The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 4, pp. 513~521, 2012
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.4.513

분산전원 투입을 고려한 배전망 이용요금 산정에 관한 연구

Calculation of Distribution Network Charging for DG Embedded Distribution System

황 석 현* · 김 문 겸† · 박 종 근**
(Seok-Hyun Hwang · Mun-Kyeom Kim · Jong-Keun Park)

Abstract - With the advent of smart grid, distribution network charges have been one of keystones of ongoing deregulation and privatization in power industries. This paper proposes a new charging methodology to allocate the existing distribution network cost with an aim of reflecting the true cost and benefit of network customers, especially of distribution generator (DG). The proposed charging methodology separates distribution network costs due to the respective real and reactive power flows. The costs are then allocated to network users according to each charge for the actual line capacity used and available capacity. This distribution network charging model is able to provide the economic signals to reward network users who are contributing to better power factors, while penalizing customers who worsen power factors. The proposed method is shown on IEEE 37 bus system for distribution network, and then the results are validated through the comparison with the MW-Miles and MVA-Miles methods. The charges derived from the proposed method can provide appropriate incentives/penalties to network customers to behave in a manner leading to a better network condition..

Key Words : Network charging, Distribution generator, Distribution system

1. 서 론

오늘날 스마트그리드라는 새로운 패러다임이 등장함에 따라 전력 산업과 관련하여 국내외 많은 변화가 일어나고 있으며, 전력시장 자유화가 진행되면서 탈규제화 현상이 일어나고 있다. 과거 전력 산업은 일반적으로 발전, 송전 및 배전/판매 부문이 통합된 형태를 이루고 있었다. 이는 전력이라는 에너지가 저장이 어렵고, 전송속도가 빨라서 발전과 소비가 매 순간 항상 일치하여야 하는 특성을 갖기 때문에, 한 회사가 전력을 생산, 수송, 공급하는 수직 통합 체제가 더 효율적이고, 합리적인 것이라 판단했기 때문이다. 그러나 전력 사업의 규모가 비대화됨에 따라 사업의 독점과 규제의 한계에 따른 비효율성, 비경제성 문제가 대두되었으며, 이에 대한 대안으로 경쟁과 선택이라는 시장원리를 전력산업에 적용하기 위한 많은 연구가 수행되었다[1-2]. 그 결과 독점 형태로 운영되던 전력 산업에서도 다수의 시장참여 및 소비자가 공급자를 선택할 수 있는 경쟁체제의 도입방안이 제안되었다.

최근 정부는 에너지 효율의 향상을 위하여 신재생 에너지 비중을 장기적으로 늘려 간다는 발표를 한 바 있고, 탄소배출권, 환경문제, 에너지 가격 상승 등과 결부하여 신재생 에너지는 그 중요성이 더욱 부각될 것임이 자명하다. 신재생 에너지는 그 특성상 배전계통의 일부로서 투입되는 것이 일반적인데, 이런 분산 전원(DG: Distribution Generator)의 도입은 부하지역과 인접하게 이루어지므로 전력손실을 줄일 수 있는 방법이기도 하여 여러 측면에서 에너지 효율의 향상을 꾀할 수 있다. 또한 첨두부하에 대응력 감소, 운영비용 및 혼잡 감소 등의 다양한 이점을 가지고 있다. 이렇게 분산전원의 중요성이 부각되면서 분산전원의 계통 투입에 대한 영향을 배전 계획에 반영하려는 연구들이 진행되어 왔으나, 지금까지의 연구들은 주로 배전 손실량이나 정전 비용에 대하여 초점을 맞추어 분산전원의 적정 투입 위치 및 크기를 결정하는 연구가 대부분이다[3-5]. 따라서, 배전 및 판매 부분이 기존의 수직 독점 체제의 전력 회사로부터 분리가 되고, 실제적인 배전망 이용자에 대한 배전요금을 부과할 필요성이 대두되고 있다.

전력 시장에서 배전망은 송전망과 마찬가지로 자연 독점으로 남아 있으며, 분산 전원이 투입될 경우 송전망과 유사한 특징을 보일 것으로 예상된다. 따라서 배전망도 송전망과 마찬가지로 규모의 경제가 존재하기 때문에 독점으로 남아 있으며, 고정비가 설비비용의 많은 부분을 차지하고 있기 때문에 한계 비용으로는 고정비를 완전 회수하는 것이 불가능하다[6-8]. 결국 한계 비용을 반영한 요금제로는 투자비 회수가 보장되지 않기 때문에 규제자에 의해 결정될 필요가 있다. 이와 같은 이유로 배전요금제 역시 여러 가지 연구가 이루어지고 있으며, 특히 분산전원의 투입과 관련하여 적정한 배전요금 산정방법이 필요한 시점이다.

본 논문은 배전망 이용요금을 산정하는 방법에 대한 새로운 방법을 제안한다. 제안한 방법은 회수해야 하는 비용을

* 정 회 원 : ㈜포스코에너지 대리
† 교신저자, 정회원 : 동아대 전기공학과 조교수
E-mail : mith33@snu.ac.kr
** 펠로우 회원 : 서울대 전기공학과 교수
접수일자 : 2011년 9월 4일
최종완료 : 2012년 3월 22일

유효 전력 사용에 의한 비용과 무효 전력 사용에 의한 비용으로 구분하여, 각 요금에 대해 실제 선로 사용 용량에 대한 요금과 예비 설비 용량에 대한 요금으로 이원화해서 회수해야 하는 비용을 각 수용가에 배분한다. 즉 유효 전력과 무효 전력으로 인한 비용을 각각 구한 후, 그 비용을 사용해 각 수용가에 비용을 할당하는 방식을 사용한다. 따라서 본 논문에서는 배전망 이용요금 회수를 위한 새로운 방법 개발에 초점을 맞추고 기존의 선행연구와 비교해 보다 많은 비용을 회수 할 수 있는 동시에 분산 전원이 투입되었을 경우 유효 전력 및 무효 전력의 유·출입을 구별할 수 있는 방법에 대해 제안하고자 한다.

2. 배전망 비용의 특징

2.1 배전 설비비용

고정비가 대부분을 차지하는 배전 설비의 비용은 다음과 같은 특징을 갖고 있다. 먼저, 용량이 큰 설비를 건설할 때 평균 비용은 감소하는 경향이 있다[9]. 예를 들어, 22.9kV 설비와 6.6kV 설비를 건설하는 경우를 비교해보면 토지의 비용이나 공사비 등은 22.9kV 설비를 건설할 경우 조금 증가하는 반면, 설비를 이용해 수송할 수 있는 전력의 양은 10배 이상 증가한다. 따라서, 설비 용량이 증가하면 평균 비용은 오히려 감소한다. 다음으로, 용량이 규격화 되어 있기 때문에 용량은 비연속적으로 변한다. 부하가 증가하는 추세라면 대부분의 배전 용량은 부하의 증가를 고려하여 최적 용량보다 여유 있게 선택될 것이다. 따라서, 여분의 배전 용량으로 인해 발생하는 비용을 배전망 이용자에게 어떻게 배분할 것인지의 문제가 발생하게 된다.

2.2 배전망의 한계비용

이론적으로 가장 효율적인 요금체계는 한계 비용을 반영하는 요금체계이다[8]. 가격이 한계 비용과 일치할 때 가장 효율적인 자원 배분이 실현되기 때문이다. 하지만, 다음과 같은 어려움으로 인해 한계 비용을 충실히 반영하는 요금체계를 설계하는 것은 매우 어렵다. 첫째, 송·배전의 한계비용, 즉 전력을 한 단위 더 추가적으로 송·배전 하는데 소요되는 추가비용을 계측하는 것 자체가 매우 어렵고 비용이 많이 든다. 둘째, 한계 비용을 잘 계측했다 할지라도 요금체계가 한계 비용을 충실하게 반영할 수 있으려면 그 구조가 매우 복잡해질 수밖에 없다. 전력 공급의 한계 비용은 수요·공급상의 수많은 불확실한 요인에 의해 영향을 받게 되는데, 매 시점마다 한계 비용에 영향을 줄 수 있는 불확실한 요인들을 고려하여 시점 별, 상황 별로 요금을 차별화 시키는 것은 불가능에 가깝기 때문이다. 마지막으로, 송배전과 같이 규모의 경제가 존재하는 산업의 경우 한계비용에 근거한 요금만으로는 적절한 수입을 보장하기가 어렵다. 왜냐하면 배전망의 건설비용은 송·배전용량이 커질수록 평균 비용이 감소하는 특성을 갖고 있기 때문에, 평균 비용이 감소하는 동안은 평균 비용이 한계 비용을 상회하게 된다. 그림 1에서 보면 한계 비용 곡선과 평균 비용 곡선은 평균 비용 곡선의 최저점에서 교차하며, 교차점의 우측에서는 한계 비용이 평균 비용보다 크며 좌측에서는 평균 비용이 한계 비용보다 크다. 따라서 용량이 점 A의 우측에서 결정될 경우, 한계 비용을 적용하여도 비용회수가 가능하지만, 점 A의 좌측에서 결정된다면 한계 비용을 통해서는 비용회수가 불가능하며 추가적인 비용 회수 방법이 필요하다. 배전망의 경우 점 A의 좌측과 같은 특성을 갖기 때문에 한계 비용을 통해서는 완전한 비용 회수가 불가능하다.

결국 한계 비용에 기초한 요금 설계가 원활히 이루어지기 위해서는 대용량 및 소용량 고압, 저압 또는 용도별 수용가 집단들의 시간 별 부하패턴 그리고 이들 수용가 집단들이 요금 변화에 얼마나 민감하게 반응하는지에 대한 심층적인 분석과 이해가 선행되어야 하는데, 현실적으로는 시간 별 부하패턴을 측정하는 것 자체가 불가능하며 관리도 체계적이지 못해 신빙성 있는 분석 결과를 기대하기 힘들다. 따라서 배전망의 경우 한계 비용으로 비용을 회수하는데 한계가 있기 때문에 별도의 회수 방법을 마련하고 있는데, 가장 널리 사용되고 있는 방법은 평균 비용에 의존하는 총괄 비용법을 선호하고 있다.

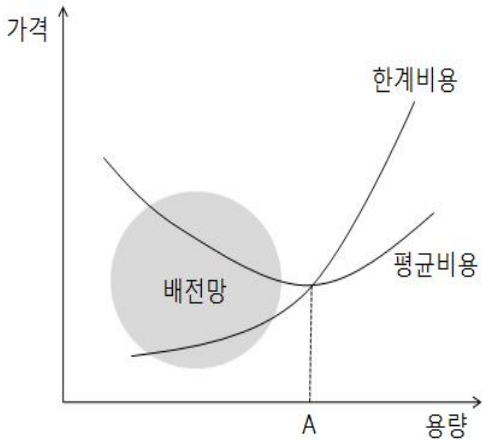

그림 1 한계비용과 평균비용
Fig. 1 Marginal cost and average cost

3. 기존의 배전망 이용요금 산정방법

3.1 MW-Mile법을 이용한 요금 산정 방식

배전 용량 및 배전 거리를 모두 고려해 배전망 이용료를 산정하는 방법을 총칭하여 거리 용량 병산제라고 한다. 그 중 MW-Mile법은 배전망의 회수 비용을 수용가의 유효 전력 조류에 비례하여 배분함을 원칙으로 한다[10]. 이 방법은 수용가의 다양한 경로의 전력 조류를 반영함으로써 기존에 사용되던 우편 요금제나 계약 경로 선정법 등의 단점을 보완한 방법이라 할 수 있다. MW-Mile법을 이용한 배전요금 산정은 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$C_{c_T} = \frac{\sum_T (MW_f)_T L_f}{\sum_T (\sum_f (MW_f)_T L_f)} \times C \tag{1}$$

여기서,
C_{c_T} : 고객 T를 위한 배전요금
C : 회수 되어야 할 비용
$(MW_f)_T$: 고객 T에 의해 배전선로 f에 발생한 유효전력
L_f : 배전선로 f의 길이

이 방법은 새로운 계약이 체결되면, 그에 따른 전력 조류 영향 평가만 하면 되므로 비교적 간단하다고 할 수 있다. 하지만, 분자의 값이 분모보다 작을 경우 비용을 완전히 회수할 수 없다는 점에서 이론적 결함이 있다. 일반적으로 계통 안정도 및 비상시를 대비해, 모든 배전망은 정격 용량에 비해 적은 수준의 전력 조류만을 허용하므로, 이 방법을 사용하기 위해서는 수익을 보정할 수 있는 다른 방법에 대한 연구도 필요하다. 또한, 분산 전원이 투입되거나 기타 여러 가지 경우에 있어 무효 전력이 유입 혹은 유출될 경우 이 방법으로는 무효 전력을 구분할 수 없기 때문에 무효 전력의 영향을 고려할 수 없다[11].

3.2 MVA-Mile법을 이용한 요금 산정 방식

이 방법은 앞서 설명한 MW-Mile법을 보완한 방법으로 유효 전력과 무효 전력을 동시에 고려할 수 있고, 수용가의 역률을 고려해 비용을 배분하는 방법이다[12-13]. 이 방법은 우선 고객 T로 인해 발생하는 피상 전력을 계산하고, 그 결과값을 이용해 비용을 배분하게 된다. 따라서 MVA-Mile법을 이용한 배전요금 산정은 다음 식으로부터 계산 될 수 있다.

$$C_{c_T} = \frac{\sum_T (MVA_f)_T L_f}{\sum_T (\sum_f (MVA_f)_T L_f)} \times C \tag{2}$$

$$MVA_f = \sqrt{P_f^2 + Q_f^2} \tag{3}$$

여기서,
$(MVA_f)_T$: 고객 T에 의해 배전선로 f에 발생한 무효전력
P_f : 배전선로 f의 유효 전력
Q_f : 배전선로 f의 무효 전력

그러나 MVA-Mile법은 피상전력을 고려하기 때문에 무효 전력의 유·출입을 구별하기 어려울 뿐만 아니라, 분산전원의 도입으로 발생 가능한 역조류를 반영하지 못하는 문제가 있다.

4. 제안된 비용 배분 방식을 이용한 배전망 이용요금 산정방법

배전망 이용요금은 경제적 효율성과 재무적 충분성을 기본 원칙으로 하고 있다. 물론 이전의 장에서 본 MW-Mile법이나 MVA-Mile법도 배전망 사용자의 사용에 대한 적절한 신호를 제공하고 효율적인 소비를 유도하며 배전 회사의 생존을 위해 적정한 수입을 보장하고는 있다. 하지만, MW-Mile법은 유효 전력만을 고려하기 때문에 분산 전원이 투입 되었을 경우, 정확한 비용 배분의 효과를 기대하기 어렵고, 반면에 MVA-Mile법은 피상 전력을 고려하기 때문에 역률에 대한 고려가 이루어질 수 없는 문제가 발생한다. 이와 같은 이유로 무효 전력의 유·출입을 구별하는 동시에 역률의 좋고 나쁨에 따라 비용 배분을 차별화할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 유효 전력으로 인한 비용과 무효 전력으로 인한 비용을 구분해서 각각을 구한 후, 실제 선로 사용량에 대한 요금과 여유 설비(선로 용량에서 실제 사용량을 제외한 양)에 대한 요금으로 이원화해서 각각을 구하는 방법이다. 사용량에 대한 요금은 실제 배전망에 흐르는 전력량을 기준으로 한 것이고, 예비 설비에 대한 요금은 배전망의 선로 용량 가운데 사용량에 대한 요금을 산정하기 위한 기준이 되는 용량을 제외한 나머지 용량에 대한 비용 회수분이다. 기본 용량은 실제 전력 조류에 직접적인 영향을 주는 거래에 의해서만 형성되는 용량이지만, 예비 용량은 거래의 유연성뿐만 아니라 계통 신뢰도 및 안전도 등에 기여하는 부분으로 계통 진입자 모두에게 혜택을 주게 되는 부분이다.

4.1 유·무효 전력 사용에 따른 회수 비용의 구분

임의의 배전선로 f에 대해, 피상 전력과 유효 전력, 그리고 무효 전력 사이의 관계를 그림 2와 같다.

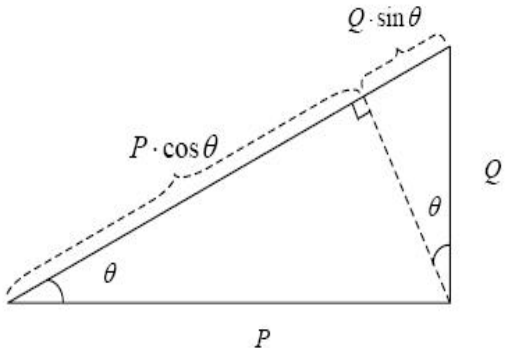

그림 2 피상 전력과 유효 전력, 무효 전력의 관계
Fig. 2 Relationship between real, reactive and apparent power

이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_f = P_f \cdot \cos\theta_f + Q_f \cdot \sin\theta_f \tag{4}$$

따라서, 피상전력 Sf와 관련된 비용, 즉 회수 되어야 하는 비용이 C_f라고 하면 유효 전력 사용으로 인한 비용은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$C_{P,f} = \frac{P \cdot \cos\theta}{S_f} \times C_f \tag{5}$$

여기서,
$C_{P,f}$: 모든 배전설비에 대하여 유효전력으로부터 회수해야 할 비용

한편, 그림 2에서도 확인할 수 있듯이 피상 전력과 유효 전력은 식 (6)과 같이 나타낼 수도 있다.

$$S_f = \frac{P}{\cos\theta} \tag{6}$$

이때, 식 (5)를 식 (6)에 대입하면 식 (7)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$C_{P,f} = \frac{P \bullet \cos\theta}{\frac{P}{\cos\theta}} \times C_f = \cos^2\theta \times C_f \tag{7}$$

무효 전력의 사용으로 인한 비용도 앞서 설명한 방법과 마찬가지 방법으로 구할 수 있다.

$$C_{Q,f} = \frac{Q \bullet \sin\theta}{\frac{Q}{\sin\theta}} \times C_f = \sin^2\theta \times C_f = (1-\cos^2\theta) \times C_f \tag{8}$$

여기서,

$C_{Q,f}$: 모든 배전설비에 대하여 무효전력으로부터 회수해야 할 비용

4.2 회수 비용의 배분 방식

식 (7)과 식 (8)을 이용하여 회수 비용을 유·무효 전력 사용에 따라 구분을 한 후 실제 선로 사용량에 대한 요금과 예비 설비(선로 용량에서 실제 사용량을 제외한 양)에 대한 요금으로 이원화해서 각각을 구하고자 한다. 우선 실제 선로 사용량에 대한 요금에 대해서는 최종 전력 조류의 사용 용량을 계산해서 그 용량을 기준으로 비용을 배분한다. 따라서 비용 계산을 위해서는 먼저 개별 배전 거래의 전력 조류 방향을 파악한 후, 식 (9)와 같이 전력량에 비례해서 비용을 부과하게 된다.

$$P_{Bu} = C_{Bk} \bullet a_k^u \quad where \;\; a_k^u = \frac{f_k^u}{\sum_{u=1}^{n} f_k^u} \tag{9}$$

여기서,

P_{Bu} : 실제 사용한 용량에 대한 회수비용

a_k^u : 실제 선로 사용량에 대한 배전망 이용자의 비용 배분 계수

u : 배전망을 이용하는 이용자 인덱스

C_{Bk} : 실제 사용한 용량에 대한 비용

이 부분에서 주의해야 할 것은, 식 (9)의 계산에서 비용 회수의 기본이 되는 비용은 식 (10)과 같이 실제로 사용한 용량에 대한 비용만을 이용한다는 것이다.

$$C_{Bk} = C_k \bullet \frac{f_k}{T_k} \tag{10}$$

여기서,

C_k : 전체 선로 용량에 대한 비용

T_k : 전체 선로 용량,

f_k : 임의의 배전선로 f의 최종 조류량

다음으로 여유 용량에 대한 비용은 전체 비용에서 식 (10)에 해당하는 부분을 제외한 나머지 부분을 배분하여 회수하게 된다.

$$P_{Ru} = C_{Rk} \bullet b_k^u \times (1-r) \; where \; b_k^u = \frac{|f_k^u|}{\sum_{u=1}^{n} |f_k^u|} \tag{11}$$

여기서,

C_{Rk} : 여유 용량에 대한 비용

b_k^u : 선로의 여유 용량에 대한 배전망 이용자의 비용 배분 계수

r : 목표 배전 설비 이용률

여기서 주의해야 할 것은, 식 (11)의 계산에서 비용 회수의 기본이 되는 비용은 식 (12)와 같이 예비 용량에 대한 비용만을 이용한다는 점이다.

$$C_{Rk} = C_k \bullet \frac{T_k - f_k}{T_k} \tag{12}$$

여유 용량은 거래의 유연성뿐만 아니라 계통 신뢰도 및 안전도 등에 기여하는 부분으로서 계통 진입자 모두에게 혜택을 주게 되므로 배전망을 실제 이용하는 이용자 모두로부터 회수하는 것은 타당하다고 할 수 있다. 하지만, 사용하지 않은 설비에 대해 100%를 부과할 경우 수용가 측의 반발이 예상된다. 배전망 사업자가 배전 설비 공사에 대한 계획을 할 경우, 목표 설비 이용률을 고려해서 계획을 짜게 된다. 배전 설비 이용률이 목표치를 초과할 경우 배전 설비의 추가적인 투입을 계획하게 되는 것이다. 즉, 설비를 안정적으로 이용하기 위한 최소한의 마진을 고려해서 배전 설비 공사를 계획하게 되는데, 이 값이 바로 목표 배전 설비 이용률이다[14]. 여유 용량에 대해서는 사용하지 않는 부분에 대해서 회수하는 비용이므로 최소한의 마진으로 비용을 회수하는 것이 수용가의 반발을 최소화하면서 보다 많은 비용을 회수할 수 있는 방법이 될 것이다. 이런 이유로 본 논문에서는 여유 용량에 대한 비용 중 일부분만 회수하는 방식을 채택한다.

마지막으로 식 (9)와 식 (11)에서 각각 구한 비용을 통해 각 수용가로부터 회수 받을 수 있는 총비용을 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_T = \sum_{u=1}^{n} P_{Bu} + \sum_{u=1}^{n} P_{Bu} = P_B + P_R \tag{13}$$

5. 사례연구

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 그림 3과 같이 배전용 IEEE 37 모선 시스템을 사용하였다[15]. 표 1과 표 2는 이 시스템의 선로 및 모선 데이터를 보여준다. 본 사례 연구에서는 앞서 설명한대로, 회수해야 할 비용을 유효 전력과 무효 전력으로 인한 비용으로 각각 구분한 뒤, 다시 그 비용을 실제 사용하는 용량에 대한 비용과 예비 용량에 대한 비용으로 나누어 구한 후 각 비용을 합하여 수용가에 배분되는 비용을 계산했다. 회수해야 하는 비용은 회수 비율을 살펴보기 위해 ₩10,000,000이라 가정했고, 선로의 정격 용량은 200MVA로 두었다. 또한 대한민국의 목표 설비 이용률은 75%이므로, 본 연구에서는 r=75%로 두고 시뮬레이션을 하였다.

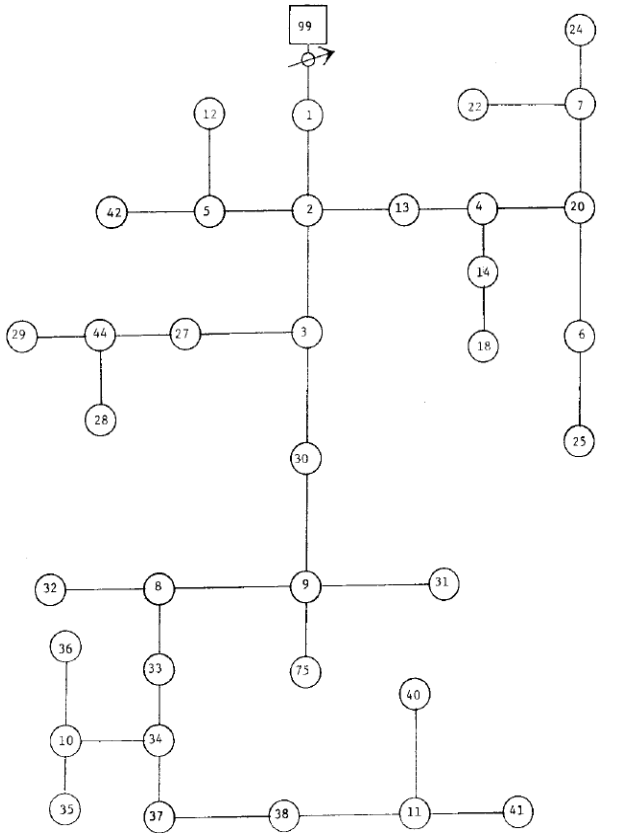

그림 3 IEEE 37 모선 시스템
Fig. 3 IEEE 37-Bus System

표 1 선로 데이터
Table 1 Line data

i	j	r	x
01	02	0.000200	0.000136
02	05	0.000083	0.000057
02	13	0.000075	0.000051
02	03	0.000275	0.000187
03	27	0.000050	0.000034
03	30	0.000125	0.000085
04	14	0.000017	0.000011
04	20	0.000167	0.000113
05	42	0.000067	0.000045
05	12	0.000050	0.000034
06	25	0.000058	0.000040
07	24	0.000158	0.000108
07	22	0.000025	0.000017
08	33	0.000067	0.000045
08	32	0.000067	0.000045
09	31	0.000125	0.000085
09	08	0.000067	0.000045
10	35	0.000042	0.000028
10	36	0.000267	0.000181
11	41	0.000083	0.000057
11	40	0.000042	0.000028
13	04	0.000108	0.000074
14	18	0.000108	0.000074
20	07	0.000192	0.000013
20	06	0.000125	0.000085
27	44	0.000058	0.000004
30	09	0.000042	0.000028
33	34	0.000117	0.000079
34	37	0.000133	0.000091
34	10	0.000108	0.000074
37	38	0.000083	0.000057
38	11	0.000083	0.000057
44	28	0.000042	0.000028
44	29	0.000058	0.000004
75	09	0.000002	0.000011
99	01	0.000386	0.000262

표 2 모선 데이타
Table 2 Bus data

Bus No.	P	Q
35	-0.85	-0.4
10	0.0	0.0
36	-0.42	-0.21
34	0.42	0.21
37	1.4	0.7
38	1.26	0.62
11	0.0	0.0
40	0.85	0.4
41	0.42	0.21
33	0.85	0.4
32	0.42	0.21
08	0.0	0.0
13	0.85	0.4
04	0.0	0.0
14	0.38	0.18
18	0.85	0.4
20	0.85	0.4
06	0.0	0.0

07	0.0	0.0
24	0.42	0.21
22	1.61	0.8
31	0.85	0.4
75	0.0	0.0
09	0.0	0.0
30	0.85	0.4
03	0.0	0.0
27	0.42	0.21
44	0.42	0.21
29	0.42	0.21
28	1.26	0.63
02	0.0	0.0
05	0.0	0.0
42	0.93	0.44
12	0.85	0.4
01	6.3	3.15
25	0.42	0.21

5.1 분산전원 도입 전 결과분석

우선 회수해야 하는 비용 ₩10,000,000을 유효 전력으로 인한 비용과 무효 전력으로 인한 비용으로 각각 구분하여 다음과 같이 계산된다.

$$C_{P,f} = \cos^2(26.57^\circ) \times 10000000 = 7999309 \tag{14}$$

$$C_{Q,f} = \sin^2(26.57^\circ) \times 10000000 = 2000691 \tag{15}$$

기본 용량에 대한 배분 비용을 구하기 위해서 먼저 다음과 같이 실제로 선로를 통해 흐르는 조류량을 이용해 기본 용량에 대한 회수 비용을 산출한다.

$$C_{P,Bk} = 7999309 \times \frac{42}{178.88} = 1878192 \tag{16}$$

$$C_{Q,Bk} = 2000691 \times \frac{21}{89.46} = 469646 \tag{17}$$

이때, 각 수용가에 배분되는 비용을 구하기 위해서는 비용 배분 계수를 구해야 하는데, 이 경우는 비용 배분 계수가 1이 되므로 식(16)과 식(17)에서 구한 결과를 합한 값이 기본용량에 대해 배분된 비용이 된다. 결국 기본 용량에 대해 배분된 비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_B = 1878192 + 469646 = 2347838 \tag{18}$$

다음으로, 여유 용량에 대한 배분 비용을 구한다. 우선 여유 용량에 대한 회수 비용은 전체 회수 비용에서 기본 용량에 대한 회수 비용을 뺀 나머지 금액이므로, 이를 계산하면 다음과 같다.

$$C_{P,Rk} = C_{P,f} - C_{P,Bk} = 6121117 \tag{19}$$

$$C_{Q,Rk} = C_{Q,f} - C_{Q,Bk} = 1531045 \tag{20}$$

이 경우도 비용 배분 계수는 1이고, 여유 용량에 대해 배분된 비용은 위에서 구한 금액의 25%만 회수하게 되므로, 여유 용량에 대한 배분비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_R = 0.25 \times (6121117 + 1531045) = 1913041 \tag{21}$$

그러므로 식 (18)과 식 (21)에 의해 총 회수할 수 있는 비용은 ₩4,260,878이 된다.

5.2 역률에 따른 배분 비용의 차이

역률에 따른 배분 비용의 차이를 알아보기 위해 모선 24번이 수용가 1=0.2+j0.08과 수용가 2=0.22+j0.13로 나눠진 역률이 서로 다른 부하라고 가정하자. 제안한 방법으로 두 부하에 배분되는 비용을 구하고자 할 때 먼저 기본 용량에 대한 배분비용은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{B1} = \frac{0.2}{0.42} \times 1878191.961 + \frac{0.08}{0.21} \times 469645.775 = 1073290 \tag{22}$$

$$P_{B2} = \frac{0.22}{0.42} \times 1878191.961 + \frac{0.13}{0.21} \times 469645.775 = 1274548 \tag{23}$$

여기서, P_{B1} 과 P_{B2} 는 각각 수용가 1과 수용가 2에 배분되는 기본 용량에 대한 비용이다.

여유 용량에 대한 배분 비용도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{R1} = \frac{0.2}{0.42} \times 6121117.039 + \frac{0.08}{0.21} \times 1531045.225 = 3498072.961 \tag{24}$$

$$P_{R2} = \frac{0.22}{0.42} \times 6121117.039 + \frac{0.13}{0.21} \times 1531045.225 = 4154089.303 \tag{25}$$

여기서, P_{B1} 과 P_{B2} 는 각각 수용가 1과 수용가 2에 배분되는 예비 용량에 대한 비용이다.

따라서 25%만 회수하므로 각 수용가에 배분되는 비용은 다음과 같다.

$$P_1 = P_{B1} + 0.25 \times P_{R1} = 1947808 \tag{26}$$

$$P_2 = P_{B2} + 0.25 \times P_{R2} = 2313070 \tag{27}$$

식 (26)과 식 (27)을 이용해 계산된 결과를 보면 수용가 2(₩2,313,070)가 수용가 1(₩1,947,808) 보다 많은 비용을 부담함을 알 수 있다. 이는 수용가 1에 비해 수용가 2의 역률이 낮기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 수용가 1이 수용가 2에 비해 더 좋은 역률을 갖고 있으므로 배분된 비용이 적음을 확인할 수 있고. 결국, 제안한 방법을 통해 비용을 배분할 경우 역률에 따라 배분 비용을 차별화됨을 알 수 있다.

5.3 분산전원 도입 후 결과분석

이번에는 분산전원이 도입된 배전 계통을 위해, IEEE 37

시스템의 24번 모선에 분산 전원을 투입시켜 시뮬레이션 하였다. 분산전원의 수용가 특성을 표 3과 같이 4가지 Case들로 구성하였다.

표 3 수용가 특성
Table 3 Customer characteristics

	분산전원	부하
Case 1	-0.3+j0.3	0.42+j0.21
Case 2	-1.0+j0.3	0.42+j0.21
Case 3	-0.3-j0.1	0.42+j0.21
Case 4	-1.0-j0.1	0.42+j0.21

분산 전원이 투입된 24번 모선의 각 Case 별 조류계산 결과값을 표 4에 제시하였고, 그에 따른 자세한 배전요금 배분 결과는 표 5에 나타내었다.

표 4 24번 모선의 각 Case 별 조류계산 결과
Table 4 Power flow results for Bus 24

	Bus 24			
	P	Q	V	Θ
Case 1	0.12	0.51	0.982	-0.100
Case 2	-0.58	0.51	0.983	-0.069
Case 3	0.12	0.11	0.982	-0.131
Case 4	-0.58	0.11	0.983	-0.099

Case 1의 경우, 분산 전원의 투입으로 인해 유효 전력량이 줄고, 무효 전력량이 증가되었다. 이는 분산 전원이 유효전력량을 줄이기 때문에 이 부분에 대해서는 보상을 해주고, 대신 무효 전력량은 증가시키기 때문에 이 부분에 대해서는 비용을 부과한 경우이다. 부하측면에서 보면 분산전원에서 발전한 유효전력을 사용하면 되므로, 그만큼 해당 모선을 덜 사용하게 되므로 분산전원 투입 전보다 배전망 사용요금이 감소한다. 반면 무효 전력의 경우, 분산전원의 투입으로 해당 모선의 무효 전력 조류가 증가하게 되어 그만큼 더 사용하게 된다. 이는 부하로 인해 더 사용하게 되는 것은 아니지만, 해당 모선의 무효 전력 조류가 증가하는 부분에 대해서는 사용 요금이 증가되었음을 보여주는 결과이다. Case 2는 분산 전원의 투입으로 인해 유효 전력 및 무효 전력량 둘 다 증가하게 된 경우이다. 분산 전원의 투입으로 인해 전력량이 증가했으므로, 분산 전원에 비용이 배분된다. 즉, 분산 전원은 발전을 하고서도 계통에 부적절한 양을 발전했으므로, 그에 대한 패널티 성격으로 비용을 부담하게 되는 것이다. 이를 통해서, 부적절한 크기의 분산 전원은 계통에 진입하지 못하게 하는 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다. 부하측면에서 보면 분산전원에서 발전한 유효전력이 해당 모선의 부담을 줄여주는 역할을 하므로 이에 대한 보상을 받게 된다. 무효전력의 경우, Case 1과 마찬가지로 해당 모선의 무효전력 조류량이 증가하는 부분에 대한 사용요금이 증가하게 된다. Case 2와 반대로 Case 3은 분산 전원이 투입되어 유효 전력 및 무효 전력량이 감소하는 경우이다. 이 경우 분산 전원의 투입으로 유효 전력 및 무효 전력량이 감소했으므로, 그에 대한 보상이 이루어지고, 분산 전원은 전체적으로 보상받게 되어 분산 전원 사업자로서는 이 경우가 가장 좋은 사례라고 할 수 있다. 부하측면에서 보면 분산전원에서 발전한 유효전력 및 무효전력을 사용하면 되므로, 해당 모선을 사용하지 않기 때문에 그만큼 배전망 사용요금을 감소시키는 효과를 볼 수 있다. 또한 Case 1과 비교하여 금액이 차이가 나는 것은 역률 차로 인해 유효전력으로 인한 회수 비용과 무효전력으로 인한 회수비용의 차이가 발생하기 때문이다. 마지막으로 Case 4는 분산 전원의 투입으로 인해 유효 전력량이 증가되고 무효 전력량이 감소되는 경우가 되겠다. 이 경우는 과다한 유효 전력 생산으로 인해 분산 전원 사업자는 비용을 부담하게 되고, 수용가 측에서는 전력을 소비하고도 보상받게 되는 기형적인 요금 배분 형태가 된다. 즉, 분산 전원 사업자는 시스템에 부적절한 크기의 분산 전원 투입을 배제하게 된다. 부하측면에서 보면 분산전원에서 발전한 유효전력을 사용하여 해당모선의 부담을 줄여주는 역할을 하기 때문에 이데 대한 보상을 받는 것이 합리적이다. 무효전력의 경우, Case 3와 마찬가지로 분산전원에서 발전한 무효전력을 사용하여 해당 모선을 사용하지 않게 되기 때문에 그만큼 배전망 사용요금이 줄어드는 효과를 보여준다.

결론적으로 제안한 방법은 유효 전력과 무효 전력의 방향이 반대일 경우, 그로 인해 발생되는 비용을 구별해서 이를 회수 혹은 보상해줌으로써 기존의 방법보다 효율적인 비용 배분 효과를 기대할 수 있고, 또한 기존의 방법보다 비용 회

표 5 각 Case별 배전요금
Table 5 Distribution charges for four Cases

Case	요금	기본용량		여유용량		합 계
		유효전력	무효전력	유효전력	무효전력	
1	부하	₩480,924	₩1,022,110	₩56,459	₩719,886	₩2,279,379
	분산전원	-₩345,517	₩1,508,830	₩40,328	₩1,028,409	₩2,234,050
2	부하	-₩1,579,967	₩693,409	₩255,924	₩275,596	-₩352,038
	분산전원	₩3,754,684	₩990,585	₩609,343	₩393,709	₩5,748,321
3	부하	₩1,548,054	₩709,525	₩727,962	₩710,326	₩3,695,867
	분산전원	-₩1,105,753	-₩337,869	₩519,973	₩338,250	-₩585,399
4	부하	-₩2,063,178	₩195,673	₩503,081	₩41,454	-₩1,322,970
	분산전원	₩4,912,329	-₩93,177	₩1,197,813	₩19,740	₩6,036,705

수 측면에서 더 많은 비용을 회수할 수 있을 뿐만 아니라 부적절한 크기의 분산 전원이 투입되지 않도록 하는 효과도 얻을 수 있었다.

5.4 기존의 방법들과의 비교

제안한 방법의 타당성을 증명하기 위해 기존의 MW-Mile 법과 MVA-Mile법을 비교 분석을 통한 산출된 비용의 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6 MW-Mile법, MVA-Miles법, 그리고 제안된 방법 비교
Table 6 Comparison with the MW-Miles, MVA-Miles, and proposed methodologies

방법	Case	부하	분산 전원	회수되지 않는 비용
MW-Mile법	Base (w/o DG)	₩2,100,000	₩0	₩7,900,000
	1	₩2,100,000	-₩1,500,000	₩9,400,000
	2	-₩2,100,000	₩5,000,000	₩7,100,000
	3	₩2,100,000	-₩1,500,000	₩9,400,000
	4	-₩2,100,000	₩5,000,000	₩7,100,000
MVA-Mile법	Base (w/o DG)	₩2,348,000	₩0	₩7,652,000
	1	₩2,348,000	-₩2,121,500	₩9,773,500
	2	-₩2,348,000	₩5,220,000	₩7,128,000
	3	₩2,348,000	-₩1,581,000	₩9,223,000
	4	-₩2,348,000	₩5,025,000	₩7,323,000
제안된 방법	Base (w/o DG)	₩3,495,662	₩0	₩5,739,122
	1	₩2,279,379	₩2,234,050	₩5,486,571
	2	-₩352,038	₩5,748,321	₩4,603,717
	3	₩3,695,867	-₩585,399	₩3,110,468
	4	-₩1,322,970	₩6,036,705	₩5,286,265

MW-Mile법은 배전망의 회수 비용을 수용가의 유효 전력량에 비례하여 배분함을 원칙으로 한다. 따라서, 이 방법은 표 6의 결과에서도 나타나듯이, 각 수용가의 역률을 구별하지 못하고, 단순히 유효 전력량에 비례해서 비용이 배분됨을 알 수 있다. 또한, 분산 전원이 투입되어 유효 전력을 유입시키고 무효 전력을 유출시킬 경우 무효 전력 사용에 대한 비용은 회수되지 않고, 유효 전력 유입에 대한 보상만 이루어지기 때문에 회수되지 않는 비용이 상당히 많음을 알 수 있고, 그 결과 효율적인 비용 배분의 효과를 기대하기 어렵다고 할 수 있다. 한편, MVA-Mile 법은 분산 전원이 투입되어 유효 전력을 유입시키고 무효 전력을 소비할 경우 무효 전력 사용에 대한 비용을 회수하기 보다는 분산 전원으로 인해 유입되는 피상 전력에 대한 보상만을 해주고 있다. 즉, 무효 전력의 유·출입에 대한 구별 없이 분산 전원이 투입되었을 경우 유입되는 피상 전력에 대한 보상만을 해주기 때문에 효율적인 자원의 배분이 이루어진다고 볼 수 없다. 이에 반해 제안한 방법은 유효 전력과 무효 전력의 방향이 반대일 경우, 그로 인해 발생되는 비용을 구별해서 이를 회수 혹은 보상해줌으로써 기존의 방법보다 효율적인 비용 배분 효과를 기대할 수 있다. 또한, 기존의 방법보다 비용 회수 측면에서 더 많은 비용을 회수할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다시 말해서, 무효 전력의 유·출입을 구별하여 무효 전력을 소비할 경우에는 이에 대한 정당한 요금을 부과하고, 그 반대의 경우는 보상을 해주는 방식으로 기존의 방법보다 효율적인 자원의 배분을 이룰 수 있다는 해석이 가능하다.

3. 결 론

오늘날 배전, 판매 부분이 기존의 수직 독점 체제의 전력회사로부터 분리되어 나오고 분산전원의 도입이 이루어지면서 배전 부분에 새로운 패러다임을 요구하고 있다. 이에 배전비용을 회수할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하며, 배전망이 가진 특성 때문에 한계 비용을 반영한 요금제로는 투자비를 모두 회수하기 어렵기 때문에 적절한 배전망 이용요금을 정책적으로 정할 필요가 있다. 본 논문은 배전망 이용요금을 산정하는 새로운 방법을 제안하였고, 그 방법의 타당성에 대해 검토해보았다. 제안된 방법을 IEEE 37모선 시스템을 통해 사례 연구 하였으며, 사례 연구를 통하여 기존의 방법과 비교했을 때 본 논문에서 제안한 방법은 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 수용가의 역률에 따라 비용 배분의 차별화가 가능하다. 수용가의 역률이 좋을 경우는 그렇지 않을 경우에 비해 적은 비용을 배분 받게 되는데, 결론적으로 수용가의 역률이 좋을 경우는 보상을 받게 되고 좋지 않을 경우는 페널티를 부과 받는다고 해석이 가능하다. 둘째, 분산 전원이 투입될 경우 무효 전력 사용에 대한 비용을 회수할 수 있다. 기존의 방법은 무효 전력의 유·출입에 대한 구별 없이 분산 전원이 투입되었을 경우 유입되는 피상 전력에 대한 보상만을 해주기 때문에 효율적인 자원의 배분이 이루어진다고 볼 수 없다. 이에 반해 제안한 방법은 무효 전력의 유·출입을 구별하여 무효 전력을 소비할 경우에는 이에 대한 정당한 요금을 부과하고, 그 반대의 경우는 보상을 해주는 방식으로 기존의 방법보다 효율적인 자원의 배분을 이룰 수 있다. 마지막으로 부적절한 크기의 분산 전원이 계통에 투입될 경우 망의 용량을 초과하거나 배전망 손실에 역효과를 주어 전력 조류를 크게 변화시킬 수 있다. 제안한 방법은 그러한 부적절한 크기의 분산 전원이 투입될 경우 패널티를 부과하여 발전을 하고서도 비용을 부담해야 하는 결과를 초래해 분산전원(배전) 사업자로 하여금 부적절한 크기의 분산 전원이 계통에 투입되지 않도록 하는 효과도 기대할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Mohammad Shahidephour, Hatim Yamin and Zuyi Li, “Market Operations in Electric Power Systems”, Wiley Interscience, 2002

[2] Mun-Kyeom Kim, Young-Woo Nam, Jong-Keun Park, “Market-clearing for pricing system security based on voltage stability criteria”, Energy, Vol. 36, No. 2, pp.1255-1264, February 2011.
[3] M. F. alHajri, M. E. El-Hawary, “Improving the voltage profiles of Distribution Network using multiple Distribution Generation Sources”, IEEE Power Engineering, 2007 Large Engineering Systems Conference, 10-12, pp.295-299, Oct. 2007.
[4] N. Hadjsaid, J. F. Canard, and F. Dumas, “"Dispersed generation impact on distribution networks,"” IEEE Comput. Appl. Power, Vol. 12, pp.22-28, Apr. 1999
[5] T.Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, “"Placement of dispersed generation systems for reduced losses,"” in Proc. 33rd Annu. Hawaii Int.Conf. Systems Sciences, Maui, HI, 2000.
[6] Dariush Shirmohammadi, Xisto Vieira Filho, Boris Gorenstin and Mario V. P. Pereira, “Some Fundamental Technical Concepts About Cost Based Transmission Pricing”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 1002-1008, May. 1996
[7] Pan Jiupong, Teklu Yonael, Rahman Saifur and Jun Koda, “Review of Usage-Based Transmission Cost Allocation Methods under Open Access”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1218-1224, November 2000.
[8] Steven Stoft, “Power System Economics - Designing Markets for Electricity”, John Wiley & Sons, 2002.
[9] 대한전기학회, “최신 배전 시스템 공학”, 2011. 7.
[10] Haap H. H, “Cost of Wheeling Methodologies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994, pp.147-156.
[11] S. N. Liew and G. Strbac, “Maximizing Penetration of Wind Generation in Existing Distribution Networks”, IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., Vol. 149, No. 3, pp. 256-262, May. 2002.
[12] Li, F., Padhy, N.P., Wang, J., Kuri, B., “Cost-Benefit Reflective Distribution Charging Methodology”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, Issue 1, Feb. 2008, pp. 58-64.
[13] Li, F., Padhy, N. P., Wang, J., Juri, B., “MW+MVAr-mile based distribution charging methodology”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
[14] 산업자원부, “전력 산업 기능별 분리에 따른 요금 결정 원칙 검토 및 새로운 요금 산정 기준 마련”, 2004. 4
[15] IEEE Distribution Planning Working Group Report, “Radial distribution test feeders”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 975-985, August 1991

저 자 소 개

황 석 현 (黃 石 賢)

1978년 3월 3일 생. 2005년 고려대 전기전자전파공학부 졸업. 2009년 서울대 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 현재 포스코에너지 대리
Tel : 02-3457-2084
E-mail : sh.hwang@poscoenergy.com

김 문 겸 (金 文 謙)

1976년 9월 12일 생. 2004년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 2011년~현재 동아대학교 공과대학 전기공학과 조교수.
Tel : 051-200-7733
E-mail : mkkim@dau.ac.kr

박 종 근 (朴 鍾 根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대학교 공학계 대학원 졸업(공학석사).1982년 동대학원 졸업(공학박사). 1983년-현재 서울대학교 공과대학 전기공학과 조교수, 부교수, 교수.
Tel : 02-880-7247
E-mail : parkjk@snu.ac.kr