

대규모 전력계통의 동적등가 축약모형 연구

장병훈* 추진부* 권세혁**
 한전전력연구원* 고려대학교**

A Study for Dynamic Equivalent Models in Large Power System

Byung-Hoon Chang* Jin-Boo Choo* Sae-Hyuk Kwon**
 KEPRI* Korea Univ**

Abstract - dynamic analysis of power systems is required the information for building a transfer function of has the heavy calculation of high order matrices. Since generally the order of the state matrix is over the limit of commercial analysis programs such as MASS(Multi-Area Small Signal Stability) Program, it is necessary to develop dynamic equivalent systems with preserving essential properties of the original system.

In this work, a procedurd to find an optimal location of FACTS controllers is presented. The procedure was applied to KEPCO system in the year of 2000. The results on a test system demonstrate the accuracy of dynamic equivalencing and verify the effect of FACTS controllers.

1. 서 론

전력수요의 증가에 따라 전력계통이 확대되면서 전원의 과의 원격화와 대규모화가 이루어지고 있어, 전력계통의 계획 및 운용에 많은 문제점을 가지고 있다[1].

이러한 대규모 전력계통의 적절한 계획 및 운용 전략을 수립하기 위해서는 계통의 과부하, 전압 등을 계산하는 정적 해석 뿐 만 아니라, 많은 양의 계산을 요구하는 과도안정도, 미소신호 안정도 등의 동적 해석을 필요로 하며, 이러한 계통해석 분야는 전력계통이 복잡화, 대규모화 되어가면서, 전력계통에 큰 외란에 의한 상정사고시의 과도 안정도 문제에서 작은 외란에 의한 지역간 동요 및 저주파 동요 등의 미소신호 안정도로도 적정 전압 유지 문제에서 전압안정도의 문제로 바뀌어 가고 있다[2].

전력계통의 미소신호 안정도 평가를 위해서는 전력계통의 상태행렬에 대한 고유치 및 고유벡터에 대한 해석을 필요하며, 전력계통의 전체 고유치 및 고유벡터 해석을 위해 QR 알고리즘이 사용되고 있으나[3], 현재까지 개발된 상용 프로그램에서 800개의 동적 차수로 계산 범위가 컴퓨터 성능 한계에 의해 제한되고 있어, 대규모 계통을 직접 적용하기에는 어려움이 있다[4]. 따라서, 현재까지는 800개 이상의 동적차수를 갖는 대규모 전력계통에 대한 전체 고유치 및 고유벡터 해석이 불가능하다.

또한, 현대의 전력계통은 국가간, 전력회사간 연계가 이루어지면서 점점 더 대규모화, 광역화, 복잡화 되어가고 있고, 이러한 대규모 전력계통의 안정도 평가에 있어 많은 계산시간이 소요되며, 복잡한 전력계통에 대한 동적, 정적 모델을 상세하게 구현하기에도 큰 어려움이 있다. 이와 같은 문제를 극복하면서, 대규모 전력계통의 안정도와 관련된 해석을 수행하기 위해 전력계통의 동적 차수 및 네트워크 구성을 축약하는 방법이 개발되어 왔으며, 이렇게 축약된 계통은 전력계통의 안정도 평가 및 제어기 설계 등과 같은 많은 양의 계산을 필요로 하는 연구분야에 주로 이용되어, 컴퓨터의 계산 시간 및 메모

리 한계를 만족시킬 수 있게 되었다[8].

본 논문에서는 사례계통인 2010년 한전계통에 대해 보다 정확하고, 신속한 안정도 해석 및 제어기 설계가 가능한 축약계통을 제시하였으며, 제시된 축약계통에 대한 적정성을 검증하였다.

2. 축약방법

본 논문에서는 보다 정확하고, 신속한 전압안정도 해석을 위해, 네트워크의 상위 송전계통(기간 송전계통)은 보존(retain)하면서, 하위 송전계통을 축약하는 방법을 제시하였다. 하위 송전계통 축약을 위해, 다음과 같이 전체 계통을 다음과 같은 3가지의 소단위 계통으로 분류하였다.

- 대상 계통(study system) : 축약시 보존될 상위 송전계통(기간 송전계통)
- 외부 계통(external system) : 축약될 하위 송전계통
- 경계 계통(boundary system) : 외부계통의 일부분으로 대상계통과 연결하기 위해 보존될 계통

발전기 축약을 위한 동적 등가화는 발전기의 연관그룹(coherent groups)을 결정하고, 이 연관그룹에 대한 단일 모델로의 통합(aggregation)과정에 의해 축약이 이루어지게 된다. 연관성 해석에 의한 발전기 그룹핑 방법은 전력계통의 해석 목적에 따라 다음과 같이 3가지 방법으로 분류된다.

선형 시간응답 해석방법(Linear Time Simulation Method)은 초기에 단순히 거리측정(사고지점으로부터)에 의해 연관 발전기(coherent generator)를 결정하는 방법을 이용하였으며[5], 이 방법은 주로 과도 안정도 해석을 위한 동적축약에 이용된다[6].

약한 결합 이용방법(Weak Link Method)는 계통 상태행렬에서 발전기 결합상태(coupling)를 해석하여 약한 결합(weak coupling)과 미소 외란(small perturbation)개념의 적용을 통해 연관그룹을 결정하는 방법으로, 이 방법은 대단위 계통에서도 수분의 계산시간을 가질 정도로 빠르기 때문에 대단위 계통의 축약에 주로 이용된다[7].

응답 시간영역 분할방법(Two-Time Scale Method)은 느린 응답변수(slow variable)과 빠른 응답변수(fast variable)를 응답시간 영역(two-time scale)으로 구분하기 위해 특이 섭동 방법(singular perturbation method)을 사용하는 알고리즘이 제시되어 개발되었으며[8], 이후 이 방법을 개선한 알고리즘이 지속적으로 개발되고 있다.

그러나, 계통축약 연구분야는 정확한 계통축약에 이용될 수 있는 해석적 기법이 현재까지 개발되지 않고 있어, 특정한 대규모 전력계통에 대한 계통축약을 위해, 해당 계통에 대한 계통해석 전문가의 경험에 기초한 경험적 방법과 해석적 방법이 병행되어 이루어지고 있다[9].

3. 사례계통의 동적등가 축약모형 제시

본 논문에서는 위의 3가지 방법에 대한 그룹핑을 대규모 전력계통인 사례계통에 실시하고, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 연관 발전기 그룹을 결정하였다.

표 1. 사례계통의 발전기 그룹핑 결과

연관 발전기	그룹#	연관 발전기	그룹#
24471~5 (5기)	1	30351~2(2기)	33
24621~5(5기)	2	23476~81(6기)	34
		23471~2(2기)	
24521~5(5기)	3	23351~6(6기)	35
		23361~6(6기)	
24526~30(5기)	4	23371~4(4기)	36
		23381~4(4기)	
26171~3(3기)	5	23473~4(2기)	37
25441~2(2기)	6	23482~7(6기)	38
26167~9(3기)	7	23375~8(4기)	39
		23385~8(4기)	
26161~6(6기)	8	27155~6(2기)	40
26821~2(2기)	9	27152~4(3기)	41
26951~6(6기)	10	27971~3(3기)	42
26901~3(3기)	11	27751~2(2기)	43
21921~8(8기)	12	27901~6(6기)	44
21831~3(3기)	13	27271~2(2기)	45
23621~4(4기)	14	27961~6(6기)	46
25721~4(4기)	15	27753~6(4기)	47
25446~7(2기)	16	29691~4(4기)	48
		29361~6(6기)	
29011~2(2기)	17	29351~3(3기)	49
25251~4(4기)	18	28152~4(3기)	50
25152~4(3기)	19	29328~30(3기)	51
25626~7(2기)	20	29252(1기)	52
25155~6(2기)	21	29681~8(8기)	53
25551~2(2기)	22	29521~2(2기)	54
28901~2(2기)	23	30152~6(5기)	55
28155~6(2기)	24	29013	56
26251~2(2기)	25	25151	57
28811~6(6기)	26	26151	58
24451~4(4기)	27	27151	59
23251~4(4기)	28	28151	60
26101~4(4기)	29	29251	61
26111~2(2기)			
26105~6(2기)	30	29152	62
26181~2(2기)			
26152~6(5기)	31	30151	63
26201~4(4기)	32		

유사한 동특성을 갖는 연관 발전기들이 그룹핑된 결과를 보여주는 표1에서, 각 그룹의 기준발전기를 중심으로 그룹내 발전기들을 동기화 하여야 하며, 이 과정에서 동기발전기를 상세 모델로 할 것인지, 간략 모델로 할 것인지를 결정하여야 한다. 축약전 사례계통에 대한 고유치 계산결과를 보여주는 표 1에서, 주요 모드에 기여되는 발전기 그룹들과 관성상수가 상대적으로 큰 발전기들로 구성된 그룹에 대해서는 상세 모델로 동기화하고, 나머지 발전기들에 대해서는 간략 모델(classical model)을 적용하여 발전기 동기화를 수행하였다

축약계통에 대한 미소신호 안정도 해석의 적정성을 검증하기 위해, 축약전 사례계통에 대한 고유치 계산결과와 비교되었다. 분석된 고유치는 0.1이하의 댐핑비와 0.0~1.2Hz 사이의 주파수를 갖는 고유치 모드만을 계산하여 비교된 결과를 표 2에서 보였다. 여기서 해당G는 해당 고유치 모드에 기여정도가 가장 높은, 즉 참여율이

가장 높은 발전기를 의미한다.

표 2. 축약 전, 후 계통의 관심 고유치 비교

축약 계통				원래계통 대응모드		
번호	주파수	댐핑비	해당 G	번호	주파수	댐핑비
1	0.6053	0.0282	29351	1	0.6291	0.0205
2	0.7452	0.0368	27961	-	-	-
3	0.8598	0.0053	25152	3	0.8598	0.0033
4	0.9048	-0.0103	29013	4	0.8761	-0.0017
5	0.9983	0.0337	26161	7	1.0317	0.0749
6	1.0063	-0.0236	28155	5	1.0063	0.0231
7	1.0369	0.0345	26161	14	1.4107	0.0523
8	1.1027	0.0359	26172	8	1.1110	0.0784
9	1.1416	0.0341	25155	11	1.1365	0.0381
10	1.1509	0.0342	24521	15	1.1365	0.0381
11	1.1696	0.0218	28813	16	1.1508	0.0636
12	1.2005	0.0236	28152	17	1.1721	0.0567

위의 표 2에서와 같이 0.0~1.2Hz의 주파수 범위에서 축약계통은 원래계통의 주요 모드를 거의 모두 나타내고 있으며, 축약계통에 일부 나타나지 않는 모드(원래계통의 2, 6, 9, 10, 12, 13번 모드)는 축약과정에서 여러 개의 작은 발전기로 그룹핑된 그룹내에 존재했던 발전기들에 의한 모드들로 생각되며, 축약계통 모드 중 원래계통에 존재하지 않는 모드(축약계통의 2번 모드)는 통합과정에서 생성된 모드로 생각된다.

또한, 축약 사례계통에 대한 과도안정도해석의 적정성을 검증하기 위해, 사고모의를 위한 타임 시뮬레이션을 수행하였다. 수행된 시뮬레이션은 사례계통의 취약지역인 5번 지역 주요 선로 2회선 상정사고를 모의하였다. 이 결과 상정사고 지역의 발전기에 대해 좋지 않은 결과를 보였으나, 취약지역인 5번 지역과 부하밀집지역인 1,2번 지역을 보존(retain)하였을 경우에는 다음과 같은 결과를 구할 수 있었다.

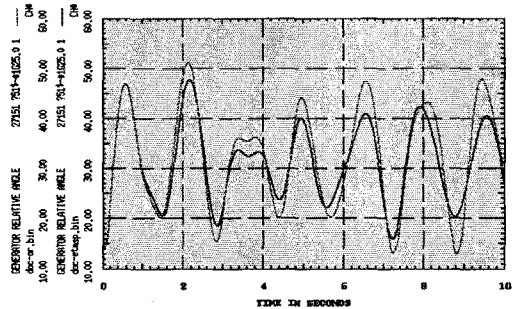


그림 1. 상정사고시 축약 전, 후 계통의 발전기 위상비교

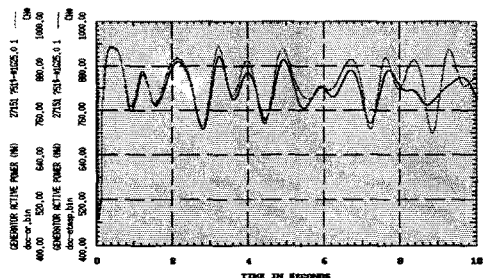


그림2 상정사고시 축약 전후 발전기 유효전력 비교

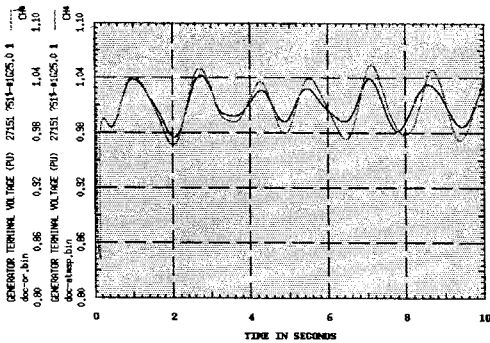


그림3. 상정사고시 축약 전 후 발전기 단자전압 비교

그림 1은 상정사고시 YK(27151) 발전기의 위상변화를 축약 전, 후 계통에 대해 비교하여 나타냈으며, 시간에 따른 위상변화가 거의 같은 추이로 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

그림 2는 상정사고시 시간에 따른 YK(27151) 발전기의 유효전력 변화를 축약 전, 후 계통에 대해 비교하여 나타낸 것으로, 상정사고 후 8초 까지는 거의 같은 추이로 나타나고 있으며, 8초~10초 사이는 다른 양상을 보이고 있으나, 과도 안정도(Transient Stability) 모의를 위한 시간대에서 축약계통과 원래계통의 특성이 거의 같음을 알 수 있다.

그림 3은 상정사고시 시간에 따른 영광 발전기의 단자전압 변화를 축약 전, 후 계통에 대해 비교하여 나타냈으며, 그 결과 시간에 따른 단자전압의 변화가 거의 같은 추이로 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

이와 같이 대규모 계통인 사례계통에 대해 네트워크와 발전기 축약을 통해 축약계통을 구성하였다. 축약계통은 조류계산, 전압안정도 해석에 필요한 정특성과 과도안정도, 미소신호안정도 해석에 필요한 동특성에 대해 사례계통과 비교되어, 그 적정성을 검증하였다.

다음은 사례계통에서 안정화기 설계에 필요한 발전기-여자기 전달함수에 대한 주파수 응답특성을 분석한 예이다. 사례계통의 UJN N/P #1 (25151)의 여자기 기준전압을 입력으로 하고, 발전기 유효전력을 출력으로 한 주파수 응답 곡선을 축약전, 축약후 사례계통에 대해 비교하여 그림 4와 그림 5에서 보였으며, 여기서 축약계통은 축약전 사례계통의 주파수 응답특성이 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 축약계통을 이용한 제어기 설계의 가능여부를 판단하기는 어려운 것으로 생각되며, 이는 더욱 상세하고, 많은 축약 연구를 통해 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다.

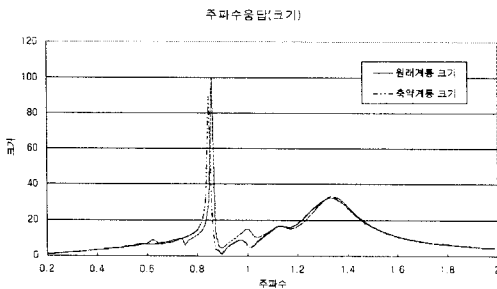


그림4. 축약 전후 주파수응답 특성 비교(크기)

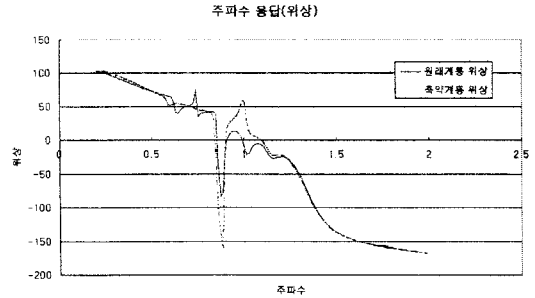


그림 5. 축약 전후 주파수응답 특성 비교(위상)

4. 결론

이와 같이 본 논문에서는 대규모 계통에 대한 전압안정도, 과도안정도, 미소신호안정도 등의 계통해석을 보다 신속하고, 정확하게 수행하기 위한 계통축약 방법을 고찰하고, 대규모 사례계통에 대한 축약 모형을 제시하였다. 제시된 축약계통은 전력계통 해석을 위한 다양한 적용 가능성을 가지고 있으며, 보다 정확하고, 간단화된 축약계통을 만들기 위해 더욱 상세하고, 많은 연구가 지속되어야 할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

- [1] 송길영, "신편 전력계통공학", 통일출판사, 1998, 9, pp26~27.
- [2] EPRI, "Dynamic Reduction: Version 4.0", EPRI TR-102234 Volume 1, 1993, 4, pp1-1.
- [3] P.Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1993, pp726.
- [4] EPRI, "Small Signal Stability Analysis Program Package: Version 4.0", EPRI TR-101850 Volume 1, 1993, 2, pp2-1.
- [5] S.T.Y. Lee, F.C. Schweppe, "Distance Measures and Coherency Recognition Transient Stability Equivalents", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-82, pp. 1550~1557, September/October 1973
- [6] R. Podmore, "Identification of Coherent Generators for Dynamic Equivalents", IEEE Trans., Vol. PAS-97, pp. 1344-1354, July/August, 1978.
- [7] R. Nath, S.S. Lamba, K.S. Prakasa Rao, "Coherency Based System Decomposition into Study and External Areas Using Weak Coupling", IEEE Trans., Vol. PAS-104, pp. 1443-1449, June, 1985.
- [8] J.R. Winkelman, J. Chow, B.C. Bowler, B. Avramovic, and P.V. Kokotovic, "An Analysis of Interarea Dynamics of Multi-Machine Systems", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp. 754-763, February, 1981.
- [9] Lei Wang, Meir Klein, Solomon Yirga, Prabha Kundur, "Dynamic Reduction of Large Power Systems for Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.12, No.2, pp. 889~895, May 1997