

전압안정성 분석 및 제어에 관한 연구

유석구 김규호 장수형*
한양대학교

A Study on the Analysis and Control of Voltage Stability

You, Seok-Koo Kim, Kyu-Ho Jang, Su-Hyeong
Hanyang University

Abstract - This paper presents an efficient method to calculate voltage collapse point and to improve static voltage stability. To evaluate static voltage stability in power systems, it is necessary to get critical loading points. For this purpose, we use linear programming to calculate efficiently voltage collapse point. And if index value becomes larger than given threshold value, voltage stability is improved by compensation of reactive power at selected bus. This algorithm is verified by simulation on the sample system.

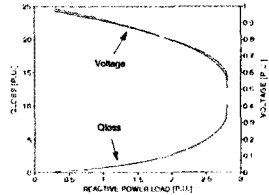


그림 1. 전압과 무효전력손실과의 관계
Fig. 1 Relationship of Voltage and Qloss

1. 서론

최근 전력계통은 전원의 원격, 편재 및 대용량화에 따라 송전선의 선로조류가 증가하는 등 대규모 복잡화 되고 있다. 특히 냉방기기 사용으로 인한 단시간내에 급증하는 전력수요는 계통에 무효전력 불균형을 가져와, 최악의 경우 계통붕괴까지 초래된다. 이러한 계통붕괴 현상은 미국, 일본, 프랑스 등의 선진국에서 경험하였으며[1], 우리나라도 계통의 변화추세로 보아 전압붕괴의 위험을 내포하고 있으므로 계통계획 및 운용에 있어 전압안정도의 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다. 지금까지 전압안정도에 관련된 연구중 전압안정도 평가와 감시에 많은 연구가 집중되어 왔으며, 특히 임계부하를 구하는 방법은, 감도에 의한 방법, 다근조류계산에 의한 방법, 자코비안 행렬식의 그래디언트를 이용하는 방법 등이 제시되고 있다. 그리고 전압불안정회피를 위해서는 지수를 정의한 후 이 지수의 값을 일정범위 내로 유지하도록 제어하는 방법 등이 제시되고 있다[2, 3, 4, 5]. 그러나 이러한 방법은 일반적으로 계산시간이 많이 걸려 대규모 전력계통에 적용하기에는 문제점이 있다. 따라서 계산시간을 감소시킬 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 전력계통을 감시하는 지수로서 무효전력손실을 사용하여 계통의 전압안정성을 평가하고[6], 선형계획법을 이용하여 무효전력손실이 증가하는 방향으로 부하를 증가시키면서 임계부하를 구하는 계산법을 제안한다. 또한 계통의 전압불안정회피를 위하여 무효전력원의 투입위치 및 투입량을 결정하는 방안을 제시 한다.

이를 모델계통을 대상으로 사례연구를 통하여 효용성 및 타당성을 입증한다.

2. 지수의 선정

전압안정성을 평가하기 위해서는 우선 주어진 운전조건이 전압붕괴에 이르는 전압불안정 조건에 대해 얼마만큼의 여유를 가지고 있는가 또는, 어느 정도의 전압불안정성을 내포하고 있는가를 감시하는 지수를 계산해야 한다. 본 연구는 이러한 지수로서 계통의 총무효전력손실(Qloss)을 사용한다[6]. 이 값은 시스템이 전압붕괴에 이르게 되기까지의 물리적 의미를 잘 반영하고, 조류계산을 통해 비교적 쉽게 구할 수 있으므로 계산량이 적은 장점이 있다. 그림 1에서 나타나 있듯이 부하가 증가함에 따라 전압은 서서히 감소하다가 어느 점 이상에서는 급격히 감소하고, 무효전력손실 또한 서서히 증가하다가 전압붕괴점에 가까워 지면 갑자기 증가함을 알 수 있다. 따라서, 전압강하와 무효전력손실 증가의 의존관이 반복되어 일어나는 전압붕괴현상을 탐지하기 위한 지수로서 무효전력손실을 선정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

3. 임계부하계산

전력계통의 전압불안정에 대한 여유란 주어진 운전조건에서 얼마 만큼의 부하증가시 전압불안정상태가 되는가를 나타낸다. 이 전압불안정 여유를 계산하는 데는 전압붕괴가 시작되는 최대부하조건, 즉 임계부하를 계산하는 것이 중요하다. 이 임계 부하는 주어진 운전조건 및 시스템이 임계점에 도달하기까지의 운전조건에 따라 다르다. 그러나 계통의 운전상태가 현재에서 미래에 어떻게 변화하여 갈 것인가를 정확히 예측하는 것은 상당히 곤란하므로, 본 연구에서는 부하를 어떻게 증가시키면 현재의 운전조건에서 가장 가까운 전압붕괴조건에 이를 수 있는가를 계산하는 알고리즘을 제시한다. 이것은 주어진 운전조건에서 전압붕괴점을 찾기 위한 부하증분 계산알고리즘으로 무효전력손실이 최대가 되는 방향으로 부하를 증가시킨다. 이를 정식화하면 다음과 같다.

○ 목적함수

$$\text{MAX } \Delta Q_{\text{loss}} = [S_L]^T [\Delta Q] \quad (1)$$

$$= \left[\frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial Q} \right]^T [\Delta Q]$$

여기서 S_L 은

$$S_L = \left[\frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial Q} \right] = \left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right]^T \left[\frac{\partial Q_{\text{loss}}}{\partial V} \right]$$

○ 제약조건

$$\left[\frac{\partial V}{\partial Q} \right] [\Delta Q] \geq [V_{\text{min}}^{\text{crit}}] - [V^0] \quad (2)$$

여기서 $[\Delta Q]$: 부하의 무효전력변화량의 벡터

$[V^0]$: 현 운전점 전압크기의 벡터

$[V_{\text{min}}^{\text{crit}}]$: 예상되는 임계전압크기의 벡터

식(2)를 제약조건으로 식 (1)을 최적화하여 무효전력 증가분을 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$Q^{k+1} = Q^k + \Delta Q^k \quad (3)$$

유효전력 증가분 계산은 각 모선에서 역류이 일정한 것으로 가정하여 식 (4)를 적용한다.

$$P^{k+1} = P^k + \Delta P^k \quad (4)$$

여기서, $\Delta P^k = (pf / \sqrt{1 - pf^2}) \Delta Q^k$

pf : 역률

제약조건 (2)에서 $V_{\text{min}}^{\text{crit}}$ 는 내부임피던스 $Z_s < \delta$ 인 전압원 V_s 가

부하임피던스 $Z_L \angle \phi$ 에 전력을 공급하고 있는 그림 2의 2 모선 계통에서 $Z_S/Z_L=1$ 일때 계통은 최대의 전력을 부하에 공급한다는 원리로부터 식 (5)와 같이 구할 수 있다[7].

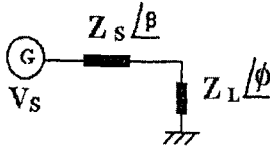


그림 2. 2 모선 계통도
Fig. 2 2 bus system

$$V_{pred}^{crit} = \frac{V_S}{\sqrt{2[1 + \cos(\beta - \phi)]}} \quad (5)$$

여기서
 β : 내부임피던스각
 ϕ : 부하역률각
 V_S : 전압원

이것을 일반적인 모델계통에 적용할 경우 테브닌정리를 이용하여 최대전력전달원리를 설명할 수 있다. N 모선계통에서, 모선 i와 대지간의 단자쌍에서 본 테브닌 등가임피던스를 $Z_{ii} \angle \beta_i$ 라 하고, 모선 i의 부하임피던스를 $Z_L \angle \phi_i$ 라 하면, $Z_{ii}/Z_L=1$ 일때 부하에 최대전력이 전달된다. N 모선 계통에서 식 (5)의 V_{pred}^{crit} 는 다음과 같은 절차에 의하여 구한다.

- ① 현 운전점에서 조류계산을 한다.
- ② 계통의 부하와 발전기의 유·무효전력을 어드미턴스로 표현하여 선형화한다.

$$Y_i \angle \phi_i = \frac{P_i}{V_i^2 \cos \phi_i} \angle \phi_i$$

여기서, $\angle \phi_i = -\tan^{-1}(-\frac{Q_i}{P_i})$

- ③ ②에서 구한 어드미턴스를 고려한 모선어드미턴스 행렬 [Y]를 구하고 역행렬을 취하여 모선어드미턴스 행렬 [Z]를 구한다. 테브닌 임피던스 $Z_{ii} \angle \beta_i$ 는 [Z]의 i번째 대각요소이다.
- ④ i 모선에서 무부하 전압 V_S 는 그 모선의 부하를 제거하고, 조류계산으로 구한다.

결과적으로 부하가 변할 때마다 무부하전압 V_S 와 테브닌임피던스 Z_{ii} 는 변하게 된다. 그러므로 부하가 증가 할 때마다 전체 부하모선에 대해 V_S 와 Z_{ii} 를 다시 구해야 하므로 계산량이 많아진다. 따라서 본 연구에서는 부하에 대한 전압감도가 유사한 모선들은 부하변화에 대하여 전압변화가 비슷하다고 보고 이를 기초로 하여 cluster를 구성한다. 이를 설명하면 다음과 같다.

$S = \{1, 2, \dots, q\}$ 는 계통의 부하모선이고, clustering의 조건은 다음의 식(6)과 같이 정의한다.

$$S_L = \{u_k \mid \varepsilon_U \leq u_k \leq \varepsilon_U\} \quad (6)$$

여기서, $u_k = -\frac{\partial V_k}{\partial Q_k}$

$L = 1, 2, \dots, l$

$\varepsilon_U, \varepsilon_L$ 는 계통에 따라 임의로 결정

$S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_l = S$ 이다.

또한 효율적으로 부하중분량을 결정하기 위하여 각 cluster에서 부하에 대한 전압감도의 값이 가장 큰 모선에서 만 V_{pred}^{crit} 를 구하고 선형계획법에 제약식으로 사용하여 각 모선의 부하중분을 결정한다. 이와같이 각 모선에서 유효전력과 무효전력 부하가 증가되어, 임계부하에 매우 근접하게 되면 전압감도가 급격히 증가하여 조류계산의 수렴이 어려워지게 된다. 따라서 이때의 운전점은 전력조류 임계점에 매우 가깝다고 볼 수 있으므로 이 부하상태를 전력조류 임계점으로 간주할 수 있다. 그림 3은 임계부하조건 계산 알고리즘을 나타내는 순서도이다.

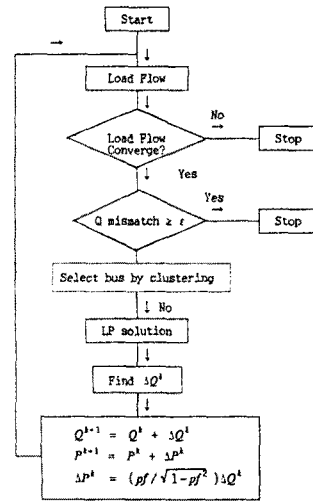


그림 3. 임계조건 계산 알고리즘 순서도

Fig. 3 Computation Algorithm for Critical Load Condition

4. 전압불안정회피 방안

전압안정도 지수로서 선택한 무효전력손실이 미리 정해진 문턱값보다 크게 되면 전압안정도 지수가 작아지도록 제어를 행한다. 문턱값은 각 계통특성에 따른 고유한 것으로 많은 사례 분석과 실온전으로 부터 얻은 경험 등에 의해서 정해질 수 있는 것이나, 본 연구에서는 임의로 선정한다. 전압안정도 지수가 미리 정해진 문턱값을 벗어나면, LP를 이용해서 적절한 보상량을 구해 부하모선에 보상을 해준다. 문제의 정식화는 다음과 같다.

● 목적함수

$$\text{MAX } \sum \Delta Q_c \quad (7)$$

● 제약조건

$$V^{\min} - V^0 \leq \frac{\partial V}{\partial Q_c} \Delta Q_c \leq V^{\max} - V^0 \quad (8)$$

$$Q_c^{\min} - Q_c^0 \leq \Delta Q_c \leq Q_c^{\max} - Q_c^0$$

여기서 ΔQ_c : 무효전력보상량
 V^0 : 현 운전점의 전압크기

전압이 보상됨에 따라 본 연구에서 제시한 전압안정도 지수인 무효전력손실이 감소하게 되는데 이는 전압안정도의 개선을 의미한다. 그림 4는 전압불안정 회피를 위한 제어알고리즘의 순서도이다.

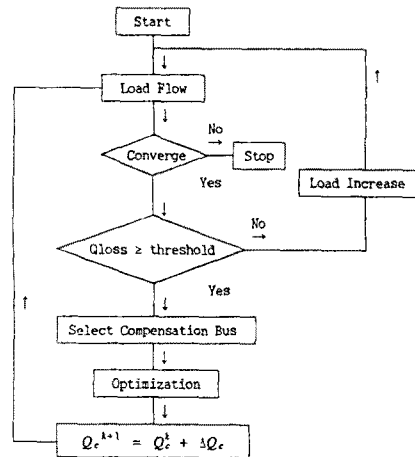


그림 4. LP를 이용한 전압불안정회피 방안

Fig. 4 Algorithm for Voltage Instability Avoidance using LP

5. 사례연구

본 연구에서 제시한 전압안정성 분석 및 제어에 관한 효율성을 입증하기 위하여 IEEE 14모선 계통에 대하여 모의 실험을 한다. 그림 5는 모선 14에서 부하가 변화함에 따라 실제전압 V_{bus} , 무부하전압 V_s , 그리고 예상되는 붕괴전압 V_{crit} 를 나타내었다. 그림 5로부터 계통의 전체부하가 0.735 [P.U.]에서 2.797 [P.U.]로 변화하였을 때 모선 14의 경우 실제전압은 1.021 [P.U.]에서 0.847 [P.U.]로 감소하고 예상되는 임계전압은 0.88 [P.U.]에서 0.841 [P.U.]로 변화함을 알 수 있다. 결과로부터 본 연구에서 제시한 부하중분결정에 의해 계산한 임계점에서 실제전압과 예상되는 임계전압이 만남을 알 수 있다.

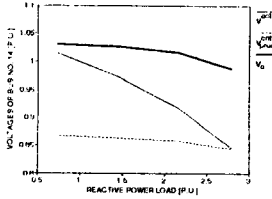


그림 5. 부하에 대한 전압변화 (모선 14)
Fig. 5 Variance of Voltage (BUS No. 14)

또한, 표 1은 전압 무효전력감도에 의한 clustering의 결과를 나타낸 것이다.

표 1. 전압 무효전력감도에 의한 모선분류
Table 1. Bus clustering by Voltage Reactive Sensitivity

	모선번호	ϵ_{i1}	ϵ_{ij}
S_1	14	0.2	0.3
S_2	10, 12, 11, 9, (13)	0.1	0.2
S_3	13, 5, 4	0.0	0.1

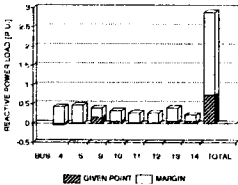


그림 6. 계통붕괴에 대한 여유량 (with clustering)
Fig. 6 Margin on the System Collapse (with clustering)

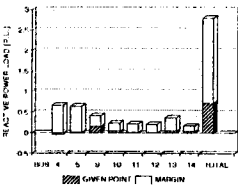


그림 7. 계통붕괴에 대한 여유량 (without clustering)
Fig. 7 Margin on the System Collapse (without clustering)

표 1에서 S_3 의 모선 13은 계통이 임계부하에 접근함에 따라 감도가 커져 S_2 에 포함되었다. 그림 6은 표 1의 clustering에 의해 결정된 각모선의 계통붕괴 여유량과 계통전체의 여유량을 나타낸 것이다. 그림 7은 계통의 부하모선 전체에 대하여 예상하는 임계전압을 계산하여 현 운전점에 대한 계통붕괴 여유량을 계산한 것이다. 그림 6과 그림 7을 비교해 보면 계통전체의 현 운전점에 대한 계통붕괴 여유량은 거의 같음을 알 수 있다. 그림 6에서 계통의 붕괴점은 2.88 [P.U.]이고 그림 7에서 붕괴점은 2.79 [P.U.]이다. clustering에 의해 축소된 제약식으로 구한 경우의 여유량과 부하모선 전체를 제약식으로 계통붕괴 여유량을 구한 경우의 차이는 0.09 [P.U.]이다. 이러한 차이는 clustering에 의한 오차라 생각된다. 그러나 대규모 계통에 적용시 계산시간을 상당히 감소할 수 있으므로 효율적임을 알 수 있다.

표 2. 전압 보상에 따른 전압비교

Table 2. Comparison on the Compensation of Voltage

모선번호	전압 (보상전)	전압 (보상후)	보상량 (제어1)	보상량 (제어2)
10	0.945	1.024	0.35	0.05
11	0.980	1.026	0.05	0.15
12	0.994	1.028	0.15	0.05
14	0.914	1.02	0.4	0.0

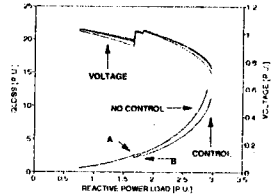


그림 8. 전압안정도 지수의 비교
Fig. 8 Comparison of Voltage Stability index

표 2는 무효전력보상에 따른 전압의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8은 전압안정도 지수인 무효전력손실이 문턱값(2.5 [P.U.])을 넘으면 제어를 실시한 경우와 제어를 하지 않은 경우를 비교한 것이다. 여기서 제어를 하지 않았을 때 임계부하 조건이 2.815 [P.U.](무효전력부하)이었으나 제어를 실시한 경우에는 2.967 [P.U.]로 임계전력이 증가하여 전압안정도가 개선되었음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 전압안정성 분석 및 제어를 하기 위한 효율적인 알고리즘을 제시하였고 모델계통에 적용하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 현 운전조건에서 임계점에 도달하기 위한 부하중분량을 결정함에 있어서 선형계획법을 이용하므로써 적은 계산량으로 전압붕괴에 대한 계통의 여유량을 비교적 정확하게 평가하였다.
2. 부하에 대한 전압 감도를 이용하여 cluster를 선정하여 효과적으로 계통붕괴점을 구할 수 있었다. 즉 부하모선 전체에 대한 증분을 결정할 경우와 clustering에 의해 제약식을 축소하여 결정할 경우에 있어서 현 운전점에 대한 계통붕괴 여유량은 거의 비슷함을 알 수 있었고 제약식 축소에 의해 대규모 계통에 적용 가능함을 보였다.
3. 본 연구에서 제시한 전압불안정회피 방안에서는 최적화문제 구성시 전압안정도에 관련된 각 모선별 정보가 포함되어 있지 않다. 앞으로 전압안정도에 관련된 모선별 특성을 고려한다면 보다 효과적으로 전압안정도를 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] L. H. Fink, "Bulk Power System Voltage Phenomena: Voltage Stability and Security", EPRI EL-6183, sec. 3.4
 [2] 餘利野直人, "電力系統の電壓安定度の分類とその解析", PE-89-113
 [3] T. Van, Cutsem, "A Method to compute Reactive Power Margin with respect to Voltage Collapse", IEEE 90 WM 097-6 PWRs pp. 145 ~ 156
 [4] N. Flatabo, "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods", IEEE PWRs, Vol. 5, No. 4, 1990, pp. 1286 ~ 1293
 [5] 서의석, "대규모 전력계통에서 부하의 전압특성을 고려한 정적 전압붕괴 조건 산법에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대학교, 1992
 [6] 김태관, "대규모 전력계통에서 정적 전압안정도 개선방안에 관한 연구 개선에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대학교, 1993
 [7] A. M. Chebbo, "Voltage collapse proximity indicator: behaviour and implication", IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 139, No. 3, MAY 1992