

분산전원이 도입된 배전계통의 전압해석 방법에 관한 연구

論 文

52A-2-1

A Study for the Voltage Analysis Method of Distribution Systems with Distributed Generation

金 兌 應* · 金 在 彦**
(Tae-Eung Kim · Jae-Eon Kim)

Abstract - This paper presents a voltage analysis method of distribution systems interconnected with DG(Distributed Generation). Nowadays, small scale DG becomes to be introduced into power distribution systems. But in that case, it is difficult to properly maintain the terminal voltage of low voltage customers by using only ULTC(Under Load Tap Changer). This paper presents a voltage analysis method of distribution systems with DG for proper voltage regulation of power distribution systems with ULTC. In order to develop the voltage analysis method, distribution system modeling method and advanced loadflow method are proposed. Proposed method has been applied to a 22.9 kV practical power distribution systems.

Key Words : Distribution System Modeling, DG(Distributed Generation), ULTC(Under Load Tap Changer), Voltage Analysis Method

1. 서 론

산업의 발달과 함께 에너지 사용량은 꾸준히 증가하여 왔으며, 이에 따른 발전설비의 증가 또한 꾸준히 증가하여왔다. 그러나 최근 발전소 부지선정의 어려움과 환경문제로 인하여 대규모 발전소를 건설하는 것이 점점 더 어려워지고 있다. 또한, 수용가에 민감한 부하의 등장으로 고품질의 전기를 요구하는 수용가가 증가하고 있다. 이에 따라, 다양한 에너지원의 효율적 활용 및 고품질의 서비스를 위한 한 방법으로서 태양광발전, 열병합발전, 연료전지발전, 풍력발전 등의 분산전원(Distributed Generation)의 적극적인 개발과 배전계통에의 도입이 관심을 모으고 있다[1][2][3]. 그러나, 분산전원이 배전계통에 도입될 경우, 기존 배전계통의 전압 관리에 많은 어려움이 발생하게 될 것이다[4][5][6][7]. 이 경우 배전전압 관리자의 입장에서는 적절한 전압관리를 위해 배전계통 전압해석을 수행할 필요가 있다. 현재까지 분산전원이 도입된 배전계통의 전압해석과 관련된 논문들은 거의가 특정한 부하상태에서 배전용변전소로부터의 단순거리에 따른 전압특성곡선을 통한 전압해석이 대부분이었다 [1][2][9][10]. 그러나, 배전실무자 입장에서는 단순거리에 따른 전압특성곡선을 통한 전압해석보다는 분산전원의 도입에 따른 시간대별 전압특성곡선을 안다면, 어느 지역이 언제 전

압허용범위를 벗어났는지의 여부를 쉽게 파악할 수 있을 것이다.

따라서, 본 논문에서는 저압배전선의 전압허용범위(220±6%)를 22.9kV 특고압 라인의 전압허용범위로 환산하여, 이 전압허용범위를 모든 22.9kV 선로의 전압이 만족되는지를 시간대별로 알아볼 수 있는 분산전원의 도입에 따른 시간대별 전압해석 방법을 제안한다.

한편, 현재 선진외국의 전력회사를 비롯한 국내 한전의 경우, 배전계통 전압해석시 모든 선로구간의 부하역률이 동일하고, 변전소인출구부터 선로말단에 이르기까지 단방향전력조류라는 가정하에서 모든 선로구간의 부하를 역률일정의 정전류 부하로 보아 단순전압강하계산법에 의한 전압해석을 수행하고 있으며, 또한, 배전계통 조류해석시 ULTC의 주변압기 내부 임피던스가 변압기 정격용량의 10~15%정도임에도 불구하고 이를 고려하지 않고, 주변압기 2차측 전압을 일정한 값으로 고정된 채 조류해석을 수행하고 있다[11]. 따라서, 분산전원이 도입된 배전계통 전압해석상의 전술과 같은 두 가지 문제점을 해결하고자, 본 논문에서는 분산전원이 도입된 방사상 배전계통의 조류계산에 우수한 장점을 가지고 있는 DistFlow Method를 이용하였다[9][10]. 그러나, DistFlow Method는 여러 가지 장점에도 불구하고 여러 개의 피더가 동시에 연결되어 있고, 하위 laterals, sub-laterals 및 sub-sub-laterals 등이 복잡하게 연결되어 있는 실배전계통에 적용하는 데에는 한계성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이 한계성을 극복하고자 Dummy bus and branch 방법과 각 laterals 및 sublaterals를 처리할 수 있는 numbering 방법을 제안하였다. 제안된 전압해석방법은 22.9kV급 실배전계통에 대하여 적용하고 고찰하였다.

* 正 會 員 : 忠 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 計 算 機 工 學 部 助 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002 年 11 月 14 日

最 終 完 了 : 2003 年 1 月 16 日

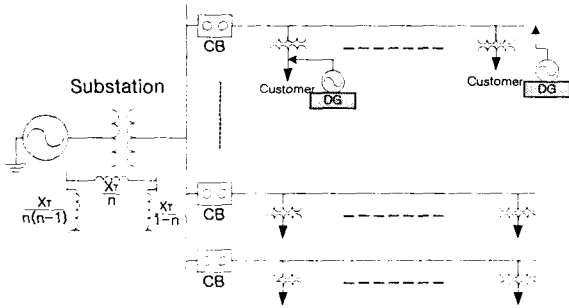


그림 1 분산전원이 도입된 배전계통 기본 모델
Fig. 1 Basic Model of Distribution System interconnected with DG

2. 분산전원이 도입된 배전계통 모델링

2.1 분석대상 배전계통의 기본 모델

현재 국내 및 외국의 전력회사에서는 배전계통 해석시 모든 부하를 역률일정의 정전류부하로 처리하며, 주변압기의 임피던스를 고려하지 않고, 2차측 전압을 일정한 값으로 고정한 채 전압해석을 수행하고 있다. 그러나, 실제 송전라인으로부터 전송된 전력은 배전용변전소의 주변압기를 거쳐 각 배전선으로 공급되고, 부하전류의 변동에 따라 주변압기의 ULTC와 LDC를 이용하여 수용가의 단자전압이 207V~233V가 되도록 배전계통의 전압이 조정되고 있으므로 전압 해석을 위한 대상배전계통은 배전용변전소의 주변압기를 포함한 계통일 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 분산전원이 도입된 배전계통의 전압을 보다 정확하게 해석하기 위해 배전용변전소 주변압기의 1차측을 무한모선으로 가정하고 주변압기 내부임피던스를 포함한 그 이하의 배전선로들에 분산전원이 도입된 계통을 분석대상 배전계통의 기본모델로 하였다. 그림 1은 배전계통의 기본모델을 나타낸다.

2.2 ULTC 주변압기 및 LDC 동작특성 모델링

ULTC 및 LDC 전압조정 방법은 배전계통 전압조정에 널리 사용되고 있으며 우리나라 배전계통에서도 ULTC에 의한 전압조정이 이루어지고 있다. ULTC 및 LDC 전압조정 장치는 그림 2에서와 같이, 미리 LDC의 정정계수인 R, X, V₀를 결정하여두고 모든 수용가의 전압이 허용된 범위를 만족하도록 ULTC 주변압기의 탭을 조정한다. 이 때 LDC의 정정계수인 R, X, V₀는 최대부하시의 최적 송출전압 V_{spo,max}, 최대전류 I_{max} 및 부하역률 θ_{max}와 최저부하시의 최적송출전압 V_{spo,min}과 최소전류 I_{min}을 이용하여 산출된다[1][2][3].

LDC의 정정계수는 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$R = \frac{V_{spo,max} - V_{spo,min}}{\sqrt{3}(I_{max} - I_{min})} \cos \theta_{max} \quad (1)$$

$$X = \frac{V_{spo,max} - V_{spo,min}}{\sqrt{3}(I_{max} - I_{min})} \sin \theta_{max} \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{I_{max} \cdot V_{spo,min} - I_{min} \cdot V_{spo,max}}{I_{max} - I_{min}} \quad (3)$$

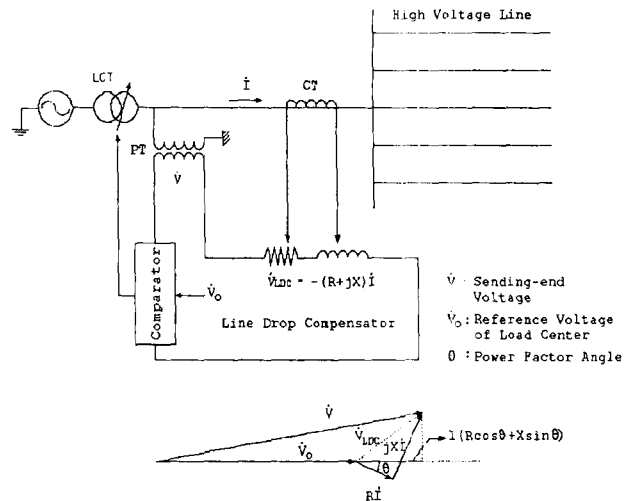


그림 2 ULTC 주변압기 및 LDC 전압조정 개념도
Fig. 2 Concept of ULTC main transformer & LDC voltage regulation

따라서, 송출기준전압 V_{spo}는 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$V_{spo} = (R \cos \theta + X \sin \theta)I + V_0 \quad (4)$$

그림 2는 ULTC 주변압기 및 LDC 전압조정 개념도를 나타낸다. 그림 2에서 주변압기를 고려한 ULTC 및 LDC의 전압조정 방법은 주변압기 2차측에 흐르는 전압과 전류를 이용하여 송출기준전압과 송출전압사이의 오차를 계산하고 오차가 Dead Band 범위를 벗어나면 LCT의 탭 값을 증가 또는 감소시킴으로써 배전계통의 적정전압을 유지하도록 전압 조절을 하도록 되어 있다.

ULTC 및 LDC를 고려한 전압조정 방법은 다음과 같다 [8].

$$n(t+1) = n(t) - d \cdot f(e(t), \tau(t)) \quad (5)$$

$$\tau(t+1) = g(e(t), \tau(t)) \quad (6)$$

$$f(e, \tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau > T_d \\ -1 & \text{if } e < -\epsilon \text{ and } \tau < -T_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$g(e, \tau) = \begin{cases} \tau + 1 & \text{if } e > \epsilon \text{ and } \tau \geq 0 \\ \tau - 1 & \text{if } e < -\epsilon \text{ and } \tau \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$e = V - V_{ref} \quad (9)$$

여기서,

- n : ULTC 변압기의 탭 값
- d : ULTC 변압기의 탭 간격
- e : 전압오차
- ε : dead band의 크기
- T_d : 시간지연
- τ : 카운터

V : 주변압기 2차측 송출전압
 Vref : 주변압기 2차측 송출기준전압

2.3 분산전원과 부하 모델링

전력계통의 조류해석에 있어서 발전기들은 시스템 전압의 등유지가 가능한 P-V 노드 또는 시스템의 전압을 추종하는 정역률, 정출력 운전을 하는 P-Q 노드로 처리된다. 그러나, 배전계통에 도입되는 분산전원은 연계점의 전압을 일정하게 유지할 수 있을 정도로 큰 용량을 갖지 않고 또한, 제이기도 대부분이 정역률, 정출력 운전을 하도록 설계되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 분산전원을 P-V노드가 아닌 P-Q노드로 처리하였다. 즉, 분산전원은 부의 특성을 갖는 정전력 부하로 고려될 수 있다.

한편, 실배전계통의 부하는 정전력, 정전류, 정임피던스 부하가 서로 혼합된 형태인 합성부하 형태로 구성되어 있으나, 여기에서는 주변압기를 제외한 모든 부하를 전압변동에 영향을 큰 정전력 부하로 가정하였다.

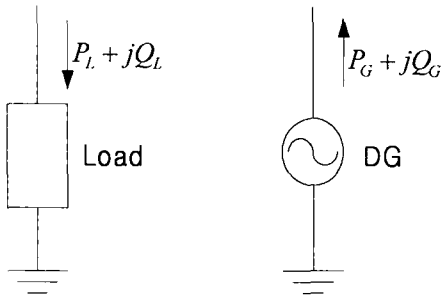


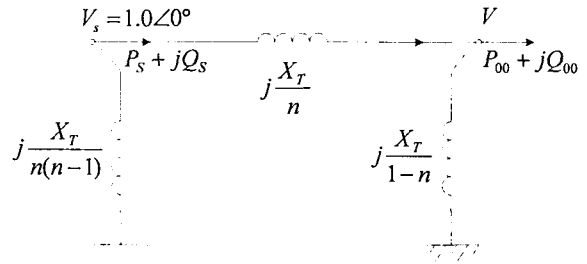
그림 3 부하 및 분산전원의 등가모델
 Fig. 3 The equivalent models of a load and a DG

그림 3은 부하와 분산전원의 등가모델을 보여주고 있다. 그림 3에서 부하 및 분산전원은 진상에 대하여 무효전력량이 부(-)의 값으로 되며, 지상에 대하여 무효전력량은 정(+)의 값을 가지게 된다.

2.4 ULTC 주변압기 모델링

주변압기의 내부임피던스는 변압기 정격용량의 약 15%정도로서, 정확한 배전계통의 해석을 위해서는 반드시 고려되어야만 한다. 그러나, 일반적으로 전원측을 무한모션으로 가정하는 조류계산의 특성상 변압기를 주변압기 2차측에 연결되어있는 피더들과 직접 연결할 수가 없다. 따라서, 이 부분들을 해결하기 위하여 ULTC 변압기를 π 등가회로로 바꾸었다.

그림 4에서 주변압기 1차측의 전압은 크기가 1 p.u.이고 위상이 "0"인 것으로 한다. 위의 그림에서 주변압기 2차측에 연결되어있는 임피던스($jX_T/(1-n)$)는 주변압기 2차측의 전압에 따라 가변하는 정임피던스 부하로 가정할 수 있다. 따라서, 조류해석시 전압에 의존하는 정임피던스 부하로 처리된다.



Vs : 주변압기 1차전압, V : 주변압기 2차전압
 XT : 주변압기 임피던스, n : 주변압기 탭 값

그림 4 주변압기 등가모델
 Fig. 4 Equivalent model of Main Transformer

3. 조류 해석 알고리즘

일반적으로 조류해석은 Gauss-Seidel과 Newton-Raphson Method를 사용해왔다. 그러나, 배전계통은 대부분 방사상이고, 송전계통에 비해 R/X 비율이 매우 크기 때문에 이 두 방법을 배전계통에 적용하는데는 비효율적이라는 문제점을 가지고 있다. 그런데 1989년 Baran과 Wu에 의해 제안된 DistFlow Method는 admittance matrix를 사용하지 않고, 방사상 계통에 적합한 branch equation과 그 system jacobian의 determinant가 거의 1에 가깝다는 성질을 이용하여 해가 항상 구해질 수 있다는 우수한 장점을 가지고 있다[9][10]. 이 DistFlow Method 이론은 참고문헌 [10]에서 System Jacobian을 main feeder를 포함한 각각의 laterals 및 sublaterals로 나누어 해석 할 수 있도록 향상되었다. 그러나, 실배전계통은 배전용변전소의 주변압기 2차측에 여러개의 피더가 동시에 연결되어 있으며, 또한 여러 개의 하위 laterals, sub-laterals 및 sub-sub-laterals를 가지고 있어 DistFlow Method를 적용하는데 한계가 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 주변압기에서 인출되는 다수의 feeder를 처리하기 위한 Dummy bus & branch를 이용하는 방법과, 하위 laterals, sub-laterals 및 sub-sub-laterals를 처리하기 위한 numbering 방법, 이 두가지들을 이용하여 기존의 DistFlow Method를 개선한 조류계산 알고리즘을 제안한다.

3.1 DistFlow Method

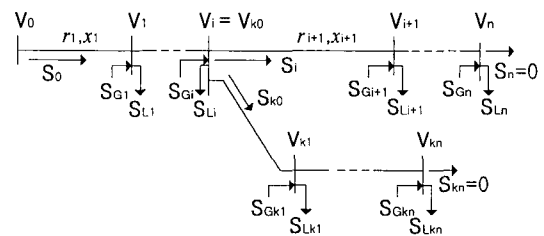


그림 5 방사상 배전계통
 Fig. 5 Radial Distribution System

DistFlow Method는 DistFlow branch equation이라는 반복적인 연산식을 사용하여 해를 구한다[3]. 먼저 그림 5와 같은 분산전원이 도입된 방사상 배전계통을 고려하기로 한다.

변전소의 인출전압의 크기는 V_0 , 각 branch의 임피던스를 $z_i = r_i + jx_i$, 각 버스의 부하를 $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$, 그리고 각 버스에 유입되는 분산전원을 $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$ 로 하면 (10)과 같은 방정식이 성립한다.

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_{i+1}(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 - P_{Li+1} + P_{Gi+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_{i+1}(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 - Q_{Li+1} + Q_{Gi+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + z_{i+1}^2(P_i^2 + Q_i^2)/V_i^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

P_i, Q_i : bus i에서 branch i+1로 향하는 유효, 무효전력

P_{Gi}, Q_{Gi} : bus i로 유입되는 분산전원의 유효, 무효전력

V_i : bus i에서 전압의 크기

z_i : bus i에서 임피던스의 크기

식 (10)은 branch flow equation이며, 일명 DistFlow equation이라 불린다. DistFlow Method에서는 변전소인출구의 전압이 일정하다는 것과 선로말단에서의 유효전력과 무효전력이 "0"라는 경계조건을 이용하여 위의 식 (10)을 반복 연산을 통하여 해를 구한다.

실배전계통은 다양한 부하가 혼재되어있는 합성부하 형태로 구성되어 있다. 합성부하는 정전력, 정전류, 정임피던스로 구성된 부하를 말하며, 일반적으로 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{Li}(V_i) &= P_{L0i}[a_{pi} + b_{pi}V_i + c_{pi}V_i^2] \\ Q_{Li}(V_i) &= Q_{L0i}[a_{qi} + b_{qi}V_i + c_{qi}V_i^2] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

P_{L0}, Q_{L0} : 정격운전 전압에 대한 부하

a_{pi}, a_{qi} : 정전력부하 성분계수

b_{pi}, b_{qi} : 정전류부하 성분계수

c_{pi}, c_{qi} : 정임피던스부하 성분계수

3.2 주변압기에서 인출되는 다수의 feeder 처리 방법

실배전계통은 주변압기 2차측 직하에 여러개의 피더가 동시에 연결되어 있다. 그러나, 기존의 Distflow Method를 이용한 조류계산으로는 이 부분에 대한 처리가 곤란하다. 이것은 주변압기 2차측과 각각의 피더 사이에 $r=x=PL=QL=0$ 인 dummy branch와 dummy bus를 사용하여 해결할 수 있다.

Dummy bus & branch란 가상의 bus와 branch를 의미하며, dummy branch는 임피던스가 "0"이며, dummy bus에는 부하가 없다. 그림 6은 하나의 모선에 4개의 피더가 동시에 연결되어있는 경우에 대한 간단한 Dummy bus & branch 모델을 보여주고 있다. 이 때 V는 주변압기 2차측의 전압을 의미하며, dummy bus의 개수는 주변압기 직하에 연결되어 있는 피더의 수와 같다. 그림 6에서와 같은 Dummy bus에서는 전압강하 없이 모든 노드의 전압값이 동일하게 된다.

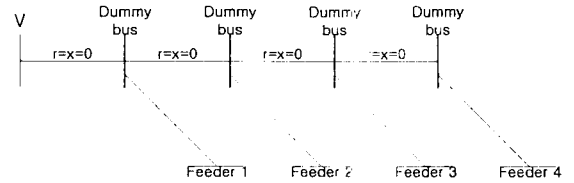


그림 6 Dummy bus와 branch를 이용한 주변압기에서 인출되는 다수의 feeder 처리 방법

Fig. 6 Solution for the feeders connected with main transformer using dummy bus & branch

즉, 모든 dummy bus에서의 전압은 주변압기 2차측의 전압과 같게 되어 모든 피더가 주변압기 2차측에 직접 연결된 것과 같게 된다.

3.3 하위 Laterals, Sub-laterals 및 Sub-sub-laterals의 처리 방법

실배전계통에서는 다수의 하위 laterals, sub-laterals 및 sub-sub-laterals를 갖고 있으므로, 여기에서는 이들에 대한 numbering 방법을 제시한다. 우선, 본 논문에서는 main feeder를 포함한 laterals 및 sublaterals, sub-sublaterals 등을 각각 하나의 lateral로 간주한다.

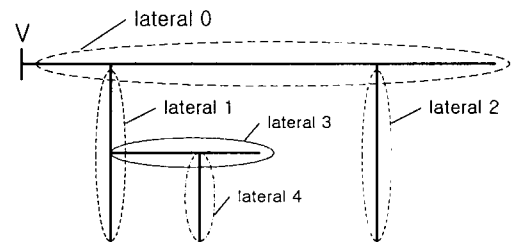


그림 7 lateral의 번호부여 방법

Fig. 7 lateral numbering Method

먼저, 모든 피더를 각각의 lateral로 간주하고 각각의 피더에 lateral 번호를 부여한다. lateral 번호 부여는 주변압기 직하에 연결되어있는 main feeder로부터 하위 lateral로 가면서 순차적으로 부여한다. 만약 1개의 lateral이 있는 경우에 main feeder를 lateral 0으로 간주한다면, lateral 0부터 1까지 모두 1+1개의 lateral이 생성된다. 예를 들면, 그림 6과 같은 배전계통에 대한 numbering 방법은 처음 main feeder를 lateral 0로 하고, 다음의 하위 laterals를 배전용변전소에서 가까운 지점으로부터 lateral 1과 lateral 2로 한다. 다음으로 sublateral에 대한 numbering을 하고, 계속해서 sub-sublateral, sub-sub-sublateral 순으로 numbering을 수행한다.

이 때 numbering은 각 lateral과 node의 첨자로 구별하여 sublateral 증가시에 야기될 수 있는 문제를 해소하였다. 예를 들면, $V_{i,k}$ 에서 I는 main feeder를 포함한 lateral의 번호, k는 i번째 lateral의 노드 번호를 나타내는 것으로 하면, $V_{i,k}$ 는 i번째 lateral의 k번째 노드의 전압의 크기가 된다. 모든 lateral에 numbering이 끝나면 position matrix를 생성한다.

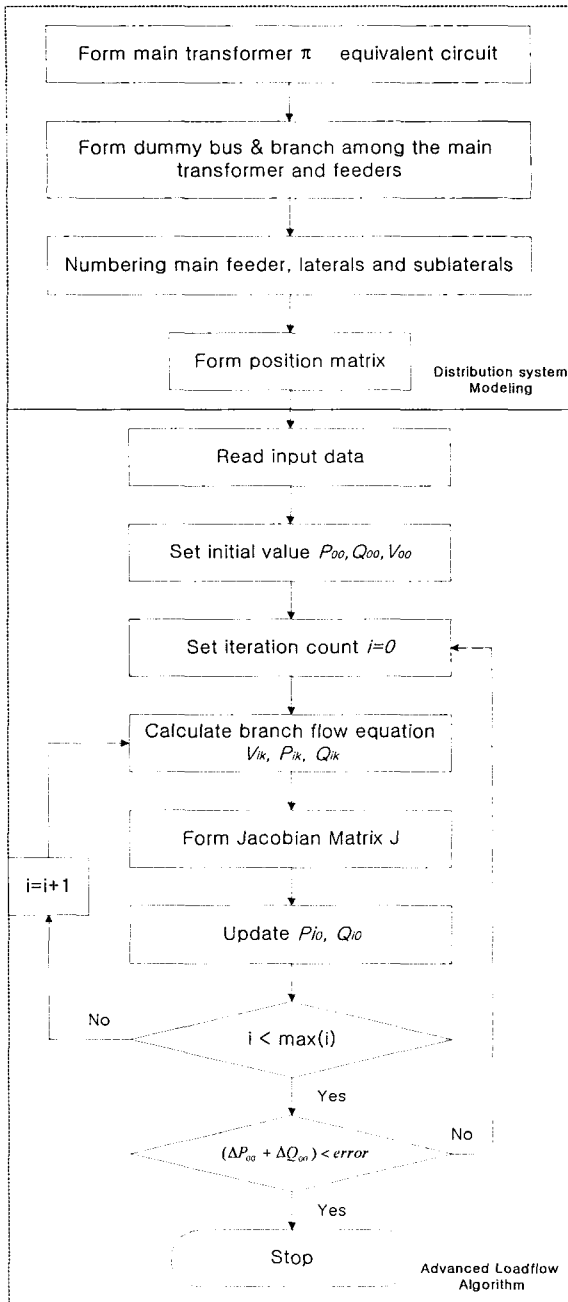


그림 8 개선된 조류계산 알고리즘 플루차트
 Fig. 8 Flowchart of an advanced loadflow algorithm

Position matrix는 lateral의 정보를 갖는 행렬로써, 개선된 조류계산 알고리즘에서 다수의 하위 laterals 및 sublaterals에 대한 조류계산을 수행하는데 이용된다.

3.4 개선된 조류계산 알고리즘

기존의 DistFlow method에 위에서 언급한 주변압기에서 인출되는 다수의 feeder 처리방법과 하위 laterals 및 sublaterals를 처리하는 방법을 이용하여 개선된 조류계산 알고리즘을 제시하고자 한다. 만약 1개의 lateral이 있는 경우에 main feeder를 lateral 0으로 간주한다면, lateral 0부터

1까지 모든 lateral에 대해 독립적으로 DistFlow Equation을 이용하여 각 lateral의 P_{ik}, Q_{ik}, V_{ik} 를 산출하고, 산출된 각 lateral의 초기 P_{i0}, Q_{i0} 값들을 update하여 나감으로써 조류계산을 수행한다. 그림 8에 개선된 조류계산 알고리즘을 제시한다.

메인 피더를 포함해서 1개의 laterals를 갖는 배전계통에 대한 개선된 조류해석 알고리즘은 아래와 같은 8단계로 수행된다.

개선된 조류계산 알고리즘

- step1 : 주변압기의 π 등가회로를 구성한다.
- step2 : 피더의 개수만큼 dummy bus와 dummy branch를 주변압기 2차측에 연결한다.
- step3 : Main feeder를 포함하여 모든 하위 laterals와 sublaterals에 대하여 numbering을 수행한다.
- step4 : Position matrix를 생성한다.
- step5 : 데이터값을 읽어온다.(부하용량, 선로데이터, 분산전원용량등)
- step6 : Lateral 0의 처음 bus부터 마지막 bus까지 P_{ik}, Q_{ik}, V_{ik}^2 을 구한다.
- step7 : System jacobian matrix를 구성한다.
- step8 : Lateral의 처음 bus의 P_{i0}, Q_{i0} 를 update 한다.
- step9 : Lateral 1까지 step6~step8을 반복한다.
- step10 : 수렴치에 만족할 때까지 step6~step9를 반복한다.

그림 8은 위에서 언급한 기존 DistFlow Method의 단점을 보완한 개선된 조류계산 알고리즘의 flowchart로 이 알고리즘을 이용하면 하위 laterals, sub-laterals 및 sub-sub-laterals들로 구성되는 모든 복잡한 배전계통에 대한 모델링과 조류계산이 쉽게 이루어 질 수 있다.

4. 분산전원의 출력량 변동 및 부하의 변동에 따른 시간대별 적정전압유지범위 산출 방법

수용가의 단자전압을 항상 적정범위 이내로 유지한다는 것은 양질의 전력을 공급한다는 측면에서 매우 중요한 사항이다. 일반적으로 수용가의 전기기기는 정격전압에서 사용할 경우 가장 좋은 성능을 발휘하도록 설계되기 때문에 만일 전압이 정격에서 벗어나면 효율저하, 수명단축, 손실증대 등의 나쁜 영향이 나타나고, 전력을 공급하고 있는 전력회사 측에서 보면 전력계통의 각 지점에서 적정한 전압을 유지하지 못하면 전력계통 전반에 걸쳐 나쁜 영향을 끼치게 된다. 즉, 전력계통의 각 지점에서 전압을 적정범위 이내로 유지하지 못하면 개개의 기기는 물론 전력계통 전반에 걸쳐 여러 가지로 나쁜 현상이 발생해서 결과적으로 공급신뢰도와 경제성의 저하를 초래하게 되므로 전압제어는 계통운용상 필수적인 것이다. 따라서, 배전계통의 운용자는 모든 수용가의 단자전압이 적정범위 이내로 유지되는지의 여부를 정확히 판단할 필요가 있다[11].

기존의 대부분의 배전계통 전압해석과 관련된 논문에서는, 특정한 부하상태에서 배전용변전소로부터의 단수거리에 따른 전압특성곡선을 통한 전압해석이 대부분이었다

[1][2][7][9][10]. 이 해석방법은 모든 노드에 대한 전압을 알 수 있다는 장점이 있으나, 부하의 변동 및 분산전원의 출력량이 수시로 변화하는 실제 배전계통의 운용과는 거리가 있다. 배전실무자 입장에서는 단순거리에 따른 전압특성곡선을 통한 전압해석보다는 분산전원의 출력량 변동 및 부하의 변동에 따른 시간대별 선로전압이 규정전압범위를 모두 만족하는지의 여부를 아는 것이 더 중요할 것으로 사료된다. 이 때 모든 선로의 전압상태를 파악하는 것보다 주변압기직하, 선로말단 및 분산전원이 도입된 지점등 대표적인 지점을 선정하여, 선정된 지점의 전압이 규정전압을 만족하는지의 유무를 판단한다면, 모든 수용가의 전압이 적정유지전압범위를 만족하는지의 여부를 쉽게 알 수 있을 것이다.

그러나, 조류계산을 이용한 각 노드의 전압은 저압수용가의 단자전압이 아니라, 특고압선로에 대한 전압값으로, 산출된 노드의 전압값이 저압수용가의 규정전압유지범위를 만족하는지의 여부를 알기 위해서는 하기의 방법과 같이 저압배전선의 전압허용범위(220±6%)를 22.9kV 특고압 선로의 전압허용범위로 환산할 필요가 있다. 이 때 22.9kV 특고압선로의 전압허용범위를 산출하기 위해서는 특고압선로측의 전압인 주상변압기 1차측으로부터 저압수용가의 수전단에 이르기까지의 전압강하성분인 주상변압기 전압강하, 저압선 전압강하 및 수용가 인입선 전압강하를 고려하여야만 한다.

주상변압기이하 저압선로의 말단수용가의 단자전압을 207~233V 내로 유지하기 위한 22.9kV 선로측의 전압유지범위는 주상변압기 전압강하 Δv_{ptr} , 저압선 전압강하 Δv_{low} , 및 수용가 인입선 전압강하 Δv_{ent} 를 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{207}{230} \leq V_{22.9, pu} \times \frac{230/230}{13200 \times \sqrt{3}/22900} - \Delta v_{ptr} - \Delta v_{low} - \Delta v_{ent} \leq \frac{233}{230} \quad (12)$$

여기서, $V_{22.9, pu}$: 22.9kV 선로측의 전압
 Δv_{tr} : 주상변압기 전압강하
 Δv_{low} : 저압선 전압강하
 Δv_{ent} : 수용가 인입선 전압강하

또한, 주상변압기(P.tr) 직하수용가의 단자전압을 207~233V 내로 유지하기 위한 22.9kV 선로측의 전압유지범위는 주상변압기 전압강하 Δv_{tr} 및 수용가 인입선 전압강하 Δv_{ent} 를 고려하면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{207}{230} \leq V_{22.9, pu} \times \frac{230/230}{13200 \times \sqrt{3}/22900} - \Delta v_{ptr} - \Delta v_{ent} \leq \frac{233}{230} \quad (13)$$

식 (12)와 (13)으로부터 주상변압기 이하의 모든 저압수용가가 적정유지전압을 만족하기 위한 22.9kV 선로측의 유지범위는 주상변압기 직하수용가 및 말단수용가의 단자전압을 모두 만족시켜야하므로 위의 두 식 (12) 및 (13)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{207}{230} + \Delta v_{ptr} + \Delta v_{ent} + \Delta v_{low} \right) \times 0.9984 \leq V_{22.9, pu} \leq \left(\frac{233}{230} + \Delta v_{ptr} + \Delta v_{ent} \right) \times 0.9984 \quad (14)$$

따라서, 주상변압기이하 저압선로의 모든 저압수용가의 적정전압유지를 위한 22.9kV 선로측 전압유지범위는 시간(t)을 고려한 함수로서 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\left(\frac{207}{230} + \Delta v_{ptr}(t) + \Delta v_{ent}(t) + \Delta v_{low}(t) \right) \times 0.9984 \leq V_{22.9, pu}(t) \leq \left(\frac{233}{230} + \Delta v_{ptr}(t) + \Delta v_{ent}(t) \right) \times 0.9984 \quad (15)$$

식(15)로부터 각 시간대별로 부하상태 및 분산전원의 출력량에 따른 저압배전선의 전압허용범위(220±6%)를 22.9kV 특고압 선로의 전압허용범위로 환산한 적정전압유지범위는 사례연구의 그림 10에서와 같이 각각의 시간에 따른 전압의 크기로 나타낼 수 있다. 따라서, 배전실무자는 조류계산을 통해 산출된 결과로부터 전압해석을 수행하고자하는 지점의 선로전압이 위의 적정전압유지범위를 만족하는지를 파악함으로써 배전계통의 전압조정이 잘 되고있는지의 여부를 쉽게 알 수 있다.

5. 분산전원이 도입된 배전계통 전압해석 방법

분산전원이 도입된 배전계통 전압해석 알고리즘은 정상상태 운전 조건하에서 분산전원을 포함하는 배전계통에 부하의 변동 및 분산전원의 출력량 변동에 따른 배전선로의 전압특성이 어떻게 변화하는지를 파악하기 위한 것이다. 본 논문에서 제시하는 배전계통 전압해석 알고리즘은 기존에 사용되어오던 배전계통모델링 및 전력조류계산 방법을 좀더 실배전계통에 가깝도록 향상시켰다. 따라서, 여기서는 본 저자에 의해 제시된 배전계통 모델링 방법과 개선된 조류계산 알고리즘을 이용하여 분산전원이 도입된 배전계통 전압해석 알고리즘을 하기와 같이 제안하고자 한다.

그림 9는 배전계통 전압해석 알고리즘의 flowchart를 나타낸다. 그림 9의 flowchart에서 "Distribution System Modeling" "Advanced Loadflow Algorithm" 그리고 "ULTC Operating Algorithm"은 본 논문의 2장 및 3장에서 언급된 알고리즘의 일부분에 해당된다. 분산전원이 도입된 배전계통의 전압해석 방법은 다음의 순서와 같이 해석될 수 있다.

분산전원이 도입된 배전계통 전압해석 방법

- step1 : 분석대상 배전계통을 선정한다.
- step2 : 선정된 배전계통을 모델링한다.
- step3 : 각 시간에 따른 부하량 및 분산전원의 출력량을 입력한다.
- step4 : 조류계산을 수행한다.
- step5 : ULTC 전압조정을 수행한다.
- step6 : 저압수용가의 적정전압유지를 위한 22.9kV 선로측 전압유지범위를 산출한다.
- step7 : 선로전압 및 전압유지범위 산출데이터를 저장한다.

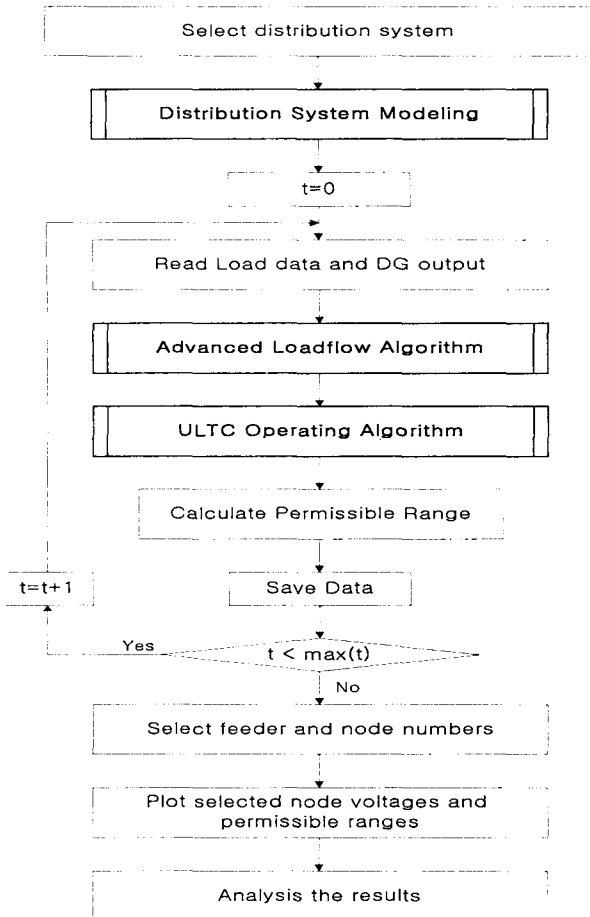


그림 9 배전계통 전압해석 알고리즘
 Fig. 9 Distribution System Voltage Analysis Algorithm

- step8 : $t < \max(t)$ 이면 step3부터 step7까지 반복한다. 그렇지 않으면 step9로 간다.
- step9 : 해석하고자하는 피더 및 노드번호를 선택한다.
- step10 : 선정된 노드전압 및 산출된 22.9kV 선로측 전압유지범위를 도시한다.
- step11 : 관련데이터 및 그림을 이용하여 배전계통의 전압해석을 수행한다.

제안된 전압해석 알고리즘을 이용하여 분산전원이 도입된 배전계통에 적용할 경우 각 시간대별로 어느 지역이 언제 전압허용범위를 벗어났는지 쉽게 파악할 수 있을 것으로 사

6. 사례 연구

제안된 배전계통 전압해석방법을 적용하기 위하여 ULTC에 의해 전압조정이 되고있는 22.9kV급 배전계통인 서청주 변전소 #1 이하의 배전계통을 선정하였다. 여기에서는 사례 연구로서 분산전원이 도입되지 않은 경우와 도입된 경우의 서청주 변전소 #1이하의 배전계통에 대한 전압해석을 Matlab을 이용하여 보이기로 한다.

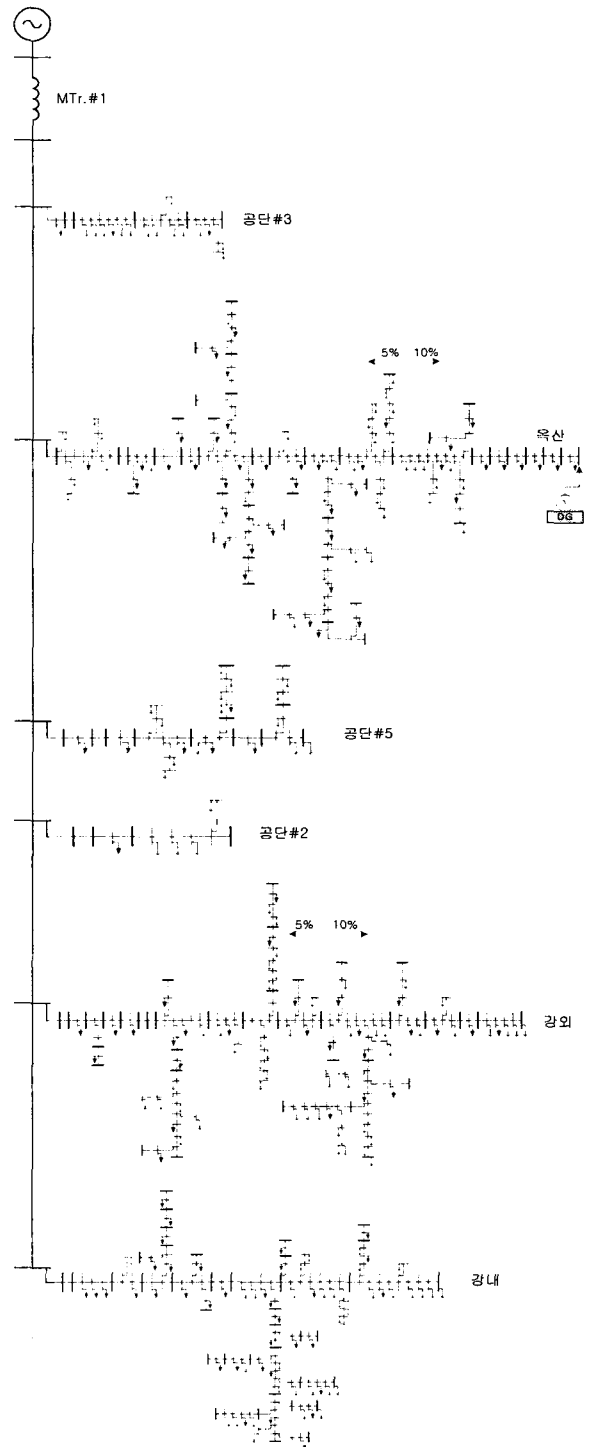


그림 10 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통의 모델
 Fig. 10 Distribution System Model for W. Cheong-Ju substation MTr Bank #1

6.1 실 배전계통 모델 선정

위에서 언급한 모델링 방법을 이용하여 ULTC로 전압조정이 되고있는 서청주 변전소 MTR Bank #1 이하의 배전계통에 대한 모델링을 수행하였다.

이 계통의 특징을 하기에 상세히 기술한다.

- Base MVA = 100[MVA], Base kV = 22.9[kV]
- 주변압기 용량 : 45/60 MVA
- 전체 피더의 개수 : 6
- 주변압기의 1차측 전압은 $1.0 \angle 0^\circ$ 로 일정히 유지되는 것으로 하였다.
- 주변압기의 임피던스 $Z = jXT = j0.333$ p.u.
- 22.9kV 배전선로의 임피던스 $Z = 0.0347 + j0.0746$ p.u./km
- 중부하시의 주상변압기의 평균전압강하 2%, 경부하시는 중부하시의 1/4 이다.
- 고압 및 저압배전선의 평균전압강하 6%, 경부하시는 중부하시의 1/4 이다.
- 수용가 인입선의 전압강하는 2%, 경부하시는 중부하시의 1/4이다.
- 주상변압기 5% Tap 비는 13200/230 이다.
- 주상변압기 10% Tap 비는 12600/230 이다.
- LCT의 탭 동작에 있어서, 탭 간격은 0.01 p.u.로 하였다.
- 저압수용가 단자전압 허용범위의 상한치를 233V, 하한치를 207V로 하고, 그 적정전압 기준치는 220V로 한다.

그림 10은 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통에 대한 모델을 나타낸다. 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통 모델에서 옥산구간과 강외구간은 5%탭과 10%탭 주상변압기를 모두 사용하고 있으며, 나머지 구간에서는 5%탭 주상변압기만 사용하고 있다. 그러나, 본 논문에서는 ULTC의 일일부하의 변화에 따른 전압특성곡선을 보이기 위하여 10%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 전압을 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 전압값으로 환산하였다.

6.2 분산전원 도입전 · 후의 부하변동에 따른 시간대별 전압해석 결과

배전계통의 전압해석은 임의의 부하상태(중부하 또는 경부하)시 모든 선로에서의 전압특성곡선에 대하여 수행하는 경우와, 일일 또는 연중 부하의 변동에 따른 각 선로에서의 최고 및 최저전압에 대한 전압특성곡선을 시간대별로 해석하는 경우로 구분할 수 있다. 일반적으로 배전계통 해석의 주체인 배전계통 운용자 입장에서는 일일 또는 연중 모든 수용가 전압이 규정전압범위를 만족하는지에 대하여 아는 것이 더 중요할 것으로 사려된다. 따라서, 본 논문에서는 일일 부하의 변동에 따른 각 선로에서의 최고 및 최저전압에 대한 시간대별 전압특성곡선의 해석방법을 이용하여 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통에 대한 전압해석을 수행한다.

제안된 배전계통 전압해석방법을 이용하여 분산전원의 도입전 및 도입후의 배전계통 전압해석을 수행하여 보기로 한다. 먼저, 분산전원이 도입되지 않은 경우와 옥산구간 말단에 지상 역률 0.9 및 진상 역률 0.9로 운전하는 5MVA 분산전원이 도입되었을 경우, 각각 하루중의 부하변화에 대하여 각 피더의 시간대별 전압특성곡선에 대한 전압해석을 수행하기로 하자.

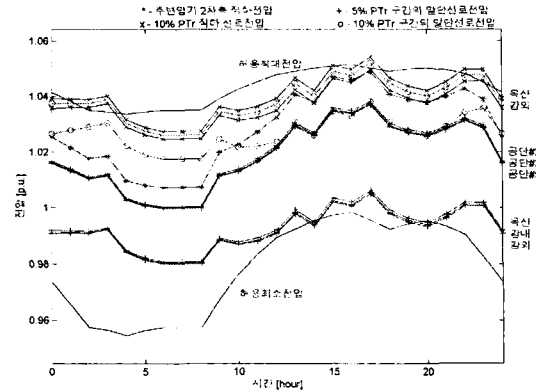
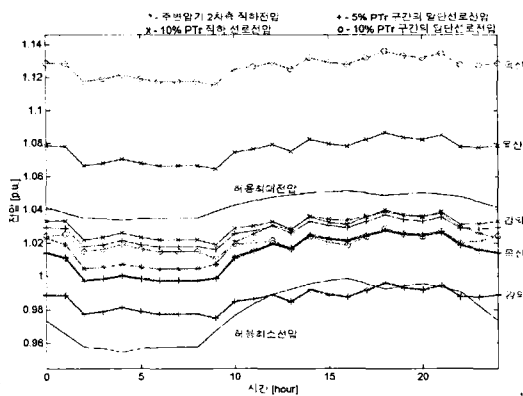


그림 11 분산전원이 도입되지 않은 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통 전압특성곡선
 Fig. 11 Distribution System Voltage profile of W. Cheong-Ju substation MTr Bank #1 without DG

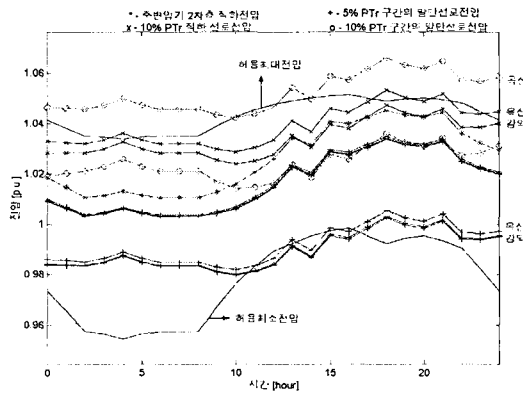
우선, 배전계통의 전압해석을 수행함에 있어서, 몇몇 필요한 노드의 전압값만을 알 필요가 있다. 본 논문에서 사용된 서청주 변전소 Bank #1 이하의 배전계통은 5% 및 10%탭 주상변압기를 모두 사용하고 있으므로, 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 최고전압과 최저전압 그리고 10%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 최고전압과 최저전압을 알 필요가 있다. 그러나 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간에서의 최고전압은 주변압기 2차측 직하에 연결되어있는 저압수용가의 단자전압을 5%탭 주상변압기 1차측으로 환산한 전압값과 같게 된다. 또한 모든 피더는 주변압기 2차측에 동시에 연결되어있으므로 각 피더의 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간에서의 최고전압은 주변압기 2차측 전압으로 대체할 수 있다. 따라서, 여기서는 주변압기 2차전압, 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 최저전압, 10%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 최고전압 및 최저전압에 대한 정보를 그림을 통하여 제시하였다.

그림 11은 분산전원이 도입되지 않은 배전계통의 하루중 부하의 변화에 따른 주변압기 2차전압(*표시), 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 마지막노드(-표시), 10%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 첫 번째 노드(x표시)와 마지막 노드(o표시)를 나타내고 있다. 그림 10에서 분산전원이 도입되지 않은 정상상태 조건에서 5%탭 주상변압기를 사용하는 구간 중 옥산, 강내, 강외의 말단선로가 전압 하한범위를 벗어나는 경우가 중부하시인 14시 및 20시에 나타났으며, 옥산 및 강외구간에서는 10%탭 주상변압기를 사용하는 일부 및 전구간이 전압 상한범위를 초과하는 경우가 나타났다. 그리고 다른 구간에서는 모든 단자전압이 전압허용범위를 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 12는 옥산구간 말단에 지상 역률 0.9 및 진상 역률 0.9로 운전하는 5MVA 분산전원이 도입되는 경우에 대한 하루 중의 각 피더의 5% 및 10%탭 주상변압기를 사용하는 구간의 최대전압과 최소전압에 대한 시간대별 전압특성곡선을 나타내고 있다.



(a) 분산전원의 운전역률 : 지상 0.9



(b) 분산전원의 운전역률 : 진상 0.9

그림 12 5MVA 분산전원이 도입된 배전계통 전압특성곡선
Fig. 12 Distribution System Voltage profile with 5MVA DG

그림 12로부터 지상 0.9로 운전하는 5MVA 분산전원이 도입된 경우에는 분산전원이 도입된 옥상구간 말단의 전압이 전압상한범위를 크게 벗어났으며 10%탭 주상변압기를 사용하는 전지역이 전압허용범위를 벗어났다(옥상 x, o표시). 그러나 진상역률 0.9로 운전하는 분산전원에 대해서는 분산전원이 도입된 옥상구간의 말단 일부분의 선로전압(옥상 o표시)만 전압상한치를 벗어났으며, 다른 선로는 대부분 분산전원이 도입되기 전과 유사한 전압특성곡선을 나타내고 있다.

탭 동작횟수는 분산전원 도입전 14번으로 나타났으며, 지상 0.9 및 진상 0.9로 운전하는 5MVA 분산전원이 도입된 경우는 각각 13번과 11번으로 나타났다. 즉, 분산전원이 진상역률로 운전하는 경우가 지상역률로 운전하는 경우에 비해 배전계통의 전압에 영향이 적었으며, 탭 동작 횟수도 감소한 것을 알 수 있다. 분산전원이 도입된 경우 전압허용범위를 가장 크게 벗어난 경우는 지상 0.9로 운전하는 분산전원이 도입된 18시의 옥상구간 말단전압이며, 이 때 주상변압기 직하에 연결되어있는 저압수용가 단자전압은 251V로 전압상한값인 233V보다 약 18V가 높게 나타났다.

사례연구를 통해 분산전원이 도입된 배전계통에 대한 전압해석은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 도입되는 분산전원이 지상으로 운전될 경우 : 분산전원이 도입되는 선로에서는 전압상승, 나머지 선로에서는 탭 위치의 저하에 의한 전압강하가 발생한다.
- 2) 도입되는 분산전원이 진상으로 운전될 경우 : 지상에 비해 배전선로의 전압변동에 큰 영향이 없다.
- 3) 10% 탭 주상변압기를 사용하는 구간이 5% 탭 주상변압기를 사용하는 구간에 비해 분산전원의 도입으로 인해 전압허용범위를 벗어날 가능성이 크다.
- 4) 도입되는 분산전원이 진상으로 운전될 경우에는 도입전에 비해 주 변압기 탭 동작횟수가 감소된다.

7. 결 론

본 논문에서는 분산전원이 도입된 배전계통을 모델링 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 분산전원이 기존의 배전계통 전압조정 에 미치는 영향을 분석 할 수 있는 시간대별 전압 해석 방법을 제안하였다. 제안된 시간대별 전압해석 방법은 기존의 ULTC 동작뿐만 아니라 분산전원이 도입된 배전계통에 대한 전압해석이 가능하다. 또한, 사례연구를 통하여 ULTC로 전압조정이 되고있는 배전계통에 분산전원이 도입 되었을 경우에 대한 실배전계통의 전압해석 예를 보였다.

분산전원이 도입된 기존의 배전계통에 대한 전압해석을 수행함으로써, 앞으로 분산전원을 도입하고자 하는 배전계통의 배전전압조정 및 급전계획을 결정하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 본 논문에서 제시한 배전계통 모델링 방법 및 전압해석 방법을 이용하여 실무자가 쉽게 기존의 배전계통을 실제에 가깝게 모델링 및 전압해석을 수행할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제(과제번호: 00-전-01)임.

참 고 문 헌

- [1] J. Kim et al.: Methods of Determining the introduction Limit of Dispersed Generation Systems in A Distribution System from the Viewpoint of Voltage Regulation, IEE Japan, Trans., Vol.16-B, No.12,pp.1461-1469, 1996
- [2] Turan G nen: Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, New York, 1986
- [3] Electric Association Group in Japan: The Regulation and Management of Distribution Voltage, report, Vol.24, No.4, 1968. (In Japanese)
- [4] Barker, P.P. De Mello, R.W.: Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 -radial Distribution Systems, Power Engineering

Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 3, 2000 Page(s): 1645 -1656 vol. 3

- [5] Dugan, R.C.; McDermott, T.E. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems, Rural Electric Power Conference, 2001, 2001 Page(s): A3/1 -A3/6
- [6] Joon-Ho Choi, Jae-Chul Kim : Advanced Voltage Regulation Method of Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems, IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 16, No.2, pp.329-334. April 2001
- [7] 김태응, 김재언 “배전계통에 도입되는 분산전원의 운전 가능범위결정이 관한 연구” 대한전기학회논문지 제51권, 제2호, pp. 93-101, 2002, 2
- [8] M. S. Calovic, "Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control System". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-103. No.7, pp.1909-1915. July 1984.
- [9] M. E. Baran, F. F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [10] 짝도일, 김재언, “배전계통에서의 새로운 DistFlow Method에 대한 연구”, 대한전기학회논문지, 제49권, 7호, pp. 365-368, 2000, 6
- [11] 한국전력공사, 설계기준II(배전분야), 1997.

저 자 소 개



김태응 (金兌應)

1972년 11월 23일생. 1999년 충북대 공대 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. Tel: 043-261-2423, Fax: 043-261-3191 E-mail: tykim@vod.chungbuk.ac.kr



김재언 (金在彦)

1959년 7월 17일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 3월 1일~1998년 8월 31일 한국전기연구소 근무. 1996년 일본 교토대 전기공학과 졸업(공학). 배전계통운용, MW급 전지전력 저장시스템 설계 및 운용, 분산전원 계통연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산배전계통, 전력품질 해석 및 진단, Custom Power Devices 등의 연구분야에 종사. 1995년도 일본 전기학회 전력·에너지부문대회 우수논문 발표대상 수상. 현재, 충북대학교 공과대학 전기전자컴퓨터공학부 조교수.

Tel: 043-261-2423, Fax: 043-261-3191

E-mail: jekim@chungbuk.ac.kr