

Voltage Stability Analysis Using Optimal Load Flow Method

田 東 勳* · 秋 鎭 夫** · 金 建 中*** · 李 炳 日§

(Dong-Hoon Jeon · Jin-Boo Choo · Kern-Joong Kim · Byoung-Il Rhee)

Abstract - In this Paper, we proposed a new voltage stability analysis algorithm. Using v , θ , λ_p , λ_q calculated by the optimal load flow method(OLF), it rapidly and correctly calculates a PV curve with voltage collapse point in the stable region. OLF can calculate voltage collapse point as well as the operating point in the stable region. Specially, λ_p , λ_q indicates the relative distance between voltage collapse point and the solution in the unstable region. In the study of a sample system, we verified the superiority of proposed algorithm.

Key Words : Optimal Load Flow(OLF), Voltage Stability, PV Curve, Voltage Collapse Point

1. 서 론

전압안정도(Voltage Stability)란 정상상태에서 부하모선의 전압크기를 일정하게 유지하려는 전력계통의 능력[1]으로 무효전력 공급원의 부족, 부하의 편중, 선로조류의 증가 등과 깊은 관계가 있는데, 특히 부하의 대도시 편중과 하계 침투부하 시 냉방부하의 급증으로 인한 부하 밀집지역에서의 비정상적인 전압의 출현은 모선전압의 저하와 그러한 전압저하의 진전으로 인하여 중국에는 전압붕괴 및 전계통 정전에 이르게 되는 매우 심각한 문제로 인식되고 있다.

전력계통에서는 일반적으로 현재의 운전점이 전압붕괴점으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는가로 전압안정도 측면에서의 안정, 불안정 여부를 판정하는데, 이때 전압안정도의 판정기준이 되는 전압붕괴점은 전압안정도를 해석함에 있어서 계통 부하를 어떻게 증가시키느냐에 따라, 증가된 부하에 맞게 발전력을 어떻게 처리하느냐에 따라 다양한 값으로 결정될 수 있기 때문에 특히 실제 계통을 대상으로 한 전압안정도 해석에서는 실제 계통 운전조건들을 반영하여 모선부하나 발전력을 처리하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

지금까지 국내외적으로 전압안정도에 관한 많은 연구논문들이 발표되었는데, 대표적인 해석방법으로는 뉴턴-랩슨 조류계산법(Newton-Raphson Load Flow Method), 연속조류계산법(Continuation Power Flow Method), 직접법(Point of Collapse Method) 등이 있다. 이중 뉴턴-랩슨 조류계산법은 수렴까지의 반복횟수와 수렴특성이 탁월한 반면, 전압붕괴점 및 전압붕괴점 부근에서는 자코비안 행렬의 특이성으로 인해 해를 구할 수 없다는 단점이 있다[2]. 이러한 문제를 해결할 수 있는 것으로 알려진 연속조류계산법은 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서는 물론 불안정영역에서도 강인하게 해를 구

할 수 있으나, 계산시간과 수렴특성이 스텝크기에 큰 영향을 받으며, 특히 전압붕괴점을 계산하기 위해서는 전압붕괴점 부근에서 스텝크기를 매우 작게 취해야 하는 단점을 가지고 있다[3]. 한편 직접법은 조류계산식에 전압붕괴점에서의 자코비안 행렬은 특이행렬이라는 필요조건을 추가한 비선형 연립방정식을 뉴턴-랩슨법으로 풀기 때문에 일단 수렴이 시작되면 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있으나, 초기값이 전압붕괴점에 충분히 근접해 있지 않으면 뉴턴-랩슨법의 특성상 발산할 우려가 있어 직접법에 필요한 초기값을 다른 방법을 통해서 제공해야 하는 단점이 있다[4].

본 논문에서는 기존의 전압안정도 해석 알고리즘[2][3][4]보다 전압붕괴점을 신속, 정확하게 계산할 수 있는 새로운 전압안정도 해석 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 최적화 조류계산법의 탁월한 수렴특성과 최적화 조류계산법에서 제공하는 계통상태 및 λ_p , λ_q 를 이용하여 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서의 PV곡선을 신속, 정확하게 계산할 수 있는데, 기존의 전압안정도 해석 알고리즘이 가지고 있는 전압붕괴점 부근에서의 발산문제, 스텝크기에 따른 수렴특성문제, 초기값에 따른 발산문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

제시한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 Wood-Wollenberg 6모선 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

2. 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석

2.1 최적화 조류계산법(Optimal Load Flow Method)[5]

조류계산은 주어진 운전조건에 맞는 계통의 상태, 즉 모선전압의 크기와 위상각을 계산하고, 이를 통해서 모선전력, 선로조류 등 계통내의 전력분포를 파악하는 것이다. 이때 조류계산을 통해서 결정된 모선전력, 선로조류 등의 전력분포는 모선에서의 수급조건을 만족해야 하며, 모선전압의 크기와 위상각 등의 계통상태는 계통을 구성하고 있는 설비의 전기적 특성과 운용상태, 각 설비간의 연결상태로부터 정식화되는 모선전력방정식을 만족해야 한다.

따라서, 조류계산 문제는 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員
 ** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 首 席 研 究 員 · 工 博
 *** 正 會 員 : 忠 南 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 § 正 會 員 : 忠 南 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 接 收 日 字 : 2001 年 5 月 8 日
 最 終 完 了 : 2001 年 6 月 14 日

수로 하고, 계통의 모션전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로 생각할 수 있다. 식(1)은 조류계산을 최적화 문제로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(y_P, y_Q) \\ & \text{s.t } P(V, \theta) - y_P = 0 \\ & \quad Q(V, \theta) - y_Q = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$f(y_P, y_Q) = 1/2(y_P - y_P^s)^T (y_P - y_P^s) + 1/2(y_Q - y_Q^s)^T (y_Q - y_Q^s) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y_P &= [P_G \ P_D]^T \\ y_Q &= Q_D \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_P^s &= [P_G^{spec} \ P_D^{spec}]^T \\ y_Q^s &= Q_D^{spec} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

- y_P : 발전기모선, 부하모선의 유효전력
- y_Q : 부하모선의 무효전력
- V : 모션전압의 크기
- θ : 모션전압의 위상각
- P_G : 발전기모선의 유효전력(계산값)
- P_D : 부하모선의 유효전력(계산값)
- Q_D : 부하모선의 무효전력(계산값)
- P_G^{spec} : 발전기모선의 유효전력(지정값)
- P_D^{spec} : 부하모선의 유효전력(지정값)
- Q_D^{spec} : 부하모선의 무효전력(지정값)
- $P(V, \theta), Q(V, \theta)$: 모션전력방정식

식(1)의 최적화문제는 라그랑지안 쌍대함수를 이용하여

$$\text{Min } L(y_P, y_Q, V, \theta, \lambda_P, \lambda_Q) \quad (5)$$

$$L \equiv f(y_P, y_Q) + \lambda_P \{ P(V, \theta) - y_P \} + \lambda_Q \{ Q(V, \theta) - y_Q \} \quad (6)$$

와 같이 제약조건을 포함한 확장된 형태로 나타낼 수 있고, 식(6)으로부터 변수 $y_P, y_Q, V, \theta, \lambda_P, \lambda_Q$ 에 대한 최적조건식을

$$\frac{\partial L}{\partial y_P} = y_P - y_P^s + \lambda_P = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_Q} = y_Q - y_Q^s + \lambda_Q = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V} = \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^T \lambda_Q = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta}\right)^T \lambda_Q = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} = P(V, \theta) - y_P^s = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} = Q(V, \theta) - y_Q^s = 0 \quad (12)$$

와 같이 유도할 수 있다.

따라서, 식(1)의 최적화 문제가 해를 가지기 위한 필요충분조건은 식(7)에서 식(12)까지의 최적조건식을 동시에 만족하는 해가 존재하는 것이며, 이때 최적조건식을 동시에 만족하는 해는 비선형 연립방정식인 최적조건식에 N-R법을 적용하여 구할 수 있다. 식(13)은 이를 행렬 형태로 나타낸 것이다.

$$\Delta G(z) = [H] \cdot \Delta z \quad (13)$$

$$[H] =$$

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & H_{VV} & H_{V\theta} & J_{PV}^T & J_{QV}^T \\ 0 & 0 & H_{\theta V} & H_{\theta\theta} & J_{P\theta}^T & J_{Q\theta}^T \\ -I & 0 & J_{PV} & J_{QV} & 0 & 0 \\ 0 & -I & J_{P\theta} & J_{Q\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Delta z = [\Delta y_P \ \Delta y_Q \ \Delta V \ \Delta \theta \ \Delta \lambda_P \ \Delta \lambda_Q]^T \quad (15)$$

$$\Delta G(z) = \left[\frac{\partial L}{\partial y_P} \ \frac{\partial L}{\partial y_Q} \ \frac{\partial L}{\partial V} \ \frac{\partial L}{\partial \theta} \ \frac{\partial L}{\partial \lambda_P} \ \frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} \right]^T \quad (16)$$

즉, 식(1)에서 최적화문제로 표현된 조류계산의 해는 식(13)의 반복을 통해서 구할 수 있는데, 이를 최적화 조류계산법(OLF)이라고 한다. 최적화 조류계산법은 비선형인 모션전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 기존의 조류계산 알고리즘[2]과는 달리 모션에서의 수급조건, 즉 모션전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모션전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 이용하여 계통상태를 결정하기 때문에 전압붕괴점 및 전압방괴점 부근에서도 안정적으로 해를 구할 수 있다.

2.2 최적화 조류계산법의 목적함수와 λ_P, λ_Q

최적화 조류계산법에서 식(2)의 목적함수는 각 모션에서 공급할 수 있는 전력량 (y_P, y_Q)과 각 모션에서 요구되는 전력량 (y_P^s, y_Q^s)의 차의 총합으로 계통이 요구되는 전력량을 공급할 수 있으면, 즉 운전점이 존재하는 안정영역에서는 0값을 가지고, 계통이 요구되는 전력량을 공급할 수 없으면, 즉 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서는 0아닌 값을 가진다.

한편 최적화 조류계산법에서 식(5)의 λ_P, λ_Q 는 식(1)의 최적화문제를 제약조건을 포함한 확장된 형태로 표현하는 과정에서 도입된 변수로써 앞 절의 최적조건식(7)(8)로부터 다음의 식(17)(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_P = y^s_P - y_P \quad (17)$$

$$\lambda_Q = y^s_Q - y_Q \quad (18)$$

여기서, λ_P, λ_Q 는 각 모선에서 공급할 수 있는 전력량 (y_P, y_Q)과 각 모선에서 요구되는 전력량 (y^s_P, y^s_Q)의 차를 나타내는데, 목적함수와 마찬가지로 운전점이 존재하는 안정영역에서는 0값을 가지고, 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서는 0아닌 값을 가진다. 따라서, λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법에 의해 계산된 해가 안정영역의 운전점인지, 불안정영역의 해인지를 판정할 수 있는 지표가 될 수 있으며, 특히 불안정영역에서의 λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법에 의해 구해진 해와 전압붕괴점사이의 상대적인 거리를 나타낸다.

2.3 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도해석 알고리즘

최적화 조류계산법의 탁월한 수렴특성과 최적화 조류계산법에서 제공하는 계통상태 및 λ_P, λ_Q 를 이용하여 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서의 PV곡선을 신속, 정확하게 계산할 수 있다. 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 절차는 다음과 같다.

- 1) 운전점이 존재하는 안정영역에서는 부하를 증가시켜가면서 최적화 조류계산법으로 해를 구한다. 이때 최적화 조류계산법은 기존 방법과는 달리 전압붕괴점 부근에서도 안정적으로 해를 구할 수 있다.
- 2) 안정영역에서 해를 구하다가 어느 단계가 되면 부하증가가 과다하여 불안정영역으로 넘어가게 되는데, 기존 방법과는 달리 최적화 조류계산법은 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서도 해를 구할 수 있다. 이때 최적화 조류계산법으로 계산된 해는 운전점이 될 수 없지만, 전 단계에서 부하가 얼마나 과다하게 증가하였는가를 나타내는, 즉 계산된 해로부터 전압붕괴점까지의 상대적인 거리를 나타내는 λ_P, λ_Q 를 제공한다.
- 3) 전 단계의 부하로부터 λ_P, λ_Q 를 차감한 후, 최적화 조류계산법을 수행한다. 결과적인 해는 불안정영역에 존재하지만, 전 단계보다는 전압붕괴점에 근접한 해가 된다.
- 4) 과정 3)을 목적함수와 λ_P, λ_Q 가 0이 될 때까지 반복하여 정확한 전압붕괴점을 구한다.

이와 같이 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘은 단순히 최적화 조류계산법의 반복 실행과 이를 통해서 제공되는 λ_P, λ_Q 만을 이용하여 전압붕괴점을 구하기 때문에 기존 방법보다 알고리즘이 간단하며, 특히 불안정영역에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정은 기존 방법과는 달리 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지 않고, λ_P, λ_Q 의 감소방향

으로 자동 처리되기 때문에 신속, 정확하게 전압붕괴점을 구할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘의 순서도를 나타낸 것이다.

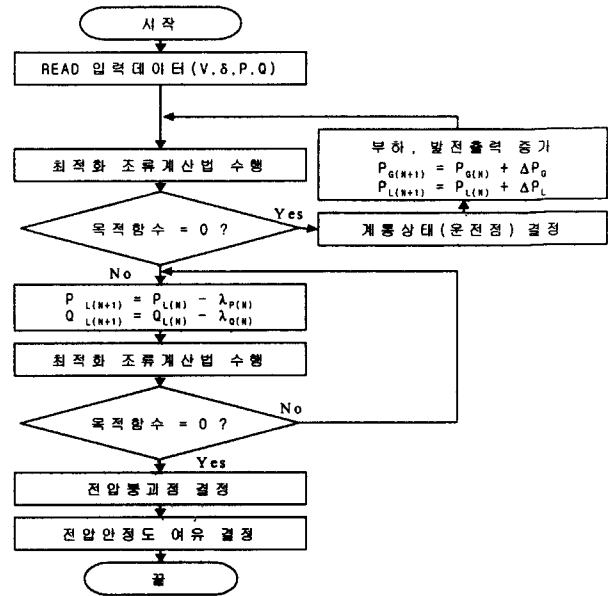


그림 1 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘의 순서도

Fig 1 The flow chart of voltage stability analysis algorithm using OLF

3. 사례연구

최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여 Wood-Wollenberg 6모선 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

전압안정도 해석에서는 모선 부하나 발전력을 어떻게 처리하느냐에 따라 다양한 전압붕괴점이 계산될 수 있으며, 특히 실제계를 대상으로 한 전압안정도 해석에서는 실제 계통 운전조건들을 반영하여 모선부하나 발전력을 처리하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 본 사례연구에서는 제안한 전압안정도 해석 알고리즘의 유용성 검증만을 위하여 부하를 정전력 모델로 가정하고, 발전기모선의 무효전력도 발전기의 최대출력값에 고정된 것으로 가정하여 해석을 단순화시켰다.

3.1 Wood-Wollenberg 6모선 계통[6]

전압안정도 해석을 위한 초기 운전점으로서 표 1의 모선데이터와 표 2의 선로데이터를 이용하여 최적화 조류계산법으로 조류계산을 수행하였다. 표 3은 허용오차 10^{-3} 에서의 해석결과를 나타낸 것인데, 기존의 조류계산법에 의한 해석결과 [5]와 정확히 일치한다. 한편 표 3에서 λ_P, λ_Q 의 차수가 10^{-11} 이고, 표 3의 해석결과를 이용한 식(1)의 목적함수값도 9.0129×10^{-23} 이므로 이를 통해서 초기 운전점이 전압안정도 측면에서 안정한 운전점이라고 판정할 수 있다.

표 1 6모선 계통의 모선데이터

Table 1 Bus data of 6-bus system

모선 번호	TYPE	초기값			
		전압 (P.U.)		전력 (P.U.)	
		크기	위상각	P	Q
1	기준	1.05	0.000	0.000	0.000
2	발전기	1.05	0.000	0.500	0.000
3	발전기	1.07	0.000	0.600	0.000
4	부하	1.00	0.000	-0.700	-0.700
5	부하	1.00	0.000	-0.700	-0.700
6	부하	1.00	0.000	-0.700	-0.700

표 2 6모선 계통의 선로데이터

Table 2 Branch data of 6-bus system

선로		R	X	C
from	to			
1	2	0.1000	0.2000	0.0200
1	4	0.0500	0.2000	0.0200
1	5	0.0800	0.3000	0.0300
2	3	0.0500	0.2500	0.0300
2	4	0.0500	0.1000	0.0100
2	5	0.1000	0.3000	0.0200
2	6	0.0700	0.2000	0.0250
3	5	0.1200	0.2600	0.0250
3	6	0.0200	0.1000	0.0100
4	5	0.2000	0.4000	0.0400
5	6	0.1000	0.3000	0.0300

표 3 초기운전점에서의 조류계산 결과

Table 3 The result of load flow at the initial operating point

모선 번호	전압		전력		전압안정도 판정지수 (*10 ⁻¹¹)	
	크기 (p.u.)	위상각 (rad)	P (p.u.)	Q (p.u.)	λ_P	λ_Q
1	1.0500	-0.0000	1.0906	-0.3024	-	-
2	1.0500	-0.0660	0.5000	-0.9933	0.3425	-
3	1.0700	-0.0768	0.6000	1.0799	0.5754	-
4	0.9835	-0.0727	-0.7000	-0.7000	0.1011	0.0462
5	0.9739	-0.0903	-0.7000	-0.7000	0.2710	0.2606
6	0.9985	-0.1047	-0.7000	-0.7000	0.3012	0.1652

목적함수 = 9.0129×10^{-23} , 총 송전손실 = 0.0906(p.u.)

Case 1) 부하모선의 부하를 초기 운전점으로부터 50%씩 증가시킨 경우

부하모선(4,5,6)의 부하를 표 3의 초기 운전점으로부터 50%씩 증가시켜가면서 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘을 적용하였다. 표 4는 전압안정도 해석결과를 나타낸

것인데, 최적화 조류계산법의 10회 실행으로 안정영역에서의 PV곡선은 물론 전압붕괴점을 정확히 계산하였다.

표 4에서 최적화 조류계산법 실행횟수가 0~3인 구간은 최적화 조류계산법은 물론 기존의 조류계산법으로도 해를 구할 수 있는, 그리고 이 해가 운전점이 되는 안정영역으로 이때 최적화 조류계산법에 의한 목적함수값과 λ_P, λ_Q 는 0이 된다. 다음으로 최적화 조류계산법 실행횟수가 3~4인 구간은 안정영역에서의 50% 부하증가가 과다하여 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역으로 넘어온 것인데, 최적화 조류계산법은 기존의 조류계산법과는 달리 해를 구할 수 있으며, 0이 아닌 값을 가지게 되는 목적함수값과 λ_P, λ_Q 를 통해서 이 해가 불안정영역에 있다는 것을 알 수 있다. 이때 목적함수값과 λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법으로 구한 불안정영역의 해와 전압붕괴점사이의 상대적인 거리를 나타내는 정보가 되는데, 이러한 거리는 최적화 조류계산법 실행횟수가 4~9인 구간에서와 같이 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘에 의해서 최적화 조류계산법이 실행될 때마다 점점 줄어들게 되어 최종적으로 최적화 조류계산법의 10회 실행에서는 정확한 전압붕괴점으로 수렴하게 된다. 그림 2는 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘이 초기 운전점에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정을 그림으로 나타낸 것이다.

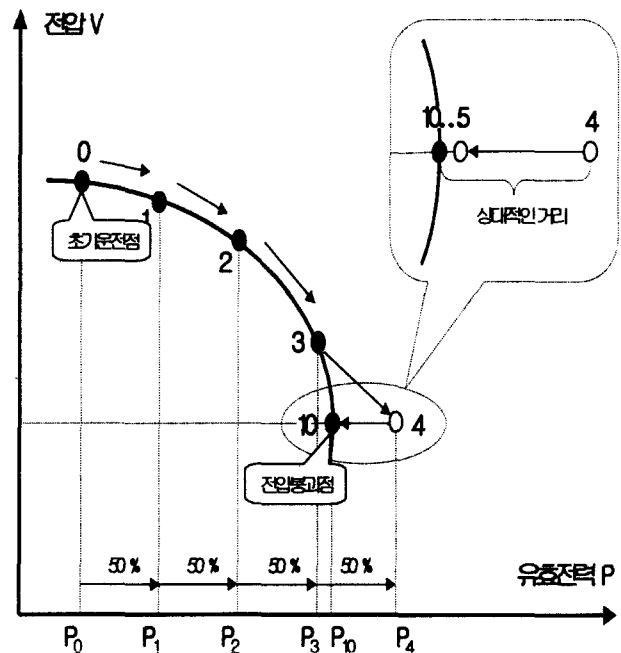


그림 2 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 (Case 1)

Fig 2 Voltage stability analysis using OLF(Case 1)

이와 같이 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘은 단순히 최적화 조류계산법의 반복 실행과 이를 통해서 제공되는 λ_P, λ_Q 만을 이용하여 전압붕괴점을 구하기 때문에 기존 방법보다 알고리즘이 간단하며, 특히 불안정영역에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정은 기존 방법과는 달리 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지 않고, λ_P, λ_Q 의 감소방향

표 4 전압안정도 해석결과(Case 1)

Table 4 The result of voltage stability analysis(Case 1)

OLF 법 실행횟수	OLF 법 내에서의 N-R 법 반복횟수	목적함수값	전압안정도 판정지수						총 송전손실 (p.u.)	비 고
			모선 4		모선 5		모선 6			
			λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q		
0	3	9.0129×10^{-23}	0.0000	0.05000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0906	안 정
1	4	5.0968×10^{-16}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2897	안 정
2	4	2.3770×10^{-21}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6980	안 정
3	5	7.5203×10^{-22}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5491	안 정
4	8	0.0208×10^{-10}	0.0627	0.0510	0.1026	0.0906	0.0849	0.0246	-	불안정
5	9	0.9007×10^{-15}	0.0132	0.0106	0.0212	0.0184	0.0178	0.0050	-	불안정
6	9	0.4099×10^{-14}	0.0028	0.0023	0.0045	0.0039	0.0038	0.0011	-	불안정
7	11	0.1937×10^{-15}	0.0006	0.0005	0.0010	0.0008	0.0008	0.0002	-	불안정
8	12	0.9801×10^{-17}	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	-	불안정
9	13	0.5247×10^{-18}	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-	불안정
10	13	0.1443×10^{-18}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.9490	임계점

으로 자동 처리되기 때문에 신속, 정확하게 전압붕괴점을 구할 수 있다는 장점이 있다.

표 5는 최적화 조류계산법에 의한 전압붕괴점의 조류계산 결과를 나타낸 것인데, λ_P, λ_Q 의 차수가 10^{-4} 이었고, 표 5의 해석결과를 이용한 식(1)의 목적함수값도 0.1443×10^{-18} 이었다. 이와 같이 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘은 전압붕괴점을 정확히 계산할 수 있기 때문에 운전점의 전압안정도 마진을 구체적으로 산정할 수 있다. 예를 들면 초기 운전점에서 부하모선 5는 약 181(%), 즉 $1.2704(p.u.) = 1.9704(p.u.) - 0.7(p.u.)$ 의 마진을 가지고 있다고 말할 수 있다.

그림 3은 제시한 알고리즘에 의해 구한 부하모선 5의 실제 PV곡선을 도시한 것이고, 그림 4는 부하증가에 대한 총 송전손실의 변화를 나타낸 것이다.

표 5 전압붕괴점에서의 조류계산 결과(Case 1)

Table 5 The result of load flow at the critical point(Case 1)

모선 번호	전압		전력		전압안정도 판정지수($\times 10^{-4}$)	
	크기 (p.u.)	위상각 (rad)	P (p.u.)	Q (p.u.)	λ_P	λ_Q
1	1.0500	-0.0000	8.8324	3.3955	-	-
2	1.0500	-0.8288	0.5000	8.6547	0.1513	-
3	1.0700	-1.0072	0.6000	4.8828	0.1977	-
4	0.7155	-0.6707	2.0206	2.0355	0.1669	0.1346
5	0.6091	-0.8527	1.9704	1.9861	0.2677	0.2318
6	0.7877	-1.0491	1.9925	2.0690	0.2263	0.0637

목적함수 = 0.1443×10^{-18} , 총 송전손실 = 3.9490(p.u.)

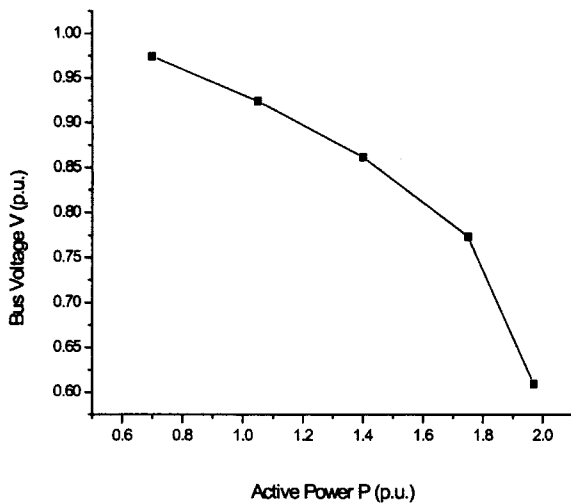


그림 3 부하모선 5의 PV곡선
Fig 3 The PV curve at bus 5

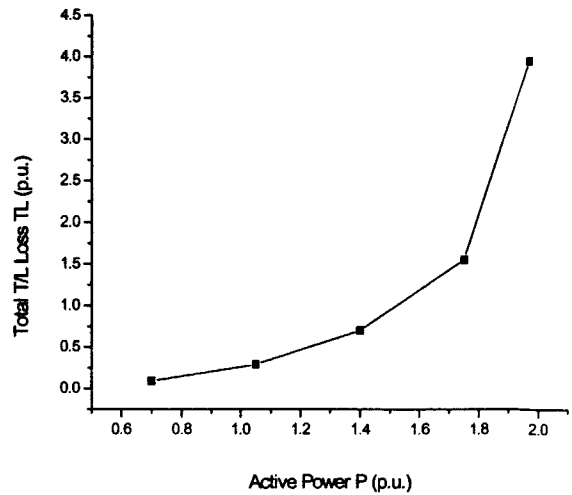


그림 4 부하증가에 대한 송전손실의 변화
Fig 4 The T/L_{Loss}-P characteristics of the system

표 6 전압안정도 해석결과(Case 2)

Table 6 The result of voltage stability analysis(Case 2)

OLF 방법 실행횟수	OLF 방법 내에서의 N-R 방법 반복횟수	목적함수값	전압안정도 판정지수						총 송전손실 (p.u.)	비 고
			모선 4		모선 5		모선 6			
			λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q		
0	3	9.0129×10^{-23}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0906	안 정
1	8	1.3872×10^{-00}	0.5420	0.4923	0.8174	0.7772	0.6604	0.2633	-	불안정
2	8	0.0406×10^{-00}	0.0960	0.0823	0.1347	0.1155	0.1215	0.0415	-	불안정
3	8	0.0099×10^{-00}	0.0207	0.0176	0.0287	0.0241	0.0263	0.0088	-	불안정
4	9	0.9179×10^{-04}	0.0046	0.0039	0.0063	0.0053	0.0058	0.0019	-	불안정
5	10	0.4654×10^{-05}	0.0010	0.0009	0.0014	0.0012	0.0013	0.0004	-	불안정
6	12	0.2642×10^{-06}	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001	-	불안정
7	12	0.1967×10^{-07}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	-	불안정
8	12	0.7966×10^{-09}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0394	임계점

Case 2) 부하모선의 부하를 초기 운전점으로부터 400% 증가시킨 경우

부하모선(4,5,6)의 부하를 표 3의 초기 운전점으로부터 400% 증가시켜 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘을 적용하였다. 표 6은 전압안정도 해석결과를 나타낸 것인데, 최적화 조류계산법의 8회 실행으로 전압붕괴점을 정확히 계산하였다.

Case 2는 Case 1과는 달리 초기 운전점으로부터 부하증가를 크게 했기 때문에 Case 1에서 최적화 조류계산법 실행횟수가 0~3인 구간처럼 안정영역에서의 해를 구하는 과정이 생략되고, 바로 전압붕괴점을 구하는 과정으로 넘어가게 된다. 즉, Case 2에서 최적화 조류계산법 실행횟수가 0~1인 구

간은 안정영역에서의 400% 부하증가가 과다하여 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역으로 넘어온 것이다. Case 1에서와 마찬가지로 목적함수값과 λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법으로 구한 불안정영역의 해와 전압붕괴점사이의 상대적인 거리를 나타내는 정보가 되는데, 이러한 거리는 최적화 조류계산법 실행횟수가 1~7인 구간에서와 같이 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘에 의해서 최적화 조류계산법이 실행될 때마다 점점 줄어들게 되어 최종적으로 최적화 조류계산법의 8회 실행에서는 정확한 전압붕괴점으로 수렴하게 된다. 그림 5는 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘이 초기 운전점으로부터 전압붕괴점을 찾아가는 과정을 그림으로 나타낸 것이다.

Case 1과 Case 2을 통해서 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘은 부하증가의 스텝크기 조정으로 안정영역에서의 정밀한 PV곡선은 물론 전압붕괴점을 직접 계산할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 스텝크기를 작게 할 경우, 정밀한 PV곡선 및 전압붕괴점의 결정이 가능하며, 크게 할 경우에는 초기 운전점으로부터 직접 전압붕괴점을 계산할 수 있다는 장점이 있다.

표 7은 최적화 조류계산법에 의한 전압붕괴점의 조류계산 결과를 나타낸 것인데, λ_P, λ_Q 의 차수가 10^{-4} 이었고, 표 7의

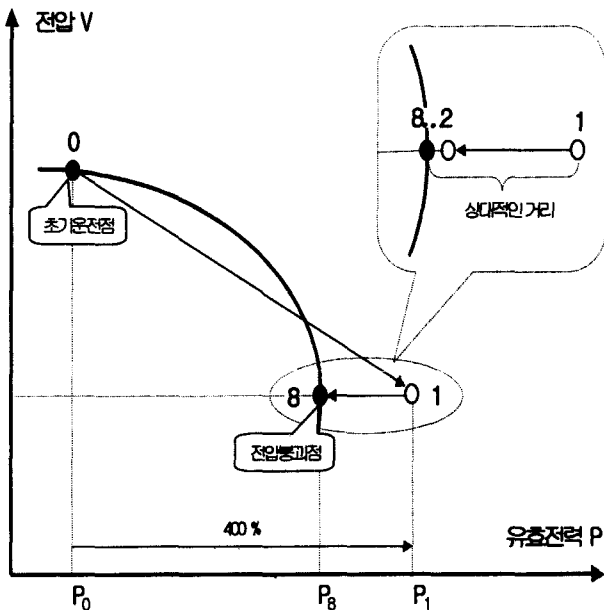


그림 5 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 (Case 2)

Fig 5 Voltage stability analysis using OLF(Case 2)

표 7 전압붕괴점에서의 조류계산 결과(Case 2)

Table 7 The result of load flow at the critical point(Case 2)

모선 번호	전압		전력		전압안정도 판정지수(* 10^{-4})	
	크기 (p.u.)	위상각 (rad)	P (p.u.)	Q (p.u.)	λ_P	λ_Q
1	1.0500	-0.0000	8.8379	3.4664	-	-
2	1.0500	-0.8356	0.5000	9.0117	0.1159	-
3	1.0700	-1.0057	0.6000	5.2117	0.1487	-
4	0.6919	-0.6782	2.1032	2.2027	0.1353	0.1145
5	0.6243	-0.8363	1.8111	1.8763	0.1868	0.1564
6	0.7525	-1.0436	1.9843	2.4840	0.1725	0.0569

목적함수 = 0.7966×10^{-09} , 총 송전손실 = 4.0394(p.u.)

표 8 전압안정도 해석결과(Case 3)

Table 8 The result of voltage stability analysis(Case 3)

OLF법 실행횟수	OLF법 내에서의 N-R법 반복횟수	목적함수값	전압안정도 판정지수						총 송전손실 (p.u.)	비 고
			모선 4		모선 5		모선 6			
			λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q	λ_P	λ_Q		
0	3	9.0129×10^{-23}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0906	안 정
1	11	63.472×10^{-00}	4.1321	4.4796	4.8244	5.1620	4.2151	3.8427	-	불안정
2	6	0.4955×10^{-00}	0.3829	0.3191	0.4267	0.3179	0.4533	0.1997	-	불안정
3	8	0.0244×10^{-00}	0.0842	0.0676	0.0940	0.0666	0.1025	0.0411	-	불안정
4	8	0.0014×10^{-00}	0.0203	0.0162	0.0227	0.0159	0.0249	0.0098	-	불안정
5	10	0.8594×10^{-04}	0.0050	0.0040	0.0056	0.0039	0.0061	0.0024	-	불안정
6	12	0.3019×10^{-06}	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004	0.0001	-	불안정
7	12	0.2244×10^{-07}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	-	불안정
8	12	0.8658×10^{-09}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.2695	임계점

해석결과를 이용한 식(1)의 목적함수값도 0.7966×10^{-09} 이었다. 이와 같이 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘은 전압붕괴점을 정확히 계산할 수 있기 때문에 운전점의 전압안정도 마진을 구체적으로 산정할 수 있다. 예를 들면 초기 운전점에서 부하모선 5는 약 158(%), 즉 $1.1111(\text{p.u.}) = 1.8111(\text{p.u.}) - 0.7(\text{p.u.})$ 의 마진을 가지고 있다고 말할 수 있다.

한편 Case 2에서는 Case 1과 다른 전압붕괴점이 계산되었는데, 이는 전압안정도 해석에서 부하증가나 부하증가에 따른 발전력 처리방법에 따라 다양한 전압붕괴점이 결정되는 것처럼 본 논문에서 제시한 알고리즘에서도 각기 다른 부하증가 시나리오가 적용되었기 때문이다.

Case 3) 부하모선의 부하를 초기 운전점으로부터 1000% 증가시킨 경우

부하모선(4,5,6)의 부하를 표 3의 초기 운전점으로부터 1000% 증가시켜 본 논문에서 제시한 전압안정도 해석 알고리즘을 적용하였다. 표 9는 전압안정도 해석결과를 나타낸 것인데, 최적화 조류계산법의 8회 실행으로 전압붕괴점을 정확히 계산하였다.

Case 3는 Case 2에서와 마찬가지로 초기 운전점으로부터

표 9 전압붕괴점에서의 조류계산 결과(Case 3)

Table 9 The result of load flow at the critical point(Case 3)

모선 번호	전압		전력		전압안정도 판정지수($\times 10^{-4}$)	
	크기 (p.u.)	위상각 (rad)	P (p.u.)	Q (p.u.)	λ_P	λ_Q
1	1.0500	-0.0000	9.3641	3.5605	-	-
2	1.0500	-0.8815	0.5000	9.2829	0.1291	-
3	1.0700	-1.0499	0.6000	5.5031	0.1619	-
4	0.6857	-0.7380	2.3739	2.1122	0.1579	0.1253
5	0.6761	-0.8618	1.6248	1.4325	0.1765	0.1232
6	0.7102	-1.0974	2.1961	2.9036	0.1939	0.0757

목적함수 = 0.8658×10^{-09} , 총 송전손실 = 4.2695(p.u.)

부하증가를 크게 했기 때문에 초기 운전점으로부터 직접 전압붕괴점을 계산하게 된다. 이때 Case 1, 2, 3을 비교해보면 안정영역에서의 해석과정은 기존 방법과 마찬가지로 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지만, 불안정영역에서 전압붕괴점까지 찾아가는 과정은 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지 않고, 최적화 조류계산법의 7~8회 실행으로 안정적으로 전압붕괴점을 구할 수 있음을 알 수 있다.

표 9는 최적화 조류계산법에 의한 전압붕괴점의 조류계산 결과를 나타낸 것인데, λ_P, λ_Q 의 차수가 10^{-4} 이었고, 표 5의 해석결과를 이용한 식(1)의 목적함수값도 0.8658×10^{-09} 이었다. 한편 초기 운전점에서 부하모선 5는 약 132(%), 즉 $0.9248(\text{p.u.}) = 1.6248(\text{p.u.}) - 0.7(\text{p.u.})$ 의 마진을 가지고 있다고 말할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 전압안정도 해석 알고리즘[2][3][4]보다 전압붕괴점을 신속, 정확하게 계산할 수 있는 새로운 전압안정도 해석 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 최적화 조류계산법의 탁월한 수렴특성과 최적화 조류계산법에서 제공하는 계통상태 및 λ_P, λ_Q 를 이용하여 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서의 PV곡선을 신속, 정확하게 계산할 수 있다. 제시한 알고리즘은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 제시한 알고리즘에서 사용한 최적화 조류계산법은 비선형인 모선전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 기존의 조류계산 알고리즘과는 달리 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 이용하여 계통상태를 결정하기 때문에 전압붕괴점 및 전압붕괴점 부근에서도 안정적으로 해를 구할 수 있다.
- (2) 제시한 알고리즘에서 사용한 최적화 조류계산법은 각 모선에서 공급할 수 있는 전력량 (y_P, y_Q)과 각 모선

에서 요구되는 전력량 (y^p, y^q)의 차를 의미하는 λ_p, λ_q 를 제공하는데, 운전점이 존재하는 안정영역에서는 0값을 가지고, 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서는 0아닌 값을 가지는 특성을 가지고 있다. 따라서, λ_p, λ_q 는 최적화 조류계산법에 의해 계산된 해가 안정영역에 있는 운전점인지, 불안정영역에 있는지를 판정할 수 있는 지표가 될 수 있으며, 특히 불안정영역에서의 λ_p, λ_q 는 최적화 조류계산법에 의해 구해진 해와 전압붕괴점사이의 상대적인 거리를 나타낸다.

- (3) 제시한 알고리즘은 단순히 최적화 조류계산법의 반복 실행과 이를 통해서 제공되는 계통상태 및 λ_p, λ_q 만을 이용하여 전압붕괴점을 구하기 때문에 기존 방법보다 알고리즘이 간단하며, 특히 불안정영역에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정은 기존 방법과는 달리 부하증가의 스텝 크기에 영향을 받지 않고, λ_p, λ_q 의 감소방향으로 자동 처리되기 때문에 안정적으로 전압붕괴점을 찾을 수 있다.
- (4) 제시한 알고리즘은 부하증가의 스텝크기 조정으로 안정영역에서의 정밀한 PV곡선은 물론 전압붕괴점을 직접 계산할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 스텝크기를 작게

할 경우, 정밀한 PV곡선 및 전압붕괴점의 결정이 가능하며, 크게 할 경우에는 초기 운전점으로부터 직접 전압붕괴점을 계산할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Carson W. Taylor, Power System Voltage Stability, 1994.
- [2] M. A. Pai, Computer techniques in power system analysis, 1979.
- [3] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", 1993.
- [4] 남해곤, 김동준, 송충기, 문영환, 김태균, 이효상, "전압붕괴 임계점 계산을 위한 효율적 통합법", 대한전기학회 논문지 제48권 제8호, pp.951~957, 1999.
- [5] 전동훈, 김건중, 최장흠, 엄재선, 허형, 이병일, "최적화기법을 이용한 새로운 조류계산 알고리즘", 대한전기학회 논문지 제49권 제11호, pp.542~548, 2000.
- [6] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation & Control", 1984.
- [7] Mokhtar S. Bazaraa, C. M. Shetty, Non-Linear Programming, 1979.

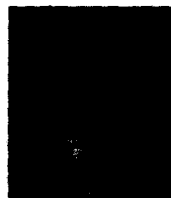
저 자 소 개



전 동 훈 (田 東 勳)

1966년 12월 11일 생. 1991년 홍익대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 충남대 전기공학과 박사과정. 1994년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5833, Fax : 042-865-5844
E-Mail : dhjeon@kepri.re.kr



김 건 중 (金 建 中)

1953년 2월 12일 생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년 해군 제2사관학교 교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5659, Fax : 042-823-7970
E-mail : kjkim@ee.chungnam.ac.kr



추 진 부 (秋 鎭 夫)

1950년 1월 7일 생. 1977년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한전 전력연구원 수석연구원

Tel : 042-865-5830, Fax : 042-865-5844
E-mail : jbc@kepri.re.kr



이 병 일 (李 炳 日)

1962년 11월 11일 생. 1985년 금오공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 시스템제어 전공(석사). 현재 충남대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7609, Fax : 042-823-7970
E-mail : brhee@power.ee.cnu.ac.kr