

연속조류계산 시스템의 개발

송화창^o 이병준 권세혁
고려대학교 전기·전자·전파공학부

The Development of a Continuation Power Flow System

Hwachang Song^o Byongjun Lee Sae-Hyuk Kwon
School of Electrical Engineering, Korea University

Abstract

This paper presents the continuation power flow system that is under development. The continuation power flow system provides robust solutions of power flow equations at any operating point. The robust convergency enables one to find solutions even at the point where power flow jacobian becomes singular. Basic concept of an algorithm and its application to static voltage stability analysis are presented.

1. 서론

정적인 전압안정도 해석은 일반적으로 뉴턴-랩슨 반복법을 이용한 전력조류계산으로 이산적인 부하에서의 각 조류해를 구한 뒤 이 조류해들을 연결하여 P-V곡선 또는 Q-V곡선을 작성하고 이를 기초로 한 여러 가지 지표로써 전압안정도를 판단하는 것으로 이루어져 왔다. 그러나 P-V곡선의 꼭지점에 해당하는 정적인 전압불안정점에서 뉴턴-랩슨 전력조류계산의 자코비안이 특이성을 가지므로 이 점과 그 부근에서 조류해를 구할 수 없어 정적인 전압불안정점을 정확하게 결정할 수 없었다.

이러한 문제는 연속 알고리즘을 적용한 전력조류계산으로 성공적으로 제거시킬 수 있다[1, 2]. 연속 알고리즘은 비선형 방정식의 파라미터 변화에 따른 평형해의 경로를 구하는 기법으로 이 알고리즘의 특징은 주어진 방정식의 본래의 수렴성과는 무관하게 강인한 수렴특성을 가지고 있는 것이다.

이 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산은 현재 부하에서의 조류해로부터 다음해의 근사치를 구하는 예측과정(predictor)과 다음해의 근사치로부터 전력조류방정식을 만족하는 정확한 조류해를 구하는 수정과정(corrector)으로 이루어져 있다. 그림 1에서와 같이 연속조류계산은 예측과정과 수정과정을 반복해 가며 조류해의 경로를 구한다.

본 논문에서는 국내에서 처음으로 개발중에 있는 연속조류계산 시스템에 대하여 설명한다. 그리고

개발된 연속조류계산 시스템을 간단한 3모선과 9모선 시험계통에 대해 적용하여 P-V곡선을 작성하고 정확한 정적인 전압불안정점을 구하여 연속조류계산의 유용성을 보이겠다.

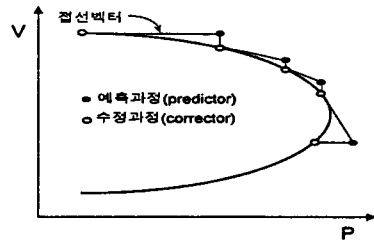


그림 1. 연속조류계산의 원리

2. 연속조류계산의 강인한 수렴성

강인한 수렴성을 가진 연속 알고리즘은 주어진 비선형 방정식의 파라미터 변화에 따른 평형해의 경로를 구하는 기법이다. 우리에게 주어진 문제가 각 부하상대에서의 조류해를 구하는 것이므로 연속 알고리즘을 적용하기 위해서는 먼저 부하 변화를 나타내는 파라미터 λ 를 전력조류방정식에 도입한다. 그러면 재구성된 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$f(x, \lambda) = 0, f \in R^n, x \in R^n, \lambda \in R \quad (1)$$

여기에서 상태변수 x 는 모선헌위상각 δ , 모선헌전압크기 V , tap changer에 의해 전압이 유지되는 모선의 tap setting t 에 해당한다. 먼저 식(1)의 양변을 식(2)와 같이 미분하여 보자.

$$f_x dx + f_\lambda d\lambda = 0 \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 $dx/d\lambda$ 를 구하면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{dx}{d\lambda} = -[f_x]^{-1} f_\lambda \quad (3)$$

현재부하에 대응하는 조류해 x_0 를 초기값으로 하여 구간 $[\lambda_0, \lambda_1]$ 에서 식(3)을 적분하여 보자.

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 - \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} [\mathbf{f}_x]^{-1} \mathbf{f}_\lambda d\lambda \quad (4)$$

\mathbf{f}_x 가 특이성을 갖지 않으면 식(4)를 이용하여 현재 조류해(\mathbf{x}_0, λ_0)를 지나는 다음해 (\mathbf{x}_1, λ_1)를 구할 수 있다. 즉 조류해의 경로를 구하는 도중 다른 곡선으로의 이행가능성이 없어지게 된다. 그러나 \mathbf{f}_x 가 특이성을 가졌을 때는 더 이상 식(4)로는 조류해의 경로를 구할 수 없다. 이를 극복하기 위하여 연속 알고리즘은 다음에 설명되는 예측과정과 수정과정을 이용한다.

2.1 예측과정

예측과정은 알고 있는 현재 조류해(\mathbf{x}_0, λ_0)로 부터 다음해의 근사치를 구하는 과정이다. 다음해의 근사치를 구하기 위해 먼저 현재 조류해에서의 접선벡터를 구한다. 식(2)를 행렬형태로 표현하여 보자.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{x} \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

여기에서 $[d\mathbf{x} \ d\lambda]^T$ 는 접선벡터를 나타내고 있다. 식(5)을 살펴보면 접선벡터를 구하기 위해서 하나의 식이 더 필요하다는 것을 알 수 있다. 이 문제는 접선벡터 성분중 가장 큰 값을 단위량으로 하는 식을 식(5)에 덧붙이는 것으로써 해결된다. 이렇게 원래의 식에 상태변수중 임의의 하나를 선택하는 식을 덧붙이는 기법을 local parameterization이라고 한다. 그래서 덧붙여진 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_\lambda \\ \mathbf{e}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{x} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서 \mathbf{f}_x 가 특이성을 갖게 되더라도 전체 행렬은 특이성을 갖지 않아 접선벡터 $[d\mathbf{x} \ d\lambda]^T$ 를 구하는 데 어려움은 없다. 식(6)에서 구한 접선벡터를 이용하여 현재 조류해(\mathbf{x}_0, λ_0)를 지나는 다음해의 근사치를 다음식으로 구할 수 있다.

$$(\mathbf{x}_1^*, \lambda_1^*) = (\mathbf{x}_0, \lambda_0) + \sigma(d\mathbf{x}, d\lambda) \quad (7)$$

여기에서 스텝크기 σ 는 다음 수정과정의 수렴반경 내에 해의 근사치가 존재하도록 결정되어야 한다.

2.2 수정과정(corrector)

수정과정은 예측과정에서 구한 다음해의 근사치($\mathbf{x}_1^*, \lambda_1^*$)로 부터 전력조류방정식의 정확한 조류해를 구하는 과정이다. 이러한 과정은 다음해의 근사치를 초기 추정값으로 하여 아래식과 같이 수정 전력조류방정식의 평형해를 구하는 뉴턴-랩슨 반복법으로 구현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) \\ \mathbf{x}_k - \eta \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

여기에서 \mathbf{x}_k 는 예측과정에서 다음해의 근사치를 구할 때 가장 크게 변한 상태변수이고 η 는 그 상태

변수의 근사치이다. 그러므로 전력조류방정식에 덧붙여진 식의 의미는 바로 예측과정에서 가장 크게 변한 상태변수를 다음해의 근사치로 고정시키고 다른 상태변수를 변화시켜 가면서 평형해를 구한다는 것이다. 식(8)에 대한 뉴턴-랩슨법의 수정방정식(mismatch equation)은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_\lambda \\ \mathbf{e}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)를 살펴보면 local parameterization 기법에 의하여 하나의 식이 덧붙여져 있음을 알 수 있다. 종래의 뉴턴-랩슨 전력조류계산의 자코비안 \mathbf{f}_x 가 특이성을 갖더라도 \mathbf{f}_λ 와 \mathbf{e}_k 가 덧붙여져 수정된 자코비안은 특이성을 갖지 않게 된다. 그래서 자코비안의 특이성으로 인하여 나타났던 정적인 전압불안정점과 그 부근에서 조류해의 발산의 문제가 강인한 수렴성을 갖는 연속 알고리즘을 적용한 연속 조류계산에서는 발생되지 않게 된다.

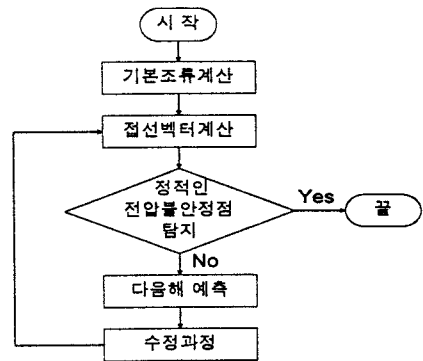


그림 2. 연속조류계산의 순서도

그림 2로 나타나 있는 연속조류계산의 순서도를 살펴보면 먼저 현재 부하에서의 기본조류계산을 실시한다. 그리고 접선벡터를 구한 다음 이 접선벡터를 이용하여 다음해의 근사치를 구하는 예측과정과 이 다음해의 근사치로부터 조류해를 구하는 수정과정을 반복한다. 조류해의 경로를 구하는 과정도중 접선벡터에서의 한 성분인 $d\lambda$ 의 부호가 바뀌게 되면 정적인 전압불안정점을 지나었다고 인지하고 프로그램을 종료한다.

3. 시험계통에 대한 적용

연속조류계산에 대한 이해를 돕고 그 유용성을 보이고자 간단한 3모선과 9모선 계통에 대하여 개발된 연속조류계산을 적용시켜 보았다.

그림 3에 보인 간단한 3모선 시험계통에 연속조류계산 시스템을 이용하여 일정 역률부하증가로 시뮬레이션하였다. 먼저 전압불안정점까지 스텝의 크기를 0.1로 하여 예측과정의 다음해의 근사치와 수정과정의 조류해를 구한뒤 이를 연결하여 그림 4에 나타내었다.

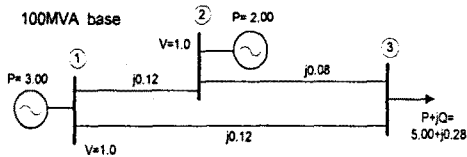


그림 3. 3모선 시험계통

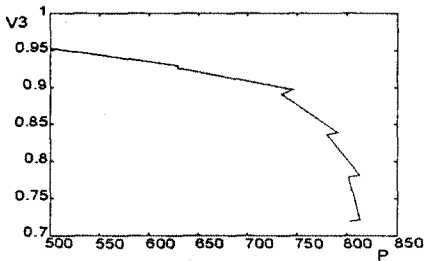


그림 4. 계산결과 I ($\sigma=0.1$)

그림 4에서는 연속조류계산의 예측과정과 수정과정 이 아주 잘 나타나 있다. 다음으로는 정확한 정적 전압불안정점을 계산하기 위하여 스텞의 크기를 1/4로 줄여 0.025로 하고 40회 반복계산하여 조류해 의 경로를 구하였다.

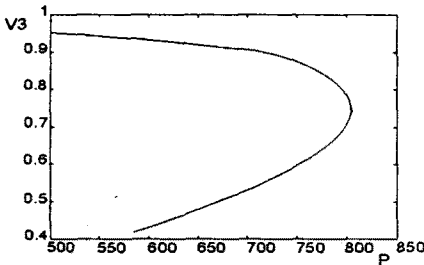


그림 5. 계산결과 II ($\sigma=0.025$)

그림 5에서는 조류해의 경로를 비교적 정확히 보여 주고 있다. 또한 P-V곡선의 꼭지점부근에서 조류해가 계산되었으므로 종래의 전력조류계산의 문제점이었던 자코비안의 특이성에 따른 조류해 수렴의 곤란성이 제거되었음을 알 수 있다. 위에서 구한 정적인 전압불안정점에서 부하의 유효전력은 804.48MW, 3번 모선의 전압은 0.7546[pu]이다.

다음으로는 연속조류계산을 많이 알려진 9모선 시험계통에 적용하여 보았다. 시뮬레이션은 현재 부하로부터 전체부하에 대한 각각 부하의 분담비만큼 일정역률로 증가시켰고, 스텞크기 σ 는 0.05, 반복회수는 40회로 하여 4번 모선에서의 P-V곡선을 작성하였다.

그림 7에 나타난 계산결과에서도 또한 P-V곡선의 꼭지점에 해당하는 전압불안정점과 그 부근에서 정확한 조류해가 구해졌음을 알 수 있다. 계산된

정적인 전압불안정점에서 전체부하의 유효전력은 552.35MW, 4번 모선의 전압은 0.6672[pu]이다.

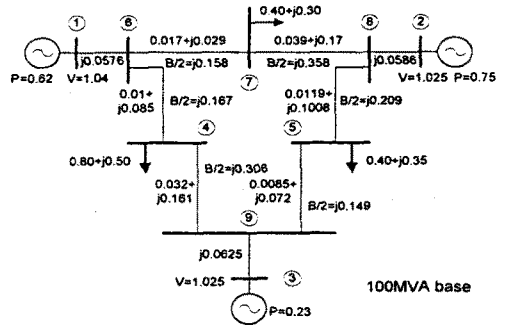


그림 6. 9모선 시험계통

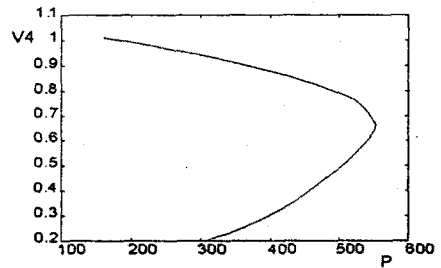


그림 7. 계산결과 III ($\sigma=0.05$)

3. 결론

지금까지 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산에 대하여 설명하고 개발된 연속조류계산 시스템을 3모선과 9모선 시험계통에 적용하여 각각의 정확한 정적인 전압불안정점을 구하여 그 유용성을 보였다. 현재 개발중에 있는 연속조류계산 시스템은 local parameterization에 의하여 덧붙여져 수정된 자코비안으로 강인한 수렴성을 가지게 되어 정적인 전압불안정점과 그 부근에서 정확한 조류해를 구할 수 있다. 그리고 종래의 이산적인 부하증가 방법과는 달리 현재부하값만을 이용하여 조류해의 경로를 계산하므로 효과적으로 P-V곡선을 작성할 수 있는 장점이 있다.

[참고 문헌]

- [1] V. Ajjarapu, et al., "The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 1, Feb. 1992.
- [2] 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. Power System, vol. 10, no. 2, May 1995, pp. 623-634.