

실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발

論 文

48A-3-3

The Improvement of Continuation Power Flow System Including the Algorithm of Practical Step Length Selection

宋 和 昌* 李 炳 峻** 權 世 嫻***

(Hwachang Song · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon)

Abstract - Continuation power flow has been developed to remove the ill-condition problem caused by singularity of power flow Jacobian at and near at steady-state voltage instability point in conventional power flow. Continuation power flow consists of predictor and corrector. In predictor, the direction vector at the present solution is calculated and the initial guess of next solution is determined at the distance of step length. The selection of step length is a very important part, since computational speed and convergence performance are both greatly affected by the choice of the step length. This paper presents the practical step length selection algorithm using the reactive power generation sensitivity. In numerical simulation, the proposed algorithm is compared with the step length selection algorithm using TVI(tangent vector index).

Key Words : steady-state voltage instability point, continuation power flow, step length selection algorithm, reactive power generation sensitivity

1. 서 론

계통의 전압안정도 해석에서 정적인 전압불안정점을 계산하는 것은 아주 중요하다. 그러나 일반적으로 이용되는 뉴턴-랩슨(N-R) 전력조류계산에서는 정적인 전압불안정점과 그 부근에서의 자코비안이 특이성을 갖게 되므로 조류계산이 발산하고 따라서 정적인 전압불안정점을 구할 수 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강한 수렴 특성을 갖는 연속 알고리즘을 전력조류계산에 적용한 연속조류계산 시스템이 소개되었고, 전압안정도에 대한 관심이 높아짐에 따라 국제적으로 연속조류계산 알고리즘의 연구가 크게 활성화되어 그 연구결과가 발표되었다[1-4].

연속조류계산은 현재의 해로부터 다음해의 추정값을 구하는 예측과정과 이 값을 이용하여 정확한 조류해를 구하는 수정과정으로 이루어져 있다. 예측과정은 조류해 경로의 정보를 이용하여 다음해의 방향을 계산하고 현재의 조류해로부터 스텝크기 만큼 떨어진 다음해의 추정값을 구한다. 이 스텝크기는 수정과정의 수렴영역 안에 존재하도록 결정되어야 하며 해의 수렴성을 위해서는 작은 스텝크기를 이용해야 하나, 계산시간이 많이 소요된다. 계산시간 단축을 위해서 큰 스텝크기를 사용하면, 조류해의 경로가 정적인 전압불안정점 부근에 다가감에 따라 예측과정에서 계산된 다음해의 추정값이 수정과정의 수렴영역 밖에 존재할 수 있어 해의 발산의 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 각 연속스

템에서 효과적인 스텝크기를 선정하는 것은 계산시간과 수렴성에 아주 큰 영향을 미친다[5,6].

현재까지 연속조류계산에 이용된 스텝크기 선택 알고리즘으로는 접선벡터를 단위화(normalization)하여 이용하는 알고리즘[3], 호 길이(arc length)를 이용하는 알고리즘[4], 그리고 TVI(tangent vector index)를 이용하는 알고리즘[7]이 있다. 접선벡터를 단위화하여 이용하는 알고리즘은 조류해의 경로를 구하는 데 안정적이나, 계산속도 측면에서 보완이 필요하다. 호 길이를 이용하는 알고리즘은 곡률반경이 큰 경우하시의 조류해의 경로에서는 큰 스텝크기를 선택하고 곡률반경이 작은 경우하시에는 작은 스텝크기를 선택하므로 연속조류계산의 수행성에 있어 비교적 우수한 알고리즘이다. 그러나 기본 조류해로부터 첫 다음해의 추정값을 구할 때, 스텝크기를 임의로 선택해야 하는 단점이 있다. 최근 소개된 TVI를 이용하는 알고리즘은 정적인 전압불안정점까지의 조류해의 경로를 추적하는 데 있어 연속스텝수를 감소시키는 특징을 가지고 있으나, 계산의 고속화를 위해서는 연속스텝수 뿐 아니라 수정과정에서의 N-R 반복회수도 고려되어야 하므로 연속스텝수가 감소되더라도 계산시간은 증가할 수 있는 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 먼저 국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘[9]을 적용한 연속조류계산에 대하여 간단히 설명하고 연속조류계산 수행성 향상에 필수적인 각 연속스텝에서의 효과적인 스텝크기를 선택하는 알고리즘을 소개한다. 이 알고리즘은 Flatabø, et al.[8]이 소개한 감도해석 기법을 적용한 무효전력 발전감도를 이용한다. 참고문헌 [8]에서 조류계산의 종속변수로 설명하고 있는 무효전력 발전의 부하 증가에 따른 감도가 본 논문에서는 예측과정에서 계산된 접선벡터 성분을 이용하여 쉽게 구해진다. 사례연구에서는 뉴 잉글랜드 39모선 시험계통을 이용하여, 본 논문에서 소개

* 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 博士課程

** 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 助教授·工博

*** 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 教授·工博

接受日字 : 1998年 9月 11日

最終完了 : 1999年 1月 22日

한 알고리즘과 TVI를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘에 대한 연속조류계산 시스템의 수행성을 비교한 결과를 보인다.

2. 연속조류계산

연속조류계산 알고리즘은 임의의 조류해에서 부하가 서서히 변화할 때 이제 따라 움직이는 조류방정식의 해를 추적하여 나간다. 각 연속스텝에서의 스텝크기 선정문제를 설명하기 위해, 본 절에서는 연속조류계산 알고리즘의 배경에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2.1 예측과정

부하 파라미터 λ 를 포함하는 조류방정식을 다음 식 (1)과 같이 표현하자.

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (1)$$

여기에서 δ 는 모선의 전압 위상각 벡터이고 V 는 모선의 전압크기 벡터이다. 연속조류계산은 현재의 조류해로부터 조류해의 경로를 추적하는 예측과정과 수정과정으로 구성되어 있으며, 예측과정은 현재의 조류해로부터 다음해의 추정값을 구하는 과정이다. 먼저 현재의 조류해에서의 다음해의 방향을 나타내는 접선벡터를 구하기 위하여 식 (1)의 양변을 미분하여 보자.

$$\begin{bmatrix} f_\delta & f_V & f_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [0] \quad (2)$$

여기에서 $[f_\delta \ f_V]$ 는 일반적인 N-R 조류계산의 자코비안이다. 위 식을 이용하여 $[d\delta \ dV]^T$ 를 구하면 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \end{bmatrix} = - [f_\delta \ f_V]^{-1} f_\lambda d\lambda \quad (3)$$

그러나 전력조류 자코비안 $[f_\delta \ f_V]$ 가 ill-condition일때, 식 (3)으로 $[d\delta \ dV]^T$ 를 구할 수 없다. 따라서 ill-condition을 극복하기 위해 국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산의 예측과정에서는 식 (2)에 접선벡터 $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 성분중 하나를 선택하는 식을 다음과 같이 추가한다.

$$\begin{bmatrix} f_\delta & f_V & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 e_k 는 k번째 성분만이 1이고 나머지 성분들은 0인 행벡터이다. 덧붙여진 식은 접선벡터 성분중 하나의 크기를 1로 정하는 식이고 우항에서 \pm 부호는 선택된 접선벡터 성분의 부호를 유지시키기 위한 것이다. 위 식에서 λ 는 하나의 상태변수로 사용되고 있고 덧붙여진 식으로 선택된 상태변수는 연속 파라미터라 불리운다. 식 (4)에서 전력조류 자코비안 $[f_\delta \ f_V]$ 이 특이성을 갖더라도 f_λ, e_k 가 덧붙여진 자코비안을 이용하여 접선벡터 $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 를 구할 수 있게 된다. 이제 현재해 $[\delta_0 \ V_0 \ \lambda_0]^T$ 로부터 다음해의 추정값 $[\delta_1^* \ V_1^* \ \lambda_1^*]^T$ 은 계산된 접선벡터를 이용하여 다음식으로 구한다.

$$\begin{bmatrix} \delta_1^* \\ V_1^* \\ \lambda_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서 σ 는 스텝크기를 나타내는데 스텝크기는 수정과정의 수렴반경안에 다음해의 추정값이 존재하도록 선택되어

져야 한다. 스텝크기 선택에 대하여 다음 절에서 자세히 설명된다.

2.2 수정과정

수정과정에서는 예측과정에서 계산된 다음해의 추정값 $[\delta_1^* \ V_1^* \ \lambda_1^*]^T$ 로부터 조류해 $[\delta_1 \ V_1 \ \lambda_1]^T$ 를 구하는 과정으로 다음과 같이 하나의 식이 덧붙여져 확장된 전력조류방정식의 해를 N-R 반복법을 이용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} f(\delta, V, \lambda) \\ g(\delta, V, \lambda) \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산에서는 다음식을 g 로 이용한다.

$$x_k - \eta = 0 \quad (7)$$

여기에서 x_k 는 예측과정에서 선택한 연속 파라미터이고 η 는 연속 파라미터의 다음해의 추정값이다. 그러므로 식 (7)을 덧붙여서 확장된 전력조류방정식을 이용하여 조류해를 구하게 되면, 연속 파라미터는 예측과정에서 계산된 추정값에 고정된다. 식 (7)을 덧붙인 전력조류방정식의 수정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_\delta & f_V & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서도 덧붙여진 자코비안을 이용하므로 정적인 전압 불안정점과 그 점 부근에서의 전력조류 자코비안이 특이성을 갖게 되어 나타난 수렴곤란의 문제는 성공적으로 제거될 수 있다.

2.3 스텝크기의 선정문제

연속조류계산에서 다음해의 초기 추정값을 구할 때 접선벡터의 스텝크기를 선택하는 문제는 조류해의 경로를 구하는 데 있어 아주 중요한 영향을 미친다. 고정된 스텝크기를 이용할 때, 스텝크기가 충분히 작으면 연속조류계산은 수정과정에서 비수렴성의 문제가 없고 정확한 조류해의 경로를 추적해 나가므로 정확한 정적인 전압불안정점을 구할 수 있으나 많은 계산시간이 소요된다는 문제가 있다. 반면, 고정된 큰 스텝크기를 이용할 경우, 조류해의 경로를 추적하는 데 있어 P-V곡선의 기울기가 완만한 경우하시에는 효과적이지만 정적인 전압불안정점에 접근해감에 따라 수정과정에서 조류해 발산의 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 고정된 스텝크기를 이용할 때에는 그 중간이 되는 적당한 스텝크기를 선택해야 한다. 그러나 계통에 따라 효과적인 고정 스텝크기는 다르게 되고 여러번의 시행착오를 거쳐야 한다. 따라서 효과적인 연속조류계산의 수행을 위해서는 각 연속 스텝마다 조류해의 경로 상태에 따라 적당한 스텝크기가 선정되어야 한다.

그리고 조류해의 경로를 추적하여 나갈 때, 각 연속스텝마다 효과적인 스텝크기가 선택되어 져야 하는 이유는 전력계통은 한계값을 갖는 파라미터를 가지고 있어 조류해 경로의 기울기의 불연속성이 생기게 되기 때문이다[5]. 즉, 조류해의 경로에 급격한 변화가 생기게 되므로 이를 고려한 스텝크기 선택이 요구된다. 한계값을 갖는 파라미터의 하나인 무효전력 발전에 의하여 조류해의 경로가 얼마나 영향을 받는지 알아보기 위하여 그림 1에서 보여지는 6모선 시험계통에 대하여 연속조류계산을 적용하여 조류해의 경로를 구하여 본다.

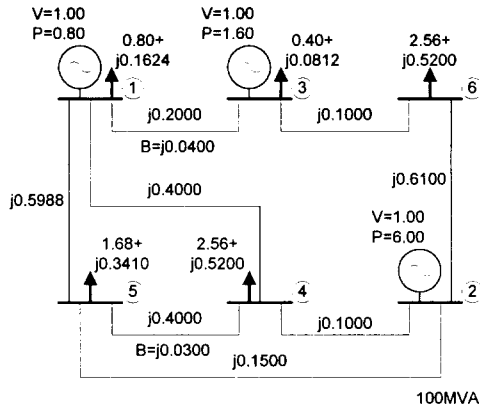


그림 1 6모선 시험계통도
Fig. 1 6-bus test system diagram

그림 2에서 부하모선에서의 P-V 곡선을 보이고 있는데, 이 그림을 살펴보면 4, 5번 부하모선의 전압이 8번째 연속스텝에서 급격한 감소를 보이고 있다. 이때 조류해 결과에 따르면, 2번 모선의 무효전력 발전이 상한에 이르렀음을 알 수 있다. 본 논문에서는 한계값을 갖는 파라미터중 조류해의 경로에 큰 영향을 미치는 발전기 무효전력 발전과 발전감도를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘을 소개하고자 한다.

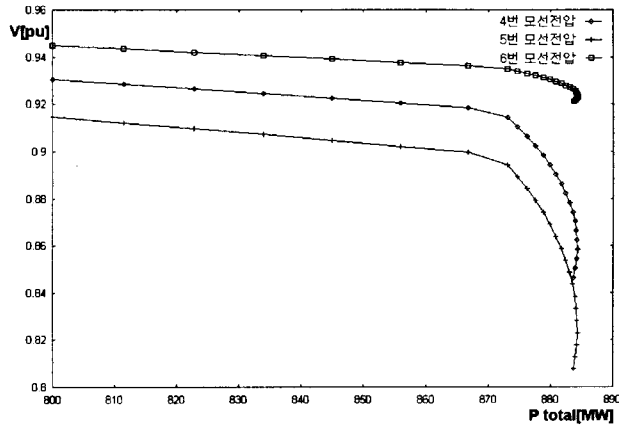


그림 2 6모선 시험계통의 P-V 곡선
Fig. 2 P-V curves of 6-bus test system

3. 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘

3.1 무효전력 발전감도

부하 파라미터 λ 가 도입된 전력조류방정식 (1)에서 i 번째 모선의 무효전력 발전 Q_{gi} 는 다음과 같다.

$$Q_{gi} = Q_{di}(\lambda) + Q_i$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (9)$$

여기에서 Q_{di} 는 i 번째 모선의 무효 부하로서 부하 파라미터 λ 의 함수로 표현된다. Q_i 는 i 모선으로부터 계통에 주입되는 무효전력이다. Y_{ij} 는 모선 어드미턴스 행렬의 (i, j) 성분의 크기이고 θ_{ij} 는 그 성분의 위상각을 나타낸다. V_i, V_j 는 각각 i, j 모선의 전압크기이고 δ_i, δ_j 는 각각 i, j 모선의 전압위상각에 해당한다.

부하 파라미터 λ 의 증가에 따른 무효전력 발전의 감도는 식 (9)를 λ 에 대하여 미분함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{dQ_{gi}}{d\lambda} = \frac{dQ_{di}(\lambda)}{d\lambda} + \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \frac{d\delta_j}{d\lambda} + \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \frac{dV_j}{d\lambda} \right] \quad (10)$$

위 식에서 우측의 첫째 항은 부하증가 시나리오에 따라 결정되므로 간단히 구할 수 있고 둘째 항에서 $\partial Q_i / \partial \delta_j, \partial Q_i / \partial V_j$ 는 뉴턴-랩슨 전력조류계산의 자코비안을 구할 때와 마찬가지로 구할 수 있다. 그리고 $d\delta_j, dV_j, d\lambda$ 는 연속조류계산의 예측과정에서 계산되는 접선벡터의 성분에 해당한다. 따라서 각 연속스텝에서의 부하증가에 따른 무효전력 발전감도는 연속조류계산의 중간과정의 정보를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

3.2 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘

발전기 모선의 무효전력 발전감도를 이용한 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 소개한다. 그림 3에서 k 번째 연속스텝에서 j 모선 발전기의 무효전력 발전 예를 보이고 있다.

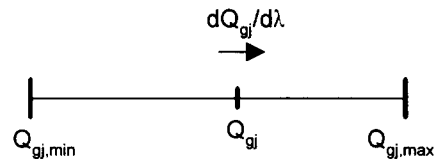


그림 3 무효전력 발전예
Fig. 3 Example of reactive power generation

그림 3에서 Q_{gi} 는 현재 무효전력 발전을 나타내고 $dQ_{gi}/d\lambda$ 는 무효전력 발전 감도에 해당한다. 그리고 $Q_{gi,max}, Q_{gi,min}$ 는 각각 무효전력 발전 상,하한에 해당한다. 현재 부하상태에서 발전감도는 양(+)의 값을 보이고 있고 상한값까지는 $Q_{gi,max} - Q_{gi}$ 의 여유를 가지고 있다. 부하 파라미터 λ 의 증가에 따라 무효전력 발전이 선형적으로 증가한다고 가정하면, 무효전력 발전이 상한값에 이르는 데 필요한 부하 파라미터 증가분 $\Delta\lambda$ 는 다음식으로 구해진다.

$$\Delta\lambda_j^{(k)} = \frac{Q_{gi,max} - Q_{gi}}{dQ_{gi}/d\lambda} \quad (11)$$

위 식을 이용하여 각 발전기 모선의 무효전력 상한에 이르게 하는 부하 파라미터 증가분을 계산될 수 있다. 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘은 이 증가분중 가장 작은 값을 선택하여 하나의 발전기만 무효전력 상한에 이르도록 하는 스텝크기를 다음식과 같이 계산한다.

$$\sigma^{(k)} = \frac{\min[\Delta\lambda_j^{(k)}]}{d\lambda} \quad (12)$$

여기에서 $d\lambda$ 는 접선벡터에서 λ 에 대한 성분이다. 식 (5)에 위 식으로 계산된 스텝크기를 대입하여 다음해의 추정값을 구할 경우, λ^*_i 은 $\lambda_0 + \min[\Delta\lambda_j^{(k)}]$ 으로 계산된다. 따라서 선형적인 무효전력 발전 증가를 가정했을 때, 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘에 의하여 선택된 스텝크기를 이용할 경우, 다음해의 추정값은 하나의 발전기만 무효전력 발전 한계에 이르게 하는 부하 파라미터를 증가시키도록 계산된다.

전력조류계산에서 무효전력 발전은 상태변수(모선 전압위상각, 전압크기)에 대한 종속변수이므로[8], 부하증가에 대하여 무효전력 발전이 한계값에 이를 때까지 선형적으로 증가

한다고 볼 수 없다. 그러므로 한 조류해에서 선형화된 무효전력 발전감도를 이용하여 식 (12)로 계산된 스텝크기로써 다음해의 추정값을 구하고 이로부터 수정과정을 통하여 정확한 조류해를 구하였을 때, 스텝크기 선택의도와 같이 하나의 발전기 모선이 무효전력 발전한계에 다다르게 될 수도 있지만 그렇지 않은 경우가 발생할 수 있다.

그림 4에서 부하 파라미터 λ 에 따른 한 발전기의 무효전력발전 곡선 예를 보이고 있다. 기본 조류해에서 스텝크기가 선형화된 감도로써 이 발전기가 무효전력 한계(Q_{gmax})에 이르도록 계산되는 $\Delta\lambda_1$ 에 의하여 결정되었다고 하자.

무효전력 발전의 증가는 선형성을 갖지 않기 때문에, 첫번째 연속스텝에서 무효전력 발전한계에 이르지 않게 된다. 두번째, 세번째 연속스텝에서 또한 선형화된 감도에 의해 계산된 $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$ 로써 결정된 스텝크기는 발전기의 무효전력 발전한계에 이를 때까지 λ 를 증가시키지 않는다. 따라서 이 경우, 위에서 설명한 스텝크기 선택 알고리즘으로 스텝크기를 계산할 경우 한 발전기가 무효전력 발전한계에 이르기까지 여러번의 연속스텝이 필요하거나 극단적인 경우 한 발전기가 무효전력 한계에 이를 때까지 무한번의 연속스텝이 요구될 수 있다. 사례연구에서 이러한 문제에 대하여 자세히 설명되며 본 논문에서는 이를 보완하기 위한 수정 알고리즘을 제시한다.

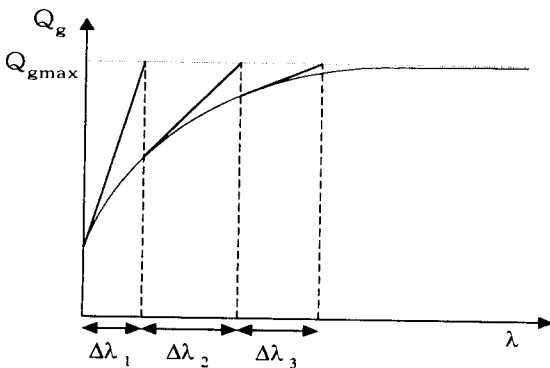


그림 4 한 발전기의 무효전력발전 곡선 예

Fig. 4 Example curve of reactive power generation

위에서 소개한 스텝크기 선택 알고리즘을 보완한 수정 알고리즘의 기본 아이디어는 무효전력 발전감도를 이용하되 한번 스텝크기 선택에 이용된 발전기는 스텝크기 결정에 있어 다시 이용하지 않는 것이다. 수정 알고리즘이 스텝크기 선택에 적용될 때, 그림 4에서의 발전기가 첫 연속스텝에서 스텝크기 선택에 사용되었다면 $\Delta\lambda_1$ 만 스텝크기 결정에 이용되며, $\Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ 는 이용되지 않고 대신 다른 발전기의 부하 파라미터 증가분이 이용된다.

3. 3 TVI(tangent vector index)이용 알고리즘의 소개

사례연구에서 수정 알고리즘을 이용하였을 때와 최근 소개된 TVI를 이용하는 알고리즘[7]의 수행성을 비교하게 되므로, TVI를 이용하는 알고리즘에 대하여 간단히 설명한다. i번째 모선의 TVI는 다음 식과 같이 정의된다.

$$TVI_i = \left| \frac{dV_i}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (13)$$

여기에서 dV_i , $d\lambda$ 는 접선벡터의 성분이다. 정적인 전압불안정점부근에서 큰 감도를 보이는 약한모선의 경우 위 지표

는 2차의 감소를 나타낸다. TVI를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘은 TVI의 2차 감소 특성을 이용하여 대략적으로 정적인 전압불안정점을 구하고 이 점까지 부하를 증가시키는 스텝크기를 선택한다. 조류해의 경로에서 두 점을 알고 있다고 했을 때, λ 는 TVI의 2차식으로 다음과 같은 표현된다.

$$\lambda = a TVI_i^2 + c \quad (14)$$

정적인 전압불안정점에서 TVI는 0이기 때문에, 정적인 전압불안정점에서의 부하파라미터 $\lambda_c = c$ 이다. 참고문헌 [7]에서는 접선벡터를 단위화하여 이용하는 알고리즘[2]을 이용하여 첫 번째 다음해를 구한 뒤, 식 (14)의 두 파라미터 a, c 를 계산한다. 그리고 정적인 전압불안정점에서의 부하 파라미터 λ 값을 예측하고 다음식으로 예측과정을 수행한다.

$$\Delta\lambda = c - \lambda_0$$

$$\Delta x = \Delta\lambda \frac{dx}{d\lambda} \quad (15)$$

여기에서 λ_0 은 현재 해에서의 부하 파라미터값이다. TVI 이용 알고리즘은 만약 위 식으로 계산되는 이 다음해의 추정값을 이용했을 때 수정과정에서 수렴하지 않으면 λ 의 증분 $\Delta\lambda$ 를 절반으로 줄여서 수렴될 때까지 계산하는 과정을 포함한다. 따라서 이 알고리즘을 적용했을 때, 수정과정에서 많은 N-R 반복이 필요하게 된다. 또한 이 알고리즘은 영우고유벡터(zero right eigenvector)로써 구해지는 약한 모선을 정적인 전압불안정점까지 조류해의 경로를 구하기 전의 정보만을 가지고 선택하여야 하므로 이에 따른 문제점을 가지고 있다. 반면 TVI 이용 알고리즘은 정적인 전압불안정점을 비교적 정확히 계산하는 특징을 가지고 있다. 참고문헌 [10]에서는 부하 여유(load margin)를 나타내는 지표(New Performance Index)를 제시하였는데, 스텝크기 선택 시 TVI와 비슷하게 이 지표가 이용될 수 있다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 무효전력 발전감도를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘을 적용한 연속조류계산 시스템을 이용하여 뉴 잉글랜드 39모선 시험계통의 조류해 경로를 구하여 본다. 뉴 잉글랜드 39모선 시험계통은 10개의 발전기 모선, 17개의 부하모선, 12개의 중간모선으로 이루어져 있으며 48개의 선로와 13개의 변압기를 가지고 있다. 본 논문에서는 정전력(constant power) 부하모델을 이용하였고 부하증가는 선택된 모선의 부하를 일정역률로 증가시켰다. 또한 전체 부하 증가량을 선택된 각 발전기의 초기 발전 분담비에 따라 분담시켜 전력수급조건을 만족시키도록 하였다. 표 1에서 부하량을 증가시킨 부하모선과 이를 분담한 발전기 모선을 보여주고 있다.

표 1 부하증가 모선과 발전증가 모선

Table 1 Load increasing bus and generation increasing bus

부하증가 모선	발전증가 모선
3,4,7,8,12,15,16,18,20,21, 23,25,26,27,28,29	1,30,32,33,34,35,36,37,38

먼저 충분히 작은 고정 스텝크기로써 조류해의 경로를 자세히 구하였다. 4번 모선에 대한 P-V곡선이 그림 5에서 보이고 있으며 정적인 전압불안정점에서의 전체 유효부하는 8570.54[MW]로 계산되었다.

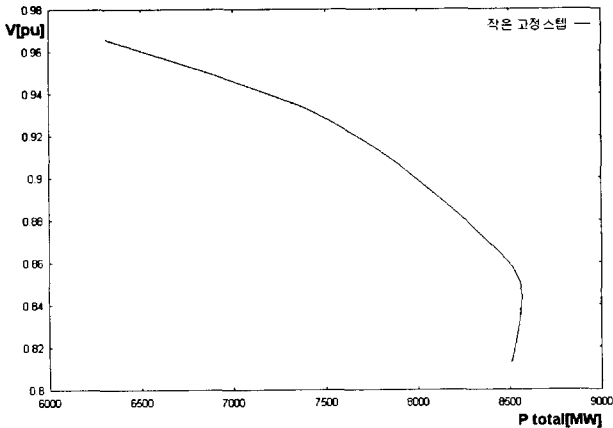


그림 5 작은 고정 스텝크기를 이용한 4번 모선의 P-V 곡선
Fig. 5 P-V curve using the small fixed step length

4. 1 실용적인 스텝크기 선택 알고리즘의 적용

무효전력 발전감도를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘을 적용하여 조류해 경로를 추적하여 보았다. 그런데 이 경우 조류해의 경로를 정적인 전압불안정점까지 성공적으로 구할 수 없었다. 그림 6에서 조류해 경로를 추적한 결과를 알아보기 쉽게 하기 위하여 작은 고정스텝의 경우와 비교하였다. 여기에서 ×표시는 이 알고리즘으로 구한 조류해를 나타낸다.

이 알고리즘을 이용할 때, 스텝크기를 결정하는 데 모든 연속스텝에서 30번 모선의 하나의 발전기만을 이용하였다. 기본해에서의 무효전력 발전감도를 이용하여 30번모선 발전기가 무효전력 발전한계에 다다르도록 스텝크기가 선택되었으나 실제 계산된 두 번째 연속스텝의 조류해에서 30번 모선은 무효전력 발전한계에 다다르지 않았다. 오히려 그림 6의 7500[MW]부근 약간의 조류해의 경로가 꺾이는 부분에서 32번 모선 발전기가 먼저 무효전력 발전상한에 이르렀다. 이것은 부하증가에 따른 무효전력 발전이 선형적으로 증가하지 않음을 알 수 있다. 표 2에서 각 연속스텝에서의 30번 모선의 무효전력 발전량(Q_g)을 보이고 있다.

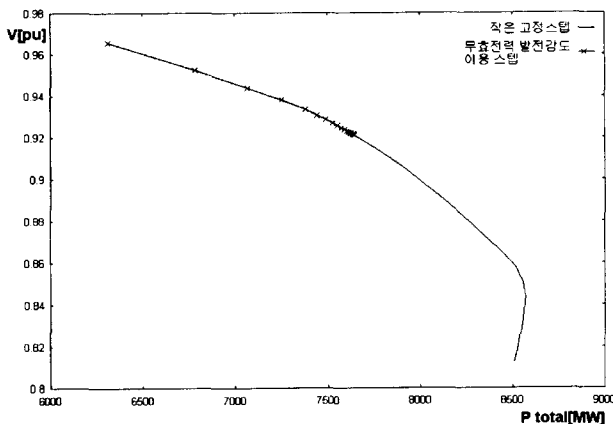


그림 6 무효전력 발전감도를 이용한 스텝크기 적용시 4번 모선의 P-V 곡선
Fig. 6 P-V curve with the step length selection algorithm using reactive power generation sensitivity

표 2 각 연속스텝에서 30번 모선의 무효전력 발전

Table 2 Reactive power generation of bus 30 at each continuation step

연속 스텝	Q _g [MVar]	연속 스텝	Q _g [MVar]	연속 스텝	Q _g [MVar]	연속 스텝	Q _g [MVar]
1	270.22	6	358.44	11	373.47	16	377.94
2	304.72	7	363.16	12	374.83	17	378.36
3	326.68	8	366.74	13	375.90	18	378.70
4	341.51	9	369.55	14	376.74	19	378.97
5	352.40	10	371.75	15	377.41	20	379.18

뉴 잉글랜드 39모선 계통에서 30번모선의 무효전력 발전 상한은 380[MVar]이다. 표 2에서 30번 모선의 무효전력은 연속스텝이 진행됨에 따라 무효전력 발전상한에 가까이 가고 있지만 한계에 이르지는 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 스텝크기의 결정에 이용된 발전기는 다시 스텝크기 선택에 이용하지 않는 수정 알고리즘을 제시하였다.

수정 알고리즘을 이용하여 구한 조류해의 경로가 그림 7에서 보이고 있다. 이 알고리즘을 사용할 때, 정적인 전압 불안정점을 지나칠 때까지 조류해의 경로를 성공적으로 구하고 있음을 알 수 있다. 그림 7에서 정확한 조류해의 경로와 수정 알고리즘을 이용할 때 계산된 조류해를 비교하기 위하여 직선으로 연결하였다.

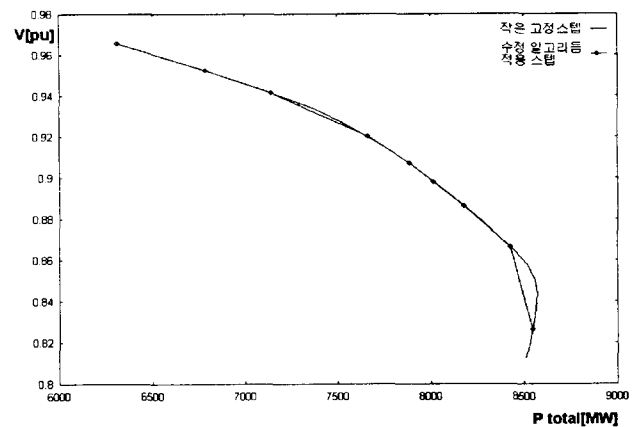


그림 7 수정 알고리즘 적용시 4번 모선의 P-V 곡선
Fig. 7 P-V curve using the small fixed step length

4. 2 수정 알고리즘과 TVI를 이용한 알고리즘의 수행성 비교

수정 알고리즘과 최근에 소개된 TVI를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘[7]과의 수행성을 비교하여 본다. 수정 알고리즘과 TVI를 이용한 알고리즘을 적용한 경우의 P-V곡선이 그림 8에서 보여지고 있다. 여기에서 TVI 이용 알고리즘 적용에 있어 정적인 전압불안정점에서의 약한모선에 대한 정보를 이미 알고 있다고 가정하였다. 그림 8에서 TVI를 이용한 알고리즘을 적용할 경우 5회의 연속스텝으로 정적인 전압불안정점을 지나쳤음을 알 수 있고 비교적 정확히 정적인 전압불안정점을 구하고 있다. 그러나 연속조류계산의 고속화를 위해서는 연속스텝수의 감소와 더불어 각 수정과정의 N-R 반복회수 또한 감소시켜야 한다. 표 3에서 이

두 알고리즘의 정적인 전압불안정점을 지날 때까지의 연속 스텝수와 N-R 반복회수를 보이고 있다.

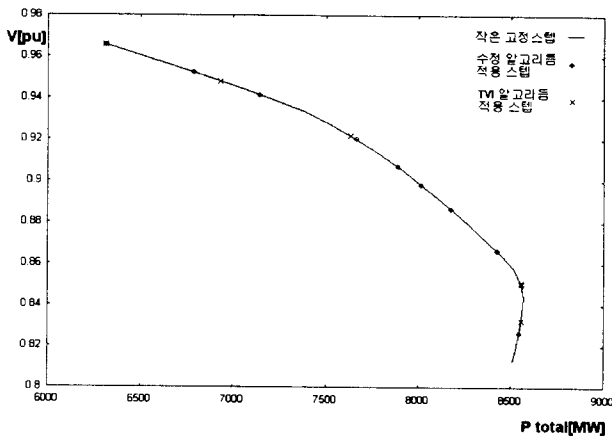


그림 8 수정 알고리즘과 TVI 이용 알고리즘의 적용시 4번 모선의 P-V 곡선

Fig. 8 P-V curve using two step length selection algorithms

표 3에서와 같이 TVI 이용 알고리즘의 경우 5회의 연속 스텝수를 보여 각 연속스텝의 예측과정에서 접선벡터 계산을 줄일 수 있게 된다. 접선벡터의 계산은 식 (4)로 이루어지며, 이것은 N-R 반복 1회의 계산에 해당한다. 반면 수정과정에서의 N-R 반복회수를 살펴보면, 수정 알고리즘의 경우 16회로 TVI 이용 알고리즘보다 5회 작은 수로 보이고 있다. 따라서 뉴 잉글랜드 39모선 시험계통의 경우, 표 3의 합계에서 보이는 것과 같이 본 논문에서 제시한 수정 알고리즘이 TVI를 이용한 알고리즘보다 정적인 전압불안정점을 지나치는 데까지 조류해의 경로를 추적하는 데 있어 보다 나은 수행성을 보이고 있다.

표 3 수정 알고리즘과 TVI이용 알고리즘의 수행성 비교
Table 3 Comparison of performance capability the modified algorithm and that of the algorithm using TVI

구 분	수정 알고리즘	TVI 이용 알고리즘
연속스텝수	8회	5회
N-R 반복회수	16회	21회
합계	24회	26회

다음은 연속조류계산의 수정과정에 dishonest N-R 법[11]을 적용하였을 때, 두 스텝크기 선택 알고리즘의 수행성을 비교하여 본다. 그림 9에서 보이는 바와 같이, dishonest N-R 법의 기본개념은 뉴턴-랩슨 반복을 통해 $h(x)=c$ 의 해(x_s)에 접근해 갈 때, 초기 추정값에서의 계산된 자코비안을 계속 이용하는 것이다.

이 알고리즘을 연속조류계산에 적용했을 경우, PQ모선이 PQ모선으로 바뀌어 자코비안 행렬의 차원(dimension)이 변하지 않는다면 각 연속스텝의 수정과정에서 한번의 자코비안 계산과 행렬분해(matrix factorization)만을 필요로 하므로 대형계통에 대한 연속조류계산 수행시 계산량이나 계산 시간 단축이 가능하다.

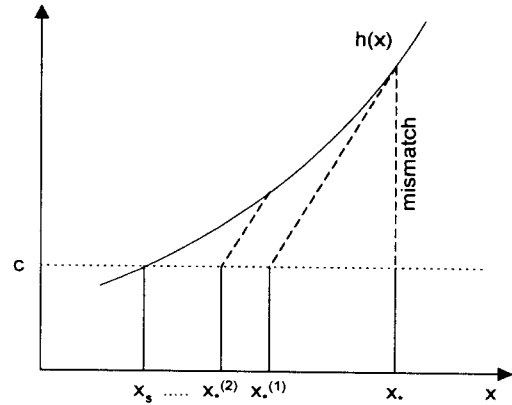


그림 9 dishonest N-R 법의 개념
Fig. 9 Principle of dishonest N-R method

표 4에서 dishonest N-R 법을 적용하였을 때, 수정 알고리즘과 TVI 이용 알고리즘의 수행성을 비교한 결과를 보이고 있다. 두 알고리즘 모두 연속스텝수는 변함이 없었다. N-R 반복회수의 경우, 수정 알고리즘을 이용할 때에는 18회로 N-R 법을 이용할 때와 비교하여 2회 증가만을 보인 반면, TVI 이용 알고리즘을 적용할 때에는 28회로 7회 증가되었다. 따라서 본 논문에서 제시한 수정 알고리즘은 dishonest N-R 법의 적용시 수정과정에서 훨씬 우수한 수렴성을 보이고 있다. 표 4에서, 수정 알고리즘의 경우 N-R 반복회수를 연속스텝수로 나누어 한 연속스텝에서 평균적인 N-R 반복회수를 구하면 2.25회로 계산되어 예측과정에서의 다음해의 추정값이 조류해의 경로와 가깝게 구해지고 있음을 알게 된다. TVI 이용 알고리즘의 경우는 평균적인 N-R 반복회수를 구하면 5.6회로 다음해의 추정값이 조류해의 경로와 멀게 계산되고 있음을 알 수 있다. 이러한 나쁜 초기 추정값(bad initial guess) 문제는 dishonest N-R 법의 대규모 계통 적용시 해의 발산의 원인이 될 수 있다.

표 4 두 스텝크기 선택 알고리즘의 수행성 비교 (dishonest N-R 법 적용)

Table 4 Comparison of performance capability of the modified algorithm and that of the algorithm using TVI (applying dishonest N-R method)

구 분	수정 알고리즘	TVI 이용 알고리즘
연속스텝수	8회	5회
N-R 반복회수	18회	28회
합계	26회	33회

5. 결 론

연속조류계산 시스템은 예측과정, 수정과정, 파라미터화, 그리고 스텝크기 선택에 있어 어떤 알고리즘 사용하느냐에 따라 구분될 수 있다. 본 논문에서는 개발중에 있는 국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산 시스템의 효과적인 수행을 위하여 필수적인 각 연속스텝에서의 계산의 고속화, 수렴성을 동시에 고려하는 유연한 스텝

크기를 선택하는 알고리즘의 하나로서, 무효전력 발전감도를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘과 부하 파라미터의 증가에 대하여 비선형적으로 증가하는 무효전력 발전에 따라 나타나는 문제점을 해결하기 위한 수정 알고리즘을 제시하였다.

사례연구에서는 조류해의 경로를 추적하는 데 있어 수정 알고리즘과 최근 발표된 TVI를 이용한 스텝크기 선택 알고리즘과의 수행성을 비교하여 보았다. 연속조류계산의 수정 과정에서 일반적인 N-R 법의 적용시 수정 알고리즘은 TVI 이용 알고리즘보다 전체적으로 좋은 수행성을 나타내었고, dishonet N-R 법 적용시에는 수정과정에서 강한 수렴성을 보이고 있다. 정적인 전압불안정점의 정확한 계산을 위해서 다른 스텝크기 선택 알고리즘을 같이 이용하든 지, 정적인 전압불안정점 가까이에서는 작은 스텝크기를 이용하는 hybrid형 스텝크기 선택 알고리즘의 개발이 요구된다.

본 연구는 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] K. Iba, H. Suzuki, M. Egawa, and T. Watanabe, "Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, no. 2, May 1991, pp. 584-593.

[2] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 1, Feb. 1992.

[3] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 1, Feb. 1993, pp. 1-8.

[4] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, and N. Balu, "CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations," IEEE Trans. on Power System, vol. 10, no. 2, May 1995, pp. 623-634.

[5] Yakout Mansour, editor, Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis, IEEE Working Group, 93TH0620-5PWR, 1993.

[6] R. Seydel, Practical Bifurcation and Stability Analysis From Equilibrium to Chaos, Springer-Verlag, New York, 1994.

[7] A. C. Z. de Souza, C. A. Cañizares, and V. H. Quintana, "New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vector," IEEE Trans. on Power System, vol. 12, no. 3, Aug. 1997, pp. 1380-1387.

[8] Flatabø, N., O. B. Fosso, R. Ognedal, T. Carlsen and K. R. Heggland, "A Method for Calculation of Margins to Voltage Instability Applied on the Norwegian System for Maintaining Required Security Level," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 3, Aug. 1993.

[9] W. C. Rheinboldt and J. V. Burkardt, "A locally parameterized Continuation Process," ACM Trans. on Mathematical Software, Vol. 9, No. 2, June 1983, pp.

215-235.

[10] H. D. Chiang, C. S. Wang, and A. J. Flueck, "Look-ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large-Scale Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, Feb. 1997.

[11] Samuel D. Conte, Carl de Boor, Elementary Numerical Analysis, New York: McGraw-Hill, 1980.

저 자 소 개



송 화 창(宋 和 昌)

1973년 1월 24일생. 1997년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기·전자·전파공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



이 병 준(李 炳 峻)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사), 1994년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년~1996년 일본 미쯔비시전기 근무. 1996년~현재 고려대학교 전기·전자·전파공학부 조교수.



권 세 혁(權 世 熾)

1949년 5월 14일 생. 1974년 서울대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사), 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학박). 현재 고려대 전기·전자·전파공학부 교수.

학부 교수.