

손실 감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표

김용배*, 김건중*, 추진부**, 김원겸*, 이상중**
 * : 충남대학교 ** : 한전기술연구원

Voltage Collapse Approximity Indexes Using The Loss Sensitivity

Yong B. Kim*, Kern J. Kim*, Jin B. Chu**, Woen K. Kim*, Sang J. Lee**
 * : ChungNam National University, ** : KEPCO

ABSTRACT

Recent years voltage collapse phenomenon have a great attention to power system engineers. As the system size increases the voltage problem shows a very complicated and the reactive power control problem becomes more difficult. This paper gives an efficient methods for calculating voltage collapse proximity index based on the reactive power loss sensitivity and real power loss sensitivity. The system voltages are tightly associated with the system reactive power, so the proposed voltage collapse proximity index is very useful for the system voltage control problems. Numerical examples showed a good and reliable results.

1. 서론

정상상태 전압붕괴 해석기법으로서 손실감도를 이용하는 것은 이전의 연구에서 그 유용성을 입증하였다.10)11)12) 본 논문에서는 유효전력 손실감도와 무효전력 손실감도를 이용하여 전압붕괴 근접도를 계산하여 효과적인 전압붕괴 예측 기법으로서의 방안을 마련하는 한편 그 과정에서 도출되는 효과적인 무효전력 투자방법을 제안하고자 한다. 또한 기존의 전압에 의한 무효전력제어 관점과의 비교를 통해 전압붕괴 근접도 지표로서 손실감도를 이용한 예측기법의 타당성을 검증하고 전력계통의 효과적인 운용 측면에서 이들 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표값의 이용 방안을 제시하고자 한다.

2. 본론

계통의 손실이 전압붕괴 현상을 유발 한다는 것은 이전의 여러 연구에서 입증된 사실이다.3)9)10)11)12) 그리고 계통의 손실을 제어할 수 있는 방안으로 무효전력제어를 해야 하는데 기존에 사용되는 무효전력 제어방법은 단순히 전압을 일정수준으로 유지하는 방법을 택하고 있다. 그러나 손실감도

를 이용하여 무효전력 제어를 수행하는 것이 바람직 하다는 것을 이전의 연구에서 밝힌바 있다.10)11) 본 논문에서는 손실감도로서 사용되는 전압붕괴 근접도 지표값으로 유효전력 손실 감도 법과 무효전력 손실감도법의 특성을 고찰하고 나아가 전압붕괴를 예측하고 이를 예방하기위한 무효전력 방안을 마련하고자 한다. 조류계산의 정식화:

$$P(V, \theta) = P^* \quad \text{슬랙모션 제의 전모션} \quad (1)$$

$$Q(V, \theta) = Q^* \quad \text{부하모션} \quad (2)$$

$$P_i(V, \theta) = V_i \sum V_k [G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}] \quad (3)$$

$$Q_i(V, \theta) = V_i \sum V_k [G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}] \quad (4)$$

조류계산은 식(1)-(4)로 주어지는 비선형 연립방정식을 (V, \theta)에 대하여 푸는 문제이다. 이때 조류계산의 해는 슬랙모션을 제외한 전 모션의 전압 위상각과 그리고 발전모션에서의 전압의 크기로 주어진다.

유효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접도 모형10):

$$\text{Min.} \quad P_{\text{Loss}}(V_D, \theta) \quad (5)$$

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

$$Q_D(V_D, \theta) = Q_D^{\text{spcc}} \quad (7)$$

위 문제에서 변수는 부하모션의 전압크기와 슬랙모션을 제외한 전모션 전압 위상각으로 주어지며, 식(6)으로 주어지는 유효전력 방정식은 슬랙모션을 제외한 전모션에서 정의되고 식(7)의 무효전력 방정식은 부하모션에서 정의된다. 전력조류계산은 식(6), (7)을 만족하는 전압의 크기와 위상각을 결정하는 문제이다. 만약 조류계산을 수행한 결과 전압의 크기와 위상각이 주어졌다고 가정하면 위 문제는 현재의 운전점(전압의 크기와 위상각)에서 계통의 손실을 최소화 하는 문제를 의미한다.

이와같은 형태의 최적화 문제는 비선형 제약조건이 있는 최적화 문제로 정의될 수 있다. 일반적으로 제약조건이 있는 최적화 문제를 푸는 방법으로는 여러가지 방법이 제시되고 있지만

기본적으로 라그랑주 함수를 도입하여 해결하는 방법에 기초하고 있다. 따라서 여기에서 라그랑주 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$L = P_{Loss}(V_D, \theta) + \lambda_P T[P(V_D, \theta) - P_{Spec}] + \lambda_Q T[Q_D(V_D, \theta) - Q_{D^{Spec}}] \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && \text{Minimize} && L[V_D, \theta, \lambda_P, \lambda_Q] \\ & [P_{\lambda_P}, P_{\lambda_Q}] && [V_D, \theta] \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 변수 $[V_D, \theta], [\lambda_P, \lambda_Q]$ 를 동일한 형태의 변수로 취급하여서는 곤란하다. 왜냐하면 변수 $[V_D, \theta]$ 에 대하여는 최소화의 문제로 되고 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 에 대하여는 최대화 문제로 표현되기 때문이다.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial Q_{Loss}}{\partial \theta} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q_D}{\partial \theta} \right]^T \lambda_Q = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_D} = \left[\frac{\partial Q_{Loss}}{\partial V_D} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial V_D} \right]^T \lambda_P + \left[\frac{\partial Q_D}{\partial V_D} \right]^T \lambda_Q = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} = P(V_D, \theta) - P_{Spec} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} = Q_D(V_D, \theta) - Q_{D^{Spec}} = 0 \quad (13)$$

그러나 현재의 조류계산 결과 얻어진 운전점은 위의 최적조건을 완전히 만족하지 않고 있다. 최적조건 형태를 살펴보면 여기에는 두 가지로 분류될 수 있음을 알 수 있다. 즉 본래의 변수 $[V_D, \theta]$ 와 제약조건에 의하여 도입된 변수 $[\lambda_P, \lambda_Q]$ 로 분류된다.

식(11), (12)를 행렬의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L}{\partial V_D} \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V_D} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

단 J는 다음과 같은 자코비안 행렬을 나타낸다.

$$J = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial V_D} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial V_D} \right] \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(15)으로부터 $[P_{\lambda_P}, P_{\lambda_Q}]$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{\lambda_P} \\ P_{\lambda_Q} \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V_D} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(17)의 $[P_{\lambda_P}, P_{\lambda_Q}]$ 는 전압봉의 물리적인 특성을 표현한 전압봉의 근접도 지표이다.

무효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 모형(10):

$$\text{Min. } Q_{Loss}(V_D, \theta) \quad (18)$$

$$\text{s. t. } P(V_D, \theta) = P_{Spec} \quad (19)$$

$$Q_D(V_D, \theta) = Q_{D^{Spec}} \quad (20)$$

무효전력 손실 감도를 이용한 전압봉의 근접도 모형은 식 (5)-(17)의 유효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 모

형과 유도과정이 같다. 결과로 무효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} Q_{\lambda_P} \\ Q_{\lambda_Q} \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{Loss}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q_{Loss}}{\partial V_D} \end{bmatrix} \quad (21)$$

이상에서 살펴본 바와 같이 전압봉의 근접도 지표로서 $[P_{\lambda_P}, P_{\lambda_Q}]$ 는 물리적인 의미는 모선전력의 단위당 증가에 대한 전체계통의 유효전력 손실 증가를 의미하며, 마찬가지로 $[Q_{\lambda_P}, Q_{\lambda_Q}]$ 는 모선전력의 단위당 증가에 대한 전체계통의 무효전력 손실을 의미하게 된다.

4 사례연구

14모선 계통의 구조는 그림 1. 과 같으며 모선자료는 표 1, 표 2에 나타냈으며, 선로자료는 표 3과 같다. 4모선 계통에 대한 초기조류계산 결과는 표 4.에 나타 냈다. 그림 2, 그림 3는 초기조류 계산의 결과로 부터 부하를 일정물로 증가시키면서 계통의 전압봉의 근접도 지표값을 추적한 결과를 그림으로 나타 내었다. 표 4 초기조류계산 결과를 무효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표로 나타 냈으며, 표 5는 유효전력 손실 감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표로 나타내었다. 표 6은 31 [MVAR]무효전력 보상설비를 유효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표값으로 투자를 한 결과이며, 표 7은 무효전력 손실 감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표값으로 투자를 한 결과이다. 표 8 은 전압이 가장낮은 부하모선에 무효전력 보상설비를 투자 한 결과이다. 각 투자방법에 대한 투자량은 동일하게 31 [MVAR]을 투자하였으며, 이는 무효전력 손실감도를 이용한 전압봉의 근접도 지표가 0.02 이하를 유지하도록 하는 무효전력 보상설비의 투자 결과이다. 표 9에는 각 투자방법의 비교를 위해 31 [MVAR] 무효전력 보상설비가 투자되었을때의 결과를 정리한 것이 다.

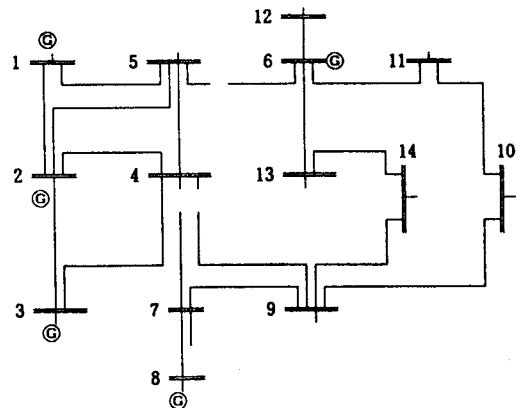


그림 1. 14모선 계통도

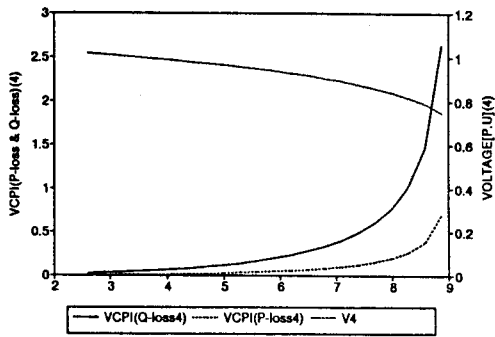


그림 2. 전압과 전압붕괴 근접도 지표

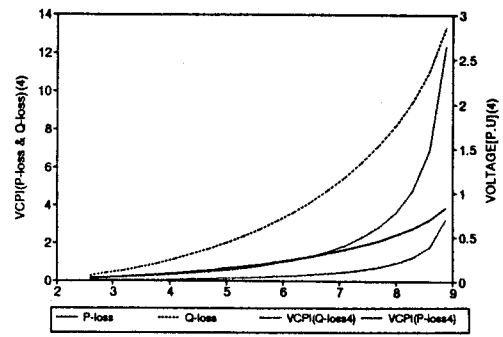


그림 3. 손실과 전압붕괴 근접도 지표

표 9. 31[MVAR]의 무효전력 보상설비가 투자된후 투자방법 비교

투자방법 구분	초 기 조류계산	유효전력 손실감도	무효전력 손실감도	전압이 낮은모선	비 고
조상설비 투자위치		14(6)5(9) 9(7)13(3) 10(6)	14(5)9(17) 10(5)5(4)	5(6)14(1) 4(24)	모선(투자량 [MVAR] 총31[MVAR])
유효전력 손	13.53	13.29	13.31	13.45	[MW]
무효전력 손	27.00	25.78	25.71	26.46	[MVAR]
V C P I [P _{loss}]	0.0194 (14)	0.0038 (5)	0.0065 (13)	0.0146 (14)	지표값(모선)
V C P I [Q _{loss}]	0.0751 (14)	0.0344 (9)	0.0198 (5)	0.0624 (14)	지표값(모선)

5 결 론

그림 2, 그림 3에서 나타난 바와같이 전압붕괴를 지표로서 무효전력 손실감도를 이용한 방법이 감도가 더 높음을 알 수 있으며, 이는 전압붕괴를 예측하는데 유효전력 손실 감도를 이용한 방법에 비해 더 효과적임을 쉽게 알 수 있다. 그러나 계통의 운용측면으로는 표 9에 나타난 바와같이 동일한 무효전력 보상설비를 투자했을 경우 유효전력 손실감도를 이용한 방법이 계통의 손실이 가장 많이 줄어드는 결과를 나타내고 있다. 또한 무효전력 손실감도를 이용한 투자방법은 투자결과 유효전력 손실은 늘어났으나 무효전력 손실이 가장 많이 줄어들었으며, 전압으로 투자한 경우에는 전압이 향상되었다. 이는 물리적인 유효전력 손실감도의 의미와 완전히 일치하는 결과를 보이고 있다. 결과적으로 무효전력 제어에는 유효전력 손실감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표를 이용하면 가장 효과적이며, 전압붕괴의 예측을 위해서는 무효전력 손실감도를 이용하는 것이 유리하다는 결론을 내릴 수 있다. 본 논문의 결과는 595모선 실계통에 적용해 보았으며, 무효전력 보상설비의 용량 및 위치 결정에 사용하여 아주 만족할 만한 결과를 얻었으며, 실제 계통 분석시 계산시간은 1회 전압붕괴 근접도 지표 계산에 초기 조류 계산 시간을 포함하여 18초가 소요되었다. 사용된 계산기의 기종은 IBM-PC 486-33MHz 을 사용하였다.

REFERENCES

- 1) R. Fischl, J.C. Chow, H. Yan, F. Mercede, F.F. Wu, "A Comparison of Indices for Predicting Voltage Collapse in Power Systems", Proceedings of the 27-th Conference on Decision and Control, Austin, Texas, Dec. 1988.
- 2) C. Barbier, J. P. Barret, "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System", 672/RGE, Tome 89, No. 10, Oct. 1980.
- 3) J. Carpentier, R. Girard, E. Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow", Proceedings of in Power Systems Conference, Aug. 1987.
- 4) P. Kessel, H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986.
- 5) A. Tiranuchit, R. J. Thomas, "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988.
- 6) Y. Sekine, A. Yokoyama, T. Kumano, "A Method for Detecting a Critical State of Voltage Collapse," Engineering Foundation Conference on Bulk Power Systems, Voltage Instability, Potoshi, Missouri, Sep. 1988.
- 7) Sekine et al "A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solution", Engineering Foundation Conference on "Bulk Power Systems Voltage Instability", Proc. St. Louis Sep. 1988.
- 8) Fernando L. Alvarado, Tay-Ho Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions", Engineering Foundation Conference on Bulk Power Systems, Voltage Instability, Potoshi, Missouri, Sep. 1988.
- 9) Tay H. Jung, Kern J. Kim, Fernando L. Alvarado, "A Marginal Analysis of The Voltage Stability with Load Variations", Proceedings of 10th PSCC Conference, Graz, Austria, Aug. 1990.
- 10) 김건중, 김원경, 정태호, 이상중, "전압 안정도 개선을 위한 무효전력 제어", 대한 전기학회 학회 논문집 1991.7.
- 11) Tay H. Jung, Kern J. Kim, D.H. Lee, "An approach for estimating voltage collapse proximity using a new index based on the system loss information", Proceedings of 34th CIGRE, Paris, France, 1992.
- 12) 김건중, 추진부, 김원경, 이상중, 김용배, "무효전력 손실 감도를 이용한 전압붕괴 근접도 지표", 대한 전기학회 학회 논문집 78P, 1992.5.