

상태변수들의 관계지수를 이용한 전력시스템 축약기법 연구

이병하 오민혁*
인천대학교 전기공학과

A study on aggregation method using relation index of state variables in the power system

Byung-Ha Lee Min-Hyuk Oh*
Department of Electrical Engineering, University of Incheon

Abstract - Increasing interconnection of power plants in modern large electric power system has made power system dynamic studies much more complex. For effective analysis of the power system, model reduction and aggregation is required. In this paper, a new relation index is presented to identify the coherent generators in the large scale power system. In order to demonstrate the effects of this relation index, it is applied to a small scale power system of IEEE 39-bus test system and the simulation results are presented.

Key Words : aggregation method, relation index, coherency

1. 서 론

현대의 전력시스템은 갈수록 대형화, 복잡화되어 가고 있는 추세인데다, \$H_{\infty}\$ 제어 및 LQG/LTR 제어 등의 다변수 제어기법을 포함하는 최신 제어 이론들은 제어기가 복잡하게 되고 차수가 크게 증가하는 등의 문제가 있으므로, 효과적으로 최신제어 기법들을 적용하기 위해서는 전력시스템의 동적인 특성을 동가적으로 표현하면서도 간략화하기 위한 축약기법을 적용하여야 한다. 대규모 전력시스템에 복잡한 현대제어기법 들을 적용하는데 지장이 없도록 축약하는 기법과 이에 근거 해서 현대의 고급제어이론들을 보다 용이하고 효과적으로 적용하는 기법들을 확립하여 전력제통의 안정도를 더욱 향상시키는 연구가 필요하다. 대규모의 연계된 전력시스템의 수많은 안정도 연구들을 수행하는 것은 계산적으로 방대하고 엄청난 시간과 노력이 요구된다. 대규모 전력 시스템에 대하여 많은 시나리오들이 분석되어야 할 때 계산적인 노력을 줄이기 위하여 동적 등가가 널리 사용되어 왔고, 이에 적합한 동적등가기법에 대한 연구가 꾸준히 수행되어 왔다[1]-[5].

본 논문에서는 모드를 구하지 않고 상태행렬과 초기 값으로부터 직접 밀접한 그룹을 찾는 관계계수를 제안하고 이 관계지수에 의해 그룹을 축약하는 방법이 제시되고, 소규모 전력시스템에 적용하여 그 효과를 보여 준다.

2. 동적 축약

2.1 발전기의 동적 모델링

대부분의 coherency확인 기법들은 역학을 표현하기 위하여 고전적인 발전기 모델을 사용하지만, 발전기 전압이 일정하게 유지된다고 가정하는 고전적인 발전기 모델보다는 전압변화가 발전기들의 coherency에 미치는 영향을 모델링하고 분석하기 위하여 시스템 전압과 전압제어장치들을 포함하는 모델로 확장되는 것이 바람직하다. 발전기의 동적 동작을 묘사하기 위하여 IEEE-Type I 여자기를 갖고 있는 2축 모델의 발전기 \$i\$의 미분방정식들은 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s, \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{Mi} - (E'_{qi} - X'_{di} I_{di}) I_{qi} - (E'_{di} - X'_{qi} I_{qi}) I_{di} - D'_a (\omega_i - \omega_s), \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$T_{di} \frac{dE'_{di}}{dt} = -E'_{di} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di} + E_{fdi}, \quad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$T_{qi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = -E'_{qi} + (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi}, \quad i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$T_E \frac{dE_{fdi}}{dt} = -(K_{Ei} + S_E(E_{fdi})) E_{fdi} + V_{Ri}, \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$T_{Ai} \frac{dV_{Ri}}{dt} = -V_{Ri} + K_{Ai} R_{fi} - \frac{K_{Ai} K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} + K_{Ai} (V_{refi} - V_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$T_{Fi} \frac{dR_{fi}}{dt} = -R_{fi} + \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi}, \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$

2.2 기존의 전형적인 Coherency 확인 척도

전력 시스템은 대규모 시스템이어서 수많은 진동 모드들이 있는데, 지역간 모드들이 강하게 밀접된 발전기들의 그룹들 간의 운동과 관계되기 때문에 밀접된 발전기들의 그룹들을 확인하는데 지역간 모드들이 활용된다. 모드 분석에 의하여 지역간 모드들이 확인되면 밀접된 발전기들의 그룹들을 확인하기 위하여 발전기 \$i\$와 \$j\$에 대한 로우터 각의 응답이 아래와 같이 표현되어진다.

$$\Delta\delta_i(t) = u_{i1} a_i e^{\lambda_1 t} + u_{i2} a_i e^{\lambda_2 t} + \dots + u_{in} a_i e^{\lambda_n t} \quad (8)$$

$$\Delta\delta_j(t) = u_{j1} a_j e^{\lambda_1 t} + u_{j2} a_j e^{\lambda_2 t} + \dots + u_{jn} a_j e^{\lambda_n t} \quad (9)$$

여기서 \$u_{in}\$는 \$i\$번째 모드에서의 \$n\$번째 상태변수의 동작을 묘사하는 시스템 행렬의 \$n\$번째 고유벡터의 \$i\$번째 요소이고 \$a_n\$은 시스템 행렬의 \$n\$번째 우 고유벡터와 전력시스템의 외란을 반영하는 상태변수들의 초기조건의 곱으로 나타난다. 위 식에서와 같이 발전기 \$i\$와 \$j\$에 대한 로우터 각의 변화가 모드로 표현되므로 각 모드의 계수로 이루어진 벡터를 구성하여 이 벡터가 서로 가까울수록 밀접하게 연관되어 있다고 할 수 있다. 이 벡터를 참여벡터라고 부른다. 따라서, 밀접된 발전기들의 그룹들을 확인하기 위한 아래의 척도가 많이 활용되고 있다.

$$\theta_{ij} = \cos^{-1} \left(\frac{w_i \cdot w_j}{\|w_i\| \cdot \|w_j\|} \right) \quad (10)$$

여기에서 \$w_i = (u_{i1} a_i, u_{i2} a_i, \dots, u_{in} a_i)\$
\$w_j = (u_{j1} a_j, u_{j2} a_j, \dots, u_{jn} a_j)\$

위 식에서 \$\theta_{ij}\$는 벡터 \$w_i\$와 \$w_j\$사이의 벡터 각을 나타내고, 두 발전기 사이의 coherency 척도를 제공한다. \$\theta_{ij}\$가 영으로 더 접근함에 따라 발전기 \$i\$와 \$j\$는 더 밀접되어 있다고 가정할 수

이다.

그러나, 이 척도를 활용하기 위해서는 대규모 시스템의 eigenvalue와 eigenvector를 모두 구해야 한다는 단점이 있다. 전력시스템과 같은 초대형 시스템의 경우 전체의 상태변수들의 고유값에 대한 참여벡터들을 구하는 것이 어려울 뿐만 아니라 시간이 많이 걸리고 복잡하다.

2.3 Coherency 확인 위한 새로운 관계지수

선형화된 전력시스템 모델을 사용하여 발전기들의 coherency를 분석한다. 운전점에서 앞 절에서의 식들을 선형화하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta Y \quad (11)$$

$$0 = C\Delta X + D\Delta Y \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} X &= [X_1^T \dots X_m^T]^T \\ &= [\delta_1 w_1 E_{q1} E_{d1} E_{f1} V_{R1} R_{f1} \dots \delta_n w_n E_{qn} E_{dn} E_{fn} V_{Rn} R_{fn}]^T \\ &= [X_1, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17} \dots X_{m1}, X_{m2}, X_{m3}, X_{m4}, X_{m5}, X_{m6}, X_{m7}]^T \end{aligned}$$

; m 은 발전기의 수; Y 는 모선 전압의 크기와 위상각, 발전기 전기자 전류 등을 포함하는 회로방정식의 변수들; Δ 는 증분을 나타내고 T 는 전치행렬을 나타낸다.

위 식들에서 ΔY 를 소거하여 간단히 하면 아래의 식을 얻는다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = (A - BD^{-1}C)\Delta X = \bar{A}\Delta X \quad (13)$$

위의 상태공간 모델에 기초하여 발전기 i 와 j 를 관련짓는 방정식들은 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{d\Delta X_i}{dt} = \bar{A}_{i1}\Delta X_1 + \bar{A}_{i2}\Delta X_2 \dots + \bar{A}_{im}\Delta X_m \quad (14)$$

$$\frac{d\Delta X_j}{dt} = \bar{A}_{j1}\Delta X_1 + \bar{A}_{j2}\Delta X_2 \dots + \bar{A}_{jm}\Delta X_m \quad (15)$$

여기에서 $\bar{A}_{ik} = [\bar{A}_{i,k1}, \bar{A}_{i,k2}, \dots, \bar{A}_{i,k7}]$,

$$\begin{aligned} \Delta X_k &= [\Delta X_{k,1}, \Delta X_{k,2}, \dots, \Delta X_{k,7}]^T \\ &= [\Delta \delta_k, \Delta w_k, \Delta E_{qk}, \Delta E_{dk}, \Delta E_{fk}, \Delta V_{Rk}, \Delta R_{fk}]^T \end{aligned}$$

이 식에서 \bar{A}_{ij} 가 j 의 발전기의 변화가 발전기 i 에 미치는 영향을 나타낸다는 것을 설명해 주고, \bar{A}_{ji} 는 그 역이다. 발전기 i 의 관점에서 발전기 j 의 변화는 \bar{A}_{ij} 의 정도로 발전기 i 의 변화에 영향을 미치고, 발전기 i 의 변화는 발전기 j 에 \bar{A}_{ji} 의 정도로 영향을 미친다.

발전기모델에서 기기의 로우터 각과 속도는 기기의 특성을 나타내는 가장 효과적인 변수들이다. 특히 발전기의 미분방정식들 중에서 기기들 사이의 밀접성의 정보를 가장 잘 제시해 주고 있는 식은 식 (2)이다.

그리고 발전기의 위상각이 가까운 그룹이 서로 보다 더 밀접한 영향을 미치고, 발전기의 응답특성은 전력시스템의 외란을 반영하는 각 상태변수들의 초기조건에 달려있다.

발전기의 미분방정식들 중에서 기기들 사이의 밀접성의 정보를 가장 잘 제시해 주고 있는 식이 각속도 w_i 에 관한 미분방정식 (2)이므로 발전기 j 가 발전기 i 에 영향을 미치는 관계 계수 R_{ij} 는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$R_{ij} = [\bar{A}_{i2,j1} \cdot \Delta X_{d,j1}(0) + \bar{A}_{i2,j2} \cdot \Delta X_{d,j2}(0) + \dots + \bar{A}_{i2,j7} \cdot \Delta X_{d,j7}(0)] \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (16)$$

여기서 $\bar{A}_{i2,j1}$ 은 j 의 발전기의 1번째 상태변수(δ_j)의 변화가 발전

기의 2번째 상태변수(w_j)의 변화에 미치는 \bar{A} 행렬의 요소를 나타내고, $X_{d,j2}(0)$ 는 전력시스템의 외란을 반영하는 j 번째 발전기의 2번째 상태변수(w_j)의 초기조건을 나타내며, δ_i 는 i 번째 발전기의 로우터의 위상각을 나타낸다. 관계 계수 R_{ij} 는 관계 계수 R_j 와 역의 의미를 가진다.

따라서, 발전기 i 와 발전기 j 사이의 관계 지수 RI_{ij} 는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$RI_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + R_j^2} \quad (17)$$

이 관계지수는 두 기기들이 얼마나 밀접하게 관련되어 있는가의 척도이다. $RI_{ij} > RI_{ik}$ 이면, 발전기 i 는 발전기 k 보다 발전기 j 에 더 밀접한 관련이 있다고 말할 수 있다. 이 관계지수 식의 변수들의 값들은 이미 알고 있는 값이거나 쉽게 구하여지는 값이므로 이 관계지수를 사용하여 아주 효과적으로 발전기들의 밀접성을 판별할 수 있다.

3. 사례 연구

본 논문에서 제시하는 관계지수를 이용하여 전력시스템 측악에 적용하기 위해 IEEE 39 모선 테스트 시스템을 사용하였다 (그림1). 10기의 발전기가 있으며 29개의 부하모선이 있다.

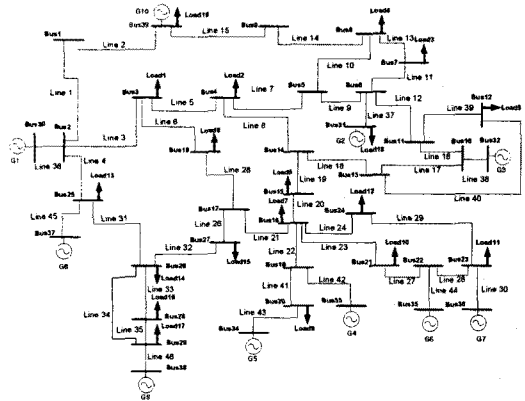


그림1. IEEE 39 모선 테스트 시스템

이 시스템의 동적 특성을 시뮬레이션하기 위하여 모선 3의 부하 차단기가 작동하여 100 MW의 전력이 탈락되는 경우를 가정하였다.

이에 대하여 발전기 간의 관계지수를 계산하여 보면 표 1과 같다.

표1. 발전기 간의 관계지수

No	발전기 그룹	RI ($\times 1E-03$)
1	6, 7	1.63605
2	1, 8	1.59839
3	4, 5	1.59396
4	2, 3	0.98194
5	8, 9	0.78921
6	5, 6	0.52263
7	1, 2	0.46627
8	1, 9	0.46511
9	4, 6	0.54299
10	1, 3	0.40072

표 1에서 가장 밀접한 관계를 갖는 것은 발전기 6과 7이라는 것을 알 수 있고, 3순위까지 등가 축약그룹을 만드는 것으로 하여 테스트한다.

부하모선은 그대로 두고 발전기모선을 축약하는 것으로 하여 등가시스템의 유효성을 테스트하기 위하여 앞에서 언급한 사고 발생시의 시뮬레이션을 수행하고 발전기 6의 로우터 각 변화의 축약 전후의 궤적을 나타낸 것이 그림 2에 제시되어 있다. 그리고 발전기 7과 1의 로우터 각 변화의 축약 전후의 궤적을 나타낸 것이 각각 그림 3과 4에 제시되어 있다. 모두 축약되기 전의 궤적에 상당히 잘 근접된 결과를 보여준다.

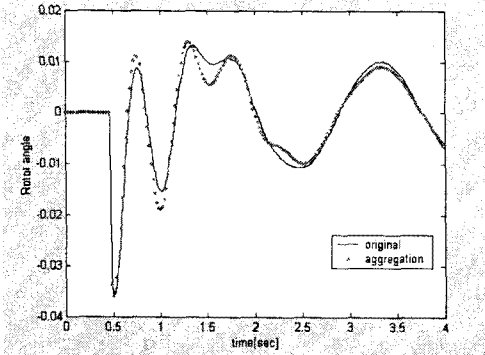


그림2. 축약전과 축약후의 발전기 6의 로우터 각 변화의 궤적

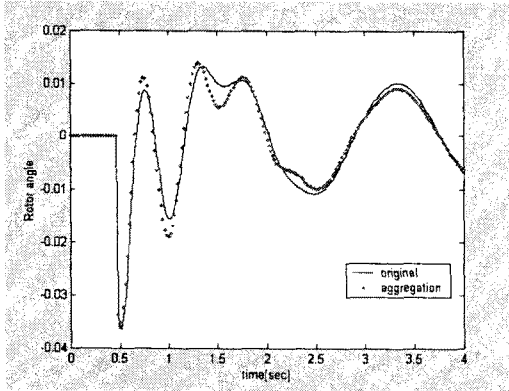


그림3. 축약전과 축약후의 발전기 7의 로우터 각 변화의 궤적

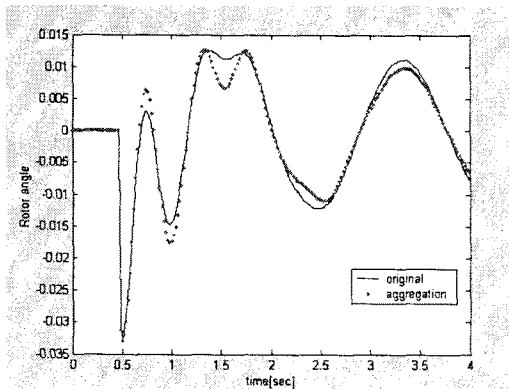


그림4. 축약전과 축약후의 발전기 1의 로우터 각 변화의 궤적

등가시스템들의 정확도를 비교하기 위하여 아래와 같이 정의된 에러의 제곱 평균 함수(RMSE)가 적용되었다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |\delta_i^{original} - \delta_i^{equivalent}|^2 dt} \quad \text{for generator } i \quad (18)$$

여기에서 $\delta_i^{original}$ 은 원 시스템에 대한 발전기 i의 상대적인 로우터 각 응답을 나타내고 $\delta_i^{equivalent}$ 는 등가 시스템에 대한 발전기 i의 상대적인 로우터 각 응답을 나타낸다. T는 수치적인 시뮬레이션의 시간 주기를 나타낸다.

등가 시스템들에 대한 RMSE 값들이 표 2에 주어져 있다.

표2. RMSE의 값들

No	발전기 모선	RMSE 값
1	6	1.533097e-003
2	7	4.129740e-004
3	1	1.530596e-003
4	8	1.533403e-003
5	4	1.662501e-003
6	5	1.794513e-003

4. 결 론

현대의 전력시스템은 갈수록 대형화, 복잡화되어 가고 있는 추세인데다, 다변수 제어기법을 포함하는 최신 제어 이론들은 제어기가 복잡하게 되고 차수가 크게 증가하는 등의 문제가 있으므로, 효과적으로 최신제어기법들을 적용하기 위해서는 전력시스템의 동적인 특성을 등가적으로 표현하면서도 간략화하기 위한 축약기법을 적용하여야 한다. 본 논문에서는 대규모 전력시스템의 경우 다루기가 힘든 모드를 구하지 않고 상태행렬과 초기 값으로부터 용이하게 밀접한 그룹을 찾는 새로운 관계지수를 제시한다. 이 관계지수에 의해 그룹을 축약하는 기법을 소규모 전력시스템에 적용하여 그 효과를 보여 준다. 제안된 관계지수 식의 변수들의 값들은 이미 알고 있는 값이거나 쉽게 구하여지는 값이므로 이 관계지수를 사용하여 아주 효과적으로 발전기들의 밀접성을 판별할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-20 05-7-103)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] J.H. Chow, R. Galarza, P. Accari, and W. Price, "Inertial and slow coherency aggregation algorithms for power system dynamic model reduction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, pp. 19-29, May 1995.
- [2] L. Wang, M. Klein, S. Yirga, P. Kundur, "Dynamic reduction of large power systems for stability studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, pp. 889-895, May 1997.
- [3] S.K. Joo, C.C. Liu, L.E. Jones, J.W. Choe, "Coherency and aggregation techniques incorporating rotor and voltage dynamics", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, pp. 1068-1075, May 2004.
- [4] H. Kim, G. Jang, K. Song, "Dynamic reduction of the large-scale power systems using relation factor", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, pp. 1696-1699, August 2004
- [5] 이동수, 전영환, "모선 간 유사지수에 근거한 새로운 계통축약 기법", 대한전기학회 논문지 Vol. 55A, pp 156-162, Apr. 2006.
- [6] J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby, "Power system dynamics and stability", John Wiley & Sons, NY, 1998.