

최단 전압붕괴점 계산을 위한 개선된 직접법과 제급전에 의한 전압안정도 향상

論 文
48A-8-6

Improved Direct Method for Calculating the Closest Voltage Collapse Point and Voltage Stability Enhancement by Generation Redispatch

南海鯤* · 宋忠機** · 金東俊***
(Hae-Kon Nam · Chung-Gi Song · D. J. Kim)

Abstract : The distance in load parameter space to the closest saddle node bifurcation (CSNB) point provides the worst case power margin to voltage instability and the left eigenvector at CSNB identifies the most effective direction to steer the system to maximize voltage stability under contingency. This paper presents an improved direct method for computing CSNB: the order of nonlinear systems equations is reduced to about twice of the size of load flow equations in contrast to about three-times in Dobson's direct method; the initial guess for the direct method is computed efficiently and robustly by combined use of continuation power flow, a pair of multiple load flow solution with Lagrange interpolation. It is also shown that voltage stability may be enhanced significantly with shift of generations in the direction of the left eigenvector at CSNB.

Key Words: voltage stability, closest saddle node bifurcation, direct method, left eigenvector, generation redispatch

1. 서 론

최근 세계의 전력회사들이 전압문제에 기인한 대형 정전 사고나 저전압 현상을 경험하였고, 전압안정도가 계통 운용과 계획 시에 제약이 가장 심한 요소 중의 하나로 대두됨에 따라 전압안정도 문제에 관한 관심이 증가되었다. 기간 송전선로가, 특히 첩두부하 시의 중요한 선로가 개방되는 상정 사고 하에서, 점점 더 성능한계 (performance limit)에 가깝게 운전될 것이 예상되어 [1], 전압안정도의 면밀한 검토가 요구된다. 전압안정도 해석에서 PV-곡선과 임계점을 계산하고 기저부하로부터 전압붕괴 임계점 (saddle node bifurcation, SNB)까지의 거리를 안정도 마진의 지표로 사용하는 방법이 가장 널리 사용되어 왔다. 또한, 축약 Jacobian 행렬의 고유치 크기나 [12] 선로손실을 [13] 안정도 지표로 사용하는 것도 가능하다.

전압안정도 해석결과 안정도마진이 크면 안전도 (security)에 문제가 없으므로 경제급전 (Economic Load Dispatch, ELD)등 계통의 경제적 운전이 우선한다. 그러나 만약 안정도마진이 충분하지 못한 경우, 특히 상정사고 등에 의하여 안정도마진이 매우 작아 안전운전이 위협을 받는 상황에서는 무엇보다도 먼저 안전도가 우선되도록 계통을 제어하여야 한다.

전통적으로 전압안정도 제어에 주로 조류계산이 사용되어 왔다. 예를 들면, 상정사고 전후의 상태에 대한 PV곡선을 반복 계산하고, 상정사고 하에서 전압안정도 향상을 위한 조치를 운전원의 경험에 의하여 수립하고 수동으로 조치를 취한다. 이러한 관행은 매우 시간 소모적이고, 계통계획과 운전 전에 종사하는 엔지니어에게 많은 업무부담을 가하고 있다. 최적조류계산 (optimal power flow, OPF)은 전압, 유효/무효 전력 출력한계 등 다양한 계통의 제약조건을 반영하면서 선로손실 같은 목적함수를 최적화 할 수 있어 전압제어에 가장 이상적인 알고리즘이라 할 수 있다 [14]. 그러나 OPF는 계산시간이 많이 소요되어 비교적 장시간에 걸쳐 기준 운전점을 설정하는 운전계획 등에는 적합하나 제어용으로는 부적합하다. 또한 전압안정도 지표로 선로손실보다는 더 직접적인 임계점까지의 마진을 목적함수로 설정하는 방법도 아직 정립되어 있지 않다. 운전원의 업무부담을 덜고 전압붕괴 사고를 예방하기 위해서는 계통부하를 발전기에 다양하게 배분하는 방법과 전압/무효전력 제어 등을 포함한 계통상태의 자동조정을 위한 체계적이고 정교한 전압제어 알고리즘이 필요하다 [1].

이러한 관점에서, Dobson 등이 [2-5] SNB 또는 최단 전압붕괴 임계점 (closest saddle node bifurcation, CSNB)에서의 기하학적 특성을 이용하여 CSNB를 계산하는 반복법과 직접법, 그리고 CSNB에서의 좌고유벡터를 사용하여 전압제어를 수행하는 것이 직접적인 안정도 지표인 임계점까지의 거리를 증가시키는데 효과적임을 제안한 것은 전압안정도 향상을 위한 알고리즘의 개발에 중요한 전기를 제공하였다. 반복법에서는 미리 정해진 방향으로 부하를 증가시키면서 PoC (Point of Collapse)법을 사용하여 SNB를 결정하고, 이 임계점에서 좌고유벡터의 방향을 다시 부하증가 방향으로

* 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 韓國電力公社

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所

接受日字 : 1999年 3月 4日

最終完了 : 1999年 7月 5日

취하여 임계점을 구하는 과정을 반복한다. 그러나 이 방법에서는 좌고유벡터가 CSNB에서의 좌고유벡터에 선형으로 수렴하므로 계통의 크기가 크면 수렴속도가 느릴 수 있다 [3]. 직접법에서는 PoC법의 조건식에 CSNB에서의 좌고유벡터는 부하증가방향에 평행하다는 조건을 추가하고, 이 식을 Newton-Raphson (NR)법으로 푼다. 이 방법은 이차 수렴특성으로 빠르게 수렴하는 특성이 있으나 조류계산식의 약 3배 크기의 비선형 연립방정식을 풀어야하고, 초기치가 해에 근접하지 않으면 발산하는 단점이 있다.

전압안정도 개선에는 전압안정도에 취약한 부하모션에서의 부하차단 또는 무효전력 보상이 가장 효과적인 방법이다. 그러나 전력공급 신뢰도 측면에서 무효전력 보상과 발전력의 재급전 등 수용가에 전력공급을 중단하지 않고 전압안정도를 확보하는 방법을 우선 고려하고, 부하차단은 이들 방법으로 전압안정도를 확보할 수 없을 때 최후의 수단으로 고려해야 한다. 그러나, 지금까지 상정사고 하에서 전압안정도를 확보하기 위한 수단으로 부하차단과 무효전력 보상과 같은 부하에서의 제어만이 고려되었고, 발전기가 가장 중요한 무효전력 공급원임에도 불구하고 발전력의 재분배에 의한 전압안정도 향상 효과는 조사되지 않았다.

본 논문에서는 CSNB에서 부하증가방향은 좌고유벡터와 평행하다는 조건을 PoC법의 조건식에 직접 이용하여, PoC법과 동일한 크기인 방정식을 풀어 CSNB를 계산하는 개선된 직접법을 제안하였다. 또한 CSNB에서의 좌고유벡터를 사용하여 발전력의 재급전만으로도 전압안정도를 현저하게 향상시킬 수 있음을 보였다. 시험계통으로는 Klos-Kerner 11-모션계통과 New England 30-모션 계통을 사용하였다.

2. CSNB 계산을 위한 직접법과 반복법

2.1 PoC법의 반복에 의한 CSNB 계산

전력계통의 조류계산식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f(x, \lambda) = 0 \tag{1}$$

위에서, x 는 상태변수벡터로 아래와 같이 모션전압으로 그리고 λ 는 매개변수벡터로 부하의 유효/무효전력과 발전기 유효전력으로 구성된다.

$$x = \begin{bmatrix} V \\ \theta \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \tag{2}$$

그림 1은 부하가 선로 리액턴스를 통하여 발전기에 연결된 간단한 방사상 계통에 연결된 계통의 부하 파라미터 공간 (load parameter space)에서의 특이곡면 (singular surface)을 보여주고 있다 [6,3]. Bifurcation이 발생하는 특이곡면 Σ 는 Jacobian 행렬의 행렬식 값 또는 적어도 하나의 고유치가 0의 값을 가지는 점들의 집합이다.

그림 1에서 임계점까지의 거리는 부하증가 방향에 따라 달라진다. 즉, 기저부하 λ_0 에서 N_0 의 방향으로 부하를 증가시키면 전압이 감소되어 부하가 λ_1 에 이르면 전압붕괴가

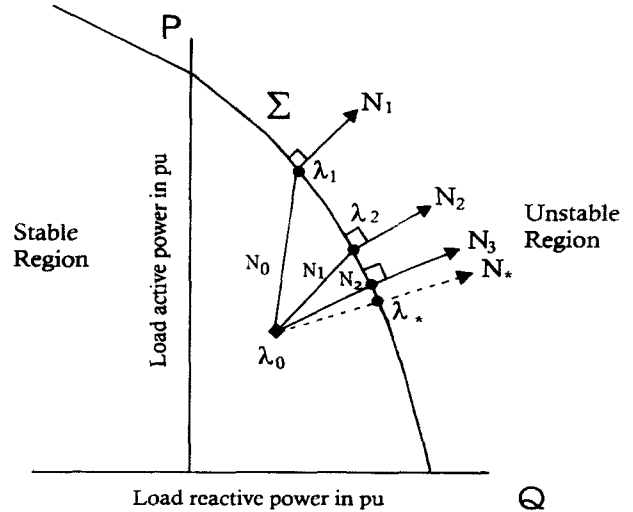


그림 1 PQ-평면에서의 특이곡면 Σ
Fig. 1 The singular surface Σ in PQ-plane

발생하고, λ_1 에서 Σ 에 수직인 좌고유벡터 N_1 의 방향으로 부하를 증가시키면 λ_2 에 이르러 전압붕괴가 발생한다. 이 과정을 반복하면 최종적으로 안정도마진이 최소가 되는 λ_* 에 도달하는데 이 점을 CSNB라 한다. CSNB에서 좌고유벡터 또는 부하증가 방향 N_* 와 $\lambda_* - \lambda_0$ 의 방향은 일치한다. 즉 Jacobian 행렬 J_x 의 좌고유벡터 w 와 N_* 는 다음 관계식을 만족한다.

$$N_* = J_x w, \quad \|N_*\|_2 = 1 \tag{3}$$

여기서 J_x 는 조류계산식의 부하 파라미터에 관한 Jacobian 행렬로 대각행렬이며 대각선 요소는 1 또는 -1의 값을 갖는다. Dobson 등은 [3] 이 원리와 PoC법을 사용하여 CSNB를 계산하는 반복법을 제안하였다.

미리 정해진 부하증가방향에 대하여 PoC법에서는 [6] 임계점에서 조류계산식을 만족하고, Jacobian 행렬은 특이행렬이 되고, 좌고유벡터의 크기가 1이라는 조건을 연립하여 임계점을 계산한다. 즉,

$$f(x, \lambda_0 + kN) = 0 \tag{4}$$

$$J_x^T(x, \lambda_0 + kN) w = 0 \tag{5}$$

$$\|w\|_2 = 1 \tag{6}$$

조류계산식의 크기가 n 일 때, PoC법은 식 (4)-(6)의 $(2n+1)$ 개의 연립방정식의 해를 N-R법으로 구한다. N-R법에서는 비교적 해에 근접한 초기치를 사용하는 것이 매우 중요한데, 본 논문에서는 연속 조류계산법 [9], 다중조류계산과 Lagrange 보간법으로 계산한 [7] 근사 임계점과 이 근사 임계점에서의 Jacobian 행렬의 좌고유벡터를 초기치로 취하는 매우 효율적인 알고리즘을 구현하였다 [8].

2.2 개선된 직접법

반복법은 직접법에 비하여 강인하게 수렴하는 장점을 가진 반면, 수렴속도가 느리다는 단점이 있다. Dobson은 PoC 법에 CSNB에서 모선부하의 증가방향은 좌고유벡터에 평행하다는 조건을 반복법의 조건식에 추가한 식 (7)-(10)의 연립방정식의 해를 직접 계산하여 CSNB를 계산하는 직접법을 제안하였다 [3].

$$f(x_*, \lambda_*) = 0 \tag{7}$$

$$J_x^T(x_*, \lambda_*) w_* = 0 \tag{8}$$

$$\|N_*\|_2 = 1 \tag{9}$$

$$(\lambda_* - \lambda_0) - k_* N_* = 0 \tag{10}$$

이 직접법은 CSNB를 보다 빠른 시간 내에 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있는 반면, 해에 매우 근접한 초기치를 필요로 하고 만일 초기치가 부정확하면 발산할 우려가 높다. 또한 (3n+1)개의 비선형 방정식을 풀어야 하므로 N-R법의 1회 계산시간이 많다는 단점이 있다.

CSNB 계산을 위한 연립방정식은 식 (10)을 식 (7)-(9)에 대입하면 아래와 같이 좀더 간략히 된다.

$$f(x_*, \lambda_0 + k_* J_\lambda w_*) = 0 \tag{11}$$

$$J_x^T(x_*, \lambda_0 + k_* J_\lambda w_*) w_* = 0 \tag{12}$$

$$\|w_*\|_2 = 1 \tag{13}$$

Dobson 등이 제안한 직접법이 (3n+1)의 비선형 방정식을 풀어야 하는데 반하여, 제안된 직접법은 PoC법과 같이 (2n+1) 개의 방정식만을 풀면 되므로 계산량이 현저하게 줄어드는 장점이 있다.

식 (11)-(13)의 비선형 연립방정식의 해는 N-R법을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} J_x & kJ_\lambda & J_\lambda w \\ H & J_x^T & 0 \\ 0 & w^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta w \\ \Delta k \end{bmatrix}^{(i)} = - \begin{bmatrix} f(x, \lambda_0 + k J_\lambda w) \\ J_x^T w \\ w^T w - 1 \end{bmatrix}^{(i)} \tag{14}$$

위에서 Hessian 행렬 H는 아래와 같이 조류계산식 f(x, λ)의 상태변수 x에 관한 Jacobian 행렬의 요소와 임계점에서의 좌고유벡터 w의 곱으로 계산된다.

$$H_{ij} = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \frac{\partial^2 f_k}{\partial x_i \partial x_j} \tag{15}$$

이 Hessian 행렬의 스파시티 구조는 Jacobian 행렬의 스

파시티 구조와 같다. 즉, Jacobian 행렬 요소의 값이 0인 위치의 Hessian 요소의 값도 0이다. 따라서, 스파시티 기법의 사용이 가능하므로 대규모 계통에 적용이 가능하다. 또한 Hessian행렬의 모든 요소는 이미 계산된 Jacobian 행렬요소 값으로 간단히 표현되므로 Hessian을 계산하기 위한 추가부담은 그리 크지 않다.

제안된 직접법은 반복법과 그 구조가 동일하므로 서로 호환성을 갖는 장점이 있다. 직접법은 SNB를 계산하는 PoC 법처럼 초기치가 부정확하면 발산할 가능성이 있어 비교적 정확한 초기치를 필요로 하는데, 반복법을 2회 수행하여 얻었다.

3. 전압안정도 향상을 위한 발전력 재급전 알고리즘

그림 1의 2-모선 계통의 특이곡면에서, 현재의 기저부하 또는 운전점 λ₀로부터 CSNB까지의 안정도 마진이 작아 부하 파라미터를 조정하여 안정도 마진을 증가시킬 필요가 있다고 가정하자. λ₀로부터 특이곡면 Σ에 수직인 -N_c의 방향으로 모선전력을 조정하면, 새로 설정된 기저부하로부터 특이곡면까지의 거리(정상적인 부하증가 방향을 포함한 임의의 부하증가방향에 대해서), 즉 안정도 마진이 가장 크게 증가함을 알 수 있다. 모든 모선의 부하 파라미터를 조정하는 것은 불가능하므로 N_c를 제어방향으로 취하는 것은 불가능하다. 즉, 부하차단을 고려하는 모선전력과 제어 가능한 무효전력 공급설비가 설치된 모선전력 그리고 발전기가 설치된 모선의 전력만이 조정 가능하다. 따라서 제어 방향 N_c는 N_c의 요소 중에서 전력의 조정이 가능한 모선에 해당하는 성분만을 취하고 조정이 불가능한 모선의 성분은 0으로 취하여야 한다. 발전력의 재급전만을 고려하는 경우는 발전기 모선에 해당되는 성분만을 취하면 된다. 전력 조정량의 크기를 d라 하면, 새로운 운전점은

$$\lambda_c = \lambda_0 - dN_c \tag{16}$$

현재의 운전점으로부터 특이곡면까지의 거리는 비선형 특성을 지니므로 식 (16)에 의해 운전점을 λ₀에서 λ_c로 dN_c만큼 변화시켜도 안정도 마진이 d만큼 증가되지는 않는다. 따라서 최대한의 안정도마진을 얻기 위해서는 제어량 d를 미소한 크기로 잡고 발전량을 계속 변화시키면서 변화된 운전점에서 새로운 제어방향을 설정하는 것을 반복한다. 최대 안정도 마진을 얻기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

최대의 전압안정도 마진을 얻기 위한 알고리즘

- [1]. 제어량 d를 일정한 크기(가능한 한 미소한 크기)로 잡는다. 여기서, d는 고정된 값으로서 1회의 제어량 혹은 제어 step을 의미한다.
- [2]. 기저부하에서 식 (16)을 이용하여 d만큼 발전력을 재분배하여 새로운 운전점 λ_c를 계산한다.
- [3]. 기저부하를 새로운 운전점 λ_c로 이동시키고, 그 점

에서 다시 CSNB를 계산하고 새로운 제어방향 N_c 를 계산한다.

- [4]. 새로운 N_c 를 이용해 제어량 d 만큼 발전력을 재급전하여 새로운 운전점 λ_c 를 계산한다.
- [5]. CSNB까지의 거리 k_* 가 일정한 값에 수렴될 때까지 단계 3과 4를 반복한다.

그러나 이 알고리즘은 모선전력 제어에 의한 최대한 얻을 수 있는 안정도 효과를 시험하기 위한 알고리즘으로 사용될 수 있으나, 많은 횟수의 반복계산에 과다한 계산시간이 소요되므로 실용적이지 못하다. 따라서 실제계에 적용하는데는 제어량 d 를 비교적 큰 값으로 취하고 이를 수회 실행하는 것으로 충분하다.

4. 사례연구

이 절에서는 CSNB 계산법과 전압제어 알고리즘을 5-모선, Klos-Kerner 11-모선, New England 30-모선 계통에 적용하여, 경우에 따라 재급전만으로도 상당한 전압안정도 향상 효과를 얻을 수 있고 상정사고시 전압안정도 향상방안으로 부하차단을 고려하기 전에 병렬보상과 함께 발전력의 재급전을 고려할 필요가 있음을 보인다.

4.1 5-모선 계통

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여, Dobson 등이 CSNB 계산에 사용한 5모선 계통에 [3] 동일한 초기조건하에서 알고리즘을 적용하였다. 반복법을 7회 수행하여 얻은 결과는 문헌 [3]의 결과와 정확하게 일치하였고, CSNB까지 도달하는데 총 32회의 N-R법이 필요하였다. 표 1은 초기 부하증가방향벡터 w_0 와 CSNB에서의 좌고유벡터 w_* 를 보여주고 있다. 직접법을 적용하여 반복법과 동일한 결과를 얻었으며, 직접법의 초기치로는 반복법을 2회 수행한 후에 얻어진 임계점에서의 부하, 전압, 좌고유벡터를 사용하였다. CSNB에서의 좌고유벡터의 변화량이 2×10^{-4} 의 범위 내로 수렴하는데 소요된 총 N-R법의 횟수는 16회(반복법:11회, 직접법:5회)로 반복법의 약 절반의 시간만이 소요되어 직접법이 반복법보다 효율적임을 알 수 있다. 직접법의 초기치를 얻기 위해 반복법을 2회 수행하는데 소요된 시간이 직접법에 소요된 시간보다 약 2배 정도이므로 효율적인 초기치 계산 알고리즘의 개발이 직접법의 수렴속도 개선에 가장 중요한 요소임을 알 수 있다.

표 1 5-모선 계통의 부하 파라미터

Table 1 Load parameters for 5-bus system

	$P_3(\theta_3)$	$P_2(\theta_2)$	$P_4(\theta_4)$	$P_5(\theta_5)$	$Q_2(V_2)$	$Q_4(V_4)$	$Q_5(V_5)$
w_0	0.4851	0.3513	0.7160	0.3570	0.0055	-0.0326	0.0074
w_*	0.0157	0.0094	0.5214	0.0550	0.0009	0.8384	0.1477

기저부하에서 부하모선인 4-번 모선의 전압이 0.9153으로 개선을 요한다. 그러나, 표 1의 CSNB에서의 좌고유벡터를 살펴보면 발전기모선인 3-번 모선의 좌고유벡터 성분은 매우 작고 부하모선인 4-번 모선의 좌고유벡터 성분이 매우 크다. 따라서 4-번 모선의 전압을 개선하기 위해서는 발전력의 재급전은 효과적이지 못하고, 4-번 모선에서 부하를 차단하거나 무효전력을 보상하여야 하는데 특히 무효전력을 보상하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

4.2 Klos-Kerner 11-모선 계통 [10]

이 계통은 기저부하에서 총 부하가 74.51 pu이고, 임계점까지의 거리가 기저부하의 0.035 %에 불과하여 기저부하가 임계점에 매우 근접한 전압붕괴 직전의 상태에 있고, 전압개선을 위한 제어가 요구된다. 또한, 기저부하가 임계점에 매우 근접하여 반복법을 3회 수행하여 CSNB에 도달할 수 있으므로 직접법의 사용이 불필요했다.

표 2는 CSNB에서의 벡터 N_c 을 보여주고 있다. 표에서 전압안정도에 가장 큰 영향을 주는 부하모선으로는 3, 4, 6번 이고 발전기모선으로는 5, 9번이다. 5-모선 계통의 경우와는 달리 발전기 모선의 벡터성분 크기가 상당히 커, 발전력의 재급전이 전압안정도 향상에 효과적일 수 있다. 모선 2와 3에서의 부하차단이나 무효전력 보상이 전압안정도 향상에 가장 효과적이거나, 본 논문에서는 발전력의 재분배가 전압안정도에 미치는 영향을 조사하는데 있으므로 이들 부하모선에서의 제어는 의도적으로 배제하고 발전력의 이동만을 고려하였다.

표 2 Klos-Kerner 계통의 CSNB에서의 벡터 N_c .

Table 2 Vector N_c at CSNB for Klos-Kerner system

Bus #	N_P	N_Q	Bus #	N_P	N_Q
2	0.2216	0.2874	7	0.2242	0.0831
3	0.4378	0.3033	8	0.1671	0.0642
4	0.3631	0.1989	9	0.1028	
5	0.2452		10	0.0983	0.0509
6	0.3477	0.2090	11	0.2133	0.1765

발전기 모선에서의 전력의 조정만을 고려하므로, 편의상 부하 파라미터 벡터 λ 로 이들 발전기 모선에서의 전력만을 나타낸다. 표 2의 발전기모선만의 좌고유벡터를 정규화 하면, 이동된 발전기 출력은

$$\lambda_c = \lambda_0 - d [0.9223, 0.3866]^T \tag{17}$$

와 같고, 발전기의 λ_0 는 음의 값으로 정의했으므로 λ_c 에서 해당 발전량은 보다 더 큰 값을 갖는다. 즉, 4와 9번 모선의 발전량을 증가시키고 이에 상당하는 slack 모선의 발전량을 감소시키는 것이 전압안정도를 향상시킨다는 것을 알 수 있다.

표 3은 식 (17)에서 제어량 d 를 10과 15로 취하고 발전

력을 재분배한 새로운 운전점에서의 전압을 보여주고 있다. 각 모선의 전압이 기저부하의 경우에 비하여 현저하게 상승하고, 따라서 발전력 재분배가 전압안정도 향상에 효과적이었다는 것을 알 수 있다. 안정도마진은 제어전에는 기저부하의 0.035%에 불과하던 것이, $d=10$ 으로 설정하고 발전력을 조정한 후에는 안정도 마진이 기저부하의 9.2%, $d=15$ 일 때는 9.35%로 증가하여 전압붕괴점으로부터 상당히 이격된 계통이 됨을 알 수 있다. 이 안정도 마진은 기저부하가 임계점에서의 총부하의 95%로 정의되는 "전송한계" 이내에 놓여야 하는 운전조건을 [11] 만족하나, 전압 프로파일 측면에서는 최저전압이 약 0.892이므로 좀더 개선을 요한다. 이는 의도적으로 발전력의 재분배만을 고려하였기 때문이며 부하모선에서의 무효전력 보상까지 함께 고려하였다면 모선전압 프로파일도 만족스러운 정도로 개선될 것으로 예상된다.

표 3 Klos-Kerner 계통의 재급전 후 전압
Table 3 Voltages after redispatch in Klos-Kerner system

Bus #	Base case	$d=10$	$d=15$
2	0.73584	0.90675	0.91415
3	0.72635	0.89173	0.88812
4	0.82708	0.92550	0.90432
6	0.82737	0.93901	0.92315
margin	0.0035 %	9.2 %	9.35 %

margin: the distance to voltage collapse point in % of the base load with load increase in the direction of bus power vector at base load.

4.3 New England 30-모선계통

CSNB 계산

그림 2의 New England 30-모선계통은 원래 미소신호안정도 해석용으로 개발된 10기 39모선의 시험계통이나, 전압안정도 해석을 위해 30-모선으로 수정되어 널리 사용되고 있다 [12]. 기저부하에서 총 부하는 6150.5 MW이고 표 4에

표 4 New England 30-모선 계통의 안정도마진
Table 4 Stability margin in New England 30-bus system

반복 횟수	총 임계부하 (MW)	반복 횟수	총 임계부하 (MW)
1	19473.59	3	10771.12
2	10833.44	4	10769.69

반복법을 수행하여 얻은 마진을 요약했다.

CSNB 계산을 위한 초기 계통부하 증가방향으로는 기저부하에서 각 모선의 부하전력과 발전기 유효전력을 균등하게 증가하는 방향을 취하였다. 초기 부하증가 방향에 대하여 임계점의 총 부하는 기저부하로부터 약 13323 MW (기저부하의 216%) 증가한 19474 MW이다. 반면 CSNB에서의 총 부하는 기저부하로부터 약 4620 MW 증가한 10,769 MW로 초기 방향보다 약 8703 MW 적은 마진이 계산되었다. 임

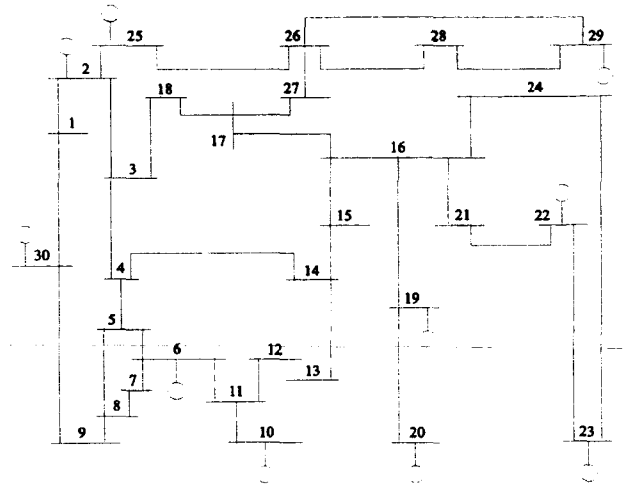


그림 2 New England 30-모선 계통.
Fig. 2 New England 30-bus system.

계점까지의 마진이 매우 크므로 전압제어의 필요성이 없다. 반복법에 필요한 N-R법 횟수가 28회인데 비해 직접법은 22회(반복법:16회, 직접법: 6회)로 계산시간이 상당히 감소하였다. New England 계통은 경부하 계통이므로 각각의 부하 증가 방향에 대하여 임계점에 도달하는 N-R법 횟수가 비교적 많았다.

재급전을 위한 계통조건의 수정

이 계통의 부하를 기저부하에서의 모선전력 벡터방향으로 증가시키면 임계부하는 기저부하의 480%인 29,567 MW이고, 안정도 마진이 너무 커 안정도 향상을 위한 제어가 불필요하다. 재급전의 효과를 조사하기 위해 기저부하에서의 모선전력벡터 방향으로 부하를 증가시켜, 임계점까지의 거리가 기저부하의 6.8%가 되도록 새로운 기저부하를 설정하였다. 이때 새로운 기저부하에서 총 부하는 27,677 MW이다. CSNB 계산에 필요한 N-R법 횟수가 반복법에서는 31회인데 직접법은 17회 (초기벡터 설정을 위한 반복법 11회, 직접법 6회)로 직접법에서의 계산시간이 반복법의 약 절반으로 직접법이 매우 효과적임을 알 수 있다.

표 5는 CSNB에서의 좌고유벡터 중에서 발전기모선과 부하모선 중에서 크기가 큰 것만을 보여주고 있다. 전압안정도에 크게 영향을 주는 부하모선은 계통의 우측중앙부분에 위치한다. 대부분 부하모선의 유효전력보다는 무효전력이 큰 영향을 미치나 21번 모선은 유효전력도 비교적 큰 영향을 미친다. 따라서, 전압안정도 향상을 위해서 이들 부하모선에서의 무효전력 보상이 효과적일 것으로 생각된다.

한편 전압안정도 향상을 위한 발전력의 이동측면에선, 표 5의 좌고유벡터 중에서 발전기에 해당하는 것만을 취하여 정규화 하면 제어방향은

$$N_c = [-0.017, 0.018, 0.011, -0.369, -0.373, -0.592, -0.594, -0.024, -0.149]^T \quad (18)$$

위에서 제어방향 벡터는 발전기 번호순으로 배열하였다.

표 5 New England의 CSNB에서의 벡터 N .

Table 5 Vecor N , at CSNB for New England system

Bus #	N_P	N_Q	Bus #	N_P	N_Q
2	-0.0117		21	-0.2919	0.2127
6	0.0125		22	-0.4028	
10	0.0073		23	-0.4037	
15	0.0863	0.2987	24	-0.0924	0.2597
16	-0.0782	0.2609	25	-0.0169	
17	0.0094	0.2136	27	0.0709	0.2040
19	-0.2509		29	-0.1012	
20	-0.2536				

전압안정도 향상을 위해서는 6번과 10번 모선의 발전기 유효전력을 증가시키고 다른 모선의 발전기 출력을 감소시키는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다. 6번과 10번의 발전기 출력증가량이 다른 발전기의 출력감소를 보상하지 못하므로 slack 발전기인 30번 모선의 출력도 증가되어야 한다. 식 (16)의 조정량 d 를 5로 취하고 조류계산을 다시 수행한 결과 중에서 모선전압이 낮은 모선들을 표 6에 보였다. 가장 낮은 전압을 보이는 15번 모선의 전압이 0.738 pu에서 0.791 pu로 상승하였으며 다른 모선도 0.03에서 0.06 pu 정도의 전압이 상승하고, 부하를 균등하게 증가하더라도 마진이 기저부하의 6.8%에서 8.7%로 향상되어 발전력의 재급전이 전압안정도 향상에 다소 도움이 됨을 알 수 있다. 그러나, d 를 7보다 크게 취하면 마진이 감소하여 발전력의 재급전에 의한 전압안정도 향상은 한계가 있다.

표 6 New England 계통의 재급전후 전압

Table 6 Voltages after redispatch in New England system

Bus #	Base case	$d=5$
15	0.7382	0.7913
16	0.7930	0.8540
17	0.7955	0.8407
21	0.8056	0.8655
24	0.8155	0.8807
margin	6.8 %	8.7 %

5. 결 론

본 논문에서는 최단 전압붕괴점 (CSNB)을 계산하기 위한 개선된 직접법을 제안하고, CSNB에서의 좌고유벡터를 사용하여 발전력의 재급전하는 것이 부하차단 및 무효전력보상과 함께 전압안정도 향상을 위한 하나의 효과적인 수단이 될 수 있음을 보였다.

CSNB를 계산하기 위한 Dobson등의 직접법에서는 조류계산식의 약 3배 크기의 비선형방정식을 풀어야 하는 부담이 있었다. 본 논문에서는 CSNB에서 부하증가방향은 좌고유벡터와 평행하다는 조건을 PoC법의 조건 식에 직접 대입하여, PoC법과 동일한 조류계산식의 약 2배 크기의 방정식을 풀어 CSNB를 계산한다. 직접법과 반복법의 프로그램 구조

가 동일하므로, 서로 호환하여 사용하는 것이 가능하고 직접법의 효율성이 제고되었다.

지금까지 부하차단과 무효전력보상에 의한 전압안정도 향상효과는 조사되었으나 가장 중요한 무효전력원인 발전기의 출력이동에 의한 전압안정도 향상효과는 간과되었다. 본 논문에서는 전압붕괴 직전에 있는 Klos-Kerner 11-모선 계통을 예로 CSNB에서의 좌고유벡터 방향으로 발전력을 이동한 결과, 기저부하에서 가장 낮은 모선전압이 0.736 pu이던 것을 0.888 pu로 향상되고 안정도마진을 기저부하의 0.035%로부터 9.35%로 증가시킬 수 있음을 보였다. 모선전압에서 더 개선을 요하나, 무효전력 보상설비의 제어까지 고려한다면 전압 프로파일을 만족스런 정도로 향상시키는 것이 가능하고 CSNB에서의 좌고유벡터 방향으로 부하를 제어하는 것이 매우 효율적인 알고리즘임을 확인하였다. 또한, New England 30-모선 계통을 부하를 기저부하에서 6.8%의 안정도 마진을 갖도록 모선전력을 조정하여 새로운 기저부하를 설정하고 가장 낮은 모선전압이 0.738 pu에서 0.791 pu로 상승하고, 균등부하 증가시 안정도 마진도 6.8%에서 8.7%로 향상됨을 확인하였다.

제안된 CSNB 및 전압제어 알고리즘은 적절한 전압을 유지하는데 상당한 어려움에 직면하고 있는 전력회사들의 계통의 안전운전에 기여를 할 것으로 기대된다. 특히 상정사고 하에서 운전원이 직관과 경험에 의존 PV곡선을 반복 계산하여 수동으로 급전을 행하는 시간 소모적인 제어가 아닌 좀 더 정확하고 정교한 전압제어 해석알고리즘에 대한 필요를 충족하여 줄 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 제안된 방법은 발전기 단자전압이 일정하게 유지된다는 전제하에 발전력의 재급전을 고려한 한계를 지니므로, 발전기 무효전력 또는 단자전압도 유효전력과 함께 독립적으로 제어할 수 있으면 더 효과적인 것으로 생각되고 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 과제 94--0100-05-01-03 및 한국 전력공사 지원 94-지-1에 의해 지원되었음

참 고 문 헌

- [1] Y. Ichida, "Studies under way in Japan for improved analysis of voltage related system behaviors," Proc. of Bulk power system voltage phenomena Missouri, Sept. 1989
- [2] I. Dobson, "Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electric power system," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 39, pp. 240-243, Mar. 1992.
- [3] I. Dobson and L. Lu, "New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse," *IEEE Trans. on Power systems.*, vol. 8, pp. 905-913, Aug. 1993.

[4] I. Dobson, Computing an Optimal Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power System, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 37, pp. 1616-1620, Oct. 1992.

[5] F. L. Alvarado, I. Dobson, Y. Hu, "Computation of closest bifurcations in power systems," *IEEE Trans. on Power Systems.*, vol. 9, pp 918-927, May 1994.

[6] F.L. Alvarado and T.H. Jung, "Direct detection of voltage collapse conditions," Proc. of Bulk power system voltage phenomena Missouri, Sept. 1989.

[7] H. K. Nam, D. J. Kim and C. J. Moon, Calculation of a Pair of Multiple Load Flow Solutions and Voltage Collapse Point for On-line Assessment of Power System Voltage Stability, 대한전기학회 논문지, Vol. 43, No. 8, pp. 1226-1238, Aug. 1994

[8] 남해곤, 김동준, 송충기, 문영환, 김태균, 이효상, "전압붕괴 임계점 계산을 위한 효율적 통합법", 대한전기학회 논문지에 게재확정

[9] V. Ajjarapu and C. Christy, The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, Feb. 1992.

[10] A. Klos and A. Kerner, "The non-uniqueness of load flow solutions" *Proc. , PSCC*, Cambridge 1975.

[11] S. Zelingher, B. Shperling, J. D. Mounford, and R. J. Koessler, Analytical Studies for Thyristor-Controlled Series Compensation in New York State, Part I Steady State Analysis, *Proc. of FACTS Conference 2*, pp. 2.1-1~13, Dec. 1992

[12] EPRI, *Voltage stability/Security Assessment and On-Line Control*, Vol. 1-3, Final Report, TR-101931, 1993.

[13] 김건중, 추진부, 이상중, 김용배, "무효전력 손실감도를 이용한 전압안정도 지표," 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp78-82,1992. 5.

[14] R. C. Burchett, H. H. Happ, K. A. Wirgau, "Large Scale Optimal Power Flow," *IEEE Trans.*, Vol. PAS-101, No. 10, Oct. 1982

저 자 소 개

남해곤 (南海鯤)

전기학회 논문지 제48A권 제8호 참조

Tel : 062-530-1745

E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr



송충기 (宋忠機)

1970년 월 일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 근무.

Tel : 02-787-8364

E-mail : cgsong@dava.kepco.co.kr



김동준 (金東俊)

1971년 1월 7일생. 1992년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹 연구원. 관심분야 : 전압 붕괴점 프로그램 개발(CPF법, PoC법),

발전기/제어계 모델링. 디지털 제어, AVR/PSS 정수 튜닝. 디지털 PSS 개발.

Tel : 0551-280-1318

E-mail : djkim@keri.re.kr