

# 계통손실 감소를 위한 전력용 콘덴서의 適正 再配置에 대한 연구

論 文
44~1~4

## A Study on the System Loss Minimizing Algorithm by Optimal Re-location of Static Condenser Using System Power Loss Sensitivity

李 尚 中\* · 金 建 中\*\* · 鄭 泰 豪\*\*\* · 金 原 謙§ · 金 龍 培§  
(Sang-Joong Lee · Kern-Joong Kim · Tae-Ho Jung · Weon-Kyum Kim · Yong-Bae Kim)

**Abstract** : The larger and the more complicated the system size and configuration grow, the more serious the system loss problem becomes. Excessive system loss causes severe system voltage depression, which even may result in system voltage collapse. This paper proposes an effective tool for minimizing the system power loss by optimal re-location of the static condenser based on the system loss sensitivity index  $\lambda_Q$ . It is possible to determine the optimal location and amount of VAR investment for minimizing the system loss by priority of  $\lambda_Q$  index given for each bus. Several computational techniques for avoiding divergency of the load flow solution are proposed. The loss sensitivity index  $\lambda_Q$  uses information of normal power flow equations and their Jacobians. Two case studies proved the effectiveness of the algorithm proposed.

**Key Words** : Ploss(계통전력손실), Power Loss Sensitivity(손실감도), Optimization Technique(최적화 기법), Load Level(부하수준) Static Condenser(전력용 콘덴서)

### 1. 서 론

계통손실이 감소하면 운전중인 발전기의 출력이 그만큼 감소되어 발전연료비가 감소하고 발전기의 출력여유가 증가하여 계통의 신뢰도가 향상된다. 계통의 전압저하는 근본적으로 선로 손실에 기인하므로 계통의 손실이 감소하면 자연스럽게 계통의 전압분포가 개선된다. 또한 선로손실의 급격한 증가는 전압붕괴를 초래할 수 있으므로 손실감소 문제는 전압안정도 측면에서도 대단히 중요하다.

계통손실감소에 관한 대표적인 기존 연구로서는 계통의 전력 손실을 목적함수로 한 최적조류계산(OPF) 연구가 있으나 OPF 분야는 해의 안정성 문제 등, 아직 대형 실계통에 적용하기에는 해결되어야 할 난제가 많이 있다.[6] 전력용 콘덴서의 신규투자 또는 재배치를 고려할 때, 계통실무자는 주로 계통전압분포를 최적화 하는 방향으로 투자위치를 선정하고 있으나 이나마 시행착오법에 의한 방법이며 기설치된 전력용 콘덴서가 과연 적정배치되어 있는지, 계통손실을 더 감소시키고 전압분포를 더 개선할 수 있는 최선의 재배치 방안을 검토하고자 할 때 수식화되고 실계통 적용이 가능한 도구를 현재 찾아보기 힘든 실정이다.

본 논문에서는 모선별로 연산된 손실감도지표  $\lambda_Q$ 에 근거하여 계통에 기설치된 전력용 콘덴서의 위치와 용량을 재조정함으로써

계통의 유효전력손실을 최대한 감소시킬 수 있는 체계화된 기법을 소개하고, 재배치 과정에서 발생하는 조류계산 해의 불안정성에 대한 대책을 제시하고자 한다.

### 2. 계통 손실감도 지표의 수식화

현실적으로 계통의 운전은 조류계산에 기초하고 있으므로 계통손실이 부하의 변화에 따라 어떻게 변화하는가를 조류계산 결과로 부터 추적할 수 있는 방법을 찾아 보자. 이는 비선형 제약조건이 있는 최적화 문제로 모형화할 수 있다. 이 때 목적함수는 계통의 전력 손실이 되고 제약조건으로는 조류계산식이 된다. 이를 수식으로 정식화하면 다음과 같이 표현할 수 있다.[1-5]

$$\begin{aligned} & \text{최소화 } P_{loss}(V, \theta) \\ & \text{제약조건 } P(V, \theta) = P^{spec} \\ & Q(V, \theta) = Q^{spec} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $V, \theta$ 는 모선전압 및 위상각의 크기,  $V_D$ 는 부하모선 전압의 크기,  $P, Q$ 는 모선 유효전력,  $P^{spec}, Q^{spec}$ 은 모선 지정전력을 나타낸다. 여기서 라그랑주 함수를 도입하면,

$$L = P_{loss}(V, \theta) + \lambda_P^T [P(V, \theta) - P^{spec}] + \lambda_Q^T [Q(V, \theta) - Q^{spec}] \quad (2)$$

이 경우 다음과 같은 최적조건(Optimality Conditions)이 성립한다.

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial L}{\partial \theta} \right] &= \left[ \frac{\partial P_{loss}}{\partial \theta} \right] + \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^T \lambda_P \\ &+ \left[ \frac{\partial Q}{\partial \theta} \right]^T \lambda_Q = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

\* 正 會 員 : 韓電技術研究院 電力研究室 課長

\*\* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 韓國電力公社 送變電處 副處長 · 工博

§ 正 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1994年 9月 9日

1 次修正 : 1994年 12月 14日

$$[ \partial L / \partial V_D ] = [ \partial P_{loss} / \partial V_D ] + [ \partial P / \partial V_D ]^T \lambda_P \quad (4)$$

$$+ [ \partial Q / \partial V_D ]^T \lambda_Q = 0$$

$$[ \partial L / \partial \lambda_P ] = P(V, \theta) - P^{spec} = 0 \quad (5)$$

$$[ \partial L / \partial \lambda_Q ] = Q(V, \theta) - Q^{spec} = 0 \quad (6)$$

제약조건에 의하여 도입된 변수  $[\lambda_P, \lambda_Q]$  의 의미를 명확하게 하기 위하여 식(2)에 대해 라그랑주 함수를 모션 지정전력  $P^{spec}, Q^{spec}$ 에 대하여 편미분하여 보면 다음과 같이 주어진다.

$$[ \partial L / \partial P^{spec} ] = -\lambda_P \quad (7)$$

$$[ \partial L / \partial Q^{spec} ] = -\lambda_Q \quad (8)$$

식(7),(8)은 라그랑주 함수의 모션 유,무효전력에 대한 미분이다. 이는 모션 유,무효전력이 단위량 변화할 때의 라그랑주 함수의 증가분을 의미하며, 이 값이 바로  $-\lambda_P, -\lambda_Q$ 가 됨을 쉽게 알 수 있다. 그런데 원2계의 운전점에서 조류계산 결과 식(5),(6)의 최적조건을 만족하고 있으므로 이는 곧  $[\lambda_P, \lambda_Q]$  변수에 대한 최적상태를 의미하게 된다. 그러므로 식(2)로 주어지는 라그랑주 함수는 오직 계통손실만을 포함하게 되고 따라서  $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 는 모션 유,무효전력의 단위량 변화시 계통손실의 변화를 의미하게 된다. 식(3),(4)를 행렬의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [ \partial L / \partial \theta ] \\ [ \partial L / \partial V_D ] \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [ \partial P_{loss} / \partial \theta ] \\ [ \partial P_{loss} / \partial V_D ] \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

단, J는 자코비안 행렬이며, 식(9)로 부터  $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} [ \partial P_{loss} / \partial \theta ] \\ [ \partial P_{loss} / \partial V_D ] \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)은 손실감도지표  $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값이 자코비안 행렬과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다. 만약 전압강화점에 접근하게 되면 자코비안 행렬의 행렬식 값은 0에 접근하게 되고 따라서 자코비안 행렬의 역행렬로 부터 계산된  $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값은 무한대로 접근하게 된다. 손실감도지표  $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 계산은 단지 조류계산에서 이미 계산된 자코비안 행렬의 역행렬에 손실감도 벡터를 곱하는 계산만을 필요로 하므로 삼각화 인수분해법을 적용하면 계산량은 조류계산 시간과 거의 동일하다.

### 3. $\lambda$ 지표에 의한 무효전력투자 알고리즘

$\lambda_Q$ 가 각 모션 무효전력의 단위투입량에 대한 계통손실의 변화를 의미하므로 이 지표값이 가장 큰 모션에 전력용 콘덴서를 우선 투자할 경우 계통손실은 가장 효과적으로 감소할 것이다. 여기서 각 모션의  $\lambda_Q$  값을 전력용 콘덴서의 투자 우선순위 지표로 삼아  $\lambda_Q$ 의 값이 가장 큰 모션으로 부터 우선적으로  $\Delta Q$  MVA 만큼의 무효전력을 투자한다.  $\lambda_Q$  지표에 의한 새로운 전력용 콘덴서의 투자 알고리즘을 흐름도로 나타내면 그림 1과 같다.  $\Sigma \Delta Q$  값(계획투자량) 또는  $\lambda_Q$  지표값이 사전에 설정한 크기에 도달하게 되면 프로그램을 종료한다.[2]

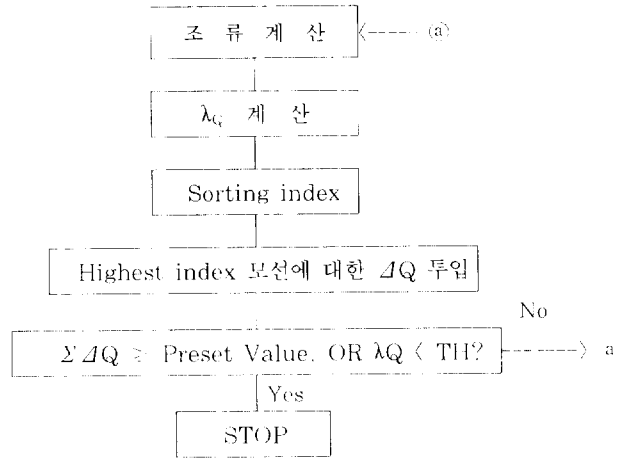


그림 1  $\lambda_Q$  지표에 의한 전력용 콘덴서 투입 알고리즘  
Fig. 1 New VAR investment Algorithm using  $\lambda_Q$  index

### 4. $\lambda$ 지표에 의한 전력용 콘덴서 재배치 알고리즘

#### 알고리즘 1 (기본 알고리즘)

계통에 기 설치된 전력용 콘덴서를  $\lambda_Q$  지표에 의하여 재배치하고자 할 경우 기본적으로 아래의 과정을 따른다.

가. 현재 부하상태에서 전 전력용 콘덴서 제거  
나.  $\lambda_Q$  지표에 의한 재배치(그림 1)

그러나 계통의 전력용 콘덴서를 전량 제거하고 조류계산을 수행한 경우 해가 분산하는 경우가 있으므로 아래 알고리즘 2와 같은 대안이 필요하다.

#### 알고리즘 2

제거된 전력용 콘덴서 용량 만큼의 계통 부하를 감소시키고 원래의 부하수준까지 서서히 부하를 증가해 가며 재배치 수, 계통부하를  $P_{total}(MVA)$ , 전력용 콘덴서 용량을  $CP_{total}(MVAR)$ 라 하고

$$\alpha = (P_{total} - CP_{total}) / P_{total} \quad (11)$$

라 할때, 각 모션의 부하를 공히  $\alpha$  배한 상태에서  $P_{total}$ 가 될 때까지 부하를 일정비율로 증가시켜 가며 전력용 콘덴서를  $\lambda_Q$  지표로 재배치한다.

#### 알고리즘 3

발전기의 Q limit(무효전력 상한선)을 해제한 상태에서 재배치 중, 모든 발전기의 무효전력 생산능력을 일단 무한하다고 가정하여 Q limit를 해제하고 전력용 콘덴서를 전량 제거한 후  $\lambda_Q$  지표로 재배치한다. 이 방법은 재배치 연산이 끝난 후 각 발전기가 실제로 Q limit를 초과하지 않았는지를 확인하는 과정이 필요하다.

#### 알고리즘 4

가.  $\lambda_Q$ 가 양호한 모션으로 부터 차례로  $\Delta Q$ 씩 전력용 콘덴서를 제거한다.  
나. 조류계산해가 수렴하지 않는 시점 부근에서는  $\lambda_Q$  지표가 가장 양호한 모션으로 부터  $\lambda_Q$  지표가 가장 취약한 모션으로 전력용 콘덴서를  $\Delta Q$  만큼씩 이동시키고 '가'의 과정을 반복한다.

다. '가-나' 과정에서 제거된 전력용 콘덴서를  $\lambda_Q$  지표로 재 투입한다.

사례연구 1

그림 2는 두대의 발전기(모선 1,3 단, 모선 1은 slack)와 세 개의 부하모선으로 구성된 5 모선 계통으로 선로정수를 표 1에 圖示하였다. 2, 4번 부하모선에 각각 0.8025 및 1.8975 p.u.(총 2.7 p.u.)의 전력용 콘덴서가 설치되어 2,4,5번 모선의 전압을 각각 0.9065, 0.92 및 0.8733 p.u.로 유지하고있다.(Base case) 모선 1, 3의 전압은 각각 1.02 및 1.03 p.u로 일정한 것으로 가정하였다. 여기서 알고리즘 1을 적용, 전력용 콘덴서를 모두 제거한 후  $\lambda_Q$  지표로 전력용 콘덴서를 재배치 할 때, 재 배치 전후의 모선주입전력, 계통손실(Ploss) 및 전압분포의 변화를 표 2에 비교분석 하였다. AVP(System Average Voltage Profile)는 모선전압과 부하의 크기를 감안한 계통부하모선전압의 평균치로서

$$AVP = \sqrt{[(\sum Vi \cdot Pi)^2 + (\sum Vi \cdot Qi)^2] / [(\sum Pi)^2 + (\sum Qi)^2]} \quad (12)$$

로 정의하였으며 부하는 모두 정전력 부하로 가정하였다. CP<sub>2</sub>, CP<sub>4</sub> 및 CP<sub>5</sub>는 각각 2,4,5번 모선의 전력용 콘덴서 투입량을 나타낸다.

재배치 효과분석

재배치 결과 Ploss가 7.6% 감소하였고 AVP가 3.5% 상승되는 등 전반적으로 계통상태가 개선되었다. 참고로, 동일한 2.7 pu의 전력용 콘덴서를 2,4,5번 모선에 각각 0.6570, 1.4400 및

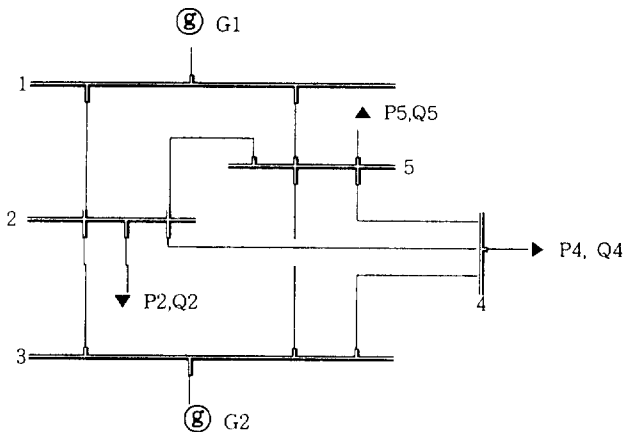


그림 2 5 모선 계통  
Fig. 2 5 bus test system

표 1 선로정수  
Table 1 Line parameter

from	to	G(pu)	B(pu)	Line Charging
1	2	1.40056	- 5.60224	Bus 1 0.03600
1	5	2.81647	- 7.48352	Bus 2 0.01800
2	3	2.45000	- 5.87000	Bus 3 0.08200
2	4	3.05000	- 4.45170	Bus 4 0.03575
2	5	3.13000	- 2.09335	Bus 5 0.03575
3	4	3.70000	- 3.73000	
3	5	1.12985	- 4.47675	
4	5	2.05362	- 4.16883	

표 2 5 모선 계통의 전력용 콘덴서 재배치 전후의 계통 상태 비교 (real-92, L9)

Table 2 Comparison of system condition before and after re-location of static condenser of 5 bus system

	Condenser 재배치전	Condenser 재배치후	비 고
CP <sub>2</sub> CP <sub>4</sub> CP <sub>5</sub>	0.8025 1.8975 0	0.9025 1.0189 0.7786	CP <sub>2</sub> -CP <sub>4</sub> +CP <sub>5</sub> = 2.7 p.u.
Ploss	0.8699	0.8034	0.0666 개선 (7.6 % 감소)
AVP	0.8700	0.9002	0.0302 개선 (3.5 % 증가)
V <sub>2</sub> V <sub>4</sub> V <sub>5</sub>	0.9065 0.9200 0.8733	0.9076 0.8796 0.9065	0.0011 개선 0.0404 감소 0.0332 개선
$\lambda_{Q2}$ $\lambda_{Q4}$ $\lambda_{Q5}$	-0.1048 -0.0070 -0.1640	-0.1095 -0.1095 -0.1095	
P1, Q1	5.2700 1.2014	5.2034 0.9107	
P2, Q2	-2.4 -0.96	-2.4 -0.96	
P3, Q3	1.5 1.3269	1.5 1.4288	
P4, Q4	-1.5 1.05	-1.5 -1.05	
P5, Q5	-2.0 -1.0000	-2.0 -1.0000	

표 3 530 모선 계통에 대한 전력용 콘덴서 재배치 전후의 계통손실 비교

Table 3 Comparison of the system loss before and after re-location of static condenser of 530 bus system

	재배치 전	재배치 후	비고
총부하	22.212MW	22.212 MW	동일
총발전량	22.579MW	22.567MW	12MW 감소
계통손실	367MW	355MW	12MW 감소

0.6030씩 재배치할 경우 V<sub>2</sub>, V<sub>4</sub>, V<sub>5</sub>를 공히 0.9 pu (AVP=0.9)로 유지할 수 있고 Ploss를 0.8170로 개선할 수 있으나 이 방법은 Ploss, AVP가 각각 0.8034, 0.9002로 개선된  $\lambda_Q$  지표에 의한 방법에 비하여 불리함을 알 수 있다.

사례연구 2

표 3은 서울 D변전소의 110 MVAR를 비롯한 전국의 99개 모선에 총 3,940 MVAR의 전력용 콘덴서가 투입된 530 모선 규모의 실제 계통에 대하여 알고리즘 3에 의하여 전력용 콘덴서를 재배치한 결과 계통손실의 감소효과를 나타내고 있다.

표 3에 나타난 바와 같이  $\lambda_Q$  지표에 의한 방법으로 전력용 콘덴서를 재배치한 결과 계통손실이 12 MW(367 MW → 355 MW) 감소하였음을 알 수 있다.

5. 전력용 콘덴서 재배치 기준 부하점의 결정

전력계통은 부하의 크기와 선로, 발전기 등의 투입상황이 시시각각 변화하고 있으며 이에 따라  $\lambda_Q$ 값도 그 크기와 순서가 달라진다. 전력용 콘덴서를  $\lambda_Q$ 의 변화에 따라 시시각각 이동할 수는 없다. 그러나 전력용 콘덴서가 투입된 시간 중 계통망 구성(system configuration)의 변동이 없다고 가정할 때, 일간(日間) 전력손실량을 최소화하기 위하여 과연 어느 부하점에 맞추어 전력용 콘덴서를 배치할 것인가를 결정하여야 한다. 이 부하점을 P'라 부르기로 한다. 그림 3과 같은 일부 하국선에서 일과중 전력용 콘덴서의 투입시각 및 개방시각을 T<sub>C</sub>(=T<sub>CLOSE</sub>)

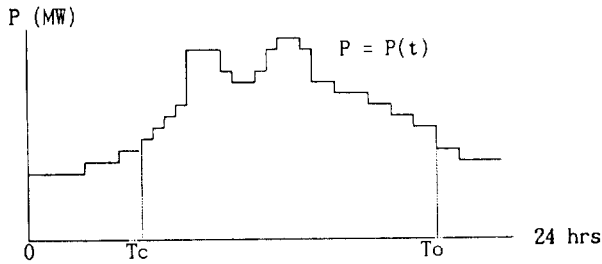


그림 3 일부하 곡선  
Fig. 3 Daily load curve

및  $T_0(=T_{OPEN})$ 라 한다면  $T_c - T_0$  시간 중 발생하는 총손실량  $\Sigma P_{loss}(MWH)$ 는

$$\Sigma P_{loss} = \int_{T_c}^{T_0} P_{loss}(P, t) dt \quad (13)$$

가 되며 식(13)을  $T_c - T_0$  (hours)로 나눈 평균손실값(MW)이 발생하는 부하점이 곧  $P^*$ 점이 될 것이다. 그런데 계통손실  $P_{loss}$ 와 부하  $P$ 는  $P_{loss} \approx \beta P^2$  (단,  $\beta$ 는 상수)의 관계가 있으므로 그림 3과 같은 일부하곡선의 경우  $P^*$ 는

$$P^* = \sqrt{\frac{\int_{T_c}^{T_0} P^2 dt}{(T_0 - T_c)}} \quad (14)$$

가 될 것이며  $T_c - T_0$  구간이  $n$ 회 sampling 된 (data)인 경우  $P^*$ 는

$$P^* = \sqrt{\frac{(P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2)}{n}} \quad (15)$$

로 주어질 것이다. 이  $P^*$ 점을 기준으로  $\lambda_0$ 를 연산하여 전력용 콘덴서의 부자위치와 부자량을 결정할 경우  $T_c - T_0$  시간 중 발생하는 전력손실량(MWH)은 가장 작아질 것으로 기대된다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 계통에 기설치된 전력용 콘덴서의 위치와 용량을 재조정함으로써 계통의 유효전력손실을 최대한 감소시킬 수 있는 방안을 소개하였다. 또한 기설치된 전력용 콘덴서를 제거 및 재배치하는 과정에서 발생할 수 있는 조류계산 해의 발산문제에 대한 대책을 제시하였다. 모션별로 연산된 손실감도 지표  $\lambda_0$ 의 순위에 의하여 전력용 콘덴서를 재배치한 결과 계통의 손실이 크게 감소되고 전압분포가 개선되었다. 손실감도 지표  $\lambda_0$ 는 정상운전시 전력조류 방정식과 그 사코비안 정보를 이용하고 있으며 조류계산과 거의 동일한 계산량으로 계산할 수 있다. 두 사례연구를 통하여 본 논문에서 제시한 전력용 콘덴서 재배치 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

### 참 고 문 헌

[1] 김건중, 심국진, 정태호, 이상중, "실시간 전압분포 측정도", 대한 전기 학회 춘계학술대회 논문집, 부산 동의대 p. 51-55, 1991. 4.  
[2] 김건중, 김원겸, 정태호, 이상중, "전압 안정도 개선을 위한 무효전력제어", 대한 전기 학회 하계학술대회 논문집, 춘

천 강원대 p. 422-425, 1991. 8.  
[3] 김건중, 추진부, 이상중, 김용배, "무효전력 손실감도를 이용한 전압안정도 지표" 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p. 78 - 82, 1992. 5.  
[4] 김건중, 추진부, 이상중, 김용배, 김용배, "손실감도를 이용한 전압안정도 지표" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 거세대 p. 218 - 221, 1992. 8.  
[5] 석사논문, 이상중, "손실감도 분석에 근거한 전력계통 전압분포 측정도 산정에 관한 연구" 92. 2. 충남대학교.  
[6] Sun, D.L., Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A. and Timmy, W. F. "Optimal power flow by Newton approach", IEEE T rans., 1984, PAS 103, pp. 2864-2880

## 저 자 소 개



### 이 상 중 (李尙中)

1955년 1월 10일생. 1977년 부산 공전 전기 과 5년 졸업. 1977년 성균관대 전기과 졸업. 1992년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 1976년 한신 입사·현재 한국전력 기술연구원 계통연구실 근무.



### 김 건 중 (金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 공대 전기 공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977년 해군 제2사관학교 교수. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학) 현재 충남대 공대 전기공학과 교수.



### 정 태 호 (鄭泰豪)

1947년 6월 14일생. 1972년 서울대 공대 전기 공학과 졸업. 1979년 위스콘신 - 매디슨 대학교 대학원 졸업(석사). 1988년 동 대학원 졸업(공학). 현재 한국전력 송변전지 부처장.



### 김 원 겸 (金原謙)

1961년 7월 5일생. 1984년 충남대 공대 전기 공학과 졸업. 1987년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대 대학원 전기공학과 박사과정.



### 김 용 배 (金龍培)

1965년 8월 22일생. 1987년 충남대 공대 전기 공학과 졸업. 1989년 충남대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대 대학원 전기공학과 박사과정.