

## 송전손실 상태식별법을 이용한 전압안정성 개선효과의 정량적 평가에 관한 연구

최중기\* 이봉용\*\* 김정훈\*\*  
\*홍익대학교 전기제어공학과  
\*\*홍익대학교 전자전기제어공학군

A Study on the Quantitative Evaluation of Voltage Stability Improvement Effect  
By the T/L-Loss System Identification Method

Jong-key Choi\* Bong-Yong Lee\*\* Jung-Hoon Kim\*\*  
\*Dept. of Electrical & Control Eng.  
\*\*Dept. of Electronical & Electrical & Control Eng.

**Abstract**

The simulation of reactive power compensation in 5-bus and 25-bus system was conducted using transmission-line loss system identification method. Sensitivities of maximum load-power with respect to reactive power compensation was identified by the simulation. With sufficient reactive power compensation at the first voltage-collapsing load-bus, the first voltage collapse could be prevented until the next voltage-collapsing load-bus lost its voltage stability. And the total compensated reactive power at the first voltage-collapsing bus means reactive power margin of voltage collapse or distance to voltage collapse. This quantity can be useful for determining the size of compensating devices or the site to compensate.

**1. 서론**

부하와 가까운 곳에 발전소를 세우거나 또는 장거리 송전선로를 건설하는 것이 점점 어려워지게 되면서 이미 있는 발전설비와 송전설비를 최대한으로 이용해야 할 필요성이 커지게 되었다. 이에 따라 선로의 열적 용량(Thermal Limit) 또는 전압안정성 한계에 대한 관심이 높아지고 있다.[7]

어떤 전력계통의 전압이 안정하다는 말은 부하의 급격한 증가 또는 선로조류의 급증 등과 같은 대규모 교란이 발생한 후에도 교란 후의 부하 전압이 교란 전과 거의 같은 전압을 유지할 수 있다는 것을 뜻한다. 만약 계통이 전압안정성을 상실하게 되면 계통 내에 비정상적으로 낮은 전압이 발생하게 되고 선로전류가 급증하게 되어 손실이 급격히 증가하게 되고 결국에는 전 정전(Black Out)에까지 이르게 된다. 무효전력 보상은 종종 전력 전송용량(power transfer capability)과 전압안정성을 개선시키는 가장 효과적인 방법 중 하나로 여겨져 왔으며 가장 흔한 형태의 무효전력 보상으로서는 series capacitor bank, shunt reactor, capacitor bank 그리고 static var compensator 등을 들 수 있다.

본 논문에서는 이미 발표된 바 있는 송전손실을 이용한 상태식별법 [10]과 전압붕괴 근접도 지수를 이용하여 가장 먼저 최대전력 한계에 도달하는 모선, 즉 전압안정도가 가장 취약한 모선을 식별하고 시뮬레이션에 의하여 그 모선과 연결된 각각의 모선에 단계별로 무효전력을 투입하여 가장 효과적인 무효전력 투입방법을 알아냄으로써 전압안정성의 대책 마련에 있어서의 송전손실 상태식별법의 가능성을 보였다. 또한, 송전손실 상태식별법으로는 전압붕괴 이후의 상태도 식별이 가능하므로 가장 먼저 전압 붕괴점에 도달하는 모선과 그 이후로 붕괴점에 도달하는 모선간의 무효전력 여유분을 알아냄으로써 무효전력 투입량의 결정에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

**2. 송전손실 상태식별법**

계통의 송전손실 부하증가와 함께 증가하고, 전압붕괴 이후에도 부하와는 달리 송전손실은 계속 증가하게 된다. 이 때 각각의 송전손실에 상응하는 시스템의 상태를 알 수 있다면 부하의 증가에 의한 조류계산으로는 할 수 없었던 정확한 전압붕괴점의 식별과 붕괴 이후의 계통상태의 식별이 가능하다는 점에 착안한 것이 송전손실을 이용한 상태식별법이다.

송전손실은  $V, \delta$ 만의 함수이므로  $P_L = P_L(V, \delta)$ 로 나타낼 수 있다. 거꾸로 임의의 송전손실  $P_L$ 과 같은 값을 갖는  $P_L(V, \delta)$ 을 구하고자 아래와 같은 최적화 문제를 구성하였다.

$$\min F = (P_{Loss}^{spec} - P_{Loss}(V, \delta))^2$$

subject to

$$P_i(V, \delta) - k_i Q_i(V, \delta) = 0 \quad (1)$$

$$P_i(V, \delta) = 0 \quad (2)$$

$$Q_i(V, \delta) = 0 \quad (3)$$

$$P_i^{min} \leq P_i(V, \delta) \leq P_i^{max}$$

$$Q_i^{min} \leq Q_i(V, \delta) \leq Q_i^{max}$$

제약조건 (1)식은 통과모선을 제외한 부하모선의 역률을 일정하게 유지시키기 위한 등호 제약조건이며, (2)식은 통과모선에서의 전력방정식을 만족시키기 위한 등호 제약조건이며 마지막 (3)식은 발전기의 유효, 무효전력의 발전력 한계를 수식화한 부등호 제약조건이다. 라그랑제 미정계수법을 이용하여 제약조건들을 목적함수에 포함시키면 제약조건이 없는 최적화 문제처럼 풀 수 있으며 최종적인 목적함수식은 아래와 같게 된다.

$$\min L = (P_{Loss}^{spec} - P_{Loss}(V, \delta))^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} (P_i(V, \delta) - c_i Q_i(V, \delta)) + \sum_{i=1}^n \lambda_{in} (P_i(V, \delta) = 0) + \sum_{i=1}^n \lambda_{iq} (Q_i(V, \delta) = 0) + \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} (P_i(V, \delta) - P_i^{band}) + \sum_{i=1}^n \lambda_{qi} (Q_i(V, \delta) - Q_i^{band})$$

여기서,

- $\lambda_{pi}, \lambda_{in}, \lambda_{qi}, \lambda_p, \lambda_q$  : 라그랑제 미정계수
- $c_i$  : 부하모선 초기상태에서  $P_i/Q_i$  비
- $D$  : 통과모선을 제외한 부하모선의 집합
- $T$  : 통과모선의 집합
- $P$  : 유효전력 발전량 상·하한에 도달한 발전기 모선의 집합
- $Q$  : 무효전력 발전량 상·하한에 도달한 발전기 모선의 집합

위 최적화 문제에서 최적조건(Optimality Condition)은

$$\nabla L(V, \delta, \lambda) = -2(P_L^{spec} - P_L(V, \delta))^2 + \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \left( \frac{\partial P_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} - c_i \frac{\partial Q_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} \right) + \sum_{i=1}^n \lambda_{in} \frac{\partial P_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} + \sum_{i=1}^n \lambda_{iq} \frac{\partial Q_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} + \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \frac{\partial P_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} + \sum_{i=1}^n \lambda_{qi} \frac{\partial Q_i}{\partial(V, \delta, \lambda)} = 0$$

$$\text{단, } \lambda = [\lambda_{pi} \ \lambda_{in} \ \lambda_{qi} \ \lambda_p \ \lambda_q]^T$$

$\nabla$  : Gradient

이 되며, 테일러 급수전개에 의하여 다음의 식으로 정리된다.  

$$\nabla L(V, \delta, \lambda) = \nabla L(V^0, \delta^0, \lambda^0) + \nabla^2 L(V^0, \delta^0, \lambda^0) \cdot \Delta(V, \delta, \lambda) = \nabla L(V^0, \delta^0, \lambda^0) + W \cdot \Delta(V, \delta, \lambda) = 0$$

$$\Delta(V, \delta, \lambda) = -W^{-1} \nabla L(V^0, \delta^0, \lambda^0)$$

위 식으로부터  $\Delta V$ ,  $\Delta \delta$ ,  $\Delta \lambda$  를 구하여  $V$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  를 수정 반복 계산함으로써 최적조건을 만족하는 해를 결정할 수 있다. 이 때 발전기의 무효전력 한계에 대한 부등호 제약조건이 active constraint 가 되면 발전기 모선에서의  $\Delta V$  량이 추가되게 됨으로써 전압제어 능력을 상실하고 부하모선처럼 바뀌게 된다.

### 3. 전압안정성 개선을 위한 무효전력 보상

선로와 부하를 임피던스로 모델링한 2모선 계통에서 임피던스 부하의 크기를 변화시켰을 때, 각각의 역률이 따라 변화하는 P-V곡선을 그린 것이 그림 3.1이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 부하 역률이 변함에 따라 부하모선의 최대전력이 증가하고 있다. 즉, 부하역률이 개선됨에 따라 전압 붕괴를 지연시킬 수 있다는 것을 의미한다. 다모선 계통에서는 전압 안정성이 가장 취약한 모선에 무효전력을 보상에 증으로써 모선의 역률을 개선시키는 효과를 볼 수 있으며, 결과적으로 모선 전압이 비정상적으로 낮아지는 것을 막고, 최대 부하전력을 증가시켜 전압안정성을 개선시키는 효과가 있음을 예상할 수 있다. 또한 가장 먼저 전압이 붕괴되는 모선에 무효전력을 보상하여 두 번째로 붕괴되는 모선이 나올 때까지 보상할 수 있다면, 그 때까지 보상한 무효전력 용량의 두 번째 모선까지의 전압불안정 무효전력 여유, 즉 두 번째 전압붕괴 모선까지 전압 불안정성의 거리의 의미를 갖게 된다. 부하 전 모선에 대하여 이러한 전압붕괴 여유를 다 구할 수 있다면 이 정보는 무효전력 보상 등과 같은 대책마련, 즉 확보해 놓아야 할 무효전력 용량의 결정, 가장 효과적인 무효전력 투입방법, 전압안정성이 가장 취약한 모선의 식별 등에 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 송전손실 상태식별법을 이용하여 증가되는 송전손실에 상응하는 상태를 식별하여 가다가, 처음으로 부하가 감소하기 시작하는 모선이 생기면 바로 전 계통상태로 돌아가서 그 모선에서 단위량 만큼 무효전력 발전을 하는 것처럼 처리하고, 다시 송전손실을 증가시키면서 계통상태를 식별함으로써 실제 계통의 무효전력 보상의 효과를 시뮬레이션해 볼 수 있었다. 흐름도는 그림 3.2과 같다.

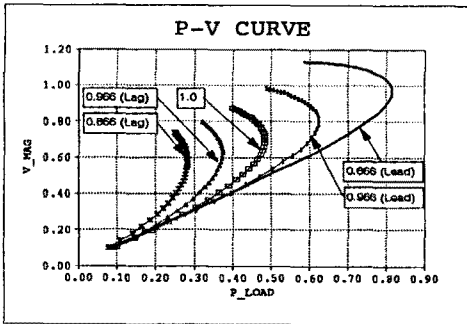


그림 3.1 2모선 계통에서 부하역률 변화에 따른 P-V곡선의 변화

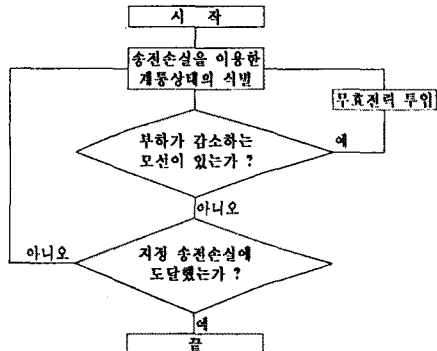


그림 3.2 송전손실 상태식별법에서의 무효전력 투입

### 4. 사례연구

사례연구로는 발전기 출력 부등호 제약조건이 없는 경우의 25모선 계통과 발전기 출력 부등호 제약조건을 고려한 5모선 계통 자료를 사용하였다. 5모선 계통도는 그림 4.1과 같다.

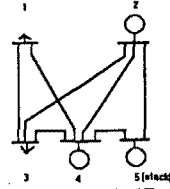


그림 4.1 5모선 계통

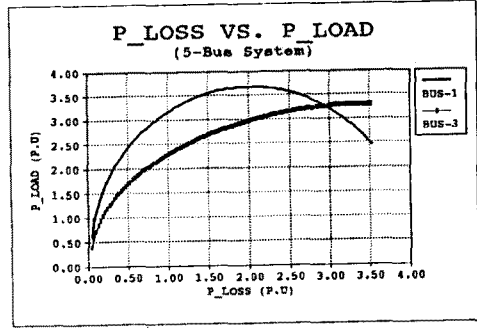


그림 4.3 송전손실에 대한 부하모선의 유효전력 부하량의 변화

그림 4.3에서 볼 수 있는 것처럼 단위 송전손실 증가에 따른 부하모선의 유효전력 부하량의 증분이 0이 될 때, 즉 최대 전력전송점에서 전압붕괴가 일어난다고 생각하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 발전기 제약은 고려한 5모선 계통에서 전압 붕괴점에 도달하는 모선의 순서는 1, 3 모선이다. 가장 먼저 붕괴점에 도달하는 1번 모선과 다른 부하모선에 각각 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 [p.u]의 무효전력을 보상해 본 결과, P-V 곡선의 변화(그림 4.4)를 보았으며, 각각의 경우 무효전력 보상량에 대한 최대 부하전력의 증분을 보여주는 것이 그림 4.6, 4.7이다. 그림 중 네모 칸안에 숫자가 의미하는 바는 AP<sub>최대</sub> / AQ<sub>보상</sub> 이다. 발전기 제약을 주지않은 25모선의 경우, 가장 먼저 붕괴되는 모선이 13번 모선이며 이 모선과 연결된 모선인 3번, 9번모선에 같은 방법으로 무효전력을 보상해 본 결과, 13번 모선의 최대전력의 증분이 얼마인가(그림 4.8)를 식별하였다.

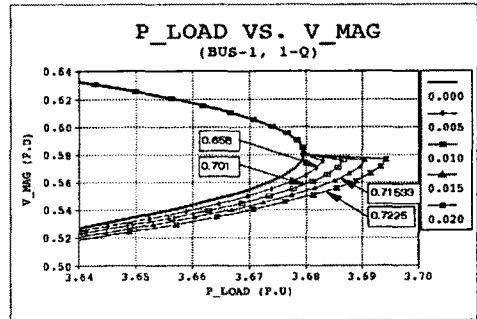


그림 4.4 1번 모선에 보상한 경우 1번 P-V 곡선의 변화 (5모선 계통)

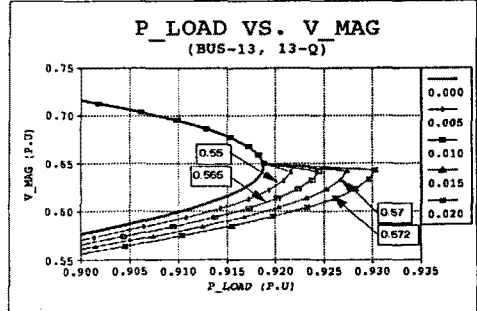


그림 4.5 13번 모선에 보상한 경우 13번 P-V곡선 변화 (25모선 계통)

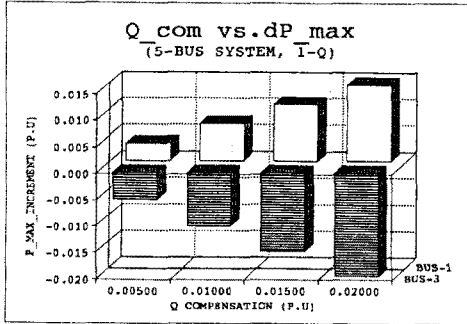


그림 4.6 1번 모선 보상량에 대한 1,3번 모선의 부하 최대전력 증분

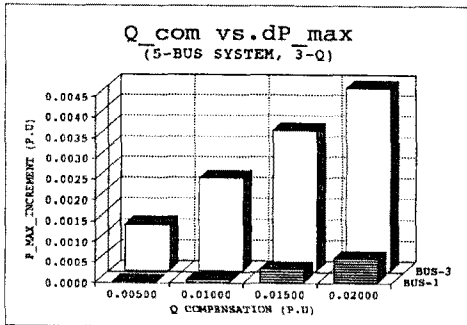


그림 4.7 3번 모선에 보상량에 대한 1,3번 모선의 부하 최대전력 증분

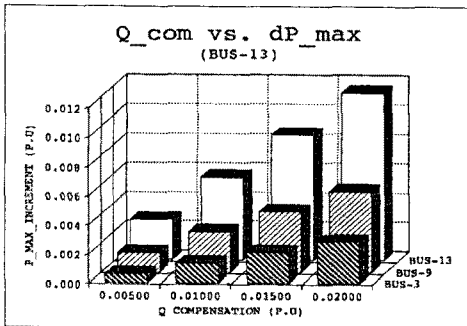


그림 4.8 3,9,13번 모선에 각각 보상할 경우 13번의 최대전력 증분

Q 보상량	투입모선 No. 1	3
0.005 [p.u]	0.65800	0.00000
0.010 [p.u]	0.70100	0.00600
0.015 [p.u]	0.71533	0.02133
0.020 [p.u]	0.72250	0.02850

표 4.1 무효전력 투입모선별 1번 모선의  $\Delta P_{MAX}/\Delta Q_{COM}$  (5모선계통)

이제까지의 그림에서 볼 수 있듯이 발전기 제약을 고려한 5모선 계통에서나 고려하지 않은 25모선 계통 모두에서 전압안정성이 가장 취약한 모선에 무효전력을 보상한 때가 연결된 다른 모선에 투입했을 때보다 단위보상량에 대한 최대전력증분이 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 5모선 계통에서 각 투입 부하모선별 단위 무효전력 보상량에 대한 부하 최대전력의 증분을 구한 결과 표 4.1이다. 또한 5모선 계통에서 두 번째로 붕괴되는 모선(3번 모선)에서 전압붕괴가 일어날 때까지 첫번째 붕괴모선인 1번 모선에 단계적으로 무효전력을 보상하여 두 모선이 동시에 전압붕괴가 일어날 때까지 보상하여 본 결과는 그림 4.9과 같다.

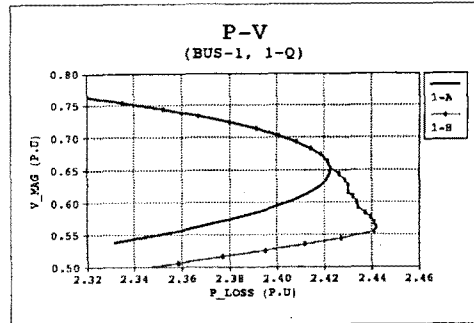


그림 4.9 3번모선 붕괴때까지 1번모선에 보상한 경우 PV 곡선변화

그림 4.9와 4.10에서 1-A 곡선은 보상 전의 곡선이며, 1-B 곡선은 보상 후, 1-Q는 1번 모선의 무효전력 보상량을 나타내는 곡선이다. 양 모선이 동시에 최대전력점에 도달할 때까지의 무효전력 보상량 0.125 [p.u]가 1번 모선의 3번 모선에 대한 무효전력 여유량을 의미한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 이미 발표된 바 있는 송전손실을 이용한 상태식별법을 이용하여 발전기 제약을 고려하지 않은 25모선 계통과 고려한 5모선 계통을 대상으로 무효전력 보상량과 보상모선을 달리하여 시뮬레이션하였으며 그 결과, 전압안정성이 가장 취약한 모선에 무효전력을 보상하는 것이 연결된 다른 모선에 보상하는 것보다 효과적임을 확인하였고, 무효전력 보상량에 대한 부하의 최대전력의 감도를 식별하여 붕괴로써 각 모선별 보상량에 대한 효과적인 보상량을 결정하는 데에 유용한 근거자료로 쓰일 수 있음을 보였다. 또한 첫번째 붕괴되는 모선에 무효전력을 투입하여 두번째 붕괴되는 모선이 생길 때까지 연속적으로 투입하여 본 결과, 그 때까지의 총 투입량은 그 모선에서 다음 번 붕괴 모선까지의 무효전력 여유량을 의미한다. 이 양은 모선별로 확보해 놓아야 할 무효전력 용량의 결정과 확보할 모선의 결정에 매우 유용한 자료로 쓰일 수 있다.

앞으로의 연구과제는 현 운전점에서의 무효전력 보상량에 대한 부하 전력 증분을 알아낼 수 있는 수식을 찾아내는 것이며, 또한 시뮬레이션 방법 면에서 선로정수 즉, Y-bus 행렬을 수정하는 방법으로 무효전력 보상장치의 투입을 시뮬레이션 함으로써 모선전압 변화에 따른 무효전력 발전량의 변화까지도 고려되도록 하는 것이다.

## 6. 참고문헌

- [1] J.Capentier, R.Girard & E.Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow", Proceeding of 8th PSCC, 1984.
- [2] H.Glavitsch & P.Kessel, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", 1985 PICA Conference Paper, 1985.
- [3] Y.Tamura, K.Iba, S.Iwamoto, "A Method for Finding Multiple Load-Flow Solution for General Power Systems", IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1980.
- [4] A.Tiranuchit, R.J.Thomas "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.1, pp 424-430. Feb.1988
- [5] O.Obadina, G.J.Berg, "Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.4, Nov. 1988.
- [6] B.Gao, G.K.Morison, P.Kundur, "Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.7, No.4, Nov. 1992.
- [7] Carson W.Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, Inc., 1994, pp.17-40.
- [8] B.M.Weedy, Electric Power Systems, John Wiley and Sons. pp.196-198, pp.325-329
- [9] 김용배, 김진중, 주진부, 김원경, 이상중, "손실감도를 이용한 전압붕괴 급진도 지표", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992.7.
- [10] 장동훈, 김정훈, 심진보, 이봉용, "송전손실 상태식별법 의한 정태 전압안정성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992.7.