

전력 계통 축약을 위한 등가 제어기 모델에 관한 연구

* 이한민*, 노규민**, 장병호***, 권세혁*
 * 고려대학교 전기공학과, ** 충청대학 전기과, *** 한전전력연구원

A study on equivalent control device model for power system reduction

* H.M. Lee*, K.M. Rho**, B.H. Jang***, S.H. Kwon*
 * Korea University, ** Chungcheong College, *** KEPR1

Abstract - This paper presents a dynamic equivalencing method in large electric power system for stability analysis. This method of modeling simplified equivalents for parts of the network outside the study area is to evaluate the stability of a study area modeled in detail. Generators are closely coupled in an electrical sense tend to swing together in groups during disturbances, and this behavior can be exploited to reduce the size of the power system model. The characteristics of generators swing together are referred to as coherency. Coherency groups whose generators state trajectory are similar to the other generators state trajectory in the same coherency group by a certain disturbance. In this paper, procedures for forming dynamic equivalents of control devices of coherency-based generating units are proposed and the aggregation of the control devices such as excitation system and governor-turbine system is accomplished by this method. This method can deal with the aggregation of the same type of control devices and combination of hydro and steam unit or the many types of excitation systems, etc. This method is shown to be efficient in reducing the number of control device of generating units with small error in the study group by result of case study presented latter part of this paper.

1. 서 론

오늘날 발전하는 산업사회와 더불어 전력수요가 급증하고 있으며 전력계통은 대규모화되고 복잡하게 되어 안정도 해석은 매우 어려워져 가고 있다. 또한 많은 계산시간 및 비용이 소요되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로서 대규모 전력계통의 축약이 필수적으로 요구되고 있다. 이렇게 계통축약을 하는데 있어서 대규모 전력계통에서 관심을 가지고 조사해야할 대상지역을 연구영역으로 지정하여 상세하게 표현하고, 이를 둘러싼 외부영역을 발전기의 연관성을 이용하여 등가 축약시켜 나타낸다. 이러한 등가 축약 방법으로 동적합성(Dynamic aggregation)은 전체계통에 대해서 발전기 연관성 인식법을 적용한다. 이렇게 연관 발전기 그룹이 선정되면 연관 그룹의 발전기와 부하모선이 소거되고 연관 그룹 발전기 모델 합성이 이루어진다[5].

본 논문에서는 연관 그룹 발전기 모델 중 제어기 모델(여자기 모델, 조속기-터빈 모델, 전력계통 안정화기 모델)의 등가 모델을 나타내는 방법에 대해서 다루었다.

등가화 방법으로 경사탐색법(numerical gradient search)이 제안되었으나 이 방법은 등가 전달함수와 합성 전달함수사이의 오차를 최소화하기 위해 등가 모델의 미확정 파라미터를 교정하는 방법으로 비교적 정확한 등가 모델을 나타내지만 조속기-터빈 모델 중 화력과 수력이 둘다 존재하는 경우에는 연관 그룹의 주파수 응답을 정확하게 맞추기 위한 단일 등가 모델을 선택하는 것이 매우 어려운 일이다. 따라서 이런 경우에는 화력은 하나의 단일 등가 화력기로 구성하고, 수력도 단일 수력기로 구성되되 모두 동일 모선에 연결시키게 된다[4,6].

그러나 연관 발전기 그룹이 다양한 제어기 모델을 포함하고 있다는 이유로 등가 모델로 나타낼 때 발전기들을 여러 부그룹으로 나눈다면 발전기의 등가화가 의미가 없을 것이다. 따라서 본 논문에서는 같은 형태의 제어기 모델의 등가화 또는 서로 다른 조속기-터빈 모델의 등가화 및 많은 종류의 여자기 모델의 등가 모델 구성을 다루었다. 또한 같은 제어기 모델인 경우에는 좀더 신속하게 등가 모델을 구성하는 방법을 제안하여 사례 연구를 통해 그 적정성을 검증하였다.

2. 등가화기법 I

등가 제어기 모델에 대한 파라미터는 각각의 모델을 합한 합성 전달함수와의 차이를 최소화한 등가 전달함수에서 구하게 된다. 그리고 합성 전달함수는 고차의 전달함수를 가지므로 계산상 많은 시간을 소비하게 되므로 저차의 등가 전달함수로 등가화 해야한다. 따라서 등가화하는 기법을 간단한 수식전개로 등가전달함수를 구하는 과정을 나타내었다.

고차의 합성 전달함수는 다음 식(1)과 같다.

$$\widehat{G}_E(S) = \frac{a_0 + a_1S + \dots + a_mS^m}{b_0 + b_1S + \dots + b_nS^n} \quad (1)$$

여기서 $n \geq m$

저차의 등가 전달함수는 다음 식(2)과 같다.

$$G_E^*(S) = \frac{c_0 + c_1S + \dots + c_pS^p}{d_0 + d_1S + \dots + d_qS^q} \quad (2)$$

여기서 $n \geq p \geq q$

식(1)은 고차의 합성 전달함수지만 저차의 등가 전달함수로 대치하기 위해서는 식(2)과 같아야 할 것이다.

$$\widehat{G}_E(S) = G_E^*(S) \quad (3)$$

각각의 복소 주파수(ju_i) 영역에 대해 합성 전달함수 $\widehat{G}_E(S)$ 는 어떤 상수값이 되고 등가 전달함수의 $c_1, c_2, \dots, c_q, d_0, d_1, \dots, d_p$ 는 구하고자하는 미지수가 된다. 식(3)을 각각의 주파수 영역에서 전개하면 식(4)과 같다.

$$\widehat{G}_E(ju_i)(ju_i)^p d_p + \dots + \widehat{G}_E(ju_i)(ju_i)^1 d_1 + \widehat{G}_E(ju_i) d_0 = (ju_i)^q c_q + \dots + (ju_i)^1 c_1 + c_0 \quad (4)$$

식(4)를 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_{i,p} d_p + \dots + x_{i,1} d_1 + x_{i,0} d_0 = y_{i,q} c_q + \dots + y_{i,1} c_1 + c_0 \quad (5)$$

여기서 i 는 일정 주파수영역을 나타낸다.

식(5)를 n 개의 주파수 영역에서 전개하면 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_0 \\ \vdots \\ c_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,p} & \dots & x_{1,1} & x_{1,0} & -y_{1,q} & \dots & -y_{1,1} \\ x_{2,p} & \dots & x_{2,1} & x_{2,0} & -y_{2,q} & \dots & -y_{2,1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ x_{n,p} & \dots & x_{n,1} & x_{n,0} & -y_{n,q} & \dots & -y_{n,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_p \\ \vdots \\ d_1 \\ d_0 \\ c_q \\ \vdots \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 x 와 y 값으로 이루어진 행렬은 정칙행렬이 아니므로 가상 역행렬(pseudo-inverse)을 적용하여 미지수 $c_1, c_2, \dots, c_q, d_0, d_1, \dots, d_p$ 를 구하게 된다.

위 등가화기법을 화력기와 수력기의 합성에 적용하게 되면 화력기와 수력기의 각각의 전달함수는 식(7), (8)과 같다.

$$G_{GT}^{Steam}(S) = \frac{K(1+ST_2)(1+SK_1T_3)}{(1+ST_1)(1+ST_2)(1+ST_3)(1+ST_4)} \quad (7)$$

$$= \frac{K(1+S(T_2+K_1T_2)+S^2T_2T_3)}{1+S(T_1+T_3+T_4+T_5)+S^2(T_1T_3+T_1T_4+T_1T_5+T_3T_4+T_3T_5+T_4T_5)+S^3(T_1T_3(T_4+T_5)+T_1T_5(T_3+T_4))+S^4T_3T_4T_5}$$

$$\text{여기서 } K = \frac{P_{\max}}{100R}$$

$$G_{GT}^{Hydro}(S) = \frac{K(1+ST_2)}{(1+ST_1)(1+ST_3)(1+ST_4)} \quad (8)$$

$$= \frac{K(1+ST_2)}{1+S(T_1+T_3+T_4)+S^2(T_1T_3+T_1T_4+T_3T_4)+S^3T_1T_3T_4}$$

$$\text{여기서 } K = \frac{P_{\max}}{100R}$$

연관 발전기 그룹에서 화력과 수력이 둘다 존재한다면 식(1)과 같은 합성 전달함수를 얻을 수 있다. 이때 등가 모델을 화력으로 선택하면 저차의 등가 전달함수는 식(9)와 같은 형태로 주어진다.

$$G_E^*(S) = \frac{c_0 + b_1 S + b_2 S^2}{a_0 + a_1 S + a_2 S^2 + a_3 S^3 + a_4 S^4} \quad (9)$$

$$\text{여기서 } b_0 = 1, \quad a_0 = \frac{1}{K_A^*}, \quad K_A^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{A_i}$$

식(9)에서 미지수 $c_1, c_2, d_1, d_2, d_3, d_4$ 를 구하게 되면 식(7)과 식(9)를 비교하여 등가 화력 조속기-터빈 모델의 파라미터 $K^*, K_1^*, T_1^*, T_2^*, T_3^*, T_4^*, T_5^*$ 를 구할 수 있다.

위와 같은 등가화기법을 적용하면 다른 형태의 조속기-터빈 모델인 경우뿐만 아니라 다른 종류의 여자기 모델의 합성 전달함수를 일정 복소 주파수영역에서 원하는 모델의 등가 전달함수와 비교하여 등가 파라미터를 구할 수 있다.

3. 등가화기법 II

한전 계통에서 실제로 적용되고 있는 여자기와 조속기-터빈모델은 다양한 형태가 있지만 같은 타입인 경우에는 그 파라미터 값들이 같거나 거의 비슷한 값을 가지게 된다. 따라서 연관 발전기 그룹에서 같은 형태의 전달함수가 합성될 때는 각 전달함수의 영점과 극점이 거의 같은 값을 가진다고 볼 수 있다. 그러므로 등가 전달함수도 같거나 비슷한 영점과 극점을 가진다면 합성 전달함수의 특성을 반영할 수 있게 된다. 따라서 이런 특성을 얻기 위해 여자기와 조속기-터빈모델 각각의 파라미터들의 평균값들을 등가 모델의 파라미터로 하게 되면 등가화기법 I보다 빠른 시간내에 등가 파라미터를 구할 수 있다.

4. 사례 연구

위 등가화기법을 뉴잉글랜드 39모선 계통에 적용하여 등가모델의 전달함수를 연관 발전기 그룹의 합성 전달함수와 보오드선도 곡선으로 비교하였으며, 또한 6번 모선에 외란을 주어 전력 계통 축약 전, 후의 모선 전압을 비교, 검증하였다.

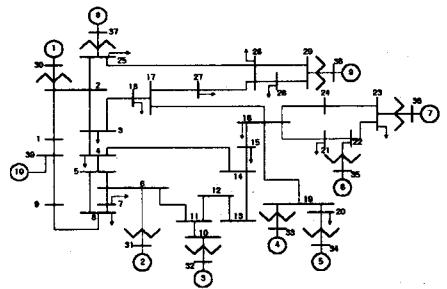


그림1. 뉴잉글랜드 39모선 계통도

연관 발전기 그룹 A는 1, 8번 발전기, 그룹 B는 9번 발전기, 그룹 C는 4, 5, 6, 7번 발전기, 연구영역은 2, 3, 10번 발전기로 선정하였다.

그룹 A의 여자기모델은 IEET1, 조속기-터빈모델은 IEEG1로 하였다. 그리고 그룹 B의 4, 5번 발전기의 여자기모델은 IEET1, 조속기-터빈모델은 IEEG1로 하고 6, 7번 발전기의 여자기모델은 SCR, 조속기-터빈모델은 IEESG로 하였다.

그룹 A의 여자기와 조속기-터빈모델의 합성 전달함수와 등가 전달함수의 보오드선도를 그림 2, 3에 나타내었다

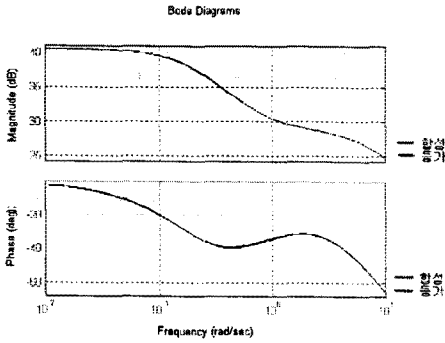


그림2. 그룹 A 여자기모델의 보드선도 비교

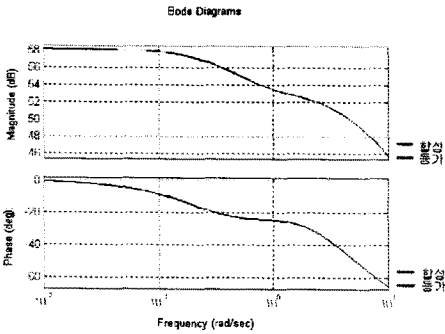


그림3. 그룹 A 조속기-터빈모델의 보드선도 비교

그림4는 그룹 B의 IEEE1과 SCRX의 합성 전달함수를 등가 IEEE1 전달함수로 나타내었으며, 그림5는 IEEEG1과 IEESGO를 등가 IEEEG1 전달함수로 나타내어 보드선도를 비교하였다.

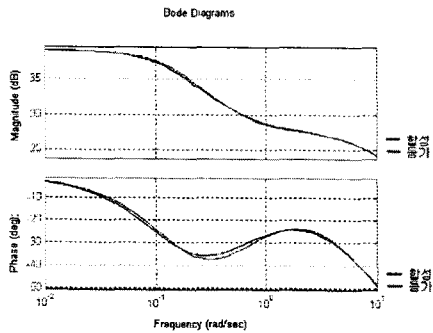


그림4. 그룹 C 여자기모델의 보드선도 비교

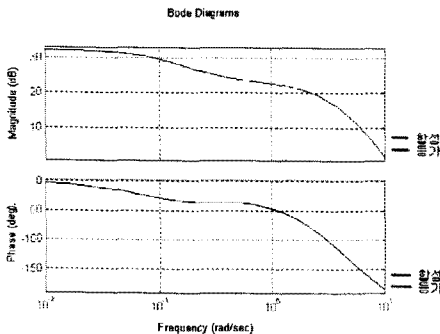


그림5. 그룹 C 조속기-터빈모델의 보드선도 비교

뉴잉글랜드 39모선 계통의 외부 영역을 네트워크 축약 및 본 논문에서 제시한 등가화기법으로 6발전기 17모선으로 계통 축약한 후 사례 계통의 6번 모선에 외란을 주어 축약 전, 후의 발전기 32번 모선 전압을 비교하였다.

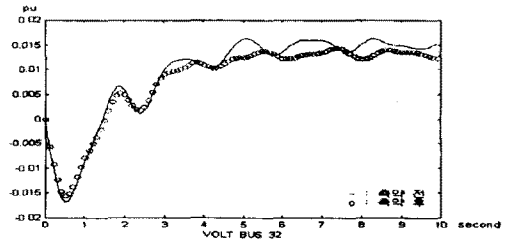


그림6. 축약 전, 후 32번 모선전압 비교

5. 결 론

계통 축약 시 외부영역의 연관 발전기 그룹내에 있는 제어기 모델을 더한 합성 전달함수는 고차의 전달함수를 가지므로 계산상 많은 시간을 소비하게 된다. 따라서 등가화기법을 적용하여 같은 특성을 가지는 등가의 전달함수를 나타내었다. 간단한 수식 전개의 등가화기법을 적용하여 저차의 등가 전달함수를 구할 수 있었고 제시한 등가화기법은 다른 형태의 제어기모델 합성이 가능하였다. 축약 전, 후 계통의 동적 특성을 비교한 결과 축약 계통이 원래계통과 근사하다는 것을 계통해석 결과로 보임으로서 제시한 등가화기법이 등가 제어기 모델합성에 적합함을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ram Nath, S.S. Lamba, K.S. Prakasa Rao, "Coherency Based System Decomposition Into Study And External Areas", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No.6, pp.1443-1449, June 1985
- [2] Ram Nath, Surrinder S. Lamba, K.S. Prakasa Rao, "Coherency Based System Decomposition into Study and External Areas Using Weak Coupling", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.6, pp.1443~1449, June 1985
- [3] J. Machowski, A. Cichy, F. Gubina, P. Omahen, "External Subsystem Equivalent Model for Steady-State and Dynamic Security Assessment", IEEE Trans., Vol.3, No.4, pp 1456-1463, Nov 1988
- [4] A.J. Germond and R. Podmore, "Dynamic Aggregation of Generating Unit Models", IEEE Trans. Vol. PAS-97, pp.1060-1069, July/August, 1978.
- [5] W.W. Price, A.W. Hargrave, B.J. Hurysz, J.H. Chow, P.M. Hirsch, "Large-scale System Testing of a Power System Dynamic Equivalencing Program", IEEE Trans., Vol. 13, No. 3, pp. 768-774, August 1998.
- [6] 장병훈, "안정도 해석을 위한 대규모 전력계통의 등가 축약 모형에 관한 연구", 고려대학교 대학원 박사학위 논문, 1999년 6월.
- [7] Dynamic Reduction: User's Manual, EPRI, May, 1994