

분산전원이 연계된 배전계통의 최적 전압/무효전력 제어 알고리즘

논문
59-2-12

The Optimal Volt/Var Control Algorithm with Distributed Generation of Distribution System

김영인* · 임일형** · 최면송† · 이승재*** · 이성우§ · 하복남§§

(Young In Kim · Il Hyung Lim · Myeon Song Choi · Seung Jae Lee · Sung Woo Lee · Bok Nam Ha)

Abstract - In this paper, a new algorithm of optimal Volt/Var Control is proposed using Volt/Var control for the Distribution Automation System (DAS) with Distributed Generation (DG) based on the modeling of the distributed load and the distributed current. In the proposed, algorithm based on the modeling of the distributed load and the distributed current are estimated from constants of four terminals using the measurement of the current and power factor from a Feeder Remote Terminal Unit (FRTU) and DG data from RTU for DG. For the optimal Volt/Var Control, the gradient method is applied to find optimal solution for tap, capacity and power control of OLTC (On-Load Tap Changers), SVR (Step Voltage Regulator), PC (Power Condenser) and DG (Distributed Generation). In the case studies, the estimation and control of the voltages have been testified in a radial distribution system with DG using matlab program.

Key Words : Volt/Var Control, Distribution system, Distributed load, Distribution Generation

1. 서론

전압/무효전력 제어는 전압제어와 무효전력 제어 기능을 통합적으로 운영함으로써 배전계통의 조상설비의 투입이나 개방 명령, 전압조절장치의 탭 조절을 미리 예측하고 원격으로 제어를 시행하여 지속적으로 부하가 변할 때라도 허용 전압변동 범위를 유지하고 손실을 최소화하는 것이다.

전압제어는 배전선로의 전압을 올리거나 낮추기 위해서 변전소의 주변압기 탭 절환 장치(OLTC: On-Load Tap Changer)와 단계별 전압 조절장치(SVR: Step Voltage Regulators)를 조절하는 것을 의미하며, 무효전력제어는 Power Condenser(PC)등의 조상설비를 통하여 투입이나 개방 명령을 통해 무효전력을 제어하는 것이다[1-4]. 이 논문에서는 이들 제어변수 뿐만 아니라 분산전원 또한 고려하였다. 전 세계적으로 교도의정서 등 환경문제의 대두로 인해 신 재생에너지를 비롯하여 분산전원의 사용이 증가하고 그에 따른 신재생 에너지 정책사업 및 기술 개발이 이루어지고 있다. 따라서 향후 배전계통에 분산전원이 연계되어 운영될 가능성이 크고 이렇게 배전계통에 연계되어 운영할 때의 운영 방법 또한 고려되어야 한다.

본 논문에서는 향후 분산전원이 배전 계통에 연계되어 운

전될 때 계통의 모델링 방법과 하나의 제어 변수로서의 다른 제어변수인 OLTC, SVR, Power Condenser(PC)와 같이 전압/무효전력 제어 알고리즘을 통하여 제어하는 방법에 대해 기술 하였다.

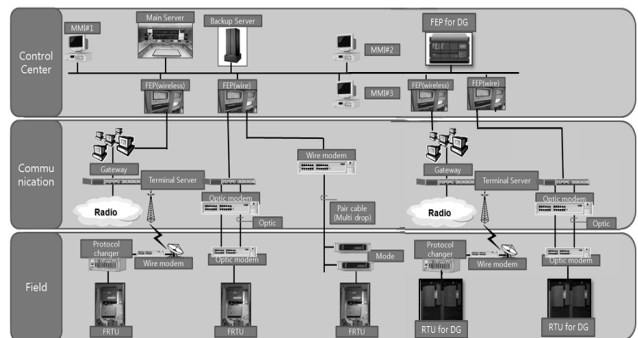


그림 1 분산전원 연계 운영 시스템 구성도
Fig. 1 Block diagram of operation system with Distributed Generation

그림 1은 분산전원이 연계 운영 될 때의 구성도이다. 분산전원 운영 시스템과 배전 자동화 시스템 상호간의 통신을 통해 제어변수인 OLTC, SVR, Power Condenser(PC) 그리고 분산전원을 제어하게 된다[5-8]. 이때의 계통의 시스템간의 데이터를 취합하고 전송하기위한 FRTU(Feeder remote terminal unit)와 분산전원 설비의 데이터 취합 및 전송을 위한 분산전원용 RTU를 통해 계통이 구성된다[9]. 여기서 FRTU는 국내의 배전 자동화 시스템을 운영 감시하는데 반드시 필요한 설비로써 원거리에 산재되어 있는 FRTU를 현장에 가지 않고 운전 상태를 감시하고 상황실에서 원격명령을 통해 제어하며 전압과 전류 등 선로 운전 정보를 수집하

* 정 회 원 : LS산전 선형기술연구소 연구원
** 정 회 원 : 명지대학 공대 전기공학과 전임연구원
*** 펠로우회원 : 명지대학 공대 전기공학과 교수
§ 정 회 원 : 한전 전력연구원 책임연구원
§§ 정 회 원 : 한전 전력연구원 수석연구원
† 교신저자, 종신회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수

E-mail : mschoi@mju.ac.kr
접수일자 : 2009년 10월 6일
최종완료 : 2010년 1월 4일

여 배전계통을 운영한다. 또한 분산전원용 RTU도 이와 같은 기능과 데이터 수집, 처리능력을 가지게 된다[10].

다수의 분산 전원을 배전 계통에 연계함으로써, 고품질, 고 신뢰도의 전력을 수용가에 공급하게 되고 현재의 배전계통 운영방식 뿐 아니라 분산전원이 연계 되었을 때의 운영 방식 및 계통 해석방식이 필요하다. 이러한 새로운 배전 계통에서의 분산전원 또한 하나의 제어 변수로 현재의 분산전원 계통연계 기술 기준에서와는 달리 능동적으로 계통 전압을 조절 가능하도록 운영 될 것으로 예측된다.

본 논문에서는 향후 분산전원이 배전계통에 연계되어 운전될 때의 계통구성을 통해 분산전원의 계통 연계방법과 하나의 제어변수로서 OLTC, SVR, Power Condenser(PC)와 함께 통합적으로 운영함으로써 배전계통의 안정적이고 효율적인 운영방식에 대해 소개 하였다. 이 때 국내의 배전계통의 앞선 기술과 자동화 기술을 이용하여 더 정확하고 최적화된 전압/무효전력 제어를 통한 계통운영방식을 실현하기 위해 GM(Gradient Method)을 이용하였다. 또한 분산전원을 포함한 각각의 제어설비들의 조절에 따른 전압 변동을 예측하기 위해 배전계통의 부하를 기존의 집중부하형태가 아닌, 실제 널리 퍼져 있는 수용가들의 부하들이 분포되어 있다고 가정하여 분포부하형태로 모델링하였다. 분포부하 해석을 통해 얻은 4단자 정수를 이용하여 배전계통을 해석하고 각 구간의 전압을 구하고 변화를 예측하였다. 그 다음 목적함수를 이용하여 GM을 통해 분산전원 크기와 OLTC, SVR, Power Condenser(PC)들의 탭과 용량 조절에 대한 해를 구하였다.

2장에서는 분산전원이 연계 된 배전계통의 분포부하 형태의 모델링 방법에 대하여 설명하고, 3장에서는 분산 전원과 전압/무효전력 제어를 위해 Gradient method을 이용하여 분산전원 및 각 설비의 최적 운영 해를 구하는 알고리즘을 소개한다. 또한 4장에서는 Matlab을 이용한 사례연구를 통해 제안한 알고리즘과 분산전원 연계방법에 대한 타당성 검증 결과를 제시할 것이다.

2. 분산전원이 연계 된 배전 계통

2.1 분포 부하 모델링을 통한 배전 계통의 구성

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

본 논문에서는 배전 계통 해석에 대한 기존의 연구와는 달리 실제와 가깝게 집중부하 형태가 아닌 분포부하 형태로 배전계통을 모델링하였다. 배전계통은 실제로 선로 중간에 설치 된 많은 변압기에서 부하로 전력이 공급되므로 분포부하 형태로 그림 2와 같이 배전 계통을 모델링 하였다. 부하

는 선로 중간에 균등하게 분포되었다고 가정하였으며 부하에 공급되는 전력은 부하 점의 전압에 따라 틀리진다고 보아 분포부하를 구간 내에 균등하게 분포한 등가부하 어드미턴스로 모델링 하였다.

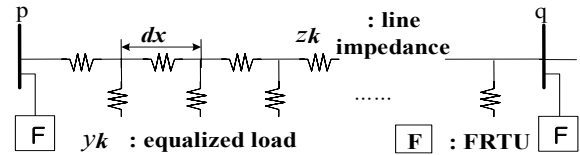


그림 2 분포 부하 배전 계통 모델링

Fig. 2 Distributed load modeling of a section in distribution system

이는 기존의 집중부하형태의 계통해석 보다 수용가에 널리 분포되어 퍼져있는 부하들과 유사하게 계통을 모델링 하였다는데 그 의미를 두고 있다. 분포 부하로 계통을 모델링 하면 계통의 특성상 각 구간에서 송전단과 수신단으로 단자를 나눌 수 있게 되고 이를 이용하여 선로정수는 양단자의 어느 쪽에서 보더라도 대칭이다. 또한 회로 내에 기전력을 갖지 않기 때문에 4단자 회로로 취급할 수 있다. 이로 인하여 구해진 4단자 정수는 선로 해석을 편리하게 하여 계통의 운영이나 계통에 필요한 알고리즘들의 계산들에서도 편리성을 제공 할 것이다[11].

국내의 배전 자동화 시스템은 원거리에 산재되어 있는 FRTU를 현장에 가지 않고 운전 상태를 감시하고 상황실에서 원격명령을 통해 제어하며 전압과 전류 등 선로 운전 정보를 수집하여 배전계통을 운영하는데 여기서 선로 각 구간의 전류크기, 역률각 정보를 취득한다. 여기서 위상각이 아닌 역률각을 취득하는 것은 정보 취득에 대한 시간 동기화에 대한 문제를 방지하기 위해서이다. 역률각을 통해 동기화에 대한 문제를 벗어남으로써 좀 더 정확한 알고리즘을 구현할 수 있다.

그림 2과 같이 분포 정수 회로로 해석한 선로에서의 4단자 정수를 구하는 방법은 다음과 같다.

한 구간에서의 전압강하와 전류 유출량은 다음과 같다.

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

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

여기서, zdx 는 단위 길이당 선로 임피던스

ydx 는 단위 길이당 등가부하 어드미턴스

분포 정수 해석방법에 의해 미분방정식을 풀고 선로의 임의 점에서 전압, 전류 방정식을 구하면 다음과 같다.

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

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

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

등가부하 어드미턴스를

I. 부하단 모선의 전류 크기는 FRTU에서 측정된 전류 크기와 같다.

II. 부하단 모선의 전압과 전류의 위상각 차는 FRTU로부터 취득되는 역률각과 같다.

이 두 가지 사실과 함께 Newton-Raphson method를 이용하여 전압, 전류 방정식을 풀면 등가부하 어드미턴스를 구해 낼 수 있다. 여기서 구한 등가 부하 어드미턴스를 이용하여 부하단 모선의 전압과 전류를 구할 수 있다. 현재 부하 상태의 정보는 등가부하 어드미턴스로 나타내어지므로 식(3), (4)는 이 구간의 모든 정보를 나타내고 있다. 이것을 4단자 정수로 구간의 정보를 나타내면 식(5)와 같다.

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

$$\begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\beta_k & -Z_k \sinh\beta_k \\ -\frac{1}{Z_k} \sinh\beta_k & \cosh\beta_k \end{pmatrix} \quad (5)$$

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

계통의 모델링은 이제 까지 선로의 전체 구간에 걸쳐서 똑같은 선로 정수가 균일 하게 분포 된 것으로 보았으나 실제로는 서로 다른 선로가 연결되거나 분기선이 있고 또한 선로의 중간에 변압기가 접속 된다든가 해서 복잡한 회로를 구성하게 된다.

배전계통 구성 특성에 따라 전류유출구간, 분기선로구간, 전압/무효전력 제어 설비구간 그리고 2.2절에서 따로 다루게 될 분산전원이 연계된 구간 등을 해석하기 위해 각 구간의 특성에 맞는 모델링을 통해 4단자 정수를 구할 수 있다.

간략히 설명하면, 전류유출구간은 노드에 역률 조정 콘덴서 등의 계통 제어 장치 등이 달려 있어 모선에 전류 유출이 생기는 구간을 전류 유출 구간이라고 하고 전류에서 그 유출 분만큼을 제외하고 4단자 정수를 구해 낼 수 있다. 또한 분기선로구간은 방사형 배전계통에서 선로의 중간 중간에 분기점이 있는데 이러한 경우의 분기 선로의 current distribution factors는 부하의 가중치에 의해 계산된다. 부하의 가중치는 각 구간의 비로 io하는데 이는 분기 선로 구간에는 변압기와 같은 부하 설비를 통해 부하로 전력이 공급되기 때문에 각 구간별 부하의 총 계약 부하 용량을 파악할 수 있으므로 부하의 비를 구할 수 있다. 즉, 부하가 많으면 부하전류도 많다는 사실을 이용하여 4단자 정수를 구해 낼 수 있다. 그리고 선로 중간에 SVR이 설치되어 진 구간이 있는데 이는 변압기 임피던스의 변압비고 전 부하로 전력 4단자 정수를 구해 낼 수 있다[12]. 마지막으로 이 논문에서 가장 중점D단자고 해석한 분산전원이 연계 된 구간의 모델링은 2.2절에서 자세히 다루도록 하겠다.

2.2 분산전원이 연계 된 배전 계통 구간 모델링

2.2.1 분산 전원

배전계통의 분산전원은 회전기 타입(Rotating-type Generator)의 AC전력을 발전하는 동기기와 유도기 등을 사용하는 풍력발전이나 정적인 타입(Static-type Generator)의

DC전력을 발전하는 태양광 발전 칩 연료전기등이 있다. 인버터와 컨버터를 통해 이들 분산전원을 계통에 연계하여 계통을 안정적으로 운영을 하게 되는데 이 때 연계 된 후에 계통 모델링이나 운영방식에 대해서는 아직 연구가 진행 중에 있다. 이 논문에서는 이러한 분산 전원이 계통에 연계 되었을 때 계통 전압에 미치는 영향을 분석하였고 이를 위해 분포 부하 형태의 분산전원 모델링 방법과 그를 통해 4 단자 정수를 얻어 내는 방법을 소개하고 모델링을 통해 계통에 미치는 영향 및 제어변수로써 분산전원을 다루었을 때 계통 운영에서의 이점 및 효율에 대해 말하고 있다.

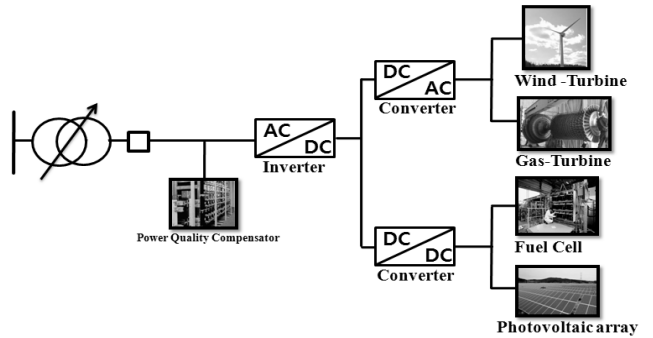


그림 3 분산 전원 계통 연계 방식
Fig. 3 Connecting Method of distributed generation in distribution system

그림 3은 분산전원 발전 설비들의 배전계통 연계 방식을 간단히 보이고 있다. 이러한 계통연계를 통해 분산전원의 출력 전압, 전류, 역률 등 모든 데이터를 얻을 수 있고 이를 설비 기준에 맞게 운영할 수 있다. 또한 앞으로의 전력 계통의 연구가 진행되고 발전 되면서 분산전원을 통해 계통 전압을 조정 할 수 있을 것이다. 물론 지금의 분산전원 연계 기준으로는 이러한 분산전원의 능동적 조정은 계통의 안정적 운영을 위해 허용 되지 않지만 미래의 계통에서는 이러한 능동적 운영 또한 생각해 봐야 할 부분이라 분산전원을 제어설비로 보고 운영하는 방법 또한 3장에서 소개하고 사례연구를 해왔다.

2.2.2 분산 전원 계통 연계 모델링

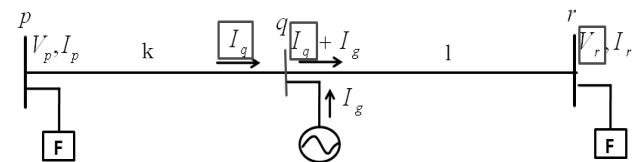


그림 4 분산전원이 연계 되어 있는 구간
Fig. 4 A Section with Distribution Generation

배전계통 내 분산전원이 연계된 구간은 그림 2와 같이 나타내었다. 하나의 구간을 분산전원이 연계되는 지역을 기점으로 q구간이 더 생겼다고 보고 q지점을 통해 분산전원이 연계된다. 이 지점부터 분산전원이 연계 된 지점 전 구간까지의 4단자 정수와 연계 된 지점 후까지의 4단자 정수를 구

하게 된다. 이렇게 한 구간에 분산전원이 연계로 인하여 2개의 4단자 정수를 얻게 된다. 여기서 분산전원의 전압은 V_g 라고 하고 전류를 I_g 라고 하고 분산전원의 전력과 그에 관한 모든 정보를 운영자가 제어할 수 있고 운영자는 그 수치 또한 알고 있다. 이 점을 이용하여 q지점에서 분산전원이 연계되었을 때 q지점 이후의 전류는 $I_q + I_g$ 로 나타낼 수 있고 전압은 V_g 가 된다. 여기서 앞단과 뒷단의 전압, 전류 방정식을 구하게 되면 식(6)~(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_g = V_p \cosh \sqrt{z_k y} x - \frac{\sqrt{z_k y}}{y} I_p \sinh \sqrt{z_k y} x \quad (6)$$

$$I_q = -\frac{y}{\sqrt{z_k y}} V_p \sinh \sqrt{z_k y} x + I_p \cosh \sqrt{z_k y} x \quad (7)$$

$$V_r = V_g \cosh \sqrt{z_l y} x - \frac{\sqrt{z_l y}}{y} (I_q + I_g) \sinh \sqrt{z_l y} x \quad (8)$$

$$I_r = -\frac{y}{\sqrt{z_l y}} V_g \sinh \sqrt{z_l y} x + (I_q + I_g) \cosh \sqrt{z_l y} x \quad (9)$$

분포 정수 회로를 통해 위와 같은 전압, 전류 방정식을 얻어 내었을 때 이 식에서 미지수는 어드미턴스(y)와 q지점의 전류(I_q), r지점의 전압(V_r)이다. 이 미지수를 구해 낸다면 분산전원이 연계된 계통의 전압, 전류의 흐름을 구할 수 있고 분포 부하 형태의 계통 모델링 및 4단자 정수를 구할 수 있게 된다. 미지수를 구해 내기 위해 식(9)의 I_q 에 식(5)를 넣어 미지수 I_q 를 없애고 난 후에 그 식과 식(8)인 V_r 의 제곱을 구하게 된다.

$$I_q^2 = I_q \cdot I_q^* \quad (10)$$

$$V_r^2 = V_r \cdot V_r^* \quad (11)$$

식(10),(11)을 Newton-Raphson method을 이용하여 미지수인 어드미턴스(y)를 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 어드미턴스(y)를 식(7)에 대입하면 I_q 또한 쉽게 구해진다. 마지막으로 식(6)에 구해진 어드미턴스(y)와 I_q 를 대입하면 식(8) 또한 완벽한 식으로 V_r 을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 식을 통해 분산전원이 연계된 계통의 전압과 전류를 알아낼 수 있고 4단자 정수 또한 식(12),(13)에 위의 알고리즘을 통해 구해진 y, I_q , V_r 을 넣으면 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_p \cosh \sqrt{z_k y} & -\frac{\sqrt{z_k y}}{y} I_p \sinh \sqrt{z_k y} \\ -\frac{y}{\sqrt{z_k y}} V_p \sinh \sqrt{z_k y} & I_p \cosh \sqrt{z_k y} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} V_g \cosh \sqrt{z_l y} & -\frac{\sqrt{z_l y}}{y} (I_q + I_g) \sinh \sqrt{z_l y} \\ -\frac{y}{\sqrt{z_l y}} V_g \sinh \sqrt{z_l y} & (I_q + I_g) \cosh \sqrt{z_l y} \end{pmatrix} \quad (13)$$

이러한 수식을 통해 분산전원이 연계된 계통에서의 분포 부하 모델링을 통한 해석 방법과 그 구간의 4단자 정수를

얻었다. 이를 이용하여 배전 계통의 분산전원이 연계 되었을 때의 전압의 변화와 분산전원을 SVR과 Power Condenser(PC)등과 함께 하나의 제어변수로 봤을 때 운영 최적화된 전압/무효 전력 운영방법에 대해 3장에서 설명하도록 하겠다.

3. 분산전원이 연계된 배전계통의 전압/무효전력 제어

3.1 배전계통 설비와 분산전원을 이용한 계통 최적 운영

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

이 평가방법은 변전소 인출단과 계통에 연계된 분산전원, 배전계통 내의 전압/무효전력 설비인 OLTC, DG, SVR Power Condenser(PC)등의 크기와 탭, 용량을 변동시켜가며 목적함수가 최소가 되는 설정치를 찾는 것이다. 전압/무효전력의 최적 제어를 위한 목적함수는 식(14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(X) = \sum w_i (v_{ni} - |V_i|)^2 \quad (14)$$

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

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

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

여기서, A : 제어 변수

V : 노드의 전압

V_{ni} : 각 노드의 전압율

V_i : 각 노드의 측정 전압

w_i : 각 선로의 가중치

n : 전체 노드 수

목적 함수에 나타난 가중치 w_i 는 선로의 중요 부하의 가중치이다. 만약 n번째 노드에 가중치가 크다면 전압율과 측정 전압의 편차가 동일하다고 하여도 목적함수는 커지게 되므로 가중치에 따라 그 노드의 전압 편차의 영향을 받는다. 즉, 가중치가 큰 노드의 중요도가 커지게 된다. 또한 분산전원도 하나의 제어 변수로 나타내어 목적함수를 Gradient Method를 통해 충족시키도록 하여 분산전원 자체의 크기를 제어할 수 있다고 보고 알고리즘으로 나타내었다.

현재 계통에서는 분산전원 발전 설비를 연계하고자 하면 계통전압의 ±4%이상 변동 되지 않도록 계통에 연계하여야 한다[13]. 그리고 공급전압 안정성 유지를 위해 분산전원의 능동적인 전압조절을 할 수 없도록 계통연계 기술 기준에 되어있다. 이 논문에서는 분산전원 발전 설비가 계통에 이미 동기화 문제를 충족시키며 연계된 상태에서 운영의 방법에 대한 알고리즘으로 동기화는 문제가 되지 않는다. 또한 능동적 운영에 있어서는 알고리즘은 능동적 운영을 시킬 수 있고 연계 기술 기준에 맞게 고정 시킬 수 있도록 구성하였다. 이는 앞으로의 계통 운영에서는 이러한 능동 운영을 통해 계통 전압을 제어할 수 있는 분산전원 해석방법이

필요할 것이라 생각하여 하나의 제어 변수로써 제어 가능하도록 한 것이다. 현재의 상황과 앞으로의 상황에 대해 두 가지 다 충족 할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 사례연구를 통해 분산전원의 전압 크기를 고정하였을 때의 전압과 분산전원 또한 제어변수로 하여 제어하였을 때의 전압을 보여 줌으로써 새로운 운영 방법에 대한 소개를 하였다.

3.2 분산전원이 연계 된 배전계통의 최적 전압/무효전력 제어

목적 함수가 최소값을 가지는 최적의 전압 및 무효전력을 찾기 위하여 Gradient Method 방법을 이용하였다. 이는 최소가 되는 지점을 향해 기울기를 변동시켜가며 답을 찾는 방법이다. 이는 식(15)의 조건에서부터 시작한다.

$$\frac{\partial J(X + \Delta X)}{\partial t} = 0 \tag{15}$$

여기서,

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

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

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

목적함수 J(X)를 gradient 방법으로 나타내면 ∇J_k 로 표현된다.

$$\nabla J_k = \frac{\partial J}{\partial a_k} = \left(\frac{\partial J}{\partial X}\right)^T \frac{\partial X}{\partial a_k} \tag{16}$$

또한, 제어 변수에 의한 상태 변수의 gradient vectors ∇X_k 는 식(17)와 같이 표현된다.

$$\nabla X_k = \frac{\partial X}{\partial a_k} \tag{17}$$

식(16)과 (17)을 이용하여 제어 변수 a_k 에 대해 F(X)로 표현하면 식(18)와 같다.

$$\frac{\partial F(X)}{\partial a_k} = \frac{\partial F(X)}{\partial X} \nabla X_k \tag{18}$$

이는 ∇X_k 로 식(19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla X_k = \left(\frac{\partial F(X)}{\partial X}\right)^{-1} \frac{\partial F(X)}{\partial a_k} \tag{19}$$

식(19)를 식(15)에 적용하면 Gradient method을 통해 목적 함수가 최소가 되는 부분을 구할 수 있다. 즉, 제어변수의 최적 값을 구할 수 있다. 이 값은 제어 변수인 OLTC, DG, SVR, Power Condenser(PC)들이 계통 운영을 위해 조절할 수 있는 최적의 셋팅 치를 나타낸다. 이렇게 전압/무효전력 알고리즘을 통해 얻어진 제어변수 값을 통하여 최적화된 계통을 얻을 수 있다.

4. 사례연구

본 논문의 사례 연구는 Matlab을 이용하여 그림 5와 같이 계통을 모의하였다. 예계통은 각각 9개의 노드로 구성된 8개의 선로가 6분할 3연계로 연결 되어 있는 방사형 구조의 배전 계통으로 node 1번은 OLTC가 설치 되어 있는 변전소 인출단 모선 부분이고 shunt capacitor 또한 인출단 모선에 달려 있어 무효전력을 보상하게 된다. node 2와 3, node 13과 14, node 35와 36, node 53과 54 사이에 무효전력 보상을 위한 Power Condenser(PC)가 존재한다.

표 1 제어변수의 초기 설정 값에서의 각 구간 전압
Table 1 Estimation of Voltage at Initial Setting of Control Variables

NODE	Voltage at Node(P.U.)									제어 변수			
	분산전원이 연계 된 계통의 모델링을 통한 각 구간 전압									OLTC	P C	SVR	D G
01~09	1	0.9594	0.9375	0.9312	0.9291	0.9289	0.9281	0.9337	0.9299	OLTC=1	PC=1	SVR=1	
10~17	1	0.9594	1	0.9916	0.9905	1.008	1.0074	0.9522	0.9914	OLTC=1	PC=1		DG=1
18~25	1	0.9594	0.9441	0.9423	0.9373	0.9358	0.9353	0.9522	0.9382	OLTC=1		SVR=1	
26~33	1	1	1	0.999	0.9967	0.9957	0.9951	0.9976	0.9963	OLTC=1			DG=1
34~41	1	0.9447	0.9229	0.9305	0.9271	0.9261	0.9256	0.9868	0.9267	OLTC=1	PC=1		
42~49	1	0.9447	0.9223	0.9156	0.915	0.9117	0.9111	0.9868	0.9183	OLTC=1		SVR=1	
50~57	1	0.9594	0.9561	0.9392	0.937	0.945	0.9445	0.949	0.9379	OLTC=1	PC=1	SVR=1	
58~65	1	0.9594	1	0.9845	0.9833	0.9823	0.9817	0.9522	0.9842	OLTC=1			DG=1

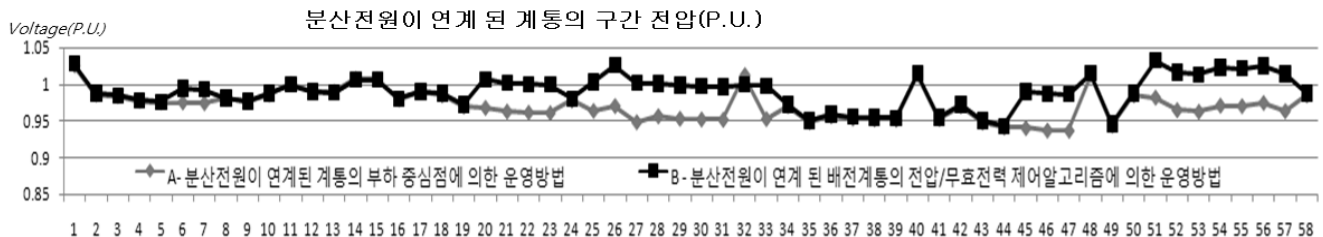


그림 6 분산전원이 연계 된 배전계통의 구간 전압(P.U.)
Fig. 6 Voltage of distribution system with distributed generation(P.U.)

또한 node5와 6, node 19와 20, node 44와 45, node 50과 51 사이에 SVR이 존재한다. 그리고 분산 전원발전 설비는 2번째 선로인 node 11과 12, 4번째 선로인 node 26과 27, 8번째 선로인 node 59와 60 사이에 존재하는 것으로 모델링하였다. 선로 임피던스는 모두 동일하게 현재 선로에 가장 많이 쓰이고 있는 배전자동화 시스템 database를 통해 취득한 R, X 성분은 1km당 0.0939, 0.1492로 설정하였고 선로의 길이는 배전자동화시스템을 기반으로 0.5km로 설정하였다. 또한 각 구간의 부하는 1MW로 설정하였다.

배전계통 구성 특성에 따라 전류유출구간, 분기선로구간, 전압/무효전력 제어 설비구간과 분산전원이 연계된 각 구간의 전압을 그림 5의 예제계통에 표시되어 있는 전류와 역률 각을 기반으로 분포부하 모델링을 통해 구해낸다. 표 1은 분포 부하 모델링을 통해 구해낸 각 구간의 전압이다.

표 1에서와 같이 모델링을 통해 얻은 전압을 이용하여 제안하는 알고리즘인 전압/무효전력제어 알고리즘을 통해 OLTC, SVR, PC 그리고 분산전원을 제어 했을 때의 결과값을 그림 6의 분산전원이 연계된 배전계통 각 구간 전압을 통해 확인 할 수 있고 이때의 제어 변수들의 셋팅치는 표 2에 나타내었다. 여기서 A는 부하중심점 운영방식을 통해 제어변수들을 제어했을 때의 결과이고 B는 전압/무효전력제어 알고리즘을 통해 얻은 결과이다.

표 2 운영 알고리즘에 따른 제어변수의 설정치

Table 2 Resetting Value of each operation Algorithm

NODE	제어 변수			
	A-부하 중심점 운영방식에 의한 구간전압			
01~09	OLTC=1.025	PC=1	SVR=1	
10~17	OLTC=1.025	PC=1		DG=1
18~25	OLTC=1.025		SVR=1	
26~33	OLTC=1.025			DG=1
34~41	OLTC=1.025	PC=1		
42~49	OLTC=1.025		SVR=1	
50~57	OLTC=1.025	PC=1	SVR=1	
58~65	OLTC=1.025			DG=1
B-전압/무효전력 제어 알고리즘에 의한 구간 전압				
01~09	OLTC=1.028	PC=1.017	SVR=1.018	
10~17	OLTC=1.028	PC=1.053		DG=1
18~25	OLTC=1.028		SVR=1.037	
26~33	OLTC=1.028			DG=1.026
34~41	OLTC=1.028	PC=1		
42~49	OLTC=1.028		SVR=1.049	
50~57	OLTC=1.028	PC=1.025	SVR=1.048	
58~65	OLTC=1.028			DG=1.021

또한 표 2에서는 제안하는 알고리즘이 배전계통 운영 측면에서 현재 배전자동화 시스템에서 사용되고 있는 운영 방법 중 하나인 부하중심점에 의한 운영방법을 나타내어 두 가지의 운영방법을 비교하였다. 그림 6는 표 2의 결과를 가지고 셋팅치가 조절 되었을 때 각각의 운영 방식을 비교하기 쉽게 분산전원이 연계된 배전계통의 구간 전압을 그래프로 나타내어 보기 쉽게 표현하였다. 그림을 통해 1P.U.를 기준으로 각 구간의 전압들이 얼마나 분산되어 있는지 확인 할 수 있다. 부하중심점에 의한 방법보다 제안하는 알고리즘이 더 1P.U.에서 적게 분산된 것을 확인 할 수 있다.

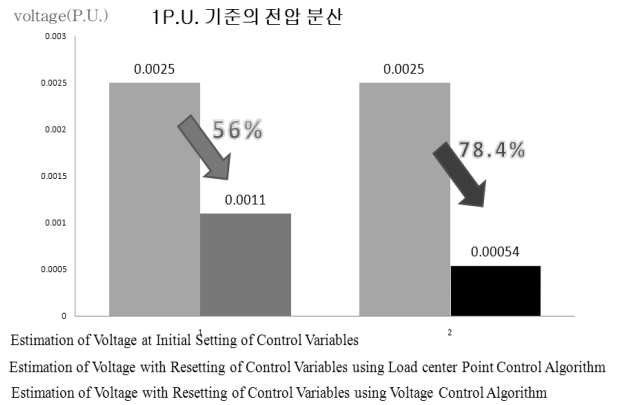


그림 7 운영 알고리즘에 따른 전압 분산
Fig. 7 Voltage variance of each operation Algorithm

또한 부하중심점에 의한 운영방법과 전압/무효전력 제어 알고리즘을 통한 운영방법을 통해 구해진 데이터들로 그림 7을 통해 기준전압인 1P.U.를 기준으로 배전계통 각 구간의 전압 분산을 계산하여 각각의 운영 방식이 얼마만큼의 효율적인 운영을 보이는지를 보였다. 부하중심점에 의한 운영방식은 운영을 통해 56%의 향상을 보였고 제안한 알고리즘은 78.4%의 향상을 보였다. 이것을 비교해 볼 때 부하중심점을 통한 운영방식보다 제안한 알고리즘이 22% 더 향상된 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 향후 분산전원이 배전계통에 연계되어 운전될 때의 계통구성을 통해 분산전원의 계통 연계방법과 하나의 제어변수로써 OLTC, SVR, Power Condenser(PC)와 함께 통합적으로 운영함으로써 배전계통의 안정적이고 효율적인 운영방식에 대해 제안하였다.

또한 배전계통의 부하를 기준과는 다르게 특정 위치에 집중하여 놓지 않고, 실제와 유사하게 분포부하 형태로 배전계통을 모델링하였다.

모델링을 통해 분산전원이 연계된 배전계통을 분포부하 형태로 해석하고 이를 대상으로 Gradient Method를 이용하여 전압/무효전력 제어 알고리즘을 위한 OLTC, SVR, Power Condenser(PC)등의 전압/무효전력 제어 설비들의 탭값과 용량을 결정짓는 방법을 제시하였고 또한 앞으로의 분산전원도 능동적 전압조절이 가능할 것이라는 전제하에 분산전원의 크기를 조절하여 배전계통을 효율적으로 운영하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위해 matlab을 이용하여 결과를 만들고 이를 현 배전계통 운영방식 중 하나인 부하중심점을 이용한 운영방식과 비교하여 그 우수성을 입증하였다.

전 세계적으로 신재생에너지를 비롯하여 분산전원이 증가하고 그에 따른 계통 운영방식을 필요로 하고 있다. 특히 국내의 전력기술이 해외진출하기 위해서는 이러한 시대에 발 맞추어나가야 할 것이다. 앞으로의 배전계통은 분산전원이 연계되고 이를 통해 많은 이익을 창출하게 될 것이다.

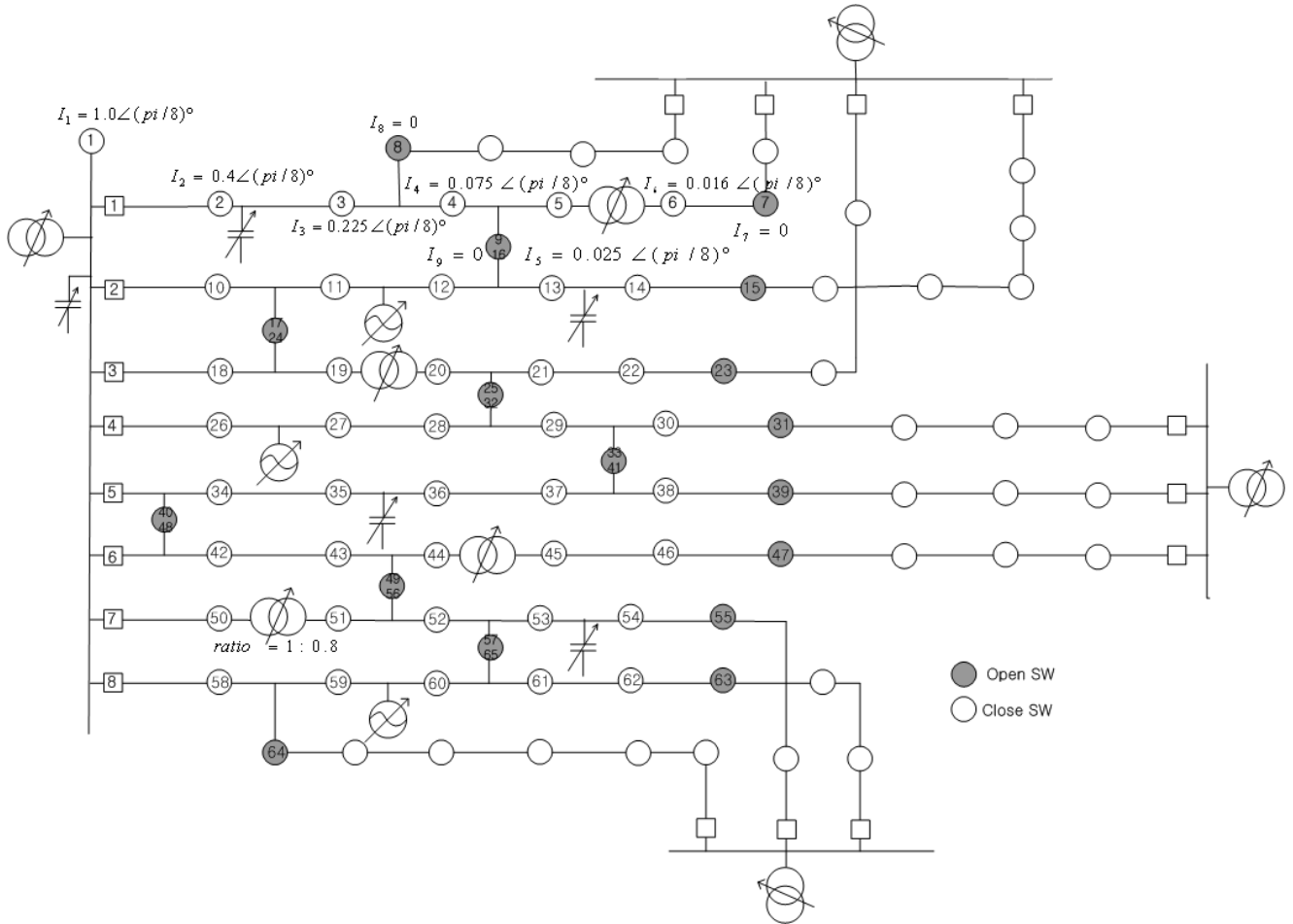


그림 5 예제 배전 계통
 Fig. 5 A example distribution system

이 논문이 배전계통에 분산전원이 연계 되었을 때의 안정적인 연계 알고리즘과 효율적인 운영 방식이 되어줄 것을 기대하고 있다.

참 고 문 헌

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

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

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

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

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

[6] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuzza, E.R. Sanseverino, "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach", IEEE Transactionson Power Systems, vol. 19, issue3, pp. 1516-1527, Aug. 2004.

[7] G. Ramakrishna, N.D. Rao, "Fuzzy inference system to assist the operator in reactive power control in distribution systems", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, issue2, pp. 133-138, March 1998.

[8] J.R.P.-R. Laframboise, G. Ferland, A.Y. Chikhani, M.M.A. Salama, "An expert system for reactive power control of a distribution system. Part 2: system implementation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, issue3, pp. 1433-1441, Aug.

1995.

- [9] 하복남 "국내의 배전 자동화 기술 동향과 전망" 계장기술, 제 13권 제2호 통권 133호(2005. 2), FEB. 2005, pp. 108-119
- [10] 하복남 "분산전원 연계운영시스템의 설계 및 구현" 전기설비(2009. 8), August, 2009, pp. 62-75
- [11] Xia Yang, Myeon-Song Choi, Il-Hyung Lim, Seung-Jae Lee, "Load Flow Analysis for Distribution Automation System based on Distributed Load Modeling", KIEE Trans., vol. 2, no. 3, pp. 329-334, Sep. 2007.
- [12] Xia Yang, Myeon-Song Choi, Il-Hyung Lim, Seung-Jae Lee, Tae-Wan Kim, "A Voltage Control Method Based on Constants of Four Terminals Network Modeling of Distribution Networks", Journal of Electrical Engineering & Technology Vol1, No.1, pp123~132, 2006
- [13] 한전전력공사 배전처 "분산형 전원 배전계통 연계 기술기준", April, 2007, pp 1-14

저 자 소 개



김 영 인 (金榮仁)

1981년 2월16일생. 2008년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 2010년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 LS산전 선형기술연구소 연구원.

Tel : 043-261-6553
 Fax : 043-261-6629
 E-mail : ykima@lsis.biz



임 일 형 (林一亨)

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업.(학사) 2007년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동대학 전기공학과 졸업(박사). 현재 차세대전력기술 연구센터 전임연구원.

Tel : 031-335-2068
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



최 면 송 (崔勉松)

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-330-6367
 E-mail : mschoi@mju.ac.kr



이 승 재 (李承宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학). 1994년 Univ. of Washington 교환 교수. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-336-6362
 E-mail : sjlee@mju.ac.kr



이 성 우 (李聖雨)

1960년 3월 1일생(음). 1999년 건국대 대학원 전기공학과(공학), 1990년 한전입사. 1992~2006년 한전 전력연구원 발전연구소 근무. 2007년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 배전IT 분야 부장. 배전지능화 및 배전 IT 시스템 분야 연구.

Tel : 042-865-5931
 E-mail : swlee@kepri.re.kr



하 복 남 (河福男)

1958년 1월 10일생. 1994년 충남대 대학원 전기공학과(석사). 2004년 충남대 대학원 전기공학과(공학), 1978년 한국전력공사 입사 이후 대전전력관리처, 광주전력관리처, 전력연구원 근무, 1988년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 수석연구원

Tel : 042-865-5930
 E-mail : bnha@kepri.re.kr