

A Study on Cost Evaluation for Capacitive Reactive Power

鄭春植* · 朴正道** · 文永鉉***

(Choon-Shik Jung · Jeong-Do Park · Young-Hyun Moon)

Abstract - In this paper, the cost for capacitive reactive power is evaluated considering the deregulation environment. For the cost assessment of reactive power, the duration curve of reactive power demand is introduced and investigated. Also, a guideline is suggested to estimate the Q-cost by using the inverse of the Q-demand duration curve. In order to obtain optimal real reactive power allocation, a new algorithm is proposed by using the piecewise linearization of the inverse of the Q-demand duration curve and the Linear Programming technique. The proposed method is tested with sample systems using MATLAB. The test results show that the algorithm yields reasonable reactive power allocation and provides fair cost evaluation for reactive power.

Key Words : Cost Evaluation, Capacitive Reactive Power, Reactive Power Allocation

1. 서 론

최근 국내외 많은 분야에서 변화가 일어나고 있으며, 국내의 전력산업 역시 세계적인 추세와 여건의 변화에 의하여 구조개편이 현실로 다가오게 되었다. 전력을 자유시장 거래화하기 위해서 그 동안 적용되던 대부분의 규정들이 철폐되어야 하는 탈규제(deregulation)현상도 이미 가시화되고 있다. 이러한 상황에서 최근 국내 산업시장에서도 경쟁이 치열해짐에 따라 전력 가격이 주요 생산요소로서 작용하게 되어, 경제성이 고려된 전력계통의 운용과 이로 인한 경비 절감의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

전력계통의 주된 목적은 유효, 무효전력의 공급이며, 전력은 석탄, 석유, 가스, 수력 또는 원자력 등의 아주 큰 에너지를 사용하여 생산된다. 이러한 대규모 자원을 효율적으로 운용하기 위하여 전력계통을 경제적으로 운용하기 위한 다양한 방법이 고안되어왔다. 전력계통의 경제적인 운용은 선정된 발전기의 최적 경제 발전량을 선정하는 경제급전(ELD: Economic Load Dispatch)과 발전기의 투입 여부를 결정하는 기동정지계획(UC: Unit Commitment)의 두 가지에 의하여 주로 수행되었다[1]. 기동정지계획과 경제급전은 경제적인 전력계통 운영에 있어서 가장 중요한 부분으로 인식되어 왔고, 이러한 이론들은 모두 필요한 유효전력량에 따라 총 발전 비용을 결정하기 때문에 단지 유효전력의 생산비용에 초점을 맞추어 이론이 전개되었다.

실제적인 전력계통 운영에 있어서 소요되는 발전비용에는

설비투자비용, 설비운영비용, 감가상각비 등과 같은 추가비용이 포함되고, 이들 비용에는 무효전력을 보상시키기 위한 SC, SHR, LRC 등과 같은 전압제어 설비비용도 포함되어 있다. 그러나 지적인 바와 같이 무효전력에 대한 추가비용이 소요됨에도 불구하고 무효전력 비용 산정을 위한 기준이나 이론은 지금까지 마련되지 않고 있다. 하지만, 전력산업의 탈규제된 환경에서 어찌면 소비자에게 전가될지도 모르는 설비투자비용, 설비운영비용 등의 무효전력에 대한 추가비용은 누군가가 어떠한 형태로든 부담해야 한다.

본 논문은 상기 언급한 무효전력에 대한 최적의 비용 산정에 대하여 연구하였다. 무효전력 비용 산정에 있어서 설비투자비용을 고려하기 위해 무효전력수요지속곡선(Q-demand duration curve)의 개념을 도입하였다. 무효전력 비용은 무효전력 부하곡선과 관련이 있고, 무효전력 비용곡선(Q-cost curve)은 각각의 무효전력 공급회사들에 의해 결정된다고 가정하였다. 실제로 무효전력설비는 일단 한번 설치되면 유지보수비용 외에 운영비용이 거의 불필요하므로 무효전력 비용 산정을 위한 지침을 만들기는 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 무효전력수요지속곡선의 역함수를 사용하여 무효전력 비용 산정을 위한 지침을 제안한다. 일반화된 이 곡선은 무효전력설비의 운영확률로써 해석될 수 있고, 비용은 이 확률에 역 비례하여 증가될 것임을 직관적으로 알 수 있다.

본 논문은 무효전력수요지속곡선의 역함수를 구간별 선형화(piecewise linearization)하고, 선형 프로그래밍(LP: Linear Programming) 기법을 사용하여 최적의 무효전력 배분을 구하는 새로운 방안을 제시한다. 매 시간대별 무효전력에 대한 비용은 OPF(Optimal Power Flow)를 사용하여 계산할 수 있으므로, 계통 네트워크의 제약요소들은 제안한 방안에 의해 충분히 고려될 수 있다. 제안한 방안은 계통 네트워크의 제약요소들을 고려하면서, 지역경제체제에 중요한 정보를 제공할 수 있는 유효 및 무효전력의 증분비용에 기초한 최적의

* 正 會 員 : 한국전력공사 진주지점 배전과장
 ** 正 會 員 : 威德大 工大 電氣工學科 傳任講師 · 工博
 *** 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2004年 1月 7日
 最終完了 : 2004年 2月 2日

무효전력 생산비용 설정 문제를 해결할 수 있다.

제시한 알고리즘을 3모선 시스템, WSCC 3기 9모선 시스템 및 IEEE 14모선 시스템에 MATLAB을 사용하여 실험하였고, 그 결과, 최적의 무효전력 배분과 무효전력에 대한 합리적인 비용 산정을 할 수 있었다. 따라서 급변하는 현재의 전력시장 환경에서 최적의 무효전력 비용 산정을 위한 기본 지침으로 제안한 방법이 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 수학적 모델링

전력시스템 운영에 있어서 총 비용은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$C_T = \sum_{i \in \text{generator}} C_{pi}(P_{Gi}) + \sum_{i \in \text{capacitor bank}} C_{qi}(Q_{Ci}) \quad (1)$$

여기서,

C_T : 전체 시스템의 총 운영비용

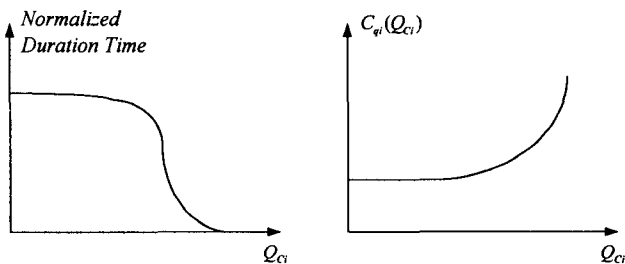
P_{Gi} : 모선i의 유효전력

Q_{Ci} : 모선i의 무효전력

$C_{pi}(P_{Gi})$: 발전기i의 발전량이 P_{Gi} 일 때의 연료비용

$C_{qi}(Q_{Ci})$: 무효전력이 Q_{Ci} 일 때의 무효전력 비용

하루 또는 일주일동안의 시간별 무효전력 소비량을 생각해 보면, 무효전력량이 증가함에 따라 무효전력 지속시간이 아주 빨리 감소하는 것을 쉽게 알 수 있다. 평균 지속시간(normalized duration time)은 그림 1 (a)와 같이 나타낼 수 있고, 평균지속곡선(normalized duration curve)은 무효전력 설비의 운영 확률로 생각할 수 있다. 따라서 무효전력의 생산비용은 이 확률에 역 비례하여 증가한다. 본 논문에서는 무효전력 비용곡선은 각각의 해당 무효전력 공급자에 의해서 주어지며, 그림 1 (b)와 같이 무효전력 수요지속곡선의 역함수 관계로 나타난다고 가정한다.



(a) 무효전력 수요지속곡선
(a) Q-demand duration curve

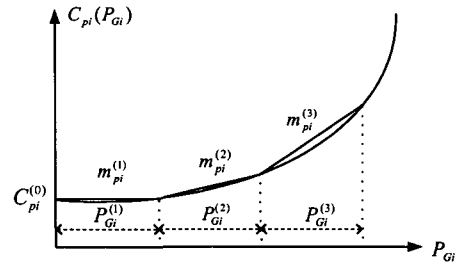
(b) 무효전력 비용곡선
(b) Reactive power cost curve

그림 1 비용과 무효전력과의 관계

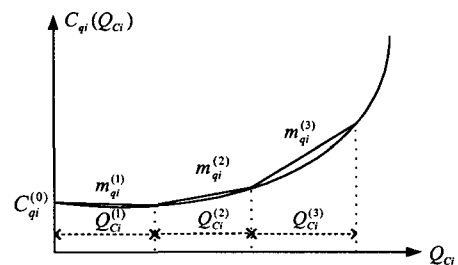
Fig. 1 The relationship between the cost vs. capacitive reactive power

그림 1 (b)의 비용곡선을 구간별 선형화 할 경우 선형화 구간을 3으로 정하면 유효 및 무효전력 비용곡선은 그림 2

(a)와 그림2 (b)와 같이 표현된다.



(a) 유효전력 비용곡선(Cost curve of real power)



(b) 무효전력 비용곡선(Cost curve of reactive power)

그림 2 유효, 무효전력의 비용곡선과 선형화

Fig. 2 Cost curve of real and reactive power and its linearization (In case of the number of linear segment is three)

여기서,

$m_{pi}^{(j)}$: 발전기i의 유효전력 비용곡선의 j번째 선분의 기울기

$m_{qi}^{(j)}$: 모선i의 무효전력 비용곡선의 j번째 선분의 기울기

$C_{pi}^{(0)}$: 발전기i의 유효전력 비용곡선의 초기비용

$C_{qi}^{(0)}$: 모선i의 무효전력 비용곡선의 초기비용

구간별 선형화 기법을 사용하여 유효전력과 무효전력을 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{pi}(P_{Gi}) = C_{pi}^{(0)} + m_{pi}^{(1)}P_{Gi}^{(1)} + m_{pi}^{(2)}P_{Gi}^{(2)} + m_{pi}^{(3)}P_{Gi}^{(3)} \quad (2)$$

$$C_{qi}(Q_{Ci}) = C_{qi}^{(0)} + m_{qi}^{(1)}Q_{Ci}^{(1)} + m_{qi}^{(2)}Q_{Ci}^{(2)} + m_{qi}^{(3)}Q_{Ci}^{(3)} \quad (3)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi}^{(1)} + P_{Gi}^{(2)} + P_{Gi}^{(3)} \quad (4)$$

$$Q_{Ci} = Q_{Ci}^{(1)} + Q_{Ci}^{(2)} + Q_{Ci}^{(3)} \quad (5)$$

여기서,

$$0 \leq P_{Gi}^{(j)} \leq P_{Gi}^{(j)\max} \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{Ci}^{(j)} \leq Q_{Ci}^{(j)\max}$$

$P_{Gi}^{(j)\max}$: $P_{Gi}^{(j)}$ 의 최대값

$Q_{Ci}^{(j)\max}$: $Q_{Ci}^{(j)}$ 의 최대값

상위, 하위 경계조건은 선형화 과정에 포함된 모든 변수에 대하여 고려되어야 하고, 발전기의 수를 n , 콘덴서 (capacitor) 뱅크의 수를 m 개라 하면 총 운영비용은 다음과 같다.

$$C_T = \sum_1^n C_{pi}(P_i) + \sum_{j=n+1}^m C_{qi}(Q_{Cj}) \quad (7)$$

따라서, 비용함수에 대한 선형화 기법을 사용함으로써 최적의 유효 및 무효전력 할당 문제를 다음 선형 프로그래밍의 일반적인 형태로 전환하여 해석할 수 있다.

$$\min(C_T) = \min(f \cdot x) \quad (8)$$

단,

$$Ax = b \quad (9)$$

$$x_m \leq x \leq x_M$$

위의 수식에서 동등 제약조건은 선형화 된 조류방정식에서 주어지고 각 송전선로에 대한 조류 제약은 식(9)에서 고려된다.

2.2 알고리즘

본 논문은 무효전력을 최적배분하고 그 비용을 산정하기 위하여 다음과 같은 체계적인 접근을 시도하였다. 전력의 합리적인 배분과 비용절감을 위해 제안한 방안은 다음과 같다.

- Step 1 시스템 데이터를 읽어 Y-bus를 구성한다.
- Step 2 조류계산의 해를 구한다.
- Step 3 조류계산의 결과를 초기값으로 설정한다.
- Step 4 초기 비용을 계산한다.
- Step 5 LP를 수행하여 $\Delta\theta$, ΔV , $P_{Gi}^{(j)}$, $Q_{Ci}^{(j)}$ 를 구한다.
- Step 6 θ , V 를 갱신하고 P_{Gi} , Q_{Ci} 를 계산한다.
- Step 7 각 모선의 유효/무효전력과 총비용 C_T 를 구한다.
- Step 8 다음과 같은 수렴조건을 검사한다.
 - ✓ 각 모선의 전력차(power mismatch)
 - ✓ $C_T^k - C_T^{k-1} < \epsilon$

여기서,

$$C_T^k : k \text{ 번째 반복 계산시의 비용 } C_T$$

- Step 9 수렴조건을 만족할 경우 끝
- 수렴조건 불만족일 경우 Step 5부터 반복

제안한 알고리즘의 상세한 흐름도를 나타내면 다음과 같다.

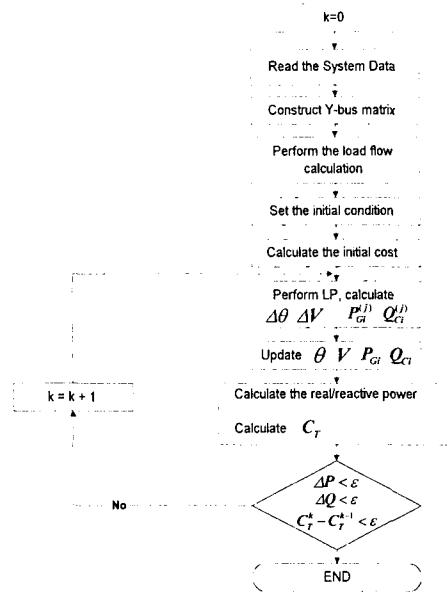


그림 3 제안한 알고리즘의 상세 흐름도
Fig. 3 The detailed flowchart of the proposed algorithm

2.3 실험 및 고찰

제안한 방안을 3모선 시스템, WSCC 3기 9모선 시스템[2] 및 IEEE 14모선 시스템 등의 모의 시스템에 적용하여 실험을 행하였다. 표 1 ~ 표 3은 각 시스템의 비용곡선 데이터를 나타내며, 부하모선은 표 1 ~ 표 6에서 제외하였다. 또한 계산의 편의를 위하여 $C_{pi}^{(0)}$, $C_{qi}^{(0)}$ 의 값은 모두 0으로 가정하였다.

표 1 3모선 시스템의 비용곡선 데이터

Table 1 Cost curve for 3-bus system

Bus	$P_{Gi}^{(1)}$	$P_{Gi}^{(2)}$	$P_{Gi}^{(3)}$	$m_{pi}^{(1)}$	$m_{pi}^{(2)}$	$m_{pi}^{(3)}$
1	70	70	140	0.5	1.0	3.0
2	35	35	70	0.5	1.0	3.0
	$Q_{Ci}^{(1)}$	$Q_{Ci}^{(2)}$	$Q_{Ci}^{(3)}$	$m_{qi}^{(1)}$	$m_{qi}^{(2)}$	$m_{qi}^{(3)}$
1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	25	25	50	0.5	1.0	3.0

표 2 9모선 시스템의 비용곡선 데이터

Table 2 Cost curve for 9-bus system

Bus	$P_{Gi}^{(1)}$	$P_{Gi}^{(2)}$	$P_{Gi}^{(3)}$	$m_{pi}^{(1)}$	$m_{pi}^{(2)}$	$m_{pi}^{(3)}$
1	25	25	40	0.5	1.0	3.0
2	55	55	110	0.5	1.0	3.0
3	30	30	40	0.5	1.0	3.0
	$Q_{Ci}^{(1)}$	$Q_{Ci}^{(2)}$	$Q_{Ci}^{(3)}$	$m_{qi}^{(1)}$	$m_{qi}^{(2)}$	$m_{qi}^{(3)}$
1	10	10	20	0.5	1.0	3.0
2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	-4.0	-4.0	-8.0	-0.5	-1.0	-3.0

표 3 14모선 시스템의 비용곡선 데이터

Table 3 Cost curve for 14-bus system

Bus	$P_{Gi}^{(1)}$	$P_{Gi}^{(2)}$	$P_{Gi}^{(3)}$	$m_{pi}^{(1)}$	$m_{pi}^{(2)}$	$m_{pi}^{(3)}$
1	80	80	160	0.5	1.0	3.0
2	14	14	14	0.5	1.0	3.0
3	0	0	0	0.5	1.0	3.0
4	0	0	0	0.5	1.0	3.0
5	0	0	0	0.5	1.0	3.0
	$Q_{Gi}^{(1)}$	$Q_{Gi}^{(2)}$	$Q_{Gi}^{(3)}$	$m_{qi}^{(1)}$	$m_{qi}^{(2)}$	$m_{qi}^{(3)}$
1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	-10	-10	-20	-0.5	-1.0	-3.0
3	-2.5	-2.5	-5.0	-0.5	-1.0	-3.0
4	11	11	22	0.5	1.0	3.0
5	50	50	100	0.5	1.0	3.0

초기비용은 조류계산 결과를 표 1 ~ 표 3에서 제시된 비용함수에 적용하여 구하였다. 제안된 알고리즘을 실행한 후 변화된 각 시스템의 최적 유효/무효전력 배분을 표 4 ~ 표 6에 나타내었다.

표 4 3모선 시스템의 유효 및 무효전력 배분 [p.u.단위]

Table 4 Real and reactive power allocation for 3-bus system

Bus	Initial		Optimized	
	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Gi}	Q_{Gi}
1	2.12	NA	1.64	NA
2	1.0	0.66	1.47	0.5455

표 5 9모선 시스템의 유효 및 무효전력 배분 [p.u.단위]

Table 5 Real and reactive power allocation for 9-bus system

Bus	Initial		Optimized	
	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Gi}	Q_{Gi}
1	0.71641	0.270459	0.9	0.2512
2	1.63	NA	1.2882	NA
3	0.85	-0.108597	1.0	-0.1134

표 6 14모선 시스템의 유효 및 무효전력 배분 [p.u.단위]

Table 6 Real and reactive power allocation for 14-bus system

Bus	Initial		Optimized	
	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Gi}	Q_{Gi}
1	2.34349	NA	2.3224	NA
2	0.40	-0.295566	0.42	-0.3033
3	0.0	-0.071973	0.0	-0.0720
4	0.0	0.319081	0.0	0.3193
5	0.0	1.421250	0.0	1.4310

표 4 ~ 표 6에서 전체 계통운용비용이 가장 경제적이도록 유효전력과 무효전력이 변화된 것을 알 수 있다. 이것은 경제적인 운용의 측면에서 볼 때 최적점에서 벗어난 일반적인 조류계산의 해를 도입한 비용곡선 모델과 제안한 알고리즘을 적용하여 수정함으로써 보다 경제적인 계통운용이 가능함을 의미한다. 각 시스템의 구체적인 비용 비교와 비용 감

소율을 표 7에 나타내었다.

표 7 각 시스템 별 비용 및 감소율과 반복실행횟수

Table 7 Cost and iteration comparisons with reductions for each system

System	Initial Cost	Final Cost	Cost Reduction	Iteration Count
3-bus	5.7150	5.2697	7.8 %	5
9-bus	5.1255	4.8918	4.6 %	6
14-bus	7.2770	7.0664	2.9 %	8

표 7에 나타난 바와 같이 본 논문에서 제안된 비용곡선 모델과 알고리즘을 적용할 경우 기존의 경우보다 더 경제적인 비용으로 계통을 운영할 수 있음을 알 수 있다. 각 시스템에 대한 비용 감소율을 고찰하면, 평균적으로 총 발전비용이 약 5.3% 정도 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 비록 전력계통에 대한 실제적인 요소들이 구체적으로 고려되지 않았다고 하더라도 전체 비용에서 볼 때 상당한 비용감소임에 분명하다.

따라서, 경쟁 시장 체제하에서 각 전력 회사들은 제시한 비용곡선 모델과 본 알고리즘을 사용하여 무효전력과 관련된 설비의 투자비용 문제에 대처할 수 있을 것이다. 그러므로 제안한 해법은 탈규제 환경에서 최적의 무효전력 비용 산정과 현물 가격 산정을 위한 기본 지침으로 사용될 수 있을 것이다.

또한, 본 알고리즘의 최적화 과정 중 조류계산을 병행하였을 경우 즉, Step5와 Step6의 과정 사이에 조류계산을 수행하여 θ , V 를 갱신한 경우에는 총 반복 실행 횟수가 대략 20%정도 감소하여 더욱 빠른 수렴성을 나타내었다.

특히, 실제 계통을 운영함에 있어서 여러 가지 상황에의 적용 가능성을 검토하기 위한 실험도 행하였다. 발전 유닛의 실제 특성을 고려하기 위해 유효 및 무효전력의 초기 값을 정격치의 120% 범위 내에서 여러 지점에 설정하여 계산을 수행하였다. 이 경우에도 본 알고리즘은 표 7에 나타난 최종 비용과 동일한 결과를 나타내었다. 즉 20% 내의 서로 다른 초기 값으로 출발하여도 동일한 비용으로 수렴하는 것을 알 수 있었고, 전체비용 역시 초기비용에 비해 현저히 감소하였으므로, 다양한 상황이 존재하는 실제 현장에의 적용에도 큰 무리가 없음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문은 전력시장에서 전력계통의 경제적인 운용에 직접적인 영향을 미치는 무효전력의 비용 산정에 관하여 연구하였다. 무효전력 비용의 산정을 위하여 무효전력 수요 지속 곡선의 개념을 도입하였고, 무효전력 수요 지속곡선의 역함수를 이용하여 무효전력 비용곡선을 나타내었다. 최적의 유효/무효전력 배분을 위하여 비용곡선을 구간 선형화하고 LP 기법을 적용하였다. 제시한 방안은 전력계통 네트워크 상의 제약요건을 고려하면서 유효/무효전력의 시스템 중분비용을 제공할 수 있는 최적의 무효전력 비용을 산정하므로 현물가격 산정에 있어서도 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다.

제안한 방안을 다양한 샘플 계통에 대해 MATLAB을 사용

하여 실험하였고, 그 결과 제시한 방안은 합당한 무효전력의 할당과 적절한 가격 산정 정보를 제공함을 알 수 있었다. 개발된 알고리즘은 전력계통의 경제적 운용에 많은 도움을 줄 수 있고, 특히, 탈규제 하의 무효전력 설비투자에 있어서 그 비용절감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 개발된 알고리즘은 시장 경쟁체제 하의 전력시장에서 무효전력의 최적 비용 산정을 위한 기본 지침으로 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", 2nd Edition, Wiley, 1996.
- [2] Peter W. Sauer, M. A. Pai, "Power System Dynamics and Stability", pp. 171, Prentice-Hall, 1998.
- [3] Katia C. Alimeida, "Critical cases in the Optimal Power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No 3, pp. 1509-1518, Aug. 1996.
- [4] N.H.Dandachi, M.J.Rqwllins, "OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC system", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 226-232, Feb. 1996.
- [5] C.N.Kurcz, D.Brandt, S.Sim, "A Linear Programming Model for Reducing System PeakThrough Customer Load Control Programs", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1817-1824, Nov. 1996.
- [6] M.Yoshikawa, "On-line Economic Load DisPatch Based on fuel cost dynamics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No.1, pp. 315-320, Feb. 1997.

저 자 소 개



정 춘 식 (鄭 春 植)

1969년 6월 25일생. 1996년 부산대학교 전기공학과 졸업. 2000년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 진주지점 배전과장.

Tel : 055-750-3271

E-mail : csjung@kepcoco.kr



박 정 도 (朴 正 道)

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 현재 위덕대학교 전기공학과 전임강사.

Tel : 054-760-1663

E-mail : jdpark@uiduk.ac.kr



문 영 현 (文 永 鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 1983년 오레곤주립대 대학원 졸업(공학박). 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수.

Tel : 02-2123-2771

E-mail : moon@yonsei.ac.kr