

A Windows-based Software for Education and Training of Transmission Network Charge

金 鉉 烘* · 曹 基 善** · 鄭 允 源*** · 朴 宗 培[†] · 愼 重 麟[§]
 (Hyun-Houng Kim · Ki-Seon Cho · Yun-Won Jeong · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper presents a graphical windows-based software for the education and training of transmission network charge. The motivation for the development of the simulator is to provide students with a simple and useable tool for gaining an intuitive feel for transmission network charge. The developed simulator consists of the main module (MMI,GUI), the power flow module (PF), the power flow tracing module (PFT), and usage cost DB module (UCD). Each module has a separate graphical and interactive interfacing window. The developed simulator provides with two power system analysis methods (i.e., DC-PF and Modified DC-PF) and supports the PSS/E input data format to load input data of power system. Also, power flow tracing can be calculate using four methods such as "Felix Wu", "Modified Felix Wu", "DCLF ICRP", and "Reverse MW mile". Results of calculation for transmission usage cost are displayed and compared on the window through the table and/or chart. Therefore, the developed simulator can be utilize as a useful tool for effective education and training of transmission network charge.

Key Words : Educational Simulator, Transmission Network Charge, Power Flow, Power Flow Tracing

1. 서 론

전력시스템에서 발전과 배전을 연계하는 송전망(electric power transmission network)은 전력수급균형과 전력시스템의 안정운용에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하고 있으며, 경쟁적 전력시장 체계하에서 송전망은 전력시장 참여자가 정도의 차이는 있으나 공동으로 이용하는 설비라는 인식하에 설비의 건설 및 운용에 소요되는 비용을 합리적으로 회수하는 메커니즘의 개발이 매우 중요한 사안으로 인지되고 있으며, 이에 대한 다양한 방안들이 연구되고 있다[1-4].

경쟁적 전력시장 체계하에서의 송전망은 상품으로서 전력이 거래될 수 있는 기반시설로서 공익적 성격의 설비로 송전망의 건설 및 유지에 소요되는 소요수입액이 시장참여자들에게 합리적인 메커니즘에 의해 할당되는 송전요금의 형태로 기술되고 있다. 이러한 송전요금을 설계함에 있어서 중요한 쟁점사안은 송전망 투입비용의 특성과 지역별 차등적 요금구조의 설계에 있다. 송전망의 투입비용은 고정비 성격의 초기투자비가 대부분을 차지하며 변동비 성격의 운전유지비용은 상대적으로 낮은 것이 특징이며, 일정규모 이

하에서는 투자비의 평균비용이 한계비용보다 크게 나타나 한계비용만을 통해 송전요금 제도를 설계할 경우 근본적으로 송전망의 소요수입액을 회수할 수 없을 개연성이 존재한다. 또한 지역별 차등적 요금구조 또는 송전망의 이용 정도에 따른 차등화 방안을 도입하기 위해서는 전력의 생산에서 소비까지 전력의 흐름을 명확히 추적할 수 있어야 하나 송전망이 망상구조(network)이면서 비선형특성에 가지고 있어 그 경로에 대한 정도 높은 추적은 기술적인 한계가 있다. 이러한 이유로 송전요금제도는 각 시장별 또는 국가별로 정책적 의사결정과정에서 설계에 도입되어 왔다[5].

송전요금제도는 전력시장의 형태와 무관하지 않으며, 모선별 가격제도를 도입한 전력시장에서는 모선별로 가격신호를 통해 송전요금을 부과하고 부족분에 대해서는 우편요금(postage stamp)제도 등을 통해 회수하고 있다. 양방향계약 시장에서는 지역적인 신호가 없으므로 송전요금의 차등화를 통하여 지역별 신호를 제공하고 있다. 우리나라의 변동비반영시장(CBP; Cost Based Pool)은 단일가격체제로 에너지 시장에서 지역적인 가격신호를 제공하지 못하고 있어 지역적 가격신호를 제공하는 차원에서 송전요금제도가 중요한 의미를 갖는다[5,10].

우리나라의 송전요금제도는 송전사업에 소요된 총괄원가를 보상하는 수준에서 송전용 전기설비 이용자간의 부담의 형평을 유지하고 자원의 합리적 배분을 실현토록 2부요금제(기본요금 및 사용요금)의 송전망이용요금(transmission charge) 제도를 시행하고 있다[6]. 최초 송전망이용요금의 산정은 호주 VPX의 송전요금산정 기법[6]을 사용하였으며, 이후에는 Felix We[9]의 조류추적법을 일부 보완하여 송전망이용요금을 산정하고 있다. Felix Wu의 조류추적법은 전력조류의 변

[†] 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

* 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 韓國電氣研究院 電力産業研究그룹 招聘研究員 · 工博

*** 正會員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

§ 正會員 : 建國大學 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2006年 11月 28日

最終完了 : 2007年 3月 27日

동분만을 계산하지 않고 선로에 흐르는 전체 조류의 생산자와 소비자를 찾아가는 방법으로 대규모 계통에 대한 적용성이 높은 기법으로 우리나라 송전망 이용요금산정에 사용되는 전력조류추적기법의 근간이 되고 있다.

송전요금제도는 전력시장의 형태와 국가별 여건에 따라 다양하나 궁극적으로 송전비용의 부담 당사자간의 형평성을 담보하고 자원의 합리적인 배분을 실현하는 방향으로 진화되고, 이를 뒷받침할 지원시스템 등의 여건을 조성하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해서 송전요금제도의 설계 및 요금산정에 요구되는 방대한 분량의 비용자료 및 계통자료를 일괄 처리하고 다양한 송전요금부과이론의 효과를 객관적 기준에서 모의할 수 있는 전산화 프로그램이 요구된다.

본 논문에서는 합리적인 송전요금 설계를 지원하기 위해 다양한 송전요금 부과이론을 체계적으로 모의할 수 있고, 송전요금의 설계 및 요금의 시산에 직접 활용할 수 있는 교육용 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 교육용 시뮬레이터에서 채택한 송전요금부과이론은 영국에서 활용되고 있는 ICRP(Investment Cost Related Pricing) 방식, 아일랜드에서 사용하고 있는 Reverse MW mile 방식, 그리고 국내에서 활용되고 있는 조류추적 방식 등이며, 접근방법에 따른 효과를 비교분석할 수 있도록 합과 동시에 사용자 편의를 증진하기 위해 Excel 기반의 스프레드시트와 GUI(Graphical User Interface)를 제공하였다.

2. 송전요금 산정 기법

공익적 역할을 담당하는 송전망은 미래의 전력수요에 대응하여 전력시스템의 건전성을 유지할 수 있도록 사전에 계획(transmission expansion planning)되어 추진되는 바, 계획의 적정성과 비용의 합리성이 담보되어야 하며, 본 논문에서는 이러한 사안은 논외로 하며 산정된 송전비용에 대한 합리적인 회수 메커니즘에 중점을 두어 기술한다.

본 장에서는 송전요금을 산정하는 기법으로 현재 활용되고 있는 영국의 ICRP(Investment Cost Related Pricing) 방식, 아일랜드의 Reverse MW mile 방식, 그리고 국내에서 채택하고 있는 조류추적기법을 살펴본다[7-8].

2.1 영국의 ICRP 기법

영국의 신전력거래협약(NETA; New Electricity Trading Arrangement)에서 송전설비 비용회수 알고리즘으로 활용하고 있는 기법은 DC 조류계산을 이용한 ICRP(Investment Cost Related Pricing)기법이다[8]. ICRP기법은 모선별 한계비용에 기초한 접근법으로 송전설비의 고정비를 회수하기 위해 추가적인 가격 보정 메커니즘이 필요한 기법이다.

ICRP기법은 시스템 침두부하시점의 시스템상태에서 전력조류계산(DC power flow)을 수행하여 기준(base case)을 수립하고, 송전요금을 평가할 관심 모선의 단위 발전량(1MW)을 증가시키고, 기준모선(slack bus)의 단위 발전량(1MW)을 감소시켜 전력조류를 재계산한다. 관심 모선의 단위발전량 증가에 따른 송전선로에서의 전력조류의 변화량을 식별한

다. 여기에 선로의 조류변화량($\Delta Flow_{TL_j}$)에 선로의 가격(RR_{TL_j})을 승산하여 관심 모선의 한계비용[\$/MW]를 도출한다. 이 한계비용에 관심 모선의 발전량(P_A)을 승산하여 해당 모선의 송전요금(TUC_A)을 산정하는 방식이다. 부하 모선 또한 동일한 과정을 통해 송전요금을 산정할 수 있다. 영국의 송전요금은 ICRP를 통해 발전과 부하측 모두에게 지역차등 송전요금을 부과하는 체계이다.

$$TUC_A = P_A \times \sum_j (\Delta Flow_{TL_j} \times RR_{TL_j}) \quad (1)$$

NETA의 ICRP기법에 의하면, 부하가 밀집된 지역에 위치한 발전모선은 송전요금을 수혜할 수 있는 체계로 지역적 신호가 강하게 나타나며, 모선별 송전요금의 차이가 전력계통의 구성에 따라 결정되므로 지역별로 균일한 가격을 제시하여 상대적으로 지역구분이 용이한 장점이 있다. 반면, ICRP기법이 근본적으로 한계비용에 기반하고 있어 총 필요 수입액을 회수하기 위해서는 추가적인 가격보정이 필요하며 기준모선의 위치에 따라 송전요금이 달라지는 단점 또한 내재되어 있다. 기준모선 선정에 따른 영향은 가격보정 메커니즘을 통해 보완하여야 한다.

2.2 아일랜드 Reverse MW mile 기법

아일랜드는 발전측에 대해서만 지역차등 송전요금을 부과하고, 부하측에는 지역차등 신호를 제공하지 않고 있으며, 발전측의 지역차등 송전요금은 Reverse MW mile기법을 통해서 산정하고 있다. Reverse MW mile기법은 영국의 NETA에서 사용하고 있는 기법과 유사하지만 관심 모선의 단위 발전량 증가분의 처리에 있어서 차이가 있다. ICRP기법에서는 관심 모선의 변화량을 기준 모선이 감당하나, Reverse MW mile기법에서는 관심 모선의 발전량 변화량을 각 부하모선에 비울할당(부하용량가중)토록 하고 있다.

Reverse MW mile법에서는 ICRP와 유사하게 시스템 침두부하시점의 시스템상태로 전력조류계산(DC power flow)을 수행하여 기준(base case)을 산정하고, 송전요금을 평가할 발전모선의 단위 발전량(1MW)을 증가시키며 증가된 단위발전량 만큼의 부하를 부하모선의 용량가중비율로 각 부하모선에 증가량을 할당하여 전력조류를 재계산한다. 관심 모선의 단위발전량 증가에 따른 송전선로에서의 전력조류의 변화량을 식별하고 여기에 선로의 가격[\$/MW]를 승산하여 관심 모선의 한계비용[\$/MW]를 도출한다. 이 한계비용에 관심 모선의 발전량을 승산하여 해당 모선의 송전요금을 산정하는 방식이다. 아일랜드의 Reverse MW mile법은 영국의 ICRP와는 달리 발전측에 대해서만 지역차등 신호를 제공하며 지역별로 균일한 가격을 제공하고 있다.

영국과 아일랜드에서 사용하는 기법들은 모두 송전선로의 이용정도에 따라 송전요금을 부과하는 방법으로 한계비용의 개념을 사용하고 있어 기준모선에 따라 가격이 변화할 수 있고 송전설비의 고정비를 회수하지 못할 개연성을 가지고 있어 별도의 가격보정이 필요하다. 이는 자국의 전력시장 상황에 맞게 정책적 의사결정을 통해서 보완하고 있다.

2.3 국내 송전요금 산정 방법

현재 국내에서 사용하고 있는 송전요금은 연간필요수입액을 산정하고 이 비용을 발전과 부하측에 각각 50%씩 균등하게 분담시켜 회수도록 설계되어 있으며, 발전 및 부하측은 각 분담액에 대해 2부 요금제 즉, 기본요금과 사용요금으로 구분하여 송전요금을 부과하며, 기본요금은 지역에 관계없이 동일(단위용량 대비 균등부과)하고, 사용요금은 지역별로 차등적으로 적용하고 있다.

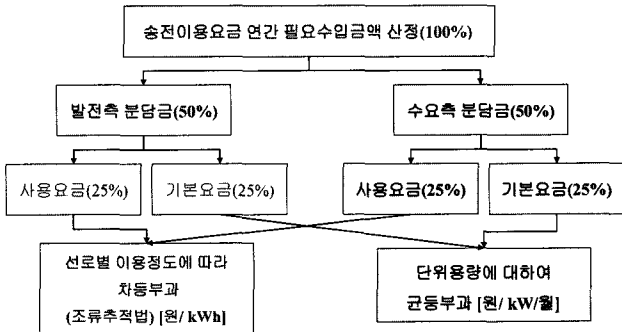


그림 1 국내 송전요금의 구조
Fig. 1 The Structure of Transmission Tariffs in KOREA

2.3.1 사용요금 산정

사용요금은 시장참여자가 송전망을 이용하는 정도에 따른 요금을 부과하는 방식으로 각 모선의 부하와 발전기가 송전망을 이용하는 정도를 합리적으로 계산해야 한다. 이를 위해서는 사용자가 어느 선로를 어느 정도 이용하는 지를 먼저 산정해야 하며, 이를 토대로 이용정도에 따른 사용요금을 부과하는 방식이다. 그림 2는 국내에서 사용하고 있는 사용요금 산정절차를 도시한 것이다.

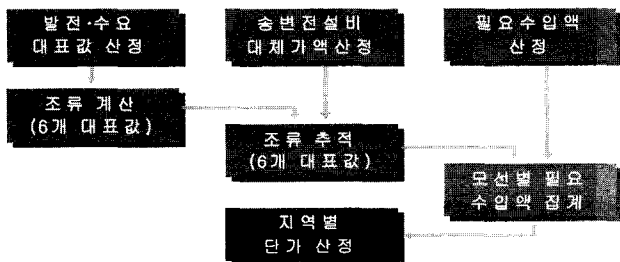


그림 2 사용요금 산정절차
Fig. 2 Procedure for Calculating of Transmission Usage Cost

그림 2에 제시한 절차를 기초로 국내 송전망 사용요금 산정과정을 살펴보자.

먼저 각 송변전설비의 대체가액을 산정한다. 송전선로 및 변전설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 감가상각이 발생하며 송전변전설비의 잔존가액은 대체가액보다 작다. 그럼에도 불구하고 대체가액을 사용하는 이유는 노후화된 설비들은 곧 신규설비로 대체하기 때문에 잔존가액을 통하여 비용을 구할 필요가 없기 때문이다.

아일랜드의 경우에는 대체가액을 사용하여 송전요금을 결정하고 있으며 영국의 경우에는 송전선의 비용을 전압별로 평균하여 km당 환산값을 적용하고 있으므로 국내에서는 대체가액을 사용하고 있다.

둘째, 사용요금은 생산 및 소비되는 전력량(kWh)을 기준으로 산정하므로 각 모선의 발전 및 부하가 년중 송전선로를 이용하는 정도에 따라 산정하는 것이 바람직하다. 하지만 8760시간에 대해 계산하기에는 소요되는 시간 및 데이터의 부담이 커져 복잡도(complexity)가 높아지므로 국내에서는 대푯값을 산정하여 적용하고 있다. 영국과 아일랜드에서는 첨두부하시점을 기준으로 산정하고 있음을 상기할 때 국내 사용요금이 보다 현실적일 수 있다. 국내에서 대푯값을 산정하는 방법으로는 부하지속곡선(load duration curve)을 기초로 6개 지점(첨두부하에 대해 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 그리고 최소값)을 선정하고 이 지점을 기준으로 좌우 10시간에 대한 표본값을 추출하여 이의 평균값을 대푯값으로 산정한다.

셋째, 산정된 대푯값을 기준으로 전력조류계산(DC)을 수행한다.

넷째, 전력조류계산의 결과를 이용해 조류추적법을 실행하여 각 모선별 송전요금을 산정한다(구체적인 방법은 2.3.2 조류추적법을 참조).

다섯째, 발전 및 부하량 보정단계로, 계산의 편의를 위해 사용한 대푯값을 8760시간으로 확장하는 하기 위해 대표값의 모선별 송전요금을 각 대푯값의 시간과 승산한다. 이렇게 계산된 발전/부하량(\tilde{P}_i)의 합은 실제 평균 발전/부하량(P_i)의 합과 일치하지 않을 수 있기 때문에 비율할당을 통해 각 모선의 발전/부하량을 보정(\tilde{P}_A)한다.

$$\tilde{P}_A = \tilde{P}_A \times \sum P_i / \sum \tilde{P}_i \quad (2)$$

여섯째, 비용보정단계로서 송변전설비의 대체가액과 필요수입액간의 차를 보정한다. 실제 선로의 대체가액의 합은 송전요금을 통해 회수해야하는 필요금액과 일치하지 않을 수 있기 때문에 이를 해결하기 위해 필요수입금액의 부족분을 발전기와 부하에 할당하여 보정한다. 보정된 차등요금(\tilde{T}_A)은 전체 필요수입액(RR)에 대해서 계산된 차등요금(\tilde{T}_i)의 비율 할당으로 다음과 같이 산정된다.

$$\tilde{T}_A = \tilde{T}_A \times \sum \tilde{T}_i / RR \quad (3)$$

마지막으로 지역단위로 모선별 요금과 발전/부하량을 계산하여 지역별 가격을 계산한다. 지역별 차등요금 신호는 현재까지도 다양한 정책적 논의가 이루어지고 있으며 최대 모선별 신호에서 최소 전국 단일요금 사이에서 다양한 정책적 의사결정이 요구되는 바, 본 논문에서는 지역별 신호의 그룹핑 부분은 논외로 하였다.

본 논문에서 개발한 교육용 시뮬레이터는 전술한 산정절차를 준용하여 설계·구현되었으며, 합리적인 송전요금 설계하기 위해 산정기법의 효과를 가시적으로 비교분석할 수 있도록 개발하였다.

2.3.2 조류추적법

송전망을 이용한 정도에 따라 부과하는 사용요금을 산정하기 위해서는 각 모선의 발전/부하의 물리량이 어떠한 경로를 통해서 에너지를 공급 및 수혜받는지를 식별하게 되는데 이는 전력조류추적법을 통해서 산정하게 된다.

전력조류추적법은 Felix We[9]가 제안한 바 있으며, 국내에서는 이를 기초로 전력조류추적기법을 수행하고 있다. Felix Wu가 제안한 조류추적법은 송전선의 이용률이 낮은 경우에 인근 모선에 높은 비용이 할당되는 문제점을 안고 있다. 그림 3에 제시한 예제 계통을 통해서 Felix Wu기법의 문제점을 살펴보자.

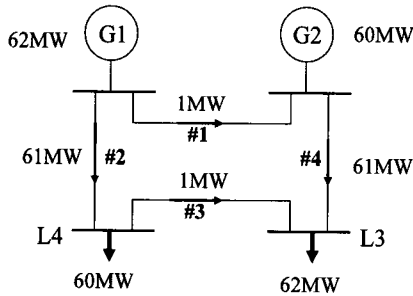


그림 3 4모선 예제 계통
Fig. 3 4-Bus Sample System

각 송전선로의 용량을 100MW, 각 송전선로가 회수해야 할 비용은 \$5,000이라 가정하자. 발전기 G1은 62MW를 발전하여 선로 #1, #2, 그리고 #3을 사용하며, 선로 #4는 발전기 G2가 60MW를 사용한다. 따라서 발전기 G1과 G2에 할당되는 비용을 산정하면 표 1과 같다.

표 1 예제계통에 대한 모선별 할당비용
Table 1 Allocated Usage Charge on the Sample System

	발전기 G1	발전기 G2	합
선로 #1	\$5,000	0	\$5,000
선로 #2	\$5,000	0	\$5,000
선로 #3	\$5,000	0	\$5,000
선로#4	\$5,000×1/61	\$5,000×60/61	\$5,000
소계	\$15,081.97	\$4,918.03	\$20,000

표 1에 나타난 바와 같이 선로 #1, #3에는 각각 1MW의 조류가 흘러 발전기 G1이 이들 선로를 전유하여 발전기 G1에 선로비용의 전체가 할당됨으로써 발전기 G1과 G2의 발전량이 유사함에도 비용의 차가 크게 발생하는 결과가 나타나게 된다.

이처럼 송전선로의 이용정도에 관계없이 각 송전선로의 회수비용을 적용함으로써 발생하는 과다비용문제를 완화하기 위해서 국내에서는 송전선로의 이용률에 따른 선로회수비용을 차별화하는 방안을 도입으로 각 선로의 선로부하율에 따라 스케일링 한 선로회수비용을 적용하고 있다. 영국에서도 선로이용률이 낮은 선로에 대해서는 비용을 25% 삭감하여 적용하고 있다.

선로부하율이 낮은 지역에 낮은 선로회수비용을 적용함으로써 선로부하율이 낮은 지역(상대적으로 송전선로용량의 여유도가 높음)에 발전/부하의 시장 진입을 유도하는 효과가 있다.

각 송전선로에서 회수되어야 하는 필요수입액(RR_{TL_i})에 각 송전선로부하율을 승산하여 보정한 회수비용(\widehat{RC}_{TL_i})은 각 송전선로의 최대용량(TL_i^{Max})과 선로조류량(TL_i^{flow})을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\widehat{RC}_{TL_i} = RR_{TL_i} \times TL_i^{flow} / TL_i^{Max}, \quad \forall i \quad (4)$$

표 2에 제시된 바와 같이 각 송전선로를 통해서 회수된 비용의 합이 전체 송전선로의 필요수입액에 미치지 못한다. 이는 각 송전선로들의 선로사용량이 선로의 최대용량보다 작기 때문에 이를 추가 보정하기 위해서 총 필요수입액 대비 또는 총 선로조류량 대비로 보정한 회수비용(\widetilde{RC}_{TL_i})은 아래와 같이 도출될 수 있다.

$$\widetilde{RC}_{TL_i} = \widehat{RC}_{TL_i} / \sum_j \widehat{RC}_{TL_j} \times \sum_j RR_{TL_j} \quad (5)$$

표 2에서 알 수 있듯이 시스템의 총 필요수입액을 기준으로 할당된 회수비용(\widetilde{RC})은 시스템의 필요수입액을 만족하면서 각 선로의 선로부하율이 감안되어 보정되었다.

표 2 예제계통에 대한 각 선로별 선로회수비용
Table 2 Compensated Transmission Network Cost for #TLs

	회수비용 (RR_{TL_i})	선로부하율	회수비용 (\widehat{RC}_{TL_i})	회수비용 (\widetilde{RC}_{TL_i})
선로 #1	\$5,000	1%	\$50	\$161.3
선로 #2	\$5,000	61%	\$3,050	\$9,838.7
선로 #3	\$5,000	1%	\$50	\$161.3
선로 #4	\$5,000	61%	\$3,050	\$9,838.7
소계	\$20,000	-	\$6,200	\$20,000

표 3 예제계통에 대한 모선별 보정 할당비용
Table 3 Compensated Usage Charge on the Sample System

	발전기 G1	발전기 G2	합
선로 #1	\$161.3	0	\$161.3
선로 #2	\$9838.7	0	\$9,838.7
선로 #3	\$161.3	0	\$161.3
선로#4	\$161.3	\$9,677.4	\$9,838.7
소계	\$10,322.6	\$9,677.4	\$20,000

표 3은 보정메커니즘을 도입한 후 각 발전기별 할당된 비용을 나타내고 있다. 송전선로의 부하율과 총 필요수입액을 고려하여 보정함으로써 유사한 수준의 발전량을 갖는 발전기에 비슷한 수준의 비용이 할당됨으로써 보다 합리적인 요금부과가 이루어졌다. 부하모선에 대해서도 동일한 메커니즘을 적용할 수 있으며 음(-)의 값을 갖는 차이만 있다.

3. 교육용 송전요금산정 프로그램

3.1 프로그램의 구성

본 논문에서 개발한 교육용 송전요금산정 프로그램은 윈도우를 기반으로 하여 사용자가 일반 PC에서 이용이 가능하도록 설계하였다. 프로그램 개발언어는 C와 C++를 사용하고 있으며 데이터베이스(DB)는 Microsoft Access를 활용하였다. 교육용 송전요금산정 프로그램은 크게 4개의 모듈로 구성하였다. MMI(Man Machine Interface) 및 GUI(Graphical User Interface)를 구현한 주 모듈, 전력조류계산 모듈, 전력조류추적모듈, 그리고 송전요금 산정을 위한 DB 모듈로 구성되었다.

Module Interface

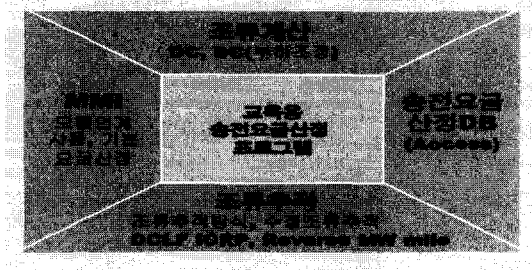


그림 4 제안한 교육용 시뮬레이터의 구성
Fig. 4 Composed of the Proposed Educational Simulator

본 교육용 시뮬레이터의 사용자 입력의 편의성을 제고하기 위해서 주요 입력요소인 송변전설비의 비용자료는 스프레드시트에서 사용자가 직접 입력하는 체계로 구성하였으며, 전력계통 자료는 PSS/E Raw Data File을 입력할 수 있도록 구성하여, 사용자로 하여금 별도의 처리절차 없이 기존의 자료를 직접 활용할 수 있도록 구성하였다.

또한, 국내 송전요금의 설계 관점에서 다양한 분석을 수행할 수 있도록 접근 방식별 비교분석 기능, 송전비용 부담률(발전/부하)조정 기능, 2부 요금의 구성비조정 기능 등을 주 모듈에서 개발하여 제공함으로써 사용자가 선행적으로 설계안을 제시하고 이에 따른 송전요금을 산정방식별 비교분석하여 설계안의 장단점을 직관적으로 검토할 수 있도록 구성하였다.

3.2 데이터베이스 관리

본 교육용 시뮬레이터의 주요 자료는 전력계통 기술자료와 송변전설비의 비용자료 구성되며, 전력계통 자료는 전력조류계산을 수행하기 위한 시스템 대푯값을 PSS/E Raw Data File형태로 관리할 수 있도록 데이터베이스를 설계 구현하였다. 그림 5는 본 논문에서 개발한 교육용 시뮬레이터의 데이터베이스 관계도이다. 6개 대푯값으로 구성된 전력시스템 자료와 송변전설비의 대체가액을 기초로 전력조류계산 및 조류추적법을 유기적으로 수행할 수 있도록 요구 자료를 구조화하였으며, 자료의 로딩 및 관리기능을 수행한다.

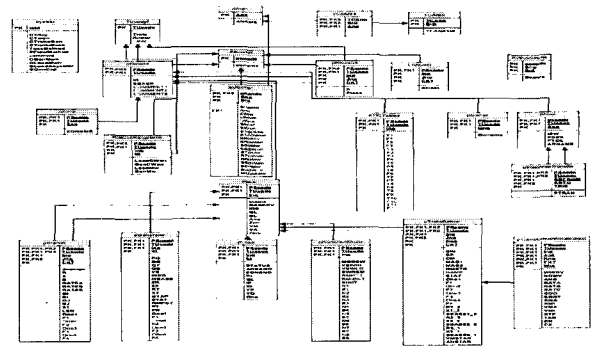


그림 5 데이터베이스 테이블 관계도
Fig. 5 Relation Diagram of Database Tables

3.3 입력 기능

본 교육용 시뮬레이터의 입력데이터는 필요수입금액, 모선, 부하, 발전기, 선로, 송·변전설비 대체가액 입력화면으로 구성하였으며, 각 입력데이터 화면을 통해서 자료를 입력 및 수정할 수 있도록 구성하였다.

송변전설비에 대한 필요수입금액 입력은 총 필요수입금액과 발전 및 부하측의 부담률 및 2부요금제의 구성비 등을 입력하여, 실제 각 항목에서 회수해야 할 비용을 직관적으로 확인할 수 있도록 구성하였다. 그림 6은 본 시뮬레이터에서 필요수입금액을 설정하는 화면이다.

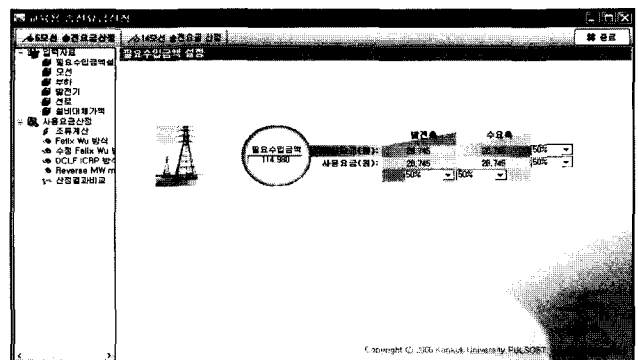


그림 6 필요수입금액의 설정
Fig. 6 Setting of Transmission Revenue Recovery

전력시스템의 기술 자료는 모선, 부하, 발전기, 선로로 구분하여 사용자가 직접 스프레드시트에 입력하는 형태로 구성하였으며, PSS/E Data을 기준으로 설계·구현함으로써 사용자는 별도의 추가적인 작업 없이 PSS/E Data를 직접 활용할 수 있도록 하였다. 그림 7은 전력시스템의 모선자료를 입력하는 화면을 예시한 것이다. 입력 자료는 스프레드시트 형태로 구성되어 직관적으로 자료를 검토할 수 있고 정렬 및 수정이 용이하도록 부가기능을 추가하여 개발하였다. 그림 8은 각각의 송전선로별로 대체가액을 입력하는 화면으로 이전에 구축된 전력시스템 자료를 로딩하여 대체가액을 직접 입력하도록 구성하였다.

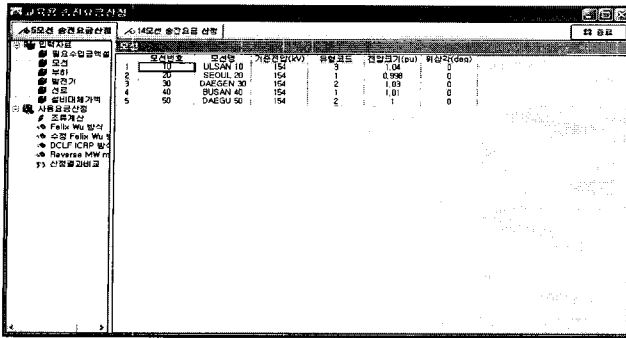


그림 7 전력시스템의 자료입력 화면
Fig. 7 Input Window of Technical Data for a Power System

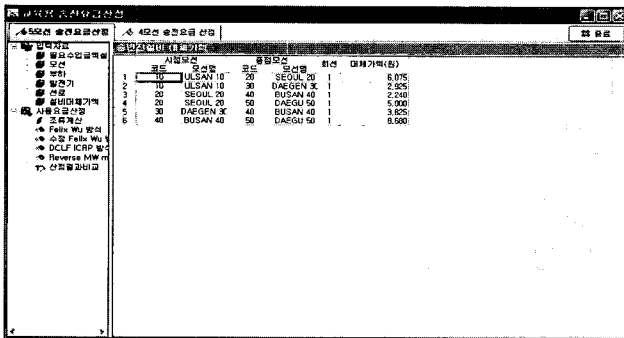


그림 8 송전선로별 대체가액 입력화면
Fig. 8 Input Window for Replacement Cost

3.4 분석 기능

본 교육용 시뮬레이터의 분석기능은 전력조류계산과 전력조류추적법의 구현에 있다. 전력조류계산은 전통적인 DC 조류계산을 사용하였으며, 전력조류추적법은 전술한 4가지 방법(Felix Wu기법, Felix Wu 수정기법, DCLF ICRP기법, Reverse MW mile기법)을 구현하였다.

3.4.1 전력조류계산

본 연구에서 전력조류계산은 조류계산의 수렴특성을 고려하여 DC조류계산기법을 사용하였으며 DC조류계산은 근본적으로 손실분을 고려할 수 없는 단점이 있다.

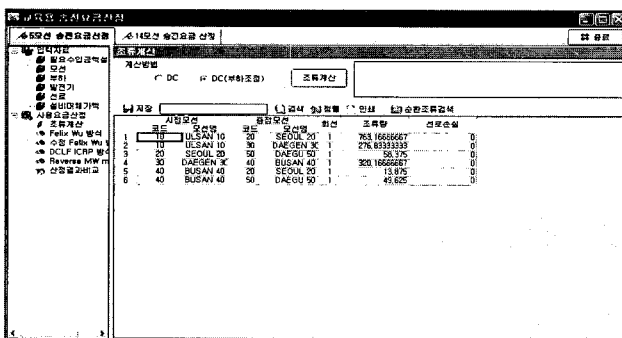


그림 9 DC 전력조류계산 화면
Fig. 9 DC Power Flow Calculation Window

본 교육용 시뮬레이터에서 손실분에 대한 영향을 반영할 수 있도록 DC조류계산 결과에 손실을 할당한 DC조류계산(부하조정) 기능을 두어 사용자가 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.

3.4.2 전력조류추적

전력조류계산이 수행된 이후 송변전설의 대체가액과 송전요금에 대한 배분방안이 설계(그림 6)된 상태에서 사용자는 조류추적방법론을 모의할 수 있다. 본 교육용 시뮬레이터는 전술한 4가지 조류추적기법을 구현하였으며 사용자로 하여금 비교분석이 용이도록 개발하였다.

동일 시스템 조건에서 조류추적기법들을 독립적으로 수행할 수 있도록 개별적으로 구현하였으며, 그림 10은 Felix Wu기법을 사용한 사용요금 산정 결과를 예시한 것이다.

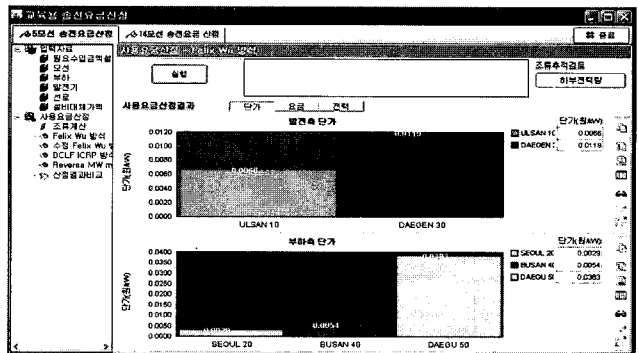


그림 10 Felix Wu기법을 사용한 사용요금 산정결과
Fig. 10 Usage Cost Results Using Felix Wu Method

수정 Felix Wu은 전술한 바와 같이 선로부하율을 고려한 보정 메커니즘을 도입한 기법이며, 전력조류추적기법에서 순환조류로 인해 프로그램이 무한루프에 빠지는 경우가 발생할 수 있기 때문에 프로그램 수행시 매 반복마다 중간과정 검토파일인 "하부전력량" 파일을 생성토록 하여 프로그램의 안정성을 높였다.

3.4.3 사용요금 산정결과 비교분석

전력조류추적이 완료되면 모선별 송전망 사용요금이 산정되므로 이를 통해 그림 10의 하단에 제시된 바와 같이 발전측과 수요측에 대한 송전이용요금을 산정할 수 있다. 사용요금은 [단가, 요금, 전력]으로 구분하여 표시하였다. 단가는 차등요금이 조정되어 계약용량(사용자입력)을 통한 kW단가(원/kWh)로 계산하여 표시하였으며, 요금은 기본요금을 제외한 발전측 사용요금과 부하측 사용요금을 비교하도록 하여 각 분담 주체의 회수비용을 비교토록 하였다. 마지막으로 전력에서는 발전측과 부하측의 사용전력을 산정한 결과를 확인할 수 있도록 하였다.

종합비교는 각기 다른 기법들에 의해 구해진 사용요금율과 단가로 구분하여 사용자의 편의에 의해서 산정방식과 모선명을 각기 분리하여 비교분석할 수 있게 하였다. 또한 수입금액조정은 필요수입금액 설정에서 사용자가 설정해 두었던 필요수입금액으로 각기 발전기와 부하에 할당하여 사용자에게 제시한다.

4. 사례연구

4.1 사례계통 선정

본 논문에서 개발한 송전요금산정 교육용 시뮬레이터의 타당성을 입증하기 위해서 사례계통에 대한 사례연구를 수행하였으며, 사례계통은 호주 VPX 자료를 활용한 5모선 계통을 선정하였으며, 총 5모선으로 발전기 3기와 6개 송전선로로 구성된 시스템이다(그림 11). 사례계통에 대한 주요 기술 자료는 표 4와 5에 제시하였으며, 모선 10번을 슬랙 모선으로 선정하였다.

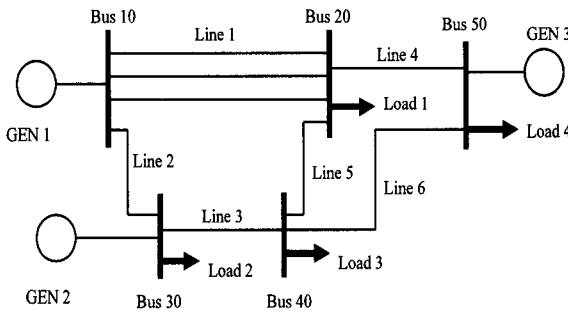


그림 11 5모선 사례계통
Fig. 11 5-bus Sample System for Case Study

사례계통의 연간 총 송변전 필요수입액은 114,980천불이며, 발전측과 수요측이 각각 50%씩 공동 부담하고, 각 부담액에 대해서 2부 요금제로 기본요금에서 50%를 그리고 사용요금으로 50%를 회수하는 메커니즘을 가정한다. 따라서 발전 및 수요부문에서 사용요금으로 회수해야하는 회수비용은 28,745천불이며, 선로별 회수비용은 표 5에 제시하였다.

표 4 5모선 사례계통의 모선자료
Table 4 Bus Data for 5-bus Sample System

모선	V		발전량		부하량	
	V	Angle	P_G	Q_G	P_L	Q_L
10	1.040	0.0	ϕ	ϕ	-	-
20	0.998	0.0	-	-	700	70
30	1.030	0.0	300	100	250	25
40	1.010	0.0	-	-	250	25
50	1.000	0.0	200	151	300	30

ϕ 는 슬랙모선(slack bus)의 발전량임.

표 5 선로의 기술자료 및 대체가액
Table 5 Technical Data and Replacement Cost for TLs

선로	모선		공장 (km)	R (100MVA)	X (100MVA)	대체가액 (천\$)
	From	To				
Line 1	10	20	50	0.50	2.0	6,075
Line 2	10	30	75	0.75	3.0	2,925
Line 3	30	40	50	0.50	2.0	5,000
Line 4	20	50	125	1.25	5.0	2,240
Line 5	20	40	100	1.00	4.0	3,825
Line 6	40	50	175	1.75	7.0	8,680

※대체가액[분담률(발전:부하 균등), 2부요금(기본:사용 균등)]

4.2 전력조류계산 모듈 성능

송전요금을 계산함에 있어서 실제 계통 상황을 보다 정밀하게 모의하기 위해서는 AC 조류계산을 사용해야하나 시스템의 대표상황에 대해 해의 수렴성이 완벽하게 보장되지 않기 때문에 대부분 DC 조류계산이 사용되고 있으나 손실에 대한 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 전통적인 DC 조류계산 모듈과 손실을 보정한 수정 DC 조류계산 모듈을 제공하여 보다 실제 상황에서 근접한 결과를 사용자가 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.

표 6은 제안한 교육용 시뮬레이터의 전력조류계산 모듈을 통해서 수행한 각 선로의 전력 조류량을 제시한 것이다. 표 6에서 알 수 있듯이 전통적인 DC 조류계산에 비해서 본 연구에서 제안하고 있는 수정DC 조류계산이 실제 AC조류계산결과(상업용 패키지인 PowerWorld로 수행)에 보다 근접한 결과를 얻었다.

표 6 전력조류계산 모듈에 의한 전력조류량 계산 결과
Table 6 Power Flow Results of the Proposed Load Flow Module

선로	전력 조류량[MW]		
	Conventional DC load flow	Modified DC load flow	PowerWorld (AC)
Line 1	737.500	763.167	765.389
Line 2	262.500	276.833	277.424
Line 3	53.125	58.375	53.142
Line 4	312.500	320.167	321.624
Line 5	15.625	13.875	17.545
Line 6	46.875	49.625	48.733
합	1,428.125	1,482.042	1,483.875

4.3 균등 비용분담(발전:수요=50:50)시 사용요금

송변전설비의 필요수입액을 발전측과 수요측이 균등분담하고 각 부담분에 대해 기본요금과 사용요금으로 균등 회수하는 경우에 대해 사용요금을 본 교육용 시뮬레이터를 이용해 산정한 결과를 그림 12에 제시하였다. 접근방법에 따른 산정결과를 테이블과 차트형태로 도시함으로써 사용자가 직관적으로 그 효과를 분석할 수 있도록 하였으며, 사용요금 산정 결과는 요금 또는 단가로 그 단위를 변경할 수 있다.

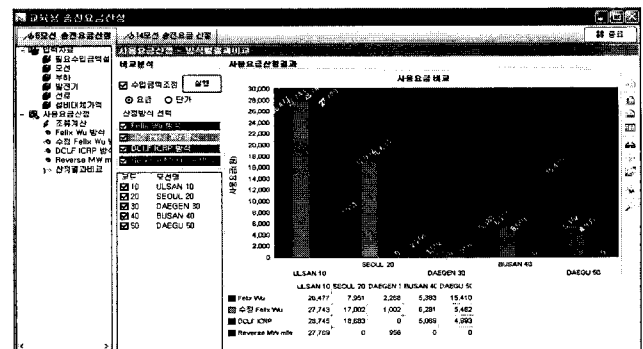


그림 12 사용요금산정 방법론에 의한 비교
Fig. 12 Comparison of Evaluating Methods for Usage Cost

표 7은 전력조류계산 모듈별 사용요금 산정결과를 활용기법에 따라 구분하여 제시하였다. 모든 접근법이 사용요금에 대한 필요수입액을 만족하고 있으며, Reverse MW mile법은 발전에 대해서만 산정되어 28,745천불의 비용이 회수되었다.

DC 조류계산의 손실보정 메커니즘 도입 유무에 따라 Felix Wu와 수정 Felix Wu기법은 사용요금의 영향이 크게 나타났으며 DCLF ICRP기법과 Reverse MW mile기법은 상대적으로 영향이 적었다. Felix Wu기법의 경우에는 모선10번 발전기가 1,325천불의 사용요금을 더 부담하고 모선30번 발전기의 사용요금이 경감되었으며, 수요측에서는 모선40번 부하의 사용요금이 1,277천불 증가되고 상대적으로 타 모선 부하의 사용요금이 감소한 결과를 도출하였다.

선로손실에 대한 보정과 선로부하율의 영향을 모두 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하면, 2,591천불의 사용요금이 모선 10번 발전기에 추가되고 모선 30번 발전기에는 경감되는 결과가 도출되었다. 상대적 규모가 작은 시장참여자에게는 이러한 결과가 진입장벽으로 작용할 수도 있다.

표 7 조류계산모듈별 사용요금 산정 결과
Table 7 Calculated Usage Cost by Load Flow Modules

(단위 : 천\$)

기법	모선	발전측		수요측			소계
		10	30	20	40	50	
DC 조류 계산 모듈	Felix Wu	25,152	3,593	8,213	4,106	16,426	57,490
	수정 Felix Wu	27,595	1,150	17,092	6,215	5,438	57,490
	DCLF ICRP	28,745	0	18,683	5,068	4,993	57,490
	Reverse MW mile	27,787	958	0	0	0	28,745
수정 DC 조류 계산 모듈	Felix Wu	26,477	2,268	7,951	5,383	15,410	57,490
	수정 Felix Wu	27,743	1,002	17,002	6,281	5,462	57,490
	DCLF ICRP	28,745	0	18,683	5,069	4,993	57,490
	Reverse MW mile	27,789	956	0	0	0	28,745

수정 Felix Wu기법과 영국의 DCLF ICRP기법은 분담 구성비측면에서 손실보정 메커니즘의 도입 유무에 큰 영향을 받지 않고 매우 유사한 수준의 결과를 보였다.

사례연구를 통해서 선로부하율이 상대적으로 낮은 경우에는 해당 선로의 회수비용을 조정하는 메커니즘을 도입하는 것이 보다 현실적임과 동시에 전력시장 참여자에게 시장 진입에 대한 긍정적 시장신호를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 송전망 이용요금을 산정하는 기본이론 학습과 다양한 정책 변수 및 전력계통의 변화를 고려한 송전요금 설계 및 분석을 지원할 교육용 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 교육용 송전요금산정 시뮬레이터는 다양한 송전요금 설계안의 사전 분석을 통한 합리적인 의사결정을 지원

하며 다양한 교육적 목적으로 활용될 수 있다.

본 연구에서 개발한 교육용 송전요금산정 시뮬레이터는 입출력 및 분석, 전력조류계산, 전력조류추적, 그리고 데이터베이스 등 4개 모듈로 개발하였으며, 데이터베이스는 PSS/E Raw Data 파일을 기준으로 스프레드시트형태로 입력을 단순화하였다. 전력조류계산은 DC조류계산과 선로손실을 보정한 수정 DC조류계산 모듈을 제공하여 보다 현실적인 분석을 수행할 수 있도록 하였으며, 전력조류추적은 Felix Wu기법, 선로부하율을 고려한 수정 Felix Wu기법, 영국에서 채택하고 있는 DCLF ICRP기법, 그리고 Reverse MW mile기법을 분석할 수 있도록 개발하였다. 송전요금 산정기법들의 비교분석을 추가하여 사용자로 보다 높은 학습효과를 얻을 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안한 교육용 송전망 이용요금산정 시뮬레이터는 새로운 제도의 설계 및 전력시장의 다양한 요구사항에 대한 영향 분석 등 교육적 목적으로 활용될 수 있으며, 향후 송변전비용에 대한 분석 기능을 추가하여 완성도를 제고할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-112) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] I.J. Perez-Arriga, *et al.*, "Marginal pricing of transmission service: An analysis of cost recovery", IEEE Transactions on power system, Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [2] Francois Leveque, 'Transport pricing of electricity networks'.
- [3] H.M. Merrill, B.W. Erickson, "Wheeling rats based on marginal-cost theory", IEEE Transactions on Power System, Vol. 4, No. 4, October 1989.
- [4] D. Shirmohammadi, *et al.*, "Cost of transmission transactions: an introduction", IEEE Transaction on Power System, Vol. 6, No. 3, August 1991.
- [5] 산업자원부, "송전이용요금산정기준", 2006.8.9
- [6] 한국전력공사, "송전망 이용가격 산정 및 전산모형", 2001.10.
- [7] National grid, 'The statement of the Use System Charging Methodology'.
- [8] ESB National grid, 'Explanatory Paper for 2004 Statement of Charges'.
- [9] F.F. Wu, Y. Ni, P. Wei, "Power Transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in Systems Without Loopflow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, August 2000.
- [10] 산업자원부, "송전요금산정 알고리즘 및 프로그램 개발", 2006.6

저 자 소 개



김 현 홍(金 鉉 洪)

1977년 12월 28일생. 2004년 전주대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel. : 02-458-4778, Fax : 02-444-1418
E-mail : hhblue@konkuk.ac.kr



박 종 배(朴 宗 培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수.
Tel. : 02-450-3483, Fax : 02-444-1418
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



조 기 선(曹 基 善)

1968년 1월 26일생. 1995년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력산업정책연구그룹 초빙연구원.
Tel. : 031-420-6126
Fax : 031-420-6129
E-mail: kscho@keri.re.kr



신 중 린(愼 重 麟)

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.
Tel. : 02-450-3487, Fax : 02-444-1418
E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



정 윤 원(鄭 允 源)

1977년 5월 8일생. 2002년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 02-458-4778, Fax : 02-444-1418
E-mail : ywjeong@konkuk.ac.kr