

# 고압배전선로용 선로전압조정장치(SVR)의 최적 도입방안에 관한 연구

論 文  
53A-11-5

## A Study on the Optimal Introduction of Step Voltage Regulator(SVR) in Distribution Feeders

李 恩 美\* · 金 美 映\*\* · 盧 大 錫\*\*\* · 孫 尙 郁<sup>§</sup> · 金 在 彦<sup>†</sup> · 朴 昌 浩<sup>§§</sup>

(Eun-Mi Lee · Mi-Young Kim · Dae-Seok Rho · Sang-wook Sohn · Jae-Eon Kim · Chang-Ho Park)

**Abstract** - With the development of industry and the improvement of living standards, better quality in power electric service is required more than ever before. Under these circumstances, to deliver reasonable voltage regulation methods in distribution systems need to be developed. So, This paper deals with optimal introduction of the line voltage regulator (SVR : Step Voltage Regulator) in power distribution systems. First, This paper investigates characteristics of SVR and performs economic evaluation of SVR's introduction by using Present Worth Method. This paper, also suggests proper location and optimal voltage regulation algorithm. In order to deliver suitable voltages to as many customers as possible, the optimal sending voltage of SVR should be decided by the effective operation of voltage regulators at the distribution feeders. The simulation results using a model distribution system and real distribution systems show that the proposed methods can be a practical tool for the voltage regulation in distribution systems.

**Key Words** : Power Quality, Step Voltage Regulator(SVR), Optimal Voltage Regulation

### 1. 서 론

최근 생활수준의 향상과 정보통신산업의 급속한 발전으로 인하여, 정보통신기기 및 정밀제어기기 등의 보급증가로 전압품질에 관한 관심이 높아져가고 있다. 특히, 전압품질에 민감한 수용가(산업체, 공장, 상가, 정보산업관련빌딩 등)의 전기피해 보상문제 등이 증가되고 있는 추세이며, 전 세계적으로도 전력품질에 대한 관심이 높아져 각종 전력품질 개선장치로부터 최적 공급시스템에 이르기까지 다양한 각도에서 전력품질을 향상하기 위한 연구개발이 활발하게 수행되고 있으며, 또한 부분적으로 실용화되고 있는 실정이다. 그러나 배전계통의 고압배전선로의 전압강하가 5%를 초과하는 장거리 배전선로에 대한 효율적인 전압관리가 미흡한 상태이다. 따라서 전압강하 5% 초과지역에 대한 효율적인 전압관리 개선 방안을 강구하기 위하여 현재 배전사업소에 도입, 설치되고 있는 선로전압조정장치의 운용 및 경제성 평가, 최적 위치선정에 대한 방안을 제시하는 연구가 필요하다<sup>[1]</sup>. 현재까지, 외국에서는 참고문헌 [1]과 같이 배전용변전소의 송출전압을 적정하게 조정하기 위하여, 수용가의 허용전압 범위를 고려한 송출전압 가능 영역도를 작성하여 이에 근거한 LDC 정정치를 계산하는 전압조정 방안을 제시하고 있으며, 국내에서

는 참고문헌 [3]과 같이 송출전압 허용 관계식을 이용하여 송출전압 조정방안을 제안하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 선로전압조정장치의 특성을 분석하고, 선로전압조정장치의 경제적 타당성을 평가하는 알고리즘과 적정 위치 선정 및 운용 알고리즘을 개발하여 선로전압조정장치의 도입방안을 제시한다. 구체적으로 말하면, 2장에서는 22.9 KV 한전 배전선로의 전압을 각 상별로 자동 조정하여 부하측에 적절한 전압을 공급하는 주상설치형 선로전압조정장치의 원리 및 개념에 대하여 살펴보고, 3장에서는 고압배전선로의 선로전압강하를 보상하는 각 투자대안을 제시하고 현재가치 환산법(PWM)을 이용한 경제성 평가 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 고압배전선로 및 저압배전선로의 전압강하 변동에 대하여, 수용가단 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수 있는 선로전압조정장치의 적절한 설치 장소의 선정에 대한 알고리즘을 제시한다. 5장에서는 LDC(Line Drop Compensation) 방식에 근거하여 선로전압조정장치의 최적 운용방안에 관한 알고리즘을 제시하고 6장에서는 실제 배전계통을 이용하여 기존의 여러 가지 전압조정 방안과 본 연구에서 제안한 방안을 비교하여, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 유효성을 확인한다.

### 2. 선로전압조정장치의 개념<sup>[2,4]</sup>

22.9KV 고압배전선로에서 부하 측에 적절한 전압을 공급하는 주상설치형 선로전압조정장치는 그림 1과 같이 단권변압기의 원리를 이용하여 승압 또는 강압 기능을 가지는 Controller와 탭 절환기를 통하여 부하 시에 자동으로 탭이 절환되어 부하 측에 적절한 전압을 공급하는 장치이다. 선로전압조정장치는 계통의 부하변동이 심한 곳에 설치되어 부하에 적절한 전압을 공급할 수 있고, 3상의 전압이 불균형한

\* 교신저자, 正會員 : 忠北大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博  
E-mail : jekim@chungbuk.ac.kr

\*\* 正會員 : 韓國技術大 研究員 · 碩士

\*\*\* 正會員 : 韓國技術大 研究員 · 碩士過程

§ 正會員 : 韓國技術大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

§ 正會員 : 忠北大 工大 電氣工學科 碩士過程

§§ 正會員 : 韓國電力公社 電力研究院 責任研究員

接受日字 : 2004年 9月 5日

最終完了 : 2004年 10月 13日

곳에 3대를 설치하여 3상 평형을 이룰 수 있으며, Radial 또는 Loop 수전방식에도 적용이 가능하다. 현재 고압배전선로에 운용 중인 주상설치형 선로전압조정장치는 그림 2와 같다.

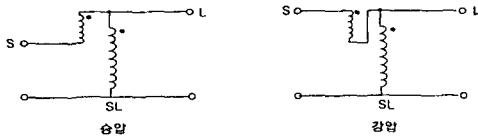


그림 1 단권변압기의 등가회로  
Fig. 1 Equivalent Circuit of Single Transformer



그림 2 선로전압조정장치의 설치도  
Fig. 2 Outline of Step Voltage Regulator

### 3. 선로전압조정장치의 경제성 평가

고압배전선로에서 부하가 증가함에 따라 주상변압기의 탭 조정만으로는 모든 수용가단 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수가 없게 되어, 수용가단 전압을 규정치 이내로 유지할 수 있는 보강공사가 필요하게 된다. 따라서 각 보강공사에 대한 경제성을 평가하여 합리적인 공사방법을 선택하는 것이 필수적이다.

#### 3.1 현재가치 환산법의 개념<sup>[4]</sup>

서로 다른 시점에서 발생한 여러 개의 투자비용을 현재기준시점으로 환산하여 각 투자대안의 경제성을 평가하는 수법이다. 현재가치는 그림 3에서 알 수 있듯이 어느 시점의 지출과 수입에 대한 기준시점의 화폐가치이고, 다음의 현재가계수( $V_n$ )를 곱해주면 된다.

현재가계수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_n = \frac{1}{(1+i)^n} \tag{1}$$

여기서  $i$  : 이자율,  $n$  : 계획년도

그리고, 누적 현재가계수는 현재가계수의 누계로서, 식 (2)와 같이 구해진다.

$$A_n = V^1 + V^2 + V^3 + \dots + V^N$$

$$= \frac{1 - V^N}{i} = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \tag{2}$$

또한, 총 계획년도에 있어서,  $n$ 년도에 수행한 설비투자의 누적현재가계수는 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$B_n = A_n - A_{n-1} = \frac{1 - \frac{1}{(1+i)^{N+1-n}}}{i(1+i)^{n-1}} \tag{3}$$

따라서 각 투자대안에 대한 현재가치는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$C_i = \sum_m \sum_n K_m \alpha_m B_{mn} \tag{4}$$

여기서,  $C_i$  :  $i$ 년도에서 바라본 현재가치,  $K_m$  : 설비비용,  $n$  : 공사가 발생한 년도,  $\alpha_m$  : 각 설비의 년경비율,  $m$  : 대상설비,  $B_{mn}$  :  $n$ 년도에 대한 누적현재가계수

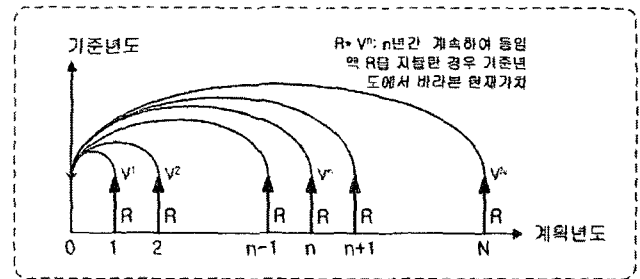


그림 3 현재가치 환산법의 개념도  
Fig. 3 Concepts for the Present Worth Method

#### 3.2 경제성 평가 방안

고압배전선로의 부하가 증가하면 선로의 전압강하가 증가하게 되어 선로의 전압을 일정하게 유지시키기 어렵게 된다. 따라서 부하증가에 따라 선로보강공사나 신설공사, 선로전압조정장치의 도입을 검토해야 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 가장 일반적인 3가지 대안에 대하여 경제성 평가를 수행한다.

- ① 선로전압조정장치(SVR)의 설치
- ② 회선증강 (ACSR 95mm<sup>2</sup> → ACSR 160mm<sup>2</sup>)
- ③ 회선신설 (전압강하 5%이상 지점에 회선 추가)

### 4. 선로전압조정장치의 적정 위치 선정

고압배전선로의 부하변동에 따라 전압을 조정하는 선로전압조정장치가 배전선로에서는 가장 효과적인 전압조정방안으로 알려지고 있다. 그러나 선로전압조정장치는 고압배전선로 및 저압배전선로의 전압강하 변동에 대하여, 수용가단 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수 있는 적절한 장소에 설치하는 것이 필수적이므로 이에 대한 알고리즘이 요구된다.

#### 4.1 기본 개념<sup>[1]</sup>

그림 4에 나타낸 바와 같이, 고압배전선로의 공장이 길거나 전압강하가 큰 선로에서는 주상변압기 탭을 여러 개 사용하여야 한다. 가장 높은 수용가단 전압이 발생하는 개소는

각 탭에서 전원 측 부근으로 전압강하가 적은 변압기 및 인입선에 접속된 직하의 수용가일 가능성이 높고, 가장 낮은 전압이 발생하는 개소는 각 탭의 가장 부하 측 부근으로서 전압강하가 큰 주상변압기와 저압배전선로 및 인입선에 접속된 저압 말단의 수용가일 것이다. 이러한 2개소의 전압(가장 높은 수용가전압과 낮은 수용가전압)을 규정치 이내로 유지시키기만 하면, 모든 수용가 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수가 있음을 알 수 있다.

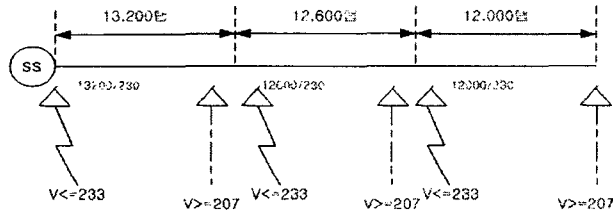


그림 4 주상변압기의 운용 개념도  
Fig. 4 Concepts for the Operation of Pole Transformer

4.2 선로전압조정장치의 설치 위치 결정

상기의 개념을 기본으로 주상변압기 2차 측의 전압분포를 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, 배전선로는 주상변압기(2%), 저압선(4%), 인입선(2%)으로 전압강하를 분담하고 있으며 저압선 말단의 수용가까지의 전압은 중부하시의 주상변압기와 저압선 및 인입선의 최대전압 강하를 합한 값(220V×0.8=17.6V)에 부동률(80%)을 고려하여 14V로 가정하고 저압부 최소 전압강하는 실제 선로에서 경부하시에 있어서도 무부하 상태로 되지 않고, 최대부하의 25%정도 부하가 항상 공급되는 것이 일반적이므로 중부하시 전압강하(14V)에 부하율(25%)을 적용하여 3V로 가정하면, 선로전압조정장치의 사용영역은 전원측 탭 직하 지점의 변압기 2차 전압이 상한치 233V에 직하 전압강하 3V를 더한 236V를 넘어서면 안 되고, 부하 측 탭 말단 지점의 변압기 탭 2차측 전압은 하한치 207V에 저압 말단까지의 전압강하 14V를 더한 221V 이하로 떨어지지 않는 범위로 유지할 필요가 있다.

그림 5에서, 적정한 영역을 결정하는 전압의 경사는 고압 배전선로 전압강하에 의한 것이므로, 선로전압조정장치의 사용영역은 고압 측 전압강하가 최대로 되는 중부하 시의 전압강하에 의하여 결정된다. 이 조건을 송출단의 전압변동(전압조정기의 불감대폭)을 포함하여, 주상변압기 탭 구간(전압강하 5% 미만 또는 초과 지점)에 대하여, 고압배전선로의 도달 전압으로 생각하면 그림 6과 같이 된다.

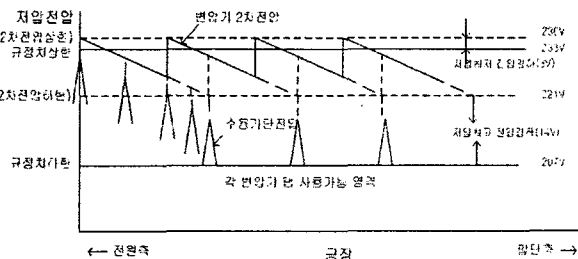


그림 5 중부하시 저압배전선로의 전압분포  
Fig. 5 Voltage Profile of Secondary Feeder at Peak Load

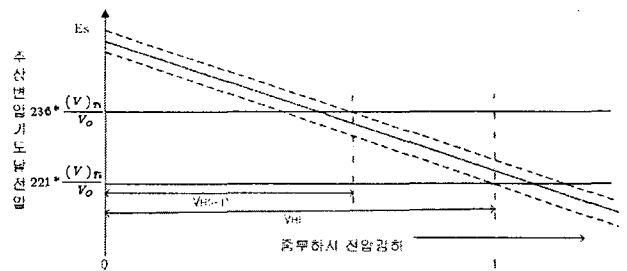


그림 6 선로전압조정장치의 설치가능 영역도  
Fig. 6 Optimal Location of SVR

이와 같은 조건으로 규정치 이내로 유지할 수 있는 관계는 다음과 같은 계산식으로 나타낼 수 있다. 수용가 도달전압이 상한치(233V)를 넘지 않을 조건은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left( (E_s + \Delta V) - V_{H(i-1)} \right) \times \frac{V_o}{(V)_{Ti}} \leq (V_{max} + V_d) \quad (5)$$

- ① 중부하시 송출전압에 전압조정기 불감대폭을 더한 최대 송출전압
- ② 최대 송출전압에서 탭 개시점 이전까지의 전압강하를 뺀 i구간의 최대 도달전압
- ③ 최대 도달전압에 변압비를 곱한 i구간의 변압기 2차 측에서의 최대 송출전압
- ④ 변압기 직하의 수용가가 규정치(233V)를 넘지 않을 주상변압기 2차 최대전압

상기의 식 (5)를 변형하면 식 (6)과 같은 조건식이 된다.

$$V_{max} \geq (E_s + \Delta V - V_{H(i-1)}) \times \frac{V_o}{(V)_{Ti}} - V_d \quad (6)$$

한편, 수용가 도달 전압이 하한치(207V)를 하회하지 않을 조건식은 식 (7)과 같다.

$$\left( (E_s - \Delta V) - V_{H(i)} \right) \times \frac{V_o}{(V)_{Ti}} \geq (V_{min} + V_d) \quad (7)$$

- ⑤ 중부하시 송출전압에 전압조정기 불감대폭을 뺀 최소 송출전압
- ⑥ 최소 송출전압으로부터 탭 종료 지점까지의 전압강하를 뺀 i구간 최소 도달전압
- ⑦ 최소 송출전압의 변압비를 곱한 i구간의 변압기 2차 측에서의 송출전압
- ⑧ 배전선말단의 수용가가 규정치(207V)를 벗어나지 않을 변압기 2차 최소전압

식 (7)을 변형하면 식 (8)과 같은 조건식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{min} \leq (E_s - \Delta V - V_{H(i)}) \times \frac{V_o}{(V)_{Ti}} - V_d \quad (8)$$

단,  $V_{max}$  : 수용가단 규정치 전압의 상한치 (233V),  $V_{min}$  :

수용가단 규정치 전압의 하한치 (207V),  $E_s$  : 중부하시 송출 전압 (13,200V),  $\Delta V$  : 송출전압 변동분(목표전압과의 편차),  $V_{HG(i)}$  : 송출단에서 i구간 직전까지의 중부하시 전압강하(변압기탭 개시점),  $V_{H(i)}$  : 송출단에서 i구간 말단까지의 중부하시 전압강하(변압기탭 종료점),  $(V)_{Ti}$  : 구간 i에서 사용되고 있는 주상변압기 탭,  $V_0$  : 주상변압기 2차 정격전압 (230V),  $V_d$  : 주상변압기 직하 수용가까지의 저압부 최소 전압강하(주상변압기+인입선의 최소치),  $V_e$  : 배전선로 말단의 수용가까지의 저압부 최대 전압강하(주상변압기+저압배전선로+인입선의 최대치)

식 (8)을 변형하면, 수용가까지의 도달전압이 규정전압을 벗어나지 않도록, 탭 개시점 직전까지의 중부하시 전압강하( $V_{HG(i)}$ )와, 탭 종료점 직전까지의 중부하시 전압강하( $V_{H(i)}$ )는 다음의 조건식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{H(i-1)} \geq E_s + \Delta V - (V_{\max} + V_d) \times \frac{(V)_{Ti}}{V_0} \quad (9)$$

$$= E_s + \Delta V - (233 + 3) \times \frac{(V)_{Ti}}{230}$$

$$V_{H(i)} \leq E_s - \Delta V - (V_{\min} + V_e) \times \frac{(V)_{Ti}}{V_0} \quad (10)$$

$$= E_s - \Delta V - (207 + 14) \times \frac{(V)_{Ti}}{230}$$

그러나 중부하시에 있어서 임의의 탭전압  $V_{Ti}$ 의 고압배전선로 전압강하에 대한 사용가능 영역은  $V_d$ ,  $V_e$ 를 파라미터로 하여, 송출전압의 변동분  $\Delta V$ 에 의하여 결정되어 진다.  $\Delta V$ 는 전압조정기의 불감대폭으로 결정되고, 단계적으로(탭절환에 의하여) 송출전압을 조정하는 타입의 전압조정기에서는 탭 간격의 50% 이상의 불감대폭을 가지지 못하면 탭 운전점 부근의 전압에서 오르내림을 연속적으로 반복하게 된다.

### 5. 선로전압조정장치의 최적 운용 방안

#### 5.1 LDC 방식에 의한 송출전압의 조정<sup>[1,2]</sup>

LDC 방식은 원래 발전기 전압조정방식의 하나로 개발된 것으로, 어느 발전기에 접속되어 있는 송전계통내의 일정 지점의 전압을 일정하게 유지하는 것을 목표로 하고 있다. 이 목적을 달성하기 위해서는 발전기의 송출전력에 따라 발전기와 송전계통내의 일정 지점까지의 임피던스에 의하여 발생하는 선로 전압강하를 보상하면 되므로 이것을 LDC 방식이라고 부르고 있다.

LDC 방식은 그 제어장치 내부에서 실제의 선로 전압강하를 모의하여 구하고, 이것을 보상한 전압이 일정하게 되도록 하는 제어회로로 구성되어 있으며, 그림 7의 계통을 예로 그 원리를 설명하면 다음과 같다. 그림에서 발전기 전압을  $E_s$ , 전압을 일정하게 유지해야 할 전압(부하중심점전압)을  $V_r$ , 선로전류를  $I$ , 송전선로의 임피던스를  $R+jX$  라고 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$V_r = E_s - (R+jX)I \quad (11)$$

따라서 일정하게 유지해야 할 기준전압  $V_r$ 을 정전압 발생 회로에 의하여 제공해 주고, 제어를 행하면, 계통내의 일정점의 전압은 항상 일정하게 된다.

송전계통의 경우에는 일반적으로 계통구성도 간단하고 상기의 이론과 같이 LDC 제어장치의 선로보상 임피던스는 송전선로의 임피던스와 동일한 값으로 선정하면 된다.(PT비, CT비에 의한 보정은 물론 필요함) 그런데, 배전계통에 이 방식을 적용하는 경우에는, 배전선로의 특성상 송전선로와 같이 단순하게 취급하는 것이 불가능하며, 각각의 배전선로와 수용가의 적정전압 유지를 하기 위하여 선로 전압강하를 보상한다는 해석적인 문제가 아니고, 전체의 수용가 전압변동을 종합적이고 총괄적으로 최소로 하는 보상 임피던스를 결정하는 통계적인 문제로 처리할 필요가 있다.

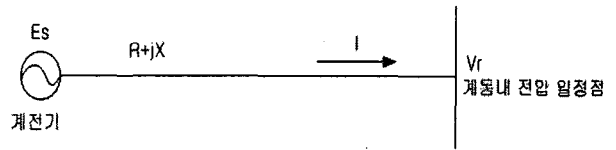


그림 7 LDC 방식의 원리 설명도  
Fig. 7 Concept for LDC Method

#### 5.2 최적 전압보상을

LDC 방식에 의한 선로전압조정장치의 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적인 분포가 되도록 전압조정요소(등가임피던스, 부하중심점 전압)를 구하는 것으로, 이 요소는 배전계통의 등가적인 전압강하 특성을 나타낸다. 즉, 먼저 시간에 따라 변화하는 이상적인 최적 송출전압(최적 전압보상율)을 결정하고, 이것과 총 부하전류와의 상관관계를 통계적인 수법을 이용하여 최적 전압조정요소를 구한다. 일반적으로 배전용변전소와 고압배전선로의 전압조정은 그림 8과 같다. 그러나 각각 다른 부하특성을 가진 피더나 부하군들을 동시에 고려하여 전압조정을 한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 가장 가혹한 조건이 되는 고압배전선로의 특정 지점들을 선택하여, 이 지점의 수용가 전압을 허용범위 이내로 유지시켜, 다른 피더의 수용가 전압도 적정범위 내로 유지시키는 개념을 이용하였다.

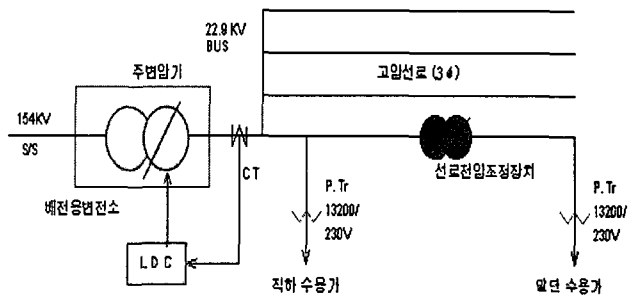


그림 8 고압배전선로의 전압조정방안 개념도  
Fig. 8 Voltage Regulation of Distribution System

송출전압의 결정문제는 그림 9와 같이 선택되어진 가장 가혹한 조건의 피더 특정 지점(최대와 최소 전압점)을 가능한

표준전압(220V)의 근방에 유지시키도록 최적 전압보상을 구하는 것이 된다. 이 문제는 다음식과 같이, 등가적으로 선로전압조정장치 직하의 수용가전압과 규정전압의 상한치(233V), 하한치(207V)와의 차의 제곱을 최소화시키는 문제로 정식화시킬 수 있다.

$$\text{Min } J(t) = \{ V1_{\text{max}}(t) - V1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} \}^2 + \{ V1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} - V1_{\text{min}}(t) \}^2 \quad (12)$$

Subj. to,  $V1_{\text{max}}(t) = V_{\text{max}} \quad (13)$

$$V1_{\text{min}}(t) = V_{\text{min}} \cdot V1(t) / V2(t) \quad (14)$$

여기서, t : 시간대, V1(t), V2(t) : SVR 직하 및 말단의 수용가 전압, V1max(t), V1min(t) : SVR 직하로 환산된 규정 전압의 상하한치, Vmax : 규정전압의 상한치, Vmin : 규정전압의 하한치, Rmtr : SVR의 전압보상율, Xmtr : SVR의 최적 전압보상율

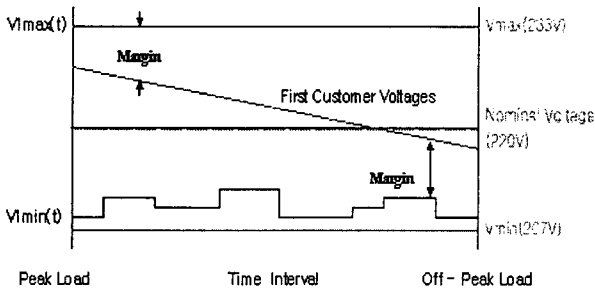


그림 9 최적 전압조정방안의 개념  
Fig. 9 Concept for the Optimal Voltage Regulation

여기에서는 상기 문제의 간략화와 계산의 오차를 피하기 위하여, SVR 직하와 말단의 수용가전압이 고압배전선로의 전압강하에 의하여 비례적으로 변화한다는 사실에 주목하여, 말단 수용가전압의 변동특성을 등가적으로 SVR 직하의 값으로 환산하였다. 즉, 식 (13)과 식 (14)는 SVR 직하 지점에서 바라본 새로운 규정전압의 상하한치를 나타낸 것으로, 상한치는 전압변동에 관계없이 일정하지만, 하한치는 직하에서 말단까지의 전압강하에 의하여, 시간과 함께 변화하는 특성을 가지고 있다.

따라서, 상기 문제에 대한 최소화 조건( $dJ / dX_{\text{mtr}} = 0$ )에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율은 다음과 같이 구해진다.

$$X_{\text{mtr}} = R_{\text{mtr}} \cdot \{ V1_{\text{max}}(t) - V1_{\text{min}}(t) \}^2 / 2V1(t) \quad (15)$$

### 5.3 최적 전압조정요소

선로전압조정장치의 이상적인 최적 송출전압과 총 부하전류와의 상관관계는 그림 10과 같이 시간과 함께 변화하는 비선형적인 상관관계 특성을 가지고 있다. 그러나 LDC의 전압조정요소는 한번 정해지면 일정기간 같은 값으로 운용되기 때문에, 최적 송출전압은 식 (16)과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다. 따라서 전압조정요소의 결정문제는 이상적인 최적 송출전압 분포의 편차를 최소화하도록 식 (16)의 계수를 구하는 문제로 되어 최소화방법에 의해 식 (17)과 같이 정식화할 수 있다.

$$V_{\text{opt}}(t) = V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}(t) \quad (16)$$

$$\text{Min } q = \sum_{t=1}^T \{ V_{\text{opt}}(t) - (V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}(t)) \}^2 \quad (17)$$

여기서, T : 전체 시간대, Vopt(t) : Xmtr에 의한 최적 송출전압, Vce : 부하중심점의 전압, Zeq : 등가임피던스, Ito(t) : SVR을 통과하는 총 부하전류

식 (17)를 최소화( $\partial q / \partial Z_{\text{eq}} + \partial q / \partial V_{\text{ce}} = 0$ )하여, 전체 고찰기간의 최적 전압조정요소(Zeq, Vce)를 구하면 다음식과 같다.

$$Z_{\text{eq}} = \{ \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}(t) \cdot \sum_{t=1}^T V_{\text{op}}(t) - T \cdot \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}(t) \cdot V_{\text{op}}(t) \} / \{ (\sum_{t=1}^T I_{\text{to}}(t))^2 - T \cdot \sum_{t=1}^T (I_{\text{to}}(t))^2 \} \quad (18)$$

$$V_{\text{ce}} = \{ \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}(t) \cdot V_{\text{op}}(t) - Z_{\text{eq}} \cdot \sum_{t=1}^T (I_{\text{to}}(t)) \} \quad (19)$$

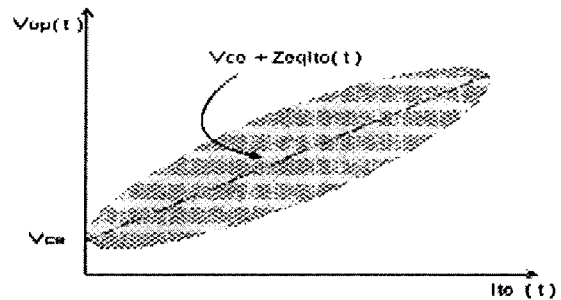


그림 10 최적 송출전압의 분포 특성  
Fig. 10 Distribution of Optimal Sending Voltage

## 6. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 6.1 선로전압조정장치의 경제성 평가

배전계통의 부하증가나 계통 변경 등에 있어서 수용가에 적절한 전압을 공급하기 위하여 배전계통 중강공사나 신설공사, 전압조정장치 도입이 필요한데, 앞에서 서술한 바와 같이 3가지 경제성 평가 대안에 대하여 시뮬레이션을 수행한다.

#### (1) 모델계통의 제조건

- ① 모델계통은 그림 11과 같은 22.9[KV] 계통을 상정하며, 역률은 0.9로 가정한다.
- ② 초기조건은 대상선로의 총 부하를 7[MW]로, 전압강하 5% 지점에 4[MW], 선로말단에 3[MW]가 분포된다고 가정한다.
- ③ 부하증가는 선로의 말단에서 발생하고 부하증가율은 1%, 2%, 3%, 4%, 5%로 상정한다.
- ④ 전압강하 5% 지점 이전에는 ACSR 160mm<sup>2</sup> 전선이 설치되고, 전압강하 5% 이상 지점에는 ACSR 95mm<sup>2</sup> 전선이 설치된다고 가정한다.
- ⑤ 이자율은 10%로 가정하고, 배전설비에 대한 년경비율은 15%로 가정한다.

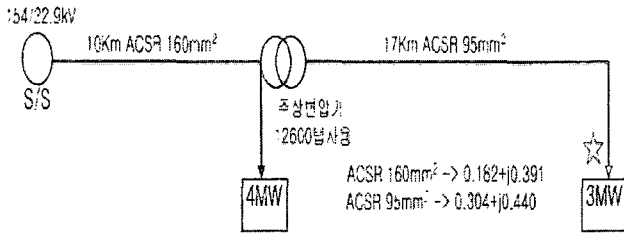


그림 11 경제성 평가를 위한 배전선로 모델 계통  
Fig. 11 Model system for economic evaluation

(2) 각 대안별 경제성 평가

이자율을 10%로 가정 하였을때 현재가치 환산법의 현재계수는 표 1과 같고, 각 투자대안별 공사비용은 표 2와 같다. 그리고 그림 12와 같이 각 대안별 공사비용을 그래프로 비교해 보면 선로전압조정장치의 도입이 경제적으로 가장 유리함을 알 수 있다.

표 1 현재계수

Table 1 Present Factor

| 년도 | 현재계수 (V <sub>n</sub> ) | 누적현재계수 (A <sub>n</sub> ) | n년도에 대한<br>누적 현재계수 (B <sub>n</sub> ) |
|----|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 1  | 0.909                  | 0.909                    | 6.145                                |
| 2  | 0.826                  | 1.735                    | 5.236                                |
| 3  | 0.751                  | 2.486                    | 4.409                                |
| 4  | 0.683                  | 3.169                    | 3.658                                |
| 5  | 0.621                  | 3.790                    | 2.975                                |
| 6  | 0.565                  | 4.355                    | 2.354                                |
| 7  | 0.513                  | 4.868                    | 1.789                                |
| 8  | 0.467                  | 5.335                    | 1.276                                |
| 9  | 0.424                  | 5.759                    | 0.810                                |
| 10 | 0.386                  | 6.145                    | 0.386                                |

표 2 각 부하증가율에 대한 투자대안별 공사비용

Table 2 Cost of Economic Alternative for the Load Increasing Rate

| 부하 증가율 | SVR 설치공사     | 회선증강공사         | 회선신설공사         |
|--------|--------------|----------------|----------------|
| 1%     | 460,875,000원 | 626,790,000원   | 940,185,000원   |
| 3%     | 460,875,000원 | 987,105,000원   | 940,185,000원   |
| 5%     | 521,625,000원 | 1,186,617,000원 | 1,022,805,000원 |

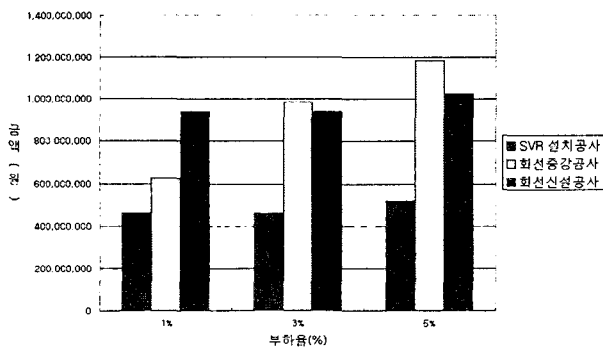


그림 12 각 투자 대안별 비교분석  
Fig. 12 Comparison of each economic alternative

6.2 선로전압조정장치 최적 위치 선정

여기서, V<sub>e</sub>는 중부하시의 주상변압기와 저압배전선로 및 인입선의 최대 전압강하를 합한 값에 부등률을 고려하여 14V로 가정하고, V<sub>d</sub>는 주상변압기 직하의 수용가까지 중부하시에 대해서도 전압강하가 작은 주상변압기와 인입선이 있는 것을 고려하여, 변압기 및 인입선 전압강하의 합계 V<sub>d</sub>를 3V로 가정한다. E<sub>s</sub>(중부하시 송출전압)는 13,200V에 있어서 송출단 직하의 수용가가 각 규정치를 넘지 않는 상한치로 하면, 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_s \leq (V_{max} + V_d) \times \frac{(V)}{V_o} \pi - \Delta V \quad (20)$$

$$= (233 + 3) \times \frac{13200}{230} - 103 = 13441 [V]$$

이 값을 식 (9)와 식 (10)에 대입하여 피크시의 전압강하가 5% 이하인 지점과 5%를 초과하는 지점의 사용영역을 구하면 다음과 같다.

(1) 피크시의 전압강하가 5% 이하인 지점 (주상변압기 탭 13,200V 경우)

$$V_{H(i-1)} \geq (13441 + 103) - (233 + 3) \times \frac{13200}{230} \approx 0 [V]$$

$$V_{H(i)} \leq (13441 - 103) - (207 + 14) \times \frac{13200}{230} = 654.5 [V]$$

(2) 피크시의 전압강하가 5% 이상인 지점 (주상변압기 탭 12,600V 경우)

$$V_{H(i-1)} \geq (13441 + 103) - (233 + 3) \times \frac{12600}{230} = 615.3 [V]$$

$$V_{H(i)} \leq (13441 - 103) - (207 + 14) \times \frac{12600}{230} = 1231 [V]$$

이와 같이, 선로전압조정장치의 사용가능 영역은 고압배전선로의 전압강하가 최대가 되는 중부하시에 가장 좁게 되고, 이 시점의 주상변압기 내부 전압강하를 포함한 저압부의 최대 및 최소의 전압강하에 의해 결정되고, 중부하시의 고압배전선로 전압 강하치에 의하여 최적 설치 지점이 구해진다.

표 3 선로전압조정장치의 최적 설치지점

Table 3 Optimal Location Site of SVR

| 내역                 | 전압강하 5% 미만지점<br>(주상변압기 탭 : 13,200V) | 전압강하 5% 초과지점<br>(주상변압기 탭 : 12,600V) |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 설치가능영역<br>(전압강하)   | 0 - 654V                            | 615 - 1231V                         |
| 최적 설치 지점<br>(전압강하) | 615V                                |                                     |

6.3 선로전압조정장치의 최적 전압조정 방안

실계통(충남지사, 서산S/S, 고북D/L)에 대해서, 제시한 최적 송출전압조정 알고리즘과 앞에서 제시한 설치 위치를 적용시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) 평가지표의 정의

배전계통 내의 수용가 전압의 양부는 각 수용가전압이 표준전압에 어느정도 가깝게 유지되는가를 산정함으로써, 평가할 수 있다. 즉, 평가지표(PI : Performance Index)는 전체 고찰시간대에 대하여 전체 대상노드의 수용가전압과 표준전압과의 편차의 제곱 합으로 나타낼 수 있다.

$$PI = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \{ V1(t, k) - Vstd \}^2 + \{ V2(t, k) - V2std \}^2 \quad (21)$$

여기서, T : 전체 고찰시간, K : 노드의 총수, Vstd : 표준전압 (220V), V1(t, k) : 각 노드직하의 수용가전압, V2(t, k) : 각 노드말단의 수용가전압

상기의 지표는 배전계통에 있어서 전체 수용가의 전압분포 특성의 수준을 평가하는 것으로, 평가지표가 작으면 작을수록 수용가 전압특성이 양호하다는 것을 나타낸다. 따라서 각 전압조정 수법에 의한 평가지표 값을 비교함으로써, 그 수법 자체의 좋고 나쁨도 평가할 수 있다.

(2) 시뮬레이션에 사용된 송출전압 조정방식

(가) 선로전압조정장치 도입 전(ULTC 조정)

① 방식 1 (Fixed Method) : 부하의 증가에 상관없이 배전용변전소 ULTC의 송출전압을 22,900V로 고정하는 방식

② 방식 2 (Programmed Method) : 시간대별 부하의 증가에 따라 타임스위치의 지정에 의해 배전용변전소 ULTC의 송출전압을 단계적으로 조정하는 방식 (여기서는 ±2%로 송출전압 조정)

③ 방식 3 (Proposed Method) : 최적 전압조정요소를 구해 시간에 따라 변화하는 부하전류의 크기에 따라 고압배전선로의 전압강하를 보상하여 배전용변전소 ULTC의 송출전압 크기를 조정하는 방식

(나) 선로전압조정장치 도입 후(ULTC + SVR 조정)

④ 방식 4 (Fixed+Fixed(SVR) Method) : 변전소와 SVR의 송출전압을 22,900V로 고정하여 송출하는 방식

⑤ 방식 5 (Proposed+Fixed(SVR) Method) : 변전소의 송출전압은 제안된 LDC 방식으로 조정하고 SVR의 송출전압은 22,900V로 고정시켜 송출하는 방식

⑥ 방식 6 (Proposed+Programmed(SVR) Method) : 변전소의 송출전압은 제안된 LDC 방식으로 조정하고 SVR의 송출전압은 프로그램 방식으로 조정하는 방식

⑦ 방식 7 (Proposed+Pic(SVR) Method) : 변전소의 송출전압은 제안된 LDC 방식으로 SVR의 송출전압은 송출전압 조정 영역도를 작도해 송출전압을 조정하는 방식

⑧ 방식 8 (Proposed+Proposed(SVR) Method) : 본 연구 제안 방식으로서 변전소와 SVR의 송출전압을 최적전압조정 알고리즘을 이용한 제안된 LDC 방식으로 조정하는 방식

(3) 실계통과 제조조건<sup>11)</sup>

① 실계통은 그림 13과 같이 22.9KV 계통이며, 고압배전선로의 구간데이터는 표 4와 같다.

② 배전용변전소의 LRT의 부하 패턴은 6,000KW의 피크 부하를 기준으로 그림 14와 같은 부하 특성을 갖는다.

③ 저압측의 전압강하 배분은 주상변압기와 인입선, 저압 배전선로의 최대 전압강하를 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.

④ 고압배전선로의 전압강하를 계산하기 위하여, 조류계산은 가우스 사이델법(Gauss-Seidel Method)을 이용한다.

⑤ SVR은 그림 13의 7번 지점에 설치되어 있다.

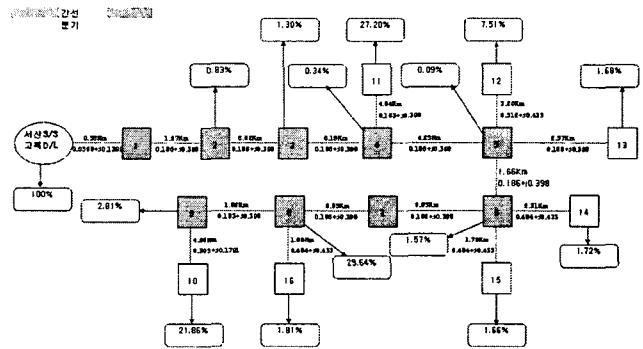


그림 13 실계통 (충남지사, 서산S/S, 고북D/L)  
Fig. 13 Real Distribution System

표 4 실계통의 구간 데이터 (충남지사, 서산S/S, 고북D/L)  
Table 4 Section Data of Real System

| Feeder Number | Section Number | Node Number |    | Impedance |         | Length (km) | Pole Tr. Tap | Load (%) |
|---------------|----------------|-------------|----|-----------|---------|-------------|--------------|----------|
|               |                | From        | To | R(Ω/km)   | X(Ω/km) |             |              |          |
| 1             | 1              | 0           | 1  | 0.0568    | 0.1399  | 0.58        | 22900/230    | 0        |
|               | 2              | 1           | 2  | 0.186     | 0.398   | 1.97        | 22900/230    | 0.83     |
|               | 3              | 2           | 3  | 0.186     | 0.398   | 6.82        | 22900/230    | 1.3      |
|               | 4              | 3           | 4  | 0.186     | 0.398   | 6.18        | 22900/230    | 0.34     |
|               | 5              | 4           | 5  | 0.186     | 0.398   | 4.25        | 22900/230    | 0.09     |
|               | 6              | 5           | 6  | 0.186     | 0.398   | 1.66        | 22900/230    | 1.57     |
|               | 7              | 6           | 7  | 0.186     | 0.398   | 0.85        | 21800/230    | 0        |
|               | 8              | 7           | 8  | 0.186     | 0.398   | 0.85        | 21800/230    | 29.64    |
|               | 9              | 8           | 9  | 0.183     | 0.398   | 1.82        | 21800/230    | 2.81     |
|               | 10             | 9           | 10 | 0.305     | 0.1791  | 4.96        | 21800/230    | 21.84    |
| 2             | 11             | 4           | 11 | 0.183     | 0.398   | 4.84        | 22900/230    | 27.2     |
| 3             | 12             | 5           | 12 | 0.512     | 0.433   | 3.2         | 22900/230    | 7.51     |
| 4             | 13             | 5           | 13 | 0.186     | 0.398   | 2.57        | 22900/230    | 1.68     |
| 5             | 14             | 6           | 14 | 0.484     | 0.433   | 2.31        | 22900/230    | 1.42     |
| 6             | 15             | 6           | 15 | 0.484     | 0.433   | 1.79        | 22900/230    | 1.66     |
| 7             | 16             | 8           | 16 | 0.484     | 0.433   | 1.69        | 21800/230    | 1.81     |

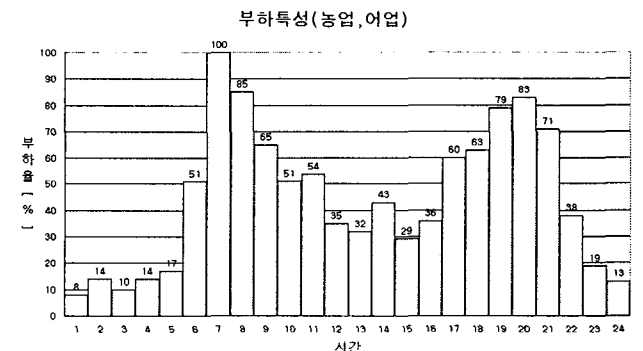


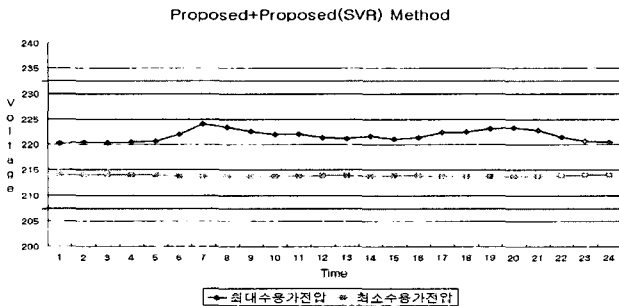
그림 14 실계통의 부하특성 곡선  
Fig. 14 Load curve of real system

**(4) 시뮬레이션 결과**

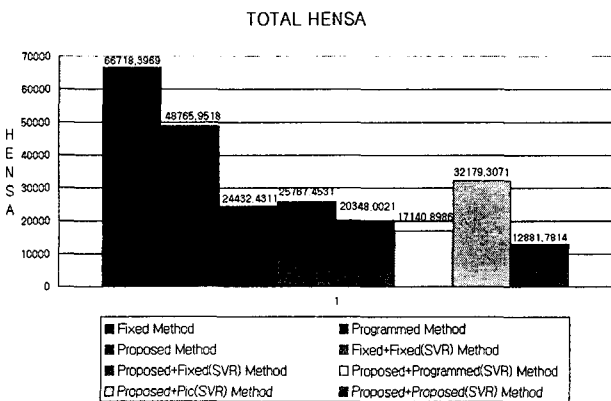
선로전압조정장치의 도입 전, 후에 대한 기존의 전압조정 방안과 본 연구에서 제안한 방안에 대한 평가지수를 계산한 결과는 그림 16과 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 변전소 ULTC와 SVR의 송출전압을 최적 전압조정 알고리즘을 이용한 LDC 방식(방식 8)이 가장 우수함을 알 수 있다. SVR 도입 후 최적 전압조정 방안의 LDC 값은 표 5와 같고 방식 8에 의한 수용가 전압특성은 그림 15와 같다. 이 그림에서는 수용가전압이 규정 전압에 근방에 분포하는 것을 알 수 있다.

**표 5** 최적전압조정방안의 LDC 값  
**Table 5** LDC value for optimal voltage regulation

|      | Zeq[Ω] (등가임피던스) | Vce[V] (부하중심점 전압) |
|------|-----------------|-------------------|
| ULTC | 1.8991          | 21,322.9399       |
| SVR  | 14.1812         | 21,893.0013       |



**그림 15** 방식8에 의한 수용가 전압특성  
**Fig. 15** The customer voltage characteristic by method 8



**그림 16** 각 방식의 평가지표의 합계 비교  
**Fig. 16** The comparison of performance index by method

**7. 결 론**

본 연구에서 수행한 선로전압조정장치의 도입방안에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선로전압조정장치의 경제성을 검증하기 위하여, 장래

에 증가되는 각각의 경우를 가정하여 현재가치 환산법을 이용해 시뮬레이션 한 결과, 선로전압조정장치의 설치가 부하 증가에 대비한 타 공사방법보다 경제적임을 확인하였다.

- (2) 선로전압조정장치의 설치 위치를 선정하기 위해, 제시한 기본개념을 통해 설치 위치를 결정하였으며, 설치가능 영역을 시뮬레이션 하여 최종적인 선로전압조정장치의 표준 설치 위치를 제안하였다.

- (3) 선로전압조정장치의 최적 전압조정을 위해, 최적 전압보상율의 개념을 설명하였으며 최적 전압조정요소를 이용한 최적 전압조정 알고리즘을 제시하였고, 방식 8인 LDC + LDC(SVR) Method가 가장 우수함을 확인하였다.

- (4) 본 논문에서 제시한 선로전압조정장치의 최적 전압조정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해, 비교 전압조정 방안들을 제시하고 이를 실 계통에 적용시켜 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 최적 전압조정 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

앞으로는 수용가의 전압을 보다 적정하게 유지시키기 위하여 중요한 요소인 배전용변전소 ULTC와 SVR의 협조운용 방안에 대한 연구를 수행할 예정이다.

**감사의 글**

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2004).

**참 고 문 헌**

- [1] “배전전압관리 개선에 관한 연구” 산업자원부, 2004.4.
- [2] “전압관리 메뉴얼” 일본 북해도전력(주), 2000.6.
- [3] 김태웅, 김재연, “분산형전원이 도입된 배전계통의 전압해석 방법에 관한 연구” 대한전기학회지A 제 52권 2호, 2003.2.
- [4] 關根奉次 “배전기술 종합 메뉴얼.”
- [5] 이은미, 노대석, 오용택, “배전계통에 있어서 최적송출 전압조정에 관한 연구(1)”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권, 2002.
- [6] 이은미, 노대석, “고압배전선로의 선로전압조정장치(SVR)의 운용에 관한 연구”, 대한전기학회 전력기술부분회 춘계학술대회 논문집, 2003.
- [7] 이은미, 노대석, 김미영, “고압배전선로의 선로전압조정장치(SVR)의 운용에 관한 연구(2)”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권, 2003.
- [8] 노대석, 이은미, “배전계통에 있어서 선로전압조정장치의 경제성 평가에 관한 연구”, 대한전기학회 전력기술부분회 춘계학술대회 논문집, 2003.
- [9] Daeseok Rho, Eunmi Lee, “A study on the Optimal



Operation of Line Voltage Regulator(SVR) on Dixtribution Feeders”, IFAC 논문집 III권, 2003.

- [10] “고유연·고신뢰·고효율 전기에너지 유통시스템 개발에 관한 기초연구” 한국전기연구소, 1998.
- [11] Daeseok Rho, Horiyuki Kita, Kenichi Nishiya and Hasegawa Jun, “Voltage Regulation Methods Based on an Extended Approach and Neural Networks for Distribution System interconnected with DSG systems”, 일본전기학회지B, 117권 3호, 1997년3월.

## 저 자 소 개



### 이 은 미(李 恩 美)

1978년 12월 25일생. 2002년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
Tel : 019-220-2085  
E-mail : ektmfla@empal.com



### 김 재 인(金 在 彦)

1959년 7월 17일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년3월1일~1998년8월31일 한국전기연구소 근무. 1996년 일본 교토대 전기공학과 졸업(공학). 배전계통운용, MW급 전지전력저장 시스템설계 및 운용, 분산 전원 계통연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산 배전계통, 전력품질 해석 및 진단, Custom Power Devices, Micro-grid 등의 연구분야에 종사. 1995년도 일본 일본전기학회 전력·에너지 부문대회 우수논문발표대상 수상. 현재, 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기공학 전공 부교수.  
Tel : 043-261-2423, Fax : 043-263-2419  
E-mail : jekim@chungbuk.ac.kr



### 김 미 영(金 美 映)

1971년 8월 5일생. 1994년 충북대학교 물리학과 졸업. 2003년 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학중.  
Tel : 041-560-1167  
E-mail : fssp@kut.ac.kr



### 노 대 석(盧 大 錫)

1962년 2월 21일생. 1985년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월 일본 북해도대학교 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1998년 한국전기연구소 선임연구원 근무. 1999~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 조교수.  
Tel : 041-560-1167  
E-mail : dsrho@kut.ac.kr



### 박 장 호(朴 昌 浩)

1956년 10월 24일생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 배전기술그룹 책임연구원  
E-mail : chpark@kepri.re.kr



### 손 상 옥(孫 尙 郁)

1981년 4월 13일생. 2004년 2월 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업, 2004년 10월 현 충북대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 시스템 최적화분야 연구중.  
E-mail : smsosa@nate.com