

무효전력기기 위치 선정을 위한 계통 손실 평가 지수에 대한 연구

이 송근, 손 광명, 박 종근
서울대학교 전기공학부

Indices of the system loss for locating the reactive power devices

Song-Keun Lee Kwang-Myoung Son Jong-Keun Park
Seoul National University

Abstract : In order to improve the voltage profile of the system we introduce the reactive power devices. However, it is difficult to know which bus will be the most effective bus when we inject the reactive power supplier in it. This paper systematically determines indices of the system in order to locate reactive power devices in a power system. To prove the validity and effectiveness of the system we apply the proposed method to the 9 bus system.

1. 서론

계통의 부하의 증가가 한곳으로 집중되던가 아니면 전체적인 계통의 부하가 증가하게 되면 계통을 더 건설하여야 한다. 그러나, 넘비현상등으로 계통을 확대하기에 어려움이 다르므로 계통의 효율을 높이는 연구가 필요하게 된다. 이러한 점에서 무효 전력 기기의 투입은 적으나마 당장에 필요한 부분은 해결하여 줄 수 있다. 그러나, 어느 모선에 얼마 만큼의 무효 전력 기기를 설치하여야 하는지를 결정하는 것은 복잡하고 어려운 문제이다. 전력 계통에 무효 전력 기기의 위치 선정시 전압 특성에의 영향, 계통 손실, 투자비등등을 고려하여야 한다. 이는 무효 전력 기기를 설치하였을때 각모선에서 전 계통에 미치는 영향이 다르기 때문인데 위치 선정을 위한 평가 함수의 도입으로 위치 선정의 의사를 결정하는데에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 무효 전력 기기의 설치 목적은 선택된 모선의 전압을 원하는 레벨로 유지하기 위한 최소량의 무효 전력 기기를 투입하는 것이다. 무효 전력 기기 위치 선정의 일반적인 접근 방법은 공학적인 개념으로 미리 후보 모선을 정해놓고 모선의 수를 줄여 가는 동시에 설치해야 되는 무효 전력 기기의 수를 최소화 시켜가는 것이다. Venkataramana^[1] 는 민감도 함수를 이용하여 계통에 무효전력원의 위치 설정문제를 해결하였다. Savulescu^[2]는 계통의 흐름에 중점을 두어 계산을 하였다. 위의 논문들에서는 계

통 손실지수를 계산하는데에 있어서 복잡한 식을 사용하였으나 본 논문에서는 해석적인 방법으로 위치 선정 평가 지수를 도입하여 무효 전력 기기의 위치를 선정하는 문제를 해결하였다. 선정 지수는 자코비안(Jacobian) 행렬과 손실 계산식으로부터 얻을 수 있다. 제안된 식을 9모선 계통에 적용하여 무효 전력 기기의 설치를 위한 위치 판정을 효율적으로 할 수 있음을 보였다.

2. 평가 지수

지금까지 널리 알려져 있는 평가 지수는 정상 상태 안정도 지수, 전압 특성 지수, 손실 지수 등등 여러 지수가 존재하는데 본 장에서는 각각의 지수에 대하여 알아본 후 본 논문에서 제안하는 계통 손실 지수 산출 방법을 나타내었다.

2.1 정상 상태 안정도 지수^{[1][2][3]}

안정도 한계와 그에 해당하는 여유분, 운전 조건의 변화는 다음 조건들의 조합으로 이루어 진다.

- 1) 계통에서 어느 모선의 부하량 혹은 발전량의 증가
- 2) 모선 사이에서의 발전량의 재 분배
- 3) 계통에서 특정한 모선의 전압의 강하

정상 상태의 안정도는 조류 계산식에서 유출해 낼 수 있다. 변화된 계통에서의 안정도는 Newton 방법의 조류 계산에서 얻어진 Jacobian행렬의 행렬식(determinant)로 알 수 있다. 만약 새로운 운전 점의 행렬식의 부호가 기존의 행렬식의 부호와 다르면 계통이 불안정하게 되고 부호가 계속 유지되면 계통은 안정하게 된다.

dQ/dV도 안정도에 대한 정보를 제공한다. 여기서는dQ/dV가 영점을 지니게 되면 불안정하게 된다.

2.2 전압 특성 지수¹¹⁾

무효 전력제어의 첫번째 목적은 전압 특성 제어이다. 변화된 전압을 무효전력의 변화량으로 표현하면 다음과 같다.

$$[\Delta V] = [\delta Q / \delta V]^{-1} [\Delta Q] \quad (1)$$

여기서, 부하 모선만을 뽑아 보면 $[\Delta V_L] = [J_V][\Delta Q_L]$ 이된다.

무효 전력 기기의 위치는 계통에 가장 많은 영향을 미칠 수 있는 모선을 선택하여야 한다. 그러므로

$$\text{전압 특성 지수} = (\text{NORM})_i - (\sigma) \quad (2)$$

여기서 (NORM)_i는 [J_V]행렬에서의 i열의 크기

(σ)는 i열의 표준 편차를 나타낸다.

2.3 계통 손실 지수

본 논문에서 제안하는 지수는 계통 손실 지수이다. 손실에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\Delta P_L] = [\delta P_L / \delta a][\Delta a] + [\delta P_L / \delta V][\Delta V] \quad (3)$$

여기서, a는 모선 전압의 위상각

V는 모선 전압의 크기

아래 첨자 L 은 손실을 나타낸다.

조류계산식으로부터

$$[\Delta P \ \Delta Q]^T = [J][\Delta a \ \Delta V]^T \quad (4)$$

$$\text{로 부터 } [\Delta a \ \Delta V]^T = [J]^{-1} [\Delta P \ \Delta Q]^T \quad (5)$$

$$[\Delta P_L] = [L][J]^{-1} [\Delta P \ \Delta Q]^T \quad (6)$$

여기서 [L] = [δP_L/δa δP_L/δV]이고 구하는 식은 부록에 나타나 있다.

식 6은 계통의 유효 전력과 무효 전력의 변화가 계통의 손실에 미치는 영향을 나타낸다.

무효 전력 기기를 설치함으로써 무효 전력의 변화량은 발생하지만 유효 전력은 일정하게 유지한다고 가정할 하면, [ΔP]는 영행렬이 된다. 그러므로,

$$[\Delta P_L] = [L_{11} \times F + L_{12} \times H][\Delta Q] \quad (7)$$

이 된다. 식 7의 의미는 계통 무효 전력의 변화가 계통의 손실에 미치는 영향을 나타내고 있다.

손실 평가 지수는 i모선에만 1의 무효 전력량이 변화하고 나머지의 모선은 변화량은 0이라 하면 i모선의 무효 전력량의 변화에 의한 계통의 손실은 [L₁₁×F + L₁₂×H]행렬의 i번째의 열을 다 더한 것과 같다. 그러므로

$$\text{계통 평가 지수}_i = 1 / \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (8)$$

여기서 K = [L₁₁×F + L₁₂×H]이다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 계통 손실 평가 지수를 9모선 계통에 적용하여 그 유용성을 알아 보았다. 9모선의 계통도는 그림 1과 같다.

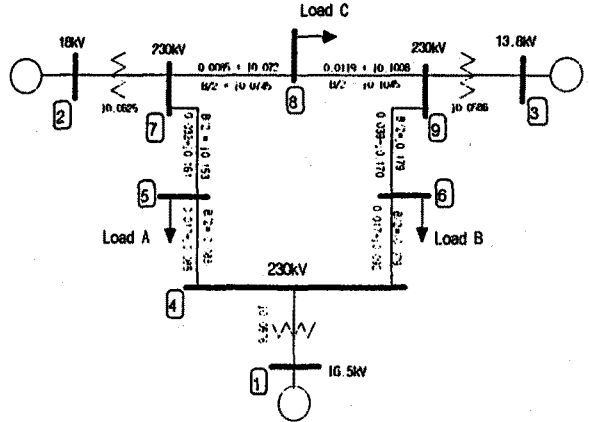


그림 1. 9모선 계통도

표 1은 9모선 계통의 부하가 정상상태, 과부하, 경부하 일때의 조류계산의 결과를 보여준다.

표 1. 9모선 계통에 대한 손실지수와 모선 전압의 크기

모선 번호	모선 전압	계통 손실 지수
1	1.0410	***
2	1.0250	***
3	1.0250	***
4	1.0266	0.1603
5	0.9962	0.6324
6	1.0132	0.0399
7	1.0259	0.1816
8	1.0160	0.2197
9	1.0325	0.0578

계통이 표 1.의 모선 전압을 가질때 계통의 손실은 0.0464p.u이다.

모선 4-9까지의 각각의 모선에 무효전력원을 투입하여 계통의 변화하는 모양을 살펴 보면 표 2.와 같다.

표 2. 무효전력원을 투입하였을때의 각모선의 반응

	4	5	6	7	8	9
4	1.0351	1.0332	1.0329	1.0285	1.0285	1.0283
5	1.0028	1.0140	1.0014	1.0008	0.9998	0.9983
6	1.0197	1.0185	1.0311	1.0154	1.0163	1.0175
7	1.0278	1.0304	1.0280	1.0345	1.0320	1.0282
8	1.0179	1.0196	1.0190	1.0222	1.0301	1.0209
9	1.0342	1.0345	1.0366	1.0348	1.0374	1.0406
계통 손실	0.0463	0.0453	0.0462	0.0458	0.0456	0.0461

표 2.의 첫번째 행은 무효 전력원이 설치되는 모선 번호를 나타내고, 두번째 행은 무효 전력원을 설치하였을때의 각 모선 전압의 크기를 나타낸다.

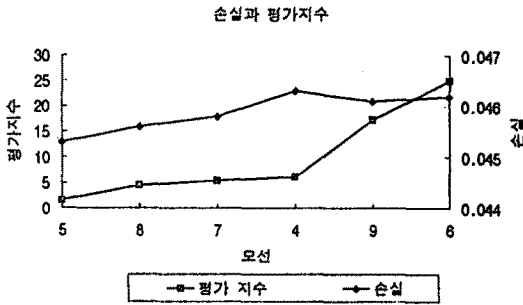


그림 2. 손실과 평가지수의 비교

위의 결과로 알수 있는 것은 모든 모선은 손실 평가 지수의 순위와 손실 크기의 순위가 일치하는데 4번 모선만은 일치하지 않고 있음을 알수 있다.

4. 결과

우선적으로, 계통의 평가 지수들에 대하여 살펴 보았다. 그리고 본 논문에서는 계통 손실 평가 지수 산출 방법을 제안하였다. 이 방법은 간단히 자코비안 행렬과 손실 행렬의 곱으로 얻을 수 있다. 그리고, 평가지수와 손실의 분석을 하였다. 제안한 방법은 빠른 시간내에 계산이 필요할 경우 매우 적절히 사용할 수 있을 것으로 본다. 제안한 방법을 9모선의 계통에 적용하여 그 유효성을 증명하였다.

향후의 연구는 평가 지수들의 더 세심한 분석을 행하는 것이 필요하고, 대규모 계통에의 응용이 필요하다.

부록

손실 조류 계산은 다음과 같다.

$$S_{Loss i} = \sum_{j=1}^n V_i(V_i - V_j)Y_{ij} \quad (A1)$$

식 A1은 모선 i에 생기는 모든 손실을 고려한 식이다. 이식을 유효전력손실과 무효전력 손실로 구분하면 식 A2와 같아진다.

$$S_{Loss i} = P_{Loss i} + jQ_{Loss i} \quad (A2)$$

$$\text{여기서 } P_{Loss i} = \sum_{j=1}^n P_{Loss ij} \cdot Q_{Loss i} = \sum_{j=1}^n Q_{Loss ij}$$

이고 각각의 P_{ij} 는 식A3과 A4와 같이 얻을 수 있다.

$$P_{ij} = V_i \{g_{ij}[V_i \cdot \cos(2a_i) - V_j \cdot \cos(a_i + a_j)] - b_{ij}[V_i \cdot \sin(2a_i) - V_j \cdot \sin(a_i + a_j)]\} \quad (A3)$$

무효전력 손실과 유효전력 손실이 각도와 전압의 크기에 대한 민감도를 계산하면 식 A5-A12와 같다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial a_i} = \sum_{j=1}^n \{V_i \cdot g_{ij}[-2V_i \cdot \sin(2a_i) + V_j \cdot \sin(a_i + a_j)] - V_i \cdot b_{ij}[2V_i \cdot \cos(2a_i) - V_j \cdot \cos(a_i + a_j)]\} \quad (A5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial a_k} = V_i \cdot V_k [g_{ij} \cdot \sin(a_i + a_j) + b_{ij} \cdot \cos(a_i + a_j)] \quad (A6)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^n \{2V_i \cdot (g_{ij} \cdot \cos(2a_i) - b_{ij} \cdot \sin(2a_i)) - V_i \cdot [g_{ij} \cdot \cos(a_i + a_j) - b_{ij} \cdot \sin(a_i + a_j)]\} \quad (A7)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_k} = -V_i \cdot g_{ij} \cdot \cos(a_i + a_k) + V_i \cdot b_{ik} \cdot \sin(a_i + a_k) \quad (A8)$$

식 A5에서 A12의 식을 다시 정리하여 쓰면 식 A13과 같이 된다.

$$L = \left[\frac{\partial P_{Loss}}{\partial a} \quad \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V} \right] \quad (A9)$$

식 A13은 조류계산식의 자코비안 행렬과 유사한 형태의 식으로 손실 흐름에 관한 식이다.

참고 문헌

- 1) A. Venkataramana, J.Carr, R.S.Ramshaw "Optimal Reactive Power Allocation" IEEE Tran. on PS Vol. PWRs-2 Feb. 1987, pp138-144
- 2) S.C. Savulescu "Qualitative Indices For The System Voltage And Reactive Power Control" IEEE Tran. on PAS Vol. PAS-95 July/Aug. 1
- 3) V.A. Venikov, V.A.Stroev, V.I.Idelchick, V.I.Tarasov "Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations" IEEE Tran. on PAS Vol. PAS-94 May/June 1975, pp 1034-1041