

배전계통에서의 분산전원 도입운용 관리방법 : LDC 운영을 하지 않을 경우

정원재, 김태웅, 김재언
충북대학교

A Control Method of Distributed Generation System Which is Connected to Power Distribution System : Without LDC Operation

Won-Jae Jung, Tae-Eung Kim, Jae-Eon Kim
Chungbuk National University

Abstract - Nowadays, small scale DGS(Distributed Generation System), as a wind power generation or photovoltaic generation, becomes to be introduced into the power distribution system. But in that case, it is difficult to properly maintain the terminal voltage of low voltage customers. So, it is necessary to determine the permissible operation limit of the introduced DGS for proper voltage in distribution system. In this paper computes permissible operation limit of DGS, when the DGS is connected to power distribution system using fixed tap(without LDC operation). For this simulation, KEPCO distribution system is used.

분산전원이 실 배전계통에 연계되었을 경우의 전압변동영향을 분석하기 위한 대상도입 배전계통으로는 서청주 MTr #2의 실 배전계통을 사용하였다. 주변압기 용량 45/60MVA, 배전선로의 기준용량은 100MVA, 기준전압은 22.9kV, 주변압기의 임피던스는 0.333p.u.이다. 전체 피더의 개수는 6개이며 선로의 길이는 3.01km(가경선로)에서 13.25km(태성선로)까지이고 피더의 용량은 5760kW(태성선로)에서 8640kW(가경선로)까지이다. 그림 1에서 MTr Bank 내의 주변압기는 내부임피던스를 고려한 조류계산을 수행하기 위하여 π 등가회로로 변환하였다. 분산전원이 도입되지 않았을 때 경부하시 및 중부하시의 배전선로 전압변화는 그림2와 같다.

1. 서 론

최근에 기존의 배전계통에 있어서 풍력발전단지, 연료전지, 태양광발전 같은 분산전원의 도입이 적극 검토되고 있다. 그러나, 분산전원이 배전계통에 도입되었을 때 이로 인하여 배전계통의 전압이 허용범위를 벗어날 수 있다. 따라서 분산전원이 소규모로 도입되는 초기보급단계의 배전계통의 운용체계로서 고려될 수 있는 가장 기본적인 현실적인 형태는 기존의 전압운용체계를 바꾸지 않고, 그대로 활용하면서 분산전원의 계통운전을 무리 없이 수용할 수 있는 체계가 될 것이다.

현재, 국내의 배전계통에 있어서 전압조정 방법은 LDC(Line Drop Compensator)를 사용하는 방법과 LDC는 설치되어있으나 LDC를 사용하지 않고 탭을 고정시켜 놓는 방법이 있다.

본 논문에서는 LDC가 설치되어있으나 LDC를 사용하지 않고 탭을 고정시켜 놓는 경우에 대하여 배전계통의 전압조정체계를 유지할 수 있는 분산전원의 운전가능범위를 결정하는 방법을 제안하고, 이를 실제의 22.9kV급 배전계통에 적용하여 타당성을 증명하였다.

2. 실 배전계통과 분산전원 도입에 따른 영향

2.1 실 배전계통

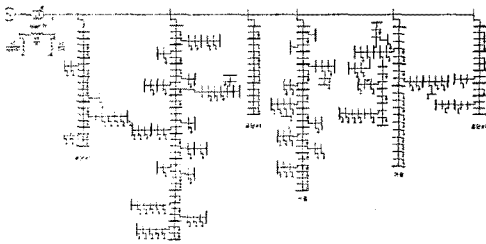
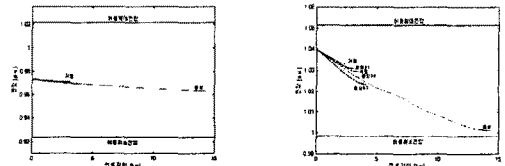


그림 1 서청주 변전소 #2의 계통도

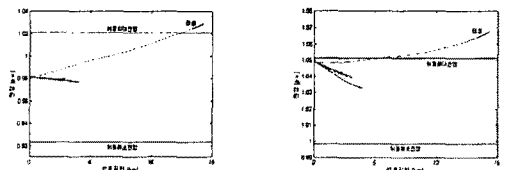


(a) 경부하시 (b) 중부하시
그림 2 분산전원이 도입되지 않은 경우의 선로전압

그림2에서 보면, 수용가 단자전압유지의 허용범위 207~233V를 고려한 중부하시 고압배전선의 유지범위 0.9984p.u.~1.0514p.u., 경부하시 고압배전선의 유지범위 0.9235p.u.~1.0214p.u.을 모두 만족하고 있다. 그리고 중부하시에는 주변압기 2차측 직하의 전압이 1.0393p.u.(23800V), 경부하시에는 주변압기 직하의 전압을 0.9738(22300V)로 고정시켰다.

2.2 분산전원의 도입이 기존배전계통에 미치는 영향 분석

분산전원의 영향을 분석하기 위하여, 배전계통의 태성구간의 마지막 노드에 지상역률 0.9로 운전하는 5MVA 분산전원을 도입하였다.



(a) 경부하시 (b) 중부하시
그림 3 분산전원이 도입된 경우의 선로전압

그림3을 보면, 특히 중부하시 배전계통에 분산전원이 도입됨으로써 주변압기 2차측의 부하전류가 감소되어 송출전압이 저하하게 되고, 분산전원이 도입된 선로 말단부에 위치한 저압수용가의 전압이 상승하여 전압허용범위를 벗어났다. 또한 이러한 현상은 전압유지 허용범위의 여유가 있는 경우하시보다는 중부하시에 송출전압의 변화로 인해 저전압 또는 과전압 수용가가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이때 도입되는 분산전원의 운전역로도 진상보다는 지상의 경우가 그 영향이 더욱 두드러지게 된다는 것을 알 수 있었다.

3. 분산전원의 운전가능범위 결정 방법

분산전원의 배전계통도입시 도입대상 배전계통의 적정 전압 조정에 영향을 미치지 않기 위해서 중부하시에 만족해야할 조건은 첫째, 중부하시 선로전압프로파일이 전압 허용범위내에 있어야 하고 둘째, 도입되는 분산전원의 출력량이 선로 설비 용량을 초과하지 말아야 한다.

3.1 분산전원의 도입량과 전압허용범위와의 관계조건

분산전원이 기존의 배전계통에 도입되면 분산전원의 출력에 의해 주변압기 임피던스에 의한 전압변화(강하 또는 상승)와 선로임피던스에 의한 전압변화가 발생하게 된다. 따라서 분산전원이 도입되지 않는 선로에 대한 전압변동과 분산전원이 도입되는 선로에 대한 전압변동을 고려할 필요가 있다. 먼저, 주변압기 임피던스에 의한 전압변화는 주변압기 이하에 연결되어있는 모든 선로의 전압프로파일을 주변압기에서의 전압변화량과 거의 같은 크기로 선형적으로 강하 혹은 상승을 하게 되어 적정전압 유지범위를 벗어나게 될 가능성이 높으므로, 주변압기 이하의 배전선로를 중에서 분산전원이 도입되지 않는 전압강하가 제일 심한 선로를 선택하여 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계조건을 도출해야 할 필요가 있다.

기존의 배전계통에 분산전원이 도입 될 때 주변압기 임피던스에 의한 전압변화량을 고려하기 위하여 그림4에서와 같이 주변압기이하의 분산전원이 도입되지 않는 배전선로 중 전압강하가 제일 심한 선로의 전압프로파일과 적정전압유지 상한치 및 하한치의 차 측, 상한여유($VH^2 - V_{max}^2$) 및 하한여유($V_{min}^2 - VL^2$)를 산출하였으며, 이 값들은 각각 주변압기 임피던스에 의한 전압변동량보다 크도록 해야한다. 이 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta V^2 > 0 \text{ 일 때, } \Delta V^2 < VH^2 - V_{max}^2 \quad (1)$$

$$\Delta V^2 < 0 \text{ 일 때, } -\Delta V^2 < V_{min}^2 - VL^2 \quad (2)$$

- ΔV : 주변압기 임피던스에 의한 전압변화(전압강하 또는 전압상승)
- VH : 중부하시 적정전압유지범위의 최대허용전압
- VL : 중부하시 적정전압유지범위의 최저허용전압
- V_{max} : 중부하시 선로에서의 최대전압
- V_{min} : 중부하시 분산전원이 도입되지 않는 배전선로에서의 최저전압

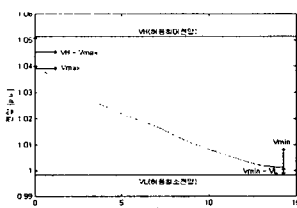


그림 4 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계

3.2 분산전원이 도입되는 선로에 대한 분산전원의 도입량 제한조건

분산전원이 도입되는 선로에 대해서는 선로에서의 전압변동량 및 분산전원이 도입된 지점에서의 전압변동량이 고려되어야 한다. 주변압기 임피던스에 의한 전압변화량(ΔV)과 주변압기2차측 직하부터 분산전원 연계점까지의 선로임피던스에 의한 전압변화량(ΔV_G)을 고려해야하므로, 분산전원이 도입되기 전 선로에서의 말단전압을 V_{end} 라 하면, 분산전원이 도입된 후의 선로말단전압 $\sqrt{V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2}$ 은 주상변압기의 전압강하, 저압배전선의 전압강하를 고려한 다음 식을 만족해야 한다.

$$VL \leq \sqrt{V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2} \leq VH \quad (3)$$

여기서, 주변압기2차측 직하부터 분산전원 연계점까지의 선로임피던스에 의한 전압변화량(ΔV_G)은 분산전원이 선로말단에 도입되는 경우가 제일 크므로, 분산전원이 선로말단에 도입되는 것으로 하는 것이 타당하다. 따라서, 선로말단에 도입되는 분산전원의 출력용량을 $S_G = P_G + jQ_G$ 하면, 중부하시 선로말단의 전압변화계수(일정)를 이용하여 선로말단에서의 선로임피던스에 의한 전압변화량은 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\Delta V_G^2 = \frac{\partial V_{end}^2}{\partial P_G} P_G + \frac{\partial V_{end}^2}{\partial Q_G} Q_G \quad (4)$$

여기서, $\partial V_{end}^2 / \partial P_G > 0$, $\partial V_{end}^2 / \partial Q_G > 0$ 이다. 왜냐하면, 분산전원이 도입된다는 것은 부하가 감소하는 것을 의미하기 때문이다.

한편, 식(3)을 분산전원의 운전역률이 지상 및 진상인 경우로 나누어 분석해 보기로 하자.

먼저, 지상의 경우 $\Delta V^2 \geq 0$, $\Delta V_G^2 \geq 0$ 이고, 본래의 대상선로가 $VL^2 \leq V_{end}^2 + \Delta V^2 \leq V_{max}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2$ 은 항상 성립한다. 또한, 선로말단에 분산전원이 도입되더라도 $V_{end}^2 + \Delta V_G^2 < V_{max}^2$ 이 만족되고 식(1)인 $\Delta V^2 \leq VH^2 - V_{max}^2$ 이 만족되면 $V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \leq VH^2$ 은 항상 성립한다.

$$\frac{\partial V_{end}^2}{\partial P_G} P_G + \frac{\partial V_{end}^2}{\partial Q_G} Q_G \leq V_{max}^2 - V_{end}^2 \quad (5)$$

다음, 진상의 경우를 살펴보면, ΔV^2 및 ΔV_G^2 은 지상의 경우에 비하여 작고, 더욱 진상으로 갈수록 0보다 작게 되므로 $V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \leq VH^2$ 은 항상 성립한다. 그리고, $VL^2 \leq V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2$ 은 $0 \leq V_{end}^2 - VL^2 + \Delta V_G^2 + \Delta V^2$ 로 변형시킬 수 있다. 이것으로부터 식(6)을 유도할 수 있다.

$$VL^2 - V_{end}^2 \leq \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \quad (6)$$

그러나, 상기의 식들은 모두 주변압기에서 인출되는 선로들 중 한 선로에 대해 적용되는 것으로서, 도입되는 분산전원의 설비용량 $S_G = \sqrt{P_G^2 + Q_G^2}$ 은 선로의 최대설비용량보다 작아야 한다.

3.3 분산전원의 운전가능범위 산출 알고리즘

분산전원 운전가능범위 산출 알고리즘은 다음과 같다.

- Step 1. $\sqrt{P_{GT}^2 + Q_{GT}^2} \leq S_B$ 인 부분을 선정한다.
- Step 2. 분산전원이 도입되지 않는 선로중 전압강하가 제일 심한 선로에 대하여 분산전원의 출력량 조건인 식

(1) 및 식(2)을 구한다.

Step 4. 분산전원이 도입된 선로에 대하여 주변압기 및 선로의 임피던스에 의한 전압변화량과 전압허용범위와의 관계조건인 지상에 대한 식(5)와 전상에 대한 식(6)을 구한다.

Step 5. 식(1)~식(2)~식(5)~식(6)을 만족하는 범위를 구한다.

4. 제안된 알고리즘에 대한 실 배전계통예의 고찰

제안된 분산전원의 운전가능범위 결정 방법의 타당성을 증명하기 위하여 실 배전계통에 대한 분산전원의 운전가능범위를 산출하여보기로 한다. 분산전원의 운전가능범위를 산출할 경우 선로에서의 전압강하가 가장 심한 선로에 분산전원이 도입되는 경우와 다른 선로에 분산전원이 도입될 경우로 분리해서 산출할 필요가 있다. 또한, 피더의 말단에서 전압변동이 가장 심하므로 말단에 도입되는 경우에 대하여 분산전원의 운전가능범위를 산출한다면 모든 위치에 대하여 분산전원의 운전가능범위를 만족시킬 것이다.

4.1 가경 구간의 말단에 도입

가경구간에 분산전원이 도입될 경우 제안된 수식적인 방법을 이용하여 분산전원의 운전가능범위를 산출하면 다음과 같다.

$$-0.0718 - 8.9724 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.3148 - 8.9724 \cdot Q_{GT} \quad (7)$$

$$-0.2079 - 3.9421 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.0792 - 2.3793 \cdot Q_{GT} \quad (8)$$

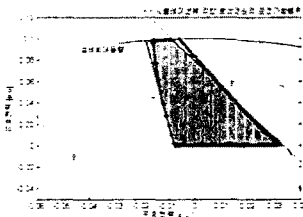


그림 5 가경구간에서의 분산전원 운전가능범위

그림 5는 서청주 변전소 =2의 가경 구간의 말단노드에 분산전원이 도입되었을 경우 분산전원의 운전가능범위를 산출한 결과이다. 위의 식에서 (7)은 주변압기 내부 임피던스 전압변동에 의한 상하한 허용범위를 만족하기 위한 조건이다. 또한 (8)은 지상 및 전상일 경우 선로에서의 주변압기 임피던스에 의한 전압변동뿐만 아니라 선로에서의 전압변동량을 고려한 조건을 각각 나타낸다.

그림 5에서 가로축은 분산전원의 무효전력량으로 제안된 수식적인 방법에 의해 산출된 운전가능범위는 전상 0.0192[p.u.]에서 지상 0.0333[p.u.]까지이며 이 때 분산전원의 유효전력량의 범위는 0[p.u.]부터 0.1[p.u.]까지로 나타났다. 또한 시뮬레이션에 의해 산출된 운전가능범위는 무효전력은 전상 0.016p.u.부터 지상 0.031p.u.까지이며, 유효전력 0p.u.부터 0.1p.u.까지이다. 수식에 의한 방법과 시뮬레이션에 의한 방법은 최대 약 0.004p.u.(400kW)정도의 오차가 발생하였다.

4.2 태성 구간의 말단에 도입

태성구간은 서청주 변전소 =2에서 선로의 길이가 가

장 길며, 전압강하 또한 가장 심한 선로이다. 이 선로의 말단에 분산전원 도입되는 경우 분산전원 운전가능범위는 다음과 같다.

$$-0.6321 - 8.9724 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.3148 - 8.9724 \cdot Q_{GT} \quad (9)$$

$$-0.0061 - 2.4190 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.0799 - 2.3896 \cdot Q_{GT} \quad (10)$$

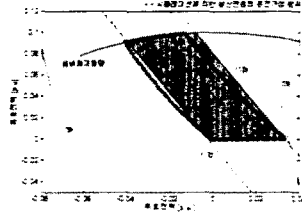


그림 6 태성구간에서의 분산전원 운전가능범위

그림 6에서 제안된 수식적인 방법에 의해 산출된 분산전원의 무효전력량 범위는 전상 0.0405[p.u.]에서 지상 0.0337[p.u.]까지이며 이 때 분산전원의 유효전력량의 범위는 0[p.u.]부터 0.1[p.u.]까지로 나타났다. 또한 시뮬레이션에 의해 산출된 운전가능범위는 무효전력은 전상 0.041p.u.부터 지상 0.033p.u.까지이며 유효전력량의 범위는 0[p.u.]부터 0.1[p.u.]까지이다. 수식에 의한 방법과 시뮬레이션에 의한 방법은 최대 약 0.0055p.u.(550kW)정도의 오차가 발생하였다.

5. 결론

본 논문에서는 LDC를 사용하지 않고 탭을 고정시켜 놓는 배전계통에 대하여 분산전원이 도입되었을 경우에 주변압기 임피던스에 의한 전압변동, 선로임피던스에 의한 전압강하(또는 상승)등을 고려한 전압조정측면에서 본 분산전원의 운전가능범위를 결정하는 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 앞으로 분산전원이 배전계통에 도입될 경우 계통운영자 입장에서 도입되는 분산전원의 운전가능범위를 결정하는데 많은 보탬이 될 것이라 생각한다. 한편, 이 방법은 배전계통에 도입되는 분산전원의 유효전력을 지정함으로써 분산전원의 도입한계량을 정량적으로 누구나 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있고, 또한 시뮬레이션에 의하여 구하여진 분산전원 운전가능범위("표시)가 조류계산프로그램을 통해 수십 시간에 걸쳐 얻어진 결과에 비하여, 제안된 방법은 기지량을 이용하여 쉽고 빠르게 분산전원의 운전가능범위를 산출할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문의 분산전원의 운전가능범위 산출 방법이 배전계통에 분산전원이 도입될 경우 계통운영자에 의해 효율적이고 손쉽게 사용될 수 있기를 기대한다.

[참고 문헌]

- [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] 김재연, 조성현, "분산전원이 도입된 복합배전계통의 운용방안에 대한 고찰", 대한전기학회논문지, 제48권, 6호, pp. 692-698, 1999. 6.
- [3] Electric Association Group in Japan: The Regulation and Management of Distribution Voltage, report, Vol.24, No.4, 1968. (In Japanese)