

An Operation Method of Many UPFC's for Maintaining the Optimal Voltage Profile

金 台 鉉* · 文 承 逸** · 朴 鍾 根**
 (Tae-Hyun Kim · Seung-Il Moon · Jong-Keun Park)

Abstract - A method to compute the reactive powers of the added buses by the decoupled UPFC model for the optimal voltage profile is presented, by which the voltage magnitudes of PQ buses can get closer to the reference value(usually one p.u.). The performance index for assessing how much the voltage magnitude is closer to the reference value is defined as the squared sum of the present voltage minus the reference voltage multiplied by the weighting number associated with the relative importance of the buses. Numerical example in a 10-unit 39-bus power system with 2 UPFC's shows that the performance index can be very much reduced by operating many UPFC's with the reactive powers for the optimal voltage profile proposed in this paper.

Key Words : FACTS, UPFC, Decoupled UPFC Model, Optimal Voltage Profile

1. 서 론

1개 또는 2 개의 파라미터를 제어할 수 있는 대부분의 다른 FACTS(Flexible AC Transmission Systems) 기기와는 달리, UPFC(Unified Power Flow Controller)는 3개의 파라미터를 동시에 제어할 수 있으므로 다른 FACTS 기기가 할 수 없는 다양한 기능을 수행할 수 있다는 장점을 가진 기기이다[1].

UPFC가 있는 전력 계통에서, 원하는 조류 상황을 유지하도록 UPFC를 제어하고 운용하기 위해서는 정상상태 해석이 우선적으로 필요하다. 이를 위해서는 조류계산을 수행하여야 한다. UPFC의 조류계산 모형으로서는 분리된 모형이 널리 사용되고 있다. 이 방법에 의하면 1개의 UPFC당 2개의 모선만 추가하면, 기존의 조류계산 프로그램을 전혀 수정하지 않고도 UPFC가 있을 때의 조류계산을 수행할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

정상 상태에서의 기초 연구로서, UPFC가 존재하는 전력 계통의 조류계산 결과 직렬 전압 그리고/또는 병렬 전류 크기가 제한 값을 초과하였을 경우 제한 값 이내가 되도록 UPFC 모선의 유효전력과 무효전력 또는 전압 크기를 바꾸어 주는 체계적인 방법이 제시되었다[2]-[4]. 그 밖에 분리된 UPFC 모형을 이용한 연구로서 정상상태 뿐만 아니라 과도 상태에서의 모형 개발[5], 다른 FACTS 기기와의 종합적인 조류 제어 연구[6] 등 활발한 연구가 진행되고 있다.

정상 상태에서 UPFC는 여러 가지 목적으로서 운용될 수 있다. 분리된 모형을 이용하여 원하는 목적을 수행하도록 UPFC를 운용하기 위한 값을 구하는 연구는 아직 거의 되어 있지 않은데, 전력 계통에서 UPFC를 운용하기 위해서는 반드시 필요하다. 본 논문에서는 전력 품질을 결정하는 중요한 요소 중의 하나인 전압 크기를 우리가 규정값(보통 1p.u.)에 가깝도록 하는 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다. 평가 지수는 PQ 모선에서 현재 전압 크기와 원하는 전압 크기의 차이의 제곱에 모선별 중요도에 의한 가중치를 곱한 값의 합으로 정의하였다. 사례 연구로서 39모선 계통에서 UPFC가 2개 있을 때, 제시한 방법에 의하여 UPFC 모선의 무효전력 값을 지정하면 평가 지수 값이 훨씬 작아지므로, 최적 전압 유지 즉 전력 품질 향상이 가능함을 보였다.

2. 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형

본 논문에서 이용한 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형은 그림 1과 같다. i 모선과 j 모선이 끊어져 있는데, 이는 조류계산의 효과적인 수행을 위함이다.

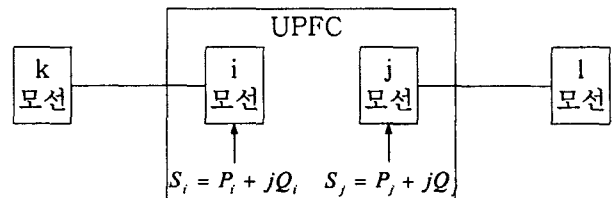


그림 1 조류계산을 위한 분리된 UPFC 모형
 Fig. 1 A decoupled UPFC model for power flow

* 終身會員 : 木浦大 工大 電氣制御工學部 專任講師 · 工博
 ** 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2000年 1月 25日
 最終完了 : 2000年 11月 8日

이 모형에 의하면 UPFC 설치 전에 존재하는 k와 l 모선 사이에, UPFC를 설치함으로써 새롭게 i와 j 두 모선을 추가하기만 하면 된다. 새로이 추가되는 i와 j 두 모선은 기존의 조류계산 프로그램에서 이용하는 PV 또는 PQ 모선 중에서 원하는 대로 선택하여 지정할 수 있다. 그러므로 1개의 UPFC당 두 모선을 추가하면, 기존의 조류계산 프로그램을 전혀 수정하지 않고도 UPFC가 있을 때 조류계산을 수행할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

i와 j 두 모선의 유효전력과 무효전력 또는 전압 크기의 값은 UPFC의 동작에 의하여 변화시킬 수 있으며, 이 값을 지정하는 방법은 [2]-[3]에 자세히 설명되어 있다. UPFC는 유효전력을 흡수하거나 저장할 수 없으므로, i와 j 모선의 유효전력의 합은 항상 0이다. 따라서, 1개의 UPFC에서 의해서 생긴 i와 j 두 모선에서 세 개의 모선 변수 값(1개의 유효전력과 2개의 무효전력 또는 2개의 전압 크기)을 독립적으로 변화시킬 수 있다.

3. 최적전압 유지를 위한 UPFC 모선의 무효전력 계산

본 논문에서는 PQ 모선의 전압 크기를 원하는 값에 가깝도록 하는 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다.

계산의 편의상 UPFC에 의해서 추가된 i와 j 두 개의 모선은 전부 PQ 모선으로 가정하였다. 따라서 최적 전압 유지를 위해서, UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선(그림 1에서 i,j)의 무효전력(Q_i, Q_j)을 변화시켰다.

모선에 대한 변수는 식 (1)-(3)과 같이 가정하였다.

$$K: \text{UPFC가 없을 때의 모선 수} \quad (1)$$

$$M: \text{UPFC에 의해서 생긴 모선 수 (2*UPFC 수)} \quad (2)$$

$$K+M: \text{UPFC가 설치된 전력 계통의 모선 수} \quad (3)$$

3.1 평가 지수와 제어 변수

전력 품질의 향상을 위해서는 실제 전압 크기와 기준 전압 크기와의 차이가 작아야 한다. 이 정도를 나타내는 평가 지수[7]는 식 (4)과 같이 정의하였다. 전압 크기의 관점에서 보아서, 이 값이 작으면 그만큼 전력 품질이 좋다고 할 수 있다.

상정 사고의 관점에서 보면, 이 값이 작을수록 위험하지 않으므로 고려할 필요가 적은 사고이다. 본 논문에서는 이 상황을 계통 최적 전압이라고 판단하고, 이 상황을 유지하기 위한 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다.

slack 모선과 PV 모선은 전압 크기를 조류계산의 입력으로 지정되고, UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선은 조류계산의 편의상 추가된 모선이므로 평가 지수 대상 모선 k에서 제외하였다. $V_{k \text{ ref}}$ 는 보통 1(p.u.)이다. ω_k 는 상대적인 중요도에 의한 가중치로서, 중요한 모선에서는 큰 값을 지정하고 중요하지 않은 모선에서는 작은 값을 지정할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=PQ \text{ 모선}} \omega_k (V_k - V_{k \text{ ref}})^2 \quad (4)$$

$$V_k : k \text{ 모선의 실제 전압 크기} \quad (5)$$

$$V_{k \text{ ref}} : k \text{ 모선의 원하는 전압 크기} \quad (6)$$

$$\omega_k : k \text{ 모선 중요도에 의한 가중치} \quad (7)$$

본 논문에서는 식 (9)를 바꾸어 식 (4)을 최소화하였다.

$$m : \text{UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선} \quad (8)$$

$$Q_m : \text{UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선의 무효전력} \quad (9)$$

3.2 제안한 알고리즘

최적 전압 운용을 위한 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하기 위하여 제안한 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다.

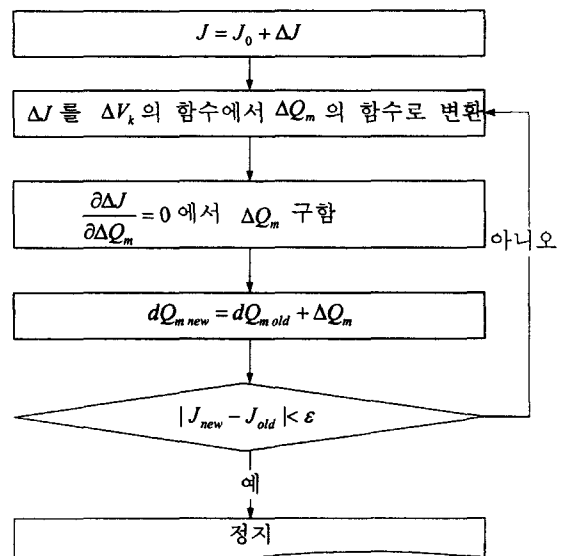


그림 2. 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모선의 무효전력 계산 과정

Fig. 2 Calculation process of the reactive powers of the UPFC buses for the optimal voltage profile

접두어 Δ 는 각 단계에서의 계산에 의한 변화량을 의미하며, 접두어 d 는 UPFC가 동작하지 않을 때에 비하여 변화한 양이다[2]-[4].

평가 지수 J 를 최소화하기 위한 Q_m 의 값을 구하기 위하여 본 논문에서 제시한 방법은 다음과 같다.

J, V_k, Q_m 가 현재의 값(아래 첨자 0가 붙은 항)에 가상의 변화(접두어 Δ 가 붙은 항)가 생긴다고 가정하면 식 (10)-(12)과 같이 표시할 수 있다.

$$J = J_0 + \Delta J \quad (10)$$

$$V_k = V_{k0} + \Delta V_k \quad (11)$$

$$Q_m = Q_{m0} + \Delta Q_m \quad (12)$$

식 (4)에 식 (10)-(11)을 대입하면 J_0 와 ΔJ 를 식 (13)-(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}})^2 \quad (13)$$

$$\Delta J = \frac{1}{2} \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k (2\Delta V_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}}) + \Delta V_k^2) \quad (14)$$

J_0 는 상수이기 때문에 J 의 최소 값을 구하는 문제는 ΔJ 의 최소 값을 구하는 문제와 같으므로 본 논문에서는 J 대신 ΔJ 의 최소화 문제를 생각한다.

식 (14)과 같이 ΔJ 가 ΔV_k 의 함수인데, 제어 변수는 ΔQ_m 이므로 이에 대한 함수로 변환하여야 한다. 그러기 위해서는 ΔV_k 와 ΔQ_m 와의 관계식을 구하여야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 과정으로 이 관계식을 구하였다.

뉴턴 램슨법에 의한 조류 방정식은 식 (15)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)의 왼쪽에 자코비안의 역행렬을 곱하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial \theta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (16)$$

본 논문에서는 식 (16)의 자코비안의 역행렬의 요소 ($\frac{\partial V}{\partial Q}$)들을 이용하여 ΔV_k 와 ΔQ_m 와의 관계식을 구하였다.

식 (17)과 같이 ΔV_k 를 ΔQ_m 들의 선형 결합으로 나타냈다.

$$\Delta V_k = \sum_{m=UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m \quad (17)$$

여기서 X_{km} 은 간단히 나타내기 위하여 도입한 변수이며 식 (18)과 같다.

$$X_{km} = \frac{\partial V_k}{\partial Q_m} \quad (18)$$

식 (17)을 식 (14)에 대입하면, 식 (19)와 같이 ΔJ 가 ΔV_k 에 대한 식에서 ΔQ_m 에 대한 식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} \Delta J = & \frac{1}{2} \sum_{k=PQ\text{모선}} [2\omega_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}}) \sum_{m=UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m] \\ & + (\sum_{m=UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

ΔJ 를 ΔQ_m ($m=K+1, \dots, K+M$)에 대해서 미분하여 0과 같다고 놓은 식을 풀면 식 (20)과 같이 ΔJ 를 최소화하기 위한 ΔQ_m 을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \Delta J}{\partial \Delta Q_m} = \sum_{k=PQ\text{모선}} X_{km} [\omega_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}}) + \sum_{m=UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m] = 0 \quad (20)$$

이 식을 행렬로 표현하면 식 (21)과 같다.

$$[\Delta Q_m] = -[\omega XX]^{-1} * [\omega VX] \quad (21)$$

여기서 $[\omega XX]$, $[\Delta Q_m]$, $[\omega VX]$ 은 식 (22)-(24)와 같다.

$$[\omega XX] = \begin{bmatrix} \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+1)}^2 & \dots & \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+1)} X_{k(K+M)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+M)} X_{k(K+1)} & \dots & \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+M)}^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[\Delta Q] = \begin{bmatrix} \Delta Q_{K+1} \\ \vdots \\ \Delta Q_{K+M} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[\omega VX] = \begin{bmatrix} \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}}) X_{k(K+1)} \\ \vdots \\ \sum_{k=PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{k\text{ref}}) X_{k(K+M)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (21)에서 구한 $[\Delta Q_m]$ 를 현재 UPFC 모선의 무효전력의 값에 더하면 식 (25)과 같이 UPFC 모선의 무효전력 값이 바뀌게 된다.

$$\Delta Q_{m\text{new}} = \Delta Q_{m\text{old}} + \Delta Q_m \quad (25)$$

$$\Delta Q_{m\text{old}} : \text{이전 단계의 UPFC 모선의 무효전력} \quad (26)$$

$$\Delta Q_{m\text{new}} : \text{현재 단계의 UPFC 모선의 무효전력} \quad (27)$$

UPFC 모선의 무효전력 값이 바뀌면, PQ 모선의 전압 크기가 기준 전압 크기에 가까워져서 평가 지수의 값이 감소하게 된다. 이는 동작점이 바뀌었음을 의미한다. 식 (17)은 현재의 동작점에서 선형화한 식이어서 동작점에 따라 미분

값이 바뀌므로 식 (18)의 X_{km} 을 다시 계산하여 반복하면 J 의 값을 계속 감소시킬 수 있으나, 무조건 많이 반복한다고 감소되는 것은 아니다. 본 논문에서는 반복 여부를 결정하기 위하여 식 (28)을 이용하였다.

$$|J_{new} - J_{old}| < \epsilon \quad (28)$$

$$J_{old} : \text{이전 단계의 평가 지수} \quad (29)$$

$$J_{new} : \text{현재 단계의 평가 지수} \quad (30)$$

$$\epsilon : \text{허용 오차} \quad (31)$$

식 (28)이 만족되지 않으면, 현재 단계에서의 평가 지수와 전 단계에서 구해진 평가 지수의 차이가 허용 오차보다 크면 반복 계산하여 평가 지수의 값을 감소시킬 가능성이 높으므로 식 (17)부터 반복한다. 반대로 식 (28)이 만족되면, 현재 단계에서의 평가 지수와 전 단계에서 구해진 평가 지수의 차이가 허용 오차보다 작으므로, 더 이상 반복해도 평가 지수 값의 개선이 별로 없을 가능성이 높으므로 반복을 중단하고 끝낸다.

4. 수치 예

본 논문에서 제시한 방법에 의하여 구한 UPFC 모선의 무효전력에 의해서 평가 지수의 값이 작아진다는 것을 보이기 위하여 그림 3과 같이 발전기가 10개 있는 39모선 계통에 2개의 UPFC가 설치된 경우에 적용하였다[8]. 2개의 UPFC 설치 후에 4개의 모선이 추가되어서 43모선 계통이 되었다. UPFC의 설치 위치는 11번 모선과 12번 모선 사이 그리고 26번 모선과 28번 모선 사이이다. 식 (1),(2)에서 $K=39, M=4$ 이다.

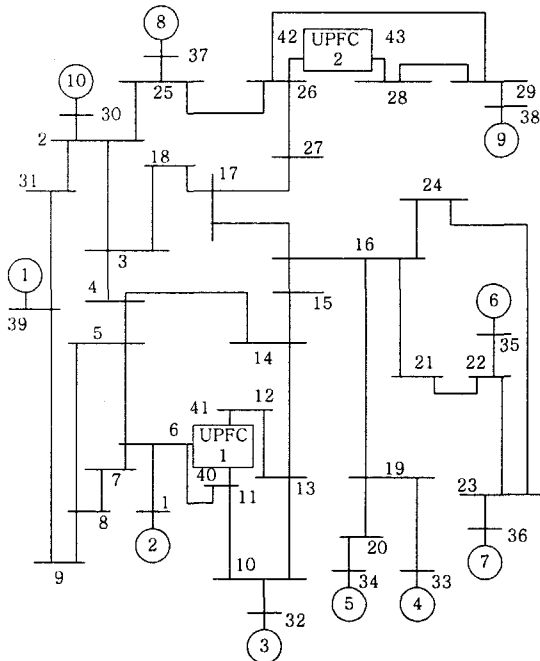


그림 3 UPFC가 2개 있는 10기 39모선 전력 계통
Fig. 3 10-unit 39-bus power system with 2-UPFC's

UPFC 1이 연결된 모선(11번과 12번 모선)과 UPFC 2가 연결된 모선(26번과 28번 모선)의 중요도에 의한 가중치를 변화시켜서 다음과 같은 5가지 경우에 대해서 최적 전압 운용을 실시하였다. 표 1에 보이지 않은 모선의 가중치는 전부 1이다.

표 1 최적 전압 운용 적용시 가중치

Table 1 The weighting numbers in optimal voltage profile operation

가중치 사례	ω_{11}	ω_{12}	ω_{26}	ω_{28}
1	1	1	1	1
2	2	2	1	1
3	0.5	0.5	1	1
4	1	1	2	2
5	1	1	0.5	0.5

본 논문에서 제시한 방법으로 계산을 반복함에 따라 각 단계에서 평가 지수의 값은 표 2와 같이 급격히 감소한다. 평가 지수에서 10^{-5} 를 생략하였다. 허용 오차를 $5 \times 10^{-9} (= \epsilon)$ 으로 지정하였더니 표 2와 같이 3번 반복으로 수행이 중단되었다.

표 2 각 단계별 평가 지수

Table 2 The performance indices of each stage

반복 사례	초기 상태	1단계	2단계	3단계
1	11.6555	5.3904	4.8962	4.8959
2	12.6431	5.4048	4.9053	4.9051
3	11.1616	5.3836	4.8892	4.8889
4	13.2689	5.4979	5.0467	5.0467
5	10.8488	5.3386	4.7408	4.7394

5. 결론

UPFC의 운용 방법의 일례로서 PQ 모선의 전압 크기를 원하는 전압 크기에 가깝도록 하는 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다. 유효전력에 비해 무효전력이 PQ 모선의 전압 크기에 미치는 영향은 훨씬 작으므로 유효전력에 의한 영향은 무시하였다.

UPFC의 조류계산 모형으로서 분리된 모형을 사용하였다. 이 모형은 UPFC 1개당 2개의 모선만 추가하면 기존의 조류계산 프로그램을 그대로 이용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

사례 연구로서 10기 39모선 계통에서 UPFC가 2개 있을 때 적용하였는데, 본 논문에서 제시한 방법에 의하여 계산된 무효전력 값을 UPFC 모선에 지정하면 평가 지수의 값이 훨씬 작아지므로 원하는 최적 전압 운용을 성공적으로 수행할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

[1] Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Jung-Uk Lim, Jung-Mun Kim, Seung-III Moon, Jong-Keun Park, "FACTS Researches", Symposium on Applied Electromagnetics Power System and Controls, Aug. 1998
 [2] Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Jung-Uk Lim, Seung-III Moon, Jong-Keun Park and Byung-Moon Han, "A decoupled UPFC Model for power flow considering limit resolution," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Feb. 1999, pp 1190-1195
 [3] 김 태현, 서 장철, 임 정욱, 문 승일, 박 종근, 한 병문, "조류계산을 위한 분리된 모형에서의 제한값 해결",

대한전기학회 논문지, 제48권, 제7호, pp 824-831, 1999.7
 [4] Jung-Uk Lim, Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Seung-III Moon, "A Limit Resolution Method of UPFC for Power Flow Studies", Symposium on Applied Electromagnetics Power System and Controls, Nov. 1999
 [5] A. Nabavi-Niaki, M. R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11. No. 4, Nov. 1996, pp 1937-1943
 [6] Douglas J. Gotham and G.T. Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 13, no. 1, February 1998, pp. 60-65
 [7] Atif.S Debs, "Modern power system control and operation", Kluwer academic publishers, 1987. p. 119
 [8] M. A. Pai, "Energy function analysis for power system stability", Massachusetts: Kluwer academic publishers, 1989, p. 223-225

저 자 소 개



김 태 현 (金 台 鉉)
 1963년 6월 18일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 2000년 3월~현재 목포대 공대 전기제어공학부 전기공학전공

전임강사
 Tel : 061-450-2462, Fax : 061-453-4843
 E-mail : kth@apollo.mokpo.ac.kr



박 종 근 (朴 鍾 根)
 1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동경대 공학계 대학원 졸업(석사). 1982년 동 대학원 졸업(공학). 1982년 4~9월 일본 도시바 중

전기기술 연구소 연구원. 1982년 10월~1983년 3월 일본 국립 에너지 물리학 연구소 연구원. 1983년 4월~현재 서울대 공대 전기공학부 교수
 Tel : 02-880-7247, Fax : 02-883-0827
 E-mail : parkjk@plaza.snu.ac.kr



문 승 일 (文 承 逸)
 1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993년~1997년 전북대 공대 전기공학과 조교수.

1997년~현재 서울대 공대 전기공학부 조교수
 Tel : 02-880-1821, Fax : 02-878-1452
 E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr