

박 영 문 * 정 정 원 ** 권 태 원 ** 주 진 부 **
 * 서울대학교 전기공학과 ** 한국전력공사 기술연구원

A New Approach to Dynamic Equivalencing

Y.M. Park* J.W. Jung** T.W. Kwon** J.B. Choo**
 * S.N.U. ** Research Center, KEPCO

ABSTRACT

With the increasing number of power plants in modern electric power systems, power system dynamics studies become more complex. Frequently, only some part of the power system is interesting. So it becomes necessary to reduce the size of dynamics or to introduce the dynamic equivalencing techniques. The major approach of dynamic equivalencing techniques are two: one is coherency approach, which separates machines in groups and combines machines within each group closely swinging together into one equivalent, and the other is modal approach which neglects the fast modes of the external system. In this paper, a new dynamic equivalencing approach which separates machines in coherent groups as the coherency method but doesn't predetermine the structure of the equivalent.

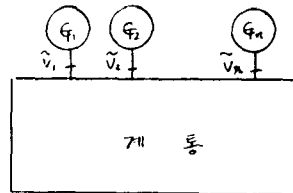
감도복한다. 이에 반해 Modal Method는 Singular Perturbation 기법을 이용해서 전계통의 Dynamics에 대한 선형화 상태방정식을 Modal Transformation 하여 빠른 mode와 느린 mode 로 분리한 다음, 빠른 mode의 Dynamics 를 무시하는 방법이다. Coherency Method 는 계통축약과 더불어 동태등가화로 현실적인 형태로 축소된 모형을 얻을 수 있는 반면 실제와 같은 구조의 발전기로서 등가 발전기를 규정함에 따른 오차 및 등가 발전기의 파라미터를 결정하는 과정에서 출력률 선형화함에 따른 오차를 가져게 되는 단점을 지닌다. Modal Method는 선형화한 운전점 근처에서는 잘 맞으나 운전점을 넘어날수록 오차가 커지고, 축약된 모형은 실재감이 없어지는 단점이 가진다. 본 논문에서는 Coherent group에 대한 등가 발전기가 반드시 실제의 발전기의 구조를 가질 필요가 없다는 점에서 새로운 각도의 동태 등가화모형을 제시한다. 가정으로서는 Coherent Group 내에서의 각 발전기의 상태변수는 서로 Coherent 하고 등가 모형의 상태변수는 각 상태변수의 가중평균으로 본다라는 점이다.

1. 서 론

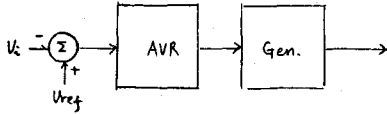
발전계통의 대형화는 발전계통의 계획 및 제어에 있어 여러가지 문제점을 주게 되었는데 그 중에서 대표적인 것이 문제 해결을 위한 계산량의 증가와 계산 시간의 증가라고 할 수 있다. 따라서 효율적인 해결을 위해서는 계산상 계통의 규모를 축소하는 것이 필요하다. 이것은 크게 두 가지로 대별되는데 하나는 계통 규모를 축소하는 것이고, 또 하나는 계통의 dynamics를 축약하는 것이다. 계통 축약에 대해서는 많은 연구가 행해져 왔고 거의 완성 단계라고 해도 과언이 아니다. 동태 등가화에는 Coherency Method 와 Modal Method 가 있는데, Coherency Method는 Coherent Group 의 각 발전기의 단자 전압 (크기와 위상을 가진 복소형태의 전압)이 일정한 비율(복소수)을 가지고 있고 각속도가 동일하다는 가정 하에, 등가 발전기의 출력이 각 발전기의 출력합과 같도록 하는 방법이다. 이때 등가모형의 구조는 미리 정해두며 정해진 구조의 조속기, 터빈, AVR 등에서의 파라미터의 결정은 등가모형의 각부분 전달함수가 각 발전기 대응부분 전달함수의 가중합과 주파수 영역에서 같은 특성을

2. Coherent group에 대한 새로운 동태 등가화 모형

우선 적절한 방법에 의해서 Coherent Group을 선정하였다고 두자. 그림 1은 Coherent Group 을 표시한다. 각 발전기는 그림 2의 block diagram과 같이 간단한 구조를 가정하자.



<그림 1> Coherent group



<그림 2> 발전기의 block diagram

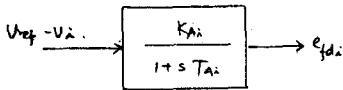
여기에서, Coherent Group의 각 발전기의 단자전압 및 각속도는 다음의 관계가 있다.

$$\tilde{V}_i = \tilde{C}_i \tilde{V} \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

$$\omega_i = \omega \quad i=1, \dots, n \quad (2)$$

여기서, \sim 는 복소수 표시를 뜻함
(\sim 가 없으면 실수값임)
 V, ω ; 등가모형의 단자전압 및 각속도

그림 2에서의 AVR을 그림 3과 같이 두면 각 발전기의 상태방정식은 다음과 같다.



<그림 3> AVR 모형

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (3-a)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad (3-b)$$

$$\frac{de_{fdi}}{dt} = \frac{1}{T_{doi}} (e_{fdi} - e_{f_i}' - (\chi_{di} - \chi_{di}') i_{di}) \quad (3-c)$$

여기서, $i_{di} = \frac{1}{\chi_{di}} (e_{f_i}' - V_i \cos(\delta_i - \theta_i))$

$$\frac{de_{fdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{doi}} (e_{fdi} + K_{Ai}(V_{ref} - V_i)) \quad (3-d)$$

우선 등가모형의 출력은 각 발전기의 출력합과 같고 (2)식의 각속도가 동일하다는 조건에서 (3-a)식을 합하여 아래의 결과를 얻는다.

$$\sum_i M_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_i P_{mi} - \sum_i P_{ei} \quad (4)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_E \quad (5)$$

여기서,

$$M = \sum M_i$$

$$P_M = \sum P_{mi}$$

$$P_E = \sum P_{ei}$$

(4)식에서 알 수 있듯이 등가모형의 관성은 각 발전기의 관성의 합임을 알수있다. 이번에는 회전자각에 대해서 살펴보자. 우선 등가모형의 회전자각도는 다음의

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (6)$$

를 만족한다고 볼 수 있으므로, (4)식과 (5)식을 각각 δ 와 δ 로 표시하면,

$$\sum_i M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = \sum P_{mi} - \sum P_{ei}$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_M - P_E$$

가 되어서 다음 식이 성립한다.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \sum M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2}$$

즉,

$$\delta = \frac{\sum M_i \delta_i}{M} = \sum_i \frac{M_i \delta_i}{(\sum_j M_j)} \quad (7)$$

등가 모형의 δ 는 각 발전기의 관성에 의한 가중평균으로 표현된다. 이것은 coherent group 선정시 같은 부류의 발전기를 대상으로 했다면 등가모형의 δ 는 관성이 큰 발전기에 더 많은 영향을 받는다고 하는 것이다. 같은 개념에서 다른 상태변수에 대해서도 등가 모형의 상태변수는 관성이 큰 발전기의 대응하는 상태변수에 더 큰 영향을 받는다고 보아, 각 발전기의 상태변수에 대한 가중평균으로 볼 수 있다. 즉, 등가 발전기의 e_{f_i}' 및 e_{fd} 는 다음으로 된다.

$$e_{f_i}' = \sum_i \frac{M_i e_{f_i}'}{(\sum_j M_j)} \quad (8)$$

$$e_{fd} = \sum_i \frac{M_i e_{fdi}}{(\sum_j M_j)} \quad (9)$$

등가모형의 dynamics를 결정짓는 미분 방정식을 구하기 위해서는 위의 방정식 이외에 coherent group 내의 각 상태변수간의 'coherency'를 가정하기로 한다. 즉,

$$\tilde{e}_{g_i} = \tilde{k}_i \cdot \tilde{e}_g \quad i=1, \dots, n \quad (10)$$

$$e_{fdi} = f_i e_{fd} \quad i=1, \dots, n \quad (11)$$

여기서, \tilde{k}_i 는 복소수 임을 표시함.

이고, 편의상 \tilde{k}_i 및 f_i 를 coherency 계수라고 부르기로 한다. 먼저 coherency 계수 \tilde{k}_i 및 f_i 를 구하기로 하자. coherency는 시간에 관계없이 유지되어야 하므로, 다음식이 성립한다.

$$k_i = \frac{e'_{g_i}(0)}{e'_g(0)} = \frac{(\sum M_i) e'_{f_i}(0)}{\sum (M_i e'_{f_i}(0))} \quad (12)$$

$$f_i = \frac{e_{fdi}(0)}{e_{fd}(0)} = \frac{\sum M_i e_{fdi}(0)}{\sum (M_i e_{fdi}(0))} \quad (13)$$

또한 k_i 의 위상 $\arg(k_i)$ 를 구하기 위해 (10) 식을 다시 쓰면

$$e'_{g_i} \angle \delta_i = k_i \angle \arg(k_i) \cdot e'_g \angle \delta$$

이므로

$$\arg(k_i) = \delta_i - \delta = \delta_i - \frac{\sum (M_i \delta_i)}{\sum M_i} \quad (14)$$

를 얻을 수 있다. 등가발전기의 상태변수 q'_i 및 q_A 의 정의식 (8), (9)와 각 발전기의 q'_i, q_A 와 e'_i, e_A 사이를 관계짓는 coherency factor 식 (12) - (14), 그리고 각발전기의 dynamics를 표현하는 미분방정식 (3-c), (3-d)를 이용하면 등가발전기의 , 에 대한 미분방정식을 구할 수 있다.

먼저 e'_g 의 정의식에서

$$\frac{de'_g}{dt} = \frac{1}{\sum_j M_j} \sum_i M_i \frac{de'_{g_i}}{dt}$$

이고 $h_i = M_i / (\sum_j M_j)$ 로 정의 하면

$$\frac{de'_g}{dt} = \sum_i h_i \frac{de'_{g_i}}{dt}$$

가 된다. 첫 식에다 (3-c) 식을 대입하면

$$\frac{de'_g}{dt} = \sum_i h_i \frac{1}{T_{d0i}} \left\{ e_{fdi} - e'_{g_i} - (\lambda_{di} - \lambda_{di}) \frac{1}{\lambda_{di}} (e'_{g_i} - V \cos(\delta_i - \theta_i)) \right\}$$

를 얻는데 여기에는 (10) - (14) 식을 사용해서 $q_{di}, e_{g_i}, \delta_i, \theta_i$ 를 q_A, e_g, δ, θ 로 대치하면 다음과 같아진다.

$$\begin{aligned} \frac{de'_g}{dt} = \sum_i \left\{ \frac{h_i f_i}{T_{d0i}} e_{fd} - \frac{h_i k_i}{T_{d0i}} e'_g \right. \\ \left. - \frac{1}{T_{d0i}} (\lambda_{di} - \lambda_{di}) \cdot \frac{1}{\lambda_{di}} \left[k_i e_g \right. \right. \\ \left. \left. - c_i \cos(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \cdot V \cos(\delta - \theta) \right. \right. \\ \left. \left. + c_i \sin(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \cdot V \sin(\delta - \theta) \right] \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

마찬가지로 해서 등가발전기의 상태변수 에 대한 미분방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{de_{fd}}{dt} = \sum_i \left\{ - \frac{h_i f_i}{T_{Ai}} e_{fd} - \frac{h_i K_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{ref} - c_i V) \right\} \quad (16)$$

이상에서 구한 등가발전기의 상태방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_e \quad (17-a)$$

$$\text{단, } M = \sum M_i, P_M = \sum P_{Mi}, P_e = \sum P_{ei}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta \omega \quad (17-b)$$

$$\frac{de'_g}{dt} = \sum_i \left\{ \frac{h_i f_i}{T_{d0i}} e_{fd} - \frac{h_i k_i}{T_{d0i}} e'_g - \frac{h_i}{T_{d0i}} (\lambda_{di} - \lambda_{di}) \right.$$

$$\left. - \frac{1}{\lambda_{di}} \cdot (k_i e'_g - c_i \cos(\arg(k_i) - \arg(c_i))) \right. \quad (17-c)$$

$$\left. V \cos(\delta - \theta) + c_i \sin(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \cdot \right.$$

$$\left. V \sin(\delta - \theta) \right\}$$

$$\frac{de_{fd}}{dt} = \sum_i \left\{ - \frac{h_i f_i}{T_{Ai}} e_{fd} - \frac{h_i K_{Ai}}{T_{Ai}} \cdot (V_{ref} - c_i V) \right\} \quad (17-d)$$

3. 등가 발전기 모형의 전기적 출력

이상에서 구한 등가발전기 모형의 dynamics를 계산하기 위해서는 등가발전기의 전기적 출력 (P_e)을 계산해야 한다. 또한 즉약된 계통을 이용하여 동태 안정도 해석을 수행하기 위해서는 유효전력뿐 아니라 무효전력도 필요하다. 이에 대한 유도 과정을 기술하기로 한다. coherent group의 각 발전기에 대한 내부 전압관계식은 다음과 같다.

$$V_g = e_g' - \alpha_d' i_d \quad (18-a)$$

$$V_d = \alpha_g i_g \quad (18-b)$$

$$V_g = V \cos(\delta - \theta) \quad (19-a)$$

$$V_d = V \sin(\delta - \theta) \quad (19-b)$$

(18), (19) 식에서 i_d , i_g 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{1}{\alpha_d'} (e_g' - V \cos(\delta - \theta)) \quad (20-a)$$

$$i_g = \frac{1}{\alpha_g} V \sin(\delta - \theta) \quad (20-b)$$

전기력 출력 P_e 및 Q_e 는

$$P_e = \text{Re} [V \cdot i^*] = i_d V_d + i_g V_g \quad (21-a)$$

$$Q_e = \text{Im} [V \cdot i^*] = i_d V_g - i_g V_d \quad (21-b)$$

이고 (21) 식에 각각 (19) 식 및 (20) 식을 대입하여 정리하면 다음식을 얻는다.

$$P_e = \frac{e_g' V}{\alpha_d'} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' \alpha_g} \sin 2(\delta - \theta) \quad (22-a)$$

$$Q_e = \frac{e_g' V}{\alpha_d'} \cos(\delta - \theta) - \frac{\alpha_d' + \alpha_g}{2 \alpha_d' \alpha_g} V^2 \cos 2(\delta - \theta) + \frac{V^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' \alpha_g} \cos 2(\delta - \theta) \quad (22-b)$$

등가발전기의 전기적출력은 coherent group에 속한 발전기의 전기력 출력의 합이므로

$$P_e = \sum_i P_{ei} = \sum_i \left\{ \frac{e_g' V_i}{\alpha_d' i} \sin(\delta_i - \theta_i) + \frac{V_i^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' \alpha_g} \sin 2(\delta_i - \theta_i) \right\}$$

이 된다. 상태변수 및 전압의 coherency를 고려하면

$$P_e = \left[\sum_i \frac{1}{\alpha_d' i} k_i c_i \cos(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] e_g' V \sin(\delta - \theta)$$

$$+ \left[\sum_i \frac{1}{\alpha_d' i} k_i c_i \sin(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] e_g' V \cos(\delta - \theta) + \left[\sum_i \frac{1}{2 \alpha_d' i \alpha_g} c_i^2 (\alpha_d' - \alpha_g) \cos 2(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] V^2 \sin 2(\delta - \theta) + \left[\sum_i \frac{c_i^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' i \alpha_g} \sin 2(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] V^2 \cos 2(\delta - \theta) \quad (23-a)$$

마찬가지로 등가발전기의 Q_e 에 대해서도 위 과정을 적용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$Q_e = \left[\sum_i \frac{1}{\alpha_d' i} k_i c_i \cos(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] e_g' V \cos(\delta - \theta) - \left[\sum_i \frac{1}{\alpha_d' i} k_i c_i \sin(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] e_g' V \sin(\delta - \theta) - \left[\sum_i \frac{\alpha_d' + \alpha_g}{2 \alpha_d' i \alpha_g} c_i^2 \right] V^2 \cos 2(\delta - \theta) + \left[\sum_i \frac{c_i^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' i \alpha_g} \cos 2(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] V^2 \sin 2(\delta - \theta) - \left[\sum_i \frac{c_i^2 (\alpha_d' - \alpha_g)}{2 \alpha_d' i \alpha_g} \sin 2(\arg(k_i) - \arg(c_i)) \right] V^2 \cos 2(\delta - \theta) \quad (23-b)$$

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 각도에서의 동태 등가화모형수립에 관한 이론을 제시하였다. 이 방법은 coherent group을 대상으로 한다는 점에서는 coherency method와 같으나 등가 모형을 실제적인 발전기 구조로 제한 하는 기존의 coherency 방법과는 달리 발전기 구조에 대해 제한을 두지 않음으로써 모형화에 따른 오차를 줄일 수 있다. 제안된 알고리즘을 이용한 연구로는 coherent group선정에 관한 연구와 더불어 전력계통의 안정도 해석이나 제어문제에의 응용연구가 기대된다.

참 고 문 헌

R.Podmore and A.Germond, Development of dynamic equivalents for transient stability studies. EPRI EL-456, 1977

A.Germond and R.Podmore, Dynamic aggregation of generating unit models. IEEE Trans. PAS, July/Aug., 1978

J.M.Undrill and A.E. Turner, Construction of power system electromechanical equivalents by modal analysis. IEEE Trans. PAS, Sept./Oct., 1971

W.W.Price et.al., Testing of the modal dynamic equivalents technique. IEEE Trans. PAS, July/Aug., 1978