Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.2, pp. 64~70 February 2007 논문 21-2-10

다중 분산부하 전압강하산정 프로그램

(A Voltage Drops Computation Program on Multi-Distributed Random Loads)

강차녕* · 권세혁 · 조성필
(Cha-Nyeong Kang · Sae-Hyuk Kwon · Sung-Pil Cho)

요 약

전기배선에서 전압강하의 발생을 피할 수는 없다. 전기배선에서 발생되는 전압강하는 열 손실을 의미한다. 이 열은 절연체의 특성을 변화시키게 되고 이로 인하여 절연성능을 저하시키게 되며 나아가 누전, 감전, 정전 및 화재 등의 사고를 일으키는 원인이 되기도 한다.

그러므로 전기배선의 설계시에 전압강하에 대한 최적화 설계는 안전성, 경제성을 결정하는 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 저압의 전기설비인 가로등, 빌딩, 지하철역사 등 공공의 안전확보가 최우선 요구되는 다중 분산부하계통에서의 전압강하가 전기배선에 미치는 영향을 분석하고, 안전성 및 경제성 제고를 위한 전압강하 최적화 방안 및 설계 프로그램 개발을 하였다.

Abstract

A voltage drop in the electrical circuit must be unavoidable. The voltage drop in the electrical circuit means a loss of heat. The heat lost would change the characteristics of the insulator and thus, the insulating performance would be lowered, resulting in electric leakage, electric shock, power failure, fire and other accidents.

Hence, an optimized design against the voltage drop in the electrical circuit must be an important factor determining safety and economy of electrical facilities.

This study analyzed the effects of voltage drop on the electrical circuits for such low-voltage electrical facilities requiring the public safety foremost and subject to multi-distributed random loads as street lamps, buildings and subway stations, and thereupon, developed an optimized voltage drop computation program to enhance safety and economy of those electrical facilities.

Key Words : Voltage drops, Multi-distributed random loads, K formula, Voltage drops computation program

1. 서 론

전기배선은 안전성, 경제성, 시공성 확보가 요구되며, 안전성은 무엇보다 중요시 되고 있다.

한국전기안전공사의 2003년 전기재해조사보고서

* 주저자 : 고려대학교 일반대학원 박사과정/대한주택공사 차장
Tel : 031-250-8349, Fax : 031-253-1481
E-mail : kL610660@empal.com
접수일자 : 2006년 10월 19일
1차심사 : 2006년 10월 27일
심사완료 : 2006년 11월 13일

에 따르면 전기재해 사고 중 저압설비의 사고는 총 321건이고 이 중 91건이 전기배선 사고로 약 29[%]로 전기배선의 안전성 확보가 매우 중요함을 알 수 있다.

전기배선은 기계적강도, 허용전류, 전압강하 등의 요소를 감안하고 안전성과 경제성을 고려하여 선정하게 된다. 이러한 요소들 중 전압강하는 전선의 열 누적을 초래하는 요소로써, 절연체의 특성을 변화시켜 절연성능을 저하시키며 나아가 누전, 감전, 정전 및 화재 등의 사고를 일으키는 원인이 되기도 한다. 따라서 전기배선에서 전압강하의 최적화 설계는 안전성 확보와 경제성을 결정하는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 다중분산부하 전기설비를 중심으로 전압강하가 전기배선에 미치는 영향을 검토하고 전압강하 최적화 설계방안 및 설계프로그램을 개발하였다.

2. 본 론

일반적인 전기설비에 있어 부하단의 전압은 전원측 전압보다 낮다. 이는 전원측으로 부터 부하말단에 이르는 배선의 임피던스에 의해 전압이 낮아지는 것이다. 이를 전압강하라 한다.

전기배선의 전압강하가 작은 것이 좋겠지만 안전성, 경제성을 고려하여 허용전압강하를 규정하고 있다.

본 연구에서는 저압의 전기설비인 가로등, 빌딩, 지하철역사 등 공공의 안전확보가 최우선 요구되는 다중 분산부하계통에서의 전압강하가 전기배선에 미치는 영향을 분석하고, 안전성 및 경제성 제고를 위한 전압강하 최적화 방안 및 설계프로그램을 개발하고자 한다.

2.1 허용 전압강하

2.1.1 전기사업법 제18조

전기사업법 제18조 및 동법시행규칙 제18조 별표 3에서 전기사업자는 표준전압을 유지하도록 하고 있다.

표 1. 표준전압 및 허용오차
Table 1. Standard Voltage and Tolerances

표준전압	허 용 오 차
110볼트	110볼트의 상하로6볼트 이내
220볼트	220볼트의 상하로 13볼트 이내
380볼트	380볼트의 상하로 38볼트 이내

2.1.2 내선규정 120-1절

1. 저압배선중의 전압강하는 간선 및 분기회로에서 각각 표준전압의 2[%]이하로 하는 것을 원칙으로 하고 있다. 다만 전기사용장소안에 시설한 변압기에 의하여 공급되는 경우 간선의 전압강하는 3[%]이하로 할 수 있다.
2. 공급변압기 2차측 단자(전기사업자로부터 전기의 공급을 받고 있는 경우에는 인입접속점)에서 최원단의 부하에 이르는 전선의 길이가 60[m]를 초과하는 경우의 전압강하는 전항에 관계없이 부하전류로 계산하며 표 2에 따를 수 있다.

표 2. 전선길이 60[m]를 초과하는 경우의 전압강하
Table 2. Voltage Drop in Case te Cable Length Exceeds 60[m]

공급변압기 2차측 단자 또는 인입접속점에서 최원단의 부하에 이르는 사이의 길이(m)	전압강하 허용범위	
	사용장소 안에 시설한 전용변압기에서 공급하는 경우	전기사업자로부터 저압으로 전기를 공급받는 경우
120 이하	5[%] 이하	4[%] 이하
200 이하	6[%] 이하	5[%] 이하
200 초과	7[%] 이하	6[%] 이하

2.1.2 허용 전압강하 결정

(1) 부하의 기기를 손상하지 않는 범위내일 것
(2) 부하단자 전압의 변동폭이 적을 것
(3) 각 부하의 단자전압이 균일할 것
(4) 배선중의 전력손실이 적을 것
(5) 경제적일 것

2.2 전압강하가 전기설비에 미치는 영향

2.2.1 백열전구의 전압특성

전구에 인가되는 전압을 변화시키면 필라멘트의 온도가 변하고, 전류, 전력, 광속,효율, 수명 등은 전압의 변화에 따라서 지수 함수적으로 변화하게 된다.

$$\frac{l}{L}=(\frac{F}{f})^{3.85}=(\frac{V}{v})^{13.5}$$

여기서, 전구의 정상값 L : 수명, F : 광속,
V : 전압(변동값 l, f, v)

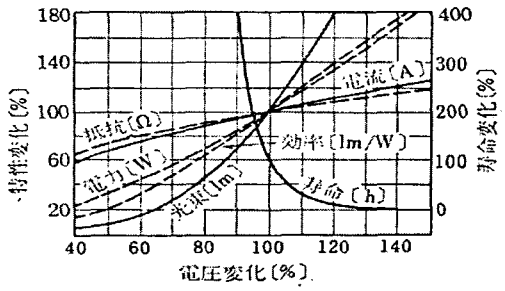

그림 1. 전구의 전압변화에 의한 특성, 수명변화
Fig. 1. Features and Changed Life of the Bulbs Depending on Voltage Changes

2.2.2 유도전동기 토오크-전압특성

유도전동기는 전압의 제곱에 비례하여 토오크가 변화하는 특성을 갖고 있다.

(1) 토오크 특성

$$T\propto V_1^2,\quad T\propto T(\frac{V_1'}{V_1})^2$$

(2) 3상유도전동기 최대토오크 특성

$$\tau_m=KoE_2^2\frac{1}{2x_2}$$

(3) 3상유도전동기 기동토오크 특성

$$T_{st}=\frac{P}{2xf}\frac{m_1V_1^2r_{2'}}{(r_1+r_{2'})^2+(x_1+x_{2'})^2}$$

2.3 단일부하 전압강하

2.3.1 직류 2선식

직류 2선식에서 전압강하는 송전단전압과 수전단전압의 차이로써 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$e=V_s-V_r=2IR,\quad \varepsilon=\frac{V_s-V_r}{Vr}\times100$$

여기서, Vs : 송전단전압, Vr : 수전단전압
R : 전선 1선당의 저항, I : 전류

2.3.2 교류 단상 2선식

교류 2선식에서의 전압강하는 그림 2의 등가회로에서 표현되는 바와 같이 송전단전압과 수전단전압의 차이로써 다음식으로 나타낼 수 있다.

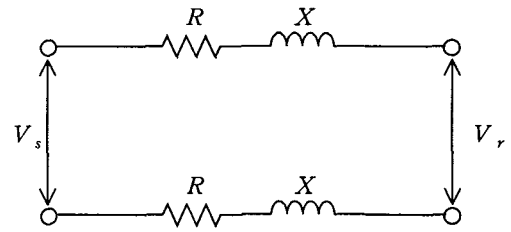

그림 2. 교류 단상 2선식 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Alternating Current Single Phase Bi-Cable

· 전압강하 $e_1=V_s-V_r=2I(Rcos\theta+Xsin\theta)$

· 전압강하율 $\varepsilon_1=\frac{V_s-V_r}{Vr}\times100$

$=\frac{2I(Rcos\theta+Xsin\theta)}{Vr}\times100$

여기서, cosθ : 역률, R : 1선당 저항,
X : 1선당의 리액턴스

2.3.3 교류 3상3선식

교류 3상3선식에서의 전압강하는 송전단전압과 수전단전압의 차이로써 다음식으로 나타낼 수 있다.

· 전압강하 $e_3=V_s-V_r=\sqrt{3}I(Rcos\theta+Xsin\theta)$

· 전압강하율 $\varepsilon_3 = \frac{V_s - V_r}{Vr} \times 100$

$= \frac{\sqrt{3}I(R\cos\theta + X\sin\theta)}{Vr} \times 100$

여기서, cosθ : 역률, R : 1선당 저항,
X : 1선당의 리액턴스

2.3.4 저항만을 고려한 경우

교류 회로에서의 전압강하는 저항과 리액턴스, 역률을 고려하여야 하지만, 선로의 저항만 고려한다면 (역률=1) 전압강하 및 전선단면적은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

(1) 교류 단상 2선식 및 직류방식

$e = 2IR = 2I\rho\frac{L}{A}$

$= \frac{LI}{A} \times 2 \times \frac{1}{58} \times \frac{100}{97} = 0.035549 \times \frac{LI}{A}$

$= \frac{35.6LI}{1000A}$, $A = \frac{35.6LI}{1000e}$

(2) 교류 3상3선식

$e = \sqrt{3}IR = \sqrt{3}I\rho\frac{L}{A}$

$= \sqrt{3} \times \frac{LI}{A} \times \frac{1}{58} \times \frac{100}{97} = \sqrt{3} \times 0.017775 \times \frac{LI}{A}$

$= \frac{30.8LI}{1000A}$, $A = \frac{30.8LI}{1000e}$

(3) 교류 단상 3선식, 3상4선식, 직류 3선식

$e' = IR = I\rho\frac{L}{A}$

$= \frac{LI}{A} \times \frac{1}{58} \times \frac{100}{97} = 0.017775 \times \frac{LI}{A}$

$= \frac{17.8LI}{1000A}$, $A = \frac{17.8LI}{1000e}$

여기서, e : 각 선간의 저압강하[V]
e′ : 외측선 또는 각 상의 1선과 중성선 사이의 전압강하[V]
A : 전선의 단면적[㎟]
L : 전선 1본의 길이[m]
I : 전류

이때 직류 3선식, 교류 단상 3선식, 3상4선식에 대한 계산식은 각 선전류는 평행으로 가정하고, 고유저항 $\rho = \frac{1}{58}\frac{100}{\sigma}$, 각 전선의 도전율 σ = 97[%]라 한다.

위 식에 의해 산출된 값에 특성계수를 곱하여 계산할 수 있다. 이 특성계수는 전원주파수, 배선 상호간의 간격, 전선의 굵기와 관련이 있고 어느 것이나 커지면 특성계수의 값도 커지는 경향이 있다.

전선의 굵기를 계산하였을 때는 계산한 전선의 굵기에 대해서 허용전류를 조사한 후 부하의 최대사용전류 이상의 허용전류를 가지는가를 검토하여야 한다.

2.4 일반적인 다중 분산부하의 전압강하 계산

2.4.1 다중 분산부하

저압설비 중 가로등, 아파트, 공장, 지하철역사 전등설비 등은 다중분산분포 부하임을 알 수 있다. 이들 회로에서 전압강하 계산식을 살펴보자

2.4.2 직류 2선식

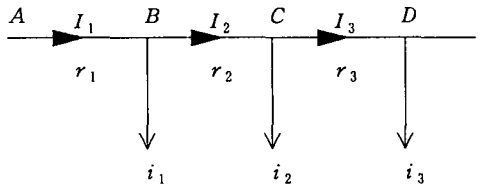

그림 3. 직류 2선식 분산부하 배선도
Fig. 3. Wiring Diagram on Distribution Random loads for Direct current Bi-Cable

$v = (i_1 + i_2 + i_3 \ldots\ldots + i_n)r_1 + (i_2 + i_3 \ldots\ldots + i_n)r_2$

$= i_1 r_1 + i_2(r_1 + i_2) + i_3(r_1 + r_2 + r_3) + \ldots\ldots$

$\ldots\ldots + i_n(r_1 + r_2 + r_3 + \ldots\ldots + r_n)$

$+ (i_3 \ldots\ldots + i_n)r_3 + \ldots\ldots + i_n r_n$

여기서 AB, BC, CD 각 구간의 왕복2선 저항을 r_1, r_2, r_3, 각 구간에 흐르는 전류를 I_1, I_2, I_3라 한다.

2.4.3 교류 단상 2선식

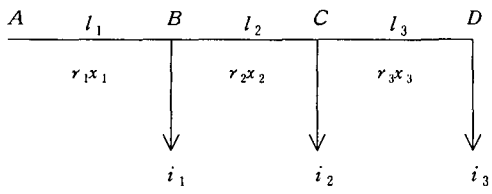

그림 4. 교류 단상 2선식 분산부하 배선도
Fig. 4. Wiring Diagram on Distribution Random loads for Alternating Current Single Phase Bi-Cable

$$v = r(l_1 i_1 c\theta_1 + l_2 i_2 c\theta_2 + l_3 i_3 c\theta_3) + x(l_1 i_1 s\theta_1 + l_2 i_2 s\theta_2 + l_3 i_3 s\theta_3)$$

2.4.4 일반적인 계산

(그림 4)와 같은 분산부하 회로에서

- 저압으로 공급받는 교류 단상 2선식 220[V]이고, 부하말단에 이르는 배선거리 합은 일반적으로 200미터를 초과하므로 전압강하는 6[%] 이하, 통상 인입선의 전압강하를 1[%](e=2[V]), 차단기로부터 각 부하말단에 이르는 배선(A점에서 D점의 말단까지)의 전압강하는 5[%](e=11[V])이하로 한다.
- 부하전류 및 각 구간거리는 조도에 따라 정해지므로, 부하전류를 각각 i_1=6[A], i_2=10[A], i_3=7[A], 구간거리를 l_1=35[m], l_2=29[m], l_3=34[m]라 한다.
- 부하의 역률을 1이라 한다.

이 회로에서 미지수인 전선단면적을 구할 수 있다. 여기서 총 전압강하가 주어졌으므로 개략 3구간의 전류비 또는 거리비로 전압강하를 정하고(11[V] ⇒ 6 : 10 : 7 또는 11[V] ⇒ 35 : 29 : 34) 각 구간별 단면적을 구하여 보면,

(1) 전류비에 의한 각 구간 단면적 산정

$$e_1 = e \times \frac{i_1}{\sum_{n=1}^{3} i_n} = 11 \times \frac{6}{(6+10+7)} = 2.9V$$

$$A_1 = \frac{35.6 L_1 I_1}{1000 e_1} = \frac{35.6 \times 35 \times 6}{1000 \times 2.9} = 2.6\text{㎟}$$

$\Rightarrow A_1'$(규격전선)=4㎟, $e_1' = 1.9V$

$e_2 = 4.8$, A_2'(규격전선)=2.5㎟, $e_2' = 4.1V$

$e_3 = 3.3$, A_3'(규격전선)=4㎟, $e_3' = 2.1V$

$e = e_1' + e_2' + e_3' = 1.9 + 4.1 + 2.1 = 8.1V$

(2) 거리비에 의한 각 구간 단면적 산정

$$e_1 = e \times \frac{l_1}{\sum_{n=1}^{3} l_n} = 11 \times \frac{35}{(35+29+34)} = 3.9$$

$$A_1 = \frac{35.6 L_1 I_1}{1000 e_1} = \frac{35.6 \times 35 \times 6}{1000 \times 3.9} = 1.9\text{㎟}$$

$\Rightarrow A_1'$(규격전선)=2.5㎟, $e_1' = 3.0V$

$e_2 = 3.3$, A_2'(규격전선)=4.0㎟, $e_2' = 2.6V$

$e_3 = 3.8$, A_3'(규격전선)=2.5㎟, $e_3' = 3.4V$

$e = e_1' + e_2' + e_3' = 3.0 + 2.6 + 3.4 = 9.0V$

2.5 K식에 의한 다중분산부하 전압강하 계산

앞서 2가지의 일반적인 적용방법으로 계산한 결과는 구간별 전압강하의 차이가 크게 발생됨을 알 수 있었다.

즉 특정구간에 전압강하가 집중되고 국부적인 절연체의 열 누적으로 절연성능저하는 물론 이로 인하여 사고를 초래할 위험이 있다.

따라서 전구간에서 단위체적당(1㎟) 전압강하가 균등하게 분포하도록 하면, 열 방산을 고르게 하게 되고 절연체의 국부적인 과열 또는 손상을 예방할 수 있음을 알 수 있다.

분산부하는 각 구간의 거리가 다르고, 분기회로의 부하 크기가 다르므로 총 허용전압강하를 구간의 거리와 전류의 곱에 비례하여 전압강하가 균등하게 분포되도록 전선규격을 선정하면 된다.

이때 계산된 단면적으로 규격전선을 선정하게 되면 전압강하분포가 다소 달라질 수 있으나, 각 구간별 전압강하를 미리 균등 분포하도록 가정하였으므로, 총 전압강하는 줄어들지만 경제적 부담이 증가되게 된다.

따라서 이들로부터 전 구간에서 단위면적당 전압강하의 균등 분산과 경제성 극대화를 위한 계산식을

다음과 같이 표현할 수 있을 것이다.

(1) 총 전압강하를 첫 번째 구간비(거리×전류)로 전압강하를 분배한다.

$$e_n = e \times \frac{l_n \times i_n}{\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j)}$$

(2) 첫 구간에서 산정된 전압강하로 단면적 산정 후 규격전선 선정한다.

$$A_1 = \frac{35.6 \times l_1 \times i_1}{1000 \times e \times \frac{l_n \times i_n}{\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j)}} \Rightarrow A$$

(3) 선정된 규격전선으로 전압강하를 산정한다.

$$e_n' = \frac{35.6 \times l_1 \times i_1}{1000 \times A \times \frac{l_n \times i_n}{\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j)}}$$

여기서, n : 해당구간, m : 말단구간, e : 총 전압강하, e′ : 직전구간까지의 전압강하의 합, en : 당해구간 전압강하, en′ : 규격전선 선정후 당해구간 전압강하, 첫구간 : 전원 공급측에서 첫 번째 구간

(4) 이후 구간부터는 총 전압강하에서 이전 구간까지의 전압강하 합을 뺀 나머지 허용전압강하를 ①~③과 같이 반복하여 말단구간까지 계산한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$e_n = (e - e') \times \frac{l_n \times i_n}{\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j) - \sum_{k=1}^{n}(l_{k-1} \times i_{k-1})}$$

$$A_n = \frac{35.6 \times l_n \times i_n}{1000 \times (e - e') \times \frac{l_n \times i_n}{\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j) - \sum_{k=1}^{n}(l_{k-1} \times i_{k-1})}}$$

$$= \frac{35.6 \times \sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j) - \sum_{k=1}^{n}(l_{k-1} \times i_{k-1})}{1000 \times (e - e')}$$

이 식을 K식(실용식)이라 약칭한다.

2.6 다중 분산부하 전압강하 계산 프로그램

앞서 살펴 본 바와 같이 다수의 분산부하에서 구간별 전압강하 및 전선의 단면적을 계산하기란 매우 복잡하다.

따라서 이 K식(실용식)을 적용하여 전압강하계산을 프로그램화하여 전기배선설계의 최적화는 물론 안전성, 경제성을 제고할 수 있을 것이다.

표 3. 다중 분산부하의 배선 전압강하 산정 예시
Table 3. An Example of Voltage Drops computation program on Multi-Distribution Random loads

Devision		18	No.1	No.2	No.18
Total		26	26	14	13
Input	NH400[W]	0			
	NH250[W]	26	12	1	1
	MH175[W]	0			
	Dist.([m])		15	30	34
output	I ([A])		15.6	1.3	1.3
	ΣIa ([A])	33.80	33.8	18.2	1.3
	$l_n \times i_n$		507	546	44.2
	$\sum_{j=1}^{m}(l_j \times i_j) - \sum_{k=1}^{n}(l_{k-1} \times i_{k-1})$		5,764	5,257	44.2
	A_n([㎟])		18.7	18.4	7.5
	A([㎟])		20.0	20.0	10.0
	e_n([V])	10.99	0.82	0.88	0.20
	A_n'([㎟])(조정후)		20.0	20.0	10.0
	e_n'([V])(조정후)	10.99	0.82	0.88	0.20
Pipe conduit		HI36	HI36	HI36	HI36

특히 본 프로그램을 가로등설비, 보안등설비, 공원등설비 등에서는 설계에 직접 활용하여 그 유용성이 입증되었다.

3. 결 론

다중 분산분포 부하에서의 전기배선설계를 위한 전압강하계산은 많은 시간이 소요되고, 다소 소홀히

취급되어 계산의 오류와 전압강하의 불균형 분포로 절연체의 열화를 가속하고 누전, 감전, 정전 및 화재사고 발생의 원인될 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 전기배선설계에 있어서의 전압강하 최적화 방안(K식, 실용식) 및 프로그램을 개발함으로써 그 동안의 수작업으로 인한 계산오류해소, 소요시간단축은 물론 최적설계로 안전성 확보와 경제성을 제고할 수 있음을 입증하였다.

특히 국내에서 가로등·보안등·공원등과 같은 다중분산부하설비에 직접 활용하여 그 유용성이 입증한 바, 지하철역사와 같은 공공장소 전기설비, 플랜트설비의 배선 선정 등 활용범위를 확대함으로써 안전성, 경제성 제고에도 크게 기여할 것으로 기대한다.

References

[1] 송길영, "송배전공학", 동일출판사, 1988.
[2] 권세혁 외, "건축전기설비上", 교문사, 1992.
[3] 강차녕, "가로등 전압강하계산", 대한주택공사, 1997.
[4] 한국전기안전공사, "2003전기재해조사보고서", 2004.
[5] 한국산업규격, "KSC IEC 60364", 132절, 2002.
[6] 이윈교, "전기설비의 설계 및 시공", 동일출판사, 1995.
[7] 최홍규, "전력사용시설물설비 및 설계", 성안당, 2001.
[8] 김세동, "전력설비 기술계산 해설", 동일출판사, 1999.
[9] 의제, "신 전기설비 기술계산핸드북", 제2판.
[10] 검정연구회, "전력공학", 동일출판사, 2000.
[11] 정용기 외, "수변전설비의 계획과 설계", 의제, 1995.
[12] 지철근,정용기, "최신 전기설비", 문운당, 1995.

◇ 저자소개 ◇

강차녕 (姜次寧)
1961년 4월 3일생. 1990년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2004년 고려대학교 공학대학원 졸업(석사). 2004년~현재 고려대학교 대학원 박사과정. 1989년~현재 대한주택공사 차장.

권세혁 (權世爀)
1949년 5월 4일생. 1974년 서울대학교 졸업. 1976년 서울대학교 전기전공 교육학 졸업(석사) 1980년 아이오와 주립대 졸업(석사) 1984년 아이오와 주립대 졸업(박사). 1985~1999년 대한전기학회 기술이사, 편집위원, 조사위원, 재무이사, 국제이사, 1999~2002년 ICEE 한국위원장, 2002~2005년 국무조정실 공공기술연구회 이사. 1985년~현재 고려대학교 전자전기공학부 교수.

조성필 (趙誠必)
1959년 3월 29일생. 1990년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정. 1994년~현재 (주)중앙전기 대표이사.