of the instrument transformer comparator

4. Wide ratio error VT를 이용한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성 평가 및 결과의 논의

4-1. Wide ratio error VT의 권선비에 의한 비오차의 이론값

Wide ratio error VT는 권선비에 의한 비오차가 영인 정격 변환비를 갖는 단자와, 이 단자의 변환비에서 2차측의 권선수를 고정시키고 1차측의 권선수를 달리하여 의도적으로 넓은 범위의 권선비에 의한 비오차를 갖도록 제작한 것이다. 이 VT는 -3 % ~ +3 % 범위에서 이론적인 권선비에 의한 비오차의 계산값과 측정값이 정확히 일치하도록 제작한 것으로서, 그림 3은 이 VT의 결선도이다.

그림 3에서 권선비에 의한 비오차가 영인 단자의 경우는 식 (5)에 의해 정격 변환비는 $N = 60$ 으로서 2 차측의 권선수 110 T(turn)에 대하여 1차측의 권선수는 6600 T에 해당된다. 다른 단자의 경우는 2 차측의 권선수를 110 T으로 고정시키고, 1 차측의 권선수를 각각 6805 T, 6666 T, 6633 T, 6567 T, 6534 T, 6408 T가 되도록 권선하였다. 이들 단자들의 권선비에 의한 비오차는 식 (5)를 이용하여 계산하

면 각각 -3.013 %, -0.990 %, -0.498 %, 0.000 %, +0.503 %, +1.010 %, 2.996 % 가 된다. 이 계산된 권선비에 의한 비오차(이론값)를 표 1의 두 번째 열과 그림 3의 괄호 안에 나타내었다.

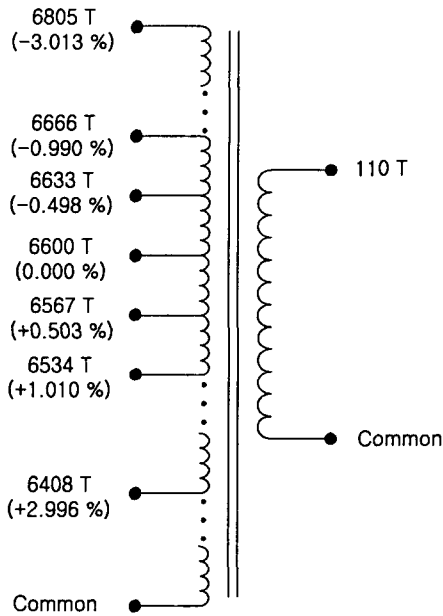


그림 3. 넓은 범위의 비오차를 갖는 전압변성기의 내부결선도
Fig. 3. Internal circuit diagram of the wide ratio error VT(괄호안은 식 (5)에 의해 계산된 권선비에 의한 비오차이다)

4-2. Wide ratio error VT의 권선비에 의한 비오차의 측정값

그림 2에서 wide ratio error VT를 피측정 계기용 변성기로 선택하여 이 VT의 비오차를 계기용 변성기 비교 측정 장치로 측정하였으며, 이 결과를 표 1의 세 번째 열에 나타내었다. Wide ratio error VT에서 측정된 비오차는 식 (4)와 같이 두 가지 요인으로 나타낼 수 있다. 즉 wide ratio error VT의 비오차 측정값은 권선비에 의한 비오차와 자체 비오차의 합이다.

자체 비오차는 1절에서 언급한 자기 포화 현상과, 1차측과 2차측의 누설 임피던스에 의해 생기는 내부오차로서, -0.030 % 로 측정되었다. 자체 비오차는 권선비에 의한 비오차가 전혀 없는 전압변성기가 자체적으로 가지고 있는 비오차로서, N=60 이고, 2차측 권선수에 대한 1 차측 권선수의 비가 6600/110 인 권선비에서 측정된 오차에 해당한다.

이는 식 (6)에서 $\epsilon_s = 100 \cdot \left(-60\delta \frac{110^2}{6600^2} \right) = -0.030 \%$ 에 해당되므로 여기서 δ 를 계산하면 $\delta=0.018$ 이다. 다른 단자에 대해서도 $\delta=0.018$ 과 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차 값을 표 1의 네 번째 열에 나타내었다. 따라서 권선비에 의한 비오차의 측정값은 식 (4)에 의해 [wide ratio error VT의 비오차 측정값-(자체 비오차)] 이므로, 이를 계산하여 표 1의 다섯 번째 열에 나타내었다.

4-3. 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성 평가결과의 논의

Wide ratio error VT의 계기용변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성이 정확하게 유지된다면, wide ratio error VT의 각 단자의 권선비에 의한 비오차의 측정값은 이론값과 동일해야 한다. 이 두 값의 차이, 즉 [권선비에 의한 비오차(이론값)-권선비에 의한 비오차(측정값)]가 계기용변성기 비교 측정 장치에 대한 보정값을 의미하는 것이며, 이를 표 1의 마지막 열에 나타내었다.

표 1에서 보는 바와 같이 권선비에 의한 비오차의 이론값이 +0.503 % 및 -0.498 % 에서는 이론값과 측정값이 0.002 % 이내에서 일치하기 때문에 보정할 필요가 없다. 왜냐하면 측정값의 불확도가 0.003 % 이므로 불확도 이내에서 이론값과 측정값이 서로 일치하기 때문이다. 반면 권선비에 의한 비오차의 이론값이 +1.010 %와 -0.990 % 인 경우는 모두 양의 방향으로(윗방향) 각각 +0.006 % 와 +0.011 % 만큼 보정해야 하며, 권선비에 의한 비오차의 이론값이 2.996 %와 -3.013 % 인 경우도 모두 양의 방향으로(윗방향)으로 각각 +0.036 % 와 +0.027 % 만큼 보정해야 한다. 보정방법은 표 1의 세 번째 열의 계기용변성기 비교 측정 장치에서 측정된 비오차 측정값에서 표 1의 마지막 열의 보정값을 더하여 실제값을 주면 된다.

표 1. wide ratio error VT의 권선비에 따라 계산된 비오차와 측정된 비오차의 비교.

Table 1. Comparison between calculated and experimental ratio errors by turn ratio for the various turn ratios of wide ratio error VT. (단위 : %)

권선비 (n ₁ /n ₂)	권선비에 의한 비오차a (이론값)	비오차b (측정값)	자체 비오차c	권선비에 의한 비오차 측정값d	보정값e (a-d)
				(b-c)	
6805/110	-3.013	-3.068	-0.028	-3.040	+0.027
6666/110	-0.990	-1.030	-0.029	-1.001	+0.011
6633/110	-0.498	-0.530	-0.030	-0.500	+0.002*
6600/110	+0.000	-0.030	-0.030	+0.000	+0.000*
6567/110	+0.503	+0.472	-0.030	+0.502	+0.001*
6534/110	+1.010	+0.973	-0.031	+1.004	+0.006
6408/110	+2.996	+2.928	-0.032	+2.960	+0.036

- a : 식 (5)에 의해 계산된 권선비에 의한 비오차.
- b : 계기용변성기 비교 측정 장치로 측정한 wide ratio error VT의 비오차.
- c : wide ratio error VT에서 $\delta=0.018$ 와 식 (6)을 이용하여 계산된 자체 비오차.
- d : 식 (4)에 의해 계산된 권선비에 의한 비오차(측정값)으로 [wide ratio error VT의 비오차 측정값-자체 비오차.] 즉 표 1에서 (b-c).
- e : 계기용변성기 비교 측정 장치의 보정값, 즉 표 1에서 (a-d).
- * : 권선비에 의한 비오차 이론값과 실험값이 불확도 이내에서 일치하여 보정이 필요하지 않음

표 1의 1차측 권선수에 대한 권선비에 의한 비오차 이론값과 측정값, 보정값을 그림 4에 나타내었다.

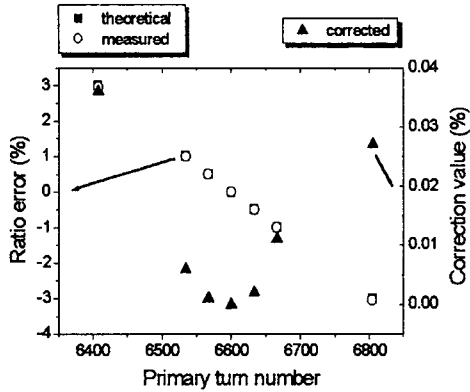


그림 4. 1차측 권선수에 대한 권선비에 의한 비오차 이론값(■)과 측정값(○), 보정값(▲).

Fig. 4. Theoretical(■) and measured(○) of ratio error by turn ratio, corrected(▲) value for primary turn number.

5. 결 론

이론적인 권선비에 의한 비오차 계산값과 정확히 일치하고, 넓은 범위의 비오차를 갖도록 제작한 전압변성기(wide ratio error VT)를 이용하여 -3% ~ +3%까지의 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성을 평가할 수 있는 기술을 최초로 개발했다. 이는 각 권선비에 의한 비오차의 이론값과 측정값을 비교 분석하여 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성을 평가할 수 있는 교정(calibration) 기술이다. 이 두 값의 차이 즉 [권선비에 의한 비오차(이론값)-권선비에 의한 비오차(측정값)]은 계기용 변성기 비교 측정 장치의 보정값을 의미한다.

이 방법을 적용하여 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차 직선성을 평가한 산업체의 경우 권선비에 의한 비오차의 이론값이 +0.503% 및 -0.498%에서는 이론값과 측정값이 0.002% 이내에서 일치하기 때문에 보정할 필요가 없으나, 권선비에 의한 비오차의 이론값이 +1.010%와 -0.990%인 경우는 모두 양의 방향으로(왼방향) 각각 +0.006%와 +0.011% 만큼 보정해야 한다. 또 권선비에 의한 비오차의 이론값이 2.996%와 -3.013%인 경우도 모두 양의 방향으로(왼방향) 각각 +0.036%와 +0.027% 만큼 보정해야 한다.

결론적으로 본 연구에서 개발된 wide ratio error VT 방식에 의한 계기용 변성기 비교 측정 장치의 비오차의 직선성 평가기술은 이동이 용이한 wide ratio error VT를 산업체로 이동하여 현장에서 측정 장치의 직선성을 평가할 수 있는 장점이 있기 때문에 향후 산업체에서 많이 활용될 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

[1] 정재갑, 권성원, 김규태, 김명수, "외부부담이 전압변성

기의 비오차와 위상각오차에 미치는 영향에 대한 연구" 대한전기학회지, vol. 53C, No. 3, pp 137-142, 2004.

[2] 계기용 변성기, KSC 1706.
 [3] 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, vol. 79, No. 51, pp. 1213-1218, 1961.
 [4] IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, American National Standards Institute, ANSI/IEEE vol. C57, No. 13, pp. 45-46, 1978.

부 록

식 (2)를 다시 쓰면

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{n_1}{n_2} + \delta \quad \text{혹은} \quad V_p = V_s \left(\frac{n_1}{n_2} + \delta \right) \quad (2)$$

이다. 전압변성기의 비오차(ratio error, RE)는 아래와 같이 정의된다.

$$RE \equiv 100 \cdot \left[\frac{(NV_s - V_p)}{V_p} \right] [\%] \quad (3)$$

여기서 N은 전압변성기의 정격 변환비 혹은 권선비(nominal ratio or turn ratio)이다. 식 (2)의 오른쪽 식을 이용하여 식 (3)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} RE &\equiv 100 \cdot \left(\frac{N - \frac{n_1}{n_2} - \delta}{\frac{n_1}{n_2} + \delta} \right) = 100 \cdot \left(\frac{N \frac{n_2}{n_1} - 1 - \delta \frac{n_2}{n_1}}{1 + \delta \frac{n_2}{n_1}} \right) \\ &= 100 \cdot \left(N \frac{n_2}{n_1} - 1 - \delta \frac{n_2}{n_1} \right) \left(1 - \delta \frac{n_2}{n_1} + \dots \right) \\ &= 100 \cdot \left(N \frac{n_2}{n_1} - 1 - N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} + \dots \right) \\ &\cong 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right) + 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \\ &= \epsilon_t + \epsilon_s \quad [\%] \quad (4) \end{aligned}$$

식 (4)에서 우변의 첫 번째 항은 권선비에 의한 비오차이고 두 번째 항은 자체 비오차로서 각각 아래와 같다.

권선비에 의한 비오차 : $\epsilon_t = 100 \cdot \left(\frac{Nn_2 - n_1}{n_1} \right)$ (5)

자체 비오차 :

$\epsilon_s = 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} + \delta^2 \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) \cong 100 \cdot \left(-N\delta \frac{n_2^2}{n_1^2} \right)$ (6)

이다. 식 (6)의 수식 전개에서 $\left(\delta \frac{n_2}{n_1} \right)$ 의 2차항 이상은 크기가 수 10⁻⁶ 이하이므로 무시 가능하다.

저 자 소 개



정재갑 (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



박영태 (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



권성원 (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



김명수 (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



김한준 (金漢俊)

1959년 1월 10일생.

1984년 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사).

2004 현재: 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

1987~2004 현재: 한국표준과학연구원 전자기표준부 전기자기그룹 선임연구원

Tel : 042-868-5283, Fax : 042-868-5018

E-mail : hanjun@kriss.re.kr