

# 배전계통의 분포 부하 모델링을 통한 최적화 IVVC 알고리즘

논문
58-8-2

## Integrated Volt/Var Control Algorithm based on the Distributed Load Modeling of Distribution Network

김영인<sup>†</sup> · 임일형<sup>\*</sup> · 최면송<sup>\*\*</sup> · 이승재<sup>\*\*\*</sup> · 이성우<sup>§</sup> · 권성철<sup>§§</sup>

(Young In Kim · Il Hyung Lim · Myeon Song Choi · Seung Jae Lee · Sung Woo Lee · Sung Chul Kwon)

**Abstract** - In this paper, a new algorithm of Integrated Volt/Var Control (IVVC) is proposed using Volt/Var control for the Distribution Automation System (DAS) based on the modeling of the distributed load and the distributed current. In the proposed, the load flow based on the modeling of the distributed load and the distributed current are estimated from constants of four terminals using the measurement of the current and power factor from a Feeder Remote Terminal Unit (FRTU). For Integrated Volt/Var Control (IVVC), the gradient method is applied to find optimal solution for tap and capacity control of OLTC (On-Load Tap Changers), SVR (Step Voltage Regulator), and SC (Shunt Condenser). What is more Volt/Var control method is proposed using moving the tie switch as well as IVVC algorithm using power utility control. In the case studies, the estimation and simulation network have been testified in Matlab Simulink.

**Key Words** : Integrated Volt/Var Control, Distribution System, Distributed Load, IVVC

### 1. 서론

IVVC(Integrated Voltage/Var Control)는 전압제어와 무효전력 제어 기능을 통합적으로 운영함으로써 배전계통의 조상설비의 투입이나 개방 명령, 전압조절장치의 탭 조절을 미리 예측하고 원격으로 제어를 시행하여 지속적으로 부하가 변할 때라도 허용 전압변동 범위를 유지하고 손실을 최소화하는 것이다. 전압제어는 배전선로의 전압을 올리거나 낮추기 위해서 변전소의 주변압기 탭 절환 장치(OLTC: On-Load Tap Changer)와 단계별 전압 조절장치(SVR: Step Voltage Regulators)를 조절하는 것을 의미하며, 무효전력제어는 Shunt 콘덴서(SC: Shunt Condenser)등의 조상설비를 통하여 투입이나 개방 명령을 통해 무효전력을 제어하는 것이다[1,2].

사회가 발전함에 따라 배전계통이 복잡해지고 그에 따른 설비와 부하들이 증가하고 있다. 이에 따라 무효전력 및 전압의 변동으로 인해 계통의 불안정 현상이 발생하여 배전계통 운영 효율과 수용가에 대한 안정적인 전력 공급에 어려움을 겪고 있다. 이를 해결하기 위하여 배전계통 운용 분야에서는 전력 품질을 매우 중요한 관심사항으로 다루고 있으며, 특히 복미 유립을 중심으로 많은 연구가 이루어졌고 관

련 설비가 설치되었으며 운영이 이루어져 왔다[3-5].

국내 배전계통 운영기술은 배전자동화를 중심으로 전력자동화 산업이 발달했다. 정보, 통신, 제어 기술의 빠른 발전에 힘입어 1996년부터 배전자동화 시스템이 개발 되어, 국내 대부분의 배전사업소에 도입되어 운영되고 있다. 최근에는 배전지능화라는 연구를 통해 기존의 자동화 시스템에서 지능형 자동화 시스템으로 해외수출까지도 고려한 향상된 배전계통 운영 전력자동화 시스템의 개발이 진행되어오고 있다[6].

배전계통 운영에 있어서 국내의 기술은 해외의 기술력보다 앞서있음에도 불구하고, 해외 전력분야에서 많은 관심을 보이고 있는 전력기술의 해외시장 진출을 위해 꼭 필요한 IVVC기능에 대한 인식과 관련 기술이 해외시장에 어필하기에는 부족한 수준이다. 따라서 해외 전력시장에서의 국가 경쟁력 강화를 위해 무효전력과 전압 유지를 통한 IVVC는 반드시 필요한 기술이다.

해외 사례를 중심으로 한 기존의 IVVC 방법은 nonlinear, linear, quadratic, Newton and interior방법 등을 이용한 수학적 접근 방법이 제안되었다[7,8]. 또한, 퍼지에 의한 방법[9,10], 경험과 학습에 의한 방법[11,12], 부하 패턴에 통계치를 통한 방법[13], Neural에 의한 방법[14], Time-interval 방법[15] 그리고 reactive power, feeder loss, voltage deviation, voltage profile의 중요도에 의한 가중치 방법[16] 등이 있다. 하지만 이러한 방법들은 전력자동화 시스템 기반의 알고리즘이라고 보기에는 어려움이 따른다.

따라서 본 논문에서는 국내의 배전계통의 앞선 기술과 자동화를 이용한 더 정확하고 최적화 된 IVVC를 실현하는 GM(Gradient Method)이용법을 제안하고 있다. 우선 IVVC에서 가장 중요하게 여기는 탭 조절에 따른 전압 변동을 예측하기 위해서는 배전계통을 보다 정확하게 해석할 필요가 있다. 이를 위하여 배전계통의 부하를 기존의 집중부하형태

† 교신저자, 준회원 : 명지대학 공대 전기공학과 석사과정

E-mail : youngin42@mju.ac.kr

\* 정 회원 : 명지대학 공대 전기공학과 박사과정

\*\* 정 회원 : 명지대학 공대 전기공학과 교수 · 공박

\*\*\* 펠로우회원 : 명지대학 공대 전기공학과 교수 · 공박

§ 정 회원 : 한전 전력연구원 책임연구원 · 공박

§§ 정 회원 : 한전 전력연구원 선임연구원

접수일자 : 2009년 4월 7일

최종완료 : 2009년 6월 8일

가 아닌, 실제 널리 퍼져있는 수용가들의 부하들이 분포되어 있다 가정하여 분포부하 형태로 모델링하였다. 분포부하 해석의 어려움을 해결하기 위해서 4단자 정수를 이용하여 배전계통을 해석하여 전압변동을 측정하고 예측하였다. 그 다음 목적함수를 이용하여 GM을 통해 OLTC, SVR, SC들의 탭과 용량 조절에 대한 해를 구하였다.

또한 기존의 IVVC는 이러한 설비들의 설정치를 결정짓는 알고리즘이 주를 이루었지만, 본 논문에서는 상시연계점 이동을 통해 말단전압을 예측하는 방법을 이용한 확장된 개념의 IVVC 방법도 제안하고 있다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Matlab과 Matlab Simulink를 통해 배전계통을 모델링하고 데이터를 측정하여 검증하였다.

2장에서는 국내의 배전자동화 시스템의 구성과 IVVC를 위한 노력에 대하여 간략히 설명하고, 3장에서는 배전계통을 4단자 정수 형태로 풀이하기 위한 분포부하 형태의 모델링에 대하여 설명한다. 4장에서는 IVVC를 풀기 위한 Gradient method 방법과 이를 통한 IVVC 해를 제시하는 알고리즘을 설명하고, 5장에서는 연계점 이동을 통한 확장된 개념의 IVVC 방법을 제시할 것이다. 끝으로 6장에서는 Matlab을 이용하여 본 논문에서 제안한 방법들에 대한 타당성 검증 결과를 제시할 것이다.

## 2. 국내의 배전자동화 시스템과 IVVC

### 2.1 배전 자동화 시스템의 구성

국내의 종합 배전 자동화 시스템은 현장 기기를 원격에서 감시하고, 배전 선로에서 발생하는 고장의 자동처리 기능이 나 계통의 효율적 운영을 위한 자동화 기능을 가지고 있다.

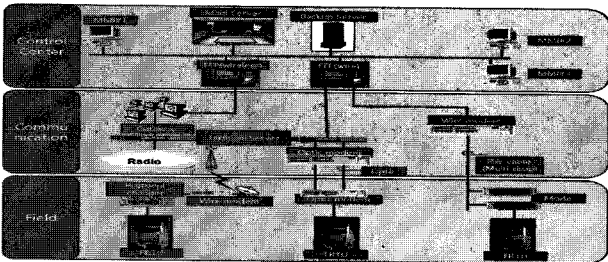


그림 1 배전자동화 시스템의 구성도  
Fig. 1 Block diagram of Distribution Automation System(DAS)

이 모든 기능들은 배전 자동화 시스템의 컴퓨터와 통신기술의 발달을 통해 가능했다. 그림 1은 종합 배전 자동화 시스템의 구성도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 종합 배전자동화 시스템은 원거리에 산재되어 있는 FRTU를 현장에 가지 않고 운전 상태를 감시하고 상황실에서 원격명령을 통해 제어하며 전압과 전류 등 선로 운전 정보를 수집하여 배전계통을 운영한다.

이러한 배전계통을 최적으로 운영하기 위한 노력으로 IVVC(Integrated Voltage/Var Control)이 있다. 이는 계통의 불안정 현상의 해소, 손실 최소화, 불필요한 과부하 현상 해결, 전력 품질유지, 설비들의 유지 보수와 설비 교체 비용 절감 그리고 효율적인 전기 사용으로 에너지 소비절감에 따른 환경 문제 개선과 같은 역할을 한다. 따라서 IVVC는 국

내의 배전계통 운영을 위해서는 꼭 필요한 기술로, 특히 배전계통 운영에 대한 국내 기술의 해외 전력시장 진출을 위해서는 꼭 필요한 기술이라고 할 수 있다.

### 2.2 국내 배전계통의 전압/무효전력 제어 방법

전압제어는 배전선로의 전압을 올리거나 낮추기 위해서 변전소의 주변압기 탭 절환장치(OLTC)를 전압 상태를 미리 예측하여 원격으로 조절하는 것을 의미한다. 무효전력 제어는 배전계통에 있는 캐패시터 뱅크와 같은 조상설비를 투입하거나 개방하여 무효전력의 흐름을 제어하는 것을 말한다. IVVC는 이러한 전압제어와 무효전력 제어를 통합적인 관리를 통해 지속적으로 부하가 변할 때 계통의 전압에 허용 전압변동 범위를 유지하고, 무효전력을 제어하여 손실을 최소화하는 것을 목표로 한다.

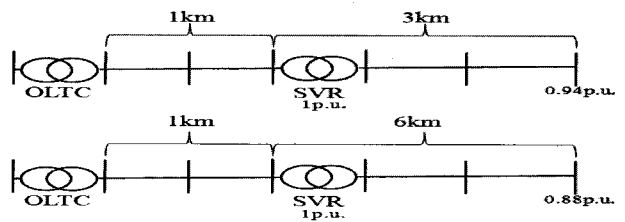


그림 2 SVR을 이용한 전압/무효전력 제어 시 일어날 수 있는 현상

Fig. 2 A problem when Volt-Var control using SVR

국내에서는 부하중심점을 기준으로 전압 및 무효전력 제어를 하고 있고, 최근에는 SVR의 부분적인 도입으로 더 나은 계통을 운영하고 있는 것이 사실이다.

부하중심점 방법은 계통의 부하들의 평균값을 통해 부하의 중심이 되는 거리를 중심으로 보고 해당 위치의 전압이 규정 전압이 되도록 OLTC의 tap을 자동으로 조절하여 계통을 운영하고 계통에서 일어나는 전압강하 현상을 방지하기 위해 SVR을 도입하고 있다.

그림 2에서는 계통이 커지고 부하가 증가함에 따라 일어날 수 있는 현상을 간단히 나타냈고 규정 전압을 통해 OLTC와 SVR을 조절 했을 때의 계통의 전압강하 현상으로 인해 말단의 전압이 허용 범위보다 낮아 질 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 이런 계통의 확장과 설비의 증가로 인해 일어날 수 있는 현상을 방지하고 해외에 어떠한 계통에도 적용 가능한 설비 제어 알고리즘을 위해 본 논문에서는 IVVC를 통해 계통을 최적으로 운영하는 방법을 제시한다.

## 3. IVVC를 위한 계통 모델링

### 3.1 배전 계통의 분포부하 모델링

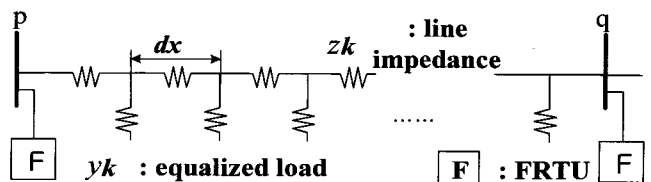


그림 3 분포 부하 배전 계통 모델링  
Fig. 3 Distributed load modeling of a section in distribution system

배전계통은 실제로 선로 중간에 설치된 많은 변압기들로부터 부하로 전력이 공급되므로 분포부하이다. 그리고 일반적으로 배전계통에서 전압에 따라 부하에서 소비하는 전력의 크기가 틀려지므로 부하는 전압의 크기에 영향을 미친다고 보아야 한다. 그동안 배전계통 해석을 위해 부하를 가운데로 위치시키는 것을 가정하거나, 상단 또는 하단에 집중부하 형태로 해석하는 경우가 많았다. 하지만 실제 배전계통의 부하는 수용가에서 사용하는 부하로, 균등분포부하는 아니라도 어느 정도의 분포부하 형태로 모델링 된다. 따라서 부하모델을 분포 impedance model, 또는 분포된 전류 model, 또는 이들의 조합으로 보아야 한다.

본 논문에서는 배전계통 해석에 대한 기존의 연구와는 달리 실제와 가깝게 집중부하형태가 아닌 분포부하 형태로 그림 3과같이 배전계통을 모델링 하였다. 부하는 선로 중간에 균등하게 분포되었다고 가정하였으며 부하에 공급되는 전력은 부하 점의 전압에 따라 틀려진다고 보아 분포부하를 구간 내에 균등하게 분포한 등가부하 어드미턴스로 모델링 하였다. 이는 기존의 집중부하형태의 해석보다는 보다 수용가에 널리 분포되어 퍼져있는 부하들과 유사하게 모델링 하였다는데 그 의미를 두고 있다.

이와 같이 현실에 맞는 부하 패턴을 구하기 위해서는 분포부하로 계통을 모델링하여야 하지만 현재까지는 분포부하를 이용한 계통해석은 수식의 복잡함으로 어려움이 있었다.

하지만 이 논문에서는 분포부하로 모델링을 하고 모델링을 통하여 방사형 계통구성의 특성상 각 구간에 송전단과 수신단으로 2개의 단자를 가지게 된다. 이를 이용하여 선로 정수는 양단자의 어느 쪽에서 보더라도 대칭이고 또한 회로 내에 기전력을 갖지 않기 때문에 4단자 회로로 취급할 수 있고 이로 인하여 구해진 4단자 정수는 선로의 해석을 편리하게 해준다.

또한 배전계통 구성 특성에 따라 전류유출구간, 분기선로 구간, 전압/무효전력 제어 설비 설치구간 등을 해석하기 위하여 모델링을 통해 4단자 정수를 구할 것이다. 이 배전계통은 FRTU로부터 전압크기와 전류크기, 역률각 정보를 취득한다. 여기서 위상각이 아닌 역률각을 취득하는 것은 정보취득에 대한 시간 동기화에 대한 문제를 방지하기 위해서이다. 역률각을 통해 동기화에 대한 문제를 벗어남으로써 좀더 정확한 알고리즘을 구현할 수 있다.

### 3.2 배전계통의 4단자 정수

배전계통은 방사형구조를 가지고 있다. 이 복잡한 방사형 시스템은 각 노드의 부하 흐름을 통해 데이터를 취득하기는 복잡하다. 하지만 본 논문에서는 계통의 모델링 방법을 통해 전압을 계산하여 조류계산을 할 뿐만 아니라 계통의 각 구간의 4단자 정수를 알아낸다. 이는 앞으로의 계통 알고리즘에 많은 영향을 미칠 것이다[17]. 또한 이 4단자 정수는 본 논문에서 제안하는 알고리즘인 확장된 개념의 IVVC를 위해 꼭 필요한 데이터이다. 즉, 각 구간의 특징에 따라 4단자 정수를 얻을 수 있고 이를 통하여 각 선로의 전압과 전류, 위상각들을 예측가능하다. 이는 계통의 운영에 도움을 줄 것이다. 계통의 모델링은 이제 까지 선로의 전체 구간에 걸쳐서 똑같은 선로 정수가 균일 하게 분포 된 것으로 보았으나 실제로는 서로 다른 선로가 연결되거나 분기선이 있고 또한 선

로의 중간에 변압기가 접속 된다는가 해서 복잡한 회로를 구성하게 된다.

한 구간에서의 전압강하와 전류유출량은 다음과 같다.

$$dV(x) = -I(x)zdx \tag{1}$$

$$dI(x) = -V(x)ydx \tag{2}$$

$zdx$ 는 단위 길이당 선로 임피던스 이고,  $ydx$ 는 단위 길이당 등가부하 어드미턴스이다.

분포정수 해석방법에 의하여 이 미분방정식을 풀어 선로의 임의 점에서 전압전류를 구하면 다음과 같다.

$$V(x) = C_1 \cosh \gamma_k x + C_2 \sinh \gamma_k x \tag{3}$$

$$I(x) = C_3 \sinh \gamma_k x + C_4 \cosh \gamma_k x \tag{4}$$

여기서,  $\gamma_k = \sqrt{z_k y_k}$ 이며 선로 특성정수이다.

등가부하 어드미턴스를

i) 부하단 모선의 전류크기는 FRTU에서 측정된 전류 크기와 같다.

ii) 부하단 모선의 전압과 전류의 위상각 차는 FRTU로부터 취득되는 역률각과 같다.

이 두 가지 사실을 통해 정리하여 NR 방법을 이용하여 풀면 등가부하 어드미턴스를 구할 수 있다. 여기서 구한 등가부하어드미턴스를 이용하여 부하단 모선의 전압과 전류를 구할 수 있다. 현재 부하상태의 정보는 등가부하 어드미턴스로 나타내어지므로 식 (3)(4)는 이 구간의 모든 정보를 나타낸다. 이것을 4단자 정수를 이용하여 구간정보로 나타내면 수식 (5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} V_q \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_p \\ I_p \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \beta_k & -Z_k \sinh \beta_k \\ -\frac{1}{Z_k} \sinh \beta_k & \cosh \beta_k \end{pmatrix}$$

선로는 앞단과 뒷단에 2개의 단자를 가지고 있고 선로 정수는 양단자의 어느 쪽에서 보더라도 대칭이며 또한 회로 내에 기전력을 갖지 않기 때문에 4단자 회로의 취급은 수식 하나 다른 응용프로그램에서의 적용에 편리하고 실용적이다.

#### 3.2.1 전류 유출 구간

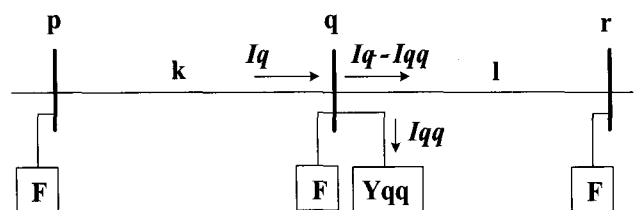


그림 4 전류 유출이 있는 구간  
Fig. 4 A section with outgoing current

노드에 역률 조정 콘덴서 등의 계통 제어 장치 등이 달려 있으면 모선에서의 전류 유출이 생기는데 그림 4와 같은 이러한 구간을 전류 유출 구간이라고 한다. 그림 4에서 q모선은 전류 유출이 생기기 때문에 배전선로의 입력전류와 출력전류는 서로 다르다. 유출되는 전류는 수식(6)과 같다.

$$I_{qq} = Y_{qq} V_q \quad (6)$$

수식(6)을 이용하면 q모선과 r모선 사이의 선로 1구간의 4단자 정수와 이를 이용한 전압 전류 방정식을 수식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_r \\ I_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_l & B_l \\ C_l & D_l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_q \\ I_q - I_{qq} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} A_l & B_l \\ C_l & D_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \beta_l + Y_{qq} Z_l \sinh \beta_l & -Z_l \sinh \beta_l \\ -\frac{1}{Z_k} \sinh \beta_l - Y_{qq} \cosh \beta_l & \cosh \beta_l \end{pmatrix}$$

### 3.2.2 분기선로

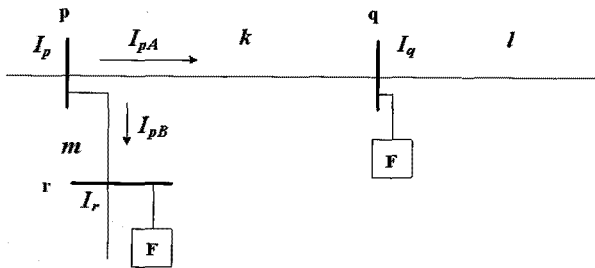


그림 5 선로 분기점이 있는 구간  
Fig. 5 A section with lateral

방사형 배전계통에서 선로의 중간 중간에 분기점이 그림 5와 같이 나타난다. 이런 경우에 분기 선로의 current distribution factors는 부하의 가중치에 의해 계산된다. 부하의 가중치는 각 구간의 부하 비로 측정하는데 이는 분기 선로 구간에는 변압기와 같은 부하 설비를 통해 부하로 전력이 공급된다. 따라서 현재 배전계통은 각 구간들의 총 변압기 개수와 구간별 부하의 총 계약 부하 용량을 파악 할 수 있으므로 부하의 비를 구할 수 있다. 즉 부하가 많으면 부하 전류도 많다는 사실을 이용하여 구할 수 있다.

부하전류  $I_p$ 가 흘러 선로  $k_{pq}$ 에  $I_{pA}$  부하전류가 흐르고 선로  $m_{pr}$ 에  $I_{pB}$  부하전류가 흐른다. 수식(8)는 분기점에서의 4단자 정수를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \beta_k & -k_{pq} Z_k \sinh \beta_k \\ -\frac{1}{Z_k} \sinh \beta_k & k_{pq} \cosh \beta_k \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 3.2.3 선로 SVR 설치 구간

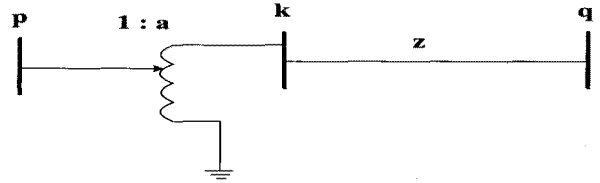


그림 6 배전선로에 SVR이 포함된 구간  
Fig. 6 A section with Step Voltage Regulator

배전계통 내 SVR이 포함된 구간을 그림 6과 같이 나타내었다. 여기서 z는 변압기 임피던스이고 변압비가 1:a인 경우 q모선 전압은 p모선 전압의 a배이며 q모선 전류는 1/a배로 4단자 정수로 표현하면 수식(9)과 같다.

$$\begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -\frac{z}{a} \\ 0 & \frac{1}{a} \end{pmatrix} \quad (9)$$

위와 같은 방법들로 전류 유출 구간, 분기선로구간, SVR 설치구간과 같이 모든 구간에 4단자 정수를 구할 수 있고 선로의 각 구간을 그림 7과 같이 4단자 정수로 표현 할 수 있다.

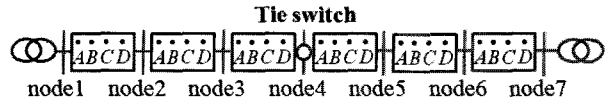


그림 7 각 구간의 4단자 정수  
Fig. 7 Four terminal constants of each section

이를 이용하여 다음 장에서 소개된 IVVC 방법으로 계통의 설비들을 최적 운영한 후에도 전압 허용 범위를 벗어나는 구간이 발생 할 때 연계점 이동을 통한 확장된 IVVC 알고리즘 해석을 할 수 있다.

## 4. Gradient Method를 이용한 IVVC

### 4.1 최적화 IVVC를 위한 평가 방법

본 논문에서는 IVVC를 통해 전압/무효전력 설비들의 적절한 용량을 설정해주는 해를 구하기 위한 방법으로 Gradient Method를 이용하였다. 이는 수학적으로 기울기의 개념을 써서 함수 값이 최소로 되는 점을 찾는 방법이다.

이 평가방법은 변전소 인출단과 배전계통 내의 전압/무효전력 설비인 OLTC, SVR SC등의 탭과 용량을 변동시켜가며 목적함수가 최소가 되는 설정치를 찾는 것이다. IVVC를 위한 목적함수는 수식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(X) = \sum w_i (v_{ni} - |V_i|)^2 \quad (10)$$

$$X = [A, V, I]^T$$

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T$$

$$V = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$$

$$I = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$$

여기서, A는 제어 변수

- V : 노드의 전압
- I : 노드의 전류
- V<sub>ni</sub> : 각 노드의 전압을
- V<sub>i</sub> : 각 노드의 측정 전압
- w<sub>i</sub> : 각 선로의 가중치
- n : 전체 노드 수

목적 함수에 나타난 가중치  $w_i$ 는 선로의 중요 부하의 가중치이다. 만약 n번째 노드에 가중치가 크다면 전압률과 측정 전압의 편차가 동일하다고 하여도 목적함수는 커지게 되므로 가중치에 따라 그 노드의 전압 편차의 영향을 받는다. 즉, 가중치가 큰 노드의 중요도가 커지게 된다.

#### 4.2 Gradient method를 이용한 IVVC 알고리즘

목적 함수가 최소값을 가지는 최적의 IVVC를 찾기 위하여 Gradient Method 방법을 이용하였다. 이는 최소가 되는 지점을 향해 기울기를 변동시켜가며 답을 찾는 방법이다. 이는 수식 (11)의 조건에서부터 시작한다.

$$\frac{\partial J(X + \Delta X)}{\partial t} = 0 \tag{11}$$

여기서,

$$\Delta X = \sum_{k=1}^p \Delta X_k$$

$$\Delta X_k = \frac{\partial X}{\partial a_k} \Delta a_k$$

$$\Delta a_k = -t \frac{\partial J}{\partial a_k}$$

목적함수 J(X)를 gradient 방법으로 나타내면  $\nabla J_k$  로 표현된다.

$$\nabla J_k = \frac{\partial J}{\partial a_k} = \left( \frac{\partial J}{\partial X} \right)^T \frac{\partial X}{\partial a_k} \tag{12}$$

또한, 제어 변수에 의한 상태 변수의 gradient vectors  $\nabla X_k$  는 수식 (13)와 같이 표현된다.

$$\nabla X_k = \frac{\partial X}{\partial a_k} \tag{13}$$

수식 (12)과 (13)을 이용하여 제어 변수  $a_k$  에 대해 F(X)로 표현하면 수식 (14)과 같다.

$$\frac{\partial F(X)}{\partial a_k} = \frac{\partial F(X)}{\partial X} \nabla X_k \tag{14}$$

이는  $\nabla X_k$  로 수식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla X_k = \left( \frac{\partial F(X)}{\partial X} \right)^{-1} \frac{\partial F(X)}{\partial a_k} \tag{15}$$

수식 (15)를 수식 (11)에 적용하면 Gradient method를 통

해 목적 함수가 최소가 되는 부분을 구할 수 있다. 즉, 제어 변수의 최적화를 구할 수 있다. 이 값은 제어 변수인 OLTC, SVR, SC들의 셋팅 치를 나타낸다. 이렇게 IVVC 알고리즘을 통해 얻어진 제어변수 값을 통하여 최적화된 계통을 얻을 수 있다. 여기서 한 가지 더 고려해야 하는 사항은 계통에 설치되어 있는 설비들을 IVVC알고리즘을 통해 그 설비로 운영할 수 있는 최적의 방법으로 운영을 하여도 계통이 커지고 복잡해지면서 설비들의 최적운영에도 수용능력을 벗어나는 경우가 생길 수 있다. 이러한 문제점까지도 이 논문에서는 확장된 개념의 IVVC 방법을 통해 해결하였다.

### 5. 확장된 개념의 IVVC 방법

#### 5.1 IVVC의 확장 개념

지금까지의 IVVC는 전압/무효전력 제어 설비들의 설정치를 정해주는 수식적 방법들이 대부분이었다. 하지만 본 논문에서는 확장된 IVVC의 개념으로 상시 연계점 이동을 통한 전압/무효전력 제어 방법을 제안하려고 한다. 이는 전압과 무효전력을 통합으로 제어한다는 IVVC의 기본 개념에, 기존과는 달리 수식적 방법이 아닌 동작적 방법을 통해 IVVC를 하게 되는 확장된 개념의 IVVC라고 할 수 있다. 확장된 IVVC 방법은 그림 8에서와 같은 계통을 예로 들어서 나타낼 수 있다.

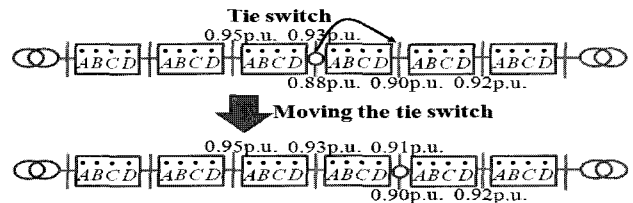


그림 8 확장된 개념의 IVVC  
Fig. 8 An expanded concept IVVC

확장된 개념의 IVVC 방법으로 배전계통의 최적화 IVVC를 통해서 제어 변수를 조절 한 후에도 계통이 커지고 복잡해지면서 선로의 말단의 전압 레벨이 전압 강하에 의하여 그림 8에 위의 계통과 같이 전압 허용 범위를 넘어가는 현상이 일어날 수 있다. 다시 말해, OLTC, SVR, SC의 제어 변수를 최적으로 운영을 하여도 각 선로의 전압레벨, 특히 선로의 말단의 전압레벨이 규정된 전압 허용범위를 넘어 문제가 발생할 가능성은 얼마든지 가능한 일이다.

이때 선로의 연계 구간 전압을 확인하여 전압 허용범위보다 여유가 많은 연계 D/L의 상시 연계점을 이동함으로써, 선로의 길이가 줄어들게 되고 전압 강하도 적게 일어나 그림 8의 아래 계통과 같이 전압조절이 가능하게 된다.

하지만 선로의 연계점 이동 후의 전압 레벨을 알 수 없는 상황에서 연계점을 직접 이동해 보는 것은 이동했을 때 예상치 못한 상황이 발생할 수 있다. 따라서 이를 정확하게 예측하기 위하여 본 논문에서는 3장을 통해 구한 4단자 정수를 이용한 확장된 IVVC알고리즘을 제안하여 이를 해결하였다.

5.2 연계점 이동을 통한 IVVC의 평가방법

5장에서 제시하는 확장된 개념의 IVVC 알고리즘은 앞서 배전계통을 모델링한 각 구간의 특징에 따라 4단자 정수를 구하게 되고, 이 4단자 정수를 이용하여 연계점을 이동하였을 때의 양쪽 단의 전압레벨을 계산해내야 한다. 그 결과를 토대로 운영자에게 연계점 이동이 계통을 안정적으로 운영하는 데에 더 효과적이라는 점을 인식하게 한다면 보다 효율적인 IVVC를 할 수 있는 방법을 제안한다.

즉, IVVC를 통해 최적의 제어를 하고 그 후에 발생 할 수 있는 운영상의 문제점에 대해서까지도 운영자에게 최적의 방법을 알려 줌으로써 선택을 쉽게 하고 직접적인 이동이나 복잡한 계산을 통해서가 아닌 4단자 정수를 이용한 알고리즘을 통해 계통의 전압 허용범위를 넘어가는 현상을 방지하여 계통을 안정하게 운영하게 된다.

계통의 최적화 후에도 한 구간의 전압 레벨이 허용범위를 넘어가면, 확장된 IVVC 개념을 적용하기 위하여 기지량인 4단자 정수를 통해 연계점을 이동하였을 때의 각 구간의 전압을 알아내게 된다. 그 후에 연계점을 이동하였을 때 연계된 구간 모두 이상이 없고 전압도 허용 범위 안에 들어오는지를 판단하고 어떤 것이 더 효율적인지를 판단하여 운영자에게 알려주고 결정에 따라 계통을 운영해야 한다.

먼저 이 알고리즘은 이미 FRTU와 계통의 배전 조류계산을 통해 우리는  $E_s, \theta$ 의 데이터와  $I_r = 0$ 을 기지량으로 알고 있다. 또한 3장을 통해 각 구간의 4단자 정수를 그림 9와 같이 나타내었다.

이를 이용하여 연계점을 이동하였을 때 이미 알고 있는 각 구간의 4단자 정수를 이용하여 각 노드의 전압, 전류를 구하여야 한다.

여기서 우리는 각 노드의 4단자 정수를 알고 있고  $E_s, \theta$ 의 데이터와  $I_r = 0$ 은 이미 기지량으로 알고 있지만 그림 9에서 볼 수 있듯이 노드 1,2,3,4의 전압, 전류를 알 수 없다.

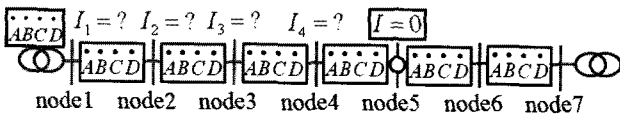


그림 9 각 선로 구간의 기지량과 미지량  
Fig. 9 Unknown and known data at each section

미지량을 구하기 위해서는 먼저 선로의 수식(16)의 4단자 정수 합성을 한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{A}_1 \dot{A}_2 + \dot{B}_1 \dot{C}_2 & \dot{A}_1 \dot{B}_2 + \dot{B}_1 \dot{D}_2 \\ \dot{A}_2 \dot{C}_1 + \dot{C}_2 \dot{D}_1 & \dot{B}_2 \dot{C}_1 + \dot{D}_1 \dot{D}_2 \end{bmatrix}$$

이 합성 과정을 통해 node1에서부터 연계점인 node5까지의 하나의 합성된 4단자 정수를 그림 10과 같이 하나의 4단자 정수로 통합할 수 있다.

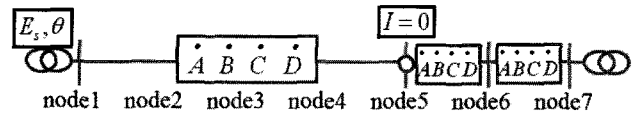


그림 10 4단자 정수 합성  
Fig. 10 Integration of four terminal constants

이를 이용하여 기본 4단자 정수를 이용한 전압, 전류 방정식 수식 (17)에 연계점 부분인 node 5의 전류가 0임을 이용하여  $\dot{E}_s$ 와  $\dot{A}$ 를 알고 있으므로  $\dot{E}_r$ 을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_s &= \dot{A} \dot{E}_r + \dot{B} \dot{I}_r \\ &= \dot{A} \dot{E}_r + 0 \end{aligned} \quad (17)$$

We get  $\dot{E}_r$  because we know  $\dot{E}_s, \dot{A}$

또한 수식 (18)을 이용하여 위와 같은 방법으로 node 2,3,4의 전압과 node 1,2,3,4의 전류를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_s &= \dot{A} \dot{E}_r + \dot{B} \dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{C} \dot{E}_r + \dot{D} \dot{I}_r \end{aligned} \quad (18)$$

이렇게 구한 양단의 각각의 노드들의 전압을 관리자에게 알리고 연계점을 이동할 것인지 아닌지에 대한 판단에 도움을 주고 계통의 안정적인 운영을 돕는다.

6. 사례연구

본 논문의 사례연구에서는 Matlab의 시뮬링크를 이용하여 그림 11과 같이 계통을 모의하고, Matlab을 이용하여 본 논문에서 제안한 IVVC알고리즘을 계산하여 그 결과를 검증하였다.

비교 대상은 IVVC 적용 전 일반 계통, 부하중심점에 의한 방법, 그리고 IVVC를 적용했을 때 전압의 변동 결과를 제시하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 우수성을 확인하였다. 또한 확장된 개념의 IVVC의 적용 가능성에 대한 평가방안 결과도 검증하였다.

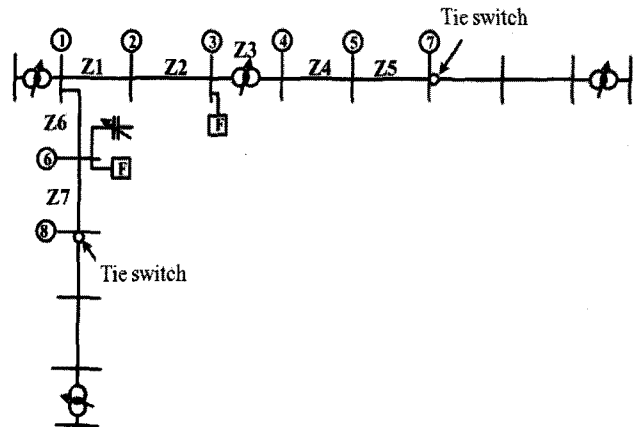


그림 11 예제 배전계통  
Fig. 11 A example distribution system

그림 11의 예제계통은 8개의 노드로 구성된 방사형 구조의 배전계통으로 node 1번은 OLTC가 설치되어있는 변전소 인출단 모선 부분이고, node 3과 4번 사이에 SVR, node 6번에는 무효 전력 보상을 위한 shunt condenser(SC)가 존재한다. 선로임피던스는 모두 동일하게 R, L, C 각각 정상분역상분에 대하여 1km당 0.01273, 0.9337e-3, 12.74e-9, // 0.3864, 4.1264e-3, 7.751e-9로 설정하였다. 선로길이는 모두 동일하게 1km로 설정하였다.

6.1 Gradient Method를 이용한 IVVC 결과 검증

그림 11과 같은 예제계통을 대상으로 임의대로 OLTC, SVR, SC의 설정 치와 용량을 통해 matlab simulink로 전압을 측정하였다. 같은 계통을 대상으로 현재 배전계통 운영 시 사용되고 있는 부하중심점에 의한 방법을 적용하여 matlab simulink를 이용하여 전압을 측정하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 IVVC 방법을 통해 얻은 각 설비들의 설정 치와 용량을 적용하여 matlab simulink를 통해 전압을 측정하였다.

이 세 방법으로 측정한 데이터는 그림 12와 표 1에서와 같이 나타낼 수 있다.

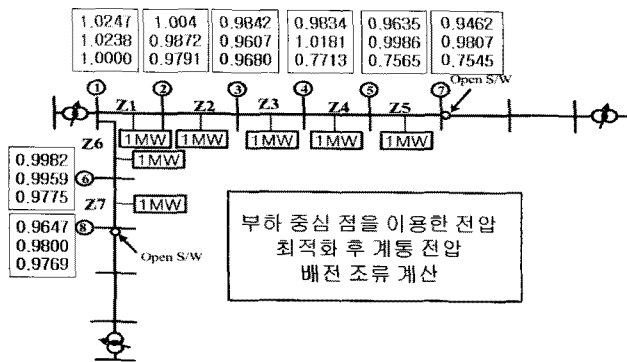


그림 12 전압/무효전력 제어를 위한 각 방법들의 비교 그림  
Fig. 12 Comparison figure of each method for Volt/Var control

표 1 전압/무효전력 제어를 위한 각 방법들의 결과비교 표  
Table 1 Comparison table of each method for Volt/Var control

구분	전압/무효전력 제어 이전	IVVC 알고리즘 적용	부하 중심점 적용
제어 변수 node 번호	a1=1.0 a2=1.0 a3=0.8	a1=1.0238, a2=1.0110, a3=1.0797	a1=1.0247
1	1.0000	1.0238	1.0247
2	0.9791	0.9872	1.0040
3	0.9680	0.9607	0.9842
4	0.7713	1.0181	0.9834
5	0.7565	0.9986	0.9635
6	0.9775	0.9959	0.9982
7	0.7545	0.9807	0.9462
8	0.9769	0.9800	0.9647

표 1과 그림 12에서 나타낸바와 같이 IVVC 알고리즘을 적용했을 때의 전압 분포율이 가장 균등하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전압/무효전력 제어와 관련하여 현재 사용

하고 있는 방식인 부하 중심점을 이용 방법보다 전압 변동율이 0.66%이고 최적화 IVVC의 전압 변동율은 0.34%로 49% 정도의 향상을 보인다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

6.2 확장된 IVVC 결과

본 논문에서 제안한 연계점 이동을 통한 확장된 IVVC의 타당성 검증을 위해 그림 11과 같은 예제계통을 동일하게 사용하였다. 이 방법의 가장 중요한 핵심은 연계점이 이동했을 때의 전압을 어떻게 예측 하느냐이다. 전압강하와 관련된 손실분은 해당선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하기 때문에, 선로임피던스를 기지랑 이라고 가정하면 연계점을 이동했을 때를 예측하기 위해서는 전류의 예측이 필수적이다.

이를 비교하기 위하여 matlab simulink를 이용하였으며, 앞서 5.2절에서 제시한 방법을 이용하여 전류를 예측하여 4단자 정수를 이용하여 연계점을 이동한 후의 전압값을 알고리즘을 통해 얻어낸 값과 matlab simulink에서 이동 후의 전압을 측정하여 그 결과를 통해 예측 오차 편차를 비교하였다. 즉, simulink를 통해 연계점 이동 후의 전압값을 측정하고 알고리즘을 통해 연계점을 이동하지 않고 계산을 통해 얻어낸 전압값을 비교하여 오차가 거의 없음을 표를 통해 보였다.

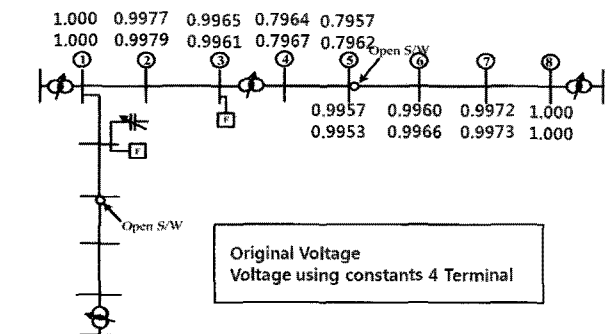


그림 13 Simulink 전압과 연계점 이동 후 4단자 정수를 통한 전압 비교

Fig. 13 After simulink voltage and the tie switch the voltage comparison using the four terminal constants

표 2 연계점 이동 후 4단자를 이용한 예측 전압

Table 2 Voltage result of simulink after moving tie switch using four terminal

알고리즘	연계점 이동 후 Matlab Simulink 측정 전압	기존 계통의 4단자 정수를 이용하여 계산된 예측 전압
1	1.0000	1.0000
2	0.9977	0.9979
3	0.9965	0.9961
4	0.7964	0.7967
좌5	0.7957	0.7962
우5	0.9957	0.9953
6	0.9960	0.9966
7	0.9972	0.9973
8	1.0000	1.0000

표 4의 결과에서 볼 수 있듯이 기존 계통 선로의 기지량을 통해 4단자 정수를 구하게 되면, 계통의 데이터들을 이용하여 연계점 이동 후의 전류를 예측 가능하다. 이 4단자 정수와 계통 데이터를 통해 연계점 이동 후의 전압을 직접 이동해 보지 않고 알고리즘을 통해 정확하게 계산해낼 수 있다. 이를 통하여 IVVC가 수식적 접근을 통해 전압/무효전력 제어 설비들의 세팅과 용량을 결정짓는 것에서 확장된 개념으로, 상시연계점 이동을 통한 전압의 제어도 가능하다는 것을 입증하였다.

7. 결 론

본 논문에서는 배전계통 운영 효율을 증대하기 위해 국내외에서 많은 관심을 보이고 있는 IVVC 알고리즘에 대한 방법과, 확장된 개념의 방법을 제안하였다.

배전계통의 부하를 기존과는 다르게 특정 위치에 집중하여 놓지 않고, 실제와 유사하게 분포부하 형태로 배전계통을 모델링하였으며, 이를 배전계통의 각 구간별 특성을 고려하여 4단자 정수를 나타내었다.

모델링한 배전계통을 대상으로 Gradient Method를 이용하여 IVVC를 위한 OLTC, SVR, SC 등의 전압/무효전력 제어 설비들의 탭 값과 용량 등을 결정짓는 방법을 제시하였다. 또한 IVVC라는 최종 목표를 위하여 수식적 방법이 아닌 동작적 접근방법으로 목표를 달성하는 확장된 개념의 IVVC 방법을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 matlab simulink를 이용하여 결과를 비교하였으며, 결과대상은 전압/무효전력 제어 설비만 갖추어져있고 설정 및 용량은 임의대로 되어있는 기본 계통과 현재 배전계통에서 전압/무효전력 제어를 위한 부하중심점 방법, 그리고 본 논문에서 제안한 IVVC 알고리즘을 통한 결과를 비교하여 그 우수성을 입증하였다. 또한 확장된 개념의 IVVC 방법이 타당하다는 것을 보이기 위하여, 상시연계점 이동에 따른 전압강하를 예측할 수 있는 방법을 제시하여 방법의 타당성을 입증하였다.

점차 전력자동화 시스템의 효율을 높이기 위한 노력들이 많아지고 있다. 특히 해외에서는 예전부터 지속적으로 관심을 가져온 전압/무효전력 제어에 대해서, 국내 전력기술이 해외시장에 진출하기 위해서는 그들의 많은 관심을 보이고 있고, 그들과는 다른 새로운 방법을 통해 국가기술 경쟁력 강화에 노력해야 할 것이다. 본 논문에서 제안한 IVVC 방법이 이러한 역할을 해줄 것으로 기대하고 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력IT IDMS(Intelligent Distribution Management System) 과제와 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

참 고 문 헌

[1] V. Borozan, M. E. Baran and D. Novosel, "Integrated Volt/Var control in distribution systems" 2001IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 1485-1490.

[2] T. Niknam, A. M. Ranjbar and A. R. Shirani, "Impact of distributed generation on Volt/Var control in distribution networks", 2003IEEE Bologna Power Tech conference proceedings, vol. 3, pp. 1-6, June 2003.

[3] I. Roytelman, B. K. Wee, R. L. Lugtu, "ilot Project to Estimate the Centralized VoltfVar Control" 1997 PICA, US, August 1997, pp. 340-345.

[4] B. R. Williams, "istribution Capacitor Automation Provides Integrated Control of Customer Voltage Levels and Distribution Reactive Power Flow" 1995 PICA, Salt Lake City, US, 1995, pp. 21 5-220.

[5] C. R. Goeckeler, "Beyond SCADA: Capacitor Automation at KCPL" Transmission& Distribution, August 1997, pp. 43-49.

[6] 하북남 "국내의 배전 자동화 기술 동향과 전망" 계장기술, 제 13권 제2호 통권 133호(2005.2), FEB. 2005, pp. 108-119

[7] Yutian Liu, Peng Zhang, Xizhao Qiu, "Optimal reactive power and voltage control for radial distribution system", in IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 85-90, July 2000.

[8] Allan C. Nerves, Froilan J. Savet, "Voltage and Reactive-Power Control Optimization in a Distribution System", IEEE Region 10 Conference, pp. 1-4, Nov. 2006.

[9] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuzza, E. R. Sanseverino, "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach", IEEE Transactionson Power Systems, vol. 19, issue 3, pp. 1516-1527, Aug. 2004.

[10] G. Ramakrishna, N. D. Rao, "Fuzzy inference system to assist the operator in reactive power control in distribution systems", IEE Proceeding son Generation, Transmissionand Distribution, vol. 145, issue 2, pp. 133-138, March 1998.

[11] J. R. P. -R. Laframboise, G. Ferland, A. Y. Chikhani, M. M. A. Salama, "An expert system for reactive power control of a distribution system. Part 2: system implementation", IEEE Transactionson Power Systems, vol. 10, issue 3, pp. 1433-1441, Aug. 1995.

[12] Loc Le Tan, M. Negnevitsky, "Expert system application for voltage and Var control in power transmission and distribution systems", IEEE Proceeding son Transmissionand Distribution Conference, pp. 531-536, Sept. 1996.

[13] Bie, Z. H. Song, Y. H. Wang, X. F. Taylor, G. A. Irving, M. R, "A transition-optimized approach to reactive power and voltage control", Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE 6-10 Page(s): 226-232 Vol. 1 June 2004



- [14] Swarup, K. S. Subash, P. S. "Neural network approach to voltage and reactive power control in power systems" Intelligent Sensing and Information Processing, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on 4-7 Jan. 2005 Page(s):228 - 233
- [15] Hu Zechun, Wang Xifan, Chen Haoyong, "Time-interval based volt/VAR control in distribution systems" Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 1, 13-17 Oct. 2002 Page(s): 81-85 vol. 1
- [16] N. D. Hatziaargyriou, T. S. Karakatsanis, "Distribution system voltage and reactive power control based on probabilistic load flow analysis", IEE Proceeding son Generation, Transmission and Distribution, vol. 144, issue 4, pp. 363-369, July, 1997.
- [17] Xia Yang, Myeon-Song Choi, Il-Hyung Lim, Seung-Jae Lee, "Load Flow Analysis for Distribution Automation System based on Distributed Load Modeling", KIEE Trans., vol. 2, no. 3, pp. 329-334, Sep. 2007.



**이 승 재 (李 承 宰)**

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 Univ. of Washington 교환 교수. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.  
Tel : 031-336-6362  
E-mail : sjlee@mju.ac.kr



**이 성 우 (李 聖 雨)**

1960년 3월 1일생(음). 1999년 건국대 대학원 전기공학과(공학박), 1992년 전력연구원 입사. 1992~2006년 한전 전력연구원 발전연구소 근무. 2007년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 배전IT 그룹 부장. 배전지능화 및 배전 IT 시스템 분야 연구.  
Tel : 042-865-5931  
E-mail : swlee@kepri.re.kr

**저 자 소 개**



**김 영 인 (金 榮 仁)**

1981년 2월16일생. 2008년 명지대학교 전기공학과 졸업. (학사) 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정  
Tel : 031-336-3290  
Fax : 031-330-6816  
E-mail : youngin42@mju.ac.kr



**권 성 철 (權 成 鐵)**

1972년 9월 24일생. 1996년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1997년 포항공과대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전력공사 전력연구원 배전연구소 선임연구원.  
Tel. : 042-865-5935  
E-mail : sckwon@kepri.re.kr



**임 일 형 (林 一 亨)**

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업.(학사) 2007년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
Tel : 031-336-3290  
E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



**최 면 송 (崔 勉 松)**

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.  
Tel : 031-336-3290  
E-mail : mschoi@mju.ac.kr