

전압 안정도 해석 프로그램 개발을 위한 객체지향 모델링

김현섭* 김중형* 신명철* 조인숙* 권명현** 이춘모***
*성균관 대학교 **여주대학 ***충청대학

Object-Oriented Modeling for Implementing Voltage Stability Analysis Program

H.S.Gil* J.H.Kim* M.C.Shin* I.S.Cho* M.H.Kweon** C.M.Lee***

*Dept. of Electrical and Computer Eng. Sungkyunkwan Univ. **Yeooju College ***Chungcheong

Abstract - This paper introduces the concepts of UML(Unified Modeling Language) and the applying this technique for implementing voltage stability analysis program. Conventional function-oriented software development methodologies are inadequate to support further maintenance and enhancement. To overcome drawbacks of these methodologies, this paper proposes applying object-oriented technology for voltage stability evaluation software development. In this paper, a modal analysis approach, a steady-state voltage stability evaluation method, is used and UML is applied to the analysis and design for software development.

1. 서 론

최근에 세계적으로 전력 계통 내에서 부하측의 예기치 못한 무효전력 요구를 보충해주지 못해 전압 불안정 현상이 자주 발생하고 있으며, 또한 이는 종종 전압 붕괴의 원인이 되기도 해 전력 계통의 새로운 문제로 인식되고 있다. 이러한 전압 저하 현상은 수요의 급격한 증가라든지 복수의 송·변전 설비의 정지 등으로 계통 내의 무효 전력 손실이 급증하였을 때 이에 대응하는 무효 전력 공급이 뒤따르지 못하고 전압이 계속 저하해서 광범위한 부하의 탈락을 초래하는 것이다.[1]

따라서, 전력 계통의 계획이나 운용을 위해 적절한 전압 안정도 해석이 요구되고 있다. 그러나, 전력 계통은 그 규모가 매우 크고 복잡한 시스템이며, 많은 변화가 있는 동적인 시스템이어서 전압 안정도 해석을 위해서는 전력 계통의 방대한 자료 처리와 그에 따른 많은 양의 계산을 수행해야 한다. 그리고, 전압 안정도 해석과정에서 조류해석의 결과를 상당부분 이용하고 있으므로 이미 개발된 조류해석 프로그램을 이용하면 매우 효율적이다. 그러나, 이러한 조류계산 프로그램과 연계 그리고, 계통의 계속인 확장과 소프트웨어 사용환경을 비롯한 전력 계통의 운용 조건 변화 등에 따른 전압 안정도 해석 프로그램의 유지와 보안을 위해서는 기존의 함수 지향적 개발기법은 한계를 가지고 있다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제안된 보다 유용한 소프트웨어 개발방법이 객체지향적 접근(object-oriented approach)이다. 객체 지향적 접근 방법은 소프트웨어 변화나 확장을 용이하게 해줄 뿐만 아니라, 기존의 여러 소프트웨어 구성요소(component)를 이후에 다시 재사용(reuse)하게 함으로써 위에서 열거한 소프트웨어의 문제점을 해결할 수 있는 좋은 개발 방법으로 제시되고 있다.[2]

그러나, 기존의 객체 지향기법을 적용한 전력 계통 프로그램의 대부분은 객체지향 프로그래밍 언어의 재사용성을 이용하고 있을 뿐 재사용할 수 있는 프로그램을 개발하지는 못하고 있어 재사용이 가능한 프로그램을 위해 적절한 모델링 언어를 선택하고 그를 이용한 체계적이고 다각적인 객체지향 분석과 설계가 요구된다.[3]

본 논문에서는 객체지향 분석 및 설계를 위한 도구로 1997년 8월 OMG(Object Management Group)에 의해 객체지향 모델링 언어의 산업 표준으로 승인되어 현재 널리 쓰여지고 있는 UML(Unified Modeling Language)을 사용하여 전압 안정도 해석 프로그램 개발을 위한 객체지향 모델링을 수행한다.

2. 본 론

2.1 전압 안정도

만약 시스템의 모든 모선에 대해 같은 모선의 무효전력 상승에 따라 모선 전압의 크기가 증가하면 계통은 주어진 동작점에서 전압 안정이다. 역으로 같은 모선의 무효전력 상승에 따라 모선 전압의 크기가 감소하는 모선이 한 개라도 존재하면 계통은 주어진 동작점에서 전압 불안정이다.[4]

발전기 또는 외부 계통의 상태 변화가 작아 계통 특성의 변화가 완만할 경우 계통의 제어 장치를 고려하지 않고, 정적인 특성만을 고려하는 것을 정태 안정도(steady state stability), 또는 소신호 안정도(small signal stability)라 정의한다. 전압 안정도 해석은 시스템의 제어와 많은 고장 시나리오에 대한 조사를 요구하는데, 이러한 응용을 위해서는 정태 해석에 근거한 기법이 유용하다. 정태 안정도 해석에도 여러 가지 기법이 있는데, 그중 몇 가지 전통적인 방법에 다음과 같은 것들이 있다.[5]

- V-Q 곡선에 의한 해석
- V-Q 감도에 의한 해석
- L index에 의한 해석
- 모드(mode)해석 기법

이중 본 논문에서는 모드해석 기법을 전압 안정도 해석 기법으로 선택했다.

2.2 전압 안정도 평가를 위한 모드(Mode) 해석 기법

본 논문에서는 객체지향 기법을 적용할 정태 전압 안정도 해석 기법으로 복잡한 전력 계통에서의 전압 붕괴 예측, 정확한 여유정도와 전력 전송 한계 명시, 전압 불안정이 일어날 수 있는 voltage-weak 점과 지역구별, 고장에 대한 보호와 제어를 위한 시스템 특성에 대한 상세한 정보 제공 등 많은 장점을 가지고 있는 모드 해석 기법을 사용한다.[6-7]

또한 모드 해석 기법은 다른 기법들이 전통적인 조류해석에 적용되는 계통 모델에 제한되는데 비해 계통 설비들의 특성에 따라 동적 해석을 위한 계통 모델로의 확장이 용이하며, 확장성·유연성·재사용성 등의 특징을 가지고 있는 객체지향 기법을 적용하기에 적합한 전압 안정도 해석 기법이다.

2.2.1 자코비안 행렬의 간략화

모드 해석 기법은 자코비안 행렬의 고유치 해석을 이용하는데, 전압 안정도에서 필요한 것은 ΔV 와 $(\Delta P, \Delta Q)$ 의 관계이므로 계산의 효율을 위해 자코비안 행렬을 간

략화 한다. 선형화된 정태 시스템 전력 전압 방정식

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

- ΔP = 모선 유효전력 변화량
- ΔQ = 모선 무효전력 변화량
- $\Delta \theta$ = 모선 전압 위상각 변화량
- ΔV = 모선 전압 크기 변화량

(1)식을 줄이기 위해, $\Delta P=0$ 이라 하면, 그 때

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \Delta V = J_R \Delta V \quad (2)$$

여기서, 축소된 자코비안 행렬(reduced Jacobian matrix)

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (3)$$

2.2.2 전압 불안정 모드(mode)에 의한 안정도 해석

축소된 자코비안 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (4)$$

여기서,

$\xi = J_R$ 의 우측 고유 벡터

$\eta = J_R$ 의 좌측 고유 벡터

$\Lambda = J_R$ 의 대각 고유치 행렬

그리고,

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (5)$$

(2)식과 (5)식으로부터,

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (6)$$

또는,

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (7)$$

$\xi_i = J_R$ 의 i 번째 열 우측 고유벡터

$\eta_i = J_R$ 의 i 번째 행 좌측 고유벡터

각 고유치 λ_i 와 대응하는 좌·우측 고유벡터 η_i 와 ξ_i 를 시스템의 i 번째 모드(mode)로 정의된다.

대응하는 i 번째 mode의 전압 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (8)$$

이 식으로부터, 각 고유치 λ_i 의 크기는 대응하는 mode의 전압 취약점(voltage weakness)을 결정한다. λ_i 의 크기가 작을수록, 대응하는 mode의 전압은 더 약해진다. 만약 $|\lambda_i| = 0$ 이라면, mode의 무효전력 변화량에 관계없이 mode의 전압 변화량은 무한한 양이 되어 i 번째 mode의 전압은 붕괴할 것이다. 또한 위 식으로부터 전압안정도를 위해 자코비안의 고유치 λ_i 가 양(+)이어야 함을 알 수 있다.

2.2.3 참여 계수(participation factor)

모드 해석 기법은 시스템의 전압 안정도 여유와 그에 대한 모선, 선로, 발전기 등의 계통 요소들의 참여 정도에 대한 정보를 제공한다.

(1) 모선 참여도(Bus Participations)

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (9)$$

(2) 선로 참여도(Branch Participations)

$$P_{lji} = \frac{\Delta Q_{lji}}{\Delta Q_{l \max i}} \quad (10)$$

(3) 발전기 참여도(Generator Participations)

$$P_{gki} = \frac{\Delta Q_{gki}}{\Delta Q_{g \max i}} \quad (11)$$

2.2.4 J_R 의 고유치와 고유벡터 계산

수천개의 모선을 가지고 있는 시스템의 모든 고유치를 계산하는 것은 비현실적이고 불필요하다. 따라서, 완전한 자코비안 행렬 또는 축소된 자코비안 행렬을 이용해서 최소 고유치와 그에 대응하는 좌·우 고유벡터를 계산하는 알고리즘을 사용한다. 만약 J_R 의 m 번째 가장 작은 고유치가 결정된다면, 시스템의 m 번째 덜 안정한 mode를 알 수 있다. 이러한 개념을 이용하여 J_R 의 고유치와 고유벡터를 계산한다. 본 논문에서는 우측 고유벡터에만 관심을 갖고 있으므로 좌우 고유 벡터를 동시에 계산하는 ILSI(Implicit Inverse Lop-sided Simultaneous Iteration) 알고리즘 보다 좀 더 효율적이고 융통성이 좋은 LOPSI(Lop-sided Simultaneous Iteration) 알고리즘을 사용한다.

일반적인 행렬 A에 대해 가장 큰 크기의 m 고유치와 관계된 고유 벡터를 계산한다. 계산 과정은 다음과 같다.

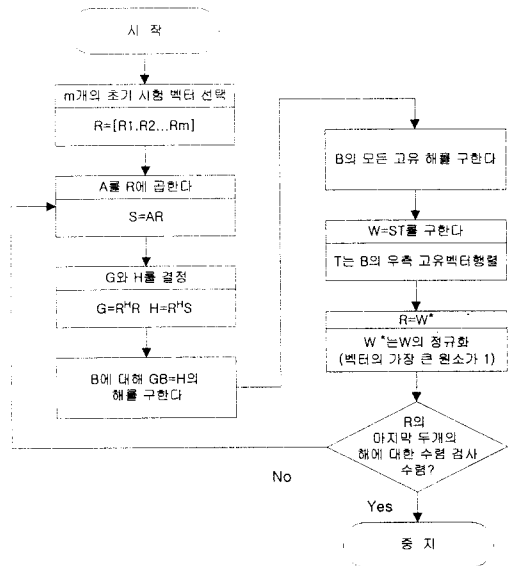


그림 1 LOPSI 알고리즘의 순서도

만약 계산 결과 R의 마지막 두개의 해가 수렴한다면, B의 고유치는 A의 m 번째 가장 큰 고유치 그리고, R은 대응하는 우측 고유벡터를 계산하는데 이용한다. A^T 에 같은 과정을 적용하여 A의 m 번째 가장 큰 고유치와 관계된 좌측 고유벡터를 계산하는데 이용한다.

2.3 객체지향 UML을 이용한 분석 및 설계

앞서 설명한 전압 안정도 평가방법을 바탕으로 객체지향 방법론을 이용한 프로그램 개발을 성공적으로 수행하기 위해서는 몇 가지 중요한 요소가 요구되는데, 그 중에서 요구사항 분석과 설계는 프로그램 개발의 성공 여부를 가름할 정도로 중요한 과정이다. 이 과정은 보통 소프트웨어 공학에서 말하는 시스템 구축 단계를 나타내는데, 1단계 요구사항 분석, 2단계 시스템 설계 및 디자인, 3단계 구현, 4단계 시험 등의 4단계로 나누어 수행한다. 본 논문에서는 객체지향 분석 및 설계 도구로 UML을 이용한다. 그리고, 요구사항 분석, 설계, 구현, 시험의 단계를 시간의 흐름에 따라 각 단계를 명확하게 구분하여 순차적으로 완료할 경우 개발 초기에 발견되지 못한 문제점을 구현이나 시험 단계에서 발견할 수 있다. 따라서, 요구사항 분석, 설계, 구현, 시험의 작업을 여러 번 나누어 계속 반복해야 한다.

2.3.1 전압 안정도 평가 프로그램의 클래스 다이어그램
원하는 프로그램의 개발을 위한 분석 및 설계를 위해서
필요한 첫 단계가 클래스의 추출이다.

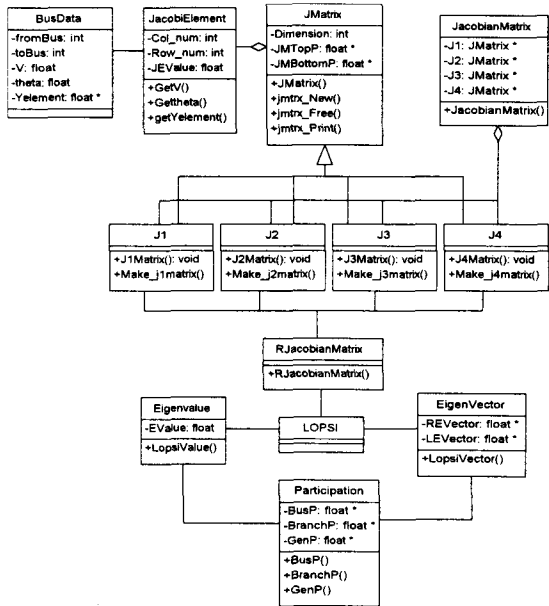


그림 2 클래스 다이어그램

자코비안 행렬의 원소들을 $J_{P\theta}$ 을 J1, J_{PV} 을 J2, $J_{Q\theta}$ 은 J3, J_{QV} 은 J4 클래스로 만들었고, 이 클래스들의 일반적인 특성을 모아 상속관계를 관계를 갖는 슈퍼클래스에 해당하는 JMatrix 클래스를 만들었으며, 이 클래스들의 제어를 위해 JacobianMatrix 클래스를 만들었다. 그리고, BusData 클래스로부터 모선 자료(전압 크기, 전압 위상각, 임피던스 행렬 원소)를 받아 자코비안 행렬 원소의 계산을 JacobiElement 클래스에서 수행하도록 하였다. $J_{P\theta}$, $J_{Q\theta}$, $J_{Q\theta}$, J_{QV} 행렬간의 연산을 통해 구해진 간략화된 자코비안 행렬을 위해 RJacobiMatrix 클래스를 만들었고, LOPSI 알고리즘을 통해 구해진 고유치와 고유벡터의 계산과 저장을 위해 Eigenvalue 클래스, Eigenvector 클래스를 만들었다. 참여도는 Participation 클래스에서 보여주도록 했다.

이 단계에서 너무 상세한 내용을 기입하면 구현 단계에서 이루어져야 할 일들이 클래스 다이어그램 내부에서 이루어지는 오류를 범하게 되므로 대략적인 속성과 연산을 클래스 내부에 기입하였다.

2.3.2 전압 안정도 평가 프로그램의 시퀀스 다이어그램

앞에서 클래스 다이어그램을 통해 객체들간의 정적인 관계를 보여 주었는데 클래스의 객체들이 시스템 내에서 어떻게 상호작용 하는지를 보여주는 인터랙션(interaction) 다이어그램이 필요하다. 시퀀스 다이어그램(Sequence Diagram)과 콜레보레이션 다이어그램(Collaboration Diagram) 두 가지가 있는데, 시퀀스 다이어그램은 객체들의 상호작용을 "시간의 흐름"에 따라 표현한 것이고, 콜레보레이션 다이어그램은 객체들의 정적인 관계를 중심으로 상호작용을 표현한 것이다. 본 논문에서는 전압 안정도 평가를 위해 자코비안 행렬을 구하는 것에서부터 각 계통 설비의 참여도 계산까지 일련의 과정이 시간의 흐름에 따라 이루어지므로 시퀀스 다이어그램으로 나타냈다.

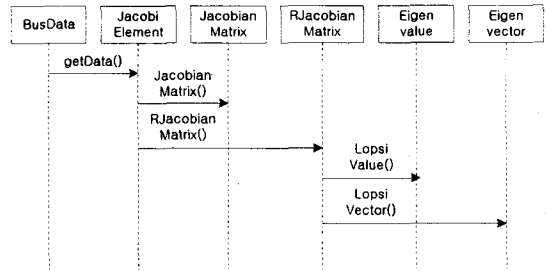


그림 3 시퀀스 다이어그램

최초에 조류계산 결과를 저장한 BusData 클래스로부터 데이터를 얻어 고유치와 고유벡터를 Eigenvalue 클래스와 Eigenvector 클래스에 저장하기까지의 과정을 시간의 순서에 따라 쉽게 확인할 수 있다.

3. 결 론

객체지향형 전압 안정도 해석 프로그래밍에 앞서 체계적이고 다각적인 객체지향 분석 단계를 도입함으로써 전압 안정도 해석 방법을 프로그램으로 구현할 때 발생하는 논리적인 오류나 불필요한 프로세스를 사전에 제거하여 신뢰성을 높이고 개발 기간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 객체간의 명확한 관계 규정을 통해 프로그램 코드 가독성의 향상 등 체계적인 객체지향기법 적용으로 프로그램 구현시 객체지향기법의 여러 장점을 얻을 것으로 기대된다.

또한 객체지향 분석 및 설계 방법론에서 제시하는 기준을 가지고 충분한 분석과 설계를 함으로써 객체지향 기법이 갖는 프로그램 확장의 유연성이나 재사용성을 최대한 발휘할 수 있게 될 것이다. 따라서, 설계된 전압 안정도 해석 프로그램에 이미 개발된 조류해석 프로그램을 비롯한 여러 가지 전력 계통 해석 프로그램을 이용할 수 있으며, 또한 개발된 전압 안정도 해석 프로그램을 다른 전력 계통 해석 소프트웨어에 쉽게 재사용 할 수 있다. 그리고, 본 논문에서 습득한 객체지향형 분석 및 설계 기법을 다른 해석 분야에 확대 적용함으로써 전력 계통의 어렵고 복잡한 문제들을 체계적이고 효과적으로 해결할 수 있는 방법을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송길영, "신변전력계통공학", 동일 출판사, 1999.
- [2] 김종형, "조류계산 프로그램을 위한 객체지향형 분석 및 설계 기법", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, 1999.
- [3] 최일훈, "UML의 철저한 해부가 시작된다", 마이크로 소프트웨어, 1999.2.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1993.
- [5] B. Gao · G. K. Morison · P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp.1529-1541, November 1992.
- [6] N. Flatabo · R. Ognedal · T. Carlsen, "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990.
- [7] P. Kunder · G. J. Rogers · D. Y. Wong · M. G. Lauby, "A Comprehensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power Systems", IEEE Transaction on Power Systems", Vol. 5, No. 4, pp.1076-1083, November 1990.