

# Micro-grid의 적정전압유지를 위한 자율분산 협조운용 제어알고리즘

김재언<sup>1\*</sup>, 신성수<sup>2</sup>, 노대석<sup>3</sup>, 윤기갑<sup>4</sup>

## Autonomous Decentralized Coordination Control Algorithm for Keeping the voltage of Micro-grid within a Proper Level

Jae-Eon Kim<sup>1\*</sup>, Seong-Soo Shin<sup>2</sup>, Dae-Seok Rho<sup>3</sup> and Gi-Gab Yoon<sup>4</sup>

**요 약** 전력산업의 구조개편과 더불어 분산전원의 배전계통연계운용 및 전력품질이 전력회사의 배전사업자, 구역전 기사업자, 전기공급 신뢰도와 밀접한 관계에 있는 산업용 수용가들에게 많은 관심을 불러일으키고 있다. 이러한 주변 정세는 차세대의 배전계통이 다수의 Micro-grid들로 구성될 것이라고 하는 예상을 전문가들로부터 제기되기에 이르렀다. 그러나, 제안된 Micro-grid는 몇몇의 분산전원과 전력 품질을 보상하는 기기, 그리고 통신제어설비와 부하들로 구성 된다는 기본적인 내용에 지나지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 수용가에 고신뢰 고품질의 전력공급을 가능하게 하는 차세대 전력공급네트워크인 Micro-grid의 적정전압유지를 위한 자율분산협조 운용제어 알고리즘을 제안한다.

**Abstract** Interconnection of DG(Distributed Generation) into distribution systems and power quality are frequent subjects of discussion by distribution companies, regional electricity utilities and industrial customers. This situation makes many experts estimate a next generation of distribution systems which is composed of some micro-grids. But the proposed micor-grid is only mentioned as a small network with DG's, power quality compensators, communication and control equipments. In this paper, a decentralized coordination control algorithm of micro-grid which is able to supply the electric power with high reliability and quality, are proposed.

**Key Words** : Distribution systems, Micro-grid, Power Quality, Voltage Regulation

### 1. 서론

차세대 전력공급 네트워크 (Micro-grid)란 “다수의 분산전원(Distributed Generation), 전력품질보상장치, 연계 제어설비 및 부하 등으로 구성되어, 기존의 전력망과 연계 혹은 분리 운전될 수 있는 새로운 개념의 소규모 전력 시스템”으로 정의할 수 있으며, 광의의 의미에서는 다수의 Micro-grid가 기존의 배전계통에 연계된 차세대 배전 계통도 포함할 수 있다. [1]-[4]

Micro-grid의 원초적인 형태는 1886년 웨스팅하우스사에 의해 구축된 매사추세츠주 150 가구(110V 전등)에 전

력을 공급하는 세계 최초의 상업용 교류공급계통으로 볼 수 있으며, 이것은 차후 보다 많은 수용가들에게 경제적 이고 안정한 전력공급을 할 수 있는 지금과 같은 다수의 원격 집중전원을 갖는 대규모 전력네트워크로 발전되었다. 그러나 최근에 아이러니하게도 다시 Micro-grid의 부활론이 제기되고 있는 데, 물론 이것은 예전의 것과는 기본적으로 그 성격이 다르다. 먼저, 그 부활의 배경으로는 1970년대의 오일쇼크로 인한 신재생에너지의 적극적인 활용, 에너지 및 환경문제로 인한 분산전원의 개발과 계통에의 도입, 전력품질에 대한 중요성 인식, 첨단기술 및 소재의 발달로 인한 소규모 발전설비의 경제성, 전력산업

이 논문은 2007학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

<sup>1</sup>충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기공학전공 부교수

<sup>2</sup>충북대학교대학원 전기공학과 박사과정

<sup>3</sup>한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기공학전공 부교수

<sup>4</sup>한전전력연구원 배전연구소 선임연구원 공학박사

\*교신저자: 김재언(jekim@cbnu.ac.kr)

접수일 08년 11월 25일

수정일 09년 01월 12일

게재확정일 09년 01월 16일

구조 개편에 따른 배전사업의 경영다각화 등을 들 수가 있다. 이러한 배경 하에서 최초로 제안된 Micro-grid의 형태는 일본의 FRIENDS(Flexible, Reliable, Intelligent ENergy Distribution System)으로 볼 수 있으며[5], 그 이후로 미국 EPRI에서 제안한 Custom Power Distribution System, 미국의 Westinghouse사의 Premium Power Bus, EU Cluster의 Integration of RES(Regional Energy System) + DG(Distribution Generation), 미국 DOE의 CERTS MicroGrid Concept 등이 제안되어 왔다.[1][6] 그러나, 지금까지 제안되어 온 Micro-grid는 그 구조와 운전 제어에 확실히 정의된 것이 없고, 단지 개념정도에 지나지 않는다. 그러나, 2005년도부터 구체적인 실현형태를 제안한 논문들이 출현하기 시작하였는데, 대부분이 직렬과 병렬 인버터로 구성되는 있는 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)의 형태이다.[2]-[4] 그러나, 직렬인버터로 구성되는 Micro-grid의 경우는 직렬인버터의 전압 보상한계, 계통사고 발생시 직렬인버터의 간섭 및 연계/전환/단독운전모드의 복잡성 등으로 현실적으로 그 실용화에는 해결해야할 과제가 많다.

따라서, 본 논문에서는 다수의 분산전원으로 구성되는 Micro-grid의 적정전압유지를 위한 분산전원의 자율분산 협조제어 알고리즘을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하기로 한다.

분산전원(DG: Distributed Generation)이 도입된 배전계통(이하, Micro-grid)의 적정전압유지 문제란, ULTC(Under Load Tap Changer)와 LDC(Line Drop Compensation)에 의하여 적정전압이 유지되고 있는 기존의 배전계통에 분산전원이 도입될 경우 발생하는 전압조정체계의 붕괴로 정의할 수 있다. 그 이유는 DG가 연계되어 있는 Micro-grid의 적정전압유지에는 단방향 조류만을 고려한 기존 배전계통 ULTC와 LDC 전압조정체계가 적합하지 않기 때문이다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 참고문헌 [7]의 Multi-LDC 방법, 참고문헌 [8]의 부하조정 방법, 그리고 참고문헌 [9]의 하이브리드(Hybrid) 제어 방법 등이 지금까지 제안 되어 왔다. 참고문헌 [7]은 주변압기의 송출전압과 부하전류, 가상부하중심점의 임피던스와 전압만으로 전압조정을 하던 기존의 LDC(Line Drop Compensation)방식에서, 주변압기 송출전압과 모든 피더의 전류, DG의 출력을 온라인으로 입력 받아 탭을 조절하는 방식을 제안하였다. 이 방식은 입력받은 자료를 근거로 조류계산을 수행한 후, 각 피더의 최대, 최소 전압과 기준전압의 차의 합이 최소가 되도록 하는 최적화 문제를 수행하여 주변압기 탭 위치를 찾는 것이다. 그런 다음, 계산된 주변압기 탭 위치와 현재의 탭 위치를 비교하여 주변압기의 탭을 조절하는 방식을 제안하였다. 그러나 이

방법은 모든 피더의 전류, 분산전원의 출력 값이 필요하므로 다수의 분산전원이 계통에 연계되었을 때 추가적인 비용이 발생하게 된다.

한편, 참고문헌 [8]과 [9]는 기존의 전압운용체계를 바꾸지 않으면서 분산전원 연계에 따른 전압변동을 최소화하기 위한 방법으로서, 먼저 참고문헌 [8]은 풍력발전의 잉여출력을 전기적 에너지(Batteries)나 열에너지(Heaters) 형태로 저장하여 적정전압을 유지하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 모선과 분산전원 사이를 부하가 없는 R, X 만을 가진 선로로 간략화 하였기 때문에 부하가 산재되어 있는 일반 배전계통에 대해서 정확한 전압제어를 수행 할 수 없으며, 부하량을 조절하기 위해 전기적 스위칭 소자를 사용하므로 고조파를 발생시킬 수 있다. 또한, 참고문헌 [9]는 DG의 역률제어(APFC : Automatic Power Factor Control)와 전압제어(AVC : Automatic Voltage Control)를 선택적으로 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 즉, DG의 연계지점에서의 전압이 적정전압 유지 범위에 있으면 역률제어를 통해 충분한 에너지를 계통에 공급하고, 적정전압 범위를 넘어서는 순간에는 전압제어를 하여 연계지점의 전압을 적정범위로 유지한다. 이 방법은 적정전압 범위 내에서 DG의 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있지만 DG에 두 개의 제어를 동시에 수행해야 하는 기능이 추가되어야 하며, 참고문헌 [9]에서와 같이 단순히 계통을 무한모선과 R, X 만을 가진 선로로 간략화 하였기 때문에 타 선로에 대한 정확한 전압제어는 불가능 하다.

상기의 논문들은 ULTC의 입력변수를 증가시켜 기능을 향상 시키거나, 기존 전압조정체계를 고려하지 않고 단순히 분산전원의 출력을 제어하여 분산전원이 계통에 미치는 영향을 최소화 하는데 주안점을 두고 있어 다수의 feeder 들로 구성되는 배전계통 전체의 전압조정을 하지는 데에는 무리가 있다.

따라서, 본 논문에서는 다수의 분산전원으로 구성되는 Micro-grid의 적정전압유지를 위한 분산전원의 자율분산 협조제어 알고리즘을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하기로 한다.

## 2. 본론

### 2.1 Micro-grid에서의 DG출력과 ULTC동작특성분석

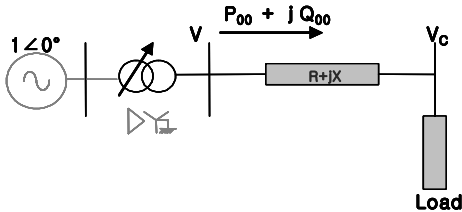
분산전원이 연계된 배전계통의 적정전압유지붕괴의 원인은 DG 도입으로 탭 전류 변화로 인한 ULTC 탭

동작, DG 출력의 배전선로에 역조류 유입으로 인한 선로 임피던스 및 주상변압기 임피던스에 의한 전압감소 및 상승에 의한 것으로 이에 대한 해결방안으로서 다음과 같은 세 가지가 고려 될 수 있다.

첫째, DG 도입에 따른 배전선로의 변화로 ULTC의 탭 동작 시 feeder의 인출구 및 말단전압이 적정전압유지 범위의 상·하한치와 충분한 여유를 가지고 있지 않으면, ULTC 탭 동작으로 인하여 feeder의 인출구 및 말단전압이 적정전압유지 범위를 넘어설 수 있다. 따라서 feeder의 전압이 적정전압 상·하한치와 충분한 여유를 가지는 것이 필요하며, DG의 무효전력을 조절하여 그 여유를 증가시킨다.(조건 1)

둘째, DG가 연계되지 않은 feeder에서 전압특성곡선이 적정전압유지 범위를 벗어나면 계통에 연계된 모든 DG의 무효전력을 조절하여 배전계통의 적정전압을 유지한다.(조건 2)

셋째, DG가 연계된 feeder에서 전압특성곡선이 적정전압유지 범위를 벗어나면 계통에 연계된 모든 분산전원의 무효전력을 조절하여 배전계통의 적정전압을 유지한다.(조건 3)



[그림 1] 단일상가부하로 표현된 배전계통모델

위 세 가지 경우에 대한 DG의 출력과 ULTC의 탭 동작과의 관계를 찾기 위해 우선 DG가 연계되지 않은 배전계통을 그림 1과 같은 단일집중등가부하로 표현하기로 한다. 이 때, LDC에 의한 ULTC 탭 동작 메커니즘은 주변압기와 가상부하 중심점사이의 등가 임피던스의 R+jX, 가상부하중심점의 전압 V<sub>C</sub> 및 기준전압 V<sub>0</sub>일 때, |V<sub>C</sub> - V<sub>0</sub>|이 불감대폭(db)을 벗어나는 경우, ULTC의 탭 동작이 이루어져 가상부하중심점의 전압 V<sub>C</sub> 를 기준전압 V<sub>0</sub> 근방으로 유지하도록 하는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$-db \leq V_c - V_0 \leq db \quad (1)$$

$$V_0 - db \leq V_c \leq V_0 + db \quad (2)$$

$$\text{단, } V_c = \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00}) + (R^2 + X^2)(P_{00}^2 + Q_{00}^2)/V^2}$$

V<sub>C</sub>: 가상부하 중심점 전압

V<sub>0</sub>: 가상부하 중심점의 기준값

P<sub>00</sub>, Q<sub>00</sub>: 변전소에서 배전계통으로 송출되는 유효전력

V: P<sub>00</sub> + jQ<sub>00</sub>에 대한 주변압기 2차측 모선에서의 전압 크기

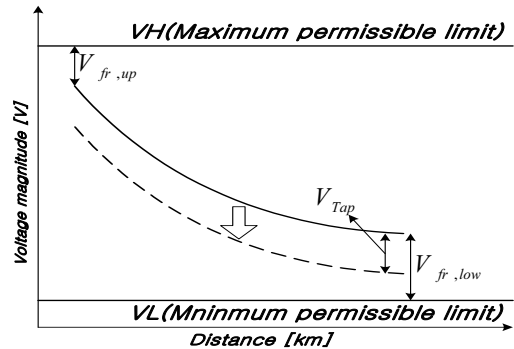
R+jX: 주변압기 2차측에서 가상부하 중심점까지의 등가 임피던스

한편, 식(2)는 단위법에서, V는 1.0에 가깝고, (R<sup>2</sup> + X<sup>2</sup>)(P<sub>00</sub><sup>2</sup> + Q<sub>00</sub><sup>2</sup>)/V<sup>2</sup>는 |-2(RP<sub>00</sub> + XQ<sub>00</sub>)|에 비해 매우 작으므로 식(3)과 같이 간략화 될 수 있다.

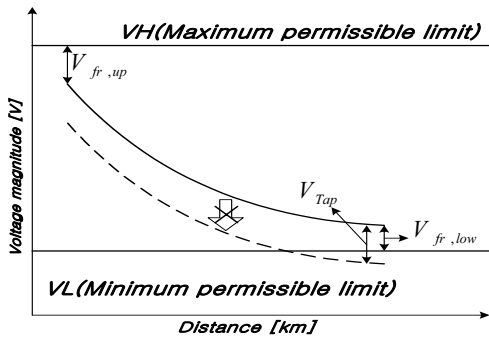
$$V_0 - db \leq \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00})} \leq V_0 + db \quad (3)$$

### 2.1.1 ULTC 탭동작시 적정전압 하한치범위를 벗어나는 경우(조건 1)

그림 2의 (a)와 (b)는 ULTC의 동작여유를 보여주고 있다. (a)에서 보듯이 분산전원이 연계되지 않은 feeder들 중에서 전압강하가 제일 심한 feeder의 말단 전압과 적정전압 하한치(VL)가 ULTC의 한 탭 동작에 의한 전압 변동(VTAP)보다도 충분한 여유를 가지고 있다면 ULTC 오동작으로 인한 문제는 발생하지 않는다. 그러나 이와 반대의 경우, (b)에서처럼 충분한 여유를 가지고 있지 않은 상태에서 ULTC 탭 동작이 발생하면 전압은 적정범위를 벗어날 가능성이 충분하게 된다. 이러한 경우에 DG의 무효전력 출력을 증가시키거나 감소시켜 선로상의 모든 전압이 적정전압 상·하한치범위내로 유지 되도록 한다.



(a) ULTC동작시 전압적정범위가 유지되는 경우



(b) ULTC동작시 전압조정범위를 벗어나는 경우

- Vfr.up = VH - 최대전압(Vmax),
- Vfr.low = 최소전압(Vmin) - VL
- VH: 적정전압유지 상한치,
- VL: 적정전압유지 하한치

[그림 2] ULTC동작과 적정전압유지 범위의 관계

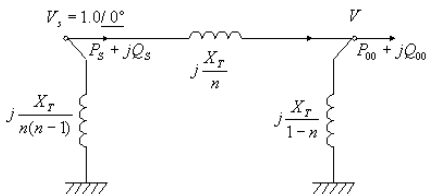
이를 위해 적정전압 유지를 위한 분산전원의 출력에 대하여 고찰해 본다. 분산전원이 주변압기 이하의 배전선로에 다수 도입되었다고 가정하면 주변압기에서 송출되는 출력은  $P_{00} - P_{GT} \cdot Q_{00} - Q_{GT}$ 로 분산전원의 전체 출력만큼 감소하게 된다. ( $P_{GT} = \sum P_{Gi,j}$ ,  $Q_{GT} = \sum Q_{Gi,j}$ ) 또한, 분산전원의 도입으로 인한 주변압기에서의 전압변화량을  $\Delta V^2$ 라 하면, LDC에 의해 ULTC 탭이 동작하지 않기 위해서는 식(3)에 근거하여 아래의 부등식이 만족되어야만 한다.[10]

$$-db \leq V_C - V_0 \leq db \quad (4)$$

단,  $V_C$ 는

$$\sqrt{(V^2 + \Delta V^2) - 2(R(P_{00} - \Delta P_{GT}) + X(Q_{00} - \Delta Q_{GT}))}$$

여기서,  $\Delta V^2$ 은 그림 3의 주변압기 등가모델로부터 식(5)와 같이 구할 수 있다.[10]



[그림 3] 주변압기의 등가회로

$$\Delta V^2 = \frac{2P_{00}P_{GT} + 2(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T})Q_{GT}}{2(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T})\frac{1}{X_T} - (\frac{n}{X_T})^2} \quad (5)$$

- $V_s$  : 1차측 전압       $V$  : 2차측 전압
- $X_T$  : 변압기 임피던스     $n$  : 변압기탭위치
- $P_{00}$  : 주변압기 송출 유효전력
- $Q_{00}$  : 주변압기 송출 무효전력
- $P_{GT}$  : 분산전원의 총 발전 유효전력
- $Q_{GT}$  : 분산전원의 총 발전 무효전력

즉, 식 (5)에서 분산전원의 출력  $P_{GT}$ ,  $Q_{GT}$ 를 통해 주변압기 2차측 전압조정이 가능하다는 것을 의미한다. 여기서 DG의 무효전력 변화에 대한 전압변동만을 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta V^2 = \frac{2(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T})\Delta Q_{GT}}{2(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T})\frac{1}{X_T} - (\frac{n}{X_T})^2} \quad (6)$$

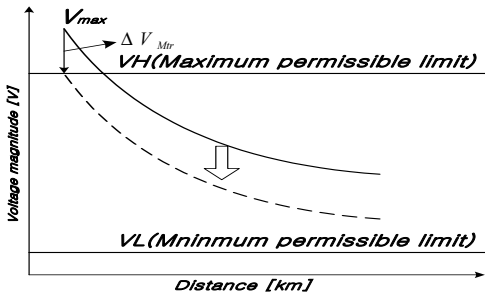
### 2.1.2 부하변동으로 인하여 Feeder의 전압특성곡선이 적정유지범위를 벗어나는 경우 (조건2)

부하가 변동하게 되면 분산전원이 연계되지 않는 feeder라도 ULTC 탭 조정 후 최고·최저한계전압을 넘어설 가능성이 있다. 이것은 분산전원의 출력변화를 포함한 부하변동으로 부하전류가 변하게 되어 주변압기 임피던스에 의한 전압 상승이나 하강이 발생하게 때문이다. 이때 모든 분산전원들의 무효전력 출력량을 조절하면 분산전원이 연계되지 않는 feeder의 적정전압을 유지할 수 있다. 그림 4의 (a),(b)에서와 같이 분산전원이 도입되지 않는 배전선로 중 전압강하가 제일 심한 선로의 전압특성곡선의 최고점 및 최소점( $V_{max}$ ,  $V_{min}$ )과 적정전압 상한치(VH) 및 하한치(VL)와의 차는  $(VH^2 - V_{max}^2)$ 와  $(V_{min}^2 - VL^2)$ 로 표현된다. 이 때, 점선은 분산전원의 출력을 조절하기 전이고 실선은 후이다. 또한, 이 값들은 주변압기의 임피던스에 의한 전압 강하( $\Delta V_{Mr}$ )보다 커야 하므로 다음과 같이 정리된다.

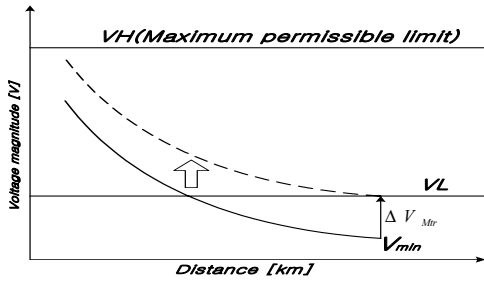
$$\Delta V_{Mr}^2 + V_{max}^2 < VH^2 \quad (7)$$

$$\Delta V_{Mr}^2 + V_{min}^2 > VL^2 \quad (8)$$

만약 식(7)과 (8)이 만족되지 못하는 경우에는, 분산전원이 보상할 수 있는 무효전력을 계산하여 각 분산전원의 무효전력을 조절함으로써 계통의 적정전압을 유지할 수 있다.



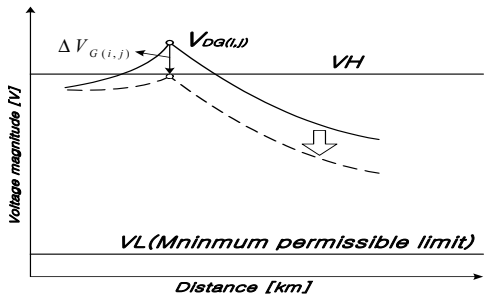
(a) DG연계되지 않은 선로가 과전압으로 되는 경우



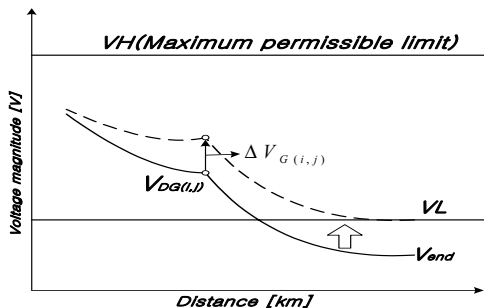
(b) DG연계되지 않은 선로가 저전압으로 되는 경우

[그림 4] 부하변동으로 인하여 Feeder의 전압특성곡선이 적정유지범위를 벗어나는 경우

### 2.1.3 DG가 연계된 Feeder의 전압특성곡선이 적정 범위를 벗어나는 경우(조건3)



(a) DG가 연계된 선로가 과전압으로 되는 경우



(b) DG가 연계된 선로가 저전압으로 되는 경우

VDG(i,j): i 번째 feeder, j 번째 node에 연계된 분산전원의 전압

V(i,end): i 번째 feeder의 말단전압

ΔVG(i,j): i 번째 feeder, j 번째 node에 연계된 분산전원에 의해 보상된 전압 크기

[그림 5] DG가 연계된 Feeder의 전압특성곡선이 적정 범위를 벗어나는 경우

그림 5의 (a)에서 보듯이 feeder 중간에 분산전원이 연계되었을 때 주변압기 직하전압이 최대가 아닌 분산전원 연계지점에서 최대가 될 수도 있다. 이러한 경우도 조건2에서 언급했던 바와 같이 feeder 전압특성곡선의 최대값과 적정전압 상한치와의 차만큼을 분산전원의 출력으로 보상할 수 있다. 식(9)는 DG에 의한 전압 상승이 적정전압 유지범위 상한치보다 작아야 하며, 또한 그림 5의 (b)에서 feeder 말단의 전압은 적정전압 하한치 보다 커야함으로 분산전원의 연계지점에서 feeder 말단까지의 선로 임피던스에 의한 전압강하(ΔV<sub>line</sub>)를 고려하여 분산전원의 정확한 출력 범위를 설정한다.

$$\sqrt{V_{DG(i,j)}^2 + \Delta V_{G(i,j)}^2} < VH \quad (9)$$

$$\sqrt{V_{(i,end)}^2 + \Delta V_{G(i,j)}^2} > VL \quad (10)$$

또한, 식(10)에서 Feeder 말단 전압 ( $V_{(i,end)}^2$ )은 DG 연계지점 전압( $V_{G(i,j)}^2$ )에서 선로 임피던스에 의한 전압강하 ( $\Delta V_{line(i,j)}^2$ )를 고려하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{(i,end)}^2 = V_{G(i,j)}^2 - \Delta V_{line(i,j)}^2 \quad (11)$$

그러므로 조건3에 해당하는 DG의 출력 전압의 범위는 식(9), (10)에 식(11)을 대입하면 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta V_{G(i,j)}^2 < VH^2 - V_{(i,end)}^2 \quad (12)$$

$$\Delta V_{G(i,j)}^2 > VL^2 - V_{DG(i,j)}^2 + \Delta V_{line(i,j)}^2 \quad (13)$$

## 2.2 적정전압유지를 위한 자율분산협조제어알고리즘

전절에서 설명한 DG연계에 따른 적정전압 유지 관점에서 세 가지 문제점과 그 대안들을 바탕으로 DG와 ULTC의 자율분산협조제어알고리즘을 그림 6과 같이 제안한다. 이 알고리즘은 다음과 같이 크게 3가지 Rule로 구성된다.

**Rule 1:** 부하변동이 발생하면 LDC 방식에 의해 ULTC는 탭 동작 준비를 한다. 이 때 적정전압유지 상한치와 주변압기 인출부, 적정전압유지 하한치와 말단전압의 차가 ULTC 한 탭 동작에 의한 전압변동치보다 작으면 모든 DG는 그 무효전력출력을 조절하여 그 여유를 늘리도록 한다. 이 때 보상될 무효전력은 각 DG에게 균등하게 분배된다. 그 다음 ULTC 탭이 동작한다.

**Rule 2:** ULTC 탭이 동작한 후 주변압기 인출전압과 feeder 말단 전압이 적정전압유지범위 상하한치를 벗어나는지를 검사하고, 각DG는 무효전력출력을 조절하여 feeder의 적정전압범위를 유지하도록 한다. 이때 무효전력으로 제어할 수 있는 보상범위를 넘어서면 유효전력을 조절한다. 다시, 하나로 돌아가 반복한다.

**Rule 3:** Feeder 중간에 DG가 연계될 경우 DG의 연계지점이 feeder의 최대전압이 되어 적정전압 유지범위 상한치를 넘어설 수 있으므로 이를 검사하여 각DG의 무효전력을 제어한다.

$DG_{i,j}$ : i번째lateral, j번째node DG출력량 (P+jQ)

$V_{DG_{i,j}}$ : i번째lateral, j번째node DG출력전압

$V_{fr,low}$ : 적정전압 하한치와의 여유

$V_{up,low}$ : 적정전압 상한치와의 여유

$N_{DG}$  : 분산전원의 개 수

Tap interval: Tap동작시 변동하는 전압의 크기

$\Delta P_{GT}$  : 유효전력 보상량

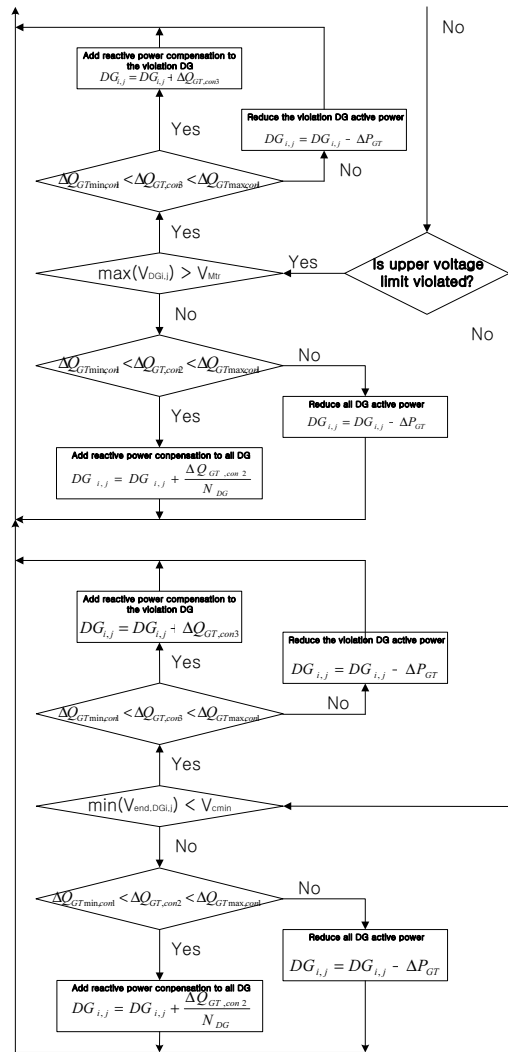
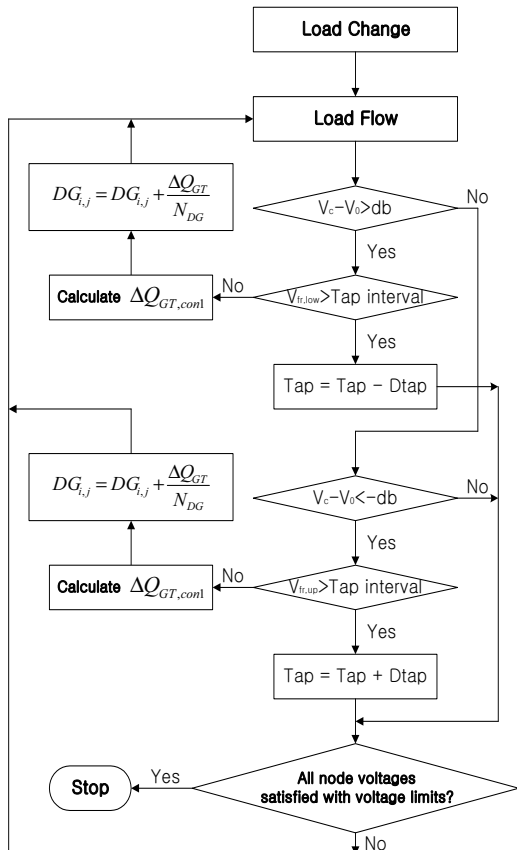
$\Delta Q_{GT,min,con1}$ : Rule1의 최소무효전력 보상량

$\Delta Q_{GT,min,con1}$ : Rule1의 최대무효전력 보상량

$\Delta Q_{GT,con1}$ : Rule1에서 결정된 무효전력 보상량

$\Delta Q_{GT,con2}$ : Rule2에서 결정된 무효전력 보상량

$\Delta Q_{GT,con3}$ : Rule3에서 결정된 무효전력 보상량



[그림 6] 자율분산협제어 알고리즘

### 2.3 적용사례

#### 2.3.1 Simulation 조건

실배전계통인 서청주 변전소 #2를 MatLab으로 모델링하여 시뮬레이션을 통해 제안된 DG와 ULTC의 전압협조 방법의 타당성을 증명 한다. 선정된 계통 모델은 그림 7 과 같다. 또한 표 1은 서청주 변전소 #2 에 대한 배전계통의 파라미터와 분산전원의 위치 및 용량을 보여주고 있다. 서청주변전소 #2는(공단 #1, #7, #8, 가경, 서경, 태성) 총 6개의 feeder로 구성되어 있으며 DG는 공단 #1의 11번째 노드와 19번째 노드, 태성의 16번째 노드와 말단, 서경말단에 연계한다.

[표 1] 서청주변전소 Mtr #2 이하 배전계통의 관련 파라미터

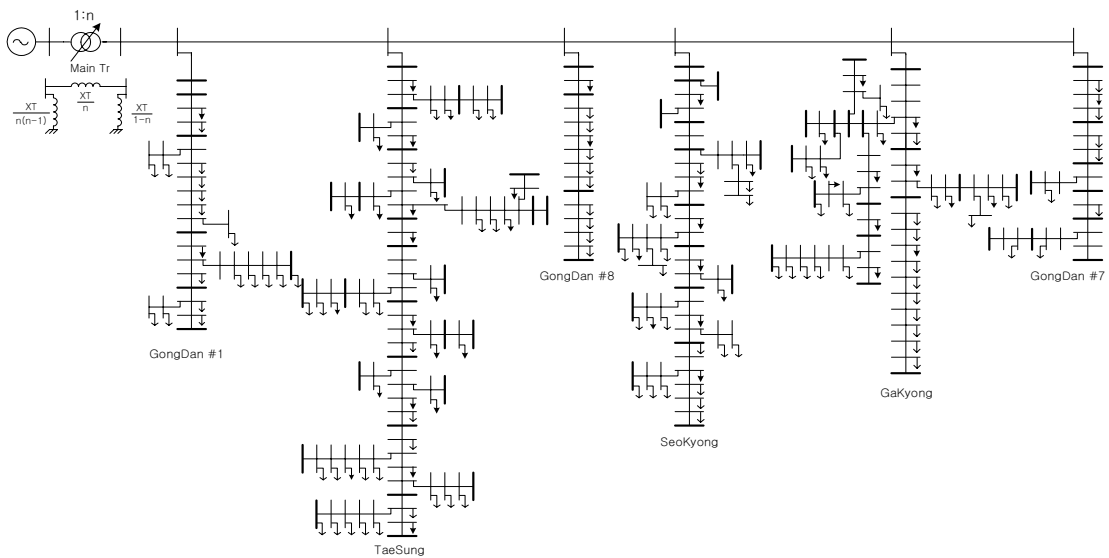
기준 용량	MVA	100 [MVA]
	kV	22.9 [kV]
주변압기	정격 용량	45/60 [MVA]
	자기 기준 임피던스	j0.333 [p.u.]
D/L	임피던스	0.0347+j0.0746 [p.u./km]
	피더 수	6
분산전원	공단 #1 No.11=1 [MVA], No.19=1 [MVA]	
	태성No.16=1 [MVA], No.35=5 [MVA]	
	서경No.27=1 [MVA]	

[표 2] 배전선로의 데이터

Feeder	선로길이[km]	선로용량[MVA]
공단 #1	3.01	8
공단 #7	3.93	9.07
공단 #8	3.55	7.2
서경	3.62	8.8
가경	3.24	10.1
태성	13.25	6.4

한편, 전절에서 언급하였던 것처럼 배전용 변전소 이하에는 수많은 개개의 수용가가 연결되어 있어 개별적으로 전압조정이 이루어질 수 없다. 따라서 모든 수용가의 단자전압을 고압측으로 환산하고, 고압측으로 환산한 전압 값이 전압허용범위를 만족하도록 배전용 변전소의 주 변압기 탭을 사용하여 전압 조정을 해야 한다. 이 때, 단 순거리에 따른 전압특성곡선을 통한 전압해석보다는 DG 의 도입에 따른 시간대별 전압특성곡선을 아는 것이 중요하다. 즉 DG의 도입에 따라, 시간대별 부하량에 따라 DG 도입 지점 또는 해당 피더의 어느 지점이 언제 전압 허용범위를 얼마나 벗어났는지의 여부를 파악할 수 있다. 따라서 DG의 도입에 따른 시간대별 전압해석을 수행하기 위해서 식(3)을 시간적 함수로 변환하면 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{207}{230} + \Delta V_{LowLimit}(t)\right) \times 0.9984 \leq V_{22.9 p.u.}(t) \\ & \leq \left(\frac{233}{230} + \Delta V_{HighLimit}(t)\right) \times 0.9984 \end{aligned} \quad (14)$$



[그림 7] 서청주변전소 MTR #2 이하 배전계통 모델

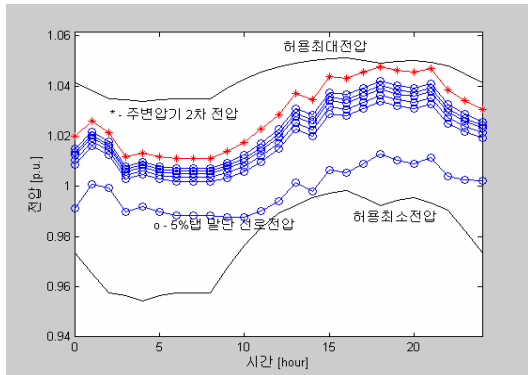
여기서,

$$\Delta V_{LowLimit} = \Delta V_{Ptr} + \Delta V_{Low} + \Delta V_{ent}$$

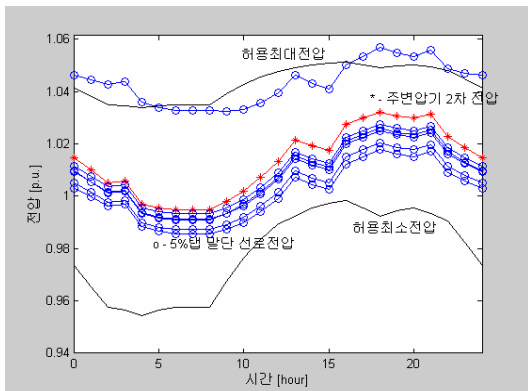
$$\Delta V_{HighLimit} = \Delta V_{Ptr} + \Delta V_{ent}$$

### 2.3.2 DG가 연계된 기존의 ULTC 전압 조정 방식에서의 전압 특성곡선

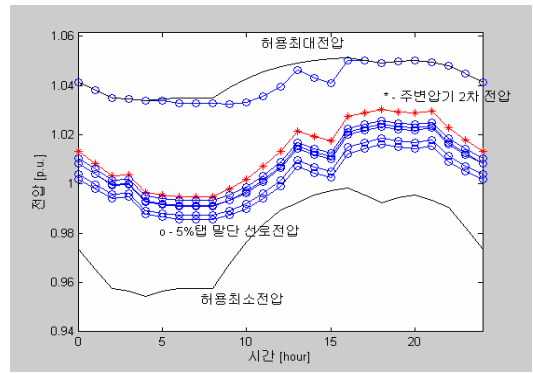
DG가 연계된 각 feeder의 주변압기 직하전압(빨강색 ‘\*’)과 말단 node의 전압(파란색 ‘o’)을 분석하였다. 그림 8은 분산전원이 연계되지 않은 서청주 변전소 #2의 전압특성곡선으로 하루 동안의 시간별 부하변동에 따른 전압을 보여주고 있다. ULTC 전압조정체계에 의해 적정전압을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 DG가 전철에서와 같이 연계되어 있다면 ULTC 전압조정체계에 서 수용가의 적정전압을 위해 ULTC 동작이 일어난 후라도 실제로 그림 9의 태성구간처럼 feeder 말단 적정전압 상한 허용치를 넘는 형태를 보인다.



[그림 8] DG연계되지 않은 경우 전압특성곡선



[그림 9] DG연계후 전압특성곡선



[그림 10] 그림9와 같은 DG연계시스템에 자율분산협조제어 알고리즘을 적용한 경우의 전압특성곡선

### 2.3.3 제안된 DG와 ULTC의 전압협조 하에서의 전압특성 곡선

배전시스템의 적정전압 유지를 위해 ULTC가 동작해도 태성 D/L 말단에 연계된 DG에 의해 적정전압범위를 넘어서는 구간이 발생하는 것과 달리 그림 10은 제안된 전압협조에 의해 배전시스템의 전압이 적정전압범위에 있음을 보여주고 있다. 또한, 표3에서 VH와 VL은 일일 부하변동에 따른 적정전압유지 범위의 상·하한치이며, VMtr은 주변압기 송출전압, TaeSung end node은 태성 D/L의 말단전압이다. 이 때의 태성 D/L에 연계된 DG의 무효전력 변동량을 보여 주고 있다.

[표 3] 시뮬레이션 결과 (p.u.)

시각	VH	VL	기존 방법		제안된 방법		
			VMtr	태성 말단	VMtr	태성 말단	전압 개선치
0	1.0414	0.9734	1.0145	1.0463	1.0133	1.0414	-0.0037
1	1.0382	0.9654	1.0099	1.0445	1.0083	1.0382	-0.0010
2	1.0350	0.9575	1.0051	1.0427	1.0032	1.0350	-0.0011
3	1.0346	0.9565	1.0058	1.0438	1.0036	1.0346	-0.0010
4	1.0338	0.9545	0.9969	1.0359	0.9964	1.0338	+0.0052
5	1.0346	0.9565	0.9956	1.0338	0.9956	1.0338	+0.0016
6	1.0350	0.9575	0.9949	1.0328	0.9949	1.0328	0
7	1.0350	0.9575	0.9949	1.0328	0.9949	1.0328	0
8	1.0350	0.9575	0.9949	1.0328	0.9949	1.0328	0
9	1.0390	0.9674	0.9981	1.0324	0.9981	1.0324	0
10	1.0426	0.9764	1.0019	1.0330	1.0019	1.0330	0
11	1.0454	0.9834	1.0071	1.0356	1.0071	1.0356	0
12	1.0478	0.9894	1.0131	1.0393	1.0131	1.0393	0
13	1.0489	0.9924	1.0214	1.0464	1.0214	1.0464	0
14	1.0501	0.9954	1.0191	1.0431	1.0191	1.0431	0
15	1.0509	0.9974	1.0176	1.0409	1.0176	1.0409	0
16	1.0513	0.9984	1.0275	1.0502	1.0275	1.0502	0
17	1.0501	0.9954	1.0298	1.0535	1.0289	1.0501	-0.0025
18	1.0489	0.9924	1.0320	1.0568	1.0301	1.0489	-0.0033
19	1.0497	0.9944	1.0305	1.0546	1.0293	1.0497	+0.0022
20	1.0501	0.9954	1.0298	1.0535	1.0289	1.0501	+0.0011
21	1.0493	0.9934	1.0313	1.0557	1.0297	1.0493	-0.0022
22	1.0482	0.9904	1.0230	1.0486	1.0229	1.0482	+0.0044
23	1.0450	0.9824	1.0184	1.0469	1.0179	1.0450	-0.0012



### 3. 결론

부하의 증가와 다양화로 고품질의 전력을 공급할 수 있는 마이크로그리드의 등장이 요구하고 있다. 그러나 마이크로그리드로 구성되는 배전계통은 수용가의 전압 상승 및 하강의 문제를 일으킬 수 있으며, 기존 전압협조 체계에 혼란을 줄 수 있다. 이에 본 논문은 마이크로그리드가 분산전원의 형태로 연계되는 기존의 배전계통의 적정전압 유지가 가능한 자율분산협조제어알고리즘을 제시하였다. 이것은 ULTC가 협조해야 하는 룰과 DG가 협력해야 하는 룰의 두 가지의 협조 룰로 구성되었고, 이를 실배전계통의 모델링과 MatLab을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 입증하였다.

### 참고문헌

[1] Robert Lasseter, et al., "Integration of Distributed Energy Resources; The CERTS Microgrid Concept", LBNL-50829, Office of Power Technologies, U.S. Department of Energy, April, 2002.

[2] Katiraei, F; Iravani, M.R.; Lehn, P.W., "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", Power Delivery, IEEE Transactions on Vol. 20, Issues 1, pp. 248-257, Jan 2005.

[3] Yun Wei Li; Vilathgamuwa, D.M.; Poh Chiang Loh, "A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire Micro-grid applications", Power Electronics, IEEE Transactions on Vol. 21, Issue 4, pp. 1021-1031, July 2006.

[4] Pogaku, N; Prodanovic, M.; Green, T.C., "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Micro-grid", Power Electronics, IEEE Transactions on Vol. 22, Issue 2, pp. 613-625, March 2007.

[5] J. Hasegawa, et al., "FRIENDS에 있어서의 전력개질 센터의 내부구성", 일본전기학회 논문지B, 118-B권 11호, pp. 1292-1301, 1998.

[6] 기초전력공학공동연구소, 다품질배전시스템에 관한 기초연구, 중기-01, 2000. 9.

[7] Joon-Ho Choi, Jae-Chul Kim, "Advanced Voltage Regulation Method of Power Distribution System Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems(Revised)" IEEE Transactions on Power Delivery. vol 16, NO.2 April 2001.

[8] Scott, N.C.; Atkinson, D.J.; Morrell, J.E.; "Use of load control to regulate voltage on distribution networks

with embedded generation", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 17, No. 2, May 2002 Page(s):510 - 515.

[9] Gaonkar, D.N.; Rao, P.C.; Patel, R.N., "Hybrid method for voltage regulation of distribution system with maximum utilization of connected distributed generation source", Power India Conference, 2006 IEEE 10-12 April 2006 Page(s):5 pp.

[10] Tae-Eung Kim, Jae-Eon Kim, "A Study for Determining the permissible Operating Range of Distributed Generation interconnected into Distribution System", KIEE Trans. Vol. 51 2002

### 김 재 언(Jae-Eon Kim)

[정회원]



- 1982.2: 한양대 전기공학과 (공학사)
- 1984.2: 한양대학교대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1996.3: 일본 교토대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1984.3 ~ 1998.8: 한국전기연구소 연구원/배전연구팀장
- 1998년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 부교수, 충북대학교 그린에너지연구소장

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

### 신 성 수(Seong-Soo Shin)

[정회원]



- 2004.2: 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기전공(공학사)
- 2007.2: 충북대학교대학원 전기공학과(석사)
- 2007.3 ~ 현재 : 충북대학교 전기전기공학과 박사과정

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985.2: 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987.2: 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997.3: 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987.3 ~ 1998.8: 한국전기연구소 연구원/선임연구원

- 1999년 3월 ~ 현재: 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

윤 기 갑(Gi-Gab Yoon)

[정회원]



- 1983년 2월 : 한양대학교 전기공학과(공학사)
- 1988년 8월 : 한양대학교대학원 전기공학과(공학석사)
- 1992년 2월 : 한양대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1990년 ~ 현재 : 한전 전력연구원

<관심분야>

전력계통, 배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석