

## Coherent 발전소들의 새로운 동태등가화 기법

박 영문, 정 정현, 최 면승<sup>o</sup>  
서울대학교 공과대학 전기공학과

A New Approach to the Coherency-Based  
Dynamic Equivalence of Power Plants

Young Moon Park, Jung Won Jung, Myeon Song Choi  
Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

## ABSTRACTS

This paper proposes a new method of the state reduction in dynamic equations of generators in large electric power system stability analysis.

This method assumes study groups whose state trajectories we are interested in, coherency groups whose state trajectories are similar to the other state trajectories of generators in the same coherency group by a certain disturbance. By the weighted sum or the other method, the states of generators in one coherency group can be reduced to the equivalent states of an equivalent generator.

This method is shown to be highly efficient in reducing the number of states with small error by the result of case study presented latter part of this paper.

## 1. 서 론

전력계통의 안정도 해석을 수치해석적인 방법으로 풀 때는, 발전기의 동특성을 나타내는 비선형 미분방정식과 계통의 전력수급을 나타내는 전력방정식을 번갈아 풀어 계통의 상태변수의 움직임을 알아볼 수 있다.

그러나 계통이 대형화될수록 발전기의 비선형 미분방정식의 수와 전력방정식의 수가 늘어나므로 기억용량과 계산시간이 문제가 되어 이런 안정도 해석이 더 어려워진다. 따라서 어떤 외란에 대하여 계통을 우리의 관심대상 부분과 그외의 부분으로 나누어, 관심대상이외의 부분중에서 고장지점에서 먼곳의 같은지역의 발전기들의 Swing curve 와 모선전압의 움직임이 비슷하므로, 이것을 이용해서 비슷한 부분을 Group 별로 나누어 등가계통으로 축약시켜 계통의 크기를 줄일 필요가 있다.

이런 등가축약시에 고려할점은 계통의 크기를 효과적으로 줄여야 하며, 등가 축약방법이 간단하여 등가축약 소요시간이 적어야하고, 원래의 시스템과 오차가 적어야 한다. 그리고 원래의 계통과 유사하여 다른 응용부분에 쉽게 이용되어야 한다.

이 논문에서는 어떤외란에 대해 같은지역의 모선들의 전압의 움직임과 발전기들중 제어계의

모델이 같은 발전기의 상태변수의 움직임이 비슷하므로 이 발전기들의 모선들을 Network Reduction에 의해 축약하여 하나의 모선으로 만들고 이 모선에 있는 발전기들중 제어계 모델이 같은 발전기들을 모아 발전기부분과 제어계부분들로 나누어 각부분의 특성을 고려하여 이 특성에 맞는 하나의 등가발전기를 만드는 방법을 제안한다.

## 2. 본 론

## 1) 계통의 표현

전력계통의 동특성을 수치해석 방법을 이용하여 상태의 궤적을 알아 볼 때 계통은 다음 식들로 표현된다.  $i$  번째 발전기의 동적 성질을 표시하는 비선형 미분방정식이

$$dx_i/dt = f(x_i, v_i, \theta_i) \quad (1)$$

$x_i$ : 상태변수 벡터  
 $v_i$ : 모선 전압크기 벡터  
 $\theta_i$ : 모선 전압위상 벡터

(1)식과 같으므로 이것을 선형부분과 비선형부분 그리고 상수부분으로 나누어 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dx_i/dt = A_1 x_i + P_i + g(x_i, v_i, \theta_i) \quad (2)$$

$A_1 x_i$ : 선형부분  
 $P_i$ : 상수부분  
 $g(x_i, v_i, \theta_i)$ : 비선형부분

그리고 전력균형의 정적인 성질을 나타내는 전력방정식이 있다.

$$Pg(x, v, \theta) - Pl(v, \theta) = Pn(v, \theta) \quad (3)$$

$$Qg(x, v, \theta) - Ql(v, \theta) = Qn(v, \theta)$$

$Pg$ : 발전기 유효전력  
 $Pl$ : 부하의 유효전력  
 $Pn$ : 모선유입 유효전력  
 $Qg$ : 발전기 무효전력  
 $Ql$ : 부하의 무효전력  
 $Qn$ : 모선유입 무효전력

2) 용어의 정의

- Coherency : 계통이 서로 연결되어 있기 때문에 어떤 외란에 대해 각 상태변수들이 비례적으로 움직이는 것
- study group : 계통에서 모든 고장과 변화가 이 부분에서 일어난다고 가정하고 우리가 관심을 갖는 상태변수들이 있는 곳으로 이 부분은 증가화할 수 없다. 계통의 주된 발전기는 이 부분에 포함된다.
- coherent group : 이 부분은 외란 발생지점과 멀어서 이 부분의 상태 변수들이 서로 Coherency 를 갖고 움직이며 우리는 이 부분의 상태변수에 관심이 없어 증가축약을 하려는 부분.

3) 발전기의 표현

발전기들의 발전기부분과 제어계부분의 입출력 관계는 다음그림으로 나타낼 수 있다.

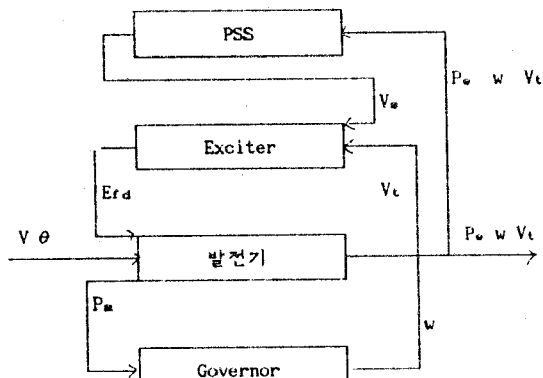


그림 발전기 구성도

축약 대상그룹의 발전기들 사이에는 제어계에 같은모델의 Governor, 같은 모델의 Exciter, 같은 모델의 PSS(Power System stabilizer)로 이루어져 있으므로 이들을 하나의 등가발전기로 표현할 때 등가발전기의 입출력도 축약 대상그룹의 발전기들과 같은 모델의 제어계를 갖으며 위의 그림으로 표현될 수 있다.

4) 축약 대상그룹의 발전기들의 가정

축약 대상그룹의 발전기들을 하나의 등가 발전기로 축약하기 위해서는 이 발전기들이 다음의 가정을 만족해야 한다.

1. 축약 대상그룹의 발전기들은 모선 전압들이 서로 Coherent 하여 Network Reduction 에 의해 한 모선으로 축약되어 축약 대상그룹의 발전기들은 하나의 모선에 연결되어 있어야 한다.
2. 축약 대상그룹의 발전기들 사이의 각속도 편차( $\delta$ )가 일정하게 유지해야 한다. 즉 축약 대상그룹의 발전기들의 각속도  $w$ 는 모두 같다.
3. 축약대상그룹의 발전기들의 제어계모델들은 모두 같다.

5) 등가발전기의 상태변수 표현

축약대상 그룹의 발전기들의 비선형 미분 방정식은 발전기 Governor, Exciter, PSS 의 결합으로 이루어져 있다. 그리고 등가 발전기의

전기적, 기계적 출력은 축약대상 그룹 발전기의 전기적, 기계적 출력의 합과 같아야 한다.

(1) 발전기 부분

발전기 부분은 동요 방정식과 여자계 특성만을 고려하여 3차식으로 나타낼 수 있다.

$$dw_i/dt = 1/2H_i ( P_{m_i} - P_{e_i} - D_i (w_i - 1) )$$

$$d\delta_i/dt = 2\pi f_0 ( w_i - 1 )$$

$$deq'_{i}/dt = 1/T_{d0} \cdot ( er_{di} - eq_i )$$

1. 등가 발전기의 각속도  $w$ 는 축약대상 그룹의 발전기들이 모두  $w_i = w$  이므로  $w_c = w$ 로 잡을 수 있다. 그리고 등가발전기의 출력과 관계된 관성 계수와 전기적 출력, 기계적 입력, Damping 계수는 축약대상 그룹의 발전기들의 합으로 표현될 수 있다.

2. 여기서 등가 발전기의 각속도 편차  $\delta_e$ 는 축약 대상 그룹 발전기들의 가중평균으로 잡을 수 있다.

3. 그리고 발전기의 과도전압  $eqe'$ 는 축약대상 그룹의 발전기들의 과도전압의 가중평균으로 볼 수 있다. 즉, 등가발전기의 과도전압은 축약대상 그룹의 발전기들중에서 출력이 큰 발전기의 영향을 더 많이 받는다고 가정할 수 있다.

(2) Governor부분

등가발전기의 Governor의 기계적 출력은 축약대상 그룹의 발전기의 Governor 출력의 합이어야 한다. 그리고 축약대상 그룹의 발전기의 Governor 출력이 선형함수로 다음과 같이 나타내어 지므로

$$P_{m_i} = f(x_{g_i}, w_i),$$

$$x_{g_i} : i \text{ 발전기의 Governor 상태변수}$$

등가 발전기의 Governor의 출력을 위의 식으로 나타낼 수 있어야 하므로 등가 발전기의 상태변수는 축약대상 그룹의 발전기의 Governor 상태변수의 합으로 나타낼 수 있다.

(3) Exciter 부분

Exciter의 입력은 발전기 단자전압과 PSS의 출력이고 Exciter 출력은 Exciter의 상태변수들과 비선형 입력인 발전기 단자전압으로 나타내어지고 이 출력이 발전기 부분의 과도전압의 미분 방정식의 입력이 되므로 위에서 우리가 등가발전기의 과도전압 부분을 가중 평균으로 취했으므로 등가발전기의 Exciter의 상태변수들은 축약대상 그룹 발전기들의 Exciter의 상태변수들의 가중 평균으로 볼 수 있다.

(4) 안정화 장치(PSS)부분

PSS의 출력이 Exciter의 입력이 되기 때문에 등가발전기의 Exciter 상태변수를 축약대상 Group의 Exciter 상태변수의 가중 평균으로 취했으므로 등가발전기의 PSS 부분의 상태변수들도 축약대상 그룹의 발전기들의 PSS부분의 상태변수의 가중평균으로 취할 수 있다.

(5) Network Reduction 에 의한 발전기 모션전압의 Coherency

어떤 외란에 의한 모션전압의 움직임이 비슷한 모션들을 모아 새로운 가상모션을 설정하고 이 모션의 전압을 축약 대상모션들의 Power의 가중평균으로 취하여 Network Reduction 으로 축약대상모션들을 축약시킬 수 있다. 그리고 이 가상 모션과 축약대상모션들의 전압의 비로 Coherency Factor  $k_v$  를 구할 수 있다. 그렇다면 축약대상모션에 있던 발전기들이 가상모션에 이상적인 변압비  $k_v$ 로 연결되어 있다고 할 수 있으며 이 발전기들의 모션전압은 Coherent 하다.

(6) 축약 대상 그룹의 발전기 상태변수와 등가 발전기 상태변수의 Coherency

등가 발전기의 상태변수는 Coherent 한 축약대상 그룹의 발전기들의 상태 변수 결합이므로 등가 발전기의 상태변수가 축약대상 그룹의 발전기의 상태 변수 사이에도 Coherency가 존재한다고 가정할 수 있어 일정한 비율의 Coherency Factor  $k_{ij}$ 를 찾을 수 있다. 단 각속도 편차  $\delta_i$ 의 Coherency Factor는 축약 대상그룹의 발전기들끼리 일정한 차를 유지한다고 가정했으므로 등가 발전기의  $\delta_o$  와도 일정한 차가 되어야 한다.

여기서 Coherency Factor  $k_{ij}$  는 각 발전기 상태변수의 초기치로서 등가 발전기의 상태변수의 초기치를 구한 후에 이 초기치의 비율로 구할 수 있으며 등가발전기의 초기치가 0 이면 이것이 Governor 상태변수가 아닐 때 Coherency Factor  $k_{ij} = 1$  로 정할 수 있다. 그리고 Governor의 상태변수일 때는 Governor 출력의 비례로 정할 수 있으며 이때  $\sum k_{ij} = 1$  이어야 한다.

(7) 등가발전기의 미분방정식 표현.

위의 특성을 이용하여 가중계수행렬  $W$  를 발전기의 과 Governor 부분은 가중계수가 1 이고 그외의 부분은 가중계수가 관성계수의 비율인 대각행렬을 구성하고 축약대상그룹의 발전기들의 초기치와 등가발전기의 초기치로 Coherency Factor의 대각행렬  $K$  를 구하여 이로부터 등가발전기의 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_o &= \sum W_i \dot{x}_i \\ &= \sum W_i A_i x_i + \sum W_i P_i + \sum W_i G_i \\ &= \sum W_i A_i K_i x_o + \sum W_i P_i + \sum W_i G_i \\ &= A_o x_o + P_o + G_o \end{aligned}$$

$W_i$ : Weighting Factor 행렬  
 $K_i$ : Coherency Factor 행렬

여기서 등가발전기의  $\delta_o$  는 축약 대상그룹의 발전기들의  $\delta_i$ 의 가중평균이며  $\delta_o$ 와  $\delta_i$ 의 Coherency Factor는 서로의 차이이며 그 가중합은 0 이다.

(8) 등가발전기의 전기적 출력.

등가발전기의 전기적 출력은 축약 대상그룹의 발전기들의 전기적 출력의 합이어야 한다.

$$\begin{aligned} P_o &= \sum P_{o_i} \\ &= \sum a_i \cdot v_i \cdot e_{q_i} \cdot \sin(\delta_i - \theta_i) + c_i \cdot v_i^2 \cdot \sin 2(\delta_i - \theta_i) \\ &= a_o \cdot v_o \cdot e_{q_o} \cdot \sin(\delta_o - \theta_o) + b_o \cdot v_o \cdot e_{q_o} \cdot \cos(\delta_o - \theta_o) + \\ &\quad c_o \cdot v_o^2 \cdot \sin 2(\delta_o - \theta_i) + d_o \cdot v_o^2 \cdot \cos 2(\delta_o - \theta_o) \\ Q_o &= \sum Q_{o_i} \\ &= \sum f_i \cdot v_i \cdot e_{q_i} \cdot \cos(\delta_i - \theta_i) + h_i \cdot v_i^2 \cdot \cos 2(\delta_i - \theta_i) + i_i \cdot v_i^2 \\ &= e_o \cdot v_o \cdot e_{q_o} \cdot \sin(\delta_o - \theta_o) + f_o \cdot v_o \cdot e_{q_o} \cdot \cos(\delta_o - \theta_o) + \\ &\quad g_o \cdot v_o^2 \cdot \sin 2(\delta_o - \theta_o) + h_o \cdot v_o^2 \cdot \cos 2(\delta_o - \theta_o) + i_o \cdot v_o^2 \end{aligned}$$

8) 사례 연구

사례연구에서는 모의 계통과 실제계에 적용시켜 보았으며, 발전기들을 축약한 후의 궤적과 축약이전의 원래의 계통과 비교하였다.

1. 발전기 10기의 가상 5모션 계통의 사례연구

1.1 모의 계통

계통도는 아래그림과 같으며 고장은 4 - 5 모션간의 단선사고를 가정했다. 그리고 발전기들의 Data는 같은 모델이더라도 각 파라미터의 값을 임의로 정했다.

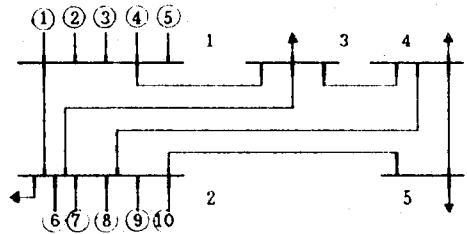
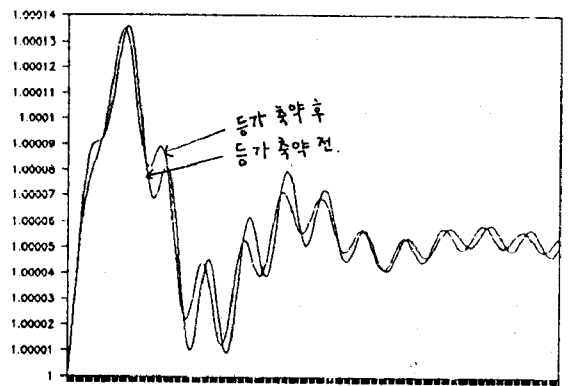


그림 모의 5 모션 계통도

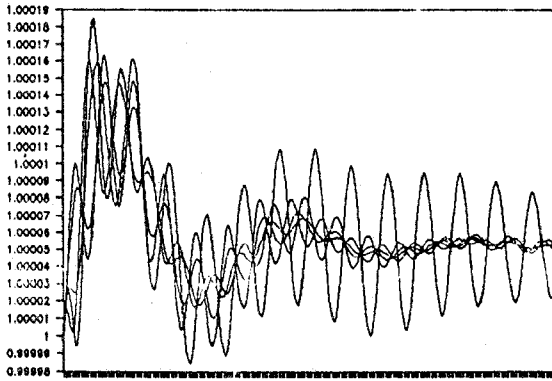
1.2 축약 결과

1. 축약 대상그룹 1 (1,2,3,4,5 번 발전기)
2. 축약 대상그룹 2 (6,7,8,9 번 발전기)
3. 축약 대상그룹 3 (연구대상 발전기 10)

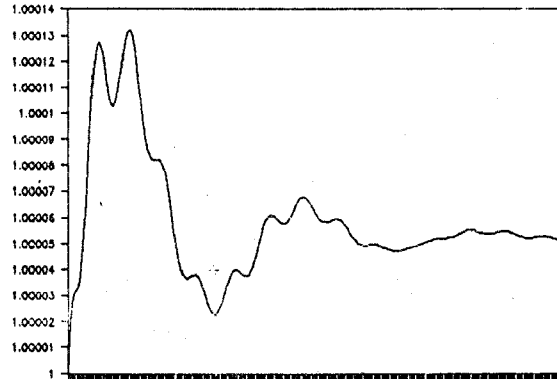
1.3 발전기들의 상태변수 궤적



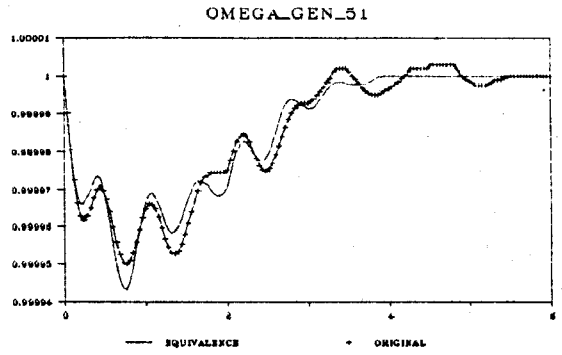
발전기 10의 상태변수  $\delta$  궤적



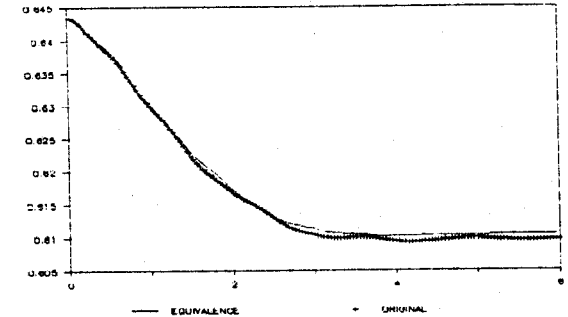
1, 2, 3, 4, 5 발전기들의 상태변수 ω 궤적



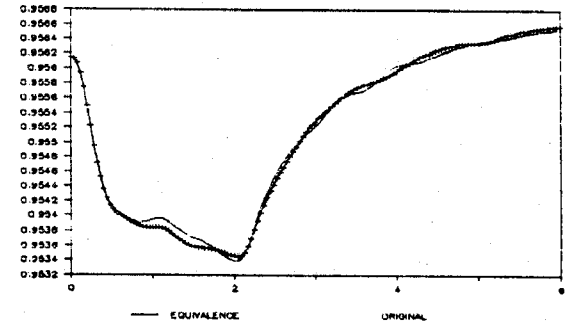
승가발전기 1의 상태변수 ω 궤적



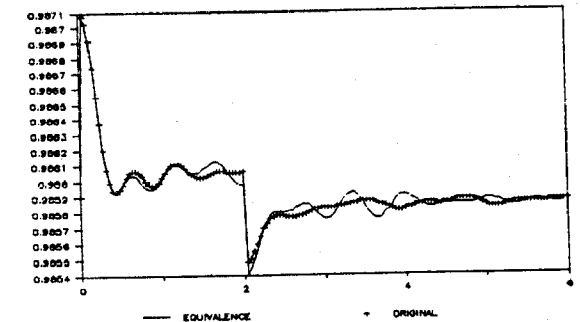
DELTA\_GEN\_51



EQ'\_GEN\_51



BUS\_VOLT\_GEN\_51



2. 발전기 81기의 한전 349모선 계통의 사례연구

2.1 실계통

한전 349모선을 Network Reduction에 의해 9 모선으로 축약한 계통도는 아래그림과 같으며 고장은 축약이전의 324 - 326 모선간의 2초간 단선사고를 가정했다.

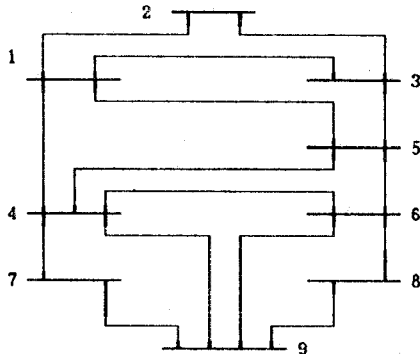


그림 한전 9 모선 등가 계통도

2.2 축약결과

계통이 축약되어진 후의 결과는 9 모선 16기 계통이며 연구대상발전기는 51 번 발전기이다.

2.3 연구대상 발전기의 상태변수 궤적

## 3. 결론

본 연구에서는 대형 전력계통의 발전기 비선형 미분방정식을, 그 특성을 고려하여 기존의 연구와는 다른 Coherency를 확대 이용한 방법으로 빠른 시간에 등가축약 할 수 있는 방법의 제시와 이를 이용한 사례연구를 하였다. 사례연구 1.에서 볼 수 있듯이 발전기와 제어계의 각 상수값이 임의의 값이므로 Swing curve가 틀린 발전기들을 하나의 발전기로 축약 했을때도 연구대상 발전기의 Swing curve는 발전기들을 등가 축약하지 않았을 때와 거의 비슷하게 나온다. 그리고 사례연구 2.에서 실제계에 적용하였을 때도 결과가 비슷함을 알 수 있었다.

또한, 다른 사례연구에서 본 연구방법으로 축약하였을 때와 EPRI의 전달함수 최소자승법으로 축약한 결과가 비슷함을 알 수 있었으며, 본 연구방법이 EPRI의 전달함수 최소자승법보다 방법보다 소요시간이 훨씬 적음을 그 사례연구를 통해 알 수 있었다.

## [ 참고 문헌 ]

- [1] EPRI EL-456, 'Development of Dynamic Equivalents for Transient Stability Studies', Final Report, April, 1977.
- [2] 한전 기술연구원, '발전기 제어계 적정 파라미터 선정에 관한 연구', 중간보고서, 1989.7.
- [3] Atif S. Debs, 'Modern Power System Control and Operation', Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [4] Yao-nan Yu, 'Electric Power System Dynamics', Academic Press, 1983.
- [5] T.E. Kostyniak, 'PSS/E Program Operation Manual', P.T.I, October 31, 1983.
- [6] M.A. PAI, 'Computer Techniques in Power System Analysis', McGraw-Hill Publishing Company Ltd., 1979.
- [7] Edward Wilson Kimbark, 'Power System Stability', Jhon Wiley & Sons. Inc, 1957.