

PSS/E를 이용한 전력계통 축약에 관한 연구

김진이* 문승일
서울대학교

A Study on Power System Reduction using PSS/E

Jin-Yi Kim* Seung-Il Moon
Seoul National University

Abstract - 전력계통 과도현상을 모의해석 하는 실시간 시뮬레이터의 경우 계통 요소들을 자세히 모델링하여 과도 현상을 모의해석 하는 것은 아주 높은 정도의 계산 부담을 치루어야 한다. 특히 이러한 시뮬레이터는 계통 크기의 제한을 가지므로 대규모 계통에 대한 과도현상 해석이 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유로 시스템 해석시 중요하다고 여겨지는 부분만을 자세히 모델링하고 나머지 부분은 상대적으로 간단하게 표현하는 축약 계통의 사용이 요구되어진다.

본 논문에서는 국내에서 가장 널리 사용되는 PSS/E를 이용해 얻은 다이나믹 데이터를 축약계통 구성에 그대로 이용할 수 있는 지수를 개발하고 이를 K-Means 알고리즘에 적용시켜 coherent한 발전기 그룹을 식별하였다. 마지막으로 제안하는 방법의 타당성을 검토하기 위하여 IEEE New England 10기 39모선에 대한 계통 축약이 수행되었다.

1. 서 론

전력계통이 대규모 조밀한 망 구조를 가지게 됨에 따라 전력계통의 안정적인 운영을 위하여, 전력 조류 계산 및 미소 신호 안정도 해석에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 대규모 비선형 계통에 대한 상세 해석시 과거에 문제시되었던 연산시간에 대한 어려움은 컴퓨터의 비약적인 발전으로 그 제한이 완화되고 있으나, 전력계통의 과도 현상을 모의 해석하는 실시간 시뮬레이터의 경우 H/V에 의해 여전히 규모의 제한을 받으므로 현실적으로 대규모 계통의 과도 현상 분석은 불가능하다. 따라서, 전력 계통의 동적/정적 특성을 반영할 수 있는 등가 계통의 개발이 요구되어진다.

계통 축약 분야의 기존의 논문들을 살펴보면 크게 두 해석을 통해 사고에 민감하지 않은 모드를 찾아 그 state를 제거하는 방법[1]과 사고에 대한 계통 응답특성을 보고 같이 스윙하는 발전기들을 하나의 등가 발전기로 바꿈으로써 계통의 규모를 줄이는 방법[2]이 있다. 전자의 경우 축약된 계통이 계통의 기본 구조를 그대로 유지할 수 없으므로 독립된 계통으로 표현될 수 없다는 단점을 가지며, 후자의 경우 제거되는 모드가 없으므로 계통의 기본 구조를 그대로 유지한다는 장점이 있으나 수학적으로 완벽하게 해석하기가 용이하지 않다는 단점을 가진다. 이후에 두가지 방법의 단점을 보완하기 위하여 계통의 모드를 관찰하여 "coherent"한 발전기 그룹을 식별하는 방법들[3]이 제시되었다. 이러한 일련의 연구들은 대부분 연구의 목적을 coherency 특성을 나타내는 위상각[4]이나 상태 행렬[5]을 구하는 쪽에 관심을 두고 있다.

그러나 시스템 선형화 과정에서 비선형 특징이 많이 생략될 수밖에 없다는 사실과 계통의 Off-Line 해석이 과거와는 달리 어려운 문제가 아니라는 점을 감안할 때, Off-Line 해석을 통한 계통 축약에 관한 연구의 필요성이 대두된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 연구들과 접근 방식을 달리하여 Off-Line 시뮬레이션을 통한 발전

기 위상각 특성을 조사하여 coherent한 발전기 그룹을 결정하는 과정을 제시하였으며 이러한 접근법이 정상상태 뿐만 아니라 과도 상태 시스템의 전체적인 특성을 포함시키는데 매우 효과적인 방법을 보여줄 것이다.

이를 위해 국내에서 가장 많이 사용되는 계통 해석 시뮬레이터인 PSS/E를 이용해 얻은 다이나믹 데이터를 축약계통 구성에 그대로 이용할 수 있는 관계지수를 개발하였고 이를 기초로 발전기 그룹을 식별하는 알고리즘을 제시하였다.

2. 본 론

일반적으로 계통의 축약은 다음과 같은 4가지 단계를 통하여 이루어진다.

- 단계1. 발전기 "coherency" 특성 확립
- 단계2. 발전기군 식별
- 단계3. 발전기 통합
- 단계4. 네트워크 축약

아래의 내용은 각 단계에 대한 간략한 설명과 상세한 절차를 나타내고 있다.

2.1 발전기 coherency 관계 지수 개발

발전기가 서로 "coherent"하다는 것은 전기적으로 멀리 떨어진 사고에 대해 서로 다른 두 발전기가 같은 패턴으로 스윙한다는 것을 말하는데 이럴 경우 두 발전기를 하나의 등가 발전기로 대체하여 계통의 규모를 줄일 수 있다(6). 다시 말해, 내부계통에 외란 발생시 PSS/E 다이나믹 해석을 통해 시간에 대한 외부 계통 발전기 위상각을 관찰하여 서로 동일한 특성을 가지는 발전기 그룹을 찾아내는 것이 관건이라 할 수 있다.

만약 각 발전기가 수초동안 시뮬레이션 되어 N개의 위상각 데이터를 얻는다면, J번째 시간에 대한 I번째 발전기의 위상각을 $A'(I, J)$ 로 표시하며 발전기들의 관성의 크기 차이와 사고전 상대적인 위상차를 제거하기 위해 식(2)와 같이 원래의 위상각 함수를 그 평균으로 빼준후 정규화 시켜 수정된 스윙 커브를 구한다.

I번째 발전기와 K번째 발전기 사이의 coherency index는 유사성을 표현하는 거리함수인 Euclidean distance를 통해 식(1)과 같이 구해진다.

$$D(I, K) = (\sum_{1 \leq J \leq M} [A(I, J) - A(K, J)]^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$A(I, J) = \frac{A'(I, J) - B(J)}{\text{Max} A'(I, J)} \quad (2)$$

$$B(J) = \frac{\sum_{1 \leq I \leq M} A'(I, J)}{N} \quad (3)$$

여기서,

$D(I, K)$: I번째와 K번째 발전기의 coherency index

$A(I, J)$: I번째 발전기의 수정된 J번째 위상각

$B(J)$: I번째 발전기의 평균

2.2 발전기군 식별 알고리즘

본 논문의 목적은 앞서도 언급했듯이 실시간 시뮬레이터의 규모에 알맞은 수준으로 계통의 규모를 줄이는 것을 목표로 한다. 그러나 기존의 발전기군 식별 알고리즘인 허용오차를 기준으로 하는 알고리즘으로는 발전기 개수를 먼저 정할 수 없다는 단점이 있으므로 본 논문에서는 그룹 수가 미리 정해질 때 이에 최적이 되도록 case를 배치하는 알고리즘인 K-Means 알고리즘을 적용하여 발전기들을 식별하기로 한다.

위에서 언급한 coherency 지수에 알맞은 알고리즘 적용을 위해 기호들을 다음과 같이 선언하였다.

$$A(I, J) \quad (1 \leq I \leq M, 1 \leq J \leq N)$$

: I번째 발전기의 J번째 위상각

$P(M, K)$: 발전기가 그룹에 들어갈 참여도

$B(L, J)$: L번째 그룹안에 포함된 발전기들의 J번째 시간의 위상각 평균

$N(L)$: L번째 그룹안에 포함된 발전기의 개수

$D(I, L)$: L번째 그룹의 평균과 I번째 발전기 거리

$$D(I, L) = (\sum_{\{1 \leq J \leq N\}} [A(I, J) - B(L, J)]^2)^{1/2}$$

$e[P(M, K)]$: 발전기와 그룹 사이 총오차

$$e[P(M, K)] = \sum_{\{1 \leq I \leq M\}} D(I, L(I))^2$$

단계 1: 초기 그룹 ($1 \leq L \leq K$)을 정한다.

$$J(I) = \text{Real} \left\{ K \frac{\text{sum}(I) - \text{MIN}}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 1 \right\} \quad (4)$$

그룹안의 평균 스윙커브를 계산한다.

$$B(L, J) \quad (1 \leq L \leq K, 1 \leq J \leq N) \quad (5)$$

초기 오차 누적율을 구한다.

$$e[P(M, K)] = \sum_{\{1 \leq I \leq M\}} D(I, L(I))^2 \quad (6)$$

단계 2: 첫 번째 발전기에 대해

$$1) \frac{M(L)D(1, L)^2}{M(L)+1} - \frac{M(L(1))D(1, L(1))^2}{M(L(1))-1} \text{ 계산}$$

2) 첫 번째 발전기가 있던 그룹 $L(1)$ 으로부터 발전기를 모든 그룹에 대해 이동시키면서 1)이 minimum 음이 되는 그룹을 찾아 그곳으로 첫 번째 발전기를 옮긴다.

3) $L(1)$ 과 minimum L 의 평균값을 update

4) $e[P(M, K)]$ update

단계 3: 단계 2를 외부 계통의 모든 발전기에 대해 반복 ($2 \leq I \leq M$)

단계 4: 어떤 발전기에 대해서도 이동이 없으면 정지 그렇지 않으면 단계 2로 이동한다.

2.3 발전기 통합

K-means 알고리즘을 통해 발전기군이 결정되면 그룹내의 모선을 기준모선으로 합치는 네트워크 데이터 수정 작업이 이루어지며 그 후 발전기 파라미터 통합이 이루어진다. 다음은 본 논문에서 수행된 발전기 통합 순서이다.

단계 1: 모선 합치기

그룹내의 평균 스윙커브와 와 그룹내 발전기중 거리가 최소인 발전기를 구한다. $\min\{D(I, L)\}$ 그 발전기의 모선을 기준 모선으로 하고 그룹내의 나머지 모선을 기준 모선으로 합치고 선로는 기준 모선에 병렬로 연결하고 발전기 및 제거되는 모선의 부하도 기준 모선에 병렬로 연결한다

단계 2: 발전기 및 부하의 정적 모델 합치기.

병렬로 연결된 성분들을 제거하고 기준 모선에 등가 발전기 및 등가 부하를 단다.

$$P_{ma} = \sum_{i \in (A)} P_{mi}, \quad Q_{ma} = \sum_{i \in (A)} Q_{mi} \quad (8)$$

여기서 등가 과도 리액턴스는 병렬로 처리된다.
단계 3: 발전기 동적 모델 합치기.
다이나믹 모델의 등가 발전기는 관성(H)는 합치고 리액턴스는 병렬로 처리하여 구해진다.

2.4 네트워크 축약

발전기 통합 순서에 의해 외부 발전기들이 등가 발전기로 대체되고 나면, PSS/E의 정적축약법을 통해 자동적으로 네트워크 축약이 수행되는데 이는 내부 계통과 외부 계통을 나누는 경계선로의 전력이 일정하게 유지되도록 하는 방법이다(6).

상세하게 관찰할 내부 계통의 모선을 1이라하고 제거될 외부계통의 모선을 2라하면 다음과 같은 어디미턴스 행렬꼴로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

이제 두 번째 행을 바꾸어 보면 다음과 같다.

$$V_2 = Y_4^{-1}(I_2 - Y_3 V_1)$$

이를 식(9)에 대입하면 식(10)과 같은 네트워크 축약이 이루어진다.

$$I_1 = (Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3) V_1 + Y_2 Y_4^{-1} I_2 \quad (10)$$

3. 사례 연구

IEEE 10기 39모선 New England 계통에 대한 계통 축약이 수행되었다. 그림 1.과 같이 내부 계통과 외부 계통은 접선을 기점으로 세 개의 경계모선을 가지도록 선정되었다. 내부 계통에는 발전기 4대가 포함되고 외부 계통에 발전기 6대가 포함되어 있으며 17번과 18번 모선 사이 선로 개방 2주기 후 사고를 제거하고 2초간 시뮬레이션 하였다.

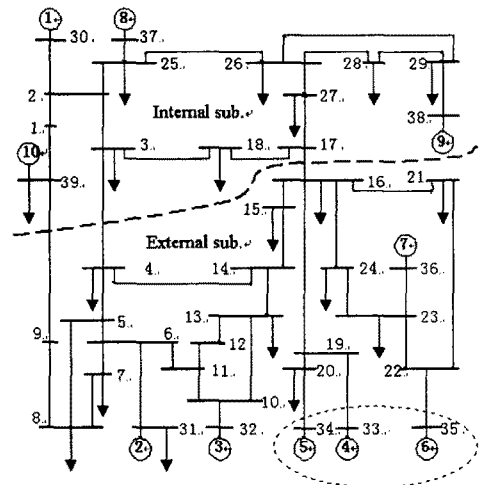


그림 1. IEEE 10기 39모선 계통

발전기 coherency 지수를 관찰하기 위한 총발전기 수는 외부 계통 발전기 수인 6대이고 발전기당 240개의 위상각 데이터를 가진다. 목표로 하는 축약 계통의 발전기 수를 4기로 할 때 K-Means 알고리즘의 그룹수가 4로 지정된다.

다음의 표 1.은 발전기의 coherency 지수를 행렬로 나타낸 값이다. 아래에서 보이는 바와 같이 자기 자신에

대한 coherency는 zero이며 계수가 작으면 작을수록 더 상관관계가 높다는 것을 알 수 있으며 행렬이 대칭 구조를 가지는 것을 볼 수 있다.

표 1. coherency index

$D(I, K)$	2	3	4	5	6	7
2	0	2.995	4.439	4.369	4.613	3.724
3	2.995	0	2.455	2.237	2.254	3.258
4	4.439	2.455	0	1.345	1.767	4.142
5	4.369	2.237	1.345	0	1.942	4.276
6	4.613	2.254	1.767	1.942	0	4.276
7	3.724	3.258	4.142	4.276	4.276	0

이를 발전기군 식별 알고리즘을 이용해 표 2.와 같이 발전기 그룹을 선정한다. 여기서 외부 계통의 발전기 그룹수를 4로 하고 이에 알맞도록 발전기들을 그룹에 배치시키는데 초기 그룹의 전체 오차율이 4.06489인데 반해 알고리즘 수행후 전체 오차율이 2.90211로 줄어든 것을 알 수 있다. 결과적으로 그림 1.에서 보이는 것처럼 발전기 4번, 5번, 6번이 등가 발전기로 선정되었다.

표 2. 발전기 그룹 선정

	초기 그룹	최종 그룹
그룹 1	발전기 7번	발전기 7번
그룹 2	발전기 3번, 5번	발전기 3번
그룹 3	발전기 4번, 6번	발전기 4번, 5번, 6번
그룹 4	발전기 2번	발전기 2번
$e[P(M, K)]$	4.06489	2.90211

그룹 3내의 기준 모선은 그룹내의 발전기들과 평균 스윙커브 사이의 coherency index를 보고 선정되는데 그 결과를 표 3.과 같이 이를 통해 4번 발전기 즉 33번 모선이 기준 모선으로 선정된다.

표 3. 기준 모선 선정 기준

coherency index	value
$D(3,4)^2$	0.67728
$D(3,5)^2$	0.89387
$D(3,6)^2$	1.33096

표 4.는 축약계통과 원계통의 정상상태 모선 전압을 내부 계통에 대해 비교한 결과로 그 값이 상당히 유사한 것을 볼 수 있으며 그 아래의 경계 모선에 흐르는 유효전력이 일정한 것으로 보아 정적 축약이 타당하게 수행되었음을 알 수 있다.

표 4. 정상상태 결과 비교.

모선	원계통		축약계통	
	모선 전압	위상각	모선 전압	위상각
1	1.0462	-9.8	1.0452	-9.9
2	1.0455	-7.3	1.0428	-7.3
3	1.0220	-10.1	1.0162	-10.2
17	1.0294	-9.0	1.0188	-9.1
18	1.0252	-9.9	1.0165	-9.9

From	To	원계통	축약계통
39	9	15.0MW	15.0MW
3	4	74.8MW	74.1MW
16	17	206.2MW	206.2MW

아래의 그림 2.는 원계통과 축약 계통의 모선3의 전압을 비교한 결과이다. 두 응답특성이 상당히 유사한 것을 관찰할 수 있으며 이를 통해 축약된 계통이 원계통의 다이내믹 특성을 적절히 반영함을 보여준다.

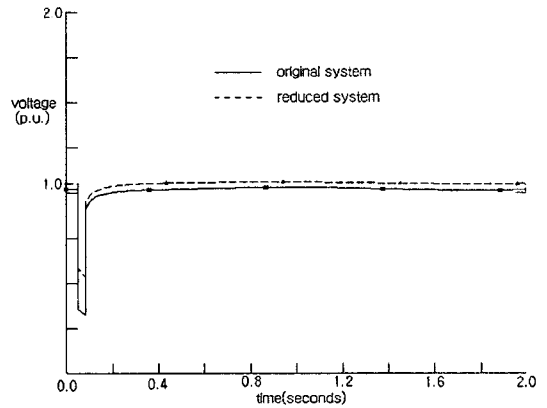


그림 2. 3번 모선의 전압의 크기

4. 결 론

본 논문에서 실시간 시뮬레이터의 H/W 규모에 알맞은 수준으로 계통을 축약하기 위한 방법이 제시되었고 이를 위한 coherency index가 개발되었으며 K-means 알고리즘을 적용함으로써 그룹수의 제한이 있는 경우 계통 축약을 이룰 수 있었으며 기준 모선 선정의 기준을 제시하였다. 제시된 절차를 따라 IEEE 10 기 39모선 계통 축약을 수행하고 그 정적·동적 응답 특성을 관찰함으로써 축약된 계통이 원계통에 유사한 특성을 나타내며 효과적으로 계통 규모를 줄일 수 있음을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Ganesh N.Ramaswamy, and Luis Rouco, "Synchronic Modal Equivalencing(SME) for Structure-Preserving Dynamic Equivalents", IEEE Trans. Vol. 11, No.1, pp 19~29, Feb. 1996
- [2] Robin Podmore, "Identification of Coherent Generators for Dynamic Equivalents", IEEE Trans, Vol. PAS-97, No. 4, pp 1344~, July 1978
- [3] P.M. van Oirsouw, "A Dynamic Equivalent using Modal coherency and Frequency Response", IEEE Trans. Vol. 5, No. 1, pp. 289-295, Feb. 1990
- [4] M.H. Haque, "An Efficient Method of Identifying Coherent Generators using Taylor Series Expansion", IEEE Trans., Vol. 3, No. 3, pp. 1112-1118, August 1988
- [5] 김형준, 장길수, 윤용범, 이진, "대규모 계통의 동적 축약에 관한 연구", 전기학회논문지, 제 49권, pp.399-404, 8월 2000년
- [6] Jan Machowski, Jamusz W. Kialeck, Power System Dynamics and Stability, Chichester: John, Wiley & Sons Ltd., pp389, 1997