

Weak Coupling Method를 이용한 계통 축약

\* 이한민\*, 노규민\*\*\*, 권세혁\*  
 \* 고려대학교 전기공학과, \*\* 충청대학 전기과.

A Network Reduction using Weak Coupling Method

\* H.M. Lee\*, K.M. Rho\*\*\*, S.H. Kwon\*  
 \* Korea University, \*\* Chungcheong College.

**Abstract** - This paper presents a network reduction using weak coupling method. Weak coupling method of identifying coherent generator groups are proposed. The partitioning technique used in this paper is based on a property of sparse matrix factorization. When a matrix has been factorized, a system is divided into study area, boundary buses and external area. A reduction process for external system starts with the load bus elimination and coherent generator aggregation. An identification of coherent generator group, network partitioning and network reduction are presented.

이때 발전기는 고전(classical)모델을 사용하여 상태행렬 A를 구한다.

Coupling Factor

계통이 N<sub>1</sub>발전기그룹과 N<sub>2</sub>발전기그룹의 2개의 부계통으로 나뉘어져 있다면 coupling factor S는 상태행렬 A를 나타내는 그림1에서 빗금 친 부분을 나타내는 부계통의 놈(norm)의 합을 빗금 친지 않은 부계통의 놈과 전체 상태행렬의 놈의 합으로 나눈 것으로 정의한다.

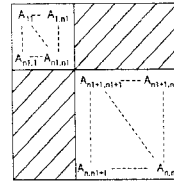


그림 1. 상태 행렬

1. 서 론

대형 복잡화되어 가는 오늘날 전력계통은 계통 해석면에서 점점 늘어나는 계산시간과 비용으로 인해 많은 문제점을 낳고있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로서 연구영역은 자세한 모델을 유지하면서 외부영역이 간략화된 등가모델로 대처하여 계통의 크기를 감소시키는 연구가 계속되어 왔다. 이렇게 얻어진 축약계통은 원래 계통의 고유한 특성을 최대한 반영하고 있어야 할 것이다.

따라서 coupling factor S는 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{SNUM}{SDEN} \tag{1}$$

여기서

$$SNUM = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \|A_{ij}\| + \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \|A_{ij}\| \tag{2}$$

$$STOT = \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \|A_{ij}\| \tag{3}$$

$$SDEN = STOT + SNUM \tag{4}$$

이때  $\|A_{ij}\|$  은 다음과 같이 정의되는 놈이다.

$$\|A_{ij}\| = \left( \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 a_{pq}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

축약된 계통을 얻기 위해 발전기들의 연관성을 인식하여 연관 발전기 그룹별로 하나의 등가 발전기로 나타내어야 하는데 이런 발전기의 연관성을 인식하는 방법으로 선형시간모의법(Linear time simulation method)이 있다[1]. 이 방법은 동요곡선을 그려 발전기의 연관성을 정확히 파악할 수 있지만 계산시간이 많이 들고 외란에 독립적이지 못하다는 문제점이 있다.

coupling factor S를 이용하여 계통 내에 서로 관계 있는 coupling의 순서대로 발전기들을 재배열한다. 그런 이후에 m개의 발전기들 (즉, L(1),L(2),...,L(m))을 포함하고 있는 N<sub>1</sub>부계통과 L(m+1)번째 발전기간 coupling의 정도는 coupling factor S의 변화정도를 측정함으로써 알 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 weak coupling method를 적용하며 이 방법은 전력계통의 선형화된 상태행렬을 이용하여 연관성을 인식하는 방법으로서 계산시간이 빠르고 외란에 독립적이다[2]. 또한 계통 분할을 하기 위해 기본 조류 계산을 수행한 후 얻어지는 모션 어드미턴스 행렬을 이용하여 LDU 삼각 분해를 하고 이때 하삼각행렬 L의 열 또는 상삼각행렬 U의 행을 통해 경로표(path table)를 구하게 된다. 이 경로표로부터 경로집합을 구해 계통 분할을 하게된다[3]. 그리고 계통 분할 후 계통 축약을 하기 위해서 연관 발전기 그룹을 바탕으로 부하 모션과 발전기 모션을 축약한다[4]. 본 논문에서는 위 방법을 일괄적으로 처리하여 뉴잉글랜드 39모션 시험 계통에 적용함으로써 축약된 계통과의 선로 조류값을 비교하여 본 논문의 타당성을 검토하고자 한다.

$$\Delta S'(m) = S(m) - S(m-1) \tag{6}$$

2. Weak Coupling Method

연관 발전기 그룹핑의 개념은 연관성이 있는 발전기를 인식하여 같은 그룹에 있는 모든 발전기들의 모션을 하나의 모션으로 등가화시키는 것이다.

식(6)에서 계산된 결과에 의해서  $\Delta S'(m) > 0$ 이면 L(m+1) 발전기는 N<sub>2</sub>그룹과 강하게 coupling 되어 있고,  $\Delta S'(m) < 0$  이면 L(m+1) 발전기는 N<sub>1</sub>그룹과 강하게 coupling 되어 있음을 의미한다.

### 3. 연관 발전기 그룹을 이용한 계통 분할

일반적으로 계통의 선형방정식은 식(7)과 같다.

$$Ax = b \quad (7)$$

여기서,

- A : nonsingular matrix
- b : 기지의 독립벡터 (known independent vector)
- x : 미지의 열벡터 (unknown column vector)

행렬 A를 LDU 삼각 분해하면 식(8)과 같이 표기된다.

$$A = LDU \quad (8)$$

- 여기서, L : 하삼각행렬
- U : 상삼각행렬
- D : 대각행렬

이때 경로는 하삼각행렬 L의 열 또는 상삼각행렬 U의 행을 이용하여 구한다.

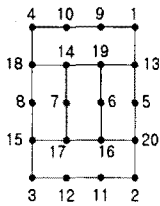
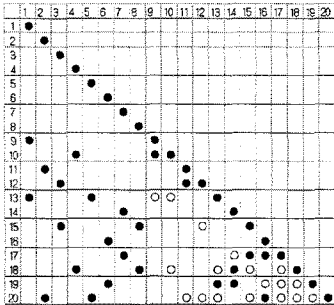


그림2. 20모선 시험 계통 모델

계통 분할을 위해 그림2와 같이 임의의 20모선 시험 계통 모델을 이용하여 그림3과 같은 하삼각행렬 L을 구한다.



- 행렬의 원래 요소
- fill-in 요소

그림3. 하삼각행렬 L

그리고 이 하삼각행렬로부터 표1과 같은 경로표를 얻을 수 있다.

계통을 분할하기 위해 경로표로부터 모선 1에 대한 경로 집합을 구하면 모선 1, 9, 10, 13, 18, 19, 20이 된다. 이 경로 집합으로부터 그림3과 같이 기하학적으로 모선 1, 9를 연구영역으로 하고 ●표시의 모선 10, 13, 18, 19, 20은 외부영역과 직접 연결되어 있으므로 경계모선으로 구분하여 계통을 분할할 수 있다.

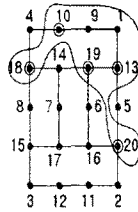


그림4. 시험 계통의 분할

표1. 시험 계통의 경로표

모선	인접모선	모선	인접모선
1	9	11	12
2	11	12	15
3	12	13	18
4	10	14	17
5	13	15	17
6	16	16	17
7	14	17	18
8	15	18	19
9	10	19	20
10	13	20	0

### 4. 계통 축약

계통 축약은 부하 모선과 발전기 모선 축약을 의미하며 모선과 선로에 의해서 표현되는 전체 계통의 크기를 줄이는 것이다.

#### 4.1 부하 모선 축약

부하 모선은 kron reduction method을 이용하여 그림5와 같이 축약한다.

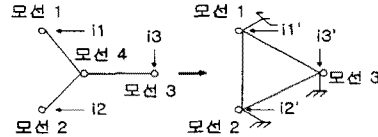


그림5. 부하 모선 축약

#### 4.2 발전기 모선 축약

부하 모선 축약 후 남겨진 발전기 모선 그룹은 등가 발전기로 구성되며 이 등가 발전기는 계통에 연결되고 나머지 발전기들은 제거된다. 계통은 연관 그룹에서 보여진 것과 같이 외부계통에 대해 같은 전력 조류 상태를 유지하도록 수정되어야 한다. 이런 절차 과정은 다음과 같다.

i) 연관 그룹에서 가장 큰 관성정수를 가지는 발전기가 기준 발전기로 선정된다. 즉, 등가발전기가 이 모선에 연결된다는 의미가 된다.

ii) 연관 발전기 그룹에서 기준 발전기의 단자 모선을 제외한 모든 발전기 단자 모선은 기준 발전기와 각각의 발전기 단자 모선 사이에 복소권수비(complex turn ratio)를 가지고 이상변압기(ideal transformer)을 연결한다. 이 이상변압기와 발전기 단자모선, 외부영역 사이에 있는 원 선로(original branch)의 일련의 조합으로서 기준 발전기의 단자 모선을 제외한 모든 발전기 단자 모선들은 그림6과 같이 제거된다.

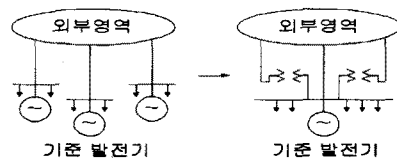


그림6. 발전기 모선 축약

## 5. 사례 연구

앞 절까지 기술한 이론들을 뉴잉글랜드 39모선 시험 계통에 적용하였다. 연관 발전기 그룹 선정은 weak coupling method를 적용하여 그림7과 같이 전체 발전기를 (9, 4, 5), (7, 6), (3, 2), (1, 8, 10) 4개 연관 발전기 그룹으로 나누었다.

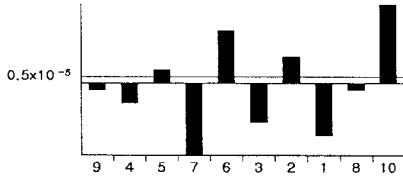


그림7. Coupling 막대 그래프

그리고 뉴잉글랜드 39모선 시험 계통에 대해 모션 어드미턴스 행렬을 구하고 이 행렬을 식(7)과 같이 LDU 삼각 분해하였다. 이 하삼각행렬 L또는 상삼각행렬 U로부터 발전기 그룹 (7, 6)에 대한 경로집합을 구함으로써 연구영역은 발전기 그룹 (7, 6)과 부하모선 (22, 23, 24)으로 되고 경계모선은 (16, 21)으로 선정되어 그림8과 같이 전체 계통을 분할하였다. 따라서 외부영역은 연관 발전기 그룹을 바탕으로 발전기 모선과 부하모선을 축약함으로써 그림9와 같은 등가모델을 구성하였다.

그리고 구성된 등가 모델로 조류계산을 수행하여 연구 영역의 전력 선로 조류값을 표2에 나타내었다. 표2에서 보는바와 같이 원시 계통과 축약된 등가모델 계통을 비교해 볼 때, 등가모델이 정확도 측면에서 최대 오차값은 1.60%이고 평균 오차 값은 0.49%로 나타났다.

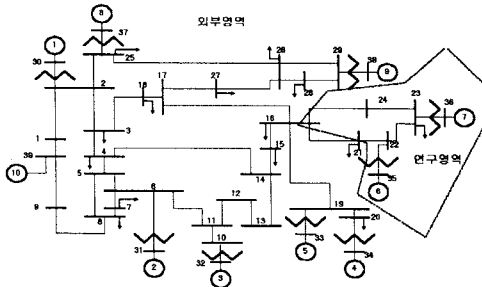
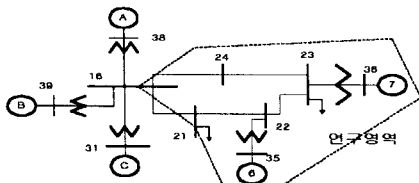


그림8. 뉴잉글랜드 39모선 시험 계통도의 계통 분할



A : 9, 4, 5번 발전기의 등가모델  
B : 1, 8, 10번 발전기의 등가모델  
C : 3, 2번 발전기의 등가모델

그림9. 축약 된 New England 시험 계통도

표2. 선로 조류계산 결과 비교

선로 번호		원시 계통		축약된 등가모델 계통	
시작	끝	유효전력	무효전력	유효전력	무효전력
22	23	80.74	-70.89	81.20	-71.49
22	35	-725.27	-10.32	-726.51	-10.31
21	22	-641.12	-46.92	-641.90	-47.30
23	24	371.60	33.26	372.06	33.80
23	36	-538.42	-171.19	-538.42	-172.39
16	24	-59.91	65.81	-60.35	65.48
16	21	-365.98	62.41	-366.75	62.15

## 6. 결론

대규모 전력계통 해석에 적합한 등가모델을 구성하기 위해 일괄적으로 연관 발전기 그룹 인식 및 계통 분할, 계통 축약을 하였다.

따라서 본 논문에서 연구한 주요 내용은 다음과 같다. 첫째, Weak coupling method를 적용하여 전체 발전기에 대해 연관성을 인식하여 그룹링 하였다.

둘째, 모션 어드미턴스 행렬을 LDU 삼각 분해하고 L 또는 U 행렬로부터 경로표를 구하여 연관 발전기 그룹의 모선에 대한 경로집합을 구하였다. 그리고 그림8처럼 뉴잉글랜드 시험 계통에 적용하여 계통 분할을 하였다.

셋째, 부하 모선과 발전기 모선을 축약함으로써 전체 계통의 크기를 감소시킬 수 있었다.

본 연구에서 제시한 계통 축약의 타당성을 검증하기 위하여 원시 계통의 선로 조류값과 축약된 등가모델 계통의 선로 조류값을 비교함으로써 만족 할만한 계산 결과 값을 얻을 수 있었다.

앞으로 시험 계통이 아닌 실제계에 적용하여 축약된 등가모델을 연구해 나갈 계획이다.

## (참 고 문 헌)

- [1] R. Podmore, "Identification of Coherent Generators for Dynamic Equivalents", IEEE Trans., Vol. PAS-97, No.4, pp. 1344-1352, July/Aug 1978
- [2] 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
- [3] W. Tinney and J.M. Bright, "Adaptive reductions for power flow equivalents", IEEE Trans., on Power Systems, vol. PWR-2, pp.351-360, May 1987
- [4] 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