

전력계통의 미소신호 안정도 해석에서 계산시간 단축에 관한 연구 : 크러스터링 기법에 대하여

권 세 혁 김 덕 영 *
고려대학교 전기공학과

The reduction of computer time in small-signal stability analysis in power systems : with clustering technique

KWON SAE-HYUK KIM DEOK-YOUNG
Korea University

ABSTRACT

This paper represents how to reduce the computer time in small signal stability analysis by selecting the dominant oscillation modes with frequency of 0.5 to 1.2 Hz using the clustering technique. Clustering technique links the buses which are expected to be similar with zero-impedance lines and the voltage variations of these buses are regarded to be identical. The computer time was reduced remarkably with this technique and the effect of clustering will be powerful in the analysis of large-scale power systems.

1. 서론

전력계통에서 동기발전기의 안정도 문제는 가장 핵심적인 부분으로 인식되고 있으며, 계통의 안정운용 한계를 평가하는 데는 일반적으로 대신호 안정도와 미소신호 안정도의 두 가지 관점에서 안정도 판별을 하고 있다. AESOPS 프로그램은 미국 EPRI 연구소에서 개발한 전력계통의 주파수영역 해석 프로그램으로서 시간영역 해석 프로그램으로는 연기가 곤란한 발전기 회전자전동에 관련된 많은 진동모드를 확실히 구별하고, 각 진동모드에 연관된 고유치의 실수부에서 그 진동모드의 계동특성을 명확히 알 수 있으며, 또한 진동모드에 큰 영향을 미치는 발전기들의 분포를 알 수 있다. 그러나 AESOPS 프로그램은 고유치의 초기값에 대응하는 외한을 발전기에 가해주고, 반복계산에 의해 고유치를 구하는 프로그램으로서, 고유치의 초기값에 매우 민감하여, 동일 발전기가 몇 개의 진동모드에 참여하고 있는 경우, 초기값에 따라 다른 진동모드로 수렴하거나 심지어 발산하는 경우도 생기게 된다.

이러한 고유치의 초기값에 관한 문제는 계통고유치에 대한 사전지식이 전혀 없는 경우 초기값의 허수부를 모든 발전기에 대해서, 전기기계적 진동모드의 주파수 영역이라 할 수 있는 0.5~3.0 Hz 까지 단계적으로 증가시켜 가면서 고유치를 찾는 방법에 의존할 수 밖에 없다. AESOPS 프로그램은 고유치 해석에 발전기 단자수의 3승에 비례하는 계산 시간이 소요되며, 따라서 모든 발전기에 대해서 주파수를 증가시켜 가면서 고유치를 찾는다는 것은 실로 방대한 계산 시간을 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 계통의 고유치 해석시 전체 진동모드 중에서 중요(Dominant) 진동모드라 할 수 있는 0.5~1.2 Hz 사이의 진동모드만을 해석하고, 또한 기계적특성이 같거나 지역적으로 인접한 발전기들을 증분전압 계산시에 등가적으로 취급하여 계산시간을 단축시키는 방법에 대해 살펴보고자 한다.

2. 프로그램의 개요

2.1 AESOPS 프로그램의 개요

AESOPS 프로그램은 전력계통의 미소신호안정도 문제의 주파수영역해석 프로그램으로서, 발전기 회전자들 사이의 전기기계적 진동모드를 구하는 프로그램이다. 이 프로그램은 계통의 상태행렬을 구성하지 않고 반복법에 의해 고유치를 구하는 방법으로서, 최대 350대의 발전기와 2500개의 모선 그리고 3600개의 선로로 구성된 대규모계통의 해석이 가능하다.

AESOPS 프로그램의 고유치계산 과정은 다음과 같다.

- (1) 고유치의 초기값($\sigma + j\Omega$)을 사용하여 계통의 회로망 방정식과 발전기 방정식으로부터 발전기의 단자전압과 내부전압을 구한다.
- (2) 발전기의 단자전압과 내부전압으로부터 외부토크 T_x 를 계산한다.
- (3) 외부토크 T_x 와 고유치의 초기값($\sigma + j\Omega$)을 사용하여 새로운 고유치를 구한다.

$$\alpha = \sigma + \frac{T_{XR}\Omega - \sigma T_{XI}}{4\Omega\omega_R H}$$

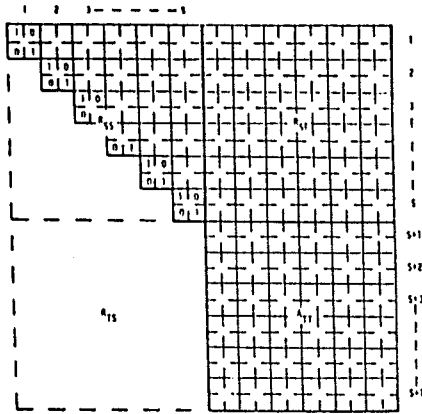
$$\beta^2 = \Omega^2 - \frac{T_{XI}\Omega + \sigma T_{XR}}{2H\omega_R} - \left[\frac{\Omega T_{XR} - \sigma T_{XI}}{4H\omega_R\Omega} \right]^2$$

단, $T_x = T_{XR} + j T_{XI}$
H : 관성정수

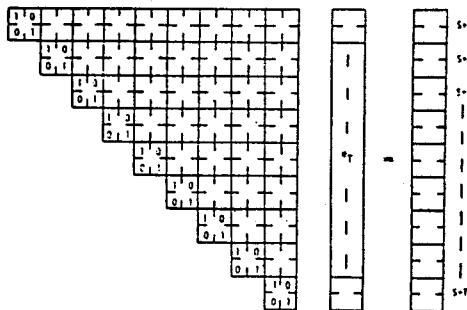
- (4) 위의 (1)~(3)의 계산을 반복하여 고유치의 변화분이 허용한계내에 수렴하면 계산을 종료한다.

2.2 크러스터링 기법

AESOPS 프로그램의 내부구조 중에서 고유치 계산과정에 가장 많은 계산시간을 차지하고 있는 부분은 회로망 어드미턴스 행렬의 발전기단자수로의 축약과 축약된 행렬을 가우스소거법을 이용하여 푸는 과정이다. AESOPS 프로그램 내부의 회로망 어드미턴스 행렬의 단자모선수로의 축약과정과 가우스소거법을 이용한 풀이과정은 그림 1과 같다.



(a) 회로망 어드미턴스 행렬의 단자모선수로의 축약과정



(b) 가우스소거법을 이용한 단자전압 계산과정

그림 1. 회로망 어드미턴스 행렬의 단자모선수로의 축약과정과 가우스소거법을 이용한 단자전압 계산과정

크러스터링 기법은 크러스터링으로 묶은 발전기들의 중분전압이 이들을 포함하는 발전기의 중분전압과 같다는 가정하에 기계적특성이 같거나 지역적으로 인접한 발전기들을 임피던스가 0 인 선로로 연결하여 묶어준다. 이 때 크러스터링으로 묶여지는 발전기들의 관성정수는 이들을 포함하는 발전기의 관성정수에 더해지며, 발전기들의 내부 어드미턴스 값은 각 발전기들의 대각요소에서 빼어서 이들을 포함하는 발전기의 대각요소에 더해지게 된다. 이 과정후 어드미턴스 행렬을 발전기 단자모선수로 축약하면, 축약된 어드미턴스 행렬의 크기는 이전에 비해 크러스터링으로 묶은 발전기의 수만큼 작아지게 되어 단자전압의 계산에 소요되는 계산시간은 크게 감소하게 된다.

3. 실제통에의 적용

86년 심야 양수발전기 기동시의 계통에 대해 고유치 해석을 하였다. 양수발전기는 발전량이 (-)인 발전기로 취급하

였으며, 이때의 계통의 발전기의 수, 모선수, 선로수, 그리고 부하의 크기는 표 1과 같다.

표 1. 86년 심야계통 구성개념

발전기의 수	모선수	선로수	부하의 크기[MW]
43	290	480	6500

3.1 감쇠율이 불량한 진동모드의 선별계산

일반적으로 진동모드의 주파수가 낮을수록 감쇠율이 불량한 것으로 알려져 있으며 문헌조사 및 계통해석결과 주된 관심의 대상이 되는 지역간 진동모드(Inter-area Mode)는 0.5 ~ 1.2 Hz 사이의 주파수를 가짐을 알게되었다. 본 연구에서는 이 주파수 범위내에서 각 구동발전기(Driven Gen.)를 허수축상에서($\alpha=0$) 주파수를 0.12 Hz씩 증가시키면서 안정도 해석을 하였다.

3.2 크러스터링 기법의 적용

앞에서 설명한 바와 같이 발전기정수가 유사하거나 지역적으로 인접해 있는 발전기들을 크러스터링 기법을 사용하여 임피던스가 0 인 선로로 연결하여 묶으면 계산시간을 상당히 단축시킬 수 있게 된다. 발전기정수가 유사한 발전기들을 크러스터링 기법으로 묶으면 원래의 계통의 고유치와 근사값의 고유치가 구해지지만, 발전기정수가 유사하지 않은 발전기들을 묶으면 크러스터링 기법을 사용하지 않은 경우에 구한 고유치값과 차이가 크게 된다. 즉 고유치 계산시에 크러스터링 기법을 과다하게 사용하는 경우 계산시간은 크게 감소하는 대신에 부정확한 고유치가 구해지게 되며 진동모드를 발견하지 못하는 경우도 생기게 된다.

위의 계통에 다음과 같이 크러스터링 기법을 적용하였다.

- 케이스 1 : 발전기정수가 같은 발전기
- 케이스 2 : 발전기정수가 유사한 발전기
- 케이스 3 : 케이스 2 + 수력발전기들을 3개의 크러스터링으로 표현
 - 그룹1 : 발전기출력 : 1 - 10 MW
 - 그룹2 : 발전기출력 : 10 - 20 MW
 - 그룹3 : 발전기출력 : 20 MW 이상
- 케이스 4 : 케이스 2 + 수력발전기들을 1개의 크러스터링으로 표현
- 케이스 5 : 지역적 인접 발전기
- 케이스 6 : 케이스 4 + 지역적 인접 발전기

일반적으로 수력발전기는 출력이 작으며 따라서 계통에 미치는 영향이 작은 것으로 간주되어, 이들 수력발전기들을 출력에 따라 3등급으로 분류하여 케이스 3에 나타내었으며, 케이스 4는 이들을 하나의 크러스터링으로 묶은 경우이다. 케이스 5는 같은 발전소에 있는 발전기들을 크러스터링으로 묶은 경우이다. 이때의 크러스터링 그룹은 표 2와 같다.

표 2. 크러스터링 그룹 모선목록

<p>케이스 1 : 43 Gen. → 32 Gen.</p> <p>(인천1,2호기) (팔당1,2호기) (파천2,3호기) (춘천1,2호기) (의암1,2호기) (충주1,2호기) (영월1,2호기) (소양1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기)</p>
<p>케이스 2 : 43 Gen. → 28 Gen.</p> <p>(인천1,2호기) (팔당1,2호기) (화천1,2,3,4호기) (춘천1,2호기) (의암1,2호기) (충주1,2호기) (영월1,2호기) (소양1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기) (청평1,2호기) (삼랑진양수1,2호기)</p>
<p>케이스 3 : 43 Gen. → 24 Gen.</p> <p>(팔당1,2호기, 청평1,2호기, 화천1,2,3,4호기) (소양1,2호기) (춘천1,2호기, 의암1,2호기, 충주1,2호기) (인천1,2호기) (영월1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기) (삼랑진양수1,2호기)</p>
<p>케이스 4 : 43 Gen. → 22 Gen.</p> <p>(팔당1,2호기, 청평1,2호기, 화천1,2,3,4호기, 소양1,2호기, 춘천1,2호기, 의암1,2호기, 충주1,2호기) (인천1,2호기) (영월1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기) (삼랑진양수1,2호기)</p>
<p>케이스 5 : 43 Gen. → 25 Gen.</p> <p>(인천1,2호기) (팔당1,2호기) (청평1,2호기) (화천1,2,3,4호기) (춘천1,2호기) (의암1,2호기) (영동1,2호기) (충주1,2호기) (영월1,2호기) (소양1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기) (고리2,3,4호기) (삼랑진양수1,2호기)</p>
<p>케이스 6 : 43 Gen. → 19 Gen.</p> <p>(팔당1,2호기, 청평1,2호기, 화천1,2,3,4호기, 소양1,2호기, 춘천1,2호기, 의암1,2호기, 충주1,2호기) (인천1,2호기) (영월1,2호기) (보령1,2호기) (서천1,2호기) (삼천포1,2호기) (삼랑진양수1,2호기) (영동1,2호기) (고리2,3,4호기)</p>

표 2의 크러스터링 그룹에 대한 진동모드와 이 값을 원래 계통의 초기치로 사용하여 최종적인 값으로 수렴할 때까지의 반복회수는 표 3과 같다. 표 3에서 계산시간은 NAS AS/XL V50 컴퓨터기종을 사용한 경우이며, CPU단위는 SEC이다.

표 3. 크러스터링 계통의 계산시간과 진동모드의 비교

원래계통			
CPU : 418.71 SEC			
-.1188 + j 5.0347			
-.5856 + j 6.5471			
-.5834 + j 7.2441			
-.7262 + j 7.2673			
케이스 1	회수	케이스 2	회수
CPU : 186.12 SEC		CPU : 129.55 SEC	
-.1188 + j 5.0345	1	-.1188 + j 5.0346	1
-.5876 + j 6.5476	2	-.5876 + j 6.5476	2
-.5805 + j 7.2413	2	-.5805 + j 7.2413	2
-.7103 + j 7.2698	5	-.7005 + j 7.2665	8

케이스 3	회수	케이스 4	회수
CPU : 93.39 SEC		CPU : 63.03 SEC	
-.1190 + j 5.0363	1	-.1200 + j 5.0479	2
-.5810 + j 6.5855	3	-.6090 + j 6.8522	5
-.5806 + j 7.2414	2	-.5806 + j 7.2414	2
-.7949 + j 7.2682	10		
케이스 5	회수	케이스 6	회수
CPU : 93.37 SEC		CPU : 43.76 SEC	
-.1240 + j 5.0360	3	-.1253 + j 5.0492	3
-.5872 + j 6.5479	1	-.6147 + j 6.8538	7
-.7035 + j 7.2601	7		

표 3에서 케이스 1에서 케이스 3까지는 4개의 중요진동모드를 모두 발견할 수 있으며, 케이스 3의 경우 최대 10회의 반복계산으로 원래의 고유치값으로 수렴하며, 계산시간은 22x로 단축된 것을 알 수 있다. 케이스 4에서 케이스 6까지는 크러스터링을 과다하게 사용한 경우로서, 중요진동모드가 발견되지 않은 것이 있으며, 케이스 6의 경우 계산시간은 원래의 계통에 비해 10.5x로 단축되었으나, 진동모드는 반 밖에 발견되지 않은 것을 알 수 있다. 즉 발전기의 출력력을 기준으로 출력의 차가 10MW 이내의 발전기들을 크러스터링으로 묶은 경우가 계산시간을 단축하면서 중요진동모드를 모두 발견할 수 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 계통고유치에 대한 사전지식이 전혀없는 계통에 대해서 AESOPS 프로그램을 사용하여 고유치 해석을 하는 경우 과다하게 소요되는 계산시간을 단축하기 위해서, 중요 진동모드의 주파수범위라 할 수 있는 0.5 ~ 1.2 Hz의 범위내에서 크러스터링 기법을 사용하여 계산시간이 현저하게 단축되는 것을 보였다. 이 예에서는 발전기 출력의 차가 10MW 이내의 발전기들을 크러스터링으로 묶는 것이 가장 적절하며, 이 경우 계산시간은 약 22x로 단축되는 것을 알 수 있다. 계통의 고유치 해석에서 크러스터링에 의한 계산시간의 단축효과는 계통의 규모가 커질수록 커지게 되며, 대규모 계통의 고유치 해석에 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

5. 참고문헌

- [1] R.T.Byerly, D.E.Sherman, and B.J.Bennon, "Phase II: Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems", Vol.1,2,3,4 and 5, Research Project 744-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, April, 1982.
- [2] 한국전력공사 고려대학교 생산기술 연구소, "전력계통의 저주파 계통동요 해석과 안정화 대책에 관한 연구", 89M-J05, 한국전력공사 계통운용처, 1991.6.
- [3] 한국전력공사 보고서, "계통 동요현상 분석", 한국전력공사 발전처, 1987.5.
- [4] P.M.Anderson and A.A.Foud, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.