

발전력 재분배에 의한 전압안정도 향상

남 해곤 송 충기*
전남대학교 전기공학과

Enhancement of Voltage Stability by Generation Redispatch

Hae-Kon Nam Chung-Gi Song
Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

Abstract - The distance in load parameter space to the closest voltage collapse point (CSNB) provides the worst case power margin and the left eigenvector identifies the most effective direction to steer the system to maximize voltage stability under contingency.

This paper proposes a new generation redispatch algorithm, which uses left eigenvector at CSNB to enhance the voltage stability. A Newton method is used to detect CSNB point. Proposed method is applicable to the selecton of appropriate reactive power compensation and load shedding point detection. But this paper make a point of voltage stability enhancement only with generation redispatch.

The proposed method has been tested for Klos Kerner 11-bus system.

1. 서론

최근 전력회사들이 공통적으로 당면하고 있는 재정, 환경, 사회적, 경과지 확보 등의 제약으로 새로운 基幹 송전선로를 확보하는 것이 어려워 앞으로 전력회사들은 적절한 전압을 유지하는 것이 어려워 전망이다. 따라서 기존 기간 송전선로는 점점, 특히 침두부하시의 중요한 선로가 개방되는 상정사고하에서, 성능한계(performance limit)에 가깝게 운전될 것이 예상된다. 이러한 환경하에서 좀더 정확하고 정교한 전압제어 해석 알고리즘을 필요로 한다[1].

전통적으로 전압안정도 해석에 주로 조류계산이 사용되어 왔다. 예를 들면, 상정사고하에서 사고 전과 사고 후 상태에 대한 PV곡선을 반복 계산하여 전압안정도 향상을 위한 조치를 운전원의 경험에 의하여 수립하고 수동으로 조치를 취하는 현재의 관행은 매우 시간 소모적이다. 따라서 계통부하를 발전기에 다양하게 배분하는 방법, 지역의 전압/무효전력 제어등을 포함한 계통상태의 자동조정을 위한 알고리즘을 필요로 한다. 이러한 기능의 알고리즘은 실제 계통계획과 운전계획에 종사하는 엔지니어에게 가해지는 업무부담을 많이 절감할 수 있다.

최근 Dobson등이 임계점에서의 기하학적 특성을 고찰하고 최단 전압붕괴임계점 (CSNB)에서의 좌고유벡터를 사용하는 것이 전압 제어에 가장 효과적임을 제안한 것은[2-4] 전압안정도 향

상에 중요한 전기를 제공하였다. 그러나 Dobson등은 부하차단과 무효전력공급을 포함한 부하측에서의 제어만을 고려하였고, 발전력의 재분배는 고려하지 않았다. 전압안정도를 개선하는 방법으로는 가장 취약한 부하모션에서의 부하차단이 가장 효과적인 방법이다. 그러나 전력공급 신뢰도 측면에서 무효전력제어와 발전력의 재급전등 수용가에 전력공급을 중단하지 않고 전압안정도를 확보하는 방법을 우선 고려해야 하고, 이 방법으로 전압안정도를 확보할 수 없을 때 최후수단으로 부하차단을 고려해야 한다.

본 논문에서는 CSNB에서의 정보를 사용하여 무효전력 공급원을 포함한 발전력의 재급전을 통하여 전압안정도를 향상하는 방법을 5-모선계통, Klos Kerner 11-모선계통에 적용하여 발전력의 재급전으로 상당한 전압안정도 향상효과가 있음을 보였다. 특히 이 방법은 전압안정도 마진이 허용치 이내로 저하되는 경우에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

2. 좌고유벡터와 발전력 재분배 알고리즘

좌고유벡터와 전압안정도 향상을 위한 가장 효과적인 재급전 방향과의 관계를 정성적으로 알아보기 위해 그림 1과 같이 가장 간단한 2모선 계통의 특이곡면을 예로 들어본다.

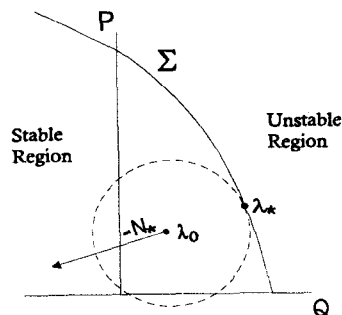


그림 1. 전력 재급전의 개념도.

현재의 운전점 λ_0 로부터 CSNB까지의 전력마진(power margin)이 작아 제급전을 할 필요가 있다고 가정하자. 그림에서 λ_0 로부터 특이곡면 Σ 에 수직인 $-N$ 의 방향으로 전력을 조정하는 것이 특이곡면으로부터 거리, 즉 전력마진이 크게 증가함을 알 수 있다. 모든 모선의 부하를 조정하는 것은 불가능하므로 N 를 제급전 방향으로 취하는 것은 불가능하다. 따라서 제어방향 N_C 는 N 의 전력의 조정이 가능한 모선의 성분만을 취하고 조정이 불가능한 모선의 성분은 0으로 취하여 정규화하는 것이 가장 효과적인 제어방향이다. 전력조정량의 크기를 d 라 하면, 새로운 운전점은

$$\lambda_c = \lambda_0 - dN_C \quad (2.1)$$

가 된다.

단, 여기서 부하차단을 고려하는 모선전력과 제어가능한 무효전력 공급설비가 설치된 모선전력, 그리고 발전기가 설치된 모선의 전력만이 조정가능하다.

CSNB에서 좌고유벡터의 크기는 그 모선이 계통의 전압안정도에 미치는 정도를 결정한다.

5모선 계통을 예로 들어 좌고유벡터가 전압안정도에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보자. 표 1은 문헌 [5]에서 인용한 5모선 계통의 CSNB 계산 결과의 요약이다.

표 1. 5-모선 계통의 반복법 사용결과 요약

	$P_3(a_3)$	$P_2(a_2)$	$P_4(a_4)$	$P_5(a_5)$	$Q_2(V_2)$	$Q_4(V_4)$	$Q_5(V_5)$
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
λ_0	-1.100	1.1500	0.7000	0.7000	0.6000	0.3000	0.4000
λ_*	-1.100	1.1585	1.1664	0.7492	0.6008	1.0493	0.5320
(x_0)	-0.065	-0.104	-0.176	-0.092	0.9603	0.9153	0.9681
(x_*)	-0.167	-0.162	-0.433	-0.159	0.9567	0.5253	0.8524

표 1에서 빗금친 영역은 CSNB에서의 좌고유벡터(w_*)와 전압크기/위상각(x_*)를 가르킨다. CSNB에서의 좌고유벡터 중에서 P_4 와 Q_4 에 관련된 좌고유벡터 성분이 가장 큰 값인 0.5214와 0.8384를 가지며, 따라서 4번 모선의 유효/무효전력 변화가 전압안정도에 가장 큰 영향을 미친다. 실제로 기저부하에서 0.9153pu이던 4번 모선의 전압은 CSNB에서 0.5253pu로 저하되어, 이 모선이 전압안정도에 가장 취약한 모선임을 알 수 있다.

전압붕괴가 일어나는 특이곡면은 비선형특성을 지니므로 식 (2.1)에 의해 운전점을 λ_0 에서 λ_c 로 d 만큼 전력량을 변화시키도 안정도 마진이 d 만큼 증가되지는 않는다. 따라서 전력량을 일정량만큼 이동시킬 때의 최대한의 안정도 마진을 얻기 위해서는 제어량 d 를 미소한 크기로 잡고 발전량을 계속 변화시키면서 변화된 운전점에서 새로운 제어방향을 제시하는 다음과 같은 알고리즘을 필요로 한다.

최대의 마진을 얻기 위한 알고리즘

단계 1] 제어량 d 를 일정한 크기(가능한 한 미소한 크기)로 잡는다. 여기서, d 는 고정된 양으로서 1회의 제어량 혹은 제어의 step을 의미한다.

단계 2] 식 (2.1)을 이용하여 d 만큼 발전력을 재분배하여 새로운 운전점 λ_c 를 계산한다.

단계 3] 새로운 운전점 λ_c 로 기저부하를 이동시키고, 그 점에서 다시 CSNB를 계산하고 새로운 제어방향 N_C 를 계산한다.

단계 4] 새로운 N_C 를 이용해 제어량 d 만큼 발전력을 재분배하여 새로운 운전점 λ_c 를 계산한다.

단계 5] CSNB까지의 거리 k_* 가 일정한 값에 수렴될 때까지 단계 3 와 4을 반복한다.

그러나 이 알고리즘은 발전력 재분배에 의한 최대한 얻을 수 있는 안정도 효과를 시험하기 위한 알고리즘으로 사용될 수 있으나, 제어량 d 를 미소한 크기로 잡아 많은 계산시간이 요구된다. 따라서 실제계의 온라인 적용에는 어렵고, 실제계에 적용하기 위해서는 제어량 d 를 5~10(\times base)정도의 비교적 큰 값으로 취하고 이를 수회 실행하는 것으로 충분하다.

3. 사례연구

Klos Kerner 11-모선계통

문헌 [6]에서 사용된 계통은 기저부하가 CSNB에 매우 근접하여 안정도 마진이 작은 계통이다. 이 계통은 중부하 상태이므로, 반복법을 3회만 수행하여 CSNB를 결정할 수 있다. 부하전력 및 발전력의 증가를 고려한 경우 최단 전압붕괴임계점까지의 거리는

$$k = |\lambda_* - \lambda_0| = 0.006207 \text{ pu}$$

표 2. Klos Kerner 11-모선계통의 CSNB에서의 벡터 N .

Bus #	N_P	N_Q	Bus #	N_P	N_Q
2	0.22159	0.28739	7	0.22415	0.08308
3	0.43775	0.30325	8	0.16708	0.06421
4	0.36309	0.19889	9	0.10276	
5	0.24515		10	0.09825	0.05087
6	0.34771	0.20895	11	0.21325	0.17653

표 2는 CSNB에서 이 계통의 정규화된 벡터 N 이다. 표에서 Klos-Kerner 11-모선계통의 전압안정도에 가장 큰 영향을 주는 모선은 가장 큰 좌고유벡터를 갖는 3, 4, 6번 모선이다.

발전력 재분배에 의한 전압안정도 향상

벡터 N 의 무효성분인 N_Q 가 없는 5, 9번 모선은 발전기 모선이다. 부하차단에 가장 적합한 부하모선은 N_P 가 가장 큰 값을 갖는 3, 4번 모선이고, 무효전력 보상이 전압안정도에 가장 효과적인 모선은 N_Q 가 가장 큰 3, 2번 모선이다.

본 연구의 목적은 부하차단없이 무효전력의 제어를 포함한 발전력의 재분배가 전압안정도에 미치는 영향을 조사하는데 있다. 무효전력의 제어가 전압안정도에 미치는 영향은 이미 많은 문헌에서 충분히 조사되었으므로, 본 연구에서는 주로 발전력의 재분배만을 다루기로 한다.

이 계통에는 원래 slack모선을 제외한 3개의 발전기가 있으나, 기저부하에서 모선 11의 유효,무효 발전량이 고정되었다고 설정되어 있어 모선 11을 부하모선으로 간주하고 반복법을 적용했다.

표 2에서 발전기만의 좌고유벡터를 정규화하면, 제어방향은

$$\lambda_* = \lambda_0 - d \begin{bmatrix} 0.9223 \\ 0.3866 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

와 같고 λ_0 는 음의 값이라고 정의했으므로 λ_* 는 λ_0 보다 더 큰 음의 값으로 계산된다. 즉 발전기 4, 9번의 유효전력을 증가시키고 이에 상당하는 slack 모선의 발전량을 감소시키는 것이 전압안정도를 향상시킨다는 것을 알 수 있다.

표 3은 모선전력의 변화방향은 초기운전점의 N_0 로 고정하고 제어량 d 를 10과 15로 잡고 식 (3.1)에 의해 발전력을 재분배한 새로운 운전점에서의 전압이다. 이 표로부터 각 모선의 전압이 현저하게 상승하고 따라서 발전력 재분배가 전압안정도 향상에 효과적이었다는 것을 알 수 있다.

표 3. Klos Kerner 11-모선계통의 재급전 후 전압분포

Bus #	Base Case		$d = 10$		$d = 15$	
	VOL	ANGLE	VOL	ANGLE	VOL	ANGLE
2	0.73584	-36.1319	0.90675	-21.6487	0.91415	-17.9181
3	0.72635	-56.6351	0.89173	-31.8174	0.88812	-26.2664
4	0.82708	-55.1945	0.92550	-25.8810	0.90432	-17.4536
6	0.82737	-53.3054	0.93901	-25.8587	0.92315	-18.0527
7	0.90894	-44.6017	0.95232	-15.7336	0.94256	-5.5270
8	0.92380	-33.8909	0.96173	-7.8305	0.95834	1.7977
10	0.96821	-20.2416	1.00540	-2.1993	0.99965	4.5517
11	0.89827	-38.4447	0.99997	-15.2684	0.98773	-7.7096
k	0.0062		2.1492		2.2379	

임계점까지의 거리 k 는 제어 전에는 0.0062로 극히 마진이 작은 계통이지만, $d = 10$ 으로 설정하고 발전력을 조정 한 후에는 안정도 마진 k 가 2.1492로, $d = 15$ 일 때는 2.2379로 증가하여 전압붕괴점으로부터 상당히 이격된 계통이 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 의도적으로 발전력의 재분배만을 고려하였으나, 무효전력 보상설비까지 포함하였다면 더 효과적이었을 것으로 생각된다. 발전력 재분배에 의한 전압안정도 효과는 전압의 개선 측면에서 더 명백하게 보인다. 제어 전에는 3번 모선의 전압이 0.72635 pu이었던 것이 제어 후에는 0.89173 pu로 상승하여 많이 개선되었다.

4. 결론

본 논문은 CSNB에서의 좌고유벡터는 전압안정도 향상을 위한 가장 효과적인 부하/발전력의 변화방향을 지시하는 특성을 이용하여 재급전 알고리즘을 제시하였다. 이 재급전 알고리즘을 Klos Kerner 11-모선 계통에 적용한 결과 안정도마진을 상당히 증가시킬 수 있었다.이 마진은 전압안정도 개선에 이미 효과가 입증된 무효전력 보상설비의 제어를 고려하지 않고 발전력 재분배만을 고려한 결과이므로, 무효전력 설비의 제어까지 고려한다면 안정도 향상효과는 더 현저할 것으로 생각된다.

본 논문에서 제안한 재급전 알고리즘은 적절한 전압을 유지하는데 상당한 어려움에 직면하고 있는 전력회사들의 계통의 안전운전에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 특히 부하가 변하는 시간대나 첨두부하시에 중요한 선로가 개방되는 상정사고하에서, 운전원은 PV곡선을 반복계산하여 수동으로 급전을 행하는 시간 소모적인 제어가 아닌 좀 더 정확하고 정교한 전압제어 해석알고리즘에 대한 필요를 충족하여 줄 수 있을 것으로 기대된다.

제안된 알고리즘을 실제계통의 전압제어에 온라인 적용할 수 있기 위해서는 좀 더 다양한 실제계통 규모의 계통에 응용하여 신뢰도를 검증할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] Y. Ichida, "Studies under way in Japan for improved analysis of voltage related system behavior," Proc. of bulk Power System Phenomena, Missouri, Sept. 1988.
- [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, "Computing an optimal direction in control space to avoid saddle node bifurcation and voltage collapse in electric power systems," *IEEE Trans. on Automatic control*, vol.37, pp. 1616-1620, Oct. 1992.
- [4] I. Dobson, "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.
- [5] 송 충기, 남 해근, "최단 전압붕괴 임계점을 계산하는 알고리즘의 특성 비교", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1078-1082, 1997.
- [6] K. Iba, H. Suzuki, M. Egawa and T. Watanabe, "Calculation of critical loading condition with nose curve using Homotopy continuation method," *IEEE Trans. on power systems*, vol. 6, no. 2, May 1991.