

무효전력 손실감도를 이용한 정적 전압 안정도 해석

金原謙*, 李福鎔, 李相喆
 東서울大學

Static Voltage Stability Analysis using Reactive Power Loss Sensitivity

Weon-Kyum Kim, Lee Bok-Yong Lee Sang-Cheol
 DONGSEOUL COLLEGE

Abstract-In recent years, much attention has been paid to the voltage collapse phenomena. There has been reported many cases about the voltage collapse in many countries. These voltage collapse phenomena are known as the event that can occur due to reactive power deficits. This paper proposes an efficient method that can pursue the reactive power loss changes and gives the simple voltage collapse proximity indicator(VCPi) based on the reactive power loss sensitivities using optimal techniques.

By comparing reactive power loss sensitivity with active power loss sensitivity, it is also proved that VCPi based on reactive power loss sensitivities is more effective.

The developed VCPi is derived from the Jacobian matrix of Load Flow and the computational burden is very low and on-line implementation is possible. The proposed method is applied to a IEEE-14 bus test system and reliable and promising results are obtained.

1. 서론

최근 전력계통이 대형화됨에 따라 전압붕괴 문제는 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 현상은 이미 세계 여러 나라들에서 빈번히 경험하고 있고 현재 이 분야는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직까지 이론적으로 완벽하고 실계통에 응용 가능한 연구들은 보고되지 않고 있다. 현재의 연구동향은 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있다. 첫째로는 계통의 통특성을 고려하지 않은 정적 전압붕괴현상이며, 둘째로는 동특성을 고려한 동적 전압붕괴현상이다.

본 연구는 정적인 관점에서 전압붕괴를 효과적으로 예측하고 또한 제어할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 이 분야의 연구는 세계적으로 여러 학자들에 의하여 연구가 진행되어 왔다. 연구의 큰 흐름은 주로 조류계산의 해가 존재하는지 여부를 검증하는 방법과 정적인 안정도의 관점에서 해석하는 방법으로 대별된다.

Barbier 등은 근사적인 전압붕괴 근접도 지표를 계산하는 방법을 제시하고 있다. 여기서는 최대 전력 전송조건에 기초하여 부하모선의 전압의 한계치를 계산하는 방법을 보여주고 있다. 그리고 모선 어드미턴스 행렬을 축약하여 사용하는 방법을 제시하였다[1]. Carpentier 등의 최적조류계산에 기초한 무효전력 공급량에 대한 부하단의 무효전력 변화를 계산하여 전압붕괴 근접도 지표로 사용하고 있다. 이 방법은 최적조류계산을 사용하여 수치적으로 감도를 계산하는 방법을 사용하고 있기 때문에 실계통에 적용하기에는 문제점이 많이 있다. 그러나 전압붕괴에 대한 물리적인 규명이 비교적 잘 표현된 연구이다[2]. Thomas 등은 최소 특이치를 사용한 전압붕괴 판별법을 제안하고 있다. 그리고 최소 특이치를 사용하여 전압붕괴를 제어하기 위한 방법을 고안하였다. 그러나 이 방법은 대규모 계통에 적용이 불가능하고 여러 모선의 제어가 어

렵다는 결정적인 단점을 가지고 있다[3]. Sekine 등은 조류계산의 해가 다근해를 갖는다는 사실로부터 계통의 다근해를 추적하는 기법을 사용하여 전압붕괴점을 예측하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 조류다근해를 구하여야 하는 어려움으로 실계통 적용은 거의 불가능한 방법으로 생각된다[4].

본 논문에서는 계통의 유효전력 손실감도 대신에 무효전력 손실감도를 사용하고 있다. 이 방법을 채용함으로써 유효전력 손실감도를 사용한 경우보다 전압붕괴 근접도 지표값이 확실하게 큰 값을 갖는 장점이 있다. 물리적으로 서로 유사하다고 생각되나 일반적으로 선로의 리액턴스 성분이 저항성분보다 상당히 큰 사실을 감안하면 유효전력 손실감도를 추적하는 것보다 무효전력 손실감도를 추적하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 따라서 사례연구에서 두 지표값을 비교하여 그 타당성을 보여주고 있다.

2. 전압붕괴 근접도 지표

전압붕괴 현상은 계통 손실의 급격한 증가를 야기 한다는 점에 착안하여 현실적으로 계통운전의 기초가 되고 있는 조류계산의 결과로부터 손실변화를 추적할 수 있는 방법을 모색하기로 한다. 일반적으로 조류계산은 다음과 같이 모형화 된다. 즉 슬랙 발전기를 제외한 모든 모선의 유효전력과, 부하모선의 무효전력을 지정하고 이를 만족하는 모선전압의 크기와 위상각을 구하는 문제이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다[5].

$$P(V, \theta) = P^{spec} \text{ 슬랙모선 제외 전모선} \quad (1)$$

$$Q(V, \theta) = Q^{spec} \text{ 부하모선} \quad (2)$$

$$P(V, \theta) = V_i \sum_{k \in n} V_k [G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}] \quad (3)$$

$$Q(V, \theta) = V_i \sum_{k \in n} V_k [G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}] \quad (4)$$

여기서, G_{ik} : 모선 i 에서 모선 k 사이의 Y_{ik} 중 실수부, B_{ik} : 모선 i 에서 모선 k 사이의 Y_{ik} 중 허수부, θ_{ik} : 모선 i 에서 모선 k 사이의 전압위상각의 차이이다.

조류계산은 식(1)-(4)로 주어지는 비선형 연립방정식을 (V, θ) 에 대하여 푸는 문제이다. 이때 조류계산의 해는 슬랙모선을 제외한 전 모선의 전압 위상각과 그리고 부하모선의 전압의 크기로 주어진다.

조류계산에 의한 전압의 크기와 위상각은 계통의 운전점이 된다. 정상적인 계통 운전시에도 계통에 충분한 무효전력 여유가 없는 경우에는 부하의 미소 무효전력 변화에도 계통은 정상적으로 운전되지 못하고 무효전력 부족에 의한 전압붕괴를 일으킬 수 있다. 전압붕괴 현상은 기본적으로 계통손실의 급격한 증가에 기인되는 것으로 정의하였다. 따라서 이러한 경우에는 계통손실이 대단히 큰 값으로 증가되는 현상이 발생할 것이다. 이러한 특성을 이용하여 계통의 전압붕괴 현상을 예측할 수 있는 모형을 제시하여보자.

전력계통은 기본적으로 전력조류 방정식을 만족하여야 한다. 그리고 전압붕괴를 해석하기 위해서 계통의 무효전력 손실이 부하모선 전력변화에 따른 감도를 추적하여야

한다. 따라서 목적함수가 계통의 무효전력 손실이 되고 제약조건이 전력조류방정식으로 주어지는 최적화 모형을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\text{Minimize } Q_{\text{loss}}(V_D, \theta) \quad (5)$$

$$\text{s.t } P(V_D, \theta) = P^{\text{spec}} \quad (6)$$

$$Q(V_D, \theta) = Q^{\text{spec}} \quad (7)$$

여기서, $V_D \in \mathbb{R}^{N-M}$ 는 부하모선 전압의 크기, $\theta \in \mathbb{R}^{N-1}$ 는 전압 위상각, $P \in \mathbb{R}^{N-1}$ 는 모선 유효전력 지정치, $Q \in \mathbb{R}^{N-M}$ 는 모선 무효전력 지정치이고 \mathbb{R} 은 각 벡터의 요소들 수, N 은 전 모선수, M 은 발전 모선수를 나타낸다.

위 문제에서 변수는 부하모선의 전압의 크기와 슬랙모선을 제외한 전모선의 전압 위상각이다. 식(6)로 주어지는 유효전력 방정식은 슬랙모선을 제외한 전 모선에서 정의되고, 식(7)의 무효전력 방정식은 부하모선에서 정의된다. 전력조류 계산은 식(6), (7)를 만족하는 전압의 크기와 위상각을 결정하는 문제이다. 만약 조류계산을 수행하여 전압의 크기와 위상각이 구해졌다고 가정하면 위 문제는 현재의 운전점에서 계통의 손실을 최적화하는 문제이다. 현재의 최적점(운전점)으로부터 부하모선 전력의 변화에 의한 손실변화를 계산하기 위하여 라그랑주 함수를 도입하기로 한다.

$$L = Q_{\text{loss}}(V_D, \theta) + \lambda_P^T [P(V_D, \theta) - P^{\text{spec}}] + \lambda_Q^T [Q(V_D, \theta) - Q^{\text{spec}}] \quad (8)$$

여기서, $\lambda_P \in \mathbb{R}^{N-1}$, $\lambda_Q \in \mathbb{R}^{N-M}$, P , P^{spec} , Q , Q^{spec} 는 벡터, L 과 Q_{loss} 는 스칼라이다.

식(8)과 같이 라그랑주 함수를 정의하면 본래의 제약조건이 있는 최적화 문제는 단순히 제약조건이 없는 라그랑주 함수의 최적화 문제로 등가화된다. 이 경우 제약조건은 없어졌지만 대신에 취급하여야 할 변수의 수는 제약조건 수만큼 증가되었음을 유의하자. 제약조건이 해제된 등가 라그랑주 함수의 최적화 문제는 정확히 다음과 같이 최대화 및 최소화의 두 과정을 포함하게 된다.

$$\text{Maximize Minimize } L[V_D, \theta, \lambda_P, \lambda_Q] \quad (9)$$

$$[\lambda_P, \lambda_Q] [V_D, \theta]$$

따라서, 변수 $[V_D, \theta]$, $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 를 동일한 형태의 변수로 취급하여서는 곤란하다. 왜냐하면 변수 $[V_D, \theta]$ 에 대하여는 최소화 문제이고 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 에 대하여는 최대화 문제로 표현되기 때문이다. 그러나 여기에서 한가지 중요한 사실은 만약 최적점에 도달하였다면 이 경우 다음과 같은 최적조건(Optimality Conditions)이 성립한다는 사실이다[6].

$$[\partial L / \partial \theta] = [\partial Q_{\text{loss}} / \partial \theta] + [\partial P / \partial \theta]^T \lambda_P + [\partial Q / \partial \theta]^T \lambda_Q = 0 \quad (10)$$

$$[\partial L / \partial V_D] = [\partial Q_{\text{loss}} / \partial V_D] + [\partial P / \partial V_D]^T \lambda_P + [\partial Q / \partial V_D]^T \lambda_Q = 0 \quad (11)$$

$$[\partial L / \partial \lambda_P] = P(V_D, \theta) - P^{\text{spec}} = 0 \quad (12)$$

$$[\partial L / \partial \lambda_Q] = Q(V_D, \theta) - Q^{\text{spec}} = 0 \quad (13)$$

최적조건의 형태를 살펴보면 여기에는 두 가지 변수로

분류될 수 있음을 알 수 있다. 즉 본래의 변수 $[V_D, \theta]$ 와 제약조건에 의하여 도입된 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 로 분류된다. 변수들의 물리적 의미를 추적해 보면 본래의 전압변수는 실제 계통의 운전변수를 의미하고, 제약조건에 의하여 도입된 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 는 다음과 같은 중요한 의미를 지니게 된다. 의미를 명확하게 하기 위하여 식(8)에 대해 라그랑주 함수를 모선 지정전력 P^{spec} , Q^{spec} 에 대하여 편미분하여 보면 다음과 같이 주어진다.

$$[\partial L / \partial P^{\text{spec}}] = -\lambda_P \quad (14)$$

$$[\partial L / \partial Q^{\text{spec}}] = -\lambda_Q \quad (15)$$

식(14)는 라그랑주 함수의 모선 유효전력에 대한 미분이다. 이는 모선 유효전력이 단위량 증가할 때의 라그랑주 함수의 증가분을 의미하며, 이 값은 바로 $-\lambda_P$ 가 됨을 쉽게 알 수 있다. 식(15)는 라그랑주 함수의 모선 무효전력에 대한 미분으로 모선 무효전력의 단위량 증가시 라그랑주 함수의 증가분을 의미한다. 라그랑주 함수는 원래의 목적함수인 계통손실과 제약조건 함수의 합으로 주어져 있으므로 식(14), (15)의 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 는 현실적으로 큰 의미가 없는 것 처럼 생각하기 쉽다. 그러나 여기서 팔목할 만한 사실은 현재의 운전점에서 조류계산의 결과 식(12), (13)의 최적조건을 만족하고 있다는 것이다. 따라서 이는 곧 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 변수에 대하여는 최적인 상태를 의미하게 된다. 그러므로 식(9)로 주어지는 라그랑주 함수는 오직 계통손실만을 포함하게 되고 따라서 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 는 모선전력의 단위량 증가시 계통손실의 증가를 의미하게 된다.

식(14), (15)로 주어지는 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값은 모선전력 변화에 대한 계통손실의 변화를 의미함을 이미 설명하였다. 전압붕괴 현상은 부하모선 전력이 미소 증가할 경우 계통손실이 급격히 증가되는 현상으로 정의될 수 있으므로 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값은 계통이 전압붕괴를 일으킬지 아닌지를 평가할 수 있는 훌륭한 지표로 사용될 수 있다. 즉 현재의 운전점에서 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값을 계산하여 그 값이 무한대로 나타나면 이는 현재의 운전점이 곧 전압붕괴 점이라는 것을 의미하며, 무한대는 아니라도 상당히 큰 값을 보이는 경우 현재의 운전점이 전압붕괴점에 상당히 가까이 존재하고 있다는 것을 의미하게 된다. 부하모선 전력의 미소량 변화에 따른 조류계산의 결과에 의한 계통 손실은 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 에 의한 계산값과 거의 일치한다. 식(10), (11)을 행렬의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [\partial L / \partial \theta] \\ [\partial L / \partial V_D] \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\partial Q_{\text{loss}} / \partial \theta] \\ [\partial Q_{\text{loss}} / \partial V_D] \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

단, J 는 자코비안 행렬로서 식(17)과 같이 표시된다.

$$J = \begin{bmatrix} [\partial P / \partial \theta] & [\partial P / \partial V_D] \\ [\partial Q / \partial \theta] & [\partial Q / \partial V_D] \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(16)으로부터 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} [\partial Q_{\text{loss}} / \partial \theta] \\ [\partial Q_{\text{loss}} / \partial V_D] \end{bmatrix} \quad (18)$$

식(18)은 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 의 값이 자코비안 행렬과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다. 만약 전압붕괴점에 접근하게 되면 자코비안 행렬의 행렬식 값은 0에 접근하게 되고 따라서 자코비안 행렬의 역행렬로부터 계산된 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 의 값은 무한대로 접근하게 된다. 이는 전압붕괴의 물리적인 특성과 본 연구에서 제안된 전압붕괴 근접도 지표가 등가임을 보여주는 명백한 결과로서 의심의 여지가 없다. 즉 식(18)은 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 에 대해서 식(14), 식(15)과 등가이다. 왜냐하면 최적조건을 만족하는 식(12), (13)을 식(8), 식(9)에 적용시키면 주어진 라그랑주 함수 L 은 오직 계통의 손실(Q_{loss}) 함수가 된다. 따라서 식(18)은 식(19)와 같은 식으로 표시 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_p \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \partial Q_{loss} / \partial \theta \\ \partial Q_{loss} / \partial V_D \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial Q_{loss} / \partial P \\ \partial Q_{loss} / \partial Q \end{bmatrix} \quad (19)$$

근접도 지표 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 의 계산은 단지 조류계산에서 이미 계산된 자코비안 행렬의 역행렬에 손실감도 벡터를 곱하는 계산만을 필요로 하므로, 계산량은 조류계산에 비하여 크게 증가되지 않고 거의 조류계산 시간과 동일하다. 따라서 실시간으로 현재의 운전점이 전압 붕괴점에 얼마나 접근하고 있는가를 알 수 있다.

3. 사례 연구

본 연구의 결과를 검증하기 위하여 그림 1과 같이 IEEE 14모선 계통에 적용하였다. 또한 14 모선 계통의 모선 자료와 선로 자료는 표 1과 표 2로 각각 주어진다.

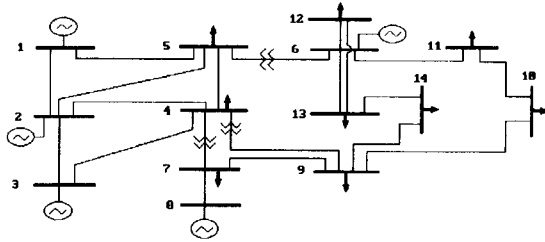


그림 1 14모선 계통도
Fig. 1 14 bus system diagram

표 1은 14모선의 모선 데이터이고, 표 2는 선로 데이터이다.

표 1 14 모선 입력데이터
Table 1 14 Bus input data

모선 번호	모선 종류	전압	위상각	부하
1	슬랙모선	1.0600	0.0000	0.0000+j0.0000
2	발전기모선	1.0450	0.0000	0.2170+j0.1270
3	발전기모선	1.0100	0.0000	0.9420+j0.1900
4	부하모선	1.0000	0.0000	0.4780-j0.0390
5	부하모선	1.0000	0.0000	0.0760+j0.0160
6	발전기모선	1.0700	0.0000	0.1120+j0.0750
7	부하모선	1.0000	0.0000	0.0000+j0.0000
8	발전기모선	1.0900	0.0000	0.0000+j0.0000
9	부하모선	1.0000	0.0000	0.2950+j0.1660
10	부하모선	1.0000	0.0000	0.0900+j0.0580
11	부하모선	1.0000	0.0000	0.0350+j0.0180
12	부하모선	1.0000	0.0000	0.0610+j0.0160
13	부하모선	1.0000	0.0000	0.1350+j0.0580
14	부하모선	1.0000	0.0000	0.1490+j0.0500

표 2 14모선의 선로 입력데이터
Table 2 Line input data of 14 bus

선로 번호	from 모선	to 모선	임피던스	Half line Charging
1	1	2	0.0194+j0.0592	j0.0264
2	1	5	0.0540+j0.2230	j0.0246
3	2	3	0.0470+j0.1980	j0.0219
4	2	4	0.0581+j0.1763	j0.0187
5	2	5	0.0570+j0.1739	j0.0170
6	3	4	0.0670+j0.1710	j0.0173
7	4	5	0.0134+j0.0421	j0.0064
8	4	7	0.0000+j0.2091	j0.0000
9	4	9	0.0000+j0.5562	j0.0000
10	5	6	0.0000+j0.2520	j0.0000
11	6	11	0.0950+j0.1989	j0.0000
12	6	12	0.1229+j0.2558	j0.0000
13	6	13	0.0662+j0.1303	j0.0000
14	7	8	0.0000+j0.1762	j0.0000
15	7	9	0.0000+j0.1100	j0.0000
16	9	10	0.0318+j0.0845	j0.0000
17	9	14	0.1271+j0.2704	j0.0000
18	10	11	0.0820+j0.1921	j0.0000
19	12	13	0.2209+j0.1999	j0.0000
20	13	14	0.1709+j0.3480	j0.0000

위에 IEEE 14모선 계통을 사용하여 조류 계산한 결과가 표 3으로 주어진다. 표 3에서 보듯이 초기 운전조건에서는 전압이 1 p.u. 근처에 존재하는 것을 볼 수 있다. 여기서 P_{loss} 와 Q_{loss} 는 유효·무효전력의 손실을 나타내고, P_{total} 과 Q_{total} 는 각각 발전할 수 있는 총 유효·무효전력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{loss} &= 0.1353 & Q_{loss} &= 0.2699 \\ P_{total} &= 1.4540 & Q_{total} &= 0.3712 \end{aligned}$$

표 3 14모선 계통 조류계산 결과
Table 3 Load flow Result of 14 bus system

No		V(p.u.)	θ	P_G [MW]	P_D [MW]	Q_G [MVAR]	Q_D [MVAR]
1	1	1.0600	0.0000	2.3247	0.0000	-0.1587	0.0000
2	2	1.0450	-0.0870	0.4001	0.2170	0.4571	0.1270
3	2	1.0100	-0.2222	0.0001	0.9420	0.2544	0.1900
4	3	1.0152	-0.1792	0.0002	0.4780	0.0004	-0.0390
5	3	1.0180	-0.1531	0.0002	0.0760	0.0007	0.0160
6	2	1.0700	-0.2516	0.0001	0.1120	0.2104	0.0750
7	3	1.0507	-0.2314	0.0001	0.0000	0.0003	0.0000
8	3	1.0895	-0.2314	0.0000	0.0000	0.2400	0.0000
9	3	1.0342	-0.2590	-0.0003	0.2950	0.0001	0.1660
10	3	1.0330	-0.2626	0.0000	0.0900	0.0000	0.0580
11	3	1.0477	-0.2592	0.0001	0.0350	0.0001	0.0180
12	3	1.0536	-0.2664	0.0000	0.0610	0.0000	0.0160
13	3	1.0472	-0.2671	0.0001	0.1350	0.0001	0.0580
14	3	1.0216	-0.2804	0.0000	0.1490	0.0000	0.0500

표 4는 전압붕괴 근접지표를 설명하기 위해서 초기 입력자료인 표 1과 표 2를 이용하여 각 부하모선의 부하를 조금씩 증가시켰을 때 전압붕괴 직전의 조류계산 결과를 나타내고 있다. 특히 14번 모선의 전압이 1.0216에서 0.5624까지 떨어지는 것을 알 수 있다. 곧 전압은 붕괴되고 더 이상 부하를 증가시킬 수 없는 점에 도달하게 된다. 표 4는 2절에서 설명한 전압붕괴 근접지표 λ_p 가 가장 큰 순서로 나열한 것이다. 또한 초기 조류 계산한 유효전력 손실(P_{loss})이 0.1353에서 1.4249로 크게 변하고, 무효전력 손실(Q_{loss})은 0.2699에서 5.8598로 증가하고 있다. 또한 총 발전량(P_{total})도 초기 운전점 1.4540에서 전압붕괴 근처에서는 8.0849로 되었다.

$$\begin{aligned} P_{loss} &= 1.4249 & Q_{loss} &= 5.8598 \\ P_{total} &= 8.0649 & Q_{total} &= 10.6418 \end{aligned}$$

표 4 유효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접지표
Table 4 Voltage collapse proximity index using active power loss sensitivity

모선 번호	$\frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P}$	$\frac{\Delta P_{loss}}{\Delta Q}$	V (p.u.)	P_G (p.u.)	P_D (p.u.)	Q_G (p.u.)	Q_D (p.u.)
	ΔP	ΔQ					
14	13.6419	16.2858	0.5624	0.0000	0.3820	0.0000	0.3250
10	9.9936	16.6409	0.5817	0.0000	0.2307	0.0000	0.3776
9	9.8649	19.0164	0.5548	-0.0002	0.7563	0.0002	1.0807
11	5.8971	6.3331	0.8002	0.0001	0.0897	0.0001	0.1172
7	4.7829	11.7035	0.6770	0.0001	0.0000	0.0003	0.0000
8	4.7829	10.0027	0.7345	0.0000	0.0000	0.2400	0.0000
13	4.6806	2.7211	0.8953	0.0000	0.3461	0.0001	0.3776
12	3.6319	1.3914	0.9599	0.0000	0.1564	0.0000	0.1042
6	2.8778	0.0000	1.0700	0.0002	0.2871	4.0648	0.4883
4	1.9853	2.9105	0.8554	0.0001	1.2255	0.0004	-0.2539
5	1.4831	1.9368	0.8787	0.0002	0.1948	0.0007	0.1042
3	0.9765	0.0000	1.0100	0.0001	2.4150	3.1352	1.2369
2	0.0880	0.0000	1.0450	4.4501	0.5563	2.7788	0.8268
1	0.0000	0.0000	1.0600	3.6142	0.0000	0.4242	0.0000

표 5 무효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접지표
Table 5 Voltage collapse proximity index using reactive power loss sensitivity

모선 번호	$\frac{\Delta Q_{loss}}{\Delta P}$	$\frac{\Delta Q_{loss}}{\Delta Q}$	V (p.u.)	P_G (p.u.)	P_D (p.u.)	Q_G (p.u.)	Q_D (p.u.)
	ΔP	ΔQ					
14	40.6905	47.2319	0.5624	0.0000	0.3820	0.0000	0.3250
10	30.0225	48.2219	0.5817	0.0000	0.2307	0.0000	0.3776
9	29.4954	54.8306	0.5548	-0.0002	0.7563	0.0002	1.0807
11	18.2622	18.4255	0.8002	0.0001	0.0897	0.0001	0.1172
13	14.8074	7.9800	0.8953	0.0001	0.3461	0.0003	0.3776
7	14.4512	28.6969	0.7345	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	14.4512	33.7462	0.6770	0.0000	0.0000	0.2400	0.0000
12	11.6815	4.0184	0.9599	0.0000	0.1564	0.0000	0.1042
6	9.5236	0.0000	1.0700	0.0002	0.2871	4.0648	0.4883
4	5.9162	8.3633	0.8554	0.0001	1.2255	0.0004	-0.2539
5	4.4804	5.6734	0.8787	0.0002	0.1948	0.0007	0.1042
3	3.1021	0.0000	1.0100	0.0001	2.4150	3.1352	1.2369
2	0.2899	0.0000	1.0450	4.4501	0.5563	2.7788	0.8268
1	0.0000	0.0000	1.0600	3.6142	0.0000	0.4242	0.0000

표 5는 무효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표이다. 무엇보다도 중요한 것은 근접도 지표값이 가장 큰 14번 모선과 연결된 10번, 9번모선 들도 다른 모선에 비해 전압붕괴 근접도 지표값이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이것은 바로 전압붕괴가 일어난 모선이 인접한 모선에 영향을 미치는 것을 보여주는 것이다.

표 4와 표 5에서 보듯이 전압붕괴 근접지표 (λ_P, λ_Q) 가 가장 큰 모선은 14번 부하 모선인 것을 알 수 있다. 그리고 중요한 사실은 무효전력 손실감도가 유효전력 손실감도보다 상당히 크다는 사실이다. 이것은 선로 리액턴스 성분이 저항성분보다 훨씬 크다는 것을 의미한다. 따라서 전압붕괴 근접도 지표로서 무효전력 손실감도를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그림 2는 부하가 증가함에 따라서 전압이 점차 떨어져서 결국에는 전압 붕괴점에 도달하고, 이때 전압붕괴 근접 지표값이 무한대로 증가하는 것을 보여주고 있다. 즉, 그림 2는 손실감도가 가장 큰 14번 모선의 전압과 (λ_P, λ_Q) (유효전력 손실감도, 무효전력 손실감도)와의 관계를 그림으로 나타내고 있다.

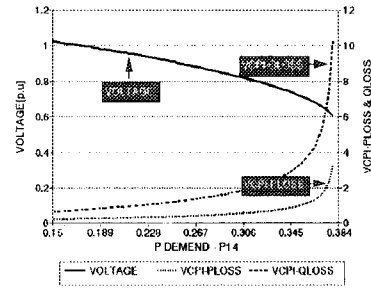


그림 2 전압붕괴 근접지표(VCPI)와 14번 모선 전압과의 관계
Fig. 2 Relationships between VCPI and #14 bus voltage

4. 결론

본 논문에서는 계통의 무효전력 손실감도를 분석하여 다음과 같은 사실을 입증하였다.

1. 전압붕괴 근접 지표는 무효전력 손실감도가 유효전력 손실감도를 사용하는 것보다 효과적임을 보여주고 있다.
2. 전압붕괴 근접 지표는 계통 조류방정식과 자코비안 행렬로부터 손쉽게 계산할 수 있고 계산시간은 조류 계산의 경우와 거의 동일하다. 따라서 실시간 연산이 가능한 전압붕괴 근접도 지표로 유용하게 사용 될 수 있다.
3. 전압붕괴 근접 지표로부터 모선 중 가장 취약한 모선 순으로 선별할 수 있어서 계통의 조상설비계획 뿐만 아니라 운용하는데 적용할 수 있다.

(참고 문헌)

- [1] C. Barbier, J. P. Barret, "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System", 672/RGE, Tome 89, No. 10, Oct, 1980.
- [2] J.Carpentier, R.Girard, E.Sceno, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow" Proceedings in Power Systems Conference, pp 671-678, August 1987.
- [3] A. Tiranuchit, R.J. Thomas "A Posturing Strategie Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, No. 13, No.1, pp. 424-430, Feb. 1988.
- [4] Sekine et al, "A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solution", Engineering Foudation Conference on "Bulk Power Systems Voltage Instability", Potoshi, Missouri, Sep. 1988.
- [5] M.A.Pai, **Computer Techniques in Power System Analysis**, Mcgraw-Hill, Inc., 1979, pp, 208-216.
- [6] M.S.Bazaraa and C.M. Shetty, **Nonlinear Programming Theory and Algorithms**, John Wiley & Sons, Inc, 1979, pp. 124-223.