

# 분산형전원이 도입된 배전계통의 최적전압조정 방안에 관한 연구

論 文
54A-5-7

## A Study on the Optimal Voltage Regulation in Distribution Systems with Dispersed Generation Systems

金美映\* · 盧大錫† · 吳龍澤\*\* · 安在閔\*\*\* · 金在彦§ · 金應相§§

(Mi-Young Kim · Dae-Seok Rho · Yong-Taek Oh · Jae-Yun An · Jae-Eon Kim · Eung\_Sang Kim)

**Abstract** - Recently, the domestic and foreign power trends are the supply of high quality power and environment conservation technology based on the new energies development. So, the dispersed generation systems, such as photovoltaic, fuel cell, and battery are to be introduced in distribution systems. According to the situation change, power of high quality and reliability are required in distribution systems with dispersed generation. Up to now, the voltage in distribution systems are regulated by ULTC of substation and pole transformer of primary feeders. These days, Step Voltage Regulator(SVR) is getting established at distribution feeders to regulate effectively voltage of primary feeders that voltage drop exceeds 5%. But, because SVR is operated independently with ULTC of substation, SVR can not take play to its full effectivity. Under these circumstances, in order to deliver suitable voltages to as many customers as possible, new optimal voltage regulation algorithms are required in distribution system. So, this paper presents optimal voltage regulation algorithm to regulate voltage effectively for ULTC and SVR in distribution systems with dispersed generation systems.

**Key Words** : Dispersed Generation, ULTC, SVR, Optimal Voltage Regulation

### 1. 서 론

최근 전력분야에도 첨단기술의 활용이 두드러져 컴퓨터, 전력전자기술의 응용, 신소재를 이용한 새로운 기기의 개발 및 신기술을 이용한 발전, 송전 및 전력저장 기술의 고도화가 빠르게 이루어지고 있으며, 전력기기의 Electronics화 및 IT화와 시스템 구성 및 운용에 있어서의 대용량화·고효율화·컴팩트화·다기능화 추세가 지속되고 있다. 선진국의 전기기술 동향을 살펴보면, 장기적으로는 안정적인 전기공급을 위한 설비와 에너지원의 확보, 품질과 서비스의 향상, 비용절감, 환경문제의 해결에 목표를 두고 있으며, 단기적으로는 경제적 효율성과 사회적 요구에 따라 신속적으로 대응하고 있다. 결국 국내외적 전력동향은 크게 신뢰성 높은 양질의 전력을 안정적으로 공급하는 것과 신 발전기술 개발에 중점을 둔 환경보호 기술이다. 이러한 주변 정세변화는 분산형전원이 도입된 배전계통에 대하여 고품질·고신뢰의 전기를 요구하고 있다.

우리나라에서는 배전용변전소 송출전압을 뱅크별로 일괄적으로 조정하고 있는데, 이는 각 배전선로의 부하특성을 무시하여 조정하므로 합리적이지 못할 뿐만 아니라, 고압배전선

로의 전압강하가 5%를 초과하는 장거리 배전선로의 전압강하를 주상변압기 탭만으로 보상을 하지 못하기 때문에 효율적인 전압관리가 미흡한 상태이다. 즉, 지금까지 배전계통의 전압관리는 배전용 변전소의 ULTC(Under Load Tap Changer)와 고압배전선로의 주상변압기에 의해 조정되어 왔으며, 최근에 고압배전선로의 전압강하가 5%를 초과하는 선로에 대하여 선로전압조정장치(SVR : Step Voltage Regulator)가 도입, 운용되고 있다. 그러나 배전용변전소 ULTC와 고압배전선로의 선로전압조정장치가 서로 독립적으로 운용되고 있기 때문에 선로전압조정장치의 효율성이 떨어지고 있는 실정이다. 한편, 부하를 악화와 전 지구적 환경문제에 대한 대책의 하나로써 풍력, 태양광, 연료전지와 같은 분산형전원이 배전계통에 도입되어 운용되고 있다. 이러한 배경 하에서, 가능한 많은 수용가에게 적절한 전압을 보내기위하여, 배전계통에서 새로운 최적 전압조정방안의 개발이 요구되고 있는 상황이다.

따라서 본 논문에서는 분산형전원이 도입된 배전계통에 대하여 배전용변전소의 ULTC와 선로전압조정장치의 효율적인 전압조정을 위한 최적 전압조정 알고리즘을 제시하고자 한다. 구체적으로 말하면, 2장에서는 분산형전원의 운전특성과 수용가 전압조건을 고려하기 위하여 기존의 LDC 수법의 통계적 해석에 기초한 전압조정방안을 제시하고, 3장에서는 quasi-Newton 반복법에 의해서 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치를 상호 협조하여 최적으로 운용하는 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 모델 계통과 실 부하 특성을 이용하여 기존의 여러 가지 전압조정 방안과 본 연구에서 제안한 방안을 비교하여, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 유효성을 확인한다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國技術教育大 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : dsrho@kut.ac.kr

\* 正會員 : 韓國技術教育大 研究員 · 碩士

\*\* 正會員 : 韓國技術教育大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正會員 : 忠北大 大學院 電氣工學科 碩士過程

§ 正會員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授 · 工博

§§ 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

接受日字 : 2005年 1月 20日

最終完了 : 2005年 3月 24日

## 2. 배전계통의 전압조정방안

### 2.1 최적 전압보상율

LDC 방식에 의한 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적인 분포가 되도록 전압조정요소(등가임피던스, 부하중심점 전압)를 구하는 것으로, 이 요소는 배전계통의 증가적인 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 배전용변전소 ULTC와 고압배전선로의 전압조정은 그림 1과 같다. 그러나 각각 다른 부하특성을 가진 피더나 부하 군들을 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 이용한다.

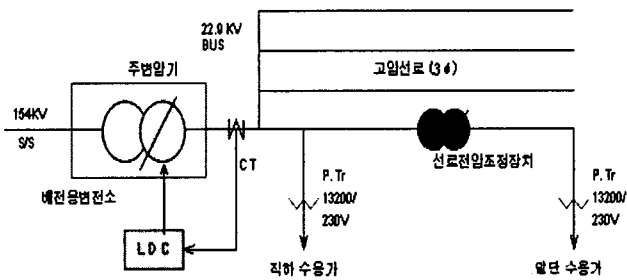


그림 1 고압배전선로의 전압조정방안 개념도  
Fig. 1 Voltage Regulation of Distribution Systems

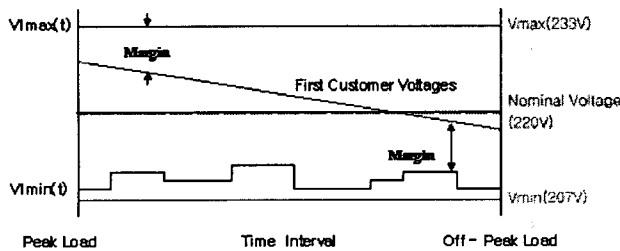


그림 2 최적 전압조정방안의 개념  
Fig. 2 Concept for the Optimal Voltage Regulation

송출전압의 결정문제는 그림 2와 같이 선택되어진 가장 가혹한 조건의 피더의 특정 지점(최대와 최소 전압 수용가)을 표준전압(220V)의 근방에 유지시키도록 최적 전압보상율을 구하는 것이 된다. 이 문제는 다음식과 같이, 증가적으로 배전용변전소 주변압기(M.tr) 측의 직하 수용가 전압과 규정전압의 상한치(233V), 하한치(207V)와의 차의 제곱을 최소화시키는 문제로 정식화시킬 수 있다.

$$\text{Min } J(t) = \{ V_{1\text{max}}(t) - V_1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} \}^2 + \{ V_1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} - V_{1\text{min}}(t) \}^2 \quad (1)$$

$$\text{Subj.to, } V_{1\text{max}}(t) = V_{\text{max}} \quad (2)$$

$$V_{1\text{min}}(t) = V_{\text{min}} \cdot V_1(t) / V_2(t) \quad (3)$$

여기서,  $t$  : 시간대,  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  : ULTC 직하 및 말단의 수용가전압,  $V_{1\text{max}}(t)$ ,  $V_{1\text{min}}(t)$  : ULTC 직하로 환산된 규정 전압의 상, 하한치,  $V_{\text{max}}$ ,  $V_{\text{min}}$  : 규정전압의 상한치, 하한치,  $R_{\text{mtr}}$  : ULTC의 전압보상율,  $X_{\text{mtr}}$  : ULTC의 최적 전압보상율

여기에서는 상기 문제의 간략화와 계산의 오차를 피하기 위하여, 배전용변전소 직하와 말단의 수용가전압이 고압배전선로의 전압강하에 의하여 비례적으로 변화한다는 사실에 주목하여, 말단의 수용가전압의 변동특성을 증가적으로 배전용변전소 직하의 값으로 환산하였다. 즉, 식 (2)와 (3)은 선로전압조정장치 직하 지점에서 바라본 새로운 규정전압의 상, 하한치를 나타낸 것으로, 상한치는 전압변동에 관계없이 일정하지만, 하한치는 직하에서 말단까지의 전압강하에 의하여, 시간과 함께 변화하는 특성을 가지고 있다.

따라서 식 (1)의 최소화 조건( $dJ/dX_{\text{mtr}} = 0$ )에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율은 다음식과 같이 구해진다.

$$X_{\text{mtr}} = R_{\text{mtr}} \cdot \{ V_{1\text{max}}(t) - V_{1\text{min}}(t) \}^2 / 2V_1(t) \quad (4)$$

### 2.2 최적 전압조정요소

배전용변전소의 이상적인 최적 송출전압과 총 부하전류와의 상관관계는 그림 3과 같이 시간과 함께 변화하는 비선형적인 상관관계 특성을 가지고 있다. 그러나 LDC의 전압조정 요소는 한번 정해지면 일정기간 같은 값으로 운용되기 때문에, 최적 송출전압은 식 (5)와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다. 따라서 전압조정요소의 결정문제는 이상적인 최적송출전압분포의 편차를 최소화하도록 식 (5)의 계수를 구하는 문제로 되어 최소자승법에 의해 식 (6)과 같이 정식화할 수 있다.

$$V_{\text{opt}}(t) = V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}(t) \quad (5)$$

$$\text{Min } q = \sum_{t=1}^T \{ V_{\text{opt}}(t) - (V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}(t)) \}^2 \quad (6)$$

여기서,  $T$  : 전체 시간대,  $V_{\text{opt}}(t)$  :  $X_{\text{mtr}}$ 에 의한 최적 송출전압,  $V_{\text{ce}}$  : 부하중심점의 전압,  $Z_{\text{eq}}$  : 등가임피던스,  $I_{\text{to}}(t)$  : ULTC를 통과하는 총 부하전류

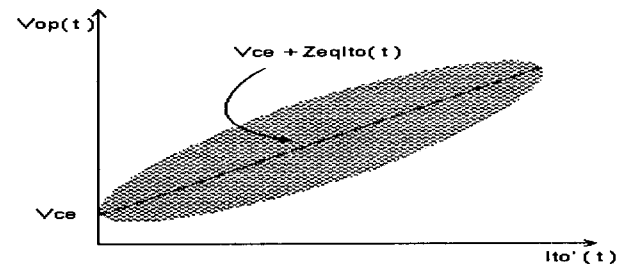


그림 3 최적 송출전압의 분포 특성  
Fig. 3 Distribution Characteristics of Optimal Sending Voltage

식 (6)을 최소화( $\partial q / \partial Z_{\text{eq}} + \partial q / \partial V_{\text{ce}} = 0$ )하여, 전체

고찰기간의 최적 전압조정요소(\$Z\_{eq}\$, \$V\_{ce}\$)를 구하면 다음식과 같다.

$$Z_{eq} = \left\{ \sum_{t=1}^T I_{to}(t) \cdot \sum_{t=1}^T V_{op}(t) - T \cdot \sum_{t=1}^T I_{to}(t) \cdot V_{op}(t) \right\} / \left\{ \left( \sum_{t=1}^T I_{to}(t) \right)^2 - T \cdot \sum_{t=1}^T I_{to}(t)^2 \right\} \quad (7)$$

$$V_{ce} = \left\{ \sum_{t=1}^T I_{to}(t) \cdot V_{op}(t) - Z_{eq} \cdot \sum_{t=1}^T I_{to}(t) \right\} / T \quad (8)$$

### 3. 배전용변전소의 ULTC와 선로전압조정장치의 최적 전압조정방안

방사상 배전계통에서, 선로전압조정장치(SVR)는 그림 4와 같이 전압강하를 보상하기 위하여 장거리 고압피드에 직렬로 연결되어 운용된다. 이러한 경우, 수용가 전압은 배전용변전소 ULTC에 의해서 우선 조정되고, 다음에 고압 배전선로 상의 선로전압조정장치에 의해서 조정된다. 그러나 배전용변전소 ULTC의 전압보상은 배전용변전소 측뿐만 아니라 선로전압조정장치 측의 수용가 전압에도 영향을 준다. 그러므로 가능한 많은 수용가에게 적절한 전압을 공급하기 위해서는 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치 사이에 상호협조를 이루며 합리적으로 전압보상을 분담하도록 해야 하므로 상호간의 최적 전압조정방안이 요구된다.

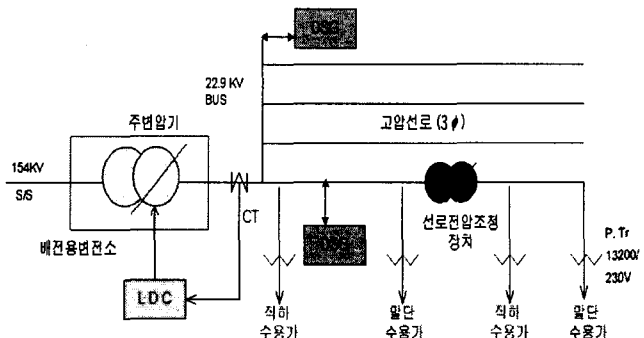


그림 4 분산형전원이 도입된 배전계통 전압조정방안 개념도  
Fig. 4 Voltage Regulation of Distribution System with DSG

#### 3.1 최적 협조방안

이제, 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치의 조정에 의해서 어떻게 수용가 전압 분포를 규정전압에 가깝도록 유지하느냐가 문제이다. 2장의 배전용변전소측의 수용가 전압 조건에 관계된 방정식을 고려하여 식 (9)~(14)와 같이 목적 함수를 확장할 수 있다.

즉 선로전압조정장치의 직하전압 \$V\_3(t)\$는 배전용변전소에서 공급하는 고압배전선로와 선로전압조정장치의 내부 전압강하 분을 고려하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{drop}(t) = \left\{ V_1(t) \cdot P_{tap1} - V_3(t) \cdot P_{tap3} \cdot V_{tap} / (V_n \cdot R_{vr}) \right\} \quad (9)$$

$$V_3(t) = \left\{ V_1(t) \cdot P_{tap1} - V_{drop}(t) \right\} \cdot V_n \cdot R_{vr} / (V_{tap} \cdot P_{tap3}) \quad (10)$$

$$V_{3X}(t) = \left\{ (V_3(t) \cdot X_{vr} / R_{vr}) - V_1(t) \cdot P_{tap} \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1) \cdot X_{vr} \cdot V_n / V_{tap} \right\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } J(t) = & \left\{ V_{1max}(t) - V_1(t) \cdot X_{mtr} / R_{mtr} \right\}^2 \\ & + \left\{ V_1(t) \cdot X_{mtr} / R_{mtr} - V_{1min}(t) \right\}^2 \\ & + \left\{ V_{3max}(t) - V_3(t) \cdot X_{vr} / R_{vr} - V_1(t) \cdot X_{vr} \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1) \cdot P_{tap} \cdot V_n / V_{tap} \right\}^2 \\ & + \left\{ V_3(t) \cdot X_{vr} / R_{vr} + V_1(t) \cdot X_{vr} \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1) \cdot P_{tap} \cdot V_n / V_{tap} - V_{3min}(t) \right\}^2 \\ & + k (X_{mtr} - X_{vr})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{Subj.to, } V_{3max}(t) = V_{max} \quad (13)$$

$$V_{3min}(t) = V_{min} \cdot V_3(t) / V_4(t) \quad (14)$$

여기서, \$V\_{drop}(t)\$ : 고압배전선로와 SVR의 내부 전압강하, \$V\_1(t)\$, \$V\_2(t)\$ : ULTC 직하, 말단의 수용가전압, \$V\_3(t)\$, \$V\_4(t)\$ : SVR 직하, 말단의 수용가전압, \$V\_{3max}(t)\$ : SVR 직하로 환산된 허용 전압의 상한치, \$V\_{3min}(t)\$ : SVR 직하로 환산된 허용 전압의 하한치, \$V\_{3X}(t)\$ : 최적 전압보상율이 적용된 \$V\_3(t)\$, \$R\_{mtr}\$, \$X\_{mtr}\$ : ULTC의 전압보상율, 최적 전압보상율, \$R\_{vr}\$, \$X\_{vr}\$ : SVR의 전압보상율, 최적 전압보상율, \$V\_n\$, \$V\_{tap}\$ : SVR의 정격전압, SVR의 탭전압, \$P\_{tap1}\$ : ULTC 직하의 주상변압기 탭전압, \$P\_{tap3}\$ : SVR 직하의 주상변압기 탭전압, \$P\_{tap}\$ : 주상변압기 탭 비율(= \$P\_{tap1} / P\_{tap3}\$), \$K\$ : 무게상수

이 목적함수는 배전용변전소와 선로전압조정장치 측의 직하 수용가 전압이 상, 하한치로부터 최대 여유를 가지고 그것들의 값이 규정전압에 근접하게 유지되는 것을 의미한다. 식 (12)에서 첫 번째와 두 번째 항목은 배전용변전소 측 수용가 전압이 배전용변전소 ULTC만의 조정에 의해서 적당한 전압을 유지함을 나타내며, 세 번째와 네 번째 항목은 선로전압조정장치 측의 수용가 전압이 선로전압조정장치의 조정에 의해 적당한 전압을 유지함을 나타낸다. 이 항목은 식 (9)의 배전용변전소에서 공급하는 고압배전선로와 선로전압조정장치 측의 내부 전압강하 분을 고려한 직하 수용가 전압 관계로부터 유도된다. 다섯 번째 항목은 탭 변화 횟수를 줄이기 위한 배전용변전소와 선로전압조정장치 사이의 조정 레벨이다. 식 (12)에서 \$K\$는 전압조정장치 간의 협조를 요구하는 정도에 따라 정하는 상수로서 전압 레벨을 감안하여 정한다.

따라서 목적함수 식 (12)가 최소가 되기 위한 조건은 다음 식과 같다.

$$\nabla J = \begin{pmatrix} \partial J / \partial X_{mtr} \\ \partial J / \partial X_{vr} \end{pmatrix} = 0 \quad (15)$$

여기서, \$\nabla J\$ : \$X\_{mtr}\$과 \$X\_{vr}\$에 대한 \$J\$의 편미분한 구배벡터

식 (15)의 행렬 요소는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \partial J / \partial X_{mtr} = & \left\{ 2.0 \cdot V_1(t) / R_{mtr} \cdot (2.0 \cdot V_1(t) \cdot X_{mtr} / R_{mtr} - V_{1max}(t) - V_{1min}(t)) \right\} + \\ & \left\{ 2.0 \cdot V_1(t) \cdot X_{vr} \cdot V_n / (R_{mtr} \cdot V_{tap}) \cdot \right. \end{aligned}$$

$$(2.0 \cdot V1(t) \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1.0) \cdot X_{vr} \cdot V_n / V_{tap} + 2.0 \cdot V3(t) \cdot X_{vr} / R_{vr} - V3_{max}(t) - V3_{min}(t)) + \{2.0 \cdot K \cdot (X_{mtr} - X_{vr})\} \quad (16)$$

$$\partial J / \partial X_{vr} = \{2.0 \cdot (V3(t) / R_{vr} + V1(t) \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1.0) \cdot (V_n / V_{tap})) \cdot (2.0 \cdot X_{vr} \cdot V1(t) \cdot (V_n / V_{tap}) \cdot (X_{mtr} / R_{mtr} - 1.0) - V3_{max}(t) - V3_{min}(t) + 2.0 \cdot V3(t) \cdot X_{vr} / R_{vr})\} + \{2.0 \cdot K \cdot (X_{vr} - X_{mtr})\} \quad (17)$$

반복 계산하는 알고리즘은 다음식과 같다.

$$\begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(K+1)} = \begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(K)} + (B^{(K)})^{-1} \cdot (\nabla J) \quad (18)$$

따라서, 상기 목적함수 식 (15)의 최소화 조건에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율이 구해진다. 식 (15)의 비선형 목적함수의 최소화 문제는 반복법이 일반적으로 사용되는데 적당한 초기값을 제공함에 의해 최적 해에 수렴한다. 본 논문은 quasi-Newton법을 사용하였고, 최적해 산정 과정은 그림 5의 Flowchart와 같다.

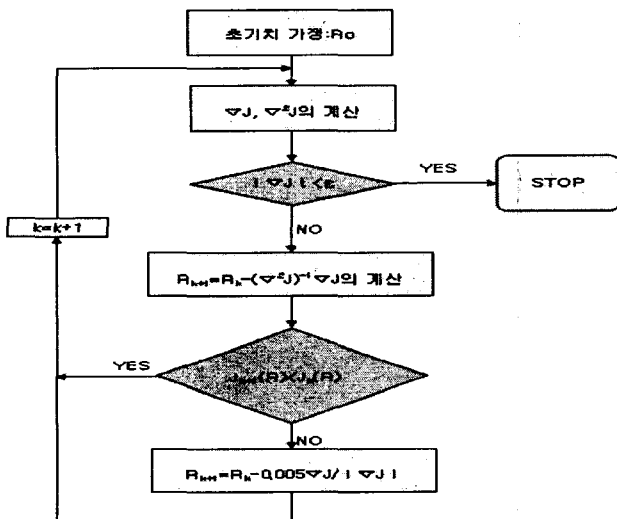


그림 5 최적 전압보상율 산정을 위한 플로우차트  
Fig. 5 Flow Chart for Optimal Voltage Compensation Rate calculation .

### 3.2 분산형전원의 운용방안

분산형전원은 수용가가 스스로 전력을 생산, 소비하는 배전계통에 도입되지 않는 경우와 배전계통에 도입되어 태양광 발전 및 풍력발전처럼 국부적 피크부하를 관리하기 위하여 방전만 하는 경우와 전지처럼 오프 피크 시 충전하여 피크 시 방전하는 두 가지 경우가 있다.

분산형전원의 공급형태는 분산형전원 운용 특성상 다음의 3가지 형태를 고려할 수 있다.

- 분산형전원이 도입되지 않는 경우
- 분산형전원이 방전(9~16시대)만 하는 경우

- 분산형전원이 충전(1~8시간), 방전(9~16시간)하는 경우

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

배전용변전소의 ULTC와 선로전압조정장치의 최적 협조 알고리즘을 분산형전원이 도입된 모델 배전계통에 대하여 시뮬레이션을 수행한다.

### 4.1 평가 방법

각 수법의 유효성을 비교하기 위해 두 가지 방법을 사용하여 평가한다. 하나는 평가지표를 사용하고, 다른 하나는 ULTC와 SVR의 탭 동작횟수를 비교한다.

#### (1) 평가지표의 정의

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

$$PI = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \{V1(t, k) - Vstd\}^2 + \{Vstd - V2(t, k)\}^2 \quad (19)$$

여기서, T : 전체 고찰기간, K : 노드의 총수, Vstd : 표준전압 (220V), V1(t, k) : 각 노드직하의 수용가전압, V2(t, k) : 각 노드상단의 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) ULTC의 Tap 총 동작횟수의 정의

배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치의 탭 동작은 기계적인 동작을 수행하여 수명에 큰 영향을 미치기 때문에 가능한 탭 동작횟수가 적을수록 유리하다. 현재 주류로 되고 있는 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치는 17개 탭이 며, 탭 간격은 1.25%(±10% 전압보상)가 표준이고 불감대폭은 50%를 기준으로 한다. 여기서는 지연시간은 고려하지 않고, 초기 탭 위치를 9번 탭(22,900V)으로 하고 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치의 탭 동작횟수를 각 수법에 따라 비교하여 그 수법의 우수성을 평가한다. 탭 위치 결정은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Tap \ Position = (V_{send} - V_n) / (T_{int} \times V_n) + T_s \quad (20)$$

여기서, V<sub>send</sub> : 최적 전압보상율에 의한 송출전압, V<sub>n</sub> : 표준전압(22,900V), T<sub>s</sub> : 기준 탭 번호(9), T<sub>int</sub> : 탭 간격 (1.25%)

### 4.2 시뮬레이션에 사용된 송출전압 조정방식

- ① 방식1 (LDC+Fixed(SVR) Method) : 배전용변전소의 송출전압은 LDC 방식으로 조정하고 선로전압조정장치의 송출전압은 22,900V로 고정시켜 송출하는 방식
- ② 방식2 (LDC+Programmed(SVR) Method) : 변전소의 송출전압은 LDC 방식으로 조정하고 선로전압조정장치의 송출전압은 프로그램 방식으로 조정하는 방식
- ③ 방식3 (LDC+LDC(SVR) Method) : 배전용변전소와 선로전압조정장치의 송출전압을 각각 독립적으로 LDC 방식으로 조정하는 방식
- ④ 방식4 (Proposed Method) : 본 연구 제안 방식으로서 배전용변전소와 선로전압조정장치의 송출전압을 상호 협조하여 운용하는 방식

### 4.3 모델계통과 제 조건

- ① 모델계통은 그림 6과 같으며, 고압배전선로의 구간데이터는 표 1과 같다.
- ② 배전용변전소의 일 부하 패턴은 그림 7과 같이 45MW의 피크부하를 기준으로 오프 피크 부하는 1~8시간대, 피크 부하는 9~16시간대, 미들 부하는 17~24시간대로 한다.
- ③ 역률은 0.9를 적용한다.
- ④ 저압 측의 전압강하 배분은 주상변압기와 인입선, 저압선로의 최대 전압강하를 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.
- ⑤ 고압배전선로의 전압강하를 계산하기 위하여, 가우스 사이델법(Gauss-Seidel Method)을 조류계산법으로 이용한다.
- ⑥ 선로전압조정장치의 설치지점은 그림 6의 10번 지점으로 상정하였으며, 운용패턴은 위의 방식 4가지를 비교한다.
- ⑦ 분산형전원의 도입량은 2가지 경우로 가정한다. 먼저 피크부하의 5%로 7, 8, 9 노드에 각각 750(Kw) 공급하는 경우와 피크부하의 10%로 1500(Kw) 공급하는 경우를 상정한다.

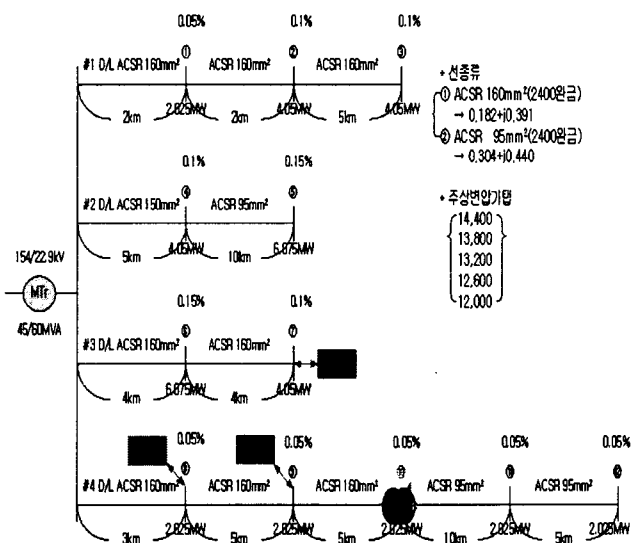


그림 6 분산형전원이 도입된 모델 배전계통  
Fig. 6 Model Distribution Systems with DSG

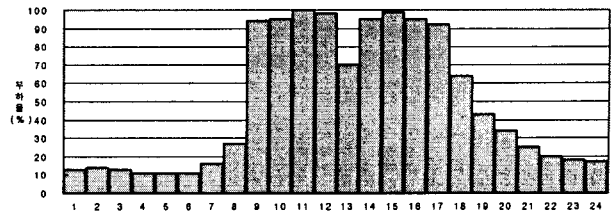


그림 7 모델계통의 일부하 곡선  
Fig. 7 Daily Load Curve of Model System

표 1 모델계통 구간데이터  
Table 1 Section Data for Model System

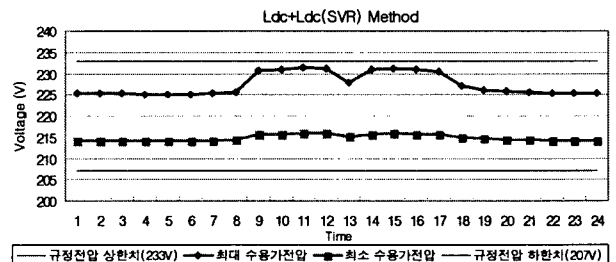
Feedert Number	Section Number	Node Number		Impedance		Length (km)	Pole Tr Tap	Load (%)	DSG (KW)
		From	To	R (Ω/km)	X (Ω/km)				
1	1	0	1	0.182	0.391	2.0	22900/230	5%	0
	2	1	2	0.182	0.391	2.0	22900/230	10%	0
	3	2	3	0.182	0.391	5.0	22900/230	10%	0
2	4	0	4	0.182	0.391	5.0	22900/230	10%	0
	5	4	5	0.304	0.440	10.0	21800/230	15%	0
3	6	0	6	0.182	0.391	4.0	22900/230	15%	0
	7	6	7	0.182	0.391	4.0	22900/230	10%	750
4	8	0	8	0.182	0.391	3.0	22900/230	5%	750
	9	8	9	0.182	0.391	5.0	22900/230	5%	750
	10	9	10	0.182	0.391	5.0	22900/230	5%	0
	11	10	11	0.304	0.440	10.0	21800/230	5%	0
	12	11	12	0.304	0.440	5.0	21800/230	5%	0

### 4.4 시뮬레이션 결과

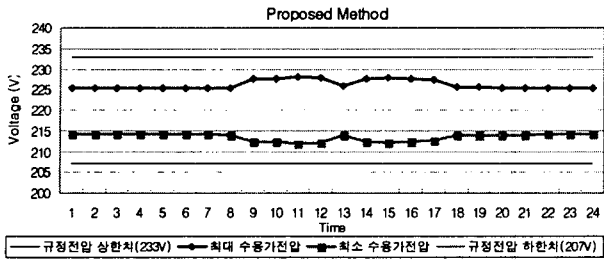
분산형전원이 도입된 배전계통에서 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치에 대해 기존의 전압조정방안과 본 연구에서 제안한 방안에 대한 평가지수를 비교한다. 상기의 4가지 전압조정 방안을 비교해 본 결과, 본 연구에서 제안한 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치를 상호 협조하여 운용하는 최적 전압조정 알고리즘을 이용한 방식 4가 가장 우수함을 확인 할 수 있었다.

#### (1) 분산형전원이 도입되지 않는 경우

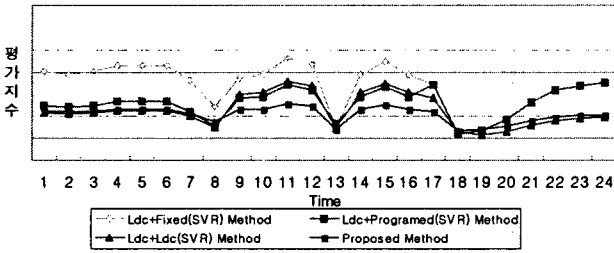
분산형전원이 도입되지 않은 모델계통에 대하여, 그림 8 (a)는 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치가 독립적으로 운용하는 수법(방식 3)에 의한 전압분포이고, (b)는 제안한 수법(방식 4)에 의한 전압분포이며, (c)는 각 수법(방식 1~방식 4)의 평가지표를 보여준다. 제안한 방법에 의한 전압분포가 규정전압에 더 가깝게 유지되고, 평가지표도 더욱 우수함을 알 수 있다.



(a)



(b)

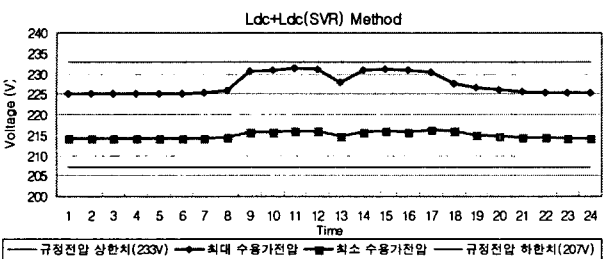


(c)

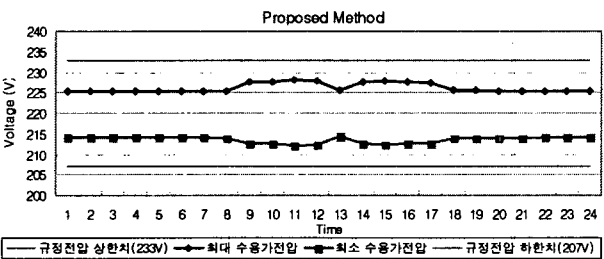
그림 8 각 방식의 수용가 전압특성 및 평가지표  
Fig. 8 The Customer Voltage Characteristic and Performance Index by Methods

(2) 분산형전원이 방전만 하는 경우(4,500Kw)

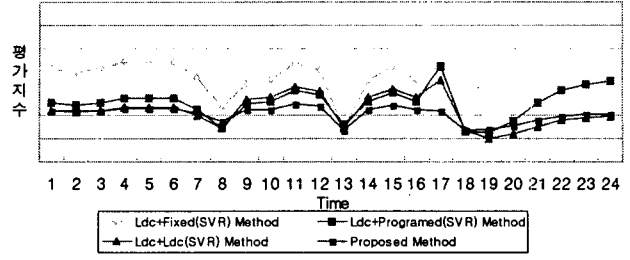
분산형전원이 9~16시간대에 7, 8, 9 노드에서 각각 1,500Kw씩 방전하는 모델계통에 대하여, 그림 9 (a)는 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치가 독립적으로 운영하는 수법(방식 3)에 의한 전압분포이고, (b)는 제안한 수법(방식 4)에 의한 전압분포이며, (c)는 각 수법(방식 1~방식 4)의 평가지표를 보여준다. 제안한 방법에 의한 전압분포가 규정전압에 더 가깝게 유지되고, 평가지표도 더욱 우수함을 알 수 있다.



(a)



(b)

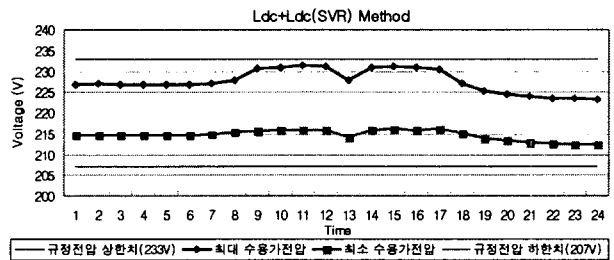


(c)

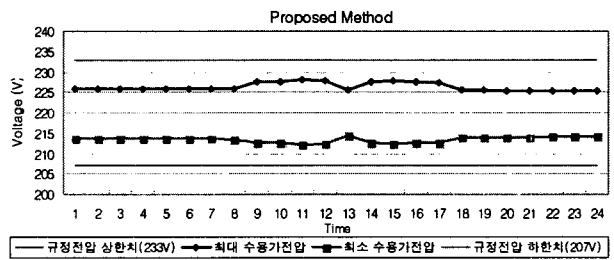
그림 9 각 방식의 수용가 전압특성 및 평가지표  
Fig. 9 The Customer Voltage Characteristic and Performance Index by Methods

(3) 분산형전원이 충/방전하는 경우(4,500Kw)

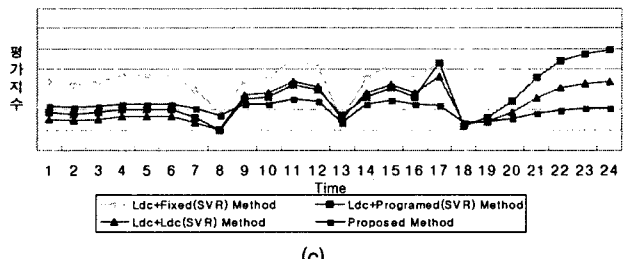
분산형전원이 7, 8, 9 노드에서 각각 1,500Kw씩 1~8시간대에 충전하고 9~16시간대에 방전하는 모델계통에 대하여, 그림 10 (a)는 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치가 독립적으로 운영하는 수법(방식 3)에 의한 전압분포이고, (b)는 제안한 수법(방식 4)에 의한 전압분포이며, (c)는 각 수법(방식 1~방식 4)의 평가지표를 보여준다. 제안한 방법에 의한 전압분포가 규정전압에 더 가깝게 유지되고, 평가지표도 더욱 우수함을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 10 각 방식의 수용가 전압특성 및 평가지표  
Fig. 10 The Customer Voltage Characteristic and Performance Index by Methods

4.4 시뮬레이션 평가

분산형전원의 공급형태에 따른 각 수법의 평가지수를 비교해 보면 표 2와 같다. 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치를 상호 협조하여 운용하는 경우가 가장 우수하며 분산형전원이 도입되어도 전체적으로 규정전압에 가깝게 유지됨을 알 수 있다.

표 2 각 방식의 평가지표 합계 비교

Table 2 The Comparison of Performance Index by Methods

DSG 도입량	DSG 공급형태	Ldc+ Fixed Method	Ldc+ Programed Method	Ldc+Ldc Method	Proposed Method
2,250 kW	zero	16331.3	12559.5	10953.3	10064.4
	방전	16205.0	12433.1	10826.9	10040.4
	충방전	16234.6	12462.7	10856.5	9988.3
4,500 kW	zero	16331.3	12559.5	10953.3	10064.4
	방전	16111.9	12340.0	10733.8	9982.3
	충방전	16305.3	12533.4	10927.2	9891.0

또한, 각 수법의 ULTC 탭 총 동작횟수는 표 3과 같다. 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치를 상호 협조하여 운용하는 경우와 기존 수법들을 비교해 보면, 배전용변전소 ULTC 탭 총 동작횟수는 약간의 변동만 있으나 선로전압조정장치 탭 총 동작횟수는 현격히 감소됨을 알 수 있다. 그리고 그림 11의 각 방식에 다른 시간대별 탭 위치를 보면 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치 간의 협조가 잘 되고 있음을 확인할 수 있다.

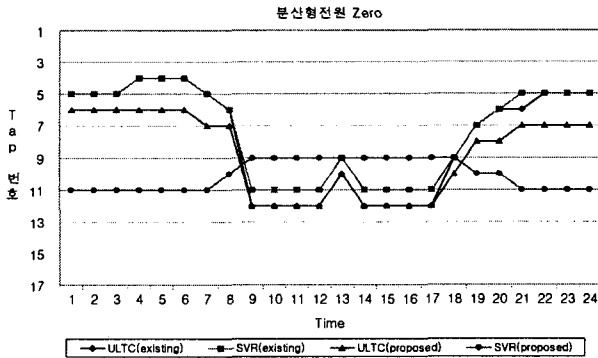


그림 11 각 방식의 시간대별 탭 위치  
Fig. 11 The Tap Position by Each Methods

그리고 고압배전선로에 선로전압조정장치가 도입이 되면 배전용변전소와 협조운용을 하는 경우와 협조운용을 하지 않은 경우의 LDC 값은 표 4와 같다.

5. 결론

배전시스템의 전력품질에 대한 요구와 필요성이 증대되고 있는 가운데, 간단하고, 신뢰성 있으며, 경제적으로 전압품질을 향상시킬 수 있는 선로전압조정장치(SVR, PVR)가 도입되고 있으며, 앞으로도 수요가 더욱더 늘어나리라 예상된다. 하지

표 3 각 방식의 ULTC 탭 총 동작횟수

Table 3 Total Tap Changing Number by Each Methods

DSG (Kw)	DSG 공급형태	ULTC tap (50%)	SVR tap (50%)
2,250	zero (existing)	24	18
	zero (proposed)	22	6
	방전 (existing)	24	18
	방전 (proposed)	22	6
	충방전 (existing)	22	18
	충방전 (proposed)	22	6
4,500	zero (existing)	24	18
	zero (proposed)	22	6
	방전 (existing)	24	18
	방전 (proposed)	22	6
	충방전 (existing)	22	18
	충방전 (proposed)	20	6

표 4 최적전압조정방안의 LDC 값

Table 4 LDC Value for Optimal Voltage Regulation

DSG (Kw)	DSG	Ldc+Ldc Method		Proposed Method	
		Zeq[Ω]	Vce[V]	Zeq[Ω]	Vce[V]
2,250	zero	2.0472	21270.0700	1.7500	21318.3598
	방전	2.1167	21253.1840	1.8106	21303.7153
	충방전	2.2256	21134.9888	1.8980	21206.9473
4,500	zero	2.0472	21270.0700	1.7500	21318.3598
	방전	2.1869	21237.0905	1.8922	21284.5535
	충방전	2.4193	20982.7391	2.0816	21073.2418

만 배전용변전소와 상호 협조를 이루며 합리적으로 전압보상을 분담하지 못하면 선로전압장치의 효율성을 충분히 달성하리라고 보기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배전용변전소의 ULTC와 선로전압조정장치(SVR, PVR)의 협조를 이루어 최적으로 전압을 조정하는 방안을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 배전시스템의 최적 전압조정을 위해, 배전용변전소 ULTC와 선로 전압조정장치를 협조 운용하는 최적 전압조정 알고리즘을 제시하였다.
- (2) 배전시스템의 최적 전압조정을 위해 제안된 수법이 기존의 수법에 비해 평가지수가 우수하여 규정전압에 더 가깝게 유지됨을 알 수 있었고, 양질의 수송가 전압 공급에 도움이 됨을 확인하였다.
- (3) 전압조정장치 탭 동작횟수를 비교한 결과, 제안된 수법이 ULTC 탭 동작횟수를 약간 감소시키고 선로전압조정장치의 탭 동작횟수를 현격히 감소시킴을 확인하였다. 또한 시간대별 탭 위치 변동 폭도 더 완만함을 확인하였다.
- (4) 배전시스템에 특성이 다른 분산형전원이 도입되어도 제안한 알고리즘이 유효함을 확인할 수 있었다.
- (5) 무계상수 K값은 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정장치의 협조정도를 나타내는 것으로 협조를 강하게 하려면 값을 크게 하면 되고, 그렇게 할수록 평가지수는 우수함을 확인할 수 있었다.
- (6) 시간대별 탭 위치를 살펴보면 배전용변전소 ULTC가 부하에 따라 충분히 전압보상을 하기 때문에 선로전압조정장

치는 상대적으로 피크부하 시에 탭이 낮아지고 경부하시에 탭이 올라간다. 따라서 배전용변전소 ULTC와 선로전압조정 장치의 상호협조가 효과적으로 이루어짐을 확인하였다.

**감사의 글**

이 논문은 2004년도 에너지기술 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

**참 고 문 헌**

- [1] “배전전압관리 개선에 관한 연구” 산업자원부, 2004.4
- [2] “전압관리 메뉴얼” 일본 북해도전력(주), 2000.6
- [3] 김태웅, 김재언, “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 추계학술대회 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] 이은미, 김미영, 노대석, 손상욱, 김재언, 박창호, “고압배전선로용 선로전압조정장치(SVR)의 최적 도입방안에 관한 연구” 대한전기학회지A, Vol. 53A No11, 2004. 11
- [11] 김미영, 노대석, “분산형전원이 도입된 배전계통의 최적전압조정 방안에 관한 연구” 대한전기학회 전력기술부분회 추계학술대회 논문집, 2004
- [11] “고유연·고신뢰·고효율 전기에너지 유통시스템 개발에 관한 기초연구” 한국전기연구소, 1998
- [12] 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**



**김 미 영 (金 美 映)**

1971년 8월 5일생. 1994년 충북대학교 물리학과 졸업. 2003년 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 석사.  
Tel : 041-560-1169  
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(공학박). 1987년~1998년 한국전기연구소 선임연구원 근무. 1999~현재 한국기술교육대 학교 정보기술공학부 전기전공 부교수. 케이피파워텍 대표이사  
Tel : 041-560-1167  
E-mail : dsrho@kut.ac.kr



**오 용 택 (吳 龍 澤)**

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 ~ 1991년 한전 정보처리처 과장. 1991년 ~ 1996년 한국기술교육대학교 조교수. 1996년 ~ 현재 전기공학과 교수.  
Tel : 041-560-1161  
E-mail : ytoh@kut.ac.kr



**안 재 운 (安 在 閔)**

1976년 3월 22일생. 2004년 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학 중.  
Tel : 043-261-2423  
E-mail : jyan@chungbuk.ac.kr



**김 재 언 (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(공학박). 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. 현재, 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기공학전공 부교수.  
Tel : 043-261-2423  
E-mail : jekim@chungbuk.ac.kr



**김 응 상 (金 應 相)**

1962년 6월 21일생. 1988년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 한국전기연구원 입소. 태양광발전 풍력발전 등 분산형전원 계통연계기술 분야에 연구. 현재, 한국전기연구원 신전력시스템 그룹 책임연구원.  
Tel : 051-280-1330,  
E-mail : eskim@keri.re.kr