

무효전력 예비력 지수를 이용한 전압안정도 평가 방법에 관한 연구

서상수*, 이병준*, 남수철**, 신정훈**, 김태균**
*고려대학교, **한전 전력 연구원

A Study on Voltage Stability Assessment Using the Reactive Reserve Index

Sangsoo Seo*, Byongjun Lee*, Su Chul Nam**, Jeonghoon Shin**, Tae-Kyun Kim**
*Korea University, **KEPRI

Abstract - The reactive reserves of generators is close to voltage stability. This characteristic has led to the development of a few year monitoring the reactive reserves. In this paper, the reactive reserves have been calculated considering the generator capability curve. In addition, through dividing the systems using electric distance, the reactive reserves of each area has been calculated. Then, using the correlative relationship between reactive reserves and PV margins, the method for monitoring the voltage stability is proposed. The proposed method is tested on PSS/E test system and KEPCO system.

1. 서 론

전압안정도 측면에서 무효전력은 매우 중요한 요소이다. 전력 조류 방정식에서 쉽게 알 수 있듯이 전압은 무효전력과 밀접한 연관이 있다. 이러한 전압과 무효전력의 연관성을 이용하여 전압안정도 평가에 활용할 수 있을 것이다. 전압안정도 평가를 위한 지수에는 가장 많이 쓰이는 것이 유효전력 여유이다. 유효전력 여유는 계통의 구조적인 특징에 의한 전체 부하의 증가 가능한 양을 제시함으로써 계통의 강건성을 보여 준다. 또 다른 것으로는 무효전력 여유가 있다. 무효전력 여유는 부하 모선에서의 무효전력 부하 증가 여유를 제시함으로써 계통의 지역적 전압안정도 특성을 보여준다. 그리고 또 하나의 지수는 유효전력 여유 지수이다. 이는 특정 두 지역 간의 연계선로를 통하여 전송할 수 있는 양을 산정하여 줌으로써 지역 간의 연계에 있어서의 전압안정성 평가에 활용된다. 본 논문에서 제시하고자 하는 무효전력 예비력 지수는 전압안정성과 무효전력 간의 상호 연관성을 이용하여 지역별 무효전력 예비력과 유효전력 여유와의 관계를 살펴보고 이를 토대로 전압안정도 평가에 이용할 수 있도록 지수화 하는 방안을 모색하고자 한다. 지역별 무효전력 예비력은 전기적 거리를 이용한 지역 분할을 토대로 계통을 지역 분할하고 각 지역에 연관된 발전기들을 그룹화 하여 산정된다. 그리고 산정된 결과와 계통의 유효전력과의 연관성을 이용 전압안정도 평가에 활용한다. 제시된 방안은 2006년도 한전계통에 적용하여 타당성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 무효전력 예비력

무효전력은 발전기, 동기 조상기, 조상 설비 및 각종 FACTS기기들로 구성될 수 있다. 만약 계통의 고장이 발생하게 된다면 계통에서 소비하게 되는 무효전력 소비량은 증가하게 되고 증가된 무효전력량에 대하여 위에서 언급한 무효전력 공급 기기들이 수급을 맞추지 못한다면 계통은 전압 불안정성을 보이며 붕괴하게 된다. 그러므로 계통에서의 적정 무효전력 예비력을 보유하는 것은 매우 중요한 일이며, 이를 위해서는 무효전력 예비력을 지수화하여 계통 상황을 감시하는데 활용할 수 있다[1].

2.1.1 무효전력 예비력의 산정

무효전력 예비력을 산정하는데 있어서 본 논문에서 고려한 것은 발전기의 무효전력 예비력이다. 현재 한전계통에서 운용중인 무효전력원은 발전기와 Sh.C 와 Sh.R, 그리고 SVC, UPFC가 있다. 그러나 계통 사고 발생시 즉시 응답할 수 있는 설비는 발전기 뿐이며, SVC와 UPFC는 응답 특성을 좋으나 설치 용량이 작아 계통의 영향이 적다.

발전기에서의 유효전력 무효전력 출력을 나타내는 식은 다음과 같다 [2].

$$P_g = \frac{E_g V_g}{X_d} \sin\delta + \frac{V_g^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\delta \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{E_g V_g}{X_d} \cos\delta + V_g^2 \left(\frac{\sin^2\delta}{X_d} + \frac{\cos^2\delta}{X_q} \right) \quad (2)$$

여기서 V_g 는 발전기의 단자 전압이며, $E_g = i_{gfd}$ 이고 i_{gfd} 는 계자 전류를 의미한다. 계자 전류한계에 의한 무효전력 출력의 한계를 표현하는데 있어서 본 논문에서는 $X_d = X_q$ 인 원통형 회전기 모델을 고려한다. 위의 식 (1)과 (2)에서 최대 계자 전류에 의한 발전기 무효전력 한계 값은 다음 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$Q_{gmax} = -\frac{V_g^2}{X_d} + \sqrt{\frac{V_g^2 I_{gfdmax}^2}{X_d^2} - P_g^2} \quad (3)$$

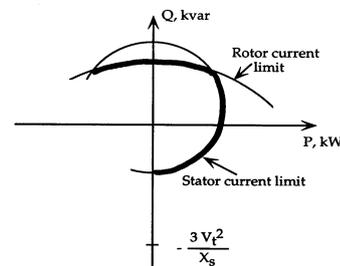
또한, 전기자 전류에 의한 무효전력 출력한계는 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Q_{gmax} = \sqrt{V_g^2 I_{gmax}^2 - P_g^2} \quad (4)$$

그리고 i번째 발전기의 무효전력 예비력은 다음 식 (5)로서 정의할 수 있다.

$$Q_{gmaxres} = Q_{gmax} - Q_g \quad (5)$$

Q_{gmax} 의 값은 식 (3)과 (4)에서 구해진 값 중에서 더 작은 값으로 결정된다.



<그림 1> 발전기 성능곡선

위 그림1은 발전기 성능곡선을 보여준다. 식 (3)으로 표현된 발전기 무효전력 최대값이 그림1의 rotor current limit에 의한 한계값을 나타내며, stator current limit에 의한 한계값은 식 (4)로 표현된다. 그러므로 앞에서 언급했듯이 발전기 무효전력 출력 최대값은 현재 유효전력 발전량에 따라 그림 1의 두 곡선에 의해서 결정되는 것이다.

2.2 계통의 지역적 특성 및 분할

무효전력은 유효전력과 달리 지역적 특성이 강하게 나타난다. 이는 AC송전망 계통에 있어서의 손실은 선로 Resistance 보다는 Reactance에 의한 것이 많다. 따라서 발전단에서 송전망을 통하여 부하에 전력을 공급하는데 있어서 유효전력의 전송 가능 여부는 무효전력의 손실에 dominant한 요소를 갖는다. 그러므로 이러한 지역적 요소가 짙은 무효전력 예비력을 고려하는데 있어서 지역별 계통 특성을 검토할 필요가 있다.

2.2.1 전기적 거리법

본 논문에서는 전기적 거리법에 의한 지역분할 방법을 고려하고자 한다. 전기적 거리법은 프랑스, 이탈리아 등에서 널리 사용되고 있는 지역분할 방법으로 전력 조류 방정식의 자코비안 행렬을 이용하여 구해진다. 다음 식 (6)은 전력 조류 방정식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 비대각 행렬 요소를 무시하고 전압과 무효전력 사이의 관계식으로만 분해한다. 그리고 분해된 관계식에서 부하모선과 발전 모선으로 행렬을 재배치하게 되면 식(7)과 같이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

그리고 식(7)을 부하모선의 무효전력 변화에 대한 전압 변화에 대한 식으로 변형하면 식(8)과 같이 된다.

$$[\Delta V_L] = [H][\Delta V_G] + [X_{CC}][\Delta Q_L] \quad (8)$$

여기서 H는 $-[B_{LL}]^{-1}[B_{LG}]$, X_{CC} 는 $-[B_{LL}]^{-1}$ 로 표현된다. X_{CC} 는 무효전력 변화에 대한 전압 변화의 감도를 나타내는 행렬이 되고 이 감도 행렬의 대각 성분은 자기 모선 무효전력 변화에 대한 전압변화율을 나타내고 비대각 행렬은 자기와 다른 모선들 사이의 감도를 나타낸다. 비대각 성분의 값이 클수록 자기모선과 다른 모선사이의 연관성이 큰 것으로 나타나며 지역 분할 시 같은 지역으로 분할되는 기준이 된다.

2.3 사례연구

본 절에서 사례연구는 PSS/E시뮬계통(savnw.raw)과 2006년도 한전 하계 첨부 부하시의 경우에 대하여 적용 연구 하였다.

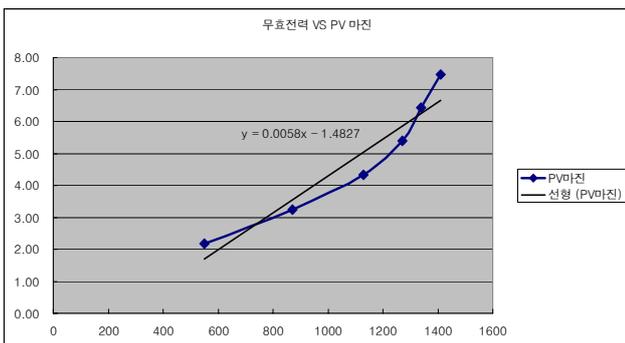
2.3.1 시험계통에 적용

무효전력 예비력은 각 발전기의 발전기 성능곡선을 이용하여 발전기 무효전력 한계를 재계산하여 새로이 계산된 무효전력 한계값과 현재 발전량 사이의 차를 무효전력 예비력으로 산정하였다. 그리고 산정된 무효전력 예비력은 다음 식(8)과 같이 가중치 요소를 두어 지역의 무효전력 예비력 산정에 활용하였다[3].

$$w_i = \frac{Q_{reserve}}{Q_{gnewmax}} \quad (8)$$

여기서 $w_i, Q_{reserve}, Q_{gnewmax}$ 는 각각 가중치, 무효전력 예비력, 새로 계산된 발전기 무효전력 한계를 나타낸다.

각 발전기의 무효전력 예비력은 현재 발전량이 무효전력 발전 한계량에 비하여 상대적으로 적은 발전기의 무효전력이 계통 변화 발생 시 영향력이 크게 작용하고 또한, 무효전력 예비력에 대한 유효전력 여유 비교 시 보다 확실한 선형화된 지수를 보일 수 있으므로 이러한 사항에 대하여 가중치를 두어 무효전력 예비력 산정 시 활용한다.



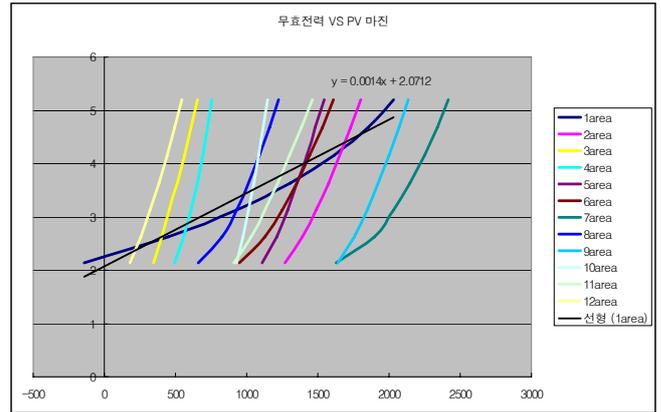
<그림 2> 무효전력 예비력에 대한 유효전력 여유1

PSS/E 시험계통은 6기 23모선으로서 전기적 거리에 의한 지역분할시 하나의 지역으로 구성되는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 계통의 6기 발전기에 대하여 부하 증가에 따른 무효전력 여유변화를 구하였고, 이를 이용하여 그림 2와 같은 무효전력 예비력에 대한 유효전력 여유사이의 관계 그래프를 구할 수 있었다. 구해진 결과는 완벽한 선형이라고 할 수는 없지만 $y = 0.0058x - 1.4827$ 이라는 근사화된 선형식으로 나타낼 수 있고 이를 이용하여 계통의 무효전력 예비력을 실시간으로 알 수 있게 되면 이 계통의 현재 유효전력 여유를 근사화 하여 구할 수가 있게되고 이 정보는 계통의 전압안정도 평가 지수로 활용될 수 있음을 확인할 수

있다.

2.3.2 한전계통 적용

2006한전 첨부 부하를 이용하여 지역 분할한 결과 12개의 지역으로 분할되었다. 각 지역에 연관된 발전기들을 구성하여 지역별 발전기 무효전력 예비력을 산정하였다. 무효전력 예비력은 한전계통의 부하 증가에 따른 무효전력 발전량의 변화를 계산하여 산정된 결과이며, 이를 이용하여 계산된 무효전력 예비력과 계통의 유효전력 여유 사이의 관계를 그림 3에서와 같이 나타내었다. 그림 3을 살펴보면 지역 1에서의 무효전력 예비력 변화에 대한 유효전력 여유사이의 관계는 $y = 0.0014x + 2.0712$ 라는 근사화 된 선형식으로 나타내어지고 이 식을 이용하면 지역 1의 발전기 무효전력 예비력을 감시하여 전압안정도 평가에 활용할 수 있음을 확인할 수 있다.



<그림 3> 무효전력 예비력에 대한 유효전력 여유2

근사화 된 선형식은 각 지역별로 계산될 수 있다. 그러나 지역1의 경우가 무효전력 예비력 변화에 대한 유효전력 여유 변화의 민감도가 가장 작음을 알 수 있는데 이는 무효전력의 공급 능력이 충분히 많다는 것을 상대적으로 알 수 있다. 따라서 하나의 지역만을 대표적으로 감시하여 전체의 전압안정도를 실시간으로 평가할 수 있는 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 하나의 계통을 전압 무효전력 특성을 이용하여 지역 분할하고 분할된 지역 내에서의 발전기 무효전력 예비력을 감시함으로써 계통의 전압안정도를 평가할 수 있는 방안에 대하여 논하였다. 즉, 무효전력 예비력과 유효전력 여유 사이의 관계를 선형화 하여 이 관계를 이용 전압안정도 감시에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 구분된 지역들의 예비력 지수들은 지역별로 다른 특성을 나타내지만, 계통의 전압안정도의 평가는 같은 계통에서는 같은 결과로의 귀추가 예상되는 바 하나의 지역 감시를 통하여 전체계통의 안정도 평가에도 응용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문에서 제시된 무효전력 예비력과 유효전력 간의 관계를 이용한 지수를 활용하여 계통의 변화에 대한 무효전력 예비력 지수의 실시간 감시를 통하여 계통의 전압 안정도의 변화를 모의 한다면 보다 정확한 검증이 될 것으로 생각된다. 따라서 시험계통 및 한전 계통의 시모의를 통하여 제안된 지수의 유용성과 타당성을 보다 정확하게 검증하고자 한다.

감사의 글 : 본 연구는 전력기술개발 기반기금의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lixin Bao, Zhenyu Huang, Wilsun Xu, "Online Voltage Stability Monitoring Using Var Reserves", IEEE Trans. Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1461-1469, Nov. 2003
- [2] C. W. Taylor, Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill, 1994
- [3] Feng Dong, Badrul H. Chowdhury, Mariessa L. Crow, Levent Acar, "Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management", IEEE Trans. Power Systems, vol. 20, no. 1, pp. 338-345, Feb. 2005