

전력계통 등가화를 위한 지역분할기법

° 한성호, 임성정, 윤용한, 김재철

송실대학교 전기공학과

Partitioning Technique for Equivalents of Power System

°Sung-Ho Han, Seong-Jeong Rim, Yong-Han Yoon, Jae-Chul Kim

Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract

This paper presents a partitioning technique for equivalent models to large scale power system. The proposed partitioning technique is utilized by using a heuristic approach based on distributed array processor and the coherent groupings of generator buses. In this paper the reduced Ward-PV method considering the characteristics of buses is used to equivalent models of external system.

The technique is demonstrated on New England system with 39 buses, 46 lines and 10 generators.

본 연구에서 제안한 지역분할기법의 효율성을 검증하기 위하여 New England 39모선 계통을 선정하여 등가축약을 구성하였으며 사례연구를 통해 만족할 만한 결과를 얻었다.

2. 이론적 고찰

본 연구는 절점분할법을 이용한 분산배열처리 이론에 코히런트 그룹인식 전문가시스템을 도입하여 계통의 등가축약을 자동적으로 처리하는 지역분할기법을 제안하였다. 이에 대한 이론적 고찰은 다음과 같다.

2-1. 분산배열처리법

대규모 전력계통을 최소의 상호연결을 갖는 소계통으로 분할하는 기법에는 절점을 중심으로 분할하는 BBDF와 가지를 중심으로 분할하는 NBDF가 있다. 이러한 방법은 원래계통의 모선 어드미턴스행렬을 위와 같은 형태로 재정리하므로써 계산 속도의 향상 및 분할된 소계통이 독립적으로 병렬처리할 수 있도록 하는 기법이다. 본 연구에서 적용한 분산배열처리법은 절점을 중심으로 분할된 계통을 BBDF 행렬로 재구성하여 병렬처리가 가능하도록 하는 방법이다.

1. 서론

전력계통 해석을 위한 응용프로그램, 즉 안전도 해석, 안정도 해석 등은 계통의 계획 및 운용에 있어서 매우 중요한 분야이다. 최근들어 전력계통의 대규모화, 복잡화에 따라 대규모 전력계통을 대상으로한 시뮬레이션 분석은 많은 계산시간이 요구되며, 이에 대한 노력과 비용이 문제가 되었다. 따라서, 전력계통을 관심지역인 내부계통과 관심의 지역인 외부계통으로 분할하여, 외부계통을 간단한 등가모델로 축약하는 등가방안이 연구되었다. 그러나 대형실계통의 경우 축약대상지역인 외부계통의 크기 또한 대규모이기 때문에 등가축약 프로그램 수행시 상당한 계산량이 요구되었다. 따라서, 외부계통도 다시 소계통(sub networks)으로 재구성하는 분할기법에 관한 연구가 절실히 요구된다.

지역분할기법은 계통 등가모델의 구성에 있어서 정확도 및 계산시간 측면에서 볼때 매우 중요하며, 또한 이를 자동적으로 처리할 수 있는 자동분할 기법의 개발이 요구된다. 일반적으로, 계통분할기법은 계통의 구성형태를 기초로 하는 경험적 접근법(heuristic approach)과 동적 프로그래밍(dynamic programming) 기법으로 크게 나눌 수 있다. 경험적 접근법은 계통을 절점(cutset nodes)을 중심으로 분할하는 BBDF(bordered block diagonal form)^[1]와 가지(cut branches)를 중심으로 분할하는 NBDF(nearly block diagonal form)^[2]로 분류된다. 본 연구는 보다 타당성 있는 계통의 지역분할처리를 자동적으로 수행할 수 있는 방안을 제시하여, 이를 계통의 동태등가화 방안에 적용하고자 한다. 따라서, 본 연구는 경험적인 접근법중 절점분할기법에 이론적 근거를 둔 분산배열처리(distributed array processor)알고리즘에 코히런트 발전기 그룹 정보를 도입하여 분산배열처리방법이 전력계통의 등가모델구성에 적용할 수 있도록 하는 지역분할기법을 제안하였다. 계통의 등가화방안은 기존에 발표한 모선의 특성을 고려한 등가축약법^[3]을 이용하였으며, 이 등가법은 계통의 정태 및 동태 안전도해석에 있어서 가장 효율적인 코히런트 발전기 그룹을 토대로한 축약 Ward-PV법을 개선한 것이다.

2-1-1. 절점중심의 계통분할법

전체계통의 구성형태에 따라 계통내 노드의 구조적 연결관계를 논리행렬로 구성하고, 이를 논리 연산을 이용하여 배열처리하는 분할법이다. 논리행렬의 요소들은 노드간의 연결관계를 TRUE와 FALSE로 나타내며, 그림 1과 같은 간단한 5 노드 모델계통을 이용하여 설명한다.

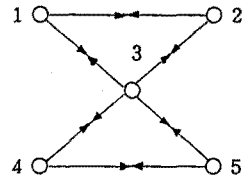


그림 1. 모델 계통도(5 노드)

단개별 분할처리과정은 다음과 같으며, 그 결과는 표 1에 나타내었다.

- 1단계) 분할을 위한 초기노드를 선정한다. - 1번 노드
- 2단계) 초기노드로 부터의 전력조류에 대한 경로(path)와 상호 연결관계를 고려하여 끝노드(terminating node)를 검색.
1번 노드 -> 2개(2번 노드, 3번 노드)

3단계) 검색결과 끝노드가 선정되면, 전력조류방향을 고려하여 각각의 끝노드와 다른 노드와의 연결정도를 조사한다. 이때, 초기노드와 끝노드사이의 연결과 끝노드 상호간의 연결은 검색에서 제외한다.

2번 노드 — 0개

3번 노드 — 2개(4번 노드, 5번 노드)

4단계) 초기노드와 연결된 끝노드중 다른 노드와의 연결정도가 가장 작은 노드를 새로운 초기노드로 선택한다.

새로운 초기노드 — 2번 노드

5단계) 새로운 초기노드는 첫번째 분할소계통에 소속한다.

6단계) 처리과정은 다음 조건식을 만족할때까지 반복한다.

$$K \leq K_{\max} \text{ or } NN = 0 \quad (1)$$

여기서, K : 소계통에 포함되는 노드의 갯수

K_{\max} : 소계통의 노드의 최대갯수

NN : 단계별 끝노드의 갯수.

표 1. 5 노드 모델계통의 분석결과

K	ON	AN	NN
1	1	2, 3	2
2	2	3	1
3	3	4, 5	2

여기서, ON : 소계통에 포함되는 새로운 초기노드의 번호.

AN : 선택된 새로운 초기노드와 연결된 끝노드 번호.

2-1-2. BBDF행렬을 이용한 분산처리법

대규모 전력계통은 모션그룹 또는 절점그룹이 분할된 소계통과 연계선을 통해 상호 연결된 형태로 표현되어진다. 따라서, 앞에서 언급한 배열처리를 이용한 절점중심의 계통분할법을 이용하여 계통을 분할한후 병렬처리를 위해 BBDF행렬로 재구성한다. 이를 근거로 전력계통을 N개의 소계통으로 분할하면 다음 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

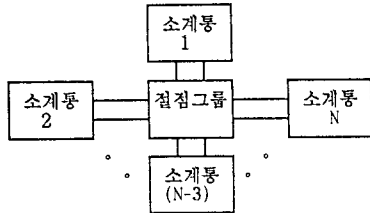


그림 2. 소계통으로 분할된 계통도

소계통으로 분할된 전체모선의 이드미턴스행렬을 BBDF형식으로 변환하면, 전체 모션수가 m개인 계통의 경우 다음 그림 3과 같이 구성된다.

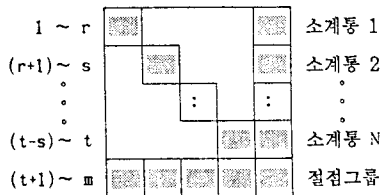


그림 3. BBDF 행렬 구성도

즉, 소계통 1은 1에서 r개의 모션들로, 소계통 2는 (r+1)에서 s개의 모션들로 형성되며, 나머지 소계통들도 각각의 보유 모션수만큼 그룹을 형성하게된다. 절점노드들은 그림 3과 같이 (t+1)에서 m개로 그룹이 형성되며, 절점분할 구성행렬의 마지막에 배치한다.

2-2. 코히런트 그룹설정

일반적으로 계통내 발전기들이 다음의 조건을 만족하면 코히런트하다고 말하며, 이들 발전기들이 전기적으로 서로 밀접한 관계를 갖고 있음을 의미한다.

$$|\Delta\theta_i(t) - \Delta\theta_{r_g}(t)| < \epsilon \quad i, r_g \in G_k \quad (2)$$

여기서, $\Delta\theta_i(t)$: 시간 t에서의 i번째 발전기 모션각의 변화분.

$\Delta\theta_{r_g}(t)$: 시간 t에서의 기준 발전기 모션각의 변화분.

ϵ : 지정 허용오차.

G_k : k번째 코히런트 그룹의 발전기 모션의 집합.

현재 개발된 코히런트 그룹선정을 위한 방법에는 과도안정도 해석법과 계통파라미터법이 있다.

본 논문에서 적용한 발전기의 코히런트 그룹인식은 계산량이 많은 과도안정도 해석법 보다 계통의 정상상태시 정보만으로 코히런트 그룹을 선정하는 계통파라미터법을 이용하였다. 특히, 기존에 발표된바 있는 코히런트 선정방법으로 계통파라미터법에 발전기간의 전기적 관계인 density measure 개념과 경험적 규칙을 적용한 코히런트 그룹인식을 위한 전문가시스템¹⁴⁾을 이용하였다. 이 방법은 동적상태시도 유용하게 적용될 수 있음이 입증된바 있다.

3. 계통등가를 위한 지역분할기법

본 논문에서 제시한 대규모 전력계통의 등가화를 위한 지역분할기법은 다음 2단계 분할과정으로 나누어진다. 즉, 1단계 분할법은 전체계통에 대한 내부계통의 선정방법이며, 2단계 분할법은 외부계통내의 코히런트 그룹특성을 분산배열처리방안에 도입한 방법이다.

3-1. 1단계 분할법.

대규모 전력계통의 등가화 방안에 있어서 우선적으로 고려해야 할 것은 전체계통을 관심영역의 기준에 따라 내부계통과 이를 둘러싼 나머지 지역인 외부계통, 그리고 내부계통과 외부계통을 상호 연계시켜주는 경계모선으로 구분하는 것이다.

전력계통의 등가모델의 구성에 있어서 이러한 내부계통의 선정에 관한 사항은 등가축약된 계통의 정확도 및 계산량에 따른 수행시간에 중요한 영향을 미친다. 그러나 지금까지의 전력계통의 등가화에 관련하여 제안된 많은 방법들이 내부계통의 선정방안에 있어서 정확한 기준선정을 제시하지 못하고 사용자의 인위적인 판단에 의존하였다. 이는 관심지역의 정의자체가 사용자 요구에 따라 변동하고, 관심지역의 범위 한계에 대한 설정의 문제점 때문이었다.

따라서, 본 논문은 2장에서 언급한 배열처리를 이용한 절점중심의 계통분할법을 적용하여 내부계통의 선정 및 경계모선을 선정하였다. 분할처리과정은 이론적 고찰과 거의 유사하며, 동태등가화방안에 적용하기 위하여 초기노드는 주요 관심지역의 모션중 가장 전력값이 큰 모션을 선정하였으며, 경계모선의 선정은 다른 모션과의 연결정도가 가장 큰 절점을 선택하였다.

3-2. 2단계 분할법

1단계 분할법이 수행된후 전체계통은 내부계통과 외부계통으로 분할되며, 다음 단계로 외부계통을 대상으로한 등가모델화를 실시하게 된다. 그러나 외부계통의 크기 또한 대규모이기때문에 보다 신속하고 효율적인 등가모델을 구성하기 위해서는 외부계통을 다시 소계통으로 분할하여 소계통별로 독립적인 등가화를 수행하는 방안이 요구된다.

따라서, 외부계통의 등가모델화 처리과정을 소계통단위별로 병렬처리가 가능하도록 개선한 기법이 2단계 분할방안이다. 외부계통의 발전기모선들은 2-2절에서 제안한 코히런트 그룹 선정기법에 의하여 코히런트 그룹을 형성하며, 그 결과 얻어진 그룹의 갯수를 외부계통의 분할갯수로 지정하였다. 또한, 분산배열처리이론의 적용을 위하여 초기노드의 선정은 기존에 발표된 등가축약이론에서 제시한 코히런트 그룹내 발전기모선의 축약시 사용되는 기준등가모선 선정이론으로 적용하였다.

3-3. 계통 등가화 방안

계통의 등가화방안은 본 논문에서 제시한 지역분할기법을 적용하여 계통의 분할을 실시한 후, 모선의 특성을 고려한 등가축약법^[5]을 이용하였다. 동태등가화를 위한 지역분할기법을 이용하여 최종적으로 얻어진 등가모델계통도는 다음 그림 4와 같다.

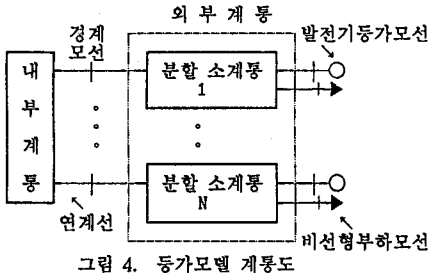


그림 4. 등가모델 계통도

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 계통등가화를 위한 지역분할기법의 효용성을 입증하기 위하여 New England 39모선 모델계통을 선정하였으며, 등가축약을 실시하여 그 정확성을 검증하였다.

제안된 지역분할기법을 모델계통에 적용한 결과, 다음 표 2와 같이 분할되는 양상으로 나타났다. 즉, 1단계 분할인 관심지역에 따른 내부계통의 분할은 39번모선을 초기노드로 선정하여 수행하였다.

표 2. New England 모델계통의 분할 결과

구분	내부계통		외부계통	절점번호
	소계통1 모선번호	소계통2 모선번호	소계통3 모선번호	
1단계 분할	1, 2, 25, 26, 28, 29, 30, 37, 38, 39	4~8, 10~24, 31~36	—	3, 9, 27
2단계 분할	—	4~8, 10~15, 18, 31, 32	16, 17, 19~24, 33~36	—

2단계 분할은 외부계통내의 발전기모선을 대상으로 코히런트 그룹을 선정할 결과 다음 표 3과 같이 2개의 코히런트 그룹으로 나누어졌다. 따라서, 2개의 코히런트 그룹에서 각각, 기준등가발전기 모선으로 선정된 32번 모선과 36번 모선을 분할처리를 위한 초기노드로 선정하였다.

표 3. 외부계통내 코히런트 그룹 결과

구분	코히런트 그룹 1	코히런트 그룹 2
모선번호	31, 32#	33, 34, 35, 36#

여기서, #: 기준등가 발전기모선

본 연구에서 제시한 지역분할기법을 적용한 결과, 다음 그림 5와 같은 분할계통도를 얻었다.

제안된 지역분할기법을 적용하여 구성한 등가축약계통의 정확도 여부를 검증하기 위해 전력조류계산을 수행하였으며, 결과를 다음 표 4와 같이 비교하였다.

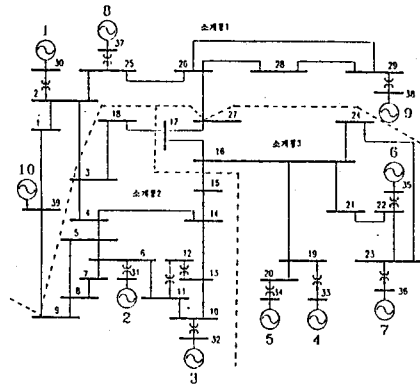


그림 5. 분할된 New England 39모선 계통도

표 4. 조류계산 결과 비교

LINE NO.	FROM	TO	ORIGINAL SYS.		EQUIVALENT	
			P LINE	Q LINE	P LINE	Q LINE
1	2		-0.1194	0.0944	-0.1197	0.1056
1	39		0.1194	0.2620	0.1197	0.2663
2	3		0.3696	0.1632	0.3701	0.1818
2	25		-0.2395	0.0165	-0.2402	0.0129
2	30		-0.2562	0.0098	-0.2562	0.0095
9	39		-0.0151	0.0029	-0.0153	0.0015
25	26		0.0717	0.0395	0.0712	0.0432
25	37		-0.5485	0.0577	-0.5484	0.0556
26	27		0.2648	0.1741	0.2646	0.1959
26	28		-0.1421	0.0922	-0.1423	0.0893
26	29		-0.1901	0.0240	-0.1902	0.0187
28	29		-0.3488	0.1238	-0.3490	0.1242
29	38		-0.8358	0.0898	-0.8355	0.0862

표 4에서 보는 바와 같이 모델계통의 내부지역에 포함되는 선로의 조류계산과 등가축약후 계통의 내부지역 선로의 조류계산 결과가 서로 일치함을 볼수있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 분할기법을 이용하여 계통의 등가축약을 실시한 결과 정확도가 입증되었다.

5. 결론

본 논문은 대형계통의 해석을 위한 등가축약방안에 지역분할기법을 적용함으로써 보다 효율적인 계통등가 프로그램을 개발하였다. 제안된 분할방법은 분산배열처리이론과 코히런트 발전기 그룹을 근거로한 지역분할기법이다. 이 기법을 등가축약법에 적용하여 관심지역인 내부계통의 설정문제와 외부계통의 재구성 방안을 개선하였다. 향후, 제안된 방법의 실용화를 위해 계속적인 연구를 수행할 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] A.O.M. Saleh & M.A.Laughton, "Cluster Analysis of Power System Networks for Array Processing Solutions," IEE Proc, Vol 132, Pt. C, No. 4, pp172-178, JULY 1985.
- [2] 關根泰次の 2冊, "重み付けノード(ブランチ)除去による並列處理のための電力系統の 不平等 分割," T.IEE Japan, vol. 109-B, No.11, pp483-490, 1982.
- [3] 김재철, 한성호, "모선의 특성을 고려한 등가축약," 대한전기학회 추계종합학술대회 논문집, pp44-46, 11월, 1992.
- [4] 김재철, 윤용환, 임성정, "코히런트 그룹 인식을 위한 전문가 시스템," 대한전기학회 추계종합학술대회 논문집, pp67-70, 11월, 1992.
- [5] 한성호, "모선의 특성을 고려한 계통축약," 숭실대학교 대학원 석사학위 논문, 1993. 2.
- [6] Ning Zhu, Anjan Bose, "A Dynamic Partitioning Scheme for Parallel Transient Stability Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, vol.7, No.2, pp940-946, May 1992.