

대규모 전력계통에서의 하위 송전계통 축약을 이용한 FACTS 위치선정 연구

論 文

48A-11-10

FACTS Site Selections in Large Power Systems using Subtransmission System Reduction

張秉勳* · 秋鎭夫** · 權世嫻***

(Byung-Hoon Chang · Jin-Boo Choo · Sae-Hyuk Kwon)

Abstract - This paper proposes the FACTS site selection method using subtransmission system reduction. A general method which uses the sensitivity of the variation in voltage and reactive power has been used to determine the location of shunt type FACTS device, but there is a difficulty to finding a proper location due to the overestimation of the effect of sub-transmission systems. Therefore, there is a need to reduce sub-transmission system for finding an effective location of shunt type FACTS devices such as SVC(Static Var Compensator), STATCOM(Static Synchronous Compesator), and so on.

Key Words : Network Reduction, Large Power System, Subtransmission System, Voltage Stability

1. 서 론

전력계통에서의 FACTS설비에 대한 설치 후보지 선정방법은 전압안정도, 과도안정도, 정태안정도 등의 계통해석을 통해 전력계통의 불안정 요소를 찾아내어, 이 불안정 요소와 모선(또는 선로) 파라미터 사이의 연관관계를 수식화함으로써, 전력계통에 나타나는 불안정 요소를 가장 효과적으로 해결할 수 있는 FACTS 설치위치를 선정하는 것이다[1,2]. 정적상태 향상을 위한 FACTS 설치위치 선정방법은 자코비안 행렬의 고유치중 불안정 고유치에 대한 모달해석(modal analysis)을 통해 불안정 고유치에 대한 참여율이 높은 모선 또는 선로를 선정하는 방법이 주로 이용되고 있다[3,7,8,9].

우리나라와 같이 하위 송전계통(154kV 계통)을 필요에 따라 방사상으로 구성하여 운용하는 경우, 자코비안 행렬의 불안정 고유치에 대한 모선참여율이 대부분 하위계통 모선에서 나타나는 현상이 발생하게되어, 이 경우 병렬 타입 FACTS(SVC, STATCOM)의 위치선정이 곤란하게 된다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해, 하위송전 계통축약을 통해 FACTS 위치를 선정하였다. 축약계통 및 원래계통에서 선정된 위치에 대해 FACTS 적용효과를 분석한 결과, 축약계통에서 선정된 FACTS 위치가 더욱 좋은 전압안정도 해석결과를 보이고 있다[10].

2. 하위송전 계통축약

2.1 개요

본 논문에서는 보다 정확하고, 신속한 전압안정도 해석을 위해, 네트워크의 상위 송전계통(기간 송전계통)은 보존(retain)하면서, 하위 송전계통을 축약하는 방법을 제시하였다. 하위 송전계통 축약을 위해, 다음과 같이 전체 계통을 다음과 같은 3가지의 소단위 계통으로 분류하였다.

- 대상 계통(study system) : 축약시 보존될 네트워크 부분, 하위 송전계통 축약을 위해 대상계통은 상위 송전 계통(기간 송전계통)으로 정한다.
- 외부 계통(external system) : 축약될 네트워크 부분, 하위 송전계통 축약을 위해 외부계통은 하위 송전계통으로 정한다.
- 경계 계통(boundary system) : 외부계통의 일부분으로 대상계통과 연결하기 위해 보존될 계통, 대부분의 경우에 경계계통은 상위 송전계통의 고압모선과 변압기로 연결된 하위 송전계통의 저압 모선들로 구성되며, 기존의 경계계통 외에 추가로 하위 송전 계통 모선들이 경계 모선으로 보존될 수도 있다.

2.2 PQ 모선제거

모든 부하가 일정 MVA 부하라고 가정하면, nodal admittance equation은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

* 正 會 員 : 電力研究院 電力系統研究室 前任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 電力研究院 電力系統研究室 首席研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣電子電波工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 2日

最終完了 : 1999年 9月 27日

\tilde{I}_1 은 보존된 모선 주입 벡터이다. \tilde{I}_s 는 $\tilde{I}_{s_i} = (S_i / \tilde{V}_i)^*$ 와 같은 전류 형태로 변환된 일정 MVA 부하의 벡터이다. 여기서 \tilde{I}_{s_i} , S_i , and \tilde{V}_i 들은 외부 모선 i에 대한 각각 변환된 전류형태, 일정 유효전력 부하, 전압 등이다. 가우시안 소거법을 적용하면 다음과 같다.

$$[\tilde{I}_1] = [Y_{11}] [\tilde{V}_1] + [\tilde{I}_s] \quad (2.2)$$

행렬 $[Y_{11}]$ 은 등가 네트워크의 Y-bus 이다.

$$[Y_{11}] = [Y_{11}] - [Y_{12}] [Y_{22}]^{-1} [Y_{21}] \quad (2.3)$$

벡터 $[\tilde{I}_s]$ 는 보존된 모선의 등가 전류형태에 대한 벡터이다.

$$[\tilde{I}_s] = - [Y_{12}] [Y_{22}]^{-1} [\tilde{I}_s] \quad (2.4)$$

제거 후, $[\tilde{I}_s]$ 는 $S_j, \tilde{V}_j, \tilde{I}_{s_j}$ 와 같은 등가 일정 유효전력 부하로 변환된다. 여기서, \tilde{V}_j 는 보존된 모선 j의 전압이고, S_j 는 보존된 모선 j에서 일정 유효전력 부하가 기존 부하에 추가된 것이다.

식 (2.4)의 효과는 각각의 소거된 모선으로부터 제거된 모선의 전기적 근사값을 비율적으로 인근의 보존된 모선으로 부하를 배분하는 것이다.

참고문헌 [4]에서 설명된 것 처럼, Ward Injection 방법은 외란 조건하에서 PV 모선들의 신뢰성 있는 대표적인 무효용량이 될 수 없기 때문에 PV 모선들을 제거하기 위한 방법으로 부적절 하다.

2.3 PV 모선 통합

모선 데이터 통합은 실제 발전력과 최대 발전력, 그룹의 무효 한계 등이 각각 합해지고, 각 각의 통합량은 등가 모선으로 모델링됨에 의해 수행되었다. 등가 발전기 전압 설정점은 다음 수식과 같이 그룹의 발전기 전압 설정점의 가중(weighted) 평균을 구함으로써 계산된다.

$$V_{hold_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{hold,i} Q_{max,i}}{\sum_{i=1}^N Q_{max,i}} \quad (2.8)$$

가중치 Q_{max} 는 대상계통의 전압 프로파일에서 각 발전기의 스트레스트된 조건하에서의 효과를 정량적으로 배분하게 된다. Q_{max} 가 Q_{gen} 대신 이용되게 되는 데, 그 이유는 Q_{max} 가 일반적인 전압이 낮을 경우인 전압 불안정을 연구할 때, 스트레스트된 조건에서 전압에 영향을 주는 발전기의 능력을 나타내기 때문이다. 전압이 높을 경우인 일반적으로 경부하시를 대상으로 할 경우, Q_{min} 이 더욱 적절한 가중치가 된다.

따라서, 두 개의 발전기 i와 j에 대해 근사적으로

$Q_{max} / Q_{max} \approx Q_{min} / Q_{min}$,가 되므로 식(2.8)을 이용할 수 있다[6].

2.4 하위계통 축약의 장점

대규모 전력계통에서 수많은 외란에 대한, 전압안정도 및 미소신호 안정도와 같이 많은 시간이 요구되는 계통해석을 필요로 하며, 이 때에 상위계통(기간계통) 전체의 모델링이 되어야만 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 따라서, 계산 시간을 절약하고, 데이터 관리를 간단화하며, 컴퓨터 메모리를 적게 쓰기 위해서는 하위계통이 축약된 등가 네트워크 모델을 이용하여, 하위계통의 효과를 상위 계통이 표현하도록 하는 방법이 유용할 수 있다.

본 논문에서는 대규모 전력계통의 불안정 해석시 하위계통과 연결된 발전기에 의해 전압이 조절되는 하위계통 모선들이 주로 불안정한 모선으로 나타나는 문제에 대한 해결방안으로서 하위계통 네트워크를 축약하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통해 전압안정도를 해석할 경우 이러한 문제를 해결할 수 있으며, 이에 대한 검증은 사례연구에서 보였다.

3. 사례연구

3.1 축약 전, 후 계통 비교

2010년 한전계통에 대해 하위송전 계통축약을 수행하였으며, 축약계통은 다음과 같은 축약 정도를 나타내고 있다.

표 1 축약전, 후 계통규모 비교

Table 1 System scale of the reduced & original system

구분	원래계통	축약계통	축약비율
모선수	1199	431	64.1%
선로수	2572	1104	57.1%

표1에서와 같이 축약계통은 원래계통 규모의 40%정도의 모선 및 선로를 가지고 있는 계통이지만, 원래계통과 거의 같은 계통특성을 보이고 있다.

제시된 축약계통은 축약전 계통과 비교하였을 때, 발전력, 부하, 조류 및 전압 등이 거의 같음을 확인하였다. 그러나, 이러한 결과만으로 축약이 완전하게 되었음을 나타내지는 못한다.

보다 정확한 네트워크 축약을 검증하기 위해, 부하 증가시 유효전력 및 무효전력에 대한 전압감도가 매우 중요한 요소로 작용하게 된다. 따라서, 축약전 계통과 축약 계통을 부하증가에 따른 전압감도를 나타내는 유효전력-전압(P-V) 곡선과 특정모선에서의 무효전력 변화에 따른 전압감도를 나타내는 무효전력-전압(Q-V)곡선으로 비교하여, 그림1~4에서 보였다.

유효전력-전압(P-V) 곡선은 부하증가에 따른 전압의 변화를 표현한 것으로서, 주요 345kV 모선인 DSU, SDG, SKJ, KS, CHY 모선에 대해 비교되었다. 이 결과, 비교된 모든

모선이 축약 전에서 보인 P-V곡선 양상이 축약 후에도 거의 유사하게 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 모선 참여율 계산

사례계통의 축약전 원래계통 및 축약계통에 대해 부하증가시 P-V 곡선에서의 전압 임계점에서 모달해석을 수행하여 구해진 최소 고유치의 모선 및 선로 참여율 계산결과는 그림 5,6과 같다.

그림5에서와 같이 원래계통에서는 154kV 7875(NW#2) 모선이 가장 큰 참여율 팩터를 보이고 있으며, 다른 모선의 참여율 팩터와의 차가 크지 않음을 알 수 있으며, 참여율 크기가 50순위 이상 까지 모두 154kV 모선임을 확인하였다. 이러한 현상은 계통의 부하와 가까운 위치에 있는 하위 송전계통 모선에서 전압과 무효전력간의 감도가 다른 모선들에 비해 더욱 크다는 것을 의미한다. 이러한 문제는 실제 계통에서 FACTS의 모선 위치를 선정하는데 어려움을 주고 있으며, 이는 참여율 계산에 사용된 VSTAB 프로그램의 한계라고 생각된다.

그림6에서와 같이 축약계통에 대한 모선참여율은 345kV 6860(NKS) 모선이 가장 큰 참여율 팩터를 보이고 있으며, 다른 모선들과 비교하여 상대적으로 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 345kV 모선과 154kV 모선이 거의 같은 비율로 나타나고 있으나, 여기서 등장되는 154kV 모선은 네트워크 축약시 보존된 경계모선으로 FACTS의 모선위치 선정에는 문제를 발생하지 않는다.

그림5에서와 같이 원래계통에서 모선참여율이 가장 크게 나타난 154kV 7875모선(SVC-O)을 이용하여 병렬형 FACTS 설비인 200MVA 용량의 SVC를 적용하여 그 효과를 분석하였다. 적용효과 분석은 원래계통에서 구해진 병렬형 FACTS 후보지에 SVC를 정상상태시 원래계통의 해당모선에 적용하여 P-V 곡선을 구하고, 이를 SVC 적용전과 비교하여 전압안정도 마진 개선효과를 분석하여, 그림7에서 보였다. 이 결과, 약 450MW의 전압안정도 마진 개선효과가 있는 것으로 분석되었다.

또한, 그림6에서와 같이 축약계통에서 모선참여율이 가장 크게 나타난 345kV 6860모선(SVC-R)을 이용하여 그림 5에서와 같은 방법으로 SVC를 적용하여 그 효과를 분석하였으며, 그 결과를 그림7에서 보였다. 이 결과, 약 700MW의 전압안정도 마진 개선효과가 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 축약계통에 의해 구해진 FACTS 후보지가 원래계통에 의해 구해진 경우보다, 약 250MW의 전압안정도 개선효과가 더 있는 것으로 분석되었다.

위와 같은 모의를 상정사고시에도 적용하였으며, 이에 대한 결과를 그림8에서 보였다. 이 결과 상정사고시에도, 축약계통에 의해 구해진 FACTS 후보지가 원래계통에 의해 구해진 경우보다, 약 200MW의 전압안정도 개선효과가 더 있는 것으로 분석되었다.

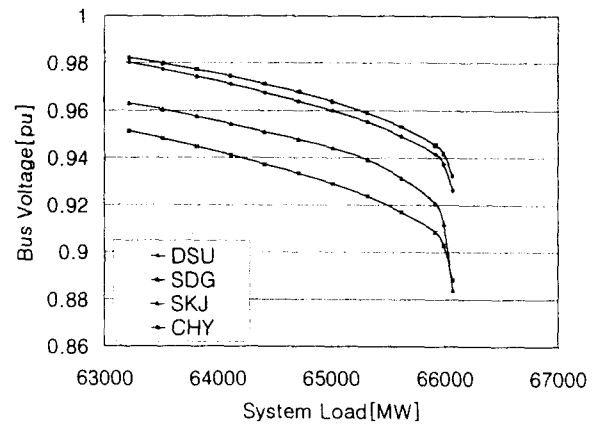


그림 1 축약전 사례계통 P-V 곡선
Fig. 1 P-V curve of the original case system

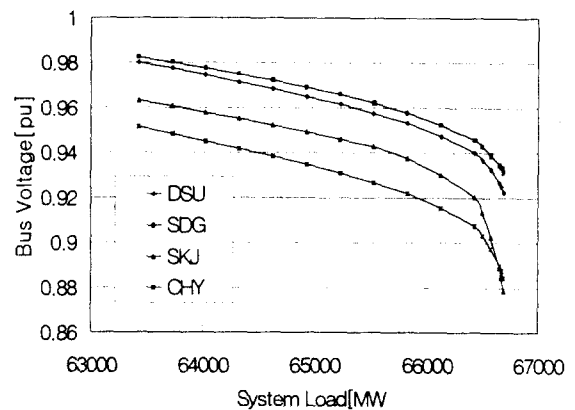


그림 2 축약 사례계통 P-V 곡선
Fig. 2 P-V curve of the reduced case system

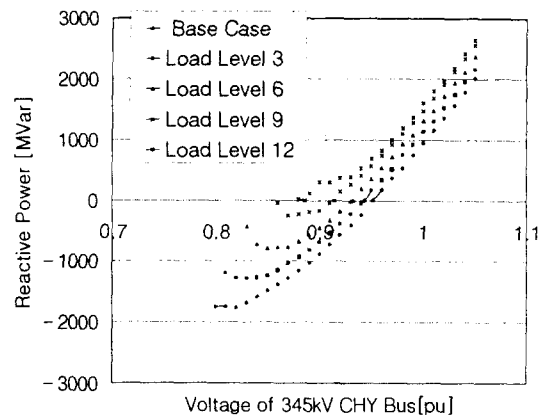


그림 3 축약전 사례계통 Q-V 곡선
Fig. 3 Q-V curve of the original case system

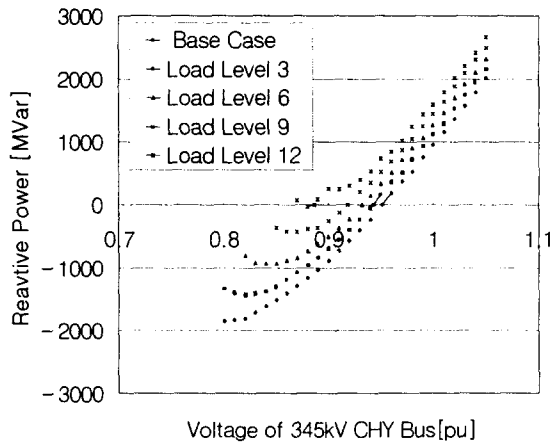


그림 4 축약 사례계통의 Q-V 곡선
Fig. 4 Q-V curve of the reduced case system

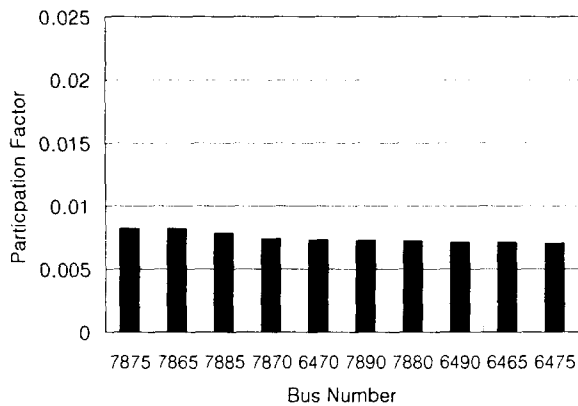


그림 5 원래계통의 모선참여율(내림차순)
Fig. 5 Bus participation factor of the original system(descending order)

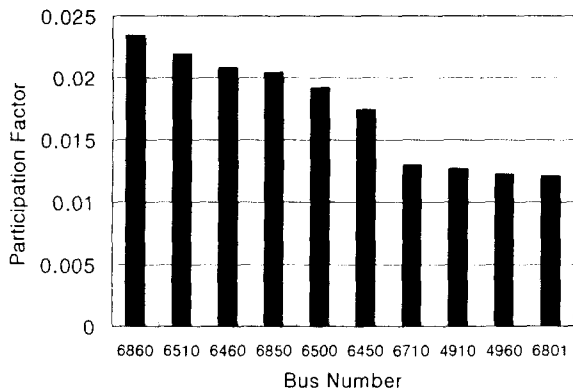


그림 6 축약계통의 모선참여율(내림차순)
Fig. 6 Bus participation factor of the reduced system(descending order)

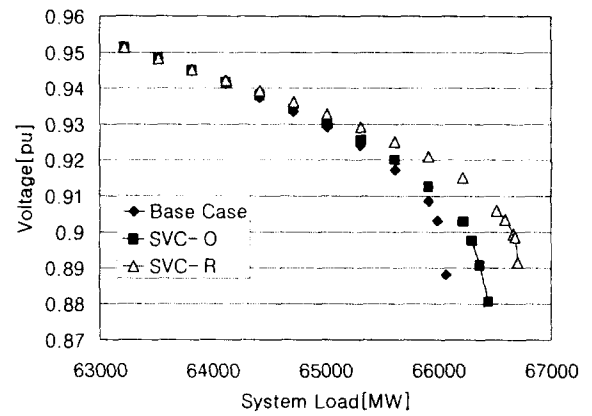


그림 7 정상상태시 FACTS 적용효과(P-V곡선)
Fig. 7 FACTS application effects at the normal state(P-V curve)

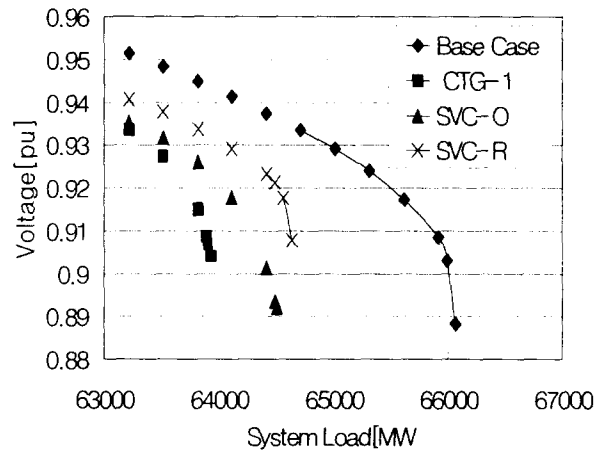


그림 8 상정사고시 FACTS 적용효과(P-V곡선)
Fig. 8 FACTS application effects at the contingency(P-V curve)

4. 결 론

대규모 계통축약을 위한 네트워크 축약방법은 하위계통 축약(subtransmission reduction) 방법을 이용하였으며, 이 결과 전압안정도 해석시 자코비안 행렬에 대한 불안정 고유치와 연관된 요소에 대한 부정확한 해석결과를 보완하면서, 보다 신속한 해석이 가능하게 하였다. 특히 병렬형 FACTS 후보지 선정에 대한 기존의 자코비안 행렬에 대한 최소 고유치에 대한 모선 참여율 계산 결과는 주로 하위 계통 모선에 나타나 부정확한 위치를 선정하게 하며, 이를 해결하기 위해 하위계통 축약을 수행하고, 축약된 계통에 대한 FACTS 위치선정 결과 더욱 정확한 위치를 선정할 수 있었다.

감사의 글

본 논문을 지도해 주신 고려대학교 송길영 교수님, 권세혁 교수님, 이병준 교수님, 전남대학교 남해곤 교수님, 한전 전력연구원 추진부 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] CIGRE FACTS SOCIETY, "FACTS OVERVIEW", CIGREI, 95 TP 108, 1995. 4
 [2] EPRI "Voltage Stability/Security Assessment and On-Line Contro", TR-101931, Final Report Vol. 1, 1993. 4
 [3] B. Gao, G.K. Morison, and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", paper 91 SM420-0 PWRs, presented at the 1991 IEEE PES Summer Meeting San Diego, California, July 28 - August 1, 1991.
 [4] Wu, F., Monticeli, A., "Critical Review of External Network Modelling for Online Security Analysis" Electrical Power & Energy Systems, Vol. 5, No. 4, 1983.
 [5] G.C. Verghese, I.J. Perez-Arriaga, and F.C. Schweppe, "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems Part I : Heuristic Introduction, Part II : The Dynamic Stability Problem", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 9, September 1982, pp. 3117-3134.
 [6] James F. Luini, R. Peter Mackin, Gerardo H. Molina "Subtransmission Reduction for Voltage Instability Analysis" IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, March 1993, pp. 349-356.
 [7] 한전 전력연구원 "송전선로 송전용량 증대방안에 관한 연구" KRC-94Y-S12, 1996. 9
 [8] 장병훈, 이근준, 김영한, "전력 수송능력 증대를 위한 FACTS의 전력계통 적용효과 연구", 대한전기학회 논문지, 제46권 2호, pp192-197, 1997년 2월.

[9] 이근준, 장병훈, 오태규, 추진부, "전력계통의 안전성 향상을 위한 FACTS 적용기법 연구", 대한전기학회 논문지, 제46권 10호, pp1435-1440, 1997년 10월.
 [10] 한전 전력연구원 "FACTS 계통운용 기술개발 연구(I 단계)"TR.96EJ26.P1999.191, 1999. 4

저 자 소 개



장 병 훈 (張 秉 勳)

1964년 3월 21일생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원



추 진 부 (秋 鎭 夫)

1950년 1월 7일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 수석연구원

권 세 혁 (權 世 爓)



1949년 5월 14일생. 1974년 서울대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사). 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학). 현재 고려대 전기전자전파공학부 교수

Tel : (02) 3290-3220

E-mail : kwon@eeserver.korea.ac.kr