

조상설비를 고려한 전압안정성 여유전력의 평가에 관한 연구

김 세 영

특허청

A Study for Evaluating of Voltage Stability Margin Considering Shunt Capacitor

Sae Young Kim

Korean Industrial Property Office

요 약

이 논문은 극좌표의 선로조류방정식을 이용하여 전압안정성 여유전력을 평가하는 고속계산법을 제안한다. 여기서, 선로조류방정식은 상태변수 V_i , δ_i , V_j 와 δ_j , 그리고, 선로정수 r 과 x 로 구성되는데 극좌표계의 특징을 이용하면 이것은 두 개의 변수 V_i 와 V_j 를 가진 하나의 식이 된다. 그리고, j 모선이 조류계산에서 전압크기가 지정되는 발전기 또는 slack 모선이라면, 변수 V_i 만을 가진 하나의 식 즉, V_i^2 에 대한 2차 방정식으로 정식화된다. 그러므로, 전력조류다근은 간단한 계산을 통해 구할 수가 있는데 이와 같이 구해진 다근은 감도해석 또는 다근의 근접도를 통해 전압안정도를 평가할 수가 있었다. 또한, 전압안정도 평가시에 중요한 요소인 전력용 콘덴서와 같은 조상설비를 고려하여 전압안정성 여유전력을 평가하는 방법을 개발하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 유효성을 입증하였다.

Abstract— This paper presents a fast calculation method for evaluating of voltage stability margin (MW) using the line flow equation in polar form. Here, Line flow equations (P_{ij} , Q_{ij}) are comprised of state variable, V_i , δ_i , V_j and δ_j , and line parameter, r and x . Using the feature of polar coordinate, these becomes one equation with two variables, V_i and V_j . Moreover, if bus j is slack or generator bus, which is specified voltage magnitude in load flow calculation, it becomes one equation with one variable V_i , that is, may be formulated with the second-order equation for V_i^2 . Therefore, multiple load flow solutions may be obtained with simple computation. The obtained load flow multiple solutions are used for evaluating of voltage stability through sensitivity analysis or its closeness. Also, the method is proposed to calculate for voltage stability margin considering shunt capacitor, which is important element for evaluating of voltage stability. The proposed method was validated to sample systems.

1. 서 론

최근에, 전압불안정 현상과 밀접한 관련이 있는 계통 사고 이후에 전압안정도 문제는 전력계통 전반에 걸쳐 중요한 관심사가 되고 있다. 현재, 우리나라의 전력수요도 비약적으로 증가하고 있고 이러한 상황에 대처하기 위해서 전력계통은 원격화, 대규모화, 그리고 더욱 복잡화되고 있는데 이에 따라 계통운용에서 부하 급증시 무효전력의 부족으로 인해 발생하는 전압불안정 문제가

중요하게 대두되어 현재 운전상태에 대한 전압안정도 평가는 필요 불가결한 요소로 인식되고 있다. 이러한 전압불안정 문제는 전력조류다근과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있는데 한쌍의 인접 조류다근의 상호 근접도 또는 조류다근의 감도해석 즉, P-V 곡선과 Q-V 곡선을 통해 전압안정도 여유전력을 평가하는 것이 가장 실용적이라고 평가받고 있다. 한편, 전압안정도 평가시에 조상설비와 같은 전압제어설비의 효과를 고려하는 것이 중요한데 이와 관련하여 연구가 활발히 진행되고 있다.

조류다근의 계산법으로 Sekine 등[1]은 현재 운전전압을 계통특성에 따라 단위당 만큼 감소시켜 이것을 조류다근 계산의 초기치로 사용하여 낮은해 전압이 구해질 때 까지 반복계산하고 있다. Tamura 등[2]은 직좌표계의 전력방정식 P_i, Q_i 를 원의 방정식으로 정식화하고 두 원의 교차점을 조합시킨 초기치로 조류계산을 실행시키고 있다. 그리고, 문헌[3]은 조류계산식을 배수(multiplier)의 3차 방정식으로 정식화하고 운전상태가 한계점에 접근하게 되면 수렴특성상 이것 중 하나의 배수가 실수가 되어 이것을 다근계산의 초기치에 사용할 수 있다고 가정하고 있다. 문헌[4]는 주위 모선의 전압크기와 위상각을 고정하면 임의의 모선전압에 2개의 모드(+, -)가 존재해서 이 모드를 조합시킨 초기치로 조류다근을 구하고 있는데 중부하 또는 경부하시에도 모드에 따라서는 해가 구해지지 않는 단점이 있다. 아울러, 조류다근에 기반을 둔 전압안정도 평가법으로 문헌[5]는 조류다근 계산에서 구한 높은해와 낮은해 전압 각각에 대해 dV/dP_i 를 계산하여 두 기울기의 교차점으로 전압안정성 여유[MW]를 구하고 있다.

또한, 전압안정도 평가시 전압제어설비 즉, 전력용 콘덴서와 같은 조상설비, 발전기 단자전압, 변압기 Tap 등은 고려해야 될 중요한 요소인데 이와 관련된 연구로 Obadina와 Berg[6]는 전압제어설비(발전기 무효전력 한계, 전력용 콘덴서, 변압기 탭) 등을 고려하여 이것을 최적화문제로서 정식화하고 SQP(Sequential Quadratic Programming)법을 사용하여 전압안정 한계점을 계산하고 있고 Tiranuchit와 Thomas[7]는 기존의 최소특이치의 전압안정도 지표에 캐패시터와 같은 조상설비가 투입된 경우의 영향을 평가하였다. 그리고, Lemaitre 등[8]은 부하특성, 발전기 VAR 한계 등과 같은 계통의 동적특성을 고려하여 연속선형근사법(Successive Linear Approximation)에 기반을 둔 실시간의 CPU 시간으로 전압 불안정의 근접성(Proximity)을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 전력용 콘덴서와 같은 조상설비를 고려하여 조류다근계산법[9]으로 구한 다근의 감도해석으로 정적인 전압안정도 한계점을 구해 전압안정성 여유 전력을 구하는 방법을 제안하고 있다. 감도해석에 사용되는 전력조류다근의 계산법의 기본개념은 i 에서 j 모선으로 흐르는 선로조류 P_{ij} 와 Q_{ij} 는 상태변수($V_i, \delta_i, V_j, \delta_j$)와 선로정수(r, x, tap)들로 구성되는데 극좌표계의 선로조류방정식 특성상 두 식은 변수 V_i 와 V_j 만을 포함한 하나의 방정식으로 된다는 것이고 만일, j 모선이 slack 또는 발전기모선이라면 V_j 는 상수이므로 식은 V_i 만의 함수로 정의되고 이것을 풀면 두개의 해가 구해지는데 하나는 높은해(조류계산결과, 안정평형점)이고, 나머지는

낮은해(불안정평형점)가 된다. 이와 같이 정식화한 식으로 계산한 조류다근은 종래의 방법[4]처럼 임점 모선의 전압크기와 위상각을 일정하다고 가정하지 않아 전압안정도를 평가하는데 발생한 오차는 충분히 작게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 정식화한 조류다근 계산식에 선로조류 감도를 이용하여 조상설비 투입효과 즉, 전압불안정이 염려되는 중부하상태 또는 고찰하는 기간동안의 피크 부하상태에서 조상설비를 투입하는 경우 전압안정도를 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2-1. 조류다근의 계산

Fig. 1 계통의 i 모선에서 j 모선으로 흐르는 선로조류 방정식 P_{ij}, Q_{ij} 는 다음과 같다.

$$\dot{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{V}_i \dot{V}_j^* \angle (\delta_i - \delta_j) \quad (1)$$

(1)식의 양변에 $r - jx$ 를 곱하고 양변을 실수부와 허수에 대해 정리하면 다음 두 식이 유도된다.

$$rP_{ij} + xQ_{ij} - V_i^2 = -V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

$$rQ_{ij} - xP_{ij} = -V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

그리고, (2), (3)식의 양변을 제곱하고 더해주면 변수 δ_i, δ_j 가 생략되어 변수 V_i, V_j 만을 포함한 하나의 식이 되고 결국, 이것은 V_i^2 에 대한 2차 방정식이 된다.

$$a_i (V_i^2)^2 + b_i (V_i^2) + c_i = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(rP_{ij} + xQ_{ij}) - V_j^2 \\ c_i = (rP_{ij} + xQ_{ij})^2 + (rQ_{ij} - xP_{ij})^2 \end{cases}$$

(4)식은 변수 V_i (V_i 는 상수)만을 포함하고 있고 이것을 풀면 4개의 해가 구해지는데 전압크기는 - 값을 갖을 수 없으므로 결국, 2개의 해, 높은해전압과 낮은해전압이 구해진다. 이와같이 2 모선계통에서는 $P_i=P, Q_i=Q$ 이므로, 선로조류 P_{ij}, Q_{ij} 를 만족하는 다근은 모선 i 의 주

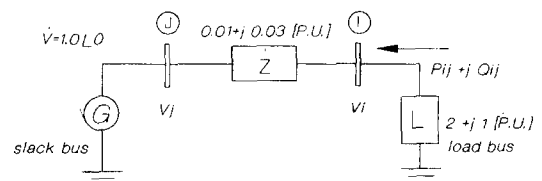


Fig. 1. 2-bus sample system.

입전력 P_i, Q_i 를 만족하는 조류다근과 동일하다.

2-2. 한계점의 계산

Fig. 1의 계통에서 $P_{ij}=P_i, Q_{ij}=Q_i$ 이므로 (4)식에 조류 계산의 지정치인 주입전력 P_i 와 Q_i 를 대입하면 다음과 같다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0 \tag{5}$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(rP_i + xQ_i) - V_j^2 \\ c_i = (rP_i + xQ_i)^2 + (rQ_i - xP_i)^2 \end{cases}$$

만일, 계통의 부하모선 i 가 정적으로 변화하는 경우 즉, P_i 와 Q_i 가 k 배 증가하는 경우의 조류다근은 (5)식의 계수에 P_i 와 Q_i 대신에 kP_i 와 kQ_i 를 대입하여 계산한다. 물론, 이 때 부하모선 i 의 역할은 일정하게 유지되고 이와 같이, 부하수요가 점차로 증가하게되면 두개의 다근은 결국, 일치하게 되는데 이에 대한 조건은 다음과 같다.

$$k = \frac{-V_j(rP_i + xQ_i) \pm \sqrt{V_j^2(rP_i + xQ_i)^2 + 4V_j^2(rQ_i - xP_i)^2}}{4(rQ_i - xP_i)^2} \tag{6}$$

2-3. 전압제어설비와 전압안정성

전압안정도에 영향을 미치는 계통설비로는 조상설비와 같은 무효전력 공급원, 변압기 탭 그리고 부하특성등이 있는데 본 연구에서는 조상설비등을 고려한 전압안정성 평가방법을 제시하고 있다.

2-3-1. 변압기 Tap의 고려

Fig 2와 같이 변압기 탭(Tap)이 있는 경우에 선로조류는 다음과 같다.

$$P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{V}_i k_{ij}^* = \dot{V}_i (n \dot{V}_j - \dot{V}_j) \cdot n \left(\frac{1}{r + jx} \right)^* \tag{7}$$

$$P_{ji} + jQ_{ji} = \dot{V}_j k_{ji}^* = \dot{V}_j \left(\frac{1}{n} \dot{V}_i - \dot{V}_i \right) \cdot n \left(\frac{1}{r + jx} \right)^* \tag{8}$$

그러므로, 변압기 탭을 고려한 조류다근은 다음 식(9)

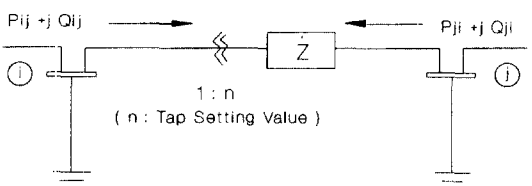


Fig. 2. Case of considering transformer tap setting values.

에 의해 계산된다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0 \tag{9}$$

$$\begin{cases} a_i = n^4 \\ b_i = -2n_2(rP_{ij} + xQ_{ij}) - n^2 V_j^2 \\ c_i = (rP_{ij} + xQ_{ij})^2 + (rQ_{ij} - xP_{ij})^2 \end{cases}$$

이와같이, 변압기 탭을 고려한 경우에 탭 값을 설정치의 범위에서 단위조작량(n) 변화시킨 경우에 각각의 탭 설정치를 식(9)에 대입하여 다근을 구하고 감도해석을 통해 전압안정도를 평가할 수가 있다.

2-3-2. 조상설비(Q_c)의 고려

Fig. 3과 같이 콘덴서와 같은 조상설비(또는 선로충전 용량)가 있는 경우에, 부하모선 i 의 선로조류 P_{ij}, Q_{ij} 에 대해 식을 정리하면 다음과 같이 주입전력 P_i, Q_i 와 조상설비 또는, 선로의 충전용량이 공급하는 무효전력원 Q_c 등으로 표현된다.

$$P_{ij} = P_i \tag{10}$$

$$Q_{ij} = Q_i + Q_c = Q_i + Y_c V_i^2 \tag{11}$$

이와 같이 전력용 콘덴서와 같은 조상설비를 고려하는 경우에 부하모선 i 에 대한 조류다근 계산식을 구하기 위해 식(10)과 식(11)을 식(2)와 식(3)에 대입하면 다음과 같은 두 식이 얻어진다.

$$rP_i + x(Q_i + Y_c V_i^2) - V_i^2 = -V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \tag{12}$$

$$r(Q_i + Y_c V_i^2) - xP_i = -V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j) \tag{13}$$

결국, 위 두 식은 부하모선 i 에 대한 전압크기의 제곱 즉, $(V_i)^2$ 에 대한 2차 방정식으로 정식화 된다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0 \tag{14}$$

$$\begin{cases} a_i = (1 - xY_c)^2 + (rY_c)^2 \\ b_i = -2(rP_i + xQ_i)(1 - xY_c) + 2(rQ_i - xP_i)rY_c - V_j^2 \\ c_i = (rP_i + xQ_i)^2 + (rQ_i - xP_i)^2 \end{cases}$$

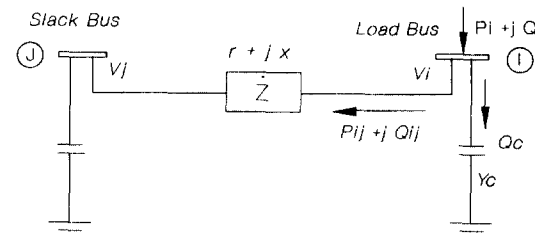


Fig. 3. Case of considering shunt capacitor.

그러므로, 조상설비(Q_c)가 투입된 경우의 조류다근은 식(14)로 구할 수가 있고 전압안정도는 그것의 감도해석등을 통해 평가할 수가 있다. 이와 같이, 조상설비를 투입된 경우($Q_c=YcV^2$)에는 조상설비가 무효전력을 공급하여 계통에서 부하모선 i 로 공급되는 무효전력이 감소하여 무효전력 손실도 감소하게 된다. 그 결과, 전압안정성 여유는 증가하게 되고 계산된 다근의 전압차이 V_h-V_i 가 조상설비를 투입하지 않은 경우에 비해 벌어지게 된다. 일반적으로 조상설비(Q_c , TCUL) 등을 투입하여 전압안정도를 향상시키는 것은 전압안정도 여유(전압안정도 한계점-현재운전점)를 증가시키는 것을 의미하고 이것은 또한 조류다근의 높은해와 낮은해사이의 차이를 크게하는 것과 동일하다.

한편, 이와 같이 조상설비를 고려한 경우의 정적인 전압임계점을 2.2 절에서 설명한 바와 같이 계산할 수 있는데 그 결과식은 다음 식(15)와 같다. 여기서, 계수 a , b , c 는 식(14)의 계수 값들을 나타낸다.

$$k = \frac{(b_i + V_j^2) V_j^2 \pm \sqrt{(b_i + V_j^2)^2 V_j^4 - \{(b_i + V_j^2)^2 - a_i c_i\} V_j^4}}{\{(b_i + V_j^2)^2 - a_i c_i\} V_j^4} \quad (15)$$

그러나, 일반적인 n 모선 계통에서는 대개 부하모선에 다수의 선로가 연결되었기 때문에 즉, (15)식의 V_j 가 상수로 되지않는 부하모선이 연결된 경우에는 총 부하 증가에 대한 전압감도와 선로조류 감도를 포함하여 조상설비를 고려하는 경우의 정적인 전압안정도 한계점을 구해 현재 운전상태의 전압안정성 여유전력(MW)을 평가해야 할 것이다.

2-4. 조류다근의 감도해석에 의한 전압안정성 여유 전력의 평가

제한한 방법으로 계산된 다근은 전압안정도에 대한 평가에 사용될 수가 있는데, 다음 식(16)은 계산된 현재 운전상태의 조류다근을 기반으로 감도해석에 의한 전압안정도 여유전력(MW) ΔP (전압안정한계점-현재운전점)를 구하는 식이다. 이 식에서 $\Delta V/\Delta P_T$ 의 값은 양이고 $\Delta V_h/\Delta P_T$ 의 값은 음이므로 본모는 양의 값을 갖는데 각각의 기호기가 클수록 그리고, 분자의 값 즉, 높은해 전압과 낮은해 전압사이가 근접할수록 여유전력은 작아지게 된다. 한편, 제한한 전압안정도 평가방법은 현재 운전점의 조류계산 결과(선로조류 P_{ij} , Q_{ij}) 또는 실제 계통의 선로조류 측정치만 있으면 조류다근 계산과 이것을 기반으로하여 구하게 되는 전압안정성 여유(MW, MVAR 여유)의 계산 소요시간은 거의 없다는 장점이 있다.

$$\Delta P(\text{MW}) = \frac{V_h - V_i}{\frac{\Delta V_i}{\Delta P_T} - \frac{\Delta V_h}{\Delta P_T}} \quad (16)$$

2-5. 조상설비를 고려한 전압안정도 평가와 향상 대책

현재 운전상태의 전압안정도를 평가하기 위해서 본 연구에서는 조류다근의 감도해석을 통해 전압안정도 여유전력 ΔP_m (전압임계점-현재운전점)을 계산하고 있는데 여기서, 발생된 실제한계점과 계산된 전압한계점 사이의 오차는 전압불안정 현상이 염려되는 전압안정도 면에서 중요하게 평가되는 중부하영역에서는 충분히 받아들일 만하다. 그리고, 전압안정도를 평가하는 고찰기간 중의 다음 운전시간에서 예상되는 총부하 증가 ΔP_T 를 부하예측(load forecast)을 통해 구해야 하는데 이것은 on-line 사용의 목적을 위해 신속히 계산되어야 하는데(부하변화에 대한 시나리오를 가정하여 이용할 수도 있는데 이것은 각 모선부하의 시간변화에 대한 유효전력과 무효전력의 변화율을 각각 결정해 사용하면 된다) 이러한 부하예측을 통해 구한 ΔP_T 와 제한한 방법에서 계산된 전압안정도에 대한 여유전력 ΔP_m 값을 비교했을 때 ΔP_m 이 ΔP_T 보다 훨씬 크지 않다면 즉, $\Delta P_m/\Delta P_T$ 가 1.0에 가깝다면 다음 운전시간에서 전압안정도 지표로 사용되는 전압안정도 여유전력 [MW]을 계산하기 전에 전압붕괴가 일어날 수가 있다. 그러므로, 이러한 경우에는 전압불안정 현상에 대한 경보를 발생하고 설치되어 있는 조상설비를 투입해야 하는데 이것으로도 부족하다면 부하차단이나 선로개폐 여부를 결정해야 할 것이다. 또한, 이와 관련하여 전압안정도에 대한 예방제어를 실행하기 위해서는 전력용 콘덴서와 같은 조상설비를 통해 전압안정도 여유를 가장 효과적으로 확장시키도록 하는 최적운용을 실행해야 한다.

위에서 설명한 전압안정도 향상 대책의 알고리즘에 대한 절차는 다음과 같다.

- STEP 1 - 현재 운전상태의 조류계산을 시행하여 각 모선의 운전전압과 각 선로에 대한 선로조류 P_{ij} 와 Q_{ij} 를 계산한다.
- STEP 2 - 현재부하상태가 전압불안정이 염려되는 중부하 영역 또는 피크부하라면 다음 STEP으로 가고, 그렇지 않으면 STEP 1으로 되돌아간다.
- STEP 3 - 조류다근을 구해 다근에 대한 감도 $\Delta V/\Delta P$ 중에서 가장 감도가 큰 부하모선을 선택하여 전압안정성 여유전력을 평가한다.
- STEP 4 - 전압안정도 여유 P_m (안정한계점-현재운전

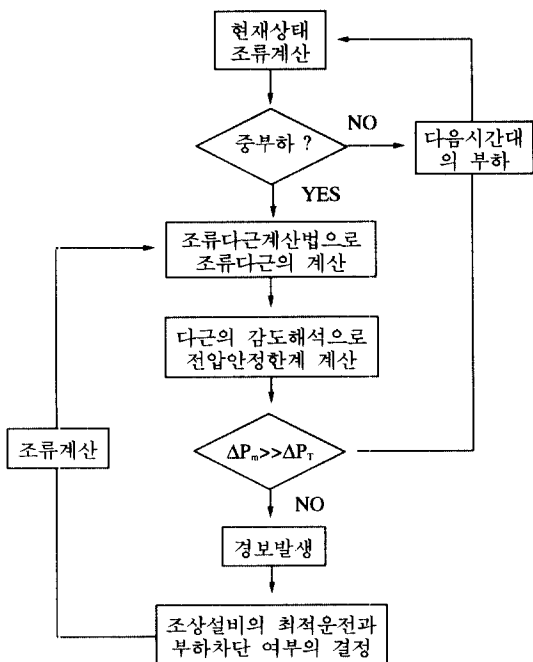


Fig. 4. Flow chart of proposed algorithm.

점)가 다음 시간대의 총부하 변화량 ΔP_T 보다 크게 초과한다면 STEP 1로 되돌아가고 그렇지 않으면 경보를 발생하고 다음 STEP으로 간다.

STEP 5 - 조상설비(전력용 콘덴서 등)로 최적 운전하고 부하차단 또는 선로를 스윗칭할 것인가의 여부를 결정한다.

STEP 6 - STEP 5의 계통상태에 대해 조류계산을 실행하고 STEP 3으로 간다.

제안한 방법에 대한 알고리즘의 순서도(flow chart)는 다음과 같다.

3. 사례연구

Fig. 5는 Fig. 1의 2-모선 계통에서 조상설비를 투입한 경우, 공급된 무효전력원의 크기가 전압안정성 여유에 얼마만큼의 영향을 미치는가를 보인 것인데 이것은 콘덴서의 어드미턴스 Y_c 를 0.0~1.5 [pu]의 범위에서 0.5만큼씩 변화시킨 경우의 각각에 대해 식(5)와 식(6)을 사용해 조류다근과 전압임계점을 구해 작성한 P-V 곡선이다. 한편, 이러한 경우에 전압임계점 즉, nose point의 변화 방향은 우상반부를 향하게 된다. 그러므로, 이것은 낮음해전압 영역이 상승한다는 것을 의미하고 이러한 현상이 더욱 진전되면 운전가능 전압영역가

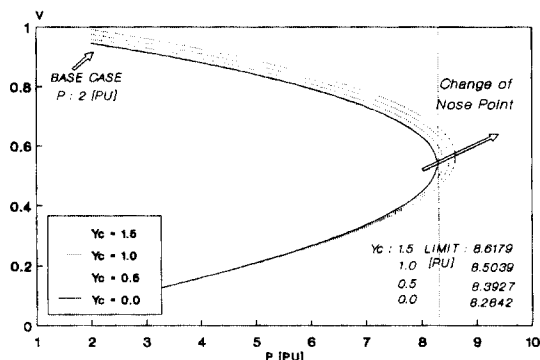


Fig. 5. Changes of P-V curve by addition of shunt capacitor.

Table 1. Results considering transformer tap setting values.

변압기 탭	전압안정도 여유 증가 [pu]	계통상태
0.975	0.9763 [pu]	0.9988 [pu]
1.000	0.9858 [pu]	0.9997 [pu]
1.025	1.0000 [pu]	1.0000 [pu]
BASE CASE		
비고	제한한 평가 한계점 계산프로그램의 사용 로그파일[10] 사용	

지 침범할 수 있으므로 전압안정도 평가시 항상 주의해야 한다.

Table 1에서는 IEEE 6-모선 계통의 모선 4와 모선 2 사이의 변압기 탭 값이 0.975~1.025 범위에 있는 경우 식(9)를 사용해 구한 다근의 전압여유 증가 또는, 다근의 감도해석에 의한 전압안정도 여유전력 증가에 대한 결과를 보이고 있다. 이 표에서 Base Case(Tap=1.025)에서의 전압안정도 여유가 가장 큼을 알 수가 있는데 이것은 현재운전상태(Base Case)가 송전손실 P_{loss} 를 최소로 하는 계통제어를 변압기 탭을 고려하여 시행한 결과라고 생각할 수 있다(V-Q 제어의 제어설비로써 변압기 탭이 고려된다면 전압조정을 통해 전압유지를 하는 것 이외에 송전손실을 최소화하는 목적의 역할을 할 수 있다). 왜냐하면, 한계점에서는 P, Q 증가에 대한 유효전력과 무효전력의 송전손실 증분($\Delta P_{loss}/\Delta P$)이 무한대이므로 송전손실이 최소로되는 변압기 탭 값은 전압안정도 여유를 가장 크게 한다. 즉, 손실감도 $\Delta P_{loss}/\Delta P$ 또는 $\Delta Q_{loss}/\Delta Q$ 를 최소로 하는 것은 제안한 방법과 동일한 결과를 보이게 된다.

Fig. 6은 IEEE 6-모선 계통에 전력용 콘덴서와 같은 조상설비(Qc)를 투입한 경우의 전압안정도 평가에 대한 계산결과를 보인다. 먼저, 0.1[pu] 단위량 만큼의 조상설비를 각 부하모선에 투입한 경우에 제한한 전압안정도

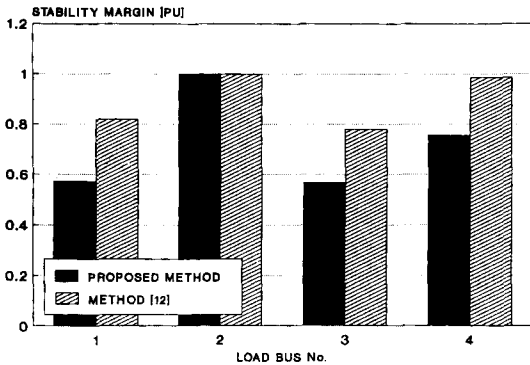


Fig. 6. Results by addition of shunt capacitor.

한계점 계산 프로그램을 사용하여 구한 한계점과 이때의 전압안정도 여유[pu](한계점-현재운전점)에 대한 크기는 2, 4, 1, 3 모선 순이다. 그리고, 제한한 조상설비 투입시 전압안정도 평가법에 의해서 구한 전압안정도 여유[pu]의 증가순서는 2, 4, 1, 3 번 부하모선 순인데 둘다 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수가 있다. 그러므로, 이것은 조상설비 투입시 제한한 조류다근법으로 구한 다근의 감도해석을 통해 구한 전압안정도 여유계산의 유효성을 입증하는 것이다.

Fig. 7은 IEEE 6-모선의 각 부하모선에 0~0.3 [pu]범위의 조상설비(Qc)를 0.05씩 투입시킨 경우의 한계점 계산방법[10]으로 구한 한계점 변화를 보여주고 있다. 여기서, 조상설비를 각 부하모선중 하나의 모선에 만 투입할 수 있는 경우에 투입량의 범위가 0~0.1 에서는 2번 모선의 경우가, 0.15~0.3 범위에서는 4번 모선이 전압안정도 여유(한계점-현재운전점)를 제일 크게 증가시키음을 알 수 있는데 그러므로, 이것은 전압 안정도에 대한 조상설비 효과를 고려할때 조상설비 설치모선의 선택도 중요하지만 투입량의 크기에 따라 설치모선의 선정이

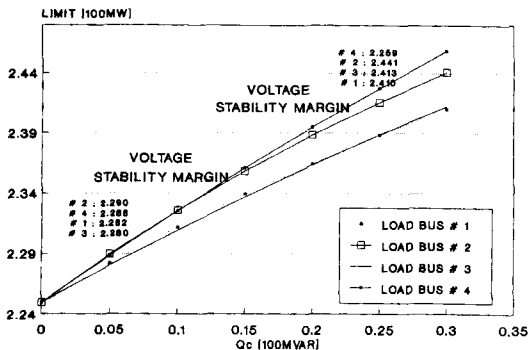


Fig. 7. Changes of limit by addition of shunt capacitors.

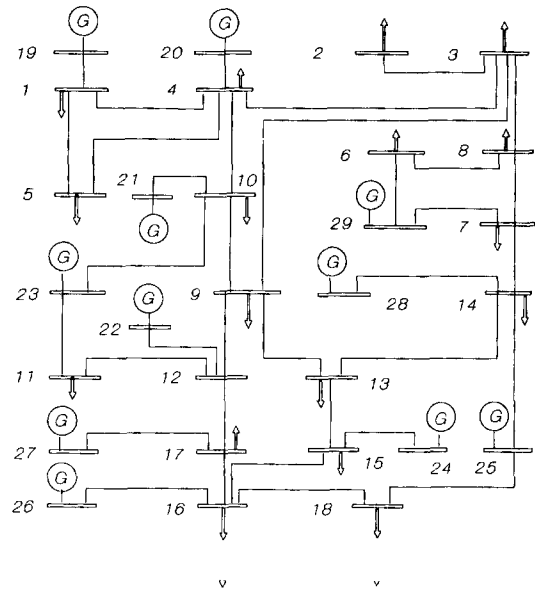


Fig. 8. Diagram of KEPCO 345 KV system.

변할 수 있다는 것을 의미한다.

일반적으로 현재 운전점에 대한 $\Delta V/\Delta P_r$ 의 크기가 가장 큰 모선(d P/d V_r이 가장 작은 모선)이 다른모선에 비해 조상설비 Q_c 투입시 전압안정도 향상에 대한 효과 즉, 전압 안정도여유를 가장 크게 증가시키는 모선이 된다. 왜냐하면, $\Delta V/\Delta P_r$ 의 크기가 가장 큰 모선 즉, 전압안정도에서 가장 취약한 부하모선은 총부하변화분 ΔP_r 에 대한 전압강하 ΔV_r 가 제일 크고 이로 인해 선로손실 (P_{loss}, Q_{loss})이 크게 증가하므로 이러한 모선에 조상설비를 투입하는 경우가 가장 전압안정도를 가장 증강시키게 될 것이다(한계점에서의 d P/d V_r의 크기는 0이므로 현재 운전점에 대한 d P/d V_r의 크기가 제일 작은 모선이 전압안정도 면에서 가장 임계적이라고 할 수 있다).

Fig. 9는 Fig. 8의 KEPCO 345-KV 계통에서 전압안정도 측면에서 가장 취약한 즉, 총부하가 정적으로 증가하는 경우 전압크기가 가장 크게 감소하는 부하모선 2에 전력용 콘덴서와 같은 조상설비를 투입했을 경우의 결과를 보인다. 여기서, 조상설비의 쉐어턴스가 0.0에서 1.0[pu]의 범위에서 0.2[pu]씩 투입한 경우에 제안한 방법으로 전압임계점과 전압안정도 여유전력을 구하고 있다. 만일, 현재 운전상태가 전압불안정이 염려되고 있는 중부하상태라면 조상설비는 전량 투입된다고 생각할 수가 있다.

Fig. 10은 KEPCO 345-KV 계통에 제안한 2.5 절의 방법을 적용한 결과이다. 먼저, 총 부하는 다음 시간대에서 정적으로 5[%]씩 증가한다고 가정하고, 각 시간대의

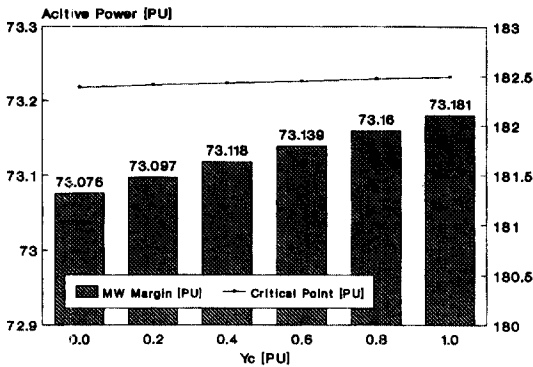


Fig. 9. Results by addition of shunt capacitor.

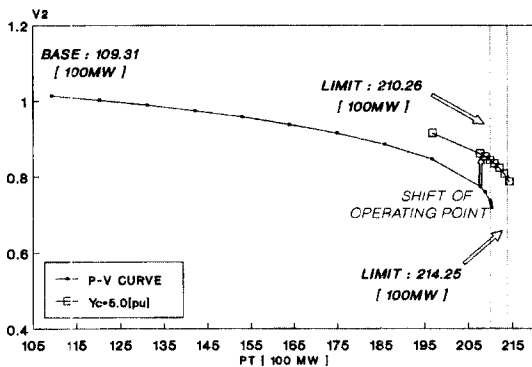


Fig. 10. Results of application of monitoring control for voltage stability.

상태에서 제안한 방법으로 전압임계점과 현재상태간의 차인 전압안정도 여유전력을 평가한다. 이와 같이, 총 부하가 정적으로 증가하여 207.6852[pu] 상태가 되면 제안한 방법에서 계산한 여유전력 ΔP_m 이 13.6785[pu] 이 되는데 이 때 다음 시간대의 총 부하 증가량은 ΔP_r 는 10.3845 [pu]가 되므로, 제안한 알고리즘에서 전압불 안정에 대한 경보를 발생하는 조건 즉, ΔP_m 이 ΔP_r 와 거의 같은 크기를 가지므로 경보를 발생하고 조상설비와 같은 무효전력원을 공급하게 된다. 이 때, 조상설비는 부하모선 2에 설치되어 $Y_c=5.0$ [pu]의 크기를 공급한다고 가정한다. 그리고, 이러한 상태에서 제안한 방법을 적용하면 전압안정도 여유는 26.1794[pu]로서 계산된다. 그러므로, 조상설비를 투입한 상태에서는 총 부하가 5[%] 증가하는 다음 시간대에서 전압불안정 현상이 일어나지 않을 것이라고 평가할 수 있는데 이것을 Fig. 10에서 보이고 있다. 여기서, 조상설비를 투입한 경우의 P-V 곡선은 실제 조류계산에서 구한 결과를 보이고 있는데 이것은 제안한 방법이 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 보이는 것이다.

4. 결 론

제안한 조상설비를 고려한 전압안정도 평가방법을 시험계통인 2-모선, IEEE 6-모선 그리고 실제계통인 KEP-CO 345-KV 계통에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 극좌표로 표현한 선로조류방정식 P_i, Q_i 특성을 이용하여 조류계산 결과 또는 선로조류의 측정치만으로 간단히 수치계산할 수 있는 조류다근계산법과 이것을 기반으로 한 새로운 전압안정도 평가방법을 제시하였다.
2. 조류다근의 계산과 감도해석($\Delta V/\Delta P$)에 필요한 계산시간이 거의 없으므로 현재 운전점과 한계점 사이의 전압안정도 여유(MW)를 고속계산할 수 있다는 장점을 가지고 있다.
3. 전압안정도 평가시에 중요한 영향을 미치는 전력용 콘덴서와 같은 조상설비와 변압기 탭을 고려한 전압안정도 평가방법을 제안하였다.

참고문헌

1. 鈴木守, 佐藤正弘, 青柳眞理, "電力系統의 近接潮流根의 求解法", T.IEE Japan. Vol. 109-B. No. 10, pp. 451-458. (1989).
2. 伊庭健二, 岩本伸一, 田村康男, "實規模 系統에 對する 潮流多根計算法", 電學論. 55-B30, pp. 257-264, (昭55-5).
3. Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, Isutomu Watanabe, "A Method For Finding a Pair of Multiple Load Flow Solutions in Bulk Power Systems", IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. 5, No. 2, May, (1990).
4. 朴鍾根, 關根泰次, "潮流多根解의 一解法について", 電學論 55-B31 (昭 54-4).
5. Akihiko Yokoyama, Yasuji Sekine, "A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solutions", Engineering Foundation Conferences. (1988).
6. O.O. Obadina, G.J. Berg, "Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power Systems", IEEE trans. on Power and Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1545-1554. November, (1988).
7. A. Tiranuchit, R.J. Thomas, "A Posturing Strategy against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power and Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 87-93. February, (1988).
8. C. Lemaitre, J.P. Paul, J.M. Tesson, Y.H. Armand, Y.S. Zhao, "An Indicator of the Risk of Voltage Pro-

- file InStability for Real-Time Control Applications", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 154-161. February, (1990).
9. 송 길영, 김 세영, "간략 조류다근계산법과 전압안정도 평가에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 158-161. July. (1995).
 10. 송 길영, 김 세영, 김 용하, "전압벡터의 유효분 감도지표 dP/de 수정법에 의한 견고한 전압안정도 평가에 관한 연구", 전기학회논문지, pp. 1-8. Jan. (1996).