

배전계통의 부하 변동에 따른 전압안정도 지표 성능 분석

이용석, 고준환, 정재성
아주대학교 전자공학과

starwalker@ajou.ac.kr, jhkoh2000@ajou.ac.kr, jjung@ajou.ac.kr

Analysis of Voltage Stability Indices for Load Variation in Distribution System

Lee Yongseok, Koh Junhwan, Jung Jaesung
Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요 약

기술의 발전과 더불어 전력 소비량의 증가는 전력 계통의 안정성을 위협한다. 이에 따라 전력 계통의 신뢰도 있는 운영을 위한 전압안정도 분석의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 본 논문은 전압안정도 분석 방법 중 Continuation Power Flow(CPF)와 다수의 전압 안정도 지표를 비교함으로써 지표의 성능을 분석한다. 이를 위해 Line, Bus, Jacobian matrix 기반 VSI 를 간략하게 설명한다. 다음으로 앞서 설명한 VSI 를 CPF 에 의해 도출된 P-V 곡선과 비교함으로써 전압안정도 지표의 성능을 분석하고 이에 따라 VSI 의 활용 방향성을 제안한다.

I. 서 론

최근 전력 계통은 지속적인 부하 소비량 증가와 복잡한 계통 상황으로 인해 한계 지점에서 운영되고 있다. 이로 인해 송·변전 설비의 확장이 필요하지만, 경제적인 문제와 추가 설비 증설의 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 계통의 안정성 평가 및 전압 붕괴 방지를 위한 사전적 조치의 필요성이 중요해지고 있다. [1]

전압안정도를 분석하는 방법으로 P-V 곡선과 전압안정도 지표가 많이 사용된다. P-V 곡선은 전압 붕괴 지점의 정보를 제공하며, 이에 대한 Voltage Stability Margin(VSM)을 계산할 수 있다. P-V 곡선을 도출하기 위한 Continuation Power Flow(CPF)는 정확하지만 계산량이 많다는 단점을 가지고 있다. 전압안정도 지표는 전압 불안정에 대한 수치적인 근사치를 제시하고 취약한 모선 및 선로를 식별할 수 있다. 이러한 지표들은 시스템 변수 기반 지표와 자코비안 행렬 기반 지표로 분류된다. [2] 이러한 전압안정도 지표는 계산량이 적어 연산에 필요한 시간이 적게 소요되는 장점이 있지만 개발된 지표에 따라 전압 불안정을 감지하는 정도가 모두 다르다. 따라서 본 논문은 CPF 로 도출된 P-V 곡선상의 해와 전압 안정도 지표 값을 비교하여 지표의 성능을 분석하고 전압안정도 분석에 대한 지표 활용 방향성을 제시한다.

II. Voltage Stability indices

본 논문에서는 CPF 를 통해 도출된 P-V 곡선을 기반으로 전압안정도 지표의 정확도를 분석해 보고자 한다. 따라서 해당 절에서는 성능 분석을 위해 사용되는 전압안정도 지표들을 소개하고자 한다.

1. Fast Voltage Stability Index (FVSI)

FVSI 은 전압안정도를 분석하기 위해서 모선 사이의 라인을 기반으로 개발된 전압안정도 지표이다. 이는 2

모선 사이의 전압에 대한 2 차 전압방정식을 구성하여 이에 대한 판별식의 해가 존재한다는 가정하에 개발되었다. FVSI 는 Admittance 의 영향을 고려하지 않았으며, 모선간 전압의 위상차가 0 이라는 가정하였다. FVSI 의 수치가 1 에 가까울수록 해당 라인이 불안정하다는 것을 뜻한다. FVSI 의 수식은 다음과 같다.

$$FVSI = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i X} \quad (1)$$

2. Improved Voltage Stability Index (IVSI)

IVSI 는 전압안정도를 분석하기 위해서 모선을 기반으로 개발된 전압안정도 지표이다. 전력 조류 해석 방정식과 계통 내의 여러가지 파라미터를 고려하여 개발된 전압안정도 지표이다. 이는 Radial, Meshed 형태의 계통 모두 전압안정도 분석이 가능하다. 또한 해당 지표는 다른 모선 기반의 전압안정도 지표에 비해 많은 파라미터를 고려하고 있다. IVSI 의 값이 1 에 가까우면 해당 모선의 불안정을 나타내고 있다. IVSI 의 수식은 다음과 같다.

$$IVSI = \frac{-4 \sum_{j=0}^n (G_{ij} - B_{ij})(P_i + Q_i)}{(\sum_{j=0}^n |V_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + \sin \delta_{ij}) - B_{ij} (\cos \delta_{ij} - \sin \delta_{ij}))^2} \quad (2)$$

3. P-index

P-index 는 앞서 설명한 두개의 시스템 변수 기반 전압안정도 지표와 다르게 자코비안 행렬을 기반으로 개발된 전압안정도 지표이다. 해당 지표는 부하의 유효전력의 변화에 따른 전압의 변화 및 등가 부하 어드미턴스의 변화에 대한 수식을 기반으로 개발된 지표이다. 해당 지표의 값이 1 에 가까울수록 불안정을 나타낸다. 해당 지표의 수식은 다음과 같다.

$$P_{index} = \frac{\frac{P_{Lj} dV_j}{V_j dP_{Lj}}}{1 - 2 \frac{P_{Lj} dV_j}{V_j dP_{Lj}}} \quad (3)$$

III. Test System

전압안정도 지표 분석을 시뮬레이션하기 위한 Test system 은 148 모선의 배전계통 모델이다. 해당 Test System 은 148 개의 모선, 167 개의 Branch 로 구성되어 있으며, 부하의 총 유효전력 및 무효전력은 44.43MW, 21.51MVAR 이다. 그림 1 은 148 배전계통의 모식도이다.

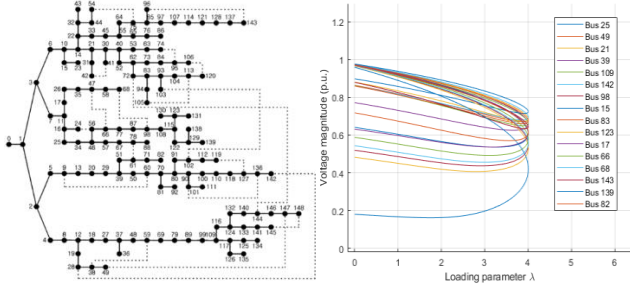


그림 1. 148 Distribution Test System(좌), 그림 2. 각 모선별 P-V 곡선(우)

그림 2는 CPF 를 통해 도출된 특정 모선의 P-V 곡선을 나타낸다. 각 모선의 부하의 증가에 따른 전압값을 나타내며, 특히 139 번 모선의 경우 전압 강하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

IV. Simulation 결과

본 절에서는 P-V 곡선상의 임계점에서의 데이터를 기반으로 전압안정도 지표의 값으로 계산한 결과를 분석한다.

Bus (Line)	Initial Power Flow			Critical Point		
	FVSI	IVSI	P-index	FVSI	IVSI	P-index
15 (10-15)	0.004	0.003	0.052	0.050	0.012	0.888
17 (11-17)	0.263	0.005	0.054	1.784	0.027	1.342
21 (14-21)	0.001	0.002	0.061	0.003	0.005	1.324
25 (16-25)	0.002	0.001	0.057	0.001	0.003	1.497
66 (56-66)	0.208	0.003	0.06	0.382	0.011	1.922
68 (58-68)	0.078	0.01	0.062	0.445	0.034	2.434
82 (71-82)	0.162	0.065	0.058	1.926	0.895	1.522
83 (72-83)	0.005	0.001	0.06	0.033	0.003	1.132
109 (99-109)	0.005	0.001	0.061	0.033	0.001	1.445
123 (115-123)	0.022	0.002	0.065	0.111	0.022	3.562
139 (129-139)	0.175	0.047	0.073	3.780	1.020	12.49
142 (28-142)	0.001	0.001	0.054	0.041	0.065	1.015

표 1 전압안정도 지표값

(초기 전력 조류 해석 및 P-V 곡선상 임계점)

위의 테이블은 Test System 에서 Base case 에 대한 초기 전력 조류 해석의 데이터를 기반으로 지표의 값을 계산한 결과와 P-V 곡선상의 임계점에서의 데이터를 기반으로 지표의 값을 계산한 결과이다. 모든 모선의 P-V 곡선상의 임계점에서는 전압 붕괴에 가까운 값으로 볼 수 있으며, 임계점에서의 데이터를 전압안정도의 지표의 값으로 계산하면 모든 모선이 모두 1 에 근사하거나 큰 값을 나타내야 한다. 표 1 의 결과를 보면 시스템 변수 기반 전압안정도 지표(라인 및 모선 기반) 특정 모선 및 라인에서만 1 과 근사하거나 1 보다 큰 수치를 보이고 있다. 이러한 모선 및 라인의 경우 취약한 모선 및 라인이다. 실제로 139 번 모선 및 해당 모선에 연결된 129-139 라인의 경우 전압안정도 지표로써 높은 값을

보이고 있고 실제 P-V 곡선상에서 139 번 모선은 부하 증가에 따른 전압 강하의 비율이 큰 것을 확인할 수 있다. 다음으로 자코비안 행렬 기반 전압안정도 지표의 결과를 보면 P-index 의 값이 모두 불안정을 나타내는 수치인 1 과 근사하거나 이보다 큰 수치를 보이고 있다. 또한 P-index 는 계통의 운전 상태에 따른 불안정 상태를 나타낼 수 있다. 그림 3 의 결과를 보면 부하의 변동에 따른 P-index 의 변화를 확인할 수 있다. 이와 같이 P-index 는 전압 모니터링에 활용이 가능하다.

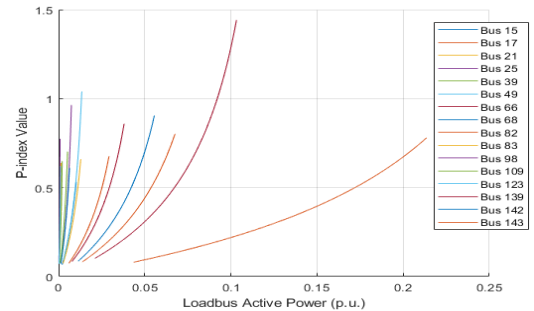


그림 3 부하의 유효전력 변화에 따른 P-index 의 변화

V. 결론

본 논문은 CPF 를 통해 도출된 P-V 곡선과 전압안정도 지표를 비교 및 성능 분석을 통해 시스템 변수 기반 지표와 자코비안 행렬 기반 지표의 활용 방향성을 제시하였다. 시스템 변수 기반 지표의 경우 취약 모선 및 선로에 대한 정보를 제시함으로써 계통의 불안정 요소를 파악하는 데 사용이 가능하다. 이와 다르게 자코비안 행렬 기반 지표 중 P-index 의 경우 부하 변동에 따른 모든 모선의 불안정 상태를 수치적으로 나타냄으로써 전압 모니터링의 활용이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2022 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO.20228530050030)

참 고 문 헌

- [1] Power system stability and control, Mcgraw-hill, 1994, p27
- [2] Salama, Hossam S., and István Vokony. "Voltage stability indices-A comparison and a review." Computers & Electrical Engineering 98 (2022): 107743.
- [3] Musirin, Ismail, and TK Abdul Rahman. "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system." *Student conference on research and development*. IEEE, 2002.
- [4] Yang, Chien-Feng, et al. "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 37.1 (2012): 50-57.
- [5] Kamel, Mariana, Abdelrahman A. Karrar, and Ahmed H. Eltom. "Development and application of a new voltage stability index for on-line monitoring and shedding." *IEEE Transactions on power systems* 33.2 (2017): 1231-1241.