

분산전원 연계 배전계통의 최적전압조정에 관한 연구

서규석·백영식·김정년**
 경북대학교·LS전선(주)**

A study for Optimal Voltage Control Method of Distribution Systems with Distributed Generation

Gyu-Seok Seo· Young-Sik Baek· Jung-Nyun Kim**
 *Kyungpook National University **LS Cable Ltd

Abstract - 최근 생활수준의 향상과 정보통신 산업의 급속한 발전으로 인하여 전 세계적으로 전력품질에 대한 관심이 높아져, 각종 전력품질 개선장치로부터 최적 공급시스템에 이르기까지 다양한 각도에서 전력품질을 향상하기 위한 연구개발이 수행되고 있으며, 특히 정보통신기기 및 정밀제어기기 등의 보급증가로 전압품질에 대한 관심이 높아져가고 있다. 또한 전력소비는 증가하고 있지만 환경문제, 부지확보 문제로 인한 대형 발전 설비의 확충이 어렵고, 전력산업 구조개편으로 인해 분산전원의 도입이 적극 검토되고 있다. 지금까지 배전계통의 전압 관리는 배전용변전소 ULTC(Under Load Tap Changer)와 고압배전선로의 주상변압기에 의해 조정되어 왔다. 하지만 배전용변전소와 고압배전선로의 선로전압조정장치가 서로 독립적으로 운용되고 있기 때문에 선로전압조정장치의 효율성이 떨어지고 있는 실정이다. 또한 분산전원이 도입 한계량에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 배전계통에서의 최적 전압조정을 위한 전압조정 장치와 분산전원의 도입 한계량의 협조 운용 방안을 제시하고자 한다.[1]

해에 접근하는 방법적인 면과 실제 배전계통 자동화에 접목시키기 위하여 개발 중인 HMI(Human-Machine Interface)에 대해 살펴보도록 한다.

2. 본 론

2.1 배전계통의 모델

그림 2에 제시된 두 개의 변압기, 하나의 분산전원을 포함하고 있는 배전계통의 모델을 시뮬레이션 대상으로 삼아 그림 3의 결과를 얻을 수 있었다.

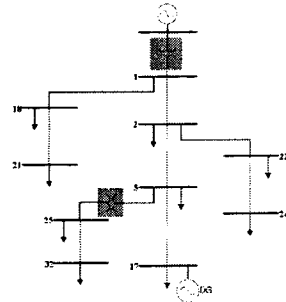


그림 2 배전계통 모델

1. 서 론

배전계통 자동화란 원거리에 설치되어 있는 배전설비를 원격에서 감시 제어하고, 배전선로의 고장을 인지하여 자동으로 처리하고, 취득 데이터를 이용하여 배전계통을 최적 운영하는 기술을 말한다.

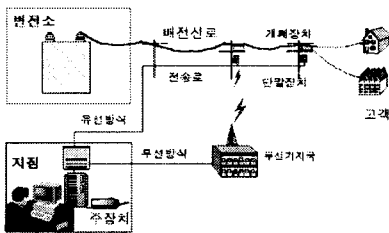


그림 1 배전계통 자동화 구성 설비

이러한 배전계통 자동화를 구현하기 위한 구성 설비로서는 그림 1에서 볼 수 있는 중앙제어장치, 통신장치, 통신망(유선, 무선), 단말장치(FRTU), 개폐장치 등이 필요하고, 모든 구성 설비가 구현되면 배전계통 각 노드별 전압 데이터를 취득 가능하게 될 것이다. 실제 경부하 상태로 정상적인 전압을 유지하며 운용되던 배전계통에서 특정 피더에 중부하가 걸렸을 경우 해당 피더의 노드중 허용치 전압 범위를 넘어서게 되는 경우가 발생하게 될 것이고, 이를 올바른 허용치 범위 내로 들게 하기 위해서는 배전계통에 포함된 여러 가지 설비를 컨트롤 하여야 한다. 이러한 설비들을 컨트롤하는데 있어 최적의

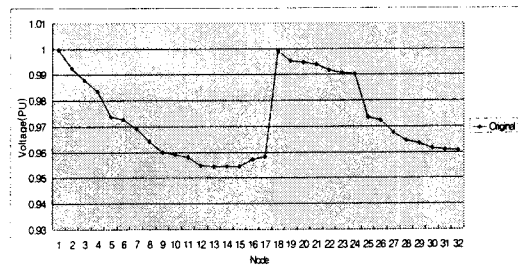


그림 3 배전계통 해석 결과

배전계통 모델의 주변압기 1차측 전압은 1.0 pu 로 일정하게 유지되는 것으로 하였고, 각 변압기의 Tap step 당 비율은 0.00625pu로 17step을 사용하였다. 또한 분산전원 무효전력의 최대 투입량은 해당모선 전압(Node 17)의 허용치 전압(1.05pu)을 넘지 않는 2.7MVar를 상한으로 하였다. 위의 모델에서는 모든 전압이 허용치전압(0.95pu~1.03pu) 사이에 유지 될 수 있도록 기본적으로 분산전원 측에서 무효전력 450kVar를 공급하는 것으로 시뮬레이션 하였다. 이로써 모든 노드의 허용치전압이 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다.

2.2 Distflow

배전계통 조류계산은 아래에 주어진 바와 같이 Distflow Branch Equation이라는 반복적인 연산식을 사용하여 해를 구한다.[3]

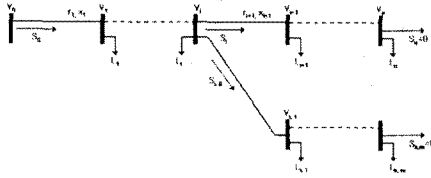


그림 4 방사상 배전계통

$$S_1 = S_{0,0} - S_{loss1} - S_{L1} = S_{0,0} - z_1 \frac{|S_{0,0}|^2}{V_0^2} - S_{L1}$$

$$V_1 = V_0 - z_1 I_0 = V_0 - z_1 \frac{S_{0,0}^*}{V_0}$$

$$P_{i+1} = P_i - r_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{L,i+1}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{L,i+1}$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1} P_i + x_{i+1} Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}$$

$$x_{0,i+1} = f_{0,i+1}(x_{0,i}) \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

where $x_{0,i} = [P_i \quad Q_i \quad V_i^2]^T$

Boundary Conditions

$$P_n = 0$$

$$Q_n = 0$$

$$V_n = V_n^{min}$$

2.2.1 ULTC의 적용

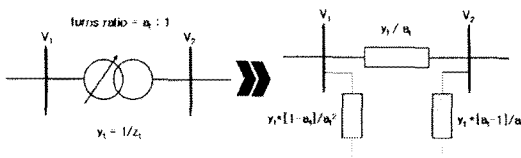


그림 5 ULTC의 Distflow 적용

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{N + k\Delta N}{n} = \frac{N}{n} + \frac{k\Delta N}{n}$$

$$= \text{nominal turns ratio} + \frac{k\Delta N}{n} \quad a_i = \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 + k \frac{\Delta N}{N}$$

그림 5에서의 우측 그림과 같이 ULTC를 등가모델로 해석하여 계통에 적용한다. 예를 들어 V_1 측을 보면 $\frac{(V_1)^2}{y_1(1-a)/(a^2)}$ 와 같이 적용하여 Distflow에 반영한다.

2.2.2 분산전원의 적용

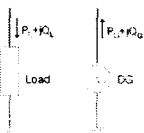


그림 6 분산전원의 Distflow 적용

분산전원의 Distflow 적용방법은 그림 6에서 보는바와 같이 부하의 반대방향인 음수를 취하여 적용할 수 있다.[2]

이와 같이 고려되어진 Distflow의 전압 결과는 표 1에서 보듯이 계통 해석 툴인 EDSA의 전압 결과값과 거의 동일하게 얻어졌으며, 이로써 Distflow로 얻을 수 있는 결과값에 대한 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.

표 1 EDSA와 Distflow의 전압 결과값 비교

| Node | EDSA | Distflow | Error |
|------|--------|----------|----------|
| 1 | 0.9981 | 0.99815 | -0.00072 |
| 2 | 0.984 | 0.984759 | -0.00076 |
| 3 | 0.9765 | 0.9773 | -0.0008 |
| 4 | 0.9692 | 0.96925 | -0.00072 |
| 5 | 0.9508 | 0.95158 | -0.00078 |
| 6 | 0.9473 | 0.948102 | -0.00068 |
| 7 | 0.9425 | 0.943268 | -0.00077 |
| 8 | 0.9362 | 0.937012 | -0.00081 |
| 9 | 0.9304 | 0.93121 | -0.00081 |
| 10 | 0.9296 | 0.930352 | -0.00075 |
| 11 | 0.9281 | 0.928855 | -0.00075 |
| 12 | 0.922 | 0.922755 | -0.00075 |
| 13 | 0.9197 | 0.920494 | -0.00079 |
| 14 | 0.9183 | 0.919084 | -0.00078 |
| 15 | 0.9169 | 0.917719 | -0.00082 |
| 16 | 0.9149 | 0.915697 | -0.0008 |
| 17 | 0.9143 | 0.915091 | -0.00079 |
| 18 | 0.9976 | 0.998287 | -0.00069 |
| 19 | 0.994 | 0.994716 | -0.00072 |
| 20 | 0.9933 | 0.994013 | -0.00071 |
| 21 | 0.9927 | 0.993377 | -0.00068 |
| 22 | 0.9804 | 0.98118 | -0.00078 |
| 23 | 0.9738 | 0.974521 | -0.00072 |
| 24 | 0.9704 | 0.971203 | -0.00068 |
| 25 | 0.95 | 0.951069 | -0.00107 |
| 26 | 0.9474 | 0.948515 | -0.00112 |
| 27 | 0.936 | 0.937118 | -0.00112 |
| 28 | 0.9278 | 0.928931 | -0.00113 |
| 29 | 0.9243 | 0.925387 | -0.00109 |
| 30 | 0.9201 | 0.921241 | -0.00114 |
| 31 | 0.9192 | 0.920329 | -0.00113 |
| 32 | 0.9189 | 0.920047 | -0.00115 |

2.3 배전계통 내 노드의 허용전압 범위 위배 시 각 설비의 최적 컨트롤에 대한 시뮬레이션 및 결과

지금까지 설명된 내용을 바탕으로 배전계통 내 임의의 피더에 중부하가 걸렸을 경우 각 설비별로 컨트롤 하는 방법에 대하여 생각해 봐야 한다. 따라서 그림 2번의 모델에서 노드 10~17, 노드 25~32의 부하량을 100% 증가시켜 시뮬레이션 하였고, 아래의 그림에서와 같은 전압 결과를 얻을 수 있었다.

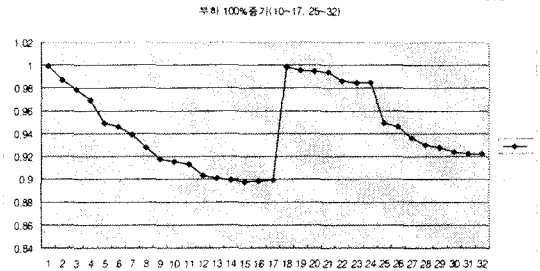


그림 7 증가된 부하에서의 전압 결과

위의 결과에서 볼 수 있듯이 부하가 증가함에 따라 허용전압범위를 벗어난 노드가 상당히 발생했음을 알 수 있다(최저전압 발생 모선 → Node 15 : 0.897641pu, 최고전압 발생 모선 → Node 1 : 0.999304pu). 이들의 전압을 허용범위 내에 들도록 하기 위해서는 해당 배전계통 내의 컨트롤이 가능한 설비들을 조작하여야 하는데, 이때 이 설비들이 최적으로 컨트롤 될 수 있는 방법에 대하여 알아보도록 한다.

아래의 식에서는 허용전압 위배모션 발생 시 최고/최저전압 노드에서 각 컨트롤 설비의 단위 step 변화에 따른 영향을 변화율로 나타낸 변수를 볼 수 있다. 예를 들어, B라는 변수는 변압기에서 현재 유지되고 있는 Tap을 기준으로 1 step 변화시켰을 때 최저전압 모선에 끼치는 영향을 나타내고, 분산전원에서의 1 step은 변압기가 1 step변화하였을 때 해당 2차 측 모선에 영향을 주는 만큼의 양에 기인하여 단계를 나누었다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 각 단계별 무효전력 공급량을 150kVar로 두었다.

목적식은 각 설비별 컨트롤을 가장 최소로 하겠다는 의미를 지닌다. 제약식은 최고/최저전압 모선의 전압 유지

범위, 그리고 각 설비별로 컨트롤 될 수 있는 상/하한치를 규정하는 역할을 한다.

-변수 정의-

- A: <최저전압 모션>분산전원의 출력량에 대한 변화율(%)
- B: <최저전압 모션>Main Tap의 변화에 대한 변화율(%)
- C: <최저전압 모션>2nd Tap의 변화에 대한 변화율(%)

- A': <최고전압 모션>분산전원의 출력량에 대한 변화율(%)
- B': <최고전압 모션>Main Tap의 변화에 대한 변화율(%)
- C': <최고전압 모션>2nd Tap의 변화에 대한 변화율(%)

- X₁: 계통에 적용 될 분산전원의 Step
- X₂: 계통에 적용 될 Main Tap의 Step
- X₃: 계통에 적용 될 2nd Tap의 Step

제약식

$$\begin{aligned} \min \text{Voltage}(\%) &\leq \text{Low_Current Voltage}(\%) + Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 \leq \text{MAX Voltage}(\%) \\ \min \text{Voltage}(\%) &\leq \text{High_Current Voltage}(\%) + A'x_1 + B'x_2 + C'x_3 \leq \text{MAX Voltage}(\%) \\ \text{분산전원 출력량의 하한치} &\leq x_1 \leq \text{분산전원 출력량의 상한치} \\ \text{Tap의 Step 하한치} &\leq x_2 \leq \text{Tap의 Step 상한치} \\ \text{Tap의 Step 하한치} &\leq x_3 \leq \text{Tap의 Step 상한치} \end{aligned}$$

목적식

$$\min F(x) = x_1^2 + x_2^2$$

제시된 수식으로부터 그림 8에서 볼 수 있는 해를 얻을 수 있고 이로서 다음의 결과를 얻을 수 있다.

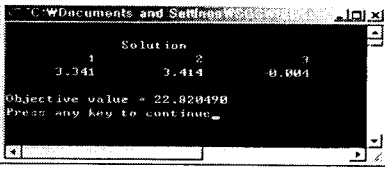


그림 8 목적식의 해

분산전원의 출력량 : 3.341×150 = +501.15 kVar
Main TR Tap : 3.414 = +3 Step(반올림 처리)
2nd TR Tap : -0.004 = 0 Step(반올림 처리)

분산전원은 실제 운용시 각 Step별로 적용할 필요가 없기 때문에 실제 구해진 해의 실수값을 적용하여 출력량을 조정하고, 변압기의 Tap은 정수값을 필요로 하기 때문에 반올림 처리하여 각 Step을 결정하여 주었다.

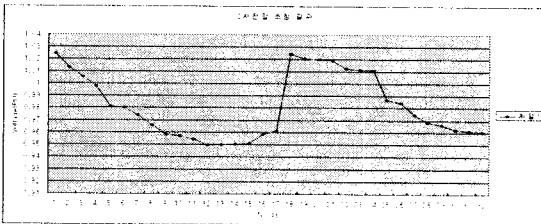


그림 9 2차 전압 조정 결과

위의 과정을 2회에 걸쳐 반복적으로 적용을 함으로서 그림 9에서 보는바와 같은 결과를 얻을 수 있었고, 거의 모든 노드에서의 전압이 허용치 범위 내에 들어왔다는 것을 볼 수 있다.

2.3 실계통과의 연계 방안 모색

본 논문에서 제안한 각 설비별 최적 컨트롤 값을 실제 계통에 적용하기 위한 시스템의 개요도를 그림 10에 나타내었다. 허용전압 위반 발생 시 배전계통에서 읽어 들인 각각의 데이터를 이용하여 Distflow Engine에서 최적의 해를 구하고, 그것을 다시 배전계통 내 컨트롤 설비에 적용함으로써 배전계통 내 전압을 허용전압 내에서

운용할 수 있다.

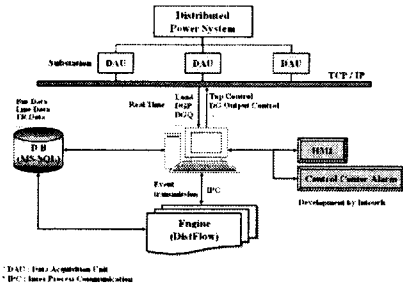


그림 10 배전계통 자동화 시스템 개요도

그림 11에서는 배전계통 자동화에 적용 되어질 수 있는 Intouch를 구현하였으며 이를 이용하여 실제 배전계통과 연계할 수 있게 되어진다. 또한 현재의 배전계통 내 상황을 계통 운용자가 쉽게 판단 할 수 있게 도와줄 수 있을 것으로 판단된다.

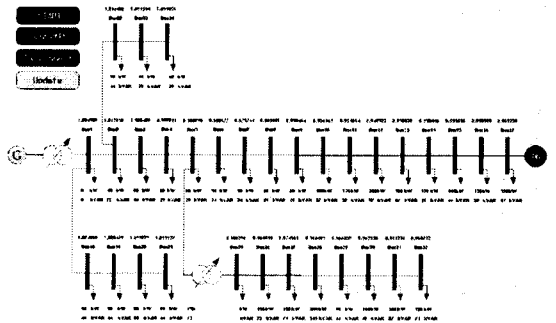


그림 11 Intouch로 구현한 HMI

3. 결 론

본 논문에서는 배전전압조정을 위해 계통 내 설비에 대한 최적 컨트롤의 해를 구하는 새로운 방법을 제안하였다. 향후 모든 배전계통 내 각 설비들에 대한 자동화가 이루어진다면 제안된 분산전원이 연계된 배전계통의 최적 컨트롤 방법으로 좀 더 빠른 시간 안에 각 설비들의 최적조건을 충족시키는 해를 구해 낼 수 있을 것이고, 실 계통에 적용 또한 가능할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김태웅, 김재연 "배전계통에 도입되는 분산전원의 운전 가능범위결정에 관한 연구" 대한전기학회 논문지 제51권, 제2호, pp. 93-101, 2002, 2
- [2] Joon-Ilo 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
- [3] 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.