

IEEE SSR 벤치마크 시스템 고유치 해석과 시간영역 검증

김동준, 문영환, 송충기*
한국전기연구원, 한국전력공사*

Eigenvalue analysis of IEEE SSR Benchmark System and Its Time-Domain Validation

D.J. Kim, Y.H. Moon, C.K. Song*
KERI, KEPCO*

Abstract - This paper presents the high frequency (HF) eigenvalue results against IEEE SSR First Benchmark Mode and validation using the simultaneous time-domain simulation program, PSCAD/EMTDC. Two results show a little difference but not much. Particularly, HF eigenvalue analysis results tends to give more conservative results compared to those of the exact time-domain simulation.

1. 서 론

전력계통의 미소신호 안정도 해석은 전력계통의 모델링 정도에 따라 2 Hz 이하대의 저주파수(Low Frequency, LF)대 모드와 5-55 Hz대의 고주파수(High Frequency, HF) 모드 해석으로 나눌 수 있다. LF 미소신호안정도의 주관심사는 0.1-2.0 Hz 이하의 전기기계적 모드이다. LF 고유치 모델링 방법은 기기의 다이내믹과 이것과 관련된 제어기의 다이내믹 특성만 고려하고 네트워크의 다이내믹은 무시한다. 그러나 HF 고유치 모델링 방법은 기기와 제어기뿐만 아니라 네트워크의 다이내믹 특성까지 모두 고려한 시스템 행렬을 이용한다.

전력계통의 운전조건과 시스템 운전 파라미터에 따라 HF 모드는 불안정해질 수 있다. 예로서 송전선로 RLC 회로와 터빈-발전기(Turbine-Generator, TG)의 공진현상(SSR), HVDC와 같은 고속 전력장치의 제어기 사이의 상호간섭, TG 축비틀림 모드와 PSS와 같은 제어기와의 상호간섭 등을 들 수 있다. 이와 같은 진동 주파수 범위는 5-55Hz의 주파수대에 존재하고, HF 모드를 해석하는데 사용하는 툴은 HF 고유치 해석 프로그램과 EMTDC와 같은 순시치 시간영역 해석 툴이 있다. 순시치 시간영역 해석 툴은 가장 정확한 모의와 결과를 제공한다. 그러나 이것은 모의하는데 시간이 많이 걸리고 여러 가지 복합모드가 혼합되어서 나오기 때문에 시스템 특성을 분석하기 어렵다. 그러나 HF 고유치 해석 프로그램은 고유치 계산 시간이 적고 중요 모드를 분석하는 것이 용이하다. 그러나 고유치 계산결과는 시간영역 해석 툴에 의해서 검증하는 것이 필요하다.

본 논문은 HF 신고유치 해석(Novel Eigenvalue Analysis, NEA) 프로그램 [1]을 이용하여 IEEE SSR First Benchmark Model (FBM) [2]의 고유치를 계산하고, 계산된 결과를 시간영역 해석 툴인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 검증한다.

2. 본 론

2.1 HF 고유치 해석 알고리즘

IEEE SSR FBM 등과 같은 HF 고유치 해석을 위해서는 네트워크의 다이내믹까지 고려된 상태행렬을 유도해야 한다. 본 논문에서 사용한 NEA 프로그램은 상태행렬을 비선형 미분 방정식으로 부터 직접 선형화하여 구성한다. NEA의 모델링 방법은 다음과 같다. 본 절에서 미소변화 기호 Δ 는 생략한다.

전력계통에서 다이내믹 장치 모델은 많으나 발전기 모델링에 대해서만 기술한다. 발전기의 선형화된 상태 방정식은 식 (1)과 (2)와 같다. 백터 u_g 는 발전기의 단자전압으로 입력이 되고, 출력은 식 (2)와 같이 발전기의 전류가 된다.

$$p x_g = A_g x_g + B_g u_g + B_c v_c \quad (1)$$

$$i_{gg} = C_g x_g + D_g u_g + D_c v_c \quad (2)$$

각 행렬은 모듈러 기법이 적용되어 각 발전소에 해당되는 블록 대각선 행렬을 갖는다[3]. 제어 신호 v_c 가 없다고 가정하면, 행렬 D_g 와 D_c 는 영(zero)행렬이 된다.

네트워크의 다이내믹 방정식은 식 (3)과 (4)로 구성된다. 발전

기의 상태방정식과 달리, 네트워크 방정식에서는 전압이 출력변수가 되고 전류가 입력으로 사용되어, 두 다이내믹 시스템을 서로 인터페이스 할 수 있다. 네트워크의 상태 행렬의 유도는 매우 복잡하나 문헌 [3]에 잘 기술되어 있으므로 생략한다.

$$p x_n = A_n x_n + B_n u_n + B_{1n} p u_n \quad (3)$$

$$v_{ng} = C_n x_n + D_n U_n + D_{1n} p u_n \quad (4)$$

식 (2)를 식 (3)에 인터페이스하고 식(4)를 식 (1)에 인터페이스 하면 식 (5)와 같은 시스템 상태 행렬을 유도할 수 있다. 여기서 주의해야 할 것은 일반적으로 기기의 상태방정식 유도는 기기 회전자의 d-q축을 기준으로 방정식이 유도되고, 네트워크 방정식은 공통기준 R-I축을 기준으로 모델링 된다는 것이다. 따라서, 인터페이스 시에 이점을 고려해 주어야 한다. 행렬 C_g', C_n', C_{1n}' , 그리고 D_n' 은 각각 좌표축을 변환한 값이 된다. 본 논문에서 사용한 변환 법은, 네트워크의 전압은 기기 좌표축 기준인 d-q축으로 변환해서 기기 상태행렬에 입력으로 사용되고, 발전기 전류는 공통 기준 R-I축으로 변환해서 네트워크 상태행렬에 입력으로 사용된다.

$$p \begin{bmatrix} x_g \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N(A_g + B_g D_n' C_g') & N B_g C_n' \\ B_n C_g' + B_{1n} C_g' N(A_g + B_g D_n' C_g') & A_n + B_{1n} C_g' N B_g C_n' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N B_c \\ B_{1n} C_g' N B_c \end{bmatrix} v_c \quad (5)$$

2.2 IEEE SSR FBM 고유치 해석

HF 고유치 해석 프로그램을 IEEE SSR FBM에 적용하였다. NEA 프로그램을 이용하여 IEEE SSR FBM 시스템에 대한 무부하시의 고유치 결과는 표 1과 같다. 이것은 TG 축진동 모드, 네트워크 모드, 그리고 기기 모드에 대한 고유치를 보여준다.

<표 1> 무부하 IEEE SSR FBM 고유치 계산결과($X_c=0.371$ PU)

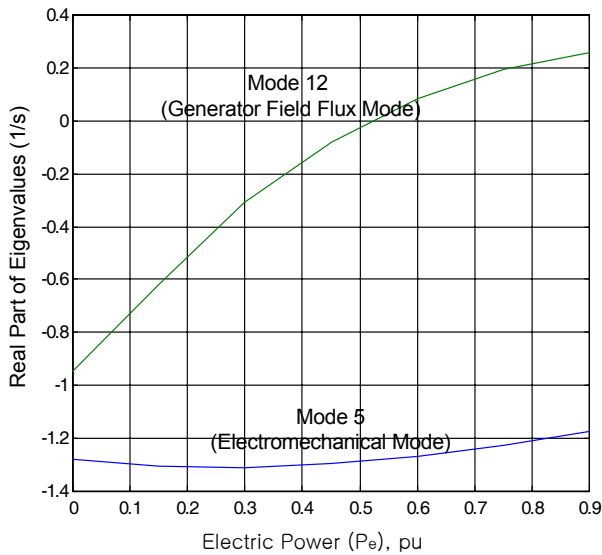
Mode No.	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Hz	비 고
1	0.002(0.028)*	±202.860	32.286	
2	0.025(0.028)*	±160.392	25.527	
3	0.103(0.11)*	±127.233	20.250	
4	0.048(0.05)*	±99.809	15.885	
5	-1.279	±10.805	1.720	(*):
6	-4.374	±619.035	98.523	decrement
7	0.000	±298.176	47.456	factor [2]
8	-3.560	±134.303	21.375	
9	-25.414	0.0	0.0	
10	-23.002	0.0	0.0	
11	-1.266	0.0	0.0	
12	-0.948	0.0	0.0	

표 2는 발전기 출력이 $P_e=0.9$ PU 일때 IEEE SSR FBM에 대한 고유치 결과를 보여준다. 축진동 모드 중 모드 1과 모드 2는 안정 영역으로 들어왔으나, 모드 4는 부하시 더 불안정하여 다른 모드에 비해서 가장 불안정하다. 그리고 모드 12는 실수부만 있는데 이 모드가 양의 값을 가져 불안정 영역으로 이동 하였다. 발전출력 변화에 대한 모드 12와 전기기계적 모드인 모드 5의

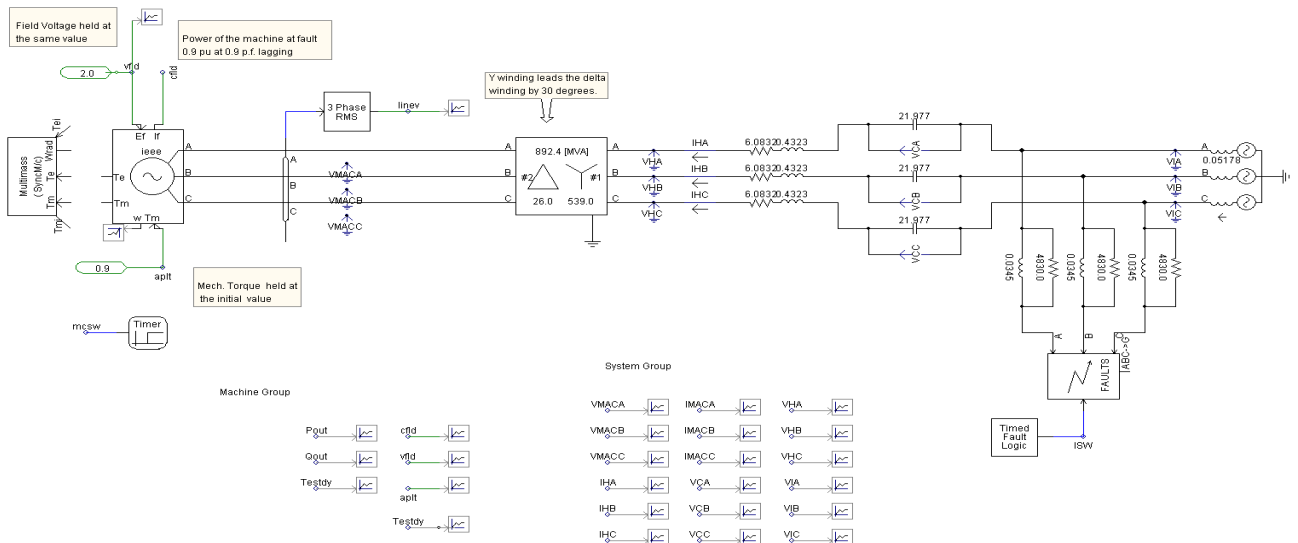
이동 경로는 그림 1과 같다. 모드 12는 발전 출력증가에 따라 불안정 영역으로 이동한다. 이러한 결과는 기존 연구결과에서 보고된 바 없는 특이한 것이다. 다음 절은 기기의 계자권선과 관련된 모드 12 결과를 순시치 시간영역에서 검증한다.

〈표 2〉 부하시 고유치 결과 ($V_f=1.0$ PU, $P_e=0.9$ PU, $PF=0.9$ lagging, $X_c=0.371$ PU)

Mode No.	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Hz	Remark
1	-0.030	202.814	32.280	
2	-0.032	160.314	25.525	
3	0.130	127.103	20.238	
4	0.168	99.426	15.841	
5	-1.172	9.187	1.462	
6	0.000	298.177	47.456	*불안정한 기기 모드
7	-4.365	619.030	98.522	
8	-3.663	134.450	21.398	
9	-25.424	0.0	0.0	
10	-23.069	0.0	0.0	
11	-2.534	0.0	0.0	
12	0.256*	0.0	0.0	



〈그림 1〉 부하조건에 따른 시스템 모드 (모드 5)와 기기 모드 (모드 12) 변화 ($X_c=0.371$ PU)



〈그림 2〉 IEEE SSR First Benchmark 모델 ($X_c=0.371$ PU, $E_{fd}=2.0$ PU, $P_e=0.9$ PU)

2.3 IEEE SSR FBM의 시간영역 검증

고유치 해석에 대한 결과를 검증하기 위해서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 IEEE SSR FBM을 그림 2와 같이 모델링하여 모의하였다. 먼저 계자권선과 관련된 모드 12의 동기탈조 불안정을 모의하기 위해서 해석 결과를 용이하게 분석하기 위해서 다중 축시스템을 발전시스템과 분리하였다. 이때 관성은 총 관성값으로 두고 모의하였다. 계자전압은 수동제어 방식으로 자동전압조정장치(AVR)가 없는 것으로 하였고, 계자전압은 초기에는 2.5 PU로 하였다. 모의 방법은 그림 2와 같이 모의 시작시의 외란외에는 아무 사고가 없도록 하여 25초 동안 그냥 정상상태를 모의하는 것으로 하였다. 이때의 모의 결과는 고유치 해석과 달리 동기탈조와 같은 불안정 현상이 발견되지 않았다.

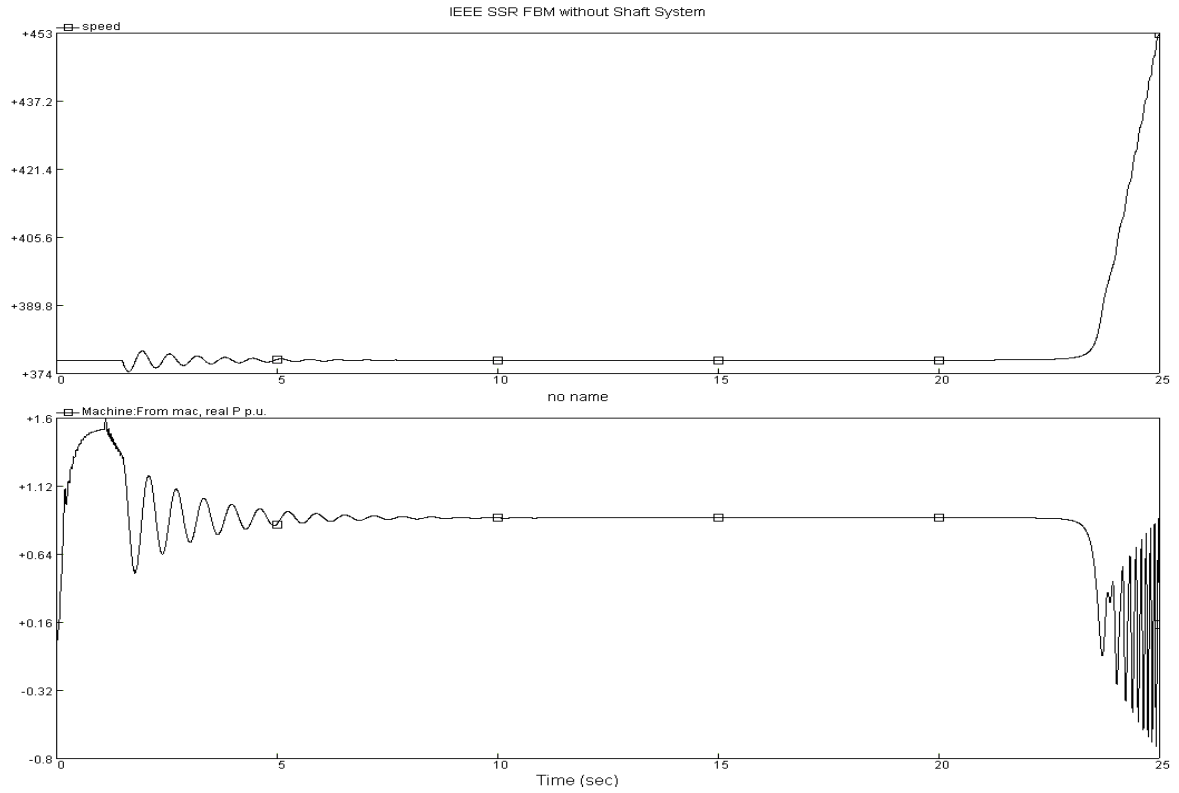
연속적으로 계자전압을 낮추어 모의한 결과 계자전압이 2.0 PU일 때 그림 3과 같은 동기탈조가 발생하였다. 물론 다중 축시스템을 포함하는 경우에도 그림 4처럼 초기에는 축진동 모드에 대한 불안정 동요가 발생하였고 약 20초에 기기모드에 대한 불안정이 발생하여 동기탈조가 발생하였다. 모드 12의 동기탈조는 그림 3과 4를 비교할 때 다중 축시스템을 포함하는 경우가 포함하지 않은 경우보다 몇 초 빠르게 발생하였으나 큰 차이는 없다. 이러한 결과로서 알 수 있는 것은 고유치 해석 결과가 비선형 해석방법인 시간영역 해석 결과보다 좀 더 불안정하게 해석된다는 것이다. 이것은 HF 고유치 해석 툴은 시스템을 선형화 영역에서 안정도를 판단하고 시간영역 해석 툴처럼 비선형성에 의한 영향은 고려하지 않기 때문이다.

3. 결 론

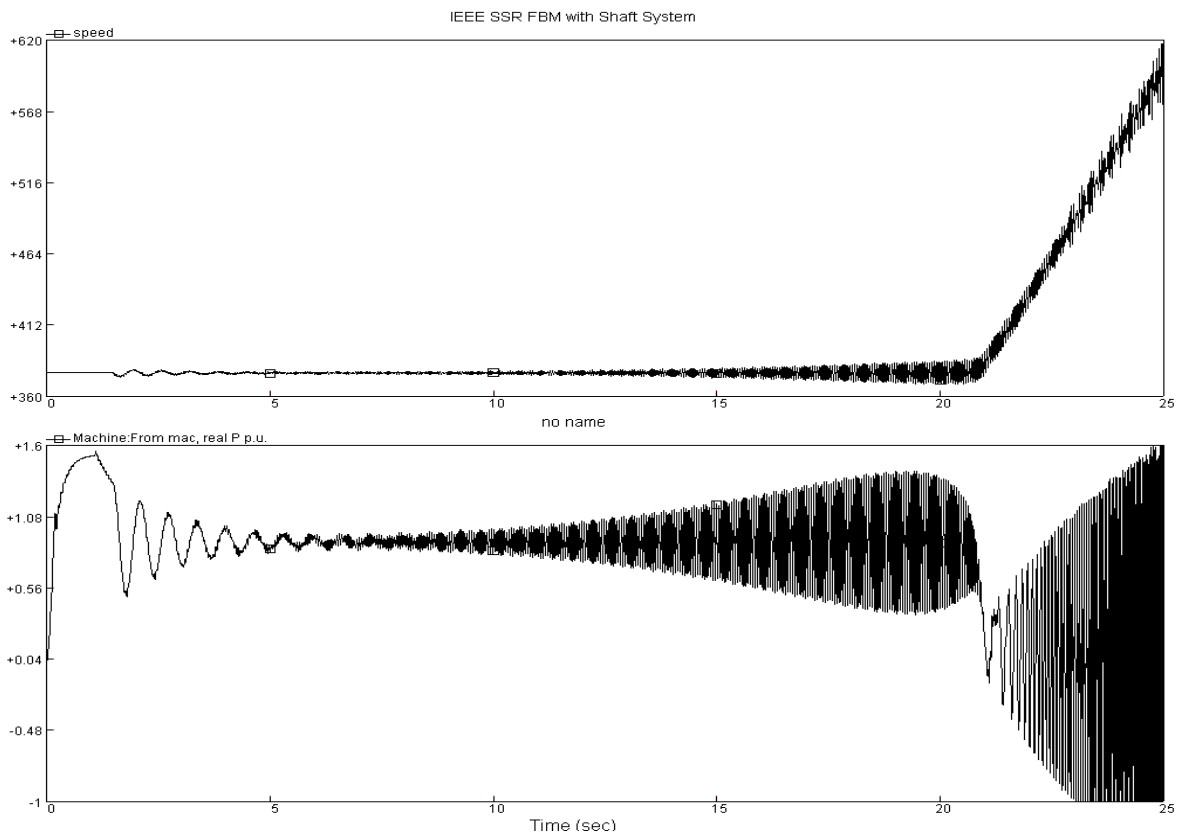
본 논문은 HF 고유치를 해석할 수 있는 NEA 프로그램을 이용하여 IEEE SSR FBM의 고유치를 계산하였고, 이 계산된 고유치 결과 중 단조지수 함수적으로 불안정한 결과를 나타내는 하나의 기기 모드를 순시치 시간영역 해석 툴인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 검증하였다. 하나의 불안정한 기기 모드에 대한 HF 고유치 해석 결과는 정확한 시간영역 해석 툴에 의해서 검증되었으나 약간의 차이는 있었다. 결론적으로 HF 고유치 해석 툴은 선형 영역에서 안정도를 판단하기 때문에 정확한 순시치 시간영역 해석 툴의 결과에 비해서 좀더 보수적인 결과를 제공한다고 판단된다.

【참 고 문 헌】

- [1] D. J. Kim, H. K. Nam, and Y. H. Moon, "Universal SSR small signal stability analysis program of power systems and its applications to IEEE benchmark systems," *KIEE*, no. 3, Sept. 2003.
- [2] IEEE SSR Working Group, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance", *IEEE Trans.*, Vol. PAS-96, September/October 1977.
- [3] M. Parniani, M.R. Iravani, "Computer Analysis of Small-Signal Stability of PowerSystems Including Network Dynamics", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* Vol. 142, No. 6, November 1995.
- [4] Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD/EMTDC Power Systems Simulation Software Tutorial Manual, 1994.



〈그림 3〉 다중 축시스템이 없는 경우 정상상태 모의 ($E_{fd}=2.0$ PU, $P_e=0.9$ PU)



〈그림 4〉 다중 축시스템이 있는 경우 정상상태 모의 ($E_{fd}=2.0$ PU, $P_e=0.9$ PU)