

Effective Localized-Voltage Control Scheme using the Information from Pilot Bus

宋成煥* · 李昊澈† · 尹容兌** · 文承逸***
 (Sung-Hwan Song · Ho-Chul Lee · Yong-Tae Yoon · Seung-Il Moon)

Abstract - One of the major reasons for recent blackout, like August 14, 2003 blackout in the US and Canada has been insufficient voltage/reactive power support. For the stable reactive power management, a new approach for the voltage monitoring and control structure is required in the market environment. This paper proposes the effective localized-voltage control scheme using the information from pilot buses at each zone. In this paper, the steady state voltage monitoring and control (SSVMC) is adopted and illustrated for the voltage control scheme during steady state because it is thought as the systemic algorithm to explain voltage profile phenomenon before and after contingencies. And the concept of electrical distance is applied to simultaneously achieve both clustering the voltage control zone, and selecting the pilot bus as the representative node at each control zone. Applying SSVMC based on the structure with clustering and pilot bus enables system operators to monitor and understand the system condition much more easily, to monitor and control the voltage in real-time more manageably, and to respond quickly to a disturbance. The proposed voltage control scheme has been tested on the IEEE 14-bus system with the numerical analysis to examine the system reliability and structure efficiency.

Key Words : steady state voltage monitoring and control (SSVMC), electrical distance, clustering, pilot bus, Information exchange

1. 서 론

2003년에 발생한 북미 광역정전에 대한 최종보고서[1]에서 NERC는 46개의 권고항목을 제안하였는데, 이 중 무효전력 제어 및 전압제어 수단 강화에 대한 내용이 포함되어 있다. 이는 2003년 북미 광역정전 발생에 무효전력 관련 문제가 포함되어 있음을 나타낸다. 이에 대해 우리나라도 국내 전력 계통의 전압 및 무효전력 분야에 대한 운영 현황 및 문제점을 분석하고, 장단기 중점 추진과제를 도출하기 위하여 업무 추진 팀(Task Force Team)을 구성하여 운영 중일 만큼 무효전력 수급 조절 문제는 전력계통의 신뢰도를 유지하는데 중요한 역할을 담당하고 있다.

현재 전력산업이 수직 통합적인 구조에서 경쟁 시장형태로 변화를 겪음에 따라서 계통의 운영과 제어 측면에서도 새로운 변화를 맞이하게 되었다. 이전 수직통합적인 구조에서의 전력산업은 유효전력의 수급 균형을 맞추는 데만 초점을 맞추고 무효전력은 유효전력을 생산함에 따라 부수적으로 생산되는 것으로 간주하였다. 따라서 기존 전력산업에서

는 계통운영자의 경험에 의하여 계통전압이 유지되는 범위 내에서 무효전력의 생산이 이루어졌다. 하지만, 계통에 도입되는 부하들이 점점 더 복잡하게 되고 다양한 동특성을 보임에 따라 무효전력의 수급도 계통운영에 큰 변수로 작용하게 되었다.

더 실질적이고 효율적인 무효전력시장을 설계하기 위해 계통운영자는 무효전력의 지역적인 성격을 고려해야 한다. 최근 들어 이런 특성 때문에 시장 설계자들은 지역적인 무효전력 시장이라는 이슈에 많은 관심을 보인다. 더불어 무효전력 클러스터링(Clustering)은 혼잡 조류에 기본을 두는 유효전력 클러스터링과 다른 방법으로 이루어져야 한다 [2],[3]. 무효전력은 유효전력과 달리 지역적으로 제어되는 구성 성분이기 때문이다.

유럽지역에서는 전압제어 방법을 3단계로 나눈 계층적(Hierarchical) 전압 제어방법을 제시하고 실행하고 있다. 계층적인 제어 방법은 online/on-site 샘플링 신호(Sampling Signal)에 기본을 두고 있는 1차 전압제어, 시스템 전압을 정해진 범위내로 제어하기 위해 지역정보를 사용하는 2차 전압제어, 시스템 전압의 최적화를 목적으로 하는 3차 전압제어로 이루어져 있다. 특히 2차 전압제어가 실질적이고 이론적으로 가장 많이 연구되고 있으며, 2차 전압제어의 주요 쟁점 사항은 클러스터링과 파일럿 모션(Pilot Bus) 선정에 있다. 실제로 2차 전압제어를 위해서 파일럿 모션과 제어 발전기를 선택하고 최적 제어방법과 분권적(Decentralized)

† 교신저자, 學生會員 : 서울大學 工大 電氣 · 컴퓨터 碩士課程
 E-mail : hopang57@snu.ac.kr
 * 正會員 : 서울大學 工大 電氣 · 컴퓨터 博士課程
 ** 正會員 : 서울大學 工大 電氣 · 컴퓨터 助教授 · 工博
 *** 正會員 : 서울大學 工大 電氣 · 컴퓨터 正教授 · 工博
 接受日字 : 2006年 7月 24日
 最終完了 : 2006年 10月 25日

문제의 알고리즘을 이용한 2차 전압제어를 스페인 전력시스템에 적용한 예도 있다[4]. 파일럿 모선을 선택함에 있어서 기존의 이론적 연구[5]에서는 비선형적인 접근을 위해 조류 방정식을 이용하고 파일럿 모선의 초기 값을 구하는 GREEDY ALGORITHM과 포괄적인 GLOBAL SEARCH의 두 단계로 구성된 방법들을 이용하고 있으며, 실제적으로 프랑스 전력시스템[6]에서는 단락전력(Short-circuit Power) 계산 프로그램을 통하여 단락전력이 가장 큰 변전소를 파일럿 모선으로 선정하여 2차 전압제어를 시행하고 있다.

본 논문에서는 전기적 거리(Electrical Distance)[6],[7]라는 개념을 사용하여 클러스터링과 파일럿 모선 선정을 동시에 성취하고자 한다. 전기적 거리는 모선간의 전기적인 민감도 관계를 의미하고, 지역을 나누는데 있어 적용하기 적당한 것으로 판단된다. 기존의 논문[8]에서 전기적 거리를 이용하여 지역적 무효전력 시장 설계가 제안되었는데, 이는 무효전력의 획득과 시장의 정산 등 시장구조에 집중되어 있다.

본 논문은 계통운영의 측면에서 무효전력과 전압의 민감도를 나타내는 전기적 거리를 통해 클러스터링을 하고 파일럿 모선을 선정하고자 한다. 또한 선택된 파일럿 모선을 통해 전압을 제어하는데 있어서 효율적인 방법을 제시하고자 한다. 전력 시스템의 전압 문제에 대해 가장 현명한 방법은 사고가 발생하기 전에 여러 가지 가상의 사고를 예측하고 시뮬레이션을 해봄으로써 그런 사고가 발생하지 않게 하고, 발생한다고 해도 예측된 내용을 토대로 전압 문제를 해결하는 것이다[9]. 특히, 시스템에서 효율적인 전압 제어를 위해서 여러 정보들이 필요하며 그 정보교류의 구조 또한 중요하다[10]. 제안된 방법으로 간편화된 정보교류의 구조는 효과적으로 전압을 모니터링하고 제어할 수 있게 하며, 지역별 시스템의 상태를 감시함으로써 사고 후 빠른 대처가 가능해진다. 본 논문에서는 계통사고가 발생했을 때 정상상태와 유사한 전압 프로파일로 제어해주는 SSSVMC(Steady State Voltage Monitoring and Control)[11],[12] 알고리즘을 통해서 모든 부하 모선의 전압을 기준으로 하는 방법과 파일럿 모선 전압만을 기준으로 하는 방법을 비교, 검토하여 계통의 신뢰성과 정보교류 구조의 효율성을 검증하고자 한다.

2. SSSVMC Model [11],[12]

본 논문에서는 계통 사고 전과 사고 후의 전압 상태를 잘 반영하고, 사고 이전의 전압 형태로 제어해주는 SSSVMC 알고리즘을 도입하였다. 이 SSSVMC는 계통 전압 감시를 통해 계통 사고 등의 영향으로 악화된 전압 프로파일을 최적의 전압 상태로 제어해 주는 알고리즘이며, 여기서의 전압 제어는 시스템에서 무효전력의 뒷받침이 가능하다는 가정 하에 정상상태와의 전압 차를 최소화하는 것이다. SSSVMC의 이론적인 과정은 다음과 같다.

1. 조류계산식에서 무효전력 부분을 분리한다.
2. 선형화 방법을 이용해 비선형적인 문제를 선형화한다.
3. 정상상태 전압과 차이를 최소화하는 최적 제어 문제를 해결한다.
4. 모든 시스템 제약 조건이 만족할 때까지 반복해준다.

5. 위 과정이 불가능하면 가장 효율적인 위치의 부하차단을 한다.

본 논문에서는 정상상태와 부하 전압차이를 최소화하는 발전 전압 제어를 할 것이므로 그 식의 유도과정을 간단히 살펴보겠다. 유도과정은 크게 3단계로 나눌 수 있다. 먼저 조류계산식에서부터 정상상태와 사고 후 전압 변화 상태의 mismatch 구하는 과정, 그리고 구해진 mismatch 식을 근사화하고 부하와 발전에 따른 mismatch를 분리하여 행렬식으로 구하는 과정, 마지막으로 목적함수를 구하기 위해 이전 단계에서 발전전압에 의한 부하전압의 식을 유도하는 과정으로 나눌 수 있다.

A) 무효전력 mismatch(D) 구하는 과정

조류계산식에서 무효전력 부분만 보면 다음과 같다.

$$-V_i \sum_{j=0, j \neq i}^{l+g} V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) + V_i^2 [(\sum_{j=0, j \neq i}^{l+g} B_{ij}) - b_i] - Q_i = 0 \quad (1)$$

- 0 - 슬랙 모선; 1,2,...,l - 부하 모선; (l+1),..., (l+g) - 발전 모선
- $Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij}$: 모선 i와j 사이의 어드미턴스
- jb_i : 모선i의 병렬 어드미턴스

(1) 식을 정상상태 전압에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B^{nom} V^{nom} - Q^{nom} / V^{nom} = 0 \quad (2)$$

위 식에서 Q^{nom} / V^{nom} 은 각 벡터의 벡터 성분끼리 나누는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} \bullet V^{nom} &= [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_l \ \dots \ V_{l+g}]^T \\ \bullet Q^{nom} &= [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_l \ \dots \ Q_{l+g}]^T \\ \bullet B_{ii}^{nom} &= [(\sum_{j=0, j \neq i}^{l+g} B_{ij}) - b_i] \\ \bullet B_{ij}^{nom} &= -(B_{ij} \cos \theta_{ij} + G_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned}$$

시스템에서 어떤 사고가 발생하여 상태가 변했을 때 새로운 조류 방정식 해에 의해 시스템은 다음과 같이 변한다.

시스템의 토폴로지가 바뀐 상태에서 어드미턴스, 전압, 무효전력과의 관계를 나타낸 것이다.

$$BV - Q/V = 0 \quad (3)$$

이 식에 정상상태 전압(V^{nom})을 대입해 무효전력 mismatch(D)를 구할 수 있다.

$$D = BV^{nom} - Q_i/V^{nom} \quad (4)$$

B) H 행렬을 이용한 행렬식 표현

무효전력 mismatch의 근사화와 부하와 발전에 따른 mismatch 분리는 다음과 같이 구해진다. (3)식과 (4)식의 차로부터 (5)식을 얻을 수 있다.

$$D = -B\Delta V + \text{diag} \left\{ \frac{-Q_i \Delta V_i}{(V_i^{nom} (V_i^{nom} + \Delta V_i))} \right\} \Gamma \quad (5)$$

• 위 식에서 $\vec{1}$ 은 모든 성분이 1인 벡터를 의미한다. ($\Delta V = V - V^{nom}$)

식(5)에서 대각 행렬의 대각 성분은 테일러 전개(Taylor series)를 통한 확장이 가능하다. 테일러 전개 후 높은 차수 부분을 무시하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$D \approx -[B + \text{diag} \left\{ \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2} \right\}] \Delta V \quad (6)$$

H 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$H = -[B + \text{diag} \left\{ \frac{Q_i}{(V_i^{nom})^2} \right\}] \quad (7)$$

(6)식에서 mismatch를 발전기와 부하로 분리하여 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{dd} & H_{dg} \\ H_{gd} & H_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

- d - 부하 모선, g - 발전 모선
- D_d - 부하 모선의 mismatch
- H_{dd} - $d \times d$ 행렬
- H_{dg} - $d \times g$ 행렬
- ΔV_d - $1 \times d$ 행렬, 부하 모선의 전압 차이
- ΔV_g - $1 \times g$ 행렬, 발전 모선의 전압 차이

C) 목적함수

우리가 결과적으로 필요로 하는 목적함수인 발전 전압에 따른 정상상태와 부하 전압의 차이를 구하는 과정은 아래와 같다. D행렬은 정상상태 전압과 시스템변화 후의 전압 사이의 조류방정식 해에서 무효전력 mismatch를 나타낸다. 식 (8)에서 부하쪽의 mismatch만 고려해서 정리해보면 다음과 같다.

$$D_d = H\Delta V = [H_{dd} \ H_{dg}] [\Delta V_d \ \Delta V_g]^T \quad (9)$$

$$\Delta V_d = H_{dd}^{-1} D_d - H_{dd}^{-1} H_{dg} \Delta V_g$$

정상상태와 사고 후 부하전압의 변화량이 최소가 되는 방향으로 즉, 사고 후 최대한 정상상태가 되도록 발전 전압을 조정한다. 따라서 목적함수가 부하전압의 변화량 즉, 부하 전압의 오차가 되는 최소 자승법(Least square minimization)을 이용할 것이다.

$$\min_{\Delta V_g} \| \Delta V_d \|_2 \quad (10)$$

이 논문에서는 위의 알고리즘을 이용해서 사고 전과 사고 후의 부하모선 전압차이를 최소화하는 발전전압을 얻을 수 있다.

3. 전기적 거리를 이용한 클러스터링과 파일럿 모선 선정

전기적 거리를 이용하여 무효전력과 전압을 기준으로 한 클러스터링 및 파일럿 모선 선정에 대해 언급하겠다[4],[7].

그림 1은 전기적 거리를 계산하는 과정, 클러스터링을 하는 과정, 파일럿 모선을 선정하는 과정으로 이루어진 전반적인 클러스터링 과정의 절차를 보여준다. 더욱 구체적인 분석방법에 관해서 각 단계별로 나타내었다.

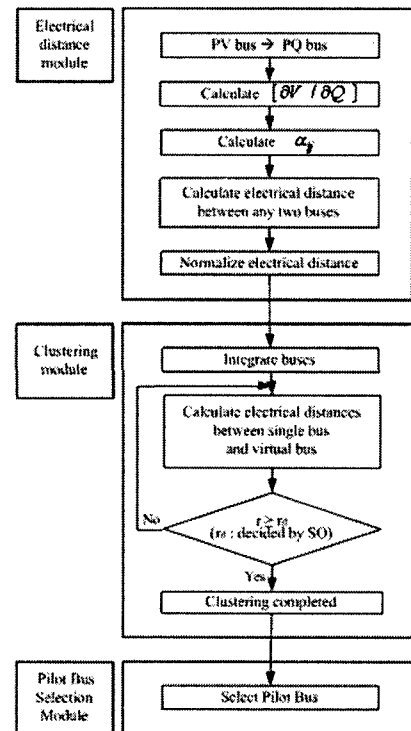


그림 1 클러스터링 절차
Fig. 1 Procedure of clustering

3.1 전기적 거리 산출 모듈

전기적 거리는 전력시스템에서 두 모선간의 전기적인 민감도 관계를 의미한다. 즉 두 모선이 서로 민감하여 전기적인 영향력이 크다면 이는 전기적인 거리가 가깝고 반대로 영향력이 작으면 전기적인 거리가 멀다. 따라서 전기적인 거리는 모선 간 무효전력 민감도에 의해 정해진다. 전기적 거리는 다음과 같은 순서로 구해진다.

Step1) $[\partial V/\partial Q]$ 를 계산하기 위해 모든 발전모선(PV 모선)을 PQ 모선으로 바꿔준다.

Step2) 모든 모선에서 $[\partial V_i/\partial Q_j]$ 값을 구해준다. 이 값은 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)의 역수로 어떤 모선에 무효전력 변화에 따르는 주변 다른 모선의 전압변화를 나타낸다.

$$\Delta V_i = -J_{ij}^{-1} * \Delta Q_j \quad (11)$$

• J_{ij}^{-1} 는 민감도 행렬로 $[\partial V_i/\partial Q_j]$ 을 의미한다.

Step3) Step2의 민감도 행렬 값을 사용하여 α_{ij} 의 값을 구한다. j모선에 전압 변화에 따른 i모선의 전압 변화는 아래에 나타난다.

$$\Delta V_i = [J_{ij}^{-1} / J_{jj}^{-1}] \Delta V_j = \alpha_{ij} \Delta V_j \quad (12)$$

• α_{ij} 는 $[j_{ij}^{-1} / j_{jj}^{-1}]$ 로 정의된다. 즉, α_{ij} 는 j버스에 무효전력 변화에 따라서 i, j 버스의 전압 변화의 비를 나타낸 것이다.

Step4) 전기적 거리의 대칭적인 성격을 반영하기 위해 $(\alpha_{ij} \times \alpha_{ji})$ 의 값을 이용하여 전기적 거리를 계산한다.

$$ed_{ij} = ed_{ji} = -\log(\alpha_{ij} \times \alpha_{ji}) \quad (13)$$

위의 식은 $(\alpha_{ij} \times \alpha_{ji})$ 의 값이 클수록 전기적 거리가 더욱 가깝다는 것을 의미한다. 다시 말해 영향력이 크다는 것은 거리적으로 가깝다는 것이 되고 영향력이 작다는 것은 거리적으로 멀다고 생각할 수 있다. 예를 들어 $(\alpha_{ij} \times \alpha_{ji})$ 의 값이 1이 되면 전기적 거리가 0이 되는 것을 알 수 있고 이는 i모선과 j모선이 같은 모선임을 의미한다.

Step5) 위의 전기적 거리 값 중 가장 큰 값으로 모든 전기적 거리를 나누어 줌으로써 이를 정규화한다.

위 과정을 통해 구해진 전기적 거리 즉 버스간의 무효전력, 전압의 상관관계를 이용하여 무효전력 제어를 위한 클러

스터링, 파일럿 모선 선정을 할 것이다.

3.2 전기적 거리를 사용한 클러스터링 모듈

모든 모선간의 전기적 거리가 구해진 후 r_d 의 범위 안에 존재하는 모선들을 하나의 모선으로 묶는 과정이 클러스터링이다. r_d 값이 작은 경우 제어 지역수가 많아지므로 실제 계통을 운영하는데 있어서 실용적이지 못하고 반면 r_d 값이 커서 제어 지역의 수가 너무 적은 경우 지역 내에 모선들간의 관계가 긴밀하지 못해서 pilot bus를 통한 지역 전체 전압 제어가 어려우므로 적절한 지역의 수로 나누어야 한다. 그리고 각 지역은 제어지역의 전압을 유지하기 위한 충분한 무효전력원을 가지고 있어야하고 제어지역 간에는 상호영향력이 최소화되어야 한다는 전제가 필요하다. 이런 조건을 모두 만족시키기 위해서는 계통의 시스템적 요소뿐만 아니라 계통의 현황과 지리적인 특성 등을 고려한 계통운영자의 경험이 어울려서 clustering이 이루어져야한다. r_d 범위 내에 존재하는 모선들은 하나의 가상의 모선을 형성하고 이런 과정을 통해 클러스터링이 이루어진다. 클러스터링이 이루어지는 과정을 아래에 간단하게 요약하였다.

Step1) 가장 작은 전기적 거리 값을 가지는 두 모선을 하나의 가상모선(virtual bus)으로 통합한다.

Step2) Step1에서 형성된 가상모선과 다른 모선(또는 다른 가상모선)과의 전기적 거리를 계산한다. 이 때 전기적 거리는 가상 모선과 단일 (또는 가상)모선 사이의 전기적 거리 중 가장 큰 값과 가장 작은 값의 평균을 사용한다.

$$ed_{ij} = (ed_{ij}^{\min} + ed_{ij}^{\max}) / 2 \quad (14)$$

Step3) 결국 모든 전기적 거리가 시스템 운영자가 정한 r_d 값 보다 크거나 같을 때까지 위의 과정을 반복하여 클러스터링을 완성한다.

클러스터링의 결과인 지역의 수나 지역의 범위를 결정하는 것은 실제계에 적용시 쉽지 않은 문제인 만큼 계통운영자의 시스템의 분석에 의해 조정된다. 따라서 계통운영자의 적절하고 경험적인 결정이 매우 중요한 부분이 되겠다.

나누어진 클러스터링을 토대로 각 지역의 효율적인 전압 제어를 위해 지역 전압을 잘 반영하는 파일럿 모선을 선정해야한다. 그 내용은 다음 장에 나타난다.

3.3 파일럿 모선 선정 모듈

파일럿 모선은 지역의 전압, 무효전력을 제어하는데 있어서 기준이 되므로 지역의 전압을 감시하고 제어하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 조건을 충족해야 된다.

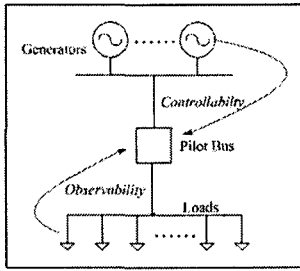


그림 2 파일럿 모선의 Controllability와 Observability
Fig. 2 Controllability and Observability of pilot bus

- 1) 파일럿 모선의 전압은 주변 무효 전력원에 의해 제어되어야 한다. (Controllable)
- 2) 파일럿 모선은 제어지역 전체 부하 모션전압을 반영해야 한다.(Observable)

위 조건을 기본으로, 앞서 행한 클러스터링을 이용하여 파일럿 모선을 결정한다. 우선 위 클러스터링에 의해 나누어진 각 지역마다 1개의 파일럿 모선이 있어야 한다.

$$\min_p \sum ed_{ip} \quad p \in \text{load buses} \quad (15)$$

여기서 p 는 파일럿 모선을 정하고자 하는 지역의 모든 부하모선을 의미한다. 지역의 전압 특성을 잘 나타내기 위해서 전체적으로 같은 지역의 다른 모션과 전기적 거리가 가장 가까운(값이 작은) 것을 의미한다. 여기서 선정된 파일럿 모선의 전압은 각 지역전압을 가장 잘 나타낸다. 따라서 파일럿 모선은 시스템 운영자가 시스템의 전압을 안정적으로 제어하고 무효전력을 효과적으로 관리하는데 큰 도움이 된다.

4. 파일럿 모선을 이용한 SSSVC 적용

SSVMC를 통해 시스템의 전압을 제어하는데 있어서 파일럿 모션 전압만을 기준으로 제어해주는 것이 가능한지 살펴보기 위해 2장에서 나타난 SSSVC에서 가중치(W_i)를 통해 목적함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min W_i \| \Delta V_{dj} \|^2 \quad (16)$$

이 식에서 모든 부하 모션을 이용해 전압제어를 해주는 경우에 $W_i = 1$ 로 두면 기존의 SSSVC의 목적함수와 동일하게 된다. 그러나 파일럿 모선의 전압만을 기준으로 전압제어를 해주는 경우에는 다음과 같이 파일럿 모션만을 제어 대상으로 포함시키고 나머지 모션은 제어대상에서 제외시킴으로써 파일럿 모선의 전압 값을 따르게 한다.

- $W_i=1$ 각 지역의 파일럿 모선의 경우
- $W_i=0$ 파일럿 모션을 제외한 나머지 모션

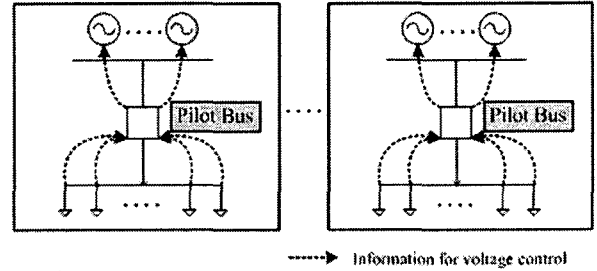
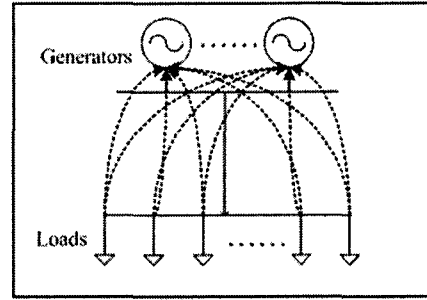


그림 3 파일럿 모선을 통한 제어
Fig. 3 Voltage control using pilot bus

그림 3은 모든 부하 모션을 고려해서 전압을 제어해주는 기존의 구조에서 각 지역의 부하 모션 중 파일럿 모션만을 고려해서 전압을 제어해주는 새로운 개념의 전압제어 구조를 나타낸 그림이다.

제한한 지역별 전압제어 방식은 전력시장 환경에서 보다 선호되는 분권제어 방식(Decentralized Control Scheme)을 기반으로 하는 것이며, 이러한 방식의 채택 시, 기존의 중앙제어 방식(Centralized Control Scheme)보다 각 시장참여자 사이에서 더 많은 정보 교류가 발생하게 되므로 시장참여자 간의 정보 처리량이 증가되고 정보교류 구조가 복잡해질 수 있다는 문제점이 발생한다. 그림 4에 각 제어 방식의 개념적 구조와 분권제어 방식의 문제점을 도식화하였다.

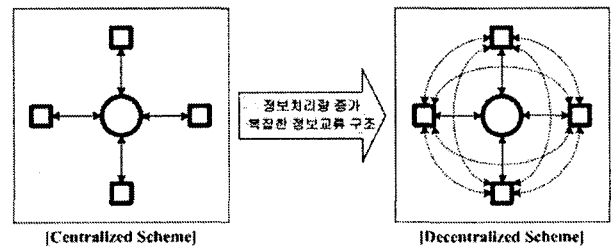


그림 4 중앙제어 방식 및 분권제어 방식의 개념적 비교
Fig. 4 The conceptual comparison of centralized control scheme and decentralized control scheme

하지만 정보 처리량 증가에 대한 문제는 전력IT 분야의 발전으로 빠른 정보처리 속도를 통해서 이를 해결할 수 있으리라 예상되며, 복잡한 정보교류 구조의 문제는 제안된 방법으로 간소화할 수 있을 것이라 판단된다.

본 논문은 정보 교류 구조의 관점에서 제안된 것이며, 제안된 방법처럼 파일럿 모선의 전압만을 고려해서 시스템 전체 전압을 감시 및 제어해주는 것이 가능하다면 계통운영의

관점에서 신뢰성과 효율성을 동시에 확보할 수 있다. 제안된 내용과 같이, 클러스터링과 파일럿 모선을 통한 전압 감시 및 제어 구조는 무효전력관리와 관련하여 전압제어지역을 구분하므로 다음과 같은 장점을 가진다.

- 시스템의 상태를 감시하고 이해하는데 더욱 용이해진다.
- 실시간 시스템 전압의 감시와 제어가 더욱 다루기 쉬워진다.
- 사고발생 후에 지역별 제어를 통해 보다 빠른 대처가 가능해진다.

기존의 모든 모선을 통한 전압제어보다 파일럿 모선을 통한 전압제어는 무효전력의 지역적 성질(Local Nature)을 이용하여 각 지역별 전압제어가 가능하다. 특히 계통운영자의 입장에서는 모든 부하전압을 감시하여 계통을 통제하는 것보다 파일럿 모선 전압을 통해 지역의 전압 상황을 쉽게 이해할 수 있으므로 전압의 감시가 쉬워지고 파일럿 모선의 전압을 기준으로 제어를 해주기 때문에 계통 사고에 대한 대처가 빨라질 수 있다.

궁극적으로 이러한 구조는 계통운영자 뿐만 아니라 시장 참여자에게도 효율적인 전압제어 방안을 제공해 줄 수 있다.

5. 사례연구

제안된 내용을 IEEE 14모선 시스템에 적용하여, 먼저 클러스터링 및 파일럿 모선 선정을 보여줄 것이며, 전체 부하전압을 적용한 SSMC 사례와 파일럿 모선 전압만을 적용한 SSMC 사례를 비교, 검토하여 제안된 방법의 효율성을 검증하고자 한다.

5.1 클러스터링 및 파일럿 모선 선정

IEEE-14bus 시스템에서 전기적 거리 개념을 이용하여 클러스터링과 파일럿 모선 선정했다. 1번 모선은 슬랙 모선이고 2, 3, 6, 8번 모선은 발전모선으로 지정하였으며, 나머지 모선은 부하모선으로 지정하였다.

3.1에 나타난 과정을 따라 두 모선 간 전기적 거리를 모두 구할 수 있으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 이 표를 통하여 같은 모선에서의 전기적 거리는 0이 됨을 알 수 있고 이는 같은 모선이 가장 민감하다는 것을 의미한다. 같은 모선인 경우를 제외하고 전기적 거리가 가장 작은 값을 가지는 모선은 모선10과 모선9 사이이다. 반면에 가장 큰 값은 모선3과 모선12사이에서 나타난다.

클러스터링은 먼저 가장 작은 전기적 거리를 가지는 모선 9와 모선10을 통합하여 새로운 가상모선을 만드는 것으로 시작한다. 모선9와 모선10으로 가상의 모선이 만들어 진 후 이 가상의 모선과 다른 모든 모선사이의 전기적 거리를 구해야한다. 그리고 다시 구해진 전기적 거리에서 가장 작은 전기적 거리를 가지는 모선을 통합하고 새로운 전기적 거리를 구하는 과정을 반복한다.

표 1 정규화된 전기적 거리

Table 1 Normalized electric distance

bus	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0	0.518	0.417	0.444	0.798	0.728	0.960	0.758	0.825	0.873	0.954	0.867	0.923
3	0.518	0	0.412	0.527	0.847	0.744	0.968	0.767	0.848	0.908	1.000	0.911	0.947
4	0.417	0.412	0	0.149	0.450	0.336	0.559	0.365	0.435	0.506	0.604	0.519	0.545
5	0.444	0.527	0.149	0	0.410	0.427	0.648	0.425	0.487	0.509	0.568	0.493	0.574
6	0.798	0.847	0.450	0.410	0	0.450	0.675	0.345	0.331	0.218	0.178	0.124	0.347
7	0.728	0.744	0.336	0.427	0.450	0	0.221	0.156	0.261	0.403	0.580	0.486	0.406
8	0.960	0.968	0.559	0.648	0.675	0.221	0	0.379	0.484	0.625	0.804	0.704	0.627
9	0.758	0.767	0.365	0.425	0.345	0.156	0.379	0	0.109	0.273	0.470	0.368	0.263
10	0.825	0.848	0.435	0.487	0.331	0.261	0.484	0.109	0	0.201	0.466	0.379	0.338
11	0.873	0.908	0.506	0.509	0.218	0.403	0.625	0.273	0.201	0	0.377	0.307	0.403
12	0.954	1.000	0.604	0.568	0.178	0.580	0.804	0.470	0.466	0.377	0	0.161	0.424
13	0.867	0.911	0.519	0.493	0.124	0.486	0.704	0.368	0.379	0.307	0.161	0	0.291
14	0.923	0.947	0.545	0.574	0.347	0.406	0.627	0.263	0.338	0.403	0.424	0.291	0

모든 전기적 거리가 시스템 운영자의 판단과 경험에 의해 정해진 제어 지역의 거리(r_d)보다 크거나 같을 때 클러스터링은 완성된다. 이 논문에서 가장 큰 전기적 거리를 가지는 모선3과 모선12사이 값을 1로 가정하고 그것의 절반 값인 0.5를 제어지역의 거리로 정하고 클러스터링을 했다.

그림 5는 클러스터링이 완성된 후 시스템이 3개의 지역으로 나누어진 결과를 보여준다. 각 지역 간 전기적 거리는 각각 0.705, 0.503, 0.652가 된다. 그림 5에서 각 지역 내에 존재하는 모선들은 다른 지역에 존재하는 모선에 비해 상대적으로 전기적 영향력이 크다는 것을 알 수 있다.

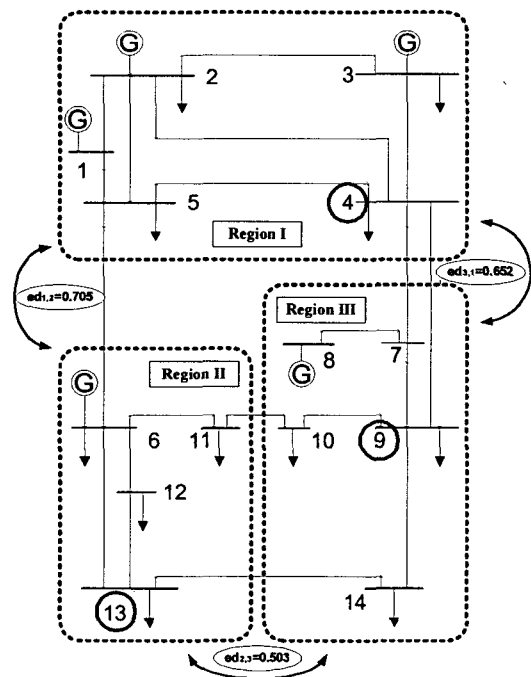


그림 5 완성된 클러스터링
Fig. 5 3 Clustering result

표 2 각 지역별 파일럿 모선

Table 2 Pilot bus in each region

모선	지역 I		지역 II			지역 III			
	4	5	11	12	13	7	9	10	14
$\min_p \sum ed_p$	0.978	1.120	0.902	0.716	0.592	1.044	0.907	1.192	1.634

각 지역의 파일럿 모선은 위의 전기적 거리와 3.3의 식 (15)을 이용하여 구할 수 있다. 표 2는 한 부하모선을 기준으로 같은 지역에 존재하는 다른 부하 모선과의 전기적 거리의 총합을 나타낸 것이다. 파일럿 모선은 같은 지역에서 다른 부하모선과 전기적 거리의 합이 최소가 되는 모선이 선택된다. 그러므로 표 2에 나타나듯이 모선4, 모선13, 모선9가 각 지역의 파일럿 모선으로 선택된다.

5.2 SSSVC 적용 결과 비교 및 검토

앞에서 언급했듯이 각 지역에서 선정된 3개의 파일럿 모선의 전압만을 토대로 시스템의 전압을 제어해준 경우와 모든 부하 모선의 전압을 토대로 시스템의 전압을 제어해준 경우를 비교해보겠다.

그림 5에서 N-1 선로 상정사고를 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 표 3에서 SSSVC를 적용하여 전압을 제어한 후 발전 전압의 결과를 나타내었고, 표 4는 정상상태와 사고 후 각 부하모선의 전압을 나타낸 것이다. 사고 후에 거의 대부분의 경우 모든 모선에서 전압이 감소현상이 나타났다. 표 3에서 사고 후 $\|\Delta V_d\|_2$ 는 사고 후 정상상태 전압과의 오차를 나타낸 것이고 SSSVC 적용 시 $\|\Delta V_d\|_2$ 는 사고가 발생하고 SSSVC를 적용한 후 정상상태 전압과의 오차를 나타낸 것이다. 특히 상정사고 후 전압의 변화가 가장 심한 13-14선로 상정사고의 경우, 14번 부하모선의 전압이 크게 감소하였음을 알 수 있다.

표 3 SSSVC 적용 전과 후의 발전 모선의 전압(pu)
(a) 파일럿 모선의 전압만을 기준으로 SSSVC를 적용, b) 모든 모선의 전압을 기준으로 SSSVC를 적용)

Table 3 Generator bus voltage before and after SSSVC
(a) Applying SSSVC to only pilot bus at each region, b) Applying SSSVC to all load buses)

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	4-7 선로 상정사고		4-9 선로 상정사고	
				a) SSSVC (Pilot 모선)	b) SSSVC (모든 모선)	a) SSSVC (Pilot 모선)	b) SSSVC (모든 모선)
				I	1	1.00	1.00
	2	1.02	1.02	1.0222	1.0283	1.0187	1.0246
	3	1.02	1.02	1.0214	1.0147	1.0192	1.0105
II	6	1.02	1.02	1.0206	1.0221	1.0202	1.0206
III	8	1.02	1.02	1.0354	1.0262	1.0297	1.0267
사고 후 $\ \Delta V_d\ _2$				0.0120		0.0059	
SSSVC 적용 시 $\ \Delta V_d\ _2$				0.0088	0.0060	0.0024	0.0017

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	10-11 선로 상정사고		13-14 선로 상정사고	
				a) SSSVC (Pilot 모선)	b) SSSVC (모든 모선)	a) SSSVC (Pilot 모선)	b) SSSVC (모든 모선)
				I	1	1.00	1.00
	2	1.02	1.02	1.0185	1.0183	1.0195	1.0154
	3	1.02	1.02	1.0190	1.0249	1.0197	1.0296
II	6	1.02	1.02	1.0202	1.0168	1.0126	1.0158
III	8	1.02	1.02	1.0333	1.0329	1.0398	1.0430
사고 후 $\ \Delta V_d\ _2$				0.0145		0.0231	
SSSVC 적용 시 $\ \Delta V_d\ _2$				0.0108	0.0093	0.0180	0.0154

본 사례연구에서는 아래 두 가지 제어 방식을 고려한다.

- 제어방식 A: 파일럿 모선을 기준으로 SSSVC를 적용한 경우
- 제어방식 B: 모든 모선을 기준으로 SSSVC를 적용한 경우

모든 부하 모선의 전압을 정상상태 전압과 차이를 최소화 하는 SSSVC를 적용하면 모선의 전압을 높이기 위해, 특히 14번 모선의 전압을 높이기 위해 같은 지역에 존재하는 8번 발전 모선의 전압이 가장 많이 상승됨을 알 수 있다. 마찬가지로, 사고 후 파일럿 모선의 전압만을 고려하여 정상상태 전압과 차이를 최소화 하는 SSSVC를 적용하였을 경우 다른 부하 모선의 전압 차는 무시하고 4번, 13번, 9번 모선의 전압을 복구하는데 중점을 두게 된다. 결과적으로 사고 후 전압의 변화가 가장 심한 14번 모선의 전압을 높이기 위해 8번 발전 모선의 전압을 많이 높인다. 이는 앞의 모든 모선 전압을 고려한 경우와 다소 차이는 있지만 비슷한 유형의 형태로 나타났다. 다른 선로의 상정사고의 경우에도 유사한 결과가 나타난다.

결과적으로 파일럿 모선을 기준으로 SSSVC를 적용한 경우(A)와 모든 모선을 기준으로 SSSVC를 적용한 경우(B)의 $\|\Delta V_d\|_2$ 값을 비교해 보면, 전반적으로 모든 모선을 기준으로 하는 경우(B)가 계통 신뢰도의 측면에서 조금 더 우수함을 알 수 있다. 그러나 악화된 부하전압이 사고 이전으로 회복되었다면 제안된 방법도 충분히 신뢰도를 확보할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 13-14 선로 사고의 경우 표 4에서 보는 것처럼 두 방법을 통해 14번부하모선의 전압 값이 비슷한 값으로 회복된 것이 단적인 예이다. 즉, 전압관점에서 두 경우 모두 신뢰성에 대해서는 큰 문제가 발생하지 않았음을 알 수 있다.

그러나 모든 모선을 기준으로 했을 경우(B) SSSVC를 적용하기 위해 필요로 하는 정보는 파일럿 모선을 기준으로 한 경우에 비해 그 정보의 양이 많음을 알 수 있다. 구체적으로 SSSVC를 적용하는 과정에서 H 행렬을 구하는 과정이 있다. H 행렬을 구하기 위해서는 모든 모선간의 어드미턴스가 필요하고 무효전력 값 등이 필요하다. 그리고 파일럿 모선을 기준으로 하는 경우 H 행렬을 구하기 위해 필요한 것은 파일럿 모선과 관련이 있는 어드미턴스만 알면 된다. 즉, 발전모선은 파일럿 모선의 정보만을 가지고도 그 지역의 계통을 감시 및 제어할 수 있으므로, 계통운영자는 이를 바탕으로 손쉽게 계통의 상황을 감시, 관리할 수 있고 사

고 후 대처도 빨리 할 수 있다. 즉 계통을 효율적이고 신뢰성있게 운영할 수 있다.

만약 파일럿 모선만을 기준으로 전압을 제어해주는 경우에 신뢰도가 충분히 확보되지 않은 경우가 발생한다면, 이와 같은 문제는 계통 신뢰도 확보 측면에서 모든 모선을 기준으로 SSSVMC를 적용하던지, 가장 효율적인 부하차단을 시행함으로써 해결할 수 있을 것이다[11].

표 4 SSSVMC 적용 전과 후의 부하 모선의 전압[pu]
(a) 파일럿 모선의 전압만을 기준으로 SSSVMC를 적용, b) 모든 모선의 전압을 기준으로 SSSVMC를 적용)

Table 4 Load bus voltage before and after SSSVMC
(a) Applying SSSVMC to only pilot bus at each region, b) Applying SSSVMC to all load buses)

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	a) SSSVMC (Pilot 모선)	b) SSSVMC (모든 모선)
I	4	0.9996	0.9978	0.9997	1.0006
	5	0.9997	0.9969	0.9986	1.0002
II	11	1.0040	1.0001	1.0033	1.0030
	12	1.0040	1.0038	1.0049	1.0061
	13	0.9986	0.9970	0.9985	0.9994
III	7	1.0050	1.0034	1.0136	1.0082
	9	0.9999	0.9930	1.0000	0.9970
	10	0.9956	0.9893	0.9951	0.9929
	14	0.9803	0.9753	0.9800	0.9787

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	a) SSSVMC (Pilot 모선)	b) SSSVMC (모든 모선)
I	4	0.9996	0.9993	0.9995	0.9996
	5	0.9997	0.9988	0.9988	0.9998
II	11	1.0040	1.0022	1.0038	1.0037
	12	1.0040	1.0039	1.0043	1.0046
	13	0.9986	0.9979	0.9985	0.9988
III	7	1.0050	1.0028	1.0072	1.0060
	9	0.9999	0.9965	0.9999	0.9991
	10	0.9956	0.9926	0.9954	0.9948
	14	0.9803	0.9780	0.9802	0.9798

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	a) SSSVMC (Pilot 모선)	b) SSSVMC (모든 모선)
I	4	0.9996	0.9986	0.9994	1.0002
	5	0.9997	0.9993	0.9995	0.9997
II	11	1.0040	1.0132	1.0134	1.0100
	12	1.0040	1.0037	1.0042	1.0010
	13	0.9986	0.9977	0.9986	0.9956
III	7	1.0050	1.0023	1.0086	1.0086
	9	0.9999	0.9947	0.9996	0.9993
	10	0.9956	0.9868	0.9917	0.9915
	14	0.9803	0.9769	0.9801	0.9786

지역	모선 번호	사고 전	사고 후/ 제어 전	a) SSSVMC (Pilot 모선)	b) SSSVMC (모든 모선)
I	4	0.9996	0.9985	0.9993	1.0009
	5	0.9997	0.9993	0.9990	0.9997
II	11	1.0040	1.0013	0.9991	1.0020
	12	1.0040	1.0065	0.9990	1.0022
	13	0.9986	1.0045	0.9970	1.0002
III	7	1.0050	1.0020	1.0103	1.0127
	9	0.9999	0.9943	0.9992	1.0016
	10	0.9956	0.9908	0.9935	0.9962
	14	0.9803	0.9598	0.9649	0.9675

6. 결 론

본 논문은 SSSVMC를 통해 각 지역의 전압을 대표하는 파일럿 모선의 전압을 감시 및 제어하는 효율적인 지역별 전압 제어 구조를 제안하였으며, 동시에 전압 관점에서의 신뢰성도 확보됨을 보여주었다.

전기적 거리를 적용하여 IEEE-14모선 시스템을 클러스터링을 했고 각 지역별 파일럿 모선을 선정하였다. 기존의 방식인 모든 부하 모선의 전압을 기준으로 전압제어를 해 준 경우에 비해 각 지역별 파일럿 모선 전압만을 기준으로 제어해준 경우는 여러 가지 구조적으로 효율적인 이점이 있음을 논하였다.

기본적으로 간소화된 정보교류 구조를 바탕으로 더 효율적으로 전압프로파일을 감시하고 제어하는 것이 가능해 졌다. 따라서 계통운영자는 특정 사고가 발생하거나 발생 위험이 있을 경우에 지역별로 파일럿 모선만을 이용해서 전압을 감시하고 제어하므로 전반적으로 전압의 경향을 쉽게 파악하고 관리해 줄 수 있으며, 사고 후 복구에 보다 빠른 대처가 가능해진다. 결국 제안된 지역별 전압제어 구조는 효율적이고 신뢰성 높은 전압제어방안을 제공해 줄 수 있다.

참 고 문 헌

[1] "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations," U.S.-Canada Power System Outage Task Force, April 5, 2004. [Online]. Available: <http://www.nerc.com>.

[2] Ashwani Kumar, S.C. Srivastava, and S.N.Singh, "A Zonal Congestion Management Approach Using Real and Reactive Power Rescheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 554-562, February 2004.

[3] C.N. Yu, and M. Ilic, "Congestion clusters-based markets for transmission management", Power Engineering Society Winter Meeting, New York, Vol. 2, pp. 821- 832, January 1999.

[4] J.L.Sancha, J.L.Fernandez, and A.Cortes, J.T. Abarca, "Secondary Voltage Control : Analysis, Solutions and

Simulation Results for the Spanish Transmission System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 630-638, May 1996.

- [5] A.Conejo, and M.J.Aguilar, "Secondary voltage control : Nonlinear selection of pilot buses, design of an optimal control law, and simulation results: IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 1, pp. 77-81, January 1998.
- [6] P.Lagonotte, J.C.Sabonnadiere, J.Y.Leost, J.P.Paul, "Structural Analysis of the Electrical System : Application to Secondary Voltage Control in France", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 479-486, May 1989.
- [7] M. Shahidehpour, and Y. Wang, "Communication and Control in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., Publication, pp.307-331, 2003.
- [8] Jin Zhong, Emilia Nobilia, Anjan Bose, and Kankar Bhattacharya, "Localized Reactive Power Markets Using the Concept of Voltage Control Areas", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 1555-1561, August 2004.
- [9] Chien-Ning Yu, Yong T. Yoon, Marija D. Ilic, Armand Catelli "On-line Voltage Regulation: The Case of New England", IEEE Transaction on Power System, Vol.14, No.4, pp. 1477-1484, November 1999.
- [10] M. Ilic'-Spong, J. Christensen, K. L. Eichorn "Secondary Voltage Control Using Pilot Point Information", IEEE Transaction on Power System, Vol.3, No.2, pp. 660-668, May 1988.
- [11] Assef Zorian, Marija D. Ilic "A Steady State Voltage Monitoring and Control Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations", IEEE Transaction on Power System, Vol.11, No.2, pp. 929-938, May 1996.
- [12] Marija Ilic', William Stobart "Development of a Smart Algorithm for Voltage Monitoring and Control", IEEE Transaction on Power System, Vol.5, No.4, pp. 1183-1193, November 1990.



이 호철 (李昊澈)

1981년 12월 5일 생. 2005년 고려대 공대 전기전자전파공학부 졸업. 2005~현재 서울대 대학원 전기·컴퓨터 공학부 석사과정.

Tel : (02) 880-9144

E-mail : hopang57@snu.ac.kr



윤용태 (尹容兌)

1971년 4월 20일 생. 1995년 MIT 전기 컴퓨터 공학부 졸업. 1997년 MIT 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(박사). 2002~2003 University of Oklahoma 전기 컴퓨터 공학부 조교수. 2004~현재 서울대 전기·컴퓨터 공학부 조교수

Tel : (02) 880-9143

E-mail : tytoon@ee.snu.ac.kr



문승일 (文承逸)

1961년 2월 1일 생. 1985년 서울대 전기 공학과 졸업. 1989 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1997년 전북대 전기공학과 조교수. 1997~2001 서울대 전기·컴퓨터 공학부 조교수. 2001~2006 서울대 전기·컴퓨터 공학부 부교수. 2006 현재 서울대 전기·컴퓨터 공학부 정교수.

Tel : (02)880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr

저 자 소 개



송성환 (宋成煥)

1978년 5월 30일 생. 2001년 부산대 공대 전기공학부 졸업. 2003년 서울대 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(석사). 2003~현재 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 박사과정

Tel : (02) 880-7257

E-mail : karyman@powerlab.snu.ac.kr