

부분 방전 신호의 위치 추정

(Estimating the Location of Partial Discharge Signals)

유치형* · 정찬수** · 김재철***

(Chi-Hyung Yoo · Chan-Soo Chung · Jae-Chul Kim)

요 약

전력계통의 고 신뢰도 운전을 위하여 전력용 변압기의 예방진단기법은 매우 중요하다. 그리고, 특히, 경제적 관점에서 운전중인 변압기의 예방진단이 요구된다. 이와 관련하여 외국에서는 부분방전 음향위치 측정법에 대한 연구가 1960년대에 본격적으로 시작되어 관련이론에 대한 연구가 계속되었고 국내에서는 변압기내의 부분방전 위치측정법으로서 부분방전시 발생하는 전기신호와 초음파신호를 검출하여 부분방전의 위치를 결정하는 전기-초음파 측정법과 발생하는 초음파신호를 두 개의 초음파 센서로 측정하여 부분방전의 위치를 결정하는 초음파-초음파 측정법이 연구되었다. 또 이 초음파-초음파 측정법에 의하여 1차원과 2차원 및 3차원에서 부분방전 위치를 도식적으로 결정하는 방법이 제시되었다. 앞에서 제시한 방법들은 부분방전의 위치를 추정할때 부분방전 신호원이 한 개라고 가정하였다. 그러나 실제로 부분방전 신호원의 수가 다수일 수 있으므로 본 논문에서는 초음파-초음파 측정법을 이용하여 다수 신호원의 위치를 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

Abstract

Preventive diagnosis technique of power transforms is very important for highly reliable operation of power systems, and especially that of online transformer is needed in view of economy. Acoustic methods for partial discharge points have been studied abroad since 1960's in earnest. Electric-ultrasonic locating method by which partial discharges are found through detecting the electric and ultrasonic signal generated in partial discharge and ultrasonic-ultrasonic locating method by which partial discharges are found through detecting two ultrasonic signal with two ultrasonic sensor have been researched in our country. By using this ultrasonic-ultrasonic locating method, it was proposed of graphical determination technique of partial discharge points one dimension, two dimension, three dimension.

But in locating partial discharges, they have assumed that the number of signal origin is one. So in this

*정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정

접수일자 : 1997. 6. 18

**정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수

study we suggests a method of locating and knowing the number of signal origins when there are several origins by using ultrasonic-ultrasonic method.

1. 서 론

경제발전과 생활수준 향상에 따른 전기에너지의 수요는 날로 증가하고 있다. 따라서 전기에너지의 원활한 공급을 위한 전력설비의 증설은 불가피 하게 되어 대용량화되고 있다. 전력설비의 대용량화에 따라 사고 발생시 과급효과가 매우 크기 때문에 사고 예방의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 전력기기 중의 하나인 변압기의 주요 사고 원인은 사용전압이 154[kV]인 경우에 절연사고가 차지하는 비율은 40 [%]정도이며 사용전압이 345[kV]인 경우에는 절연사고가 60 [%]정도에 이르고 있다. 765[kV]로 승압공사가 이루어지면 절연사고는 더욱 증가할 것이므로 절연사고 예방의 필요성이 요구되고 있다. 변압기의 내부 이상을 예방하는 방법으로는 절연유 의 가스를 분석하는 방법과 변압기의 중대한 사고원 인인 부분방전신호검출법이 있다.

절연유의 가스분석은 절연상태의 열화현상에 따른 시간지연이 클 뿐아니라 많은 측정자료를 축적하여 판단하기 때문에 On-line 감시가 불가능하다. 그러나 부분방전검출법은 시간지연이 없고 측정자료의 축적 이 필요 없을 뿐만 아니라 On-line 감시가 용이하기 때문에 변압기 내부이상 여부의 진단방법으로 많이 연구되고 있다.

부분방전검출법은 부분방전시 발생하는 전기신호 와 초음파신호의 측정으로 진단하기 때문에 미소신 호 측정 및 처리기술이 요구되고 있다.

부분방전에 의한 초음파신호를 검출하여 변압기를 진단하기 위해서는 초음파 신호의 크기만으로 부분 방전의 크기를 추정하기는 곤란하므로 기준 레벨이 상의 초음파신호의 수를 계수하여 초음파신호 수의 시간적 변화 상태로 변압기 내부 부분방전의 변화상 태를 추정하여 부분방전에 의한 사고를 예지할 수 있는 연구가 되었다[1]. 기준레벨이상의 신호수가 증가하게 되면 고장징후가 있다고 판단한 후 측정된 부분방전 신호의 신뢰성을 제고하고 절연열화의 위

치추정으로 수리시간 단축 및 수리경비 절감을 위하 여 부분방전 신호원의 위치를 추정하는 연구가 진행 되었다. 위치를 추정하는 방법으로 전기초음파 측정 법[2~4]과 초음파-초음파 측정법[5~8]이 있다.

기존의 PD 위치추정기법은 변압기 내부에 PD신 호가 한곳에서 발생한다고 가정하고 PD신호가 탐측 자까지 도달하는 시간을 측정하여 시간차이는 곧 거 리차이를 의미하므로 이를 이용하여 위치를 추정하 였으며 시간차이를 추정할 때 정확도를 개선하기 위 하여 상호상관 함수를 이용하기도 했다. 기존의 방 법으로는 부분방전 신호원의 수가 2개 이상인 경우 에는 추정이 불가능하였다. 그러므로 다수개의 부분 방전 신호원이 있는 경우에 대하여 대책이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 DOA(Direction of Arrival) 알고리즘[9, 10]을 이용하여 다수개의 부 분방전신호원의 수와 위치를 추정하는 방법을 제시 하고자 한다.

2. 센서에서 측정된 신호의 모형화

그림 1처럼 변압기 외벽에 부착된 P개의 센서위 치를 $Z_1, Z_2 \dots Z_p$ 라하면 m번째 센서의 위치 $Z = [Z_m(1), Z_m(2), Z_m(3)]^T$ 가 된다. $Z_m(1), Z_m(2), Z_m(3)$ 는 각각 x, y, z 좌표값이다. P개의 센서에 유입되는 부 분방전신호는 식(1)처럼 모형화 할 수 있다.

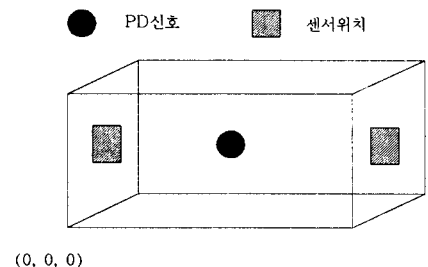


그림 1. 초음파 센서 위치
Fig. 1. Position of ultrasonic sensor.

$$X_{ideal}(t) = \begin{bmatrix} f(t-\tau_1(\theta)) \\ f(t-\tau_2(\theta)) \\ \vdots \\ f(t-\tau_p(\theta)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서 $f(t-\tau(\theta))$ 는 p 번째의 센서에 유입된 신호를 나타내며 $f(t)$ 는 부분방전 신호원을 나타내고 $\tau_p(\theta)$ 는 부분방전 신호원이 센서에 도착하는데 걸리는 시간차를 반영한 것으로 DOA 문제를 해결하는데 중요한 요소가 된다. $\tau_p(\theta)$ 는 식(2)처럼 표현한다.

$$\tau_p(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{c} [Z_d(1)\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) + Z_p(2)\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)] \quad (2)$$

식(2)에서 θ_1, θ_2 는 부분방전 신호원의 방위각과 고도각을 나타내며, c 는 전파속도를 나타낸다. 즉, 센서에 부분방전 신호원이 센서에 도착하는데 걸리는 시간은 방위각과 고도각 등으로 결정된다. 그러므로 방위각과 고도각을 알고 시간차를 반영한 $\tau_p(\theta)$ 를 구하면 신호원의 위치를 찾을 수 있다.

$f(t)$ 를 정태과정이라 하고 식(2)를 푸리에 변환을 하면 식(3)처럼 표현한다.

$$X_{ideal}(\omega) = f(\omega)s(\omega, \theta) \quad (3)$$

식(3)에서 $s(\omega, \theta)$ 는 식(4)처럼 $p \times 1$ 벡터로 표현한다.

$$s(\omega, \theta) = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_1(\theta)} \\ \vdots \\ e^{-j\omega\tau_p(\theta)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

센서에 유입되는 잡음이 없고 부분방전 신호원이 식(3)처럼 표현되면 신호원이 여러개이고 센서에 잡음이 유입되면 식(5)처럼 표현한다.

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \sum_{n=1}^q f_n(\omega)s_n(\omega, \theta_n) + \eta(\omega) \\ &= S(\omega, \theta_c)f(\omega) + \eta(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 q 는 부분 방전 신호원의 수이며 $q \times 1$ 벡터 $f(\omega)$ 는 신호원의 푸리에 변환이고 $\eta(\omega)$ 는 잡음 벡

터이다.

$p \times q$ 합성조정벡터(composite steering matrix) $S(\omega, \theta_c)$ 는 각각의 신호원에 관계된 조정 벡터의 열로 표현된다.

$$S(\omega, \theta_c) = [s_1(\omega, \theta_1) : \dots : s_q(\omega, \theta_q)] \quad (6)$$

합성조정벡터 $S(\omega, \theta_c)$ 행렬이 비특이행렬이라 가정하면 모형 오차 벡터는 식(7a)처럼 표현된다.

$$\epsilon(\theta_c, \omega, f(\omega)) = X(\omega) - S(\omega, \theta_c)f(\omega) \quad (7a)$$

식(7a)에 식(5)를 대입하고 정리하면 식(7b)로 표현된다[9].

$$\begin{aligned} \epsilon_m(\theta_c, \omega, f(\omega)) &= [I - S(\omega, \theta_c)S(\omega, \theta_c)]^+ \\ &\quad \cdot C_r(\omega)e_m(\omega) \end{aligned} \quad (7b)$$

결과적으로 신호원의 수와 위치를 찾는 문제는 식(7b)이 최소가 되도록 합성조정벡터를 구성하는 θ_c 값을 찾는 문제가 된다.

3. APSD (Array Power Spectral Density) 행렬 구성

합성조정벡터를 구성하는 θ_c 를 구하기 위하여 센서에 유입된 신호를 가지고 APSD행렬 $C_x(w_k)$ 를 구성한다.

센서에 유입된 부분방전 신호를 샘플링한 개수를 L 이라하고 L 을 Q 등분하였을 때 샘플링 개수를 N 이라 하면 $C_x(w_k)$ 는 식(8)처럼 표현된다[9].

$$\begin{aligned} C_x(w_k) &= \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q X^{(i)}(w_k)X^{(i)}(w_k)^* \\ w_k &= \frac{2\pi k}{N} \quad (0 \leq k \leq N) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 $X^{(i)}(w_k)$ 는 식(9)처럼 표현된다.

$$X^{(i)}(w_k) = [x_1^{(i)}(w_k), x_2^{(i)}(w_k), \dots, x_p^{(i)}(w_k)]^T \quad (9)$$

식(9)에서 $x_m^{(i)}$ 는 식(10)처럼 표현된다.

$$x_m^{(i)}(n\Delta) = x_m(n\Delta + [i-1]N\Delta)$$

$$(1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq p, 1 \leq n \leq N) \quad (10)$$

식(8)로 표현한 $C_x(w_k)$ 를 이용하여 합성조정 벡터를 구성하는 θ_c 를 구하게 되는데 $C_x(w_k)$ 를 양정치행렬이라 가정하여 고유값을 구하고 식(11)처럼 순서를 정할 수 있다.

$$\lambda_m(w_k) \geq \lambda_{m+1}(w_k) \geq \dots \geq 0 \quad (11)$$

이때 λ_{i+1} 이 λ_i 보다 급격히 작아지면 신호원의 수 q 는 $q=i$ 라 할 수 있다[9].

4. 경사 알고리즘

식(7)을 최소화하는 최적해를 구하기 위해서 경사 알고리즘의 하나인 MGN(Modified Gauss-Newton)[10]을 사용한다. Perturbation 벡터 δ 를 구하여 최적해가 되도록

록 θ_c 를 $\theta_c + \delta$ 로 갱신한다. 이때 식(7)의 시스템 형 오차는 식(12)처럼 수정된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_m(w_k, \theta_c + \delta) = & [I - S(w_k, \theta_c + \delta)S(w_k, \theta_c)^+] \\ & \cdot C_r(w_k)e_m(w_k) \end{aligned} \quad (12)$$

$[S(w_k, \theta_c + \delta)S(w_k, \theta_c)^+]C_r(w_k)e_m(w_k)$ 는 $\{S(w_k, \theta_c + \delta)\}$ 의 공간상에 놓이는 $C_r(w_k)e_m(w_k)$ 의 근사화 표현이 된다.

$S(w_k, \theta_c + \delta)$ 대신에 $S(w_k, \theta_c)^+$ 를 사용하는 이유는 복잡해지는 문제를 단순화하기 위한 것이다. Perturbation 벡터 δ 를 찾기 위해서 식(12)으로 표현되는 모형오차의 제곱값인 식(13)을 최소화하도록 결정하면 된다.

$$\begin{aligned} C(\theta_c, \delta) = & \sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^{\Gamma_k} \mu_{km} \epsilon_m(w_k, \theta_c + \delta)^* \\ & \cdot \epsilon_m(w_k, \theta_c + \delta) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)을 최소화하는 δ 는 식(14)로 표현되는 선형방정식을 만족하도록 구하면 된다.

$$A(\theta_c)\delta = a(\theta_c) \quad (14)$$

이때, $qt \times qt$ 행렬 A 는 식(16)으로, $qt \times 1$ 행렬 $a(\theta_c)$ 는 식(15)로 결정된다.

$$a(\theta_c) = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^{\Gamma_k} \mu_{km} C_m(w_k, \theta_c)^* \cdot \epsilon_m(w_k) \right] \quad (15)$$

$$A(\theta_c) = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^s \sum_{m=1}^{\Gamma_k} \mu_{km} C_m(w_k, \theta_c)^* C_m(w_k, \theta_c) \right] \quad (16)$$

식(15)와 (16)에서

$$\begin{aligned} C_m(w_k, \theta_c) = & [y(w_k, \theta)L(w_k, \theta) : \\ & \dots y_q(w_k, \theta)L(w_k, \theta_q)] \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)에서

$$y_n(w, \theta) = S^+(w_k, \theta)C_r(w_k)e_m(w_k)$$

$L(w_k, \theta)$ 는 식 (18)와 같다.

$$L(w_k, \theta) = \begin{bmatrix} h'(w_k, z_1, \theta) \\ \vdots \\ h'(w_k, z_p, \theta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (19)에서 $h'(w_k, z_m, \theta)$ 는 식 (19)과 같다.

$$\begin{aligned} h'(w_k, z_m, \theta) = & j \frac{1}{c} e^{-j\omega r_m(\theta)} \\ & \cdot \begin{bmatrix} Z_m(1)\sin(\theta_1)\cos(\theta_2) - Z_m(2)\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) \\ Z_m(1)\cos(\theta_1)\sin(\theta_2) + Z_m(2)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

식(14)에서 구해진 perturbation 벡터 DOA의 초기값에서 실제값으로 오차를 줄여 가는데 사용된다. 빠르게 수렴하기 위해서는 진행방향상에서 최적의 간격을 결정하는게 필요하다. 즉, $C(\theta + \alpha\delta)$ 을 최소화하는 스텝크기 α 를 결정하는 것이 필요하다. δ 을 계산하고 스텝 크기 α 를 결정하여 새로운 파라미터 갱신은 식 (20)에 의해서 한다.

$$\theta_c^{new} = \theta_c^{old} + \alpha\delta \quad (20)$$

위 과정을 반복하여 진행하면 θ_c 의 값은 식(7b)을 최소화하는 최적의 값으로 수렴하게 된다.

5. 모의실험 결과

모의 실험은 그림 2처럼 평면이라 가정하고 센서의 위치를 정하였다.

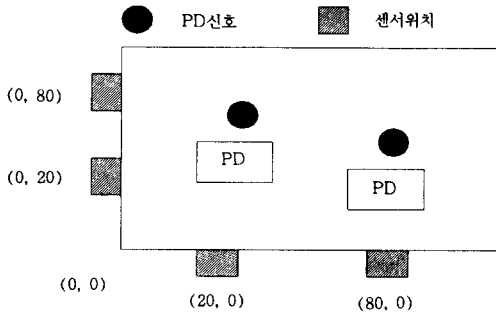


그림 1. 센서 위치
Fig. 1. Position of Sensor.

부분방전 신호원은 일반적으로 중심주파수가 200 [kHz]이고 대역폭이 50[kHz]인 초음파 신호이므로 모의 실험시 부분방전신호에 가까운 것을 사용했으며, 신호원의 특성은 평면파로 가정했다. 부분방전 신호원이 한 개 일때와 두 개일때를 분류하여 모의 실험하였다.

신호원이 한 개일때는 방위각은 20°, 두 개일때는 20°, 23°에서 발생시켰을 때 신호원의 수와 위치를 찾아보았다. 센서에 유입되는 잡음은 가우시안 백색 잡음(Gaussian White Noise) 이라 간주하고 SNR (Signal to Noise Rate)은 5[dB], 10[dB], 15 [dB], 20[dB]인 경우에 모의실험을 하였다. 각 센서에서 측정된 신호인 샘플링 주파수를 2500(kHz)로하여 128개의 샘플데이터를 이용하였다.

경우 1. 신호원이 한 개일 경우.

이 경우는 변압기 내부에서 발생하는 부분방전신호원이 한 개라 가정했을 때 신호원의 수와 위치를 찾기 위하여 모의실험한 것이다. 표1은 참값을 추정했을 때 SNR에 대한 평균과 표준편차이고 그림 3은 참값을 추정했을 때 평균자승오차이다.

경우 2. coherency인 두 개의 신호

$$(f_1(t) = f_2(t))$$

두 부분 방전 신호원이 완전히 coherency되도록 발생시켜 모의실험한 것으로 그림 4는 방위각을 추정했을 때 평균자승 오차이고 표 2는 각 SNR에 대하여 평균과 표준편차를 구한 것이다.

표 1. 신호원이 한 개일때 평균, 표준편차

Table 1. Mean, Standard deviation of Single Source.

SNR[dB]	20°
5	19.981 ± 0.026
10	20.124 ± 0.022
15	19.975 ± 0.021
20	19.987 ± 0.012

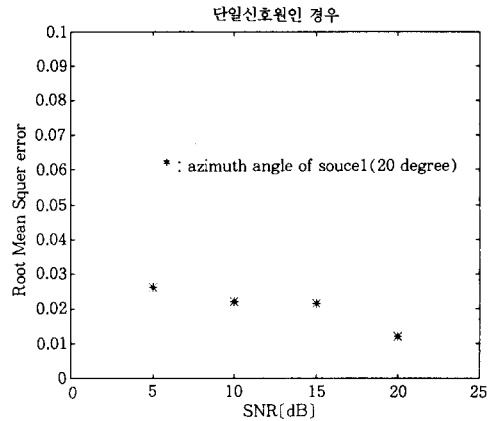


그림 3. 단일신호원인 경우 평균자승 오차

Fig. 3. Root Mean Square Error of Single Source Case.

표 2. 두 신호원이 coherency된 경우 평균, 표준편차

Table 2. Mean, Standard deviation in case that two Source is coherent.

SNR [dB]	20°	23°
5	19.990 ± 0.026	22.938 ± 0.055
10	20.321 ± 0.026	23.014 ± 0.045
15	19.965 ± 0.010	22.938 ± 0.015
20	19.953 ± 0.007	22.994 ± 0.001

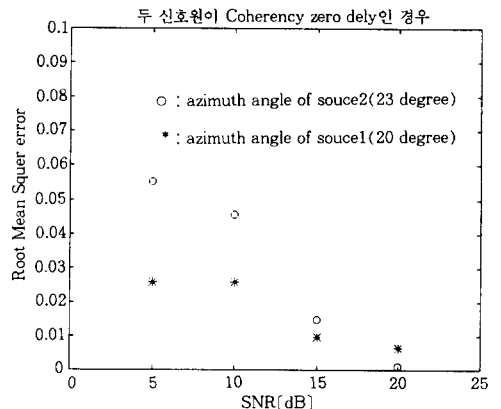


그림 4. 두신호원이 coherency된 경우 평균자승오차

Fig. 4. Root Mean Square Error in Case that Two Source is Coherent.

6. 결 론

전력 설비의 용량 증대로 사고시 과급효과가 클 뿐 아니라 사용전압이 높아짐에 따라 절연사고의 비율은 증가하게 되므로 절연사고의 예방진단 필요성이 증대하고 있다. 부분방전신호의 위치추정은 부분방전에 의한 예방진단 신뢰성을 높힐 뿐만 아니라 수리시간 단축 및 경비의 절감을 할 수 있다. 이전 연구에서는 부분방전 신호원이 한 개라고 가정하고 위치를 추정하였는데, 현실적으로는 다수의 신호원이 존재하기 때문에 유용한 활용을 기대할 수 없었다. 그러나, 본 논문에서는 신호원이 한 개뿐만 아니라 다수일 경우에도 모든 부분방전 신호원의 위치추정이 가능하였다. 또한, 신호원의 위치가 근접되었을 경우에 위치추정 오차가 다소 있었으나, 근접되지 않았을 경우에는 위치를 정확히 추정하였다. 하지만, 근접시의 추정오차는 실용성을 확보하는데는 문제가 없다.

본 논문은 다수개 신호원의 위치를 추정할 수 있으므로 유용한 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예비 진단에 관한 연구" 송실대학교 석사학위논문, 1995년 6월.
- [2] 곽희로 외, "Rowgoski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계학술대회논문집, 1990년 7월.
- [3] 곽희로 외, "전력기기 예방진단 기술연구(관리과제)", 한국전력 기술연구원, 1991년 3월.
- [4] 곽희로, 김재철, 조국희, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치검출", Journal of the Institute of Basic Science and the Industrial Technology Reserch Institute, Soongsil University, Vol 19, 1989.
- [5] 곽희로 외, "상호상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치추정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992년 7월.
- [6] 정완섭 외, "유입변압기내 부분방전 위치추정", 대한전기학회논문지, 제41권, 11호, pp.1316-1323, 1992년, 11월.
- [7] 문영재, "상호 상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치추정", 송실대학교 석사학위논문, 1993년 2월.
- [8] 전력기기 예방진단 기술연구, 한국전력기술연구원.

1991년 3월.

- [9] J.A.Cadzow, "Multiple Source Location-The Signal Subspace Approach", IEEE Trans. on ASSP, Vol. ASSP-38, pp. 1110-1125, July 1990.
- [10] D.G.Luenberger, Introduction to Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, 1973.

◇ 著 者 紹 介 ◇



유 치 형(柳治馨)

1966년 10월 1일생. 1988년 송실대 공대 전기공학과 졸. 1991년 송실대 전기공학과 대학원 졸(석사). 1997년 송실대 전기공학과 대학원 박사과정 수료. 현재 송실대학교 전자계산원 전임강사.



정 찬 수(鄭謙壽)

1949년 8월 10일생. 1972년 서울대 전기공학과 졸. 1980년 서울대 대학원 전기공학과졸(석사). 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 송실대 전기공학과 교수.



김 재 철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대 공대 전기공학과 졸. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 송실대 공대 전기공학과 교수, 전기공학과 학과장.