

전압안정도를 고려한 연속선형계획법 기반 최적조류계산

배승철*, 신용선, 이병준
고려대학교 전기공학과, 전력시스템기술연구소

Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow based on Successive Linear Programming

Seung-Chul Bae*, Yong-Son Shin, Byongjun Lee
Department of Electrical Engineering, Korea University, KPSRC

Abstract - This paper presents VSCOPF(Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow) algorithm based on SLP(Successive Linear Programming) to interpret the large scale system. Voltage stability index used to this paper is L index to be presented by function form. The objective function consists of load shedding cost minimization. Voltage stability indicator constraint was incorporated in traditional OPF formulation, as well as the objective function and constraints are linearized and the optimal problem is performed by SLP(Successive Linear Programming). In this paper, the effect of voltage stability limit constraint is showed in the optimal load curtailment problems. As a result, an optimal solution is calculated to minimize load shedding cost guaranteeing voltage security level. Numerical examples using IEEE 39-bus system is also presented to illustrate the capabilities of the proposed formulation.

1. 서 론

현재 우리나라의 전력산업은 지속적인 부하성장과 더불어 구조개편이라는 큰 변화의 시기에 직면해 있다. 이러한 전력산업의 구조개편은 전력계통의 기본적인 운용패턴을 안정성보다는 경제성에 치중할 수밖에 없도록 만들며, 이는 필연적으로 전력계통의 안정성을 저해하는 요소로 작용하고 있다. 향후 우리나라 전력계통의 지속적인 부하성장과 이로 인한 계통규모의 확대 및 전력산업 구조개편을 염두에 둘 때 선진국에서 경험한 여러 가지 계통안정성과 관련된 문제점들이 증폭될 개연성이 아주 높다고 할 수 있다. 따라서 현재의 구조개편의 상황에서 안정성의 확보와 경제성의 추구는 동시에 필요하다.

여러나라에서 구조개편이 이루어지면서 안정도를 고려한 최적조류계산의 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 특히, 참고문헌[3]에서는, 전압안정도 제약을 추가하기 위한 L지수 제약을 포함한, NLP 기반 VSCOPF (Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow) 알고리즘을 제안하고 있다. 최적조류계산 내부에 전압안정도를 고려하기 위해서는 전압안정도 지수가 함수형태로 표현되어야 하며 전압안정도 여유에 대한 한계값을 지정할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 대표적인 전압안정도 지수로는 L지수[2], Z[1]지수가 있다. 특히 L지수[2]는 실제계통의 온라인 계통감시에도 실제 사용되어지고 있는 상당히 신뢰성이 좋은 지수로 알려져 있다.

또한 참고문헌[3]에서는, 비선형 최적조류계산 문제를 풀기 위한 비선형 내점법[5]을 적용하고 있다. 이러한 비선형 내점법은 상당히 정확한 해를 얻을 수 있고 고속인 반면에 수식이 복잡해짐에 따라 수렴이 안 되는 경우가 발생되기 때문에 대규모 계통을 해석하는 데에는 적합하지 못하다. 이에 반해, 연속선형계획법[4](Successive Linear Programming)은 최적조류계

산 문제의 목적함수와 제약조건을 선형화해서 선형계획법 문제로서 정식화하여 풀지만, 선형화를 해서 얻은 해는 실제의 해와 상당한 오차가 있기 때문에 이를 연속선형계획법(Successive Linear Programming)[4]이라는 기법에 의해 비선형 최적화 문제를 푸는 방법이다. 선형계획법은 반드시 유한회의 단계를 거쳐 해에 도달하고 대부분의 비선형계획법에서 안정성있게 다루기 힘든 부등식 제약을 특별한 파라미터의 조정없이 용이하게 다룰 수 있으므로 대규모 계통으로의 적용에 대해 해의 수렴에 안정성이 높고 계산속도 또한 빠르다. 이에 본 논문에서는 대규모 계통해석을 위한 전압안정도를 고려하기 위하여 L제약을 포함한 SLP 기반 최적조류계산 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. VSCOPF

지금까지 많은 연구자들에 의해 계통상태의 전압안정도 한계점과의 Proximity를 효율적으로 계산하여 지수로서 표현하는 방법이 개발되었다.[1-2] 참고문헌[2]에서 P.Kessel은 현재의 계통상태와 전압안정도 한계점과의 "여유"를 0부터 1사이의 정규화된 실수값으로 표현되는 전압불안정 감시지수인 L-indicator를 개발하였다. 이 지수는 모든 부하모션에서 계산이 가능하며 하나의 부하단면 정보만으로 각각의 부하모션에서 다른 지역의 부하 및 원거리 발전단의 전압을 반영한 전압안정도 정보로서 함수형태로 표현가능하기 때문에 최적화문제 내부에 정식화가 가능하다. 본 논문에서는 이 지수를 최적 조류계산의 제약으로 정식화 내부에서 고려함으로써 필요한 만큼의 "안정도 여유"를 운전제약으로 고려하여 전압안정도를 고려한 최적조류계산 모델로 제안하고 있다.

2.1 VSCOPF 정식화

■ 목적함수

본 연구에서의 목적함수는 부하차단비용의 최소화로 선택하였다.

$$MIN \rho P_L$$

여기에서 ρP_L 는 benefit function을 나타낸다. 본 연구에서의 전압안정도 제약을 고려한 최적조류계산의 제어변수는 부하차단(P_L)이 이용되고 있다.

■ 제약조건

최적조류계산 모듈의 제약조건은 최적조류계산에 일반적으로 이용되는 제약조건을 포함하며 또한 사고 후 전압안정도 여유 향상 및 유지를 나타내는 L지수로 표현되는 제약을 포함하고 있다. 이에 대한 구체적인 정식을 소개한다.

□ 등식제약

먼저 등식제약으로서 전력조류 방정식은 다음과 같다

$$P_{G_i} - P_{L_i} - |\bar{V}_i|^2 \sum_{j=1}^N |\bar{V}_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2.1)$$

$$Q_{G_i} - Q_{L_i} - |\bar{V}_i|^2 \sum_{j=1}^N |\bar{V}_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (2.2)$$

위 식은 i 모선의 전력조류 방정식을 나타내며, 계통이 n 모선이라고 했을 때 n 개의 유효전력조류 및 무효전력조류 방정식이 존재하게 된다.

■ 위상각 제약

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_{i0} + \Delta\delta_i \leq \delta_i^{\max}, i \in N_L + N_G \quad (2.3)$$

■ 전압 제약

$$V_i^{\min} \leq V_{i0} + \Delta V_i \leq V_i^{\max}, i \in N_L + N_G \quad (2.4)$$

■ 발전기 유효전력 제약

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi0} + \Delta P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i \in N_G \quad (2.5)$$

■ 부하모선 유효전력 제약

$$P_{Li}^{\min} \leq P_{Li0} + \Delta P_{Li} \leq P_{Li}^{\max}, i \in N_G \quad (2.6)$$

■ L 제약

$$L_j \leq L_j^{\max} \quad (2.7)$$

위 L지수 제약은 전압안정도 제약으로서 상한제약만 고려하였으며 부하모선 수에 해당하는 N_L 개의 제약을 나타낸다.

2.2 L지수

VSCOPF 정식화에서 L제약식으로 표현되고 있는 L_j 는 아래와 같이 표현된다.

$$L_j = \text{MAX} \left| 1 - \frac{\sum_{i \in N_G} F_{ij} \bar{V}_i}{V_j} \right| \quad (i \neq j) \quad (2.8)$$

위의 정식화에서 식 (2.7)에 해당하는 부분이 L-indicator로서 상한값을 가지도록 하고 있다. L-indicator는 최적조류계산의 정식화 내부에서 식 (2.8)로 표현되는 함수제약이다. 식 (2.8)에서 α_G 는 발전기모선의 집합이고, F_{ij} 는 다음 식 (2.9)로 구해지는 하이브리드 행렬의 ij -번째 요소이다. 행렬 $[Y_{LL}]$ 과 $[Y_{LG}]$ 는 식 (2.10)과 같이 재배치된 모선 어드미턴스 행렬의 부분행렬이다.

$$[F] = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

L-indicator 제약의 가장 큰 장점은 전압안정도 여유에 대한 한계값을 지정할 수 있고, 조류단면에서 한번의 계산으로 구할 수 있는 점이다. L-indicator는 현재 운전점에 대한 정상상태 해석(조류계산)결과만으로 가까운 미래의 계통에 대한 전압안정도 정보를 알 수 있는 지수로서 결정론적인 해석이 가능하다는 장점이 있는 반면에 계산량이 많다는 단점이 있다. 식 (2.8)의 의미는 임의의 부하모선으로 사영된 발전기모선 전압들의 부분공간을 임의의 부하모선 평면에 사영시킨 값과 해당하는 부하모선의 전압과의 비로서, 태브난 등가전압과 유사하지만 엄밀하게는 같지 않은 개념이다. 이론적으로 전압안정도 한계점에서는 1의 값을 가지고 무부하상태에서는 0의 값을 가진다. 즉 숫자 1이란 부하모선의 전압을 안정화시켜 주기 위해 발전기모선의 전압이 존재해야 한다는 것을 의미한다. 공학적인 경험에 의하면 0.2에서 0.3 정도의 값을 유지하는 것이 무효전력의 공급균형을 유지하며 최소한의 안정도 여유를 가지는 상태라고 알려져 있다.

2.3 SLP에 기반한 VSCOPF 알고리즘

본 절에서는 SLP에 기반한 VSCOPF의 알고리즘에 대해 설명한다. SLP에 기반한 VSCOPF를 수행하기 앞서 CPF를 통하여 심각한 상정사고를 결정하고, 심각한 상정사고에 대해 P-V마진과 L지수를 계산한다. 여기서 P-V마진은 계통의 상대적인 값으로 표현하기 위해 P-V마진을 초기 총부하로 나눈 P-V normalized margine (PVNM)을 사용하였다. L제약을 부과할 모선의 결정은 가장 심각한 상정사고에 대해 전압안정도 여유가 가장 작은, 즉 PVNM이 가장 작고 그리고 L지수값이 가장 큰 모선으로 결정한다. SLP에 기반한 VSCOPF에서의 L제약을 부과할 모선의 결정은 VSCOPF 수행 초기에 조류계산을 수행해 함으로써 L지수를 계산하고 이때의 L지

수값이 가장 큰 모선에 적용되어 원하는 전압안정도 마진을 확보할 수 있는 적절한 L지수값을 L제약 한계값으로 설정한다. 이때의 전압안정도 한계값으로의 L지수값 기준마련에 대해서는 2.4절에서 설명하기로 한다. 다음으로 선형화된 목적함수와 제약조건을 구성하고 CPLEX를 통한 LP문제를 풀 다음 제어변수의 수렴판정을 통한 반복계산으로 OPF의 비선형 최적화문제를 풀기 위해 먼저 교류조류계산과 선형계획법(LP)을 순차적으로 수행하는 연속선형계획법을 사용하고 있다. 아래의 그림1은 SLP에 기반한 VSCOPF의 순서도를 나타내고 있다.

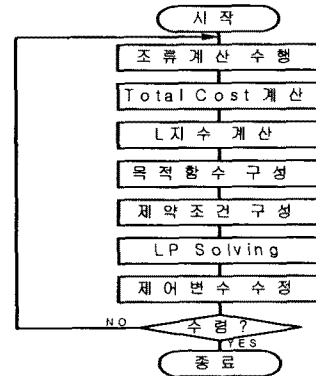


그림 1. VSCOPF의 순서도

2.4 전압안정도 한계값으로의 L지수값 기준 마련

각 상정사고마다 원하는 전압안정도 여유를 확보하기 위한 L지수값은 다르게 나타난다. 따라서 각 상정사고마다 전압안정도 한계값으로의 L지수값 기준마련이 필요하다. 본 절에서는 전압안정도 한계값의 설정에 있어 L지수값의 기준 마련을 위한 절차를 소개한다. 여기서 L지수 한계값은 WSCC 기준인 5%의 PV마진에 해당하는 값을 말한다.

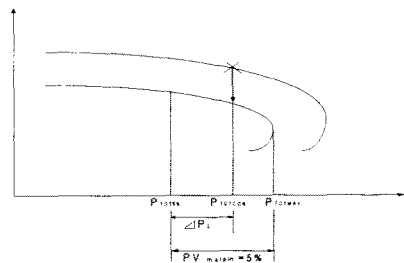


그림 2. 상정사고 전후 PV곡선

그림2에서의 P_{TOTMAX} , P_{TOTCON} , $P_{TOT5\%}$, ΔP_L 는 다음과 같다.

P_{TOTMAX} : 사고 후의 전압붕괴점에서의 총 부하량

P_{TOTCON} : 사고 후의 현재 총 부하량

$P_{TOT5\%}$: 사고 후의 PV마진이 5%가 되는 시점에서의 총 부하량

ΔP_L : 사고후 PV마진 5%를 확보하기 위한 부하차단량

■ L한계값 기준 마련을 위한 절차

상정사고시 마다 PV마진 5%확보를 위한 L지수값 산정 절차는 다음과 같다.

1. 상정사고시 PV마진과 L지수값(L_{CONT})을 계산한다.
2. 각 모선에서의 부하차단 비율을 구하기 위하여

L_{CONT} 값보다 작은 L 값을 임의로 선택하여 SLP기반 VSCOPF 수행 후 PV마진 5%대의 각 모선의 부하량을 산정한다.

$$P_{5\%} = P_{CONT} - \frac{\Delta P_{OPT}}{\Delta P_{TOTALOPT}} \times \Delta P_L$$

$$Q_{5\%} = Q_{CONT} - (P_{CONT} - P_{5\%}) \times \frac{Q_{CONT}}{P_{CONT}} = Q_{CONT} - \Delta P_L \times \frac{Q_{CONT}}{P_{CONT}}$$

$P_{5\%}$ = PV 마진 5%대의 각 모선의 부하량

$L_{5\%}$ = $P_{5\%}$ 에서의 L 지수값

P_{CONT} = 상정사고시의 각 모선의 부하량

P_{OPT} = L_{CONT} 보다 작은 임의의 L 한계값을 적용한

VSCOPF 수행후의 각 모선의 부하량

$\Delta P_{OPT} = P_{CONT} - P_{OPT}$: VSCOPF 수행후의 각 모선의 부하차단량

$\Delta P_{TOTALOPT} = \sum_{i \in N_L} \Delta P_{OPT}$: VSCOPF 수행후의 총 부하차단량

3. PV 마진 5%대의 $P_{5\%}$ 와 $Q_{5\%}$ 를 적용하여 조류계산을 수행한 후 $L_{5\%}$ 값을 마련한다.

4. $L_{5\%}$ 값을 L 계약값으로 설정하고 VSCOPF를 수행하여 최적부하차단량을 결정한다.

3. 사례연구

본 논문에서는 IEEE 39모선 계통에 대해 전압안정도 제약으로써 L 계약의 변화에 따른 부하차단량의 변화추이를 살펴보고 5%의 PV마진을 확보하기 위한 최적부하차단량을 계산하였다. 먼저 본 사례연구로 사용되는 IEEE 39모선 계통에 대해 소개하면 아래의 표1과 같다.

표1. IEEE 39모선 계통 정보

모선수	선로수	발전기 모선수	변압기 수	초기 총발전량	초기 총부하량
39개	48개	10개	13개	6,352 MW	6,311 MW

■ L 계약의 변화에 따른 부하차단량의 변화추이

본 연구에서 목적함수는 부하차단비용을 고려하였다. 아래의 식은 목적함수 표현식이다.

$$\text{목적함수} : \text{Min} \sum \beta_i \cdot P_{Li} \quad (2.13)$$

L 지수상한제약은 계통의 L 지수값을 계산 후 L 지수값이 가장 큰 모선에 적용시켰다. IEEE 39모선 계통에 대해 가장 심각한 상정사고로 결정된 28-29선로사고시 28번 모선에 L 제약을 적용하였으며, L 계약 상한은 28번 모선의 L 지수값인 0.326보다 조금 작은 0.32로 설정하고 0.01간격으로 L 계약 상한을 변화시켜가며 수행함으로써 L value, TOTAL COST의 변화를 알아보았다.

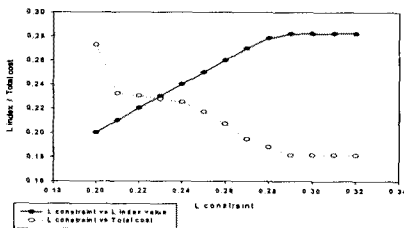


그림 3. L 계약에 따른 L 지수값과 TOTAL COST의 변화

그림 3에서 나타났듯이 L 계약이 0.28부터는 시스템이 L 계약의 한계 값으로 운전되고 있음을 알 수 있다. 또한, 계약에 맞춰 운전을 하기 위해 유효 전력 발전량과 부하차단량을 조절하기 때문에 그림 3에서처럼 Total Cost는

지속적인 증가 추세를 나타내고 있다. 특히 L 계약이 0.29부터는 부하차단이 이루어짐으로써 TOTAL COST 또한 증가하며 0.21이하의 값으로 계약을 가하면 많은 양의 부하차단이 이루어져 TOTAL COST가 급격하게 커짐을 알 수 있다.

■ IEEE 39모선 계통에 대한 최적부하차단

다음은 2.4절의 절차에 따라 IEEE 39모선 계통에 대한 5%의 PV마진에 대응하는 L 한계값을 산정하고 상정사고시 5%의 PV마진을 확보하기 위한 최적부하차단량을 결정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 중부하시에 발생하는 심각한 계통사고 이외에는 severe한 제약으로 나타날 가능성이 적으므로 본 논문에서는 부하량을 일정비율로 증가시켜 건전상태에서의 OPF 해에 대해 모든 상정사고에 대해서 안전한 전압안정도 여유를 운용한채로 제한하기 위한 L 한계값을 산정한다. 이를 위해 IEEE 39모선 계통은 아래와 같이 수정되어졌다.

- 초기발전량 : 7835.3 MW
- 초기 총부하량 : 7761.62 MW

표2는 본 논문의 사례연구로 사용되는 부등식계약으로 부하모선전압, 각 모선의 위상각 제약, 발전기 및 부하모선의 유효전력량 제약에 대해 정리하였다.

표2. 부등식 계약의 상한

부하모선 전압제약	위상각 제약
$0.95 \leq V_{Li} \leq 1.05$	$\delta_i - 0.2 \cdot \delta_{i-1} \leq \delta_i \leq \delta_i + 0.2 \cdot \delta_i$
P_G 제약	P_L 제약
$P_{G_i} - 0.5 \cdot P_{G_i} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i} + 0.3 \cdot P_{G_i}$	$P_{L_i} - 0.3 \cdot P_{L_i} \leq P_{L_i} \leq P_{L_i} + 0.3 \cdot P_{L_i}$

1. 연속조류계산을 통한 각 상정사고에 대해 PV마진이 5%이하가 되는 사고선로를 결정한다.

본 논문의 사례연구로 사용되고 있는 IEEE 39모선 시험 계통에 대해 PV마진 5%이하의 선로사고는 28-29선로사고로 결정되었으며, 이때의 L_{CONT} , PV마진, P_{MAX} , $P_{5\%}$, P_{CONT} , ΔP_L 의 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} L_{CONT} &= 0.4790 \\ PV \text{ Margin} &= 2.427\% \\ P_{MAX} &= 8058.39(\text{MW}) \\ P_{5\%} &= 7655.47(\text{MW}) \\ P_{CONT} &= 7862.83(\text{MW}) \\ \Delta P_L &= 207.36(\text{MW}) \end{aligned}$$

2. L_{CONT} 값보다 작은 임의의 L 값을 한계값으로 설정하고 SLP 기반 VSCOPF를 수행하여 PV마진 5%대의 부하량을 계산하여 이를 조류계산에 적용하여 수행함으로써 $L_{5\%}$ 값을 마련하였다. 이때의 $L_{5\%}$ 값은 아래와 같다.

$$L_{5\%} = 0.357$$

3. $L_{5\%}$ 값을 L 계약값으로 설정하고 VSCOPF를 수행하여 최적부하차단량을 결정한다. 표3은 28-29선로사고시 5%의 PV마진을 확보하기 위한 최적부하차단량을 나타내고 있다.

표 3. SLP 기반 VSCOPF 수행 후 각 모선의 부하차단량

BUS	부하차단량	
	P_L (MW)	Q_L (MVAR)
4	0.04	0.02
12	3.17	32.81
26	51.82	17.52
27	43.19	11.61
28	76.8	10.29

4. 결 론

위와 같이 5%의 PV마진을 확보하기 위한 L제약 한계값을 마련하여 SLP 기반 VSCOPF를 수행한 후 그때의 부하차단량만큼 부하차단을 하고 조류계산을 수행한 결과 정확히 5%의 PV 마진을 확보하였다. 또한 위의 VSCOPF 수행결과와 걱정성을 평가하기 위해 각 부하모선이 일정 비율로 부하차단 될 때 L지수가 가장 큰 모선인 28번 모선의 부하전압의 변화량과 각 모선의 부하변화량의 비를 Sensitivity로 사용하여 VSCOPF 수행 후의 부하차단량이 실제 최적부하차단량인지를 확인하였다.

본 논문에서 사용되는 각 부하모선에 대한 Sensitivity는 아래와 같이 정의된다.

$$Sensitivity_i = \frac{V_{28}}{\Delta P_{Li}}$$

표4는 각 부하모선에 대해 20%의 부하차단을 하였을 때 Sensitivity가 큰 모선번호의 순으로 나타내고 있으며, 여기서 $P_{L50\%}$ 는 각 부하모선 P_{Li} 의 50%에 해당하는 값을 말한다.

표 4. Sensitivity

BUS	$P_{L50\%}$ (MW)	$Q_{L50\%}$ (MVAR)	V_{28}	$P_{30\%}$ (MW)	sensitivity
28	212.27	28.44	0.9446	79.60	-0.000318
12	8.76	90.68	0.9283	3.29	-0.000274
26	143.23	48.43	0.9317	53.71	-0.000112
27	289.56	77.80	0.9337	108.59	-0.000083
15	329.74	157.66	0.9308	123.65	-0.000038
3	331.81	126.13	0.9305	124.43	-0.000034
18	162.82	30.91	0.9291	61.06	-0.000034
16	339.43	136.33	0.9305	127.29	-0.000033
24	318.00	95.01	0.9298	119.25	-0.000026
4	515.23	189.61	0.9309	193.21	-0.000025
25	230.82	48.64	0.9291	86.56	-0.000024
21	282.34	118.50	0.9292	105.88	-0.000021
7	240.92	86.56	0.9287	90.35	-0.000017
8	537.90	181.36	0.9299	201.71	-0.000016
23	255.04	87.18	0.9281	95.64	-0.000006
20	700.71	106.14	0.9278	262.77	-0.000001
29	292.14	130.77	0.9186	109.55	0.000125

5%의 PV마진을 확보하기 위한 $L_{5\%}$ 의 한계값이 적용되어졌으며 이러한 L제약을 만족시키기 위해서는 L지수 표현식에 의한 L제약이 걸린 부하모선의 전압은 필수적으로 증가되어야 하며 이는 부하차단으로써 부하전압을 증가시킬수 있다. 표4에서 보여지듯이 각 모선별 부하차단에 대하여 L제약모선으로 설정된 28번 모선의 전압에 가장 많은 영향을 미치는 28, 12, 26번 모선순으로 되어있다. 이는 VSCOPF 수행시 L제약을 만족시키기 위해 우선적으로 부하차단이 이루어질 모선을 의미한다. 표3의 부하차단량과 표4의 Sensitivity를 비교해 볼 때 본 논문에서 고려하는 각 모선별 부하차단량만큼-본 논문에서는 각 부하모선에 대하여 부하량의 30%이하로 부하차단이 시행되도록 되어져 있다.-Sensitivity가 큰 순서대로 4번 모선을 제외한 28-12-26-27번 모선에서 부하차단이 이루어지고 있으며, 표3에서는 4번 모선 또한 부하차단이 이루어지고 있는데 이는 4번 모선의 부하전압이 본 논문에서 고려되어지는 부하모선 전압제약으로 0.95[p.u]~1.05[p.u]내에 위치하도록 하기 위해 약간의 부하차단이 이루어지고 있는 것으로 사료된다.

전압 안정도 측면에서 가장 일반적으로 사용되는 전압 안정도 지수는 PV-곡선을 통한 유효전력 마진이다. 그러나 최적조류계산에서의 전압안정도 지수로서 유효전력 마진을 활용하는 데는 많은 어려움이 발생한다. 전력산업구조개편 이후 관심이 증가하고 있는 경제적인 전력공급에 관한 연구를 위해서는 최적조류계산이 선행되어야 한다. 그러므로 최적조류계산에서 적용 가능한 전압안정도 지수의 개발이 요구된다.

이에 본 논문에서는 전압안정도 지수로서 L지수의 사용 가능성과 최적조류계산에서 L지수의 구체적인 사용 방법을 소개하였다.

전압안정도 지수로서의 L지수 사용에 관해서는 기존의 많은 연구를 통해 타당성이 입증된 유효전력 마진과의 비교 분석을 통해 L지수의 전압안정도 지수로서의 사용 가능성을 확인하였으며 최적화 기법 중의 하나인 SLP(Successive Linear Programming)를 기반으로 OPF(Optimal Power Flow)를 구하는 과정에서 전압안정도 제약으로 L지수를 적용하기 위한 수학적, 구조적 방법 및 전체적인 알고리즘의 소개와 IEEE-39모선에 대한 사례연구를 통해 최적조류계산에서의 L지수 활용 가능성을 확인하였다. 또한 전압안정도 한계 값의 설정에 있어서 L지수 값의 기준 마련을 위한 절차를 마련하였으며 Sensitivity를 통한 VSCOPF 수행 후의 최적부하차단량과의 비교 해석을 함으로써 SLP 기반 VSCOPF의 활용 가능성을 확인하였다.

그러나 선로 용량 등의 다양한 제약을 추가하기 위한 연구 그리고 실제동 적용을 위한 연구가 계속 진행되어야 한다.

본 연구는 전력산업기반기금의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.M. Chebbo, M.R. Irving, M.J.H. Sterling, "Voltage collapse proximity indicator : behavior and implications", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 3, May, 1992, pp. 241-252.
- [2] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July, 1986, pp. 346-354.
- [3] S.Kim, T.-Y.Song, M.-H.Jeong, B.Lee, Y.-H.Moon, J.-Y. Namkung and G.Jang, "Development of Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow(VSCOPF)" Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, Volume: 3, 15-19 July 2001 Page(s): 1664-1669 vol.3
- [4] S. M. Shahidehpour and V. C. Ramesh, "Nonlinear programming algorithms and decomposition strategies for OPF," in IEEE tutorial course :Optimal power flow: Solution techniques, requirements, and challenges, 96 TP 111-0, 1996
- [5] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa and R. Yokoyama, "An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998.