

# 배전선로 규정전압 유지를 위한 전류 측정치 기준의 무효전력 제어방법

## Current Measurement based Reactive Power Control to Mitigate Overvoltage of Primary Distribution Line

황 지 희\* · 임 성 일†  
(Jihui Hwang · Seongil Lim)

**Abstract** - Due to the high penetration ratio of dispersed generations, overvoltage problem of the feeder has become more an important issue in distribution system operation. This paper proposes a new method for the smart inverter to control reactive power to mitigate voltage rise by the reverse power flow from the DGs. The proposed method controls reactive power based on current measurement while conventional methods use voltage measurement which include unacceptably large errors. Various case studies using MATLAB simulation have been performed to verify effectiveness of proposed method.

**Key Words** : Distributed generation, Distribution system operation, Voltage control

### 1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염의 심화로 대규모 발전소 건설이 어려워짐에 따라 신재생에너지를 기반으로 하는 분산전원의 보급이 확대되고 있다. 정부는 '제4차 신재생에너지 기본계획'에서 2035년까지의 신재생에너지 비중을 총 발전량 대비 11[%]까지 확대할 계획을 발표하였다[1].

배전선로의 분산전원 연계용량 확대에 영향을 미치는 가장 큰 기술적 제약은 역조류에 의한 과전압이다. 전압상승으로 과전압이 발생되면 전력설비의 절연이 파괴된다. 과전압의 허용시간이 매우 짧고 허용범위가 작으므로 절연파괴 등 전압 상승으로 인한 피해가 빠르게 확산된다.

#### 표 1 신재생에너지 비중 목표치

Table 1 Target of renewable energy share

| 구분            | '12 | '14 | '20 | '25 | '30 | '35 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 신재생에너지 비중 [%] | 3.2 | 3.6 | 5.0 | 7.7 | 9.7 | 11  |

과거에는 전력회사들이 분산전원 연계에 소극적이어서 각 선로 마다 규정된 범위 이내로 연계용량을 엄격히 제한하는 정책을 고수하였다. 최근에는 분산전원 연계용량 확대 요구가 증가함에

따라, 이에 대응하기 위하여 규정전압을 유지하기 보다는 분산전원의 연계를 최대한 허용하는 방향으로 정책이 전환되고 있다. 배전선로의 분산전원 수용성 향상을 위한 보다 적극적인 전압제어 방법의 도입이 요구되고 있다.

분산전원의 영향에 따른 배전계통 전압 운전조건 위반을 방지하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. 변압기, Y- $\Delta$  부하 및 단상 커패시터 뱅크로 이루어진 3상 불평형 배전선로에서 전압 무효전력 최적화 방법[3], 전압제어 및 전력손실 최소화를 위한 전압 조정 장치 제어방법[4-6], 배전선로 전압 프로파일의 최적화되도록 OLTC(On Load Tap Changer), SVR (Step Voltage Regulator), 커패시터 뱅크 및 분산전원의 무효전력 등을 제어하는 방법[7-9], 분산전원 인버터에 동작특성 커브를 설정하고 무효전력을 공급하거나 흡수하여 전압을 제어하는 방법[10] 등이 제시되었다. 기존에는 전압을 기준으로 한 무효전력 제어방법이 많이 제시되었다. 하지만 특고압 배전선로는 기구적인 제약으로 BCPD(Bushing Capacitance Potential Devices)를 사용하기 때문에 전압을 정확히 측정할 수 없다. 따라서 기존에 제시된 측정전압을 이용한 무효전력 제어방법은 매우 큰 전압 측정오차를 포함하기 때문에 실계통에 적용하기 어렵다[11].

본 논문에서는 전압을 기준으로 하는 기존 방법과 달리 전류를 기준으로 무효전력을 제어하는 새로운 방법을 제시한다. 전압 측정치는 큰 오차를 포함하지만 전류측정치는 정확하므로 매우 정밀하게 무효전력을 제어할 수 있다. 본 논문에서 제시하는 방법은 배전선로의 전압을 규정범위 이내로 유지하는 것이 아니라 개별 분산전원이 자신의 출력에 의한 전압상승을 상쇄하도록 무효전력을 제어한다. 본 논문에서 제안하는 방법을 적용하면 전압의 관점에서는 분산전원 연계용량의 제약이 없다. 기존에 제안되었던 방법과 본 논문에서 제시된 방법의 가장 큰 차이는 무효전

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea.  
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea.  
Received : April 12, 2017; Accepted : September 26, 2017

력 제어의 기준과 목적이다. 표 2는 기존방법과의 차이점을 비교하여 나타내고 있다.

표 2 기존방법과 제안방법의 차이점

Table 2 Difference between conventional and proposed method

| 구분 | 기존방법                       | 제안방법                           |
|----|----------------------------|--------------------------------|
| 기준 | 전압                         | 전류                             |
| 목적 | 규정범위(기준전압) 이내로 유지          | 분산전원 연계 전 전압 유지                |
| 장점 | • 전압을 효과적으로 제어 가능          | • 정확한 전류 측정치 이용<br>• DG 수용성 향상 |
| 단점 | • 전압 측정오차로 정확한 무효전력 제어 불가능 | • 다른 분산전원에 의한 전압 상승 해결 불가능     |

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 전압기준 무효전력 제어방법의 문제점을 검토한다. 3장에서는 전류기준 무효전력 제어방법을 제시한다. 4장에서는 다양한 사례연구를 통하여 본 논문에서 제시하는 방법의 유용성을 검증한다.

## 2. 전압기준 무효전력제어의 문제점

### 2.1 무효전력에 의한 전압제어

그림 1은 분산전원이 말단에 연계된 배전선로에서 분산전원 무효전력 제어 전후의 전압 프로파일을 나타내고 있다. 배전선로에 분산전원이 연계되면 전압 프로파일은 (A)와 같이 말단으로 갈수록 상승하는 형태를 나타내게 된다. 분산전원의 무효전력을 흡수하면 (B)와 같은 전압 프로파일로 변경된다. 분산전원 연계로 인하여 말단 전압이 상승하였을 경우 무효전력을 제어하여 선로 말단에 발생된 과전압을 해소할 수 있다.

그림 1의 인출단 전압이  $\dot{V}_s$ 이고 선로 임피던스가  $R$ 과  $X$ 이며 분산전원의 유효전력과 무효전력이  $P_{dg}$ 와  $Q_{dg}$ 일 때  $\dot{V}_{dg}$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 분산전원의 무효전력  $Q_{dg}$ 가 변하면

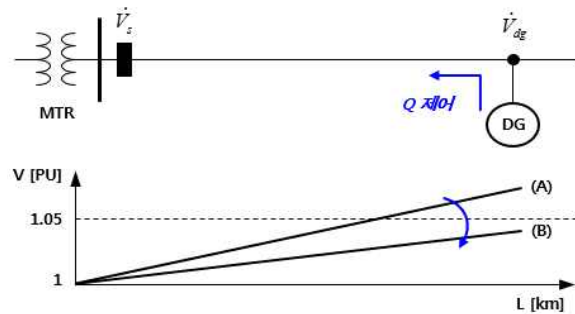


그림 1 분산전원 무효전력에 따른 전압변동  
Fig. 1 Voltage variation by reactive power control

분산전원 연계점 전압  $\dot{V}_{dg}$ 가 변동됨을 알 수 있다.

$$\dot{V}_{dg} = \dot{V}_s - \frac{RP_{dg} + XQ_{dg}}{(\dot{V}_{dg})^*} + j \frac{XP_{dg} + RQ_{dg}}{(\dot{V}_{dg})^*} \quad (1)$$

그림 2는 IEC 61850-90-7에 제시된 전압-무효전력 특성곡선 기반의 무효전력 제어방법을 나타내고 있다[12]. 배전선로 전압 프로파일을 규정범위 이내로 유지하기 위하여 측정전압을 기준으로 과전압이 발생되면 무효전력을 흡수하여 전압을 낮추고 저전압이 발생되면 무효전력을 공급하여 전압을 높인다.

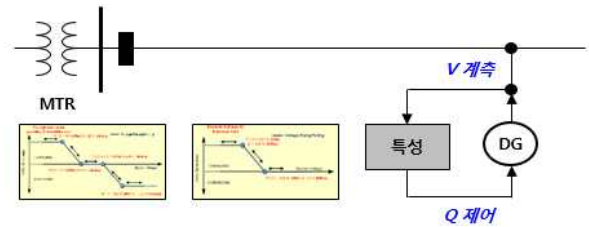


그림 2 전압측정치 기준 무효전력 제어  
Fig. 2 Voltage measurement based Var control

### 2.2 특고압 배전선로 전압계측 오차

배전용 변압기는 탭과 권수비에 의해 변압비를 조정할 수 있으므로 배전선로 전압제어의 기준은 저압측(2차측)이 아닌 특고압측(1차측)이 된다. 분산전원은 대부분 저압측에 연계되므로 2차측 전압을 측정하게 된다. 그러나 배전용 변압기 철심의 비선형적 자화특성으로 2차측에서 측정된 전압을 권수비에 따라 1차측 전압으로 정확하게 환산할 수 없다. 따라서 전압을 기준으로 무효전력을 제어하기 위해서는 1차측에서 전압을 측정하고 2차측의 분산전원 스마트 인버터로 전송해야 한다. 그림 3은 이러한 기능을 수행하는 한전의 분산전원 제어장치인 DER-AVM을 나타내고 있다. DER-AVM은 1차측에서 전압을 측정하여 2차측에 있는 분산전원 스마트인버터로 전송하고, 분산전원은 1차측 전압을 기준으로 무효전력을 제어한다.

그러나 배전선로에서는 계기용변압기(PT)의 문제로 1차측 전압을 정확하게 측정할 수 없다. 전력계통 전압 측정에 사용되는 계기용변압기의 대표적인 예로는 CCPD (Coupling Capacitor

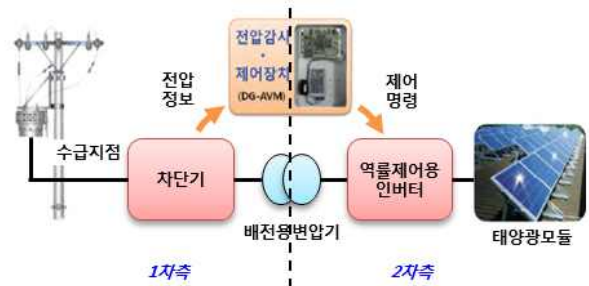


그림 3 DER-AVM 구성도  
Fig. 3 Configuration of DER-AVM

Potential Devices)와 BCPD (Bushing Capacitor Potential Devices)가 있다. CCPD는 직렬콘덴서를 이용하여 분압하는 방식으로 절연공간 확보가 용이한 송전계통에서 사용된다. BCPD는 붓싱과 대지간 정전용량을 이용하여 분압하는 방식으로서 계기용 변압기를 설치하기에 공간이 부족한 배전선로에서 주로 사용된다. BCPD는 정전용량의 크기가 일정하지 않기 때문에 전압측정 오차가 1[%] 이상으로 매우 크다[11]. 특고압 배전선로의 전압 제어 범위가 2~3[%] 이내에 불과하기 때문에 1[%] 이상의 전압 측정오차로는 전압을 기준으로 한 무효전력 제어방법을 실계통에 적용하기 어렵다. 계기용 변압기의 정밀도를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만 자동화 개폐기내에서 절연공간 확보가 어렵다는 기구적인 문제를 해결해야 하므로 실용적인 성과를 거두기 어렵다.

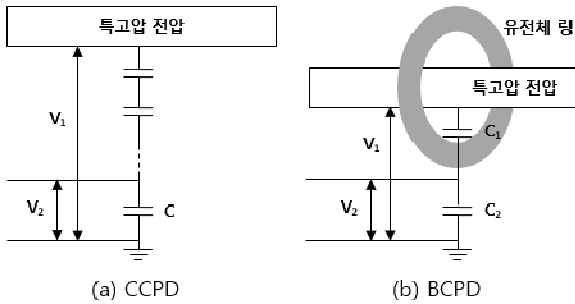


그림 4 계기용 변성기의 종류  
Fig. 4 Types of potential transformer

### 2.3 전압측정 오차의 영향

그림 5는 스마트인버터의 VVC 특성곡선으로서 전압측정치에 대한 무효전력 제어량을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 실제 전압이 1.035 [pu]라면 무효전력을 인버터 용량의 80[%]만큼 흡수하여 전압을 제어하게 된다. 만약 측정오차가 1[%]라면 전압측정치가 1.025 [pu]이고 무효전력을 인버터 용량의 30[%]만 흡수하게 되므로 전압제어에 실패하게 된다. 따라서 1[%] 이상의 측정오차가 포함된 전압 기준으로는 무효전력을 제어할 수 없다.

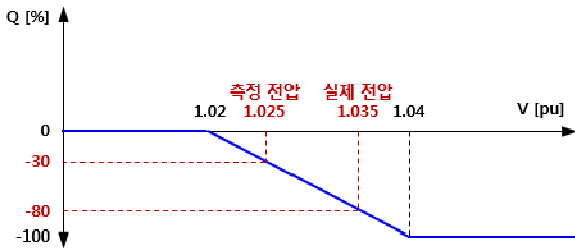


그림 5 전압 측정오차가 무효전력 제어에 미치는 영향  
Fig. 5 Effect of voltage measurement error

### 3. 제안하는 방법

#### 3.1 전류기준 무효전력 제어량 계산방법

그림 6은 말단에 분산전원이 연계된 배전선로를 나타내고 있다. 선로 임피던스는 R과 X이며 분산전원이 연계되기 전과 후의 전압은  $\dot{V}_{dg0}$ 와  $\dot{V}_{dg}$ 이다.

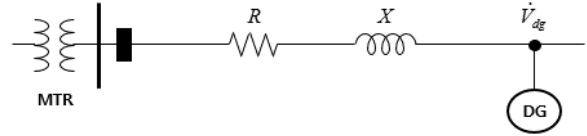


그림 6 분산전원이 연계된 배전선로  
Fig. 6 Distribution line with DG

분산전원 연계 전의 전압  $\dot{V}_{dg0}$ 와 연계 후의 전압  $\dot{V}_{dg}$ 의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$|\dot{V}_{dg}| = \sqrt{(|\dot{V}_{dg0}| + \Delta x)^2 + \Delta y^2} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta x = IR\cos\theta + IX\sin\theta$ ,  $\Delta y = IX\cos\theta - IR\sin\theta$

이 절에서는 분산전원 연계 후에도 분산전원 연계전의 전압을 유지하는 분산전원 출력전류 기준의 무효전력 제어량 계산방법을 제시한다. 식 (2)에서  $|\dot{V}_{dg0}| = |\dot{V}_{dg}|$  조건을 만족하는 I와  $\theta$ 의 관계식은 다음과 같이 유도된다. 관계식 유도를 위해 먼저, 식 (2)의 양변을  $|\dot{V}_{dg0}|$ 으로 나누면,

$$\frac{|\dot{V}_{dg}|}{|\dot{V}_{dg0}|} = \sqrt{\left(\frac{|\dot{V}_{dg}|}{|\dot{V}_{dg0}|} + \frac{\Delta x}{|\dot{V}_{dg0}|}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{|\dot{V}_{dg0}|}\right)^2} \quad (3)$$

식 (3)에 분산전원 연계전과 후의 전압이 같다는 조건을 적용하면 ( $|\dot{V}_{dg}|/|\dot{V}_{dg0}|=1$ ),

$$1 = \sqrt{1 + \frac{2\Delta x}{|\dot{V}_{dg0}|} + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{|\dot{V}_{dg0}|^2}} \quad (4)$$

식 (4)를 테일러급수로 전개하여 2차항을 취하면,

$$1 \approx 1 + \frac{\Delta x}{|\dot{V}_{dg0}|} + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2|\dot{V}_{dg0}|^2} - \frac{1}{8} \left( \frac{2\Delta x}{|\dot{V}_{dg0}|} + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{|\dot{V}_{dg0}|^2} \right)^2 \quad (5)$$

식 (5)를 정리하면,

$$0 \approx \frac{\Delta x}{|\dot{V}_{dg0}|} + \frac{\Delta y^2}{2|\dot{V}_{dg0}|^2} - \frac{\Delta x(\Delta x^2 + \Delta y^2)}{2|\dot{V}_{dg0}|^3} - \frac{(\Delta x^2 + \Delta y^2)^2}{8|\dot{V}_{dg0}|^4} \quad (6)$$

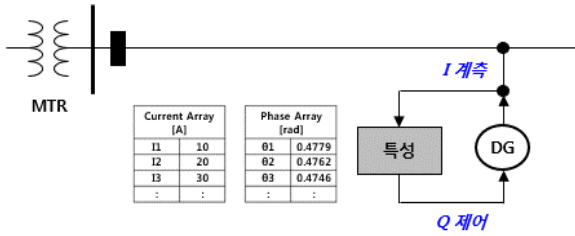


그림 8 전류측정치 기준 무효전력 제어  
Fig. 8 Current measurement based reactive power control

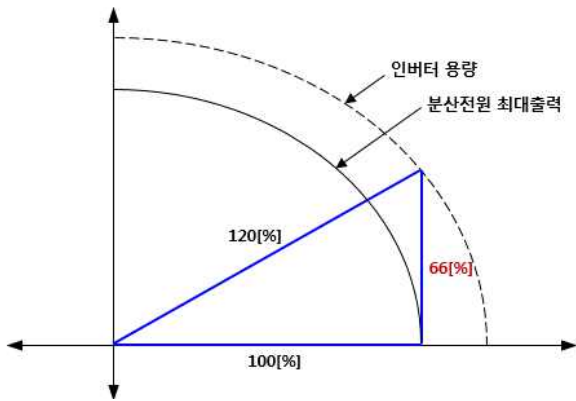


그림 9 하나의 분산전원이 연계된 예제계통  
Fig. 9 Example distribution line with one DG

식 (6)에서 크기가 작은 3항과 4항을 무시하고 양변에  $|V_{dg0}^{\cdot}|$  를 곱하면,

$$0 \approx \Delta x + \frac{\Delta y^2}{2|V_{dg0}^{\cdot}|} \quad (7)$$

분산전원 연계전 전압이 1[pu]에 근접하므로( $|V_{dg0}^{\cdot}| \approx 1$ ),

$$0 \approx \Delta x + \frac{\Delta y^2}{2} \quad (8)$$

식 (8)에  $\Delta x = IR\cos\theta + IX\sin\theta$ 와  $\Delta y = IX\cos\theta - IR\sin\theta$ 를 대입하면,

$$0 = 2IR\cos\theta + 2IX\sin\theta + I^2 X^2 \cos^2\theta - 2I^2 RX\cos\theta\sin\theta + I^2 R^2 \sin^2\theta \quad (9)$$

식 (9)를  $f(\theta)$ 라 하면 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson Method)을 이용하여 위상을 계산할 수 있으며, 분산전원이 연계되기 전의 전압을 유지하는 무효전력을 계산할 수 있다.

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \frac{f(\theta_{n-1})}{f'(\theta_{n-1})} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (10)$$

여기서,  $\theta_0 = 0$

$$f(\theta) = 2IR\cos\theta + 2IX\sin\theta + I^2 X^2 \cos^2\theta + I^2 R^2 \sin^2\theta - 2I^2 RX\cos\theta\sin\theta$$

$$f'(\theta) = 2IX\cos\theta - 2IR\sin\theta - 2I^2 X^2 \cos\theta\sin\theta + 2I^2 R^2 \cos\theta\sin\theta - 2I^2 RX\cos^2\theta + 2I^2 RX\sin^2\theta$$

식 (11)은  $\theta$  계산 시 수렴조건을 나타내고 있다.

$$|\theta_n - \theta_{n-1}| \leq \epsilon_\theta \quad (11)$$

여기서,  $\epsilon_\theta$ : 위상 허용오차

분산전원의 출력전류와 무효전력 제어량의 관계는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = P \cdot \tan \left[ \theta_k - \frac{\frac{R\cos\theta_k + X\sin\theta_k}{X\cos\theta_k - R\sin\theta_k} + \frac{I(X\cos\theta_k - R\sin\theta_k)}{2}}{1 + \frac{I\{(R^2 - X^2)\cos\theta_k\sin\theta_k + RX(1 - 2\cos^2\theta_k)\}}{X\cos\theta_k - R\sin\theta_k}} \right] \quad (12)$$

그림 7의 순서도는 분산전원 출력전류가 주어졌을 때 무효전력 제어량을 구하기 위하여 뉴턴-랩슨법을 이용한 반복추정 계산과정을 나타내고 있다.

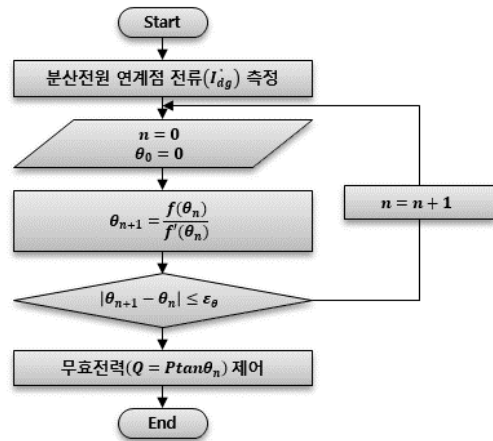


그림 7 반복추정에 의한 무효전력 제어량 계산  
Fig. 7 Calculation of reactive power control value

### 3.2 전류기준 무효전력 제어방법

본 논문에서는 측정오차가 큰 전압 대신 분산전원에서 출력되는 전류의 크기를 기준으로 한 무효전력 제어방법을 제시한다. 전류의 크기는 정확하게 측정할 수 있고 민감도가 상대적으로 낮기 때문에 기존의 전압을 기준으로 한 방법에 비해 무효전력을 정밀하게 제어할 수 있다. 전류기준 무효전력 제어방법은 분산전원 출력에 관계없이 배전선로의 전압을 분산전원이 연계되기 전

의 전압으로 유지할 수 있다. 분산전원이 연계되기 전 배전선로에 전압위반이 있다면 이를 해소할 수는 없지만, 분산전원으로 인한 과전압이 발생되지 않아 배전선로의 분산전원 수용성을 향상시킬 수 있다.

분산전원의 전류기준 무효전력 제어는 측정된 전류의 크기와 제안된 방법을 적용한 식으로 계산된 위상을 이용하여 수행된다. 그림 8에서 보는바와 같이 테이블 형태의 전류와 위상 데이터를 이용하면 배전선로 전압을 신속히 제어할 수 있어 배전계통의 효율적인 운영을 도모할 수 있다.

한전의 분산전원 연계기준에서 인버터의 용량은 분산전원 용량의 120[%]이다. 그림 9는 분산전원의 유효전력 출력이 100[%]일 때 인버터가 공급할 수 있는 무효전력의 최대치를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 분산전원 최대출력의 120[%] 용량을 가진 인버터가 공급할 수 있는 무효전력의 최대치는 유효전력의 66[%]이다.

분산전원 연계전의 전압을 분산전원 설치 이전의 상태로 회복하는데 필요한 무효전력량은 분산전원의 설치위치에 따라 달라진다. 무효전력에 의한 전압조정 효과가 유효전력 역조류에 의한 전압상승 보다 크기 때문에 유효전력에 대한 무효전력의 비는 선로 인출단에서 가장 크다. 한전의 특고압 배전선로에서 일반적으로 사용되는 ACSR 160[mm<sup>2</sup>] 전선의 경우에 분산전원 유효전력 출력이 10000[kW]라면 이를 회복하는데 필요한 무효전력의 최대치는 4900[kVar] 정도가 된다. 이는 분산전원의 120[%] 용량을 가진 인버터의 무효전력 최대치인 6600[kVar] 보다 작으므로 어떠한 조건에서도 본 논문에서 제시하는 무효전력 제어방법의 적용이 가능하다.

#### 4. 사례연구

본 논문에서 제안된 전류기준 무효전력 제어방법의 유용성을 검증하기 위하여 MATLAB을 이용한 시뮬레이션 사례연구를 두 가지 케이스에 대하여 수행하였다.

##### 4.1 CASE 1: 하나의 분산전원이 연계된 경우

그림 10은 구간 5개, 노드 6개, 분산전원 1개로 구성된 예제 배전계통을 나타내고 있다. 배전선로의 선종은 ACSR 160[mm<sup>2</sup>] 이고 구간별 공장은 2[km]로서, 각 구간의 선로 임피던스는 0.4048+j0.7782[Ω]이다.

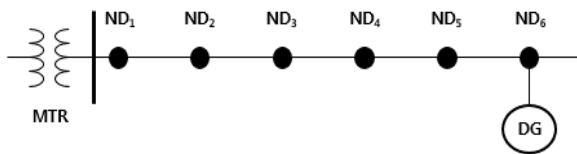


그림 10 하나의 분산전원이 연계된 예제계통

Fig. 10 Example distribution line with one DG

표 3은 부하량과 분산전원 출력 조건에 따른 4가지 시뮬레이션 시나리오의 입력 데이터를 나타내고 있다.

표 3 CASE 1의 입력데이터

Table 3 Input data for CASE 1

| 구분  | Load  |         | DG    |
|-----|-------|---------|-------|
|     | P[kW] | Q[kVar] | P[kW] |
| I   | 1800  | 871.78  | 2000  |
| II  | 1800  | 871.78  | 8000  |
| III | 5400  | 2615.34 | 2000  |
| IV  | 5400  | 2615.34 | 8000  |

표 4에서 전류는 표 3의 부하량과 분산전원 출력조건에 따른 MATLAB 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 위상과 무효전력은 본 논문에서 제시하는 제어방법에 의해 계산된 무효전력 제어량이다.

표 4 CASE 1의 전류, 위상, 무효전력

Table 4 Current, phase and reactive power in CASE 1

| 구분  | I[A]  | θ[°] | Q[kVar] |
|-----|-------|------|---------|
| I   | 57.2  | 27.4 | -1035   |
| II  | 224.8 | 25.4 | -3806   |
| III | 57.7  | 27   | -1019   |
| IV  | 277.5 | 25.3 | -3783   |

표 5는 분산전원 연계전의 전압과 연계후의 전압을 비교하고 있다. 표에서 보는바와 같이 본 논문에서 제시하는 전류기준의 무효전력 제어방법을 적용하면 분산전원이 연계된 후에도 전압변동 없이 분산전원이 연계되기 전의 전압을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

표 5 CASE 1의 각 노드별 전압 오차 비교

Table 5 Voltages comparison in CASE 1

| 구분  | ND <sub>1</sub> | ND <sub>2</sub> | ND <sub>3</sub> | ND <sub>4</sub> | ND <sub>5</sub> | ND <sub>6</sub> |       |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| I   | 연계전             | 13221           | 13189           | 13165           | 13147           | 13136           | 13133 |
|     | 연계후             | 13221           | 13189           | 13164           | 13146           | 13135           | 13132 |
|     | 오차[%]           | 0.00            | 0.00            | 0.00            | 0.01            | 0.01            | 0.01  |
| II  | 연계전             | 13221           | 13189           | 13165           | 13147           | 13136           | 13133 |
|     | 연계후             | 13222           | 13185           | 13158           | 13141           | 13133           | 13135 |
|     | 오차[%]           | 0.00            | 0.03            | 0.05            | 0.05            | 0.03            | 0.01  |
| III | 연계전             | 13221           | 13126           | 13053           | 13000           | 12969           | 12958 |
|     | 연계후             | 13221           | 13127           | 13054           | 13002           | 12971           | 12961 |
|     | 오차[%]           | 0.00            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.02  |
| IV  | 연계전             | 13221           | 13126           | 13053           | 13000           | 12969           | 12958 |
|     | 연계후             | 13221           | 13125           | 13051           | 13001           | 12973           | 12968 |
|     | 오차[%]           | 0.00            | 0.01            | 0.01            | 0.00            | 0.03            | 0.08  |

4.2 CASE 2: 다수의 분산전원이 연계된 경우

그림 11은 CASE1 그림 10의 예제계통에서 분산전원이 노드 ND<sub>2</sub>와 노드 ND<sub>6</sub>에 연계된 경우의 사례를 나타내고 있다.

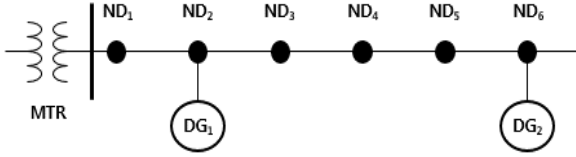


그림 11 다수의 분산전원이 연계된 예제계통

Fig. 11 Example distribution line with two DGs

표 6은 시나리오별로 부하량과 분산전원 출력량을 나타내고 있다.

표 6 CASE 2의 입력데이터

Table 6 Input data for CASE 2

| 구분  | Load  |         | DG <sub>1</sub> | DG <sub>2</sub> |
|-----|-------|---------|-----------------|-----------------|
|     | P[kW] | Q[kVar] | P[kW]           | P[kW]           |
| I   | 1800  | 871.78  | 2000            | 8000            |
| II  | 1800  | 871.78  | 8000            | 2000            |
| III | 5400  | 2615.34 | 2000            | 8000            |
| IV  | 5400  | 2615.34 | 8000            | 2000            |

표 7에서 전류는 시뮬레이션 결과이고, 위상과 무효전력은 본 논문의 방법에 의한 무효전력 제어량이다.

표 7 CASE 2의 전류, 위상, 무효전력

Table 7 Current, phase and reactive power in CASE 2

| 구분  |                 | I[A]  | θ[°] | Q[kVar] |
|-----|-----------------|-------|------|---------|
| I   | DG <sub>1</sub> | 57.4  | 28   | -1063   |
|     | DG <sub>2</sub> | 224.9 | 25.4 | -3806   |
| II  | DG <sub>1</sub> | 226.9 | 26.7 | -4031   |
|     | DG <sub>2</sub> | 57.2  | 27.4 | -1035   |
| III | DG <sub>1</sub> | 57.5  | 27.4 | -1035   |
|     | DG <sub>2</sub> | 227.2 | 25.3 | -3783   |
| IV  | DG <sub>1</sub> | 228.8 | 26.7 | -4032   |
|     | DG <sub>2</sub> | 57.9  | 27.4 | -1035   |

표 8은 분산전원 연계 전후의 전압과 오차를 나타내고 있다. 표에서 보는바와 같이 분산전원 연계 전후의 전압이 오차 0.08 [%] 이내로 변동이 없음을 알 수 있다. 사례연구를 통하여 배전 선로에 다수의 분산전원이 연계되어 있더라도 본 논문에서 제시한 무효전력 제어방법이 각각의 분산전원에 독립적으로 적용되어 전압상승을 억제할 수 있음을 알 수 있다.

표 8 CASE 2의 각 노드별 전압 오차 비교

Table 8 Voltage comparison in CASE 2

| 구분  |       | ND <sub>1</sub> | ND <sub>2</sub> | ND <sub>3</sub> | ND <sub>4</sub> | ND <sub>5</sub> | ND <sub>6</sub> |
|-----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| I   | 연계전   | 13221           | 13189           | 13165           | 13147           | 13136           | 13133           |
|     | 연계후   | 13222           | 13182           | 13154           | 13137           | 13129           | 13131           |
|     | 오차[%] | 0.00            | 0.05            | 0.08            | 0.08            | 0.06            | 0.02            |
| II  | 연계전   | 13221           | 13189           | 13165           | 13147           | 13136           | 13133           |
|     | 연계후   | 13222           | 13186           | 13162           | 13144           | 13133           | 13130           |
|     | 오차[%] | 0.00            | 0.02            | 0.02            | 0.02            | 0.03            | 0.03            |
| III | 연계전   | 13221           | 13189           | 13165           | 13147           | 13136           | 13133           |
|     | 연계후   | 13222           | 13182           | 13154           | 13137           | 13129           | 13131           |
|     | 오차[%] | 0.00            | 0.05            | 0.08            | 0.08            | 0.06            | 0.02            |
| IV  | 연계전   | 13221           | 13126           | 13053           | 13000           | 12969           | 12958           |
|     | 연계후   | 13221           | 13125           | 13053           | 13001           | 12969           | 12959           |
|     | 오차[%] | 0.00            | 0.01            | 0.00            | 0.00            | 0.00            | 0.00            |

5. 결 론

분산전원의 도입이 확대됨에 따라 전압상승 억제를 위해 다양한 무효전력 제어방법이 제시되고 있다. 기존 방법은 대부분 전압을 기준으로 무효전력을 제어하는데 전압은 측정오차가 크기 때문에 무효전력을 정확히 제어하기 어렵다. 본 논문에서는 분산전원 인버터의 출력전류를 기준으로 한 무효전력 제어방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 적용하면 분산전원 연계후의 전압을 분산전원이 연계되기 전의 전압으로 유지할 수 있다. 제시된 무효전력 제어방법은 MATLAB을 이용한 시뮬레이션 사례연구를 통하여 유용성을 검증하였다. 제안된 방법을 실제계에 적용하면 분산전원 연계로 인한 과전압을 해소할 수 있을 뿐만 아니라 분산전원 수용성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 4th basic plan for renewable energy", pp. 5, 2014.
- [2] J. Kim, J. Jung and J. Park, "Current status of the distributed generation connection in distribution system in Korea and abroad", The proceedings of KIEE, Vol 63, No. 4, pp. 16-21, 2014.
- [3] A. Borghetti, F. Napolitano and C. A. Nucci, "Volt /Var optimization of unbalanced distribution feeders via mixed integer linear programming", Power Systems Computation Conference (PSCC), pp. 1-7, 2015.
- [4] Y. Liu, P. Zhang and X. Qiu, "Optimal reactive power and voltage control for radial distribution system", in IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 85-90, 2000.
- [5] Z. Hu, X. Wang, H. Chen and G. Taylor, "Volt/VAr control in distribution systems using a time-interval based ap-

proach", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 5, pp. 548-554, 2003.

- [6] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuzza and E. R. Sanseverino, "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multi objective approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 1516-1527, 2004.
- [7] R. Baldick and F. F. Wu, "Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitors and regulators" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 805-812, 1990.
- [8] Y. I. Kim, I. H. Lim, M. S. Choi, S. J. Lee, S. W. Lee and B. N. Ha, "The optimal Volt/Var control algorithm with distributed generation of distribution system" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 59, No. 2, pp. 298-305, 2010.
- [9] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato and R. Romero, "A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 48, No. 1, pp. 123-130, 2013.
- [10] J. W. Smith, W. Sunderman, R. Dugan, B. Seal, "Smart inverter Volt/Var control functions for high penetration of PV on distribution systems" Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES, pp. 1-6, 2011.
- [11] KEPCO Department of distribution planning Division of distribution technology, "Development of high-precision distribution functionalistic equipment", pp. 2, 2016
- [12] IEC61850-90-7, "Communication networks and systems for power utility automation -Part 90-7: Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems", 2013.
- [13] D. Park, "Improvement propulsive state of distribution generation connection period in distribution system", Journal of the Electric World, pp. 26-31, 2015.

## 저 자 소 개



### 황 지 희(Jihui Hwang)

1995년 2월 16일생. 2016년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 첨단공학과 석사과정

Tel : 055-249-2630

E-mail : hwangjh899@gmail.com



### 임 성 일(Seongil Lim)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수

Tel : 055-249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr