

# 분산전원이 연계된 배전계통에서 ULTC와 분산전원의 전압제어

논문

60-12-5

## Voltage Control of ULTC and Distributed Generations in Distribution System

전재근\* · 원동준† · 김태현\*\*  
(Jae-Geun Jeon · Dong-Jun Won · Tae-Hyun Kim)

**Abstract** - LDC(Line Drop Compensation) is widely used in controlling ULTC(Under Load Tap Changer) output voltage at distribution substation. However, LDC may experience some difficulties in voltage control due to renewable energy resources and distributed generations. Therefore, more advanced voltage control algorithm is necessary to deal with these problems. In this paper, a modified voltage control algorithm for ULTC and DG is suggested. ULTC is operated with the voltages measured at various points in distribution system and prevents overvoltage and undervoltage in the distribution feeders. Reactive power controller in DG compensates the voltage drop in each distribution feeders. By these algorithms, the voltage unbalance between feeders and voltage limit violation will be reduced and the voltage profile in each feeder will become more flat.

**Key Words** : Under load tap changer(ULTC), Distributed generation(DG), Distribution system, Line drop compensation(LDC), Reactive power, Voltage control

### 1. 서론

배전계통으로부터 전력을 공급받는 일반 수용가의 전압은 시간대별로 다르게 되는데 최근 고도 정밀기기의 보급 확산으로 공급전압의 질에 대한 사회적 관심과 중요성이 대두됨에 따라, 일반 수용가에 적절한 전압의 전력을 공급하기 위한 많은 노력들이 요구되고 있다. 전력회사는 일반 수용가의 공급전압을 적정한 허용 범위 내에서 유지함은 물론 매년 그 적정전압 유지율을 개선하기 위해 다양한 전압관리 개선책을 계획, 실행하고 있다.

최근 증가하는 분산전원 출력으로 인해 배전선로에 흐르는 전력의 크기 및 방향 변화를 예측하기 힘들어지고, 전압조정 또한 문제가 발생할 수 있다. 배전계통 선로의 R/X 비율은 송전단에서의 R/X 비율보다 상당히 크기 때문에 유효전력 또한 전압변동에 많은 영향을 준다.

현재 배전계통에서는 배전용 변전소의 송출전압 조정, 주상변압기 및 무효전력 보상장치를 이용한 전압제어를 실시하고 있지만 분산전원의 증가에 대비한 전압운용과 협조제어 알고리즘 등의 전압제어 대책은 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 분산전원의 증가로 발생할 수 있는 배전계통 피더간의 전압 불균형문제와 일부 노드에서 규정전압을 벗어나는 상황에 효과적으로 대응하기 위해서, 향상된 ULTC 전압조정 방식과 분산전원 스스로 선로의 무효전

력 조정을 통해 배전선로에서의 전압강하를 보상하는 방법을 제안하였다.

본문에서는 배전계통에서 유·무효전력의 변화에 따른 전압변동을 정식화하고, 분산전원 연계시 기존 LDC방식의 문제점을 분석하며 ULTC와 DG의 새로운 전압제어 방식을 제안하였다. 마지막으로 제안된 전압제어 방식을 PSCAD/EMTDC로 모의함으로써 분산전원이 포함된 배전계통에서 전압제어 성능이 향상됨을 검증하였다.

### 2. 분산전원 출력에 따른 배전계통의 전압변동 분석

#### 2.1 유효전력 변화에 따른 전압변동

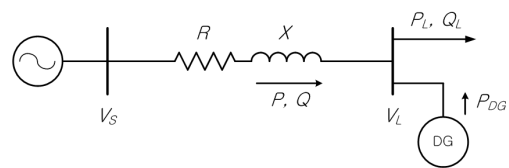


그림 1 분산전원을 포함한 간략화된 배전계통  
Fig. 1 Simplified distribution system with DG

그림 1에서  $V_S$ 는 송전단 전압,  $V_L$ 는 수신단 전압,  $R+jX$ 는 선로 임피던스를 나타낸다. 이때 송전단 전압  $V_S$ 와 수신단 전압  $V_L$ 사이의 전압차이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{V_S} = \overline{V_L} + (R+jX) \left( \frac{P-jQ}{\overline{V_L}} \right) \quad (1)$$

여기서  $P=(P_L-P_{DG})$ ,  $Q=Q_L$  이고,  $\overline{V_L}^*$ 은  $\overline{V_L}$ 의 켈레 복

\* 정 회 원 : 인하대학교 대학원

† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학부 조교수,

E-mail : djwon@inha.ac.kr

\*\* 정 회 원 : 명지전문대학 전기과 부교수

접수일자 : 2011년 10월 21일

최종완료 : 2011년 11월 24일

소수이다.  $\overline{V}_L = V_L \angle 0^\circ$  라고 하면 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{V}_S = V_L + \frac{RP + XQ}{V_L} + j \frac{XP - RQ}{V_L} \quad (2)$$

배전선로의 선로정수가  $R \approx X$ 일 경우와  $R$ 값이  $X$ 값보다 큰 경우 허수부분은 비교적 작은 값이 된다[1]. 특히, 식 (2)의 경우 실수부분이 허수 부분에 비해 매우 크기 때문에 실수 부분만 고려할 수 있고 식 (2)는 근사화 하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_S \approx V_L + \frac{RP + XQ}{V_L} \quad (3)$$

특히 변압기의 캐패시터와 캐패시터 뱅크 등 무효전력 보상장치를 통해 무효전력을 0에 가깝게 즉,  $Q \approx 0$ 으로 제어할 한다면, 식 (3)은 다음과 같이 간략화 된다[2].

$$V_L \approx V_S - \frac{R(P_L - P_{DG})}{V_L} \quad (4)$$

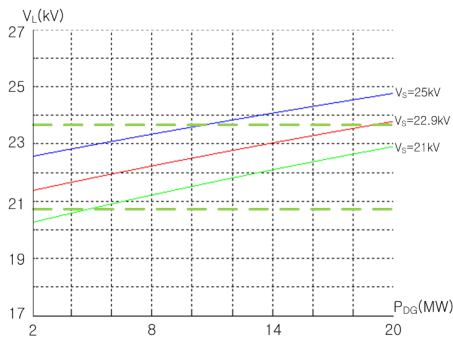


그림 2  $P_{DG}$ 의 변화에 따른  $V_L$ 의 변화 ( $R=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $X=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $P_L=13\text{MW}$ )

Fig. 2 Load voltage  $V_L$  according to  $P_{DG}$  changes ( $R=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $X=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $P_L=13\text{MW}$ )

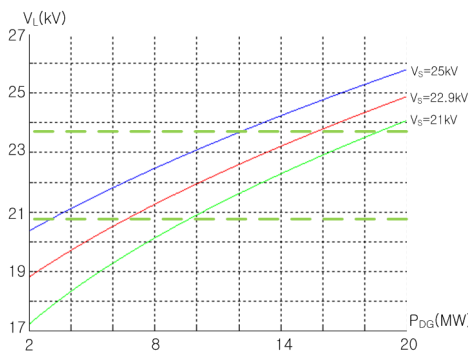


그림 3  $P_{DG}$ 의 변화에 따른  $V_L$ 의 변화 : R/X 비가 더 높은 경우 ( $R=0.7\Omega/\text{km}$ ,  $X=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $P_L=13\text{MW}$ )

Fig. 3 Load voltage  $V_L$  according to  $P_{DG}$  changes : with higher R/X ratio ( $R=0.7\Omega/\text{km}$ ,  $X=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $P_L=13\text{MW}$ )

식 (4)를 이용하여 분산전원 출력 변화에 의한  $V_L$ 의 변화를 그래프로 나타내었다. 그림 2와 그림 3에서  $P_{DG}$ 의 출력은 2MW에서 20MW까지 변화, 부하  $P_L$ 은 13MW인 역률 1의 유효전력 부하, 송전단과 수신단과의 거리는 10km로 가정하였다. 그림 2와 그림 3을 비교해보면 R/X 비율이 클수록 유효전력흐름의 변화에 따른 전압변동이 커짐을 확인할 수 있다. 또한 분산전원의 출력이 부하량(13MW)을 넘어설 때는 역조류가 발생하게 되는데 송출전압이 높은 상황에서는 자칫 과전압이 발생할 우려가 있다[3]. 이와 같이 배전계통에서는 분산전원의 유효전력 출력으로 인하여 전압 변동이 심화될 수 있기 때문에 이를 고려한 적절한 전압제어 방안이 필요하게 된다.

### 2.2 무효전력 변화에 따른 전압변동

식 (3)을 살펴보면 선로에서의 전압 강하는 유효전력과 무효전력량에 의해 결정되고 이들의 변화는 곧 전압변동의 원인이 됨을 알 수 있다. 특히 전압보상은 1차적으로 무효전력이 주로 담당해야하기 때문에 선로에 흐르는 무효전력  $Q_F$ 를 변수로 하여  $\Delta V = V_S - V_L$  를 그래프로 표현하면 그림 4와 같다.

그림 4에 따르면 선로에 흐르는 무효전력  $Q_F$ 가 증가하면  $\Delta V$ 가 그래프를 따라 증가하게 되고, 반대로  $Q_F$ 가 감소하면  $\Delta V$ 역시 감소하게 된다[4]. 따라서 선로의  $Q_F$  제어를 통하여 전압을 조절할 수 있다. 여기서  $\Delta V$ 의 변화량은 기울기인  $X/V_L$ 에만 영향을 받는다.

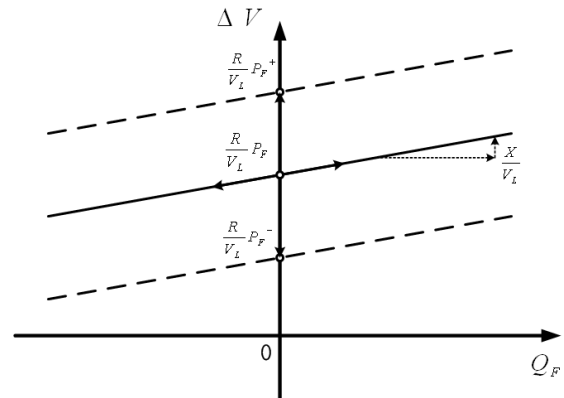


그림 4 선로에 흐르는 유·무효 전력과 전압변동의 관계

Fig. 4 Voltage variation according to active and reactive power flow

그림 4에서  $P_F$ 가 증가하면 그래프가 위로 이동해  $\Delta V$ 가 증가하고,  $P_F$ 가 감소하면 그래프가 아래로 이동해  $\Delta V$ 가 감소하는데 유효전력이 전압변동에 미치는 영향은 배전계통의 R/X비율이 클수록 두드러지게 나타난다. 유효전력을 전압제어에 이용하는 것에는 발전비용이 소요되기 때문에 비효율적이다. 그러나 분산전원이 계통으로부터 유입되는 유효전력을 줄여주는 역할을 하므로 유효전력의 흐름을 일정하게 하거나 줄여주는 방향으로 제어를 행하게 되면 전압제어에 도움을 줄 수 있다.

### 3. ULTC와 분산전원의 협조제어 알고리즘

#### 3.1 분산전원이 포함된 배전계통에서 LDC 방식의 한계 분석

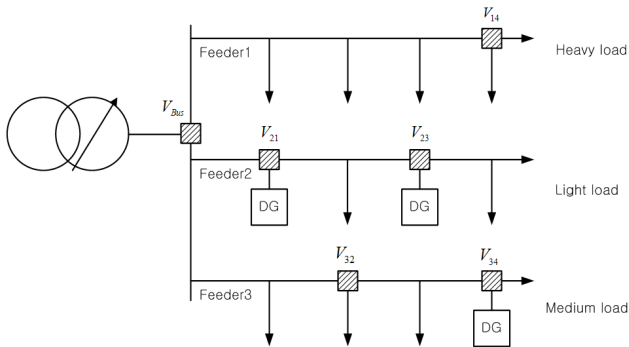


그림 5 분산전원이 포함된 배전계통  
Fig. 5 Distribution system with DG

그림 5는 ULTC변압기와 세 개의 배전 선로로 구성된 배전계통을 나타낸다. 방사형 배전계통에 각 피더 별 부하는 중부하, 경부하, 중간 부하로 구성되어 있으며 모두 집중형 부하라고 가정했다. 두 번째 피더의 첫 번째, 세 번째 노드 그리고 세 번째 피더의 네 번째 노드에 분산전원이 연결되어 있다. ULTC는  $V_{Bus}$  전압을 보상하는 LDC방식을 사용한다고 가정했다.

부하가 균등하게 분포해 있을 때 변압기 모선으로부터 마지막 노드까지의 전압곡선을 그림 6과 같이 예상할 수 있다. 가로축은 모선으로부터 시작되는 노드번호 이고 세로축은 전압 값이다. 중부하인 첫 번째 피더에서는 대체적으로 낮은 전압 곡선이 나타나고 분산전원이 많이 포함되고 경부하인 두 번째 피더에서는 역조류 발생으로 인해 높은 전압이 나타날 수 있다.

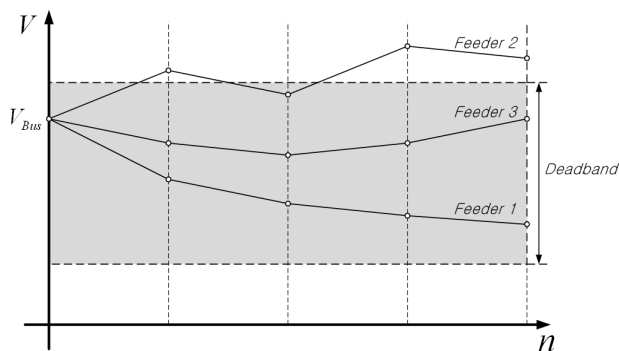


그림 6 각 선로에서의 전압곡선  
Fig. 6 Voltage profile at each feeder

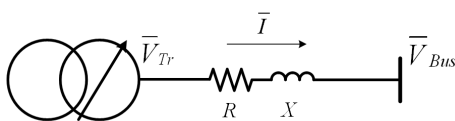


그림 7 기존의 LDC방식의 원리  
Fig. 7 Conventional line drop compensation (LDC)

그림 7을 살펴보면 LDC방식은 ULTC변압기의 2차측 전압  $\overline{V_{Tr}}$ 과 전류  $\overline{I}$  그리고 보상임피던스  $R$ 과  $X$ 를 이용하여 계산되는  $\overline{V_{Bus}}$  전압을 제어하는 방법이다[5-7]. LDC방식에서는 피더간의 전압 불균형이 큰 상황에서도 하위의 전압은 전혀 고려하지 않고  $\overline{V_{Bus}}$  전압만 기준범위 내로 제어하는 데다가 ULTC의 탭 조절이 규정전압 한계치 부근에서 발생하기 때문에 일부 노드에서 규정전압을 벗어나는 일이 발생할 우려가 있다. 비록 주상변압기나 추가적인 무효전력 보상 장치의 전압조절을 통해 규정전압을 유지할 수는 있지만 배전계통전압에 가장 크게 영향을 주는 것이 주변압기의 송출 전압이므로 적절한 송출전압 값을 결정하여 다른 전압보상 장치들의 부담을 줄여주는 것이 중요하다.

#### 3.2 측정된 배전선로 전압을 이용한 향상된 ULTC 제어

이러한 LDC방식의 단점을 보완하기 위해 본 논문에서 제안하는 ULTC 제어 방식에서는 각 피더의 주요지점 전압 데이터들을 측정하고 이를 송출전압제어에 이용하였다. LDC방식과 제안된 방식의 차이점은 LDC 방식에서는 목표 지점의 전압  $V_m$ 을 유추하여  $V_m$ 을 규정범위 내로 제어하는 방식인 반면 제안된 방식에서는 계통의 주요 노드에서 측정된 전압정보를 이용하여 목표하는 전압인  $V_{obj}$ 를 계산하고  $V_{obj}$ 를 규정범위 내로 제어하는 방식이다[8].

$$J = \sum_{k=1}^n (V_{obj} - V_{k,min})^2 + (V_{obj} - V_{k,max})^2 \quad (5)$$

식 (5)에서  $n$ 은 피더의 수,  $V_{k,min}$ 과  $V_{k,max}$ 는 각각 각 피더에서 측정된 값들 중에서 최소값과 최대값을 나타내고  $V_{obj}$ 는 목적함수를 최소화 시키는 전압 값이다. 그림 5와 같은 계통에서는 가장 높은 전압과 가장 낮은 전압이 예상되는 지점의 전압 값을 측정하기 때문에  $V_{obj}$ 값은 결국 모든 전압 값의 평균이 된다. 이 평균값을 ULTC제어에 이용하였다.

이를 통해 얻는 장점은 각 노드 전압의 평균값  $V_{obj}$ 을 ULTC 송출전압 결정에 활용함으로써 피더의 전압곡선을 전체적으로 규정전압 중간 값인  $V_{ref}$ 를 중심으로 맞춰 줄 수 있다는 점이다. 배전계통의 전압이 각 피더별로 불균형을 이루더라도  $V_{obj}$ 값을 ULTC제어에 이용하여 역조류가 발생하는 피더의 과전압과 부하량이 많은 피더의 저전압 발생을 어느 정도 방지할 수 있다.

#### 3.3 선로의 전압강하 보상을 위한 분산전원의 무효전력 제어 방법

본 논문에서 제안하는 제어 방법이 기존 분산전원 무효전력 제어와 다른 점은 분산전원이 위치한 노드의 전압제어가 아닌 선로의 전압강하 또는 전압상승을 고려한다는 점이다. 제안하는 무효전력 제어 방법의 특징은 전압강하 또는 전압상승이 최소화되도록 무효전력 제어를 시행하는 것이다[8].

배전계통의 부하를 집중형 부하로, 분산전원을 인버터 기반의 제어 가능한 분산전원이라고 가정하였다. 분산전원이 위치한 부근에서의 전력의 흐름을 그림 8과 같이 나타내면

송전단 전압  $V_S$ 와 수전단 전압  $V_L$ 의 차이는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = \frac{XQ_{F1} + RP_{F1}}{V_L} \quad (6)$$

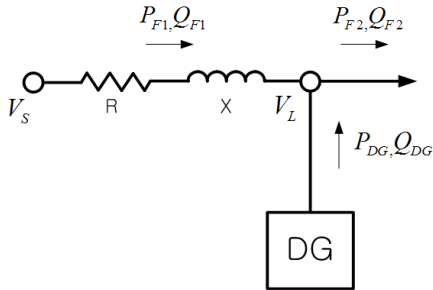


그림 8 분산전원이 포함된 배전선로에서의 조류의 흐름  
Fig. 8 Power flow in distribution system with DG

그림 8과 식 (6)을 바탕으로 무효전력 보상 기준값  $Q_{F1ref}$ 와 전압강하 기준값  $\Delta V_{ref}$ 와의 관계를 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{F1ref} = \frac{\Delta V_{ref} \times V_L - RP_{F1}}{X} \quad (7)$$

식 (7)에서는 원하는 전압강하 값에 대한 선로의 무효전력 기준값을 알 수 있다. 분산전원의 무효전력 출력량 제어는 식 (7)을 바탕으로 하게 된다. 분산전원의 인버터는 분산전원의 무효전력 출력  $Q_{DG}$ 가  $Q_{F2} - Q_{F1ref}$  값을 추종하도록  $q$ 축 기준전류  $i_q$  값을 생성하게 된다. 제어기는 그림 9와 같이 구성하였다.

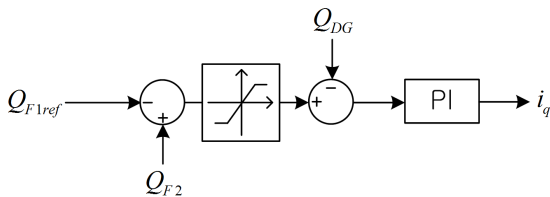


그림 9 선로 무효전력 제어를 위한 분산전원 무효전력 제어기  
Fig. 9 Reactive power controller in DG for reactive power flow control

분산전원의 선로 무효전력제어의 장점은 선로에서의 전압강하를 조절할 수 있다는 점이다. 기본적으로 선로 전압강하를 0으로 제어하여 경부하 시 분산전원이 위치한 노드에서의 전압상승을 막을 수 있고 중부하 시에도 전압강하를 보상해 주어 배전계통 전압곡선의 평활화에 기여할 수 있다. 또한 전압강하 또는 전압상승 값을 능동적으로 조절할 수 있기 때문에 배전계통에 최근 설치되고 있는 DAS(Distribution Automation System)나 EMS(Energy Management System) 등의 상위제어 시스템을 활용하게 되면 보다 효율적인 전압관리를 할 수 있다.

ULTC제어와는 별개로 분산전원의 무효전력 제어가 이루어지지만, 분산전원의 무효전력 제어가 ULTC동작보다 빠르게 동작하기 때문에 분산전원의 전압제어가 먼저 이루어지고 이후 ULTC 전압제어가 이루어지므로 두 제어기 간의 효율적인 협조제어가 가능해진다.

#### 4. 제안된 알고리즘 모의 및 결과 분석

##### 4.1 제안된 알고리즘 모의를 위한 배전계통과 시나리오

여기에서는 앞서 제안한 전압제어의 동작을 확인하고 전압보상여부를 확인하여 제안한 제어 방법의 타당성을 검증하였다. 제안한 제어방법의 검증을 위하여 분산전원이 연계된 배전계통 모델을 그림 10과 같이 구성하였고 계통 파라미터는 표 1과 같다. 피더는 총 세 개로 첫 번째 피더는 부하만 적용된 중부하의 피더, 두 번째 피더는 경부하와 많은 출력을 내는 분산전원의 피더, 세 번째 피더는 중간 정도의 부하로 구성되었다.

표 1 배전계통 파라미터

Table 1 Distribution system parameters

시스템 파라미터		
계통 전압		22.9 kV(L-L, rms)
계통 주파수		60 Hz
선로 정수		0.304(ohm/km), 0.000403(H/km)
가변 부하		500 kW ~ 2 MW (pf=1)
DB (Deadband)	Proposed	± 0.1 kV
	LDC	± 0.3 kV
ULTC time delay		0.25 sec
분산전원		1 MVA, 0.38kV(L-L, rms)

ULTC는 배전계통의 주요지점 전압을 이용하여 기준전압  $V_{ref}$ 와 목표전압  $V_{obj}$ 간의 전압 오차  $\Delta V$ 를 계산하고 이를 바탕으로 탭 변화 동작을 수행하게 된다. ULTC 제어기에는 LDC 방식과의 비교 분석을 위해 LDC 제어기도 포함되어 있다. LDC 방식에서 전압제어 대상은 저압모선이며, 변압기 2차 측의 전압과 전류를 측정해 보상전압  $V_m$ 을 계산하고 기준전압  $V_{ref}$  값과 비교하여 전압 오차  $\Delta V$ 를 계산하게 된다. 제안한 방식의 기준 범위는  $V_{ref} \pm 0.1kV$  이고, 기존 LDC방식의 기준 범위는  $V_{ref} \pm 0.3kV$  로 설정하였다. 모의 실험상에서의 ULTC 시간지연은 0.25초로 설정하였다.

적용된 분산전원 모델은 인버터기반의 분산전원모델로 기준 유효전력  $P_{ref}$ 와 기준 무효전력  $Q_{ref}$  출력할 수 있도록 설계되어 있다. 총 세 개의 분산전원은 무효전력 보상을 통해 전압제어를 수행하게 되는데, 무효전력 보상이 ULTC의 시간지연 보다 빠르게 반응하기 때문에 분산전원의 전압보상이 우선순위가 된다.  $Q_{F1ref}$  값은 식 (7)을 이용하여 계산된다. 자세한 모의실험 시나리오는 표 2와 같다.

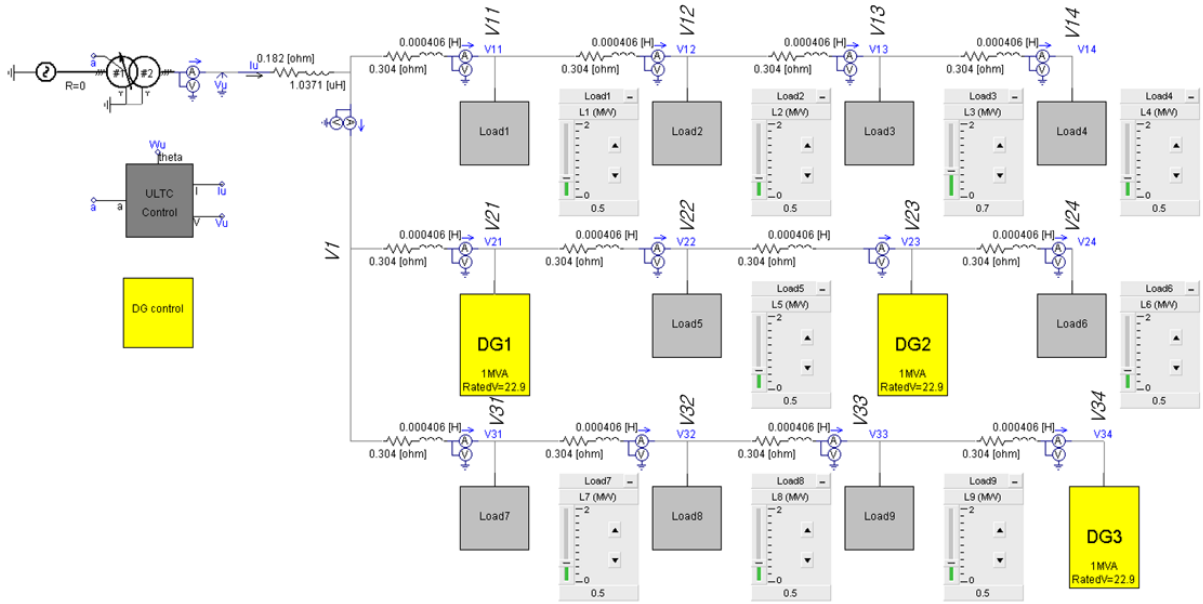


그림 10 분산전원이 포함된 배전계통의 PSCAD/EMTDC 모델  
 Fig. 10 PSCAD/EMTDC model of distribution system with DG

표 2 모의실험 시나리오  
 Table 2 Simulation scenario

구분	모의실험 조건	
LDC 제어	사례 1	$P_{DG1}$ (분산전원1 출력)=0.1MW, $P_{DG2}$ =0.1MW, $P_{DG3}$ =0.1MW $P_{feeder1}$ (피더1 부하)=2MW, $P_{feeder2}$ =1MW, $P_{feeder3}$ =1.5MW
	사례 2	$P_{DG1}$ =0.7MW, $P_{DG2}$ =0.7MW, $P_{DG3}$ =0.1MW $P_{feeder1}$ =2MW, $P_{feeder2}$ =0.1MW, $P_{feeder3}$ =1.5MW
	사례 3	$P_{DG1}$ =0.1MW, $P_{DG2}$ =0.1MW, $P_{DG3}$ =0.1MW $P_{feeder1}$ =2MW, $P_{feeder2}$ =1MW, $P_{feeder3}$ =1.5MW
제안된 ULTC 제어	사례 4	$P_{DG1}$ =0.7MW, $P_{DG2}$ =0.7MW, $P_{DG3}$ =0.1MW $P_{feeder1}$ =2MW $\rightarrow$ 1MW( $t=2s$ ), $P_{feeder2}$ =0.1MW, $P_{feeder3}$ =1.5MW
	사례 5	$P_{DG1}$ =0.1MW, $P_{DG2}$ =0.1MW, $P_{DG3}$ =0.1MW $P_{feeder1}$ =1MW $\rightarrow$ 2MW( $t=2s$ ), $P_{feeder2}$ =1MW, $P_{feeder3}$ =1.5MW
제안된 분산전원 무효전력 제어	사례 6	$P_{DG1}$ =0.1MW, $P_{DG2}$ =0.1MW $P_{feeder2}$ =1MW
	사례 7	$P_{DG1}$ =0.5MW, $P_{DG2}$ =0.5MW $P_{feeder2}$ =0.1MW

4.2 기존 LDC 방식을 이용한 ULTC 제어 방식 모의 결과

먼저, 기존의 LDC제어 방식을 채택하여 세가지 상황에 대하여 모의해 보았다. 사례1은 LDC를 통해 계산되는 보상 전압  $V_m$  값이 규정전압의 상한치인 23.2kV에 근접해 있을 경우이다. 송출전압이 높지만 피더 2에서 부하가 1MW로 높기 때문에, 그림 11에서 볼 수 있듯이 전체적으로 정상범위 안에서 전압이 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

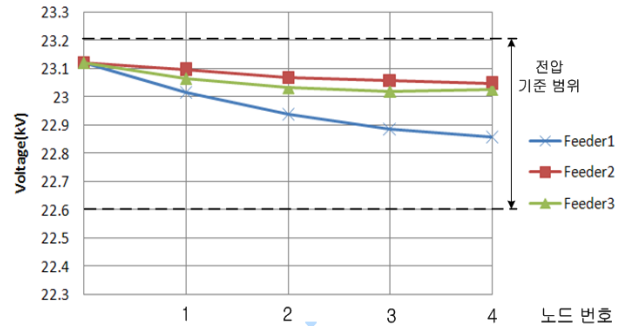


그림 11 각 선로에서의 전압 프로파일 : 사례 1  
 Fig. 11 Voltage profiles at each feeder : Case 1

사례2는 사례1과 마찬가지로 LDC를 통해 계산되는 보상 전압  $V_m$  값이 규정전압의 상한치인 23.2kV에 근접해 있을 경우이다. 하지만 피더2의 부하가 0.1MW로 낮기 때문에 그림 12에서 볼 수 있듯이 V22, V23 그리고 V24에서 과전압 현상이 나타난다. 그 이유는 피더2에서 분산전원의 출력이 부하량보다 커 유효전력의 흐름이 반대가 되어 전압상승이 일어나기 때문이다.

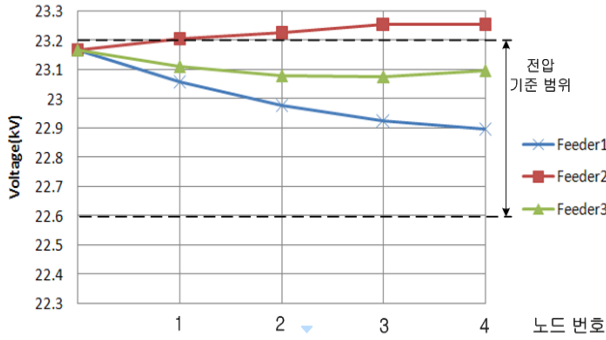


그림 12 각 선로에서의 전압 프로파일 : 사례2  
Fig. 12 Voltage profiles at each feeder : Case 2

사례3의 경우는 반대로 LDC를 통해 계산되는 보상전압  $V_m$  값이 규정전압의 하한치인 22.6kV에 근접해 있을 경우이다. 여기서는 ULTC이 송출전압이 낮기 때문에 모든 피더의 전압이 규정전압 하한치를 벗어난다.

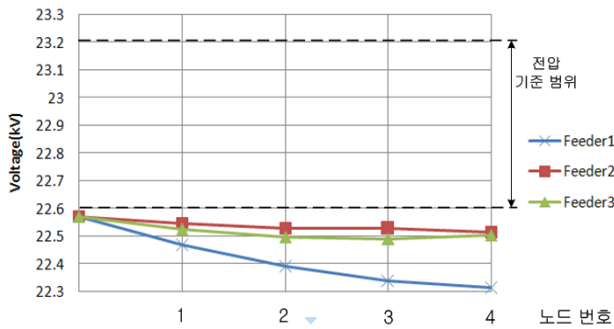


그림 13 각 선로에서의 전압 프로파일 : 사례3  
Fig. 13 Voltage profiles at each feeder : Case 3

앞의 사례1~사례3을 통하여 LDC의 전압제어 대상 모선인 V1의 전압이 규정범위 안에서 유지되더라도 분산전원의 출력량 또는 부하량에 따라 일부노드에서 규정전압을 벗어날 수 있음을 확인하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 방법을 사용한 결과를 다음 절에서 분석하도록 한다.

### 4.3 제안된 ULTC 전압제어 모의 결과

사례4에서는 모의실험 중 2초에 피더1의 부하를 2MW에서 1MW로 변화시켰다. 그림 14에서는 제안된 방식에서의  $V_{obj}$  그래프를 보여주는데, 부하 감소 후  $V_{obj}$ 가 규정전압을 초과하게 된 다음, 지연시간 이후 ULTC의 탭이 동작하여  $V_{obj}$ 를 다시 규정범위 내로 조정해 주는 것을 확인할 수 있고 그림 15에서는 이에 따른 탭 비율의 변화를 확인할 수 있다. 또한 그림 16과 사례2의 그림 12를 비교해 보면 전체적인 전압곡선이 규정전압 중심으로 이동되어 모든 노드의 전압이 규정전압 범위로 유지됨을 확인할 수 있다.



그림 14 제안된 ULTC 전압제어 방식에서의  $V_{obj}$  그래프 : 사례4  
Fig. 14  $V_{obj}$  in proposed ULTC voltage control : Case 4

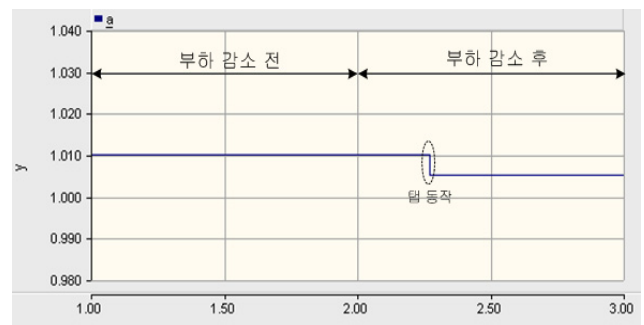


그림 15 탭 비율의 변화 : 사례4  
Fig. 15 Change of tap position : Case 4

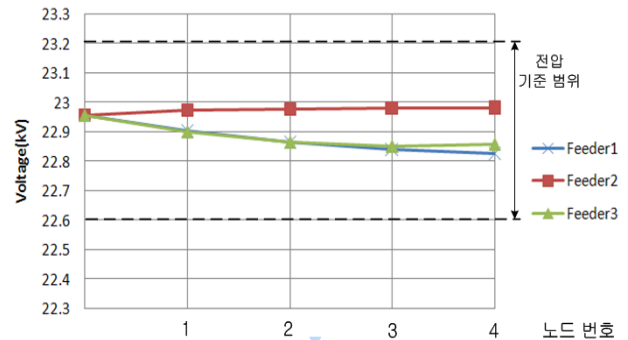


그림 16 각 선로에서의 전압 프로파일 : 사례4  
Fig. 16 Voltage profiles at each feeder : Case 4

다음의 사례5에서는 모의 실험중 2초에 피더1의 부하를 1MW에서 2MW로 변화시켰다. 그림 17에서는 제안된 방식에서의  $V_{obj}$  그래프를 보여주는데, 부하 증가 후  $V_{obj}$ 가 규정전압을 벗어나게 된 다음, 지연시간 이후 ULTC의 탭이 동작하여  $V_{obj}$ 를 다시 규정범위 내로 조정해 주고 있다. 그림 18에서는 탭 비율의 변화를 확인할 수 있다. 또한 그림 19와 사례1의 그림 11을 비교해 보면 전체적인 전압곡선이 규정전압 중심으로 이동되어 모든 노드의 전압이 규정전압 범위로 유지됨을 확인할 수 있다.

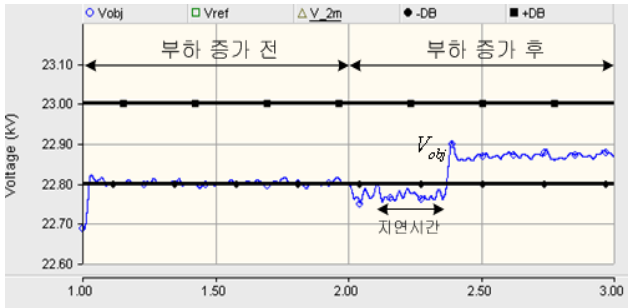


그림 17 제안된 ULTC 전압제어 방식에서의  $V_{obj}$  그래프 : 사례5  
 Fig. 17  $V_{obj}$  in proposed ULTC voltage control : Case 5

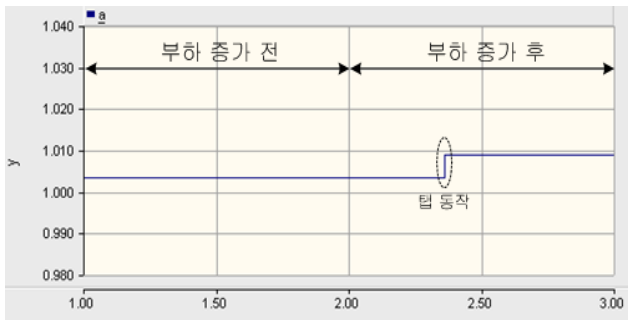


그림 18 탭 비율의 변화 : 사례5  
 Fig. 18 Change of tap position : Case 5

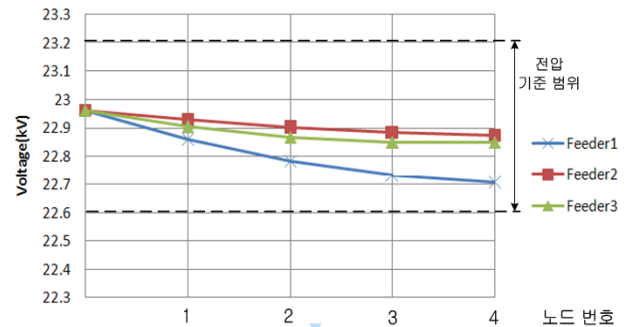


그림 19 각 선로에서의 전압 프로파일 : 사례5  
 Fig. 19 Voltage profiles at each feeder : Case 5

모의실험 결과에서 제안된 ULTC제어 방식을 사용할 경우 LDC방식의 전압 프로파일에 비해 전체적으로 전압곡선이 규정전압 중심으로 이동되었고 일부 노드에서 규정전압을 벗어나는 상황을 피할 수 있음을 확인하였다.

#### 4.4 분산전원의 무효전력 전압보상 알고리즘 모의 결과

사례6에서는 분산전원이 일정 유효전력 출력 0.1MW을 내고 피더2의 부하는 1MW로 설정된 상태에서 분산전원이 무효전력제어를 하였을 때의 전압제어 효과를 보도록 한다. 무효전력제어를 수행하지 않을 경우인 그림 20과 수행하는 경우인 그림 21을 비교해 보았을 때 전압강하량이 감소하였음을 확인할 수 있다. 또한 피더에서의 전압 프로파일이 완

만해 졌음을 확인할 수 있다. 그 이유는 모선 V23에 연결되어 있는 분산전원이  $\Delta V_{ref}=0$  이 되도록 무효전력 출력제어를 하고 있기 때문이다.

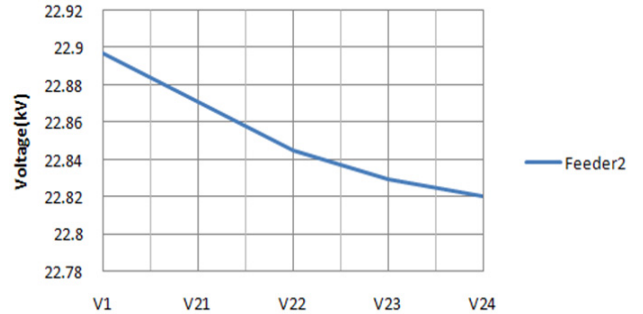


그림 20 전압제어를 하지 않을 때 피더2에서의 전압곡선 : 사례6  
 Fig. 20 Voltage profile in feeder 2 without DG control : Case 6

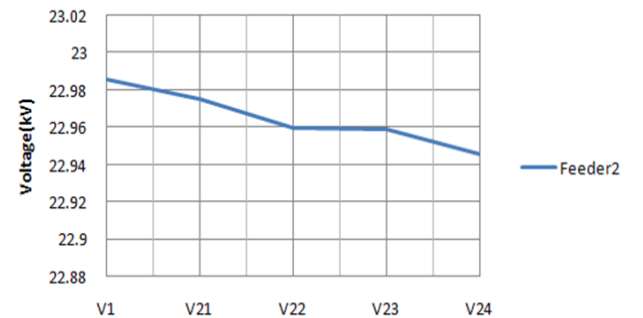


그림 21 전압제어를 할 때 피더2에서의 전압곡선 : 사례6  
 Fig. 21 Voltage profile in feeder 2 with DG control : Case 6

사례7에서는 분산전원이 일정 유효전력 출력 0.5MW을 내고 피더2의 부하는 0.1MW로 설정된 상태에서 무효전력제어에 의한 전압보상 효과를 보여주고 있다. 무효전력제어를 수행하지 않을 경우인 그림 22와 수행하는 경우인 그림 23을 비교해 보았을 때 역시 전압상승량이 감소하였음을 확인할 수 있다. 즉, 피더내의 전압상승을 분산전원의 무효전력 제어로 보상하고 있음을 알 수 있다.

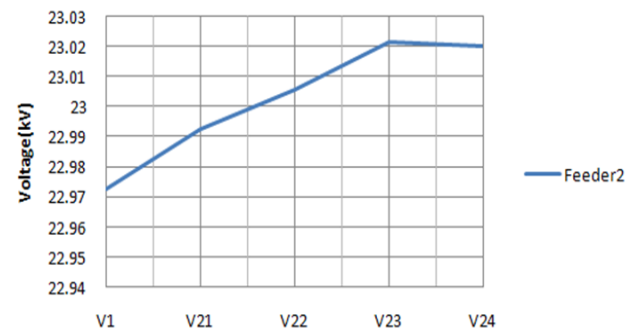


그림 22 전압제어를 하지 않을 때 피더2에서의 전압곡선 : 사례7  
 Fig. 22 Voltage profile in feeder 2 without DG control : Case 7

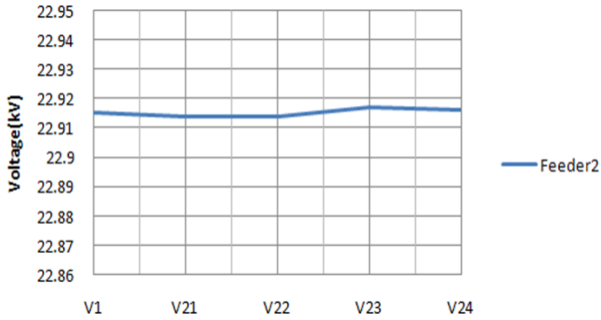


그림 23 전압제어를 할 때 피더2에서의 전압곡선 : 사례7  
 Fig. 23 Voltage profile in feeder 2 with DG control : Case 7

분산전원을 이용하여 선로의 전압변동  $\Delta V$ 를 줄여주는 제어를 통하여 전체적인 전압곡선을 보다 완만하게 만들 수 있음을 사례 6, 7의 모의실험을 통해 확인하였다. 본 논문에서 제안된 협조제어 방식에서는, ULTC제어와는 별개로 분산전원 무효전력 제어가 이루어지지만 분산전원의 무효전력 제어가 ULTC동작보다 빠르기 때문에 분산전원의 전압제어가 먼저 이루어지고, 후에 ULTC전압제어가 이루어진다. 따라서 먼저 분산전원의 무효전력제어를 통하여 개선된 전압곡선을 얻고 그 이후 제안된 ULTC제어를 통하여 배전시스템의 전압곡선을 규정범위 중심으로 제어하게 되면, 신재생에너지와 같은 불규칙한 출력변동에 대비할 수 있고, 안정적이고 효율적인 전압제어를 할 수 있을 것이다.

### 5. 결 론

출력이 불안정한 태양광 발전이나 풍력발전 형태의 분산전원이 배전시스템에 증가하게 되면 유효전력 출력의 변동이 잦아지게 된다. 배전시스템은 송전계통과는 다르게 선로의 흐르는 유효전력의 변화가 곧 전압변동으로 이어지기 때문에 분산전원의 증가가 전압제어 문제를 야기할 수 있다.

본 논문에서는 분산전원의 증가에 대비하여 기존의 LDC 방식의 ULTC 전압조정 방식을 개선하여 새로운 ULTC 전압조정 방식을 제안하고, 분산전원 스스로 선로의 무효전력 조정을 통해 전압을 제어할 수 있는 방법에 대하여 제안하여 기존의 전압제어 방식보다 향상된 전압제어 능력을 모의 실험을 통하여 검증하였다.

LDC방식은 계산된 보상전압  $V_m$ 이 규정전압을 벗어난 뒤 지연시간만큼의 시간이 지속되어야 탭 동작이 이루어지게 된다. 더군다나 전체적인 전압곡선이 위 또는 아래로 치우쳐져 있게 되므로 중부하 또는 경부하의 피더 말단에서는 규정전압 넘어서는 현상이 빈번하게 발생할 수 있다. 하지만 제안된 방식에서는 주요 전압 측정치의 평균값을 ULTC 제어에 사용함으로써 전체적인 전압곡선을 규정전압의 중간으로 위치시키게 되므로 LDC방식에서 단점을 보완할 수 있다.

이에 추가적으로 분산전원을 이용하여 선로에서의 전압강하를 보상하는 제어를 통하여 전체적인 전압 프로파일을 보다 완만하게 만들 수 있다. 이러한 새로운 제어방식을 통하여 분산전원 연계시에도 안정적이고 효율적인 전력공급이 가능할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20101010400501)

### 참 고 문 헌

- [1] N. Jenkins, R. Allan, P. Corssley, D. Kirschen, and G. Strbac, "Embedded Generation", IEE Power and Energy Publication Series, 21, 2000.
- [2] H.Y. Li, H. Leite, "Increasing Distributed Generation Using Automatic Voltage Reference Setting Technique", 2008 IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008
- [3] 전재근, 서재진, 강기혁, 원동준, "분산전원의 유효전력 출력 변화에 따른 PCC에서의 전압변동", 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.257~258, 2009
- [4] 전재근, 원동준, "분산전원의 유·무효 전력제어를 이용한 배전선로에서의 전압제어", 2010년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2010
- [5] 김태웅, 김재언, "분산전원이 도입된 배전시스템의 전압해석 방법에 관한 연구", The transactions of KIEE. Vol. 52A, No.2, pp. 69-78, Feb. 2003
- [6] J.-H. Choi, J.-C. Kim, "The Online Voltage Control of ULTC Transformer for Distribution Voltage Regulation", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 23, issue 2, pp. 91-98, Feb. 2001.
- [7] M. S. Calovic, "Modeling and Analysis of Under Load Tap Changing Transformer Control System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.7, pp. 1909-1915, July 1984
- [8] 전재근, "배전시스템에서 분산전원과 ULTC의 협조제어 방법", 인하대학교 석사학위 논문, 2011년 2월

### 저 자 소 개



### 전 재 근 (田 在 根)

1983년 9월 23일 생. 2009년 인하대학교 전기공학부 졸업. 2011년 동대학원 전기공학부 졸업(석사).





**원 동 준 (元 東 俊)**

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기컴퓨터 공학부 졸업(공박). 2004년 동 공학연구소 연구원. 2005년 ~ 2006년 미국 University of Washington, APT Center 연구원. 2006년 ~ 현재 인하대학교 전기공학부 조교수

E-mail : djwon@inha.ac.kr

Homepage : <http://power.inha.ac.kr>



**김 태 현 (金 台 鉉)**

1963년 6월 18일 생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박), 2000년 3월~2002년 2월 목포대 전기제어공학부 조교수 근무, 2002년 3월 ~ 현재 명지전문대학 전기과 부교수

E-mail : kth@mjc.ac.kr