

선로 조류 유지 기법에 근거한 계통축약 및 다변수 제어기법 적용 연구

이병하 오민혁\* 백정명  
인천대학교 전기공학과

A study on application of aggregation method based on power flow matching technique and multi-variable control method to the power system

Byung-Ha Lee Min-Hyuk Oh\* Jung-Myoung Baek  
Department of Electrical Engineering, University of Incheon

**Abstract** - The modern enormous electric power system has made power system analysis much more complex and difficult. For effective analysis of the power system, model reduction and aggregation is required. In this paper, a new aggregation method is presented to aggregate the coherent generators in the large scale power system while matching the power flow. In order to demonstrate the effects of this aggregation method, it is applied to a small scale power system. A multi-variable control technique of  $H_\infty$  control is also applied to enhance the dynamic stability of the aggregated power system.

**Key Words** : aggregation method, power flow matching, multi-variable control

1. 서 론

$H_\infty$  제어 및 LQG/LTR 제어 등의 다변수 제어기법을 포함하는 최신 제어 이론들은 제어가 복잡하게 되고 차수가 크게 증가하는 등의 문제가 있고 현대의 전력시스템은 점점 대형화, 복잡화되어 가고 있는 추세이므로, 효과적으로 최신제어기법들을 적용하기 위해서는 전력시스템의 동적인 특성을 동가적으로 표현하면서도 간략화하기 위한 축약기법을 적용하는 것이 요구된다. coherency 기법들의 동가화 과정은 coherency 확인과 시스템 축약의 두가지 주요 단계로 구성되며, 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다[1]-[6]. 어떤 전력시스템에서 발전기들의 밀접된 그룹들이 확인되면, 같은 그룹에 있는 발전기들은 축약되고 하나의 동가 발전기로 감축된다. 기존 기법에서 특히 지리적으로 멀리 떨어진 그러한 발전기들이 관성 축약 기법을 사용하여 축약될 때 원래의 시스템의 전력조류 조건들이 감축된 동적 등가에서는 유지되지 않는다.

본 논문에서는 계통을 축약할 때 선로 조류들 그대로 유지하도록 만들어 줌으로써 계통 축약 시스템의 시뮬레이션 결과가 축약 이전의 시뮬레이션의 결과와 더 근접하게 되는 선로조류 유지기법을 제시하고, 이를 활용하여 다변수제어 기법인  $H_\infty$  제어기법을 소규모 전력시스템에 적용한 결과를 보여 준다.

2. Coherency 확인과 시스템 축약

2.1 Coherency 확인과 그룹핑

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 i와 j에 대한 로우터 각의 응답이 아래와 같이 표현되어진다.

$$\Delta \delta_i(t) = u_{i1} a_1 e^{\lambda_1 t} + u_{i2} a_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + u_{in} a_n e^{\lambda_n t} \quad (1)$$

$$\Delta \delta_j(t) = u_{j1} a_1 e^{\lambda_1 t} + u_{j2} a_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + u_{jn} a_n e^{\lambda_n t} \quad (2)$$

여기서  $u_{in}$ 는 i번째 모드에서의 n번째 상태변수의 동작을 묘사하는 시스템 행렬의 n번째 고유벡터의 i번째 요소이고  $a_n$ 은 시스템 행렬의 n번째 우 고유벡터와 전력시스템의 외란을 반영하는 상태변수들

의 초기조건에 곱으로 나타난다. 위 식에서와 같이 발전기 i와 j에 대한 로우터 각의 변화가 모드로 표현되므로 각 모드의 계수로 이루어진 벡터를 구성하여 이 벡터가 서로 가까울수록 밀접하게 연관되어 있다고 할 수 있다. 따라서, 밀접된 발전기들의 그룹들을 확인하기 위한 아래의 척도가 널리 활용되고 있다.

$$\theta_{ij} = \cos^{-1} \left( \frac{w_i \cdot w_j^T}{\|w_i\| \cdot \|w_j\|} \right) \quad (3)$$

여기에서  $w_i = (u_{i1} a_1, u_{i2} a_2, \dots, u_{in} a_n)$   
 $w_j = (u_{j1} a_1, u_{j2} a_2, \dots, u_{jn} a_n)$

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 i와 j는 더 밀접되어 있다고 가정할 수 있다.

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

모우드 기법에 근거하지 않고 시스템의 행렬 요소의 정보에 근거한 관계계수를 도입하여 발전기들의 coherency를 확인하는 기법들도 활용되고 있다. 운전점에서 전력시스템의 비선형 방정식들을 선형화하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta Y \quad (4)$$

$$0 = C\Delta X + D\Delta Y \quad (5)$$

또 이 식들에서  $\Delta Y$ 를 소거하여 간단히 하면 아래의 식을 얻는다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = (A - BD^{-1}C)\Delta X = \bar{A}\Delta X \quad (6)$$

이 상태공간 모델에 기초하여 발전기j가 발전기i에 영향을 미치는 관계 계수  $R_{ij}$ 는 아래와 같이 정의되고[7],

$$R_{ij} = [\bar{A}_{i2,j1} \cdot \Delta X_{d,j,1}(0) + \bar{A}_{i2,j2} \cdot \Delta X_{d,j,2}(0) + \dots + \bar{A}_{i2,jn} \cdot \Delta X_{d,j,n}(0)] \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

발전기i와 발전기j 사이의 관계 지수  $RI_{ij}$ 는 아래와 같이 정의될 수 있다.[7]

$$RI_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + R_{ji}^2} \quad (8)$$

이 관계지수는 두 기기들이 얼마나 밀접하게 관련되어 있는가의 척도이다.  $RI_{ij} > RI_{ik}$  이면, 발전기i는 발전기k보다 발전기j에 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.

본 논문에서는 coherency를 확인하기 위하여 (8)식의 관계지수를 사용한다.

관계지수를 사용하여 밀접한 그룹들을 확인하고 그룹핑 하는 과

정은 아래와 같다.

가) (8)식을 사용하여 관계지수를 결정한다.

나) 가장 큰 관계지수를 선택한다.

다) 선택된 관계지수를 가지는 두 기기들  $i, j$ 를 같은 밀접 그룹으로 지정한다. 밀접 그룹이 선택되면 밀접 그룹  $G_{RA}$  는  $G_{RA} = G_{RA} \cup G_{RB}$  로서 경선된다. 여기서  $G_{RA}, G_{RB}$ 는 각각 기기  $i, j$ 와 밀접한 기기들이 있는 세트들이고  $G_{RB}$ 는 삭제된다.

라) 밀접한 그룹들의 수가 지정된 수와 같으면 멈춘다.

마) 다음의 가장 큰 관계지수를 선택한다.

바) 단계 다)로 돌아간다.

이 연구에서 발전기의 동적 동작을 묘사하기 위하여 IEEE-Type I 여자기 모델을 가지고 있는 2축 모델의 발전기 모델이 사용된다.

## 2.2 발전기 축약을 위한 전력조류 부합 기법

coherency 기법들의 동가와 과정은 두가지 주요 단계로 구성된다. en 단계는 coherency 확인과 시스템 축약의 과정이다. 어떤 전력시스템에서 발전기들의 밀접된 그룹들이 확인되면, 같은 그룹에 있는 발전기들은 축약되고 하나의 동가 발전기로 감축된다. 기존 기법에서 특히 지리적으로 멀리 떨어진 그러한 발전기들이 관성 축약 기법을 사용하여 축약될 때 원래의 시스템의 전력조류 조건들이 감축된 동적 동가에서는 유지되지 않는다. 축약 후에는 모선  $i$ 와  $j$ 는 PQ 모선으로 취급되기 때문에 모선  $i$ 와  $j$ 에 있는 발전량은 관성 집적의 단계에서 0으로 세트된다.

이 연구에서는 계통을 축약할 때 선로 조류를 그대로 유지하도록 만들어 줌으로써 계통 축약 시스템의 시뮬레이션 결과가 축약 이전의 시뮬레이션의 결과와 더 근접하게 되는 선로조류 유지기법을 제시한다. 집적 후에 모선  $i$ 와  $j$ 를 PQ 모선보다는 PV모선으로 취급함으로써 동일한 전력조류 조건이 구하여질 수 있다. 모선  $i$ 와  $j$ 의 발전기들을 축약하는 경우 전력조류를 유지시키는 동일조건을 만들어 주기 위하여 축약 이전의 모선들은 그대로 두되, 모선  $i$ 와  $j$ 의 모선의 유효 발전력은 영으로 두고 모선  $i$ 와  $j$ 에 연결되는 가상모선  $k$ 를 추가하여 축약전의 모선  $i$ 와  $j$ 의 유효발전력의 합을 발전하는 것으로 하고, 이 발전기에 모선  $i$ 와  $j$ 의 기기들의 관성과 계통계수를 모두 합하여 하나의 동가 기기의 관성과 계통계수로 환산하여 집적시킨다. 발전기의 리액턴스와 과도 리액턴스는 병렬로 연결된 회로의 리액턴스로 계산하여 적용한다. 가상모선  $k$ 에 동가 축약된 발전기가 연결되며, 이 모선에서 축약되어 유효 발전량이 없는 모선  $i$ 로 전송되는 모선  $i$ 에서의 전력으로 표현하면 아래와 같이 된다.

$$S_{ki} = \frac{V_i I_{ki}^*}{Z_{ki}} = \frac{V_i}{Z_{ki}} \left( \frac{V_k - V_i}{Z_{ki}} \right)^* \quad (9)$$

$$= \frac{V_i V_k^* - |V_i|^2}{Z_{ki}}$$

여기서  $Z_{ki}$ 는 모선  $k$ 와  $i$ 사이의 선로 임피던스를 나타내고 변수  $w$ 의 윗줄은 페이저를 나타낸다. 선로 임피던스와 전압의 페이저는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\overline{Z_{ki}} = r_{ki} + jX_{ki} \quad (10)$$

$$\overline{V_i} = V_i e^{j\theta_i} \quad (11)$$

$$\overline{V_k} = V_k e^{j\theta_k} \quad (12)$$

이 식들을 위의 식 (8)에 대입하여 정리하면  $Z_{ki}$  선로를 통하여  $k$ 모 선으로부터  $i$ 모선에 송전되는 유효전력과 무효전력은 아래와 같다.

$$P_{ki} = \frac{(V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k) - V_i^2) r_{ki} - V_i V_k X_{ki} \sin(\theta_i - \theta_k)}{r_{ki}^2 + X_{ki}^2} \quad (13)$$

$$Q_{ki} = \frac{(V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k) - V_i^2) X_{ki} + V_i V_k r_{ki} \sin(\theta_i - \theta_k)}{r_{ki}^2 + X_{ki}^2} \quad (14)$$

축약된 동적 동가 시스템의 모선  $i$ 에서의 전력조류방정식을 고려하면 아래와 같다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (15)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (16)$$

여기서  $P_i$ 와  $Q_i$ 는 모선  $k$ 로의 전력 주입은 제외한 모선  $i$ 의 순 유효/무효전력 주입이고,  $n$ 은 축약되기 전의 모선수이다. 식(15)와 식(16)에서 모든 전압의 크기와 위상각은 축약 이후에도 동일한 값을 갖도록 하여 대입하고, 아래의 식을 만족하도록  $Z_{ki}$ 의 값을 결정한다.

$$P_{ki} = P_i \quad (17)$$

$$Q_{ki} = Q_i \quad (18)$$

축약 후에 모선  $i$ 와  $j$ 를 PQ 모선보다는 PV모선으로 취급함으로써, 식(17)과 (18)을 만족시키는  $Z_{ki}$ 의 선로를 축약 발전기 모선  $k$ 로부터 PV모선  $i$ 로 연결시키고 동일한 과정을 거쳐서  $Z_{kj}$ 의 선로를 축약 발전기 모선  $k$ 로부터 PV모선  $j$ 로 연결시키면, 축약 이전과 동일한 전력조류 조건이 구하여질 수 있다.

이렇게 계통을 축약할 때 선로 조류를 그대로 유지하도록 만들어 줌으로써 계통 축약 시스템의 시뮬레이션 결과가 축약 이전의 시뮬레이션의 결과와 더 근접하게 되도록 할 수 있다.

## 3. 강인한 $H_\infty$ 제어기 설계

$H_\infty$  제어 이론은 플랜트의 불확실성을 심동 모델로 표현하고 특정한 조건을 만족하는 모든 섭동에 대하여 제어 시스템을 안정화 시키는 제어기를 구하는 것이다.  $H_\infty$  제어 시스템을 2단자 블록 다이어그램(two-port block diagram)으로 표현하면 아래 그림과 같이 나타낼 수 있다.

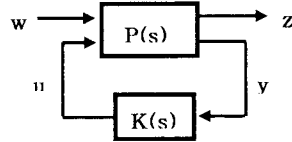


그림 1.  $H_\infty$  제어기의 2단자 블록 다이어그램

그림 1에서,  $P(s)$ 는 제어 대상 플랜트,  $K(s)$ 는 제어기를 나타내고,  $w$ 는 외부입력,  $z$ 는 제어되는 출력이다. 플랜트는 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$\dot{x} = A x + B_1 w + B_2 u \quad (19)$$

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u$$

$$y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u$$

$z, y, u$ 를 전달함수를 사용하여 관계식을 나타내면

$$z = P_{zw} w + P_{zu} u \quad (20)$$

$$y = P_{yw} w + P_{yu} u$$

$$u = K y$$

으로 표현될 수 있다. 외부입력  $w$ 와 제어되는 출력  $z$ 는

$$z = T_{zw} w \quad (21)$$

여기서,

$$T_{zw} = P_{zw} + P_{zu} K (I - P_{yu} K)^{-1} P_{yw} \quad (22)$$

$$= \text{LFT}\{P, K\}$$

이다. 페루프 전달함수  $T_{zu}$ 에 대한 위의 표현이 선형 분수 변환 (Linear fractional transformation: LFT)이다.

$H_\infty$  제어 문제는 위의 페루프 전달함수의  $\|T_{zu}\|_\infty$ 을 최소화하는 내부적으로 안정화하는 제어기  $K(s)$ 를 찾는 것이다.

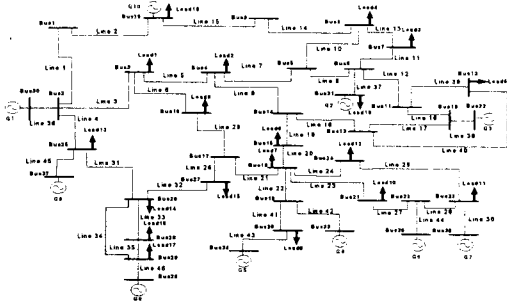


그림 2. IEEE 39 모션 테스트 시스템

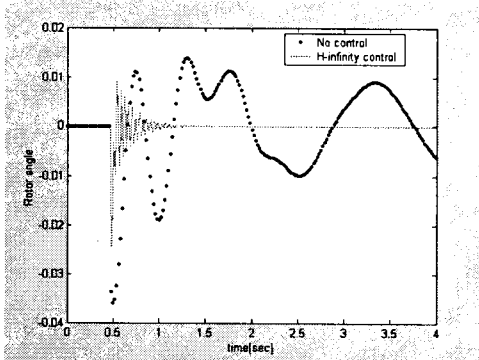


그림 3.  $H_\infty$  제어를 적용하기 전후의 발전기 6의 로우터 각 변화의 궤적

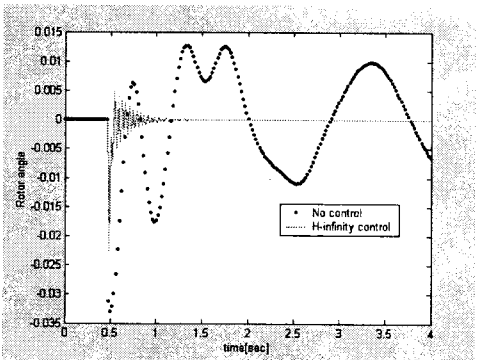


그림 4.  $H_\infty$  제어를 적용하기 전후의 발전기 1의 로우터 각 변화의 궤적

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 검토

본 논문에서 제시하는 선로조류유지 기법을 이용하여 전력시스템을 축약하는데 적용하기 위해 IEEE 39 모션 테스트 시스템을 사용하였다(그림2). 10기의 발전기가 있으며 29개의 부하모선이 있다.

발전기 간의 관계지수를 계산하여 보면 가장 밀접한 관계를 갖는 것은 발전기 모선 6과 7이고 두 번째가 발전기 모선 1과 8이고 세 번째가 발전기 모선 4와 5이다[7]. 3순위까지 등가 축약그룹을 만드는 것으로 하여 테스트한다.

부하모선은 그대로 두고 발전기모선을 축약하는 것으로 하여 등가시스템의 유효성을 테스트하기 위하여 앞에서 언급한 사고 발생시의 시뮬레이션을 수행하고  $H_\infty$  제어를 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 발전기 6의 로우터 각 변화의 궤적을 나타낸 것이 그림 3에 제시되어 있다. 그리고 발전기 1의 로우터 각 변화의  $H_\infty$  제어를 적용하기 전후의 궤적을 나타낸 것이 그림 4에 제시되어 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 계통을 축약할 때 선로 조류를 그대로 유지하도록 만들어 줄으로써 계통 축약 시스템의 시뮬레이션 결과가 축약 이전의 시뮬레이션의 결과와 더 근접하게 되는 선로조류 유지기법을 제시하였다. 이를 활용하여 다변수제어 기법인  $H_\infty$  제어기법을 소규모 전력시스템에 적용하였으며, 선로조류 유지기법에 근거한 축약기법을 사용하여 다변수제어를 전력시스템에 효과적으로 잘 적용할 수 있음을 보여주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-103)주관으로 수행된 과제임.

#### [참고 문헌]

- [1] G. Troullos, J. Dorsey, H. Wong, J. Myers "Reducing the order of very large power system models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, pp. 127-133, Feb. 1988..
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 이동수, 전영환, "모션 간 유사지수에 근거한 새로운 계통축약 기법", 대한전기학회 논문지 Vol. 55A, pp 156-162, Apr. 2006.
- [7] 이병하, 오민혁, "상대변수들의 관계지수를 이용한 전력시스템 축약기법 연구", 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회, Nov. 2006.