계통 운전조건에 따른 축 비틀림 진동 미소신호안정도 해석

김 동 준 문 영 환
한국전기연구원

Analysis of Small Signal Stability for SSR on Generator Loading Condition

D.J. Kim Y.H. Moon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The paper describes the formulation of state matrix equations from the linearized multi-machine power system including network dynamics and the application of IEEE First Benchmark Model. The eigenvalues of IEEE First Benchmark Model are investigated not only by changing the compensation of series capacitance at no-load conditions, but also by varying the generator loading at fixed compensation of capacitance. In addition, the pure electrical self-excited mode is also examined by an eigen analysis and time domain simulation.

1. 서 론

일반적으로 축비틀림 진동(또는, SSR)의 고유치 해석은 발전시스템의 다이나믹뿐만 아니라, 송전선로의 다이나믹까지 고려된 상태행렬 방정식으로부터 고유치를 계산하는 새로운 고유치 해석 프로그램을 요구한다. 최근 고유치 해석 프로그램 개발은 모든 다이나믹 모델을 직접 선형화된 방정식으로부터 상태행렬을 유도하고, 모듈러 기법이 사용되어 손쉽게 다이나믹 모델을 수정 또는 첨가할 수 있는 유연성을 갖는 프로그램으로 이루어 진다[1,2,6].

본 논문은 네트워크의 다이나믹까지 고려된 새로운 고유치 해석 모델링 방법에 대해서 기술하고, IEEE First Benchmark Model(이하, FBM)에 대해서 발전 출력변화와 네크워크의 직렬 콘덴서 보상에 따른 축 비틀림 진동 현상을 고유치 해석으로 고찰한다. IEEE FBM을 분석함에 있어서, 터어빈-발전기(TG) 축 시스템을 6차 모델로, 원통형 기기를 고정자의 다이나믹과 동요방정식을 포함하여 8차로 모델링 하였다. 이와 같이 모델링하고 IEEE FBM에 적용하여, 네트워크의 직렬 콘덴서 보상에 따른 주요 모드들에 대한 고유치 실수부 변화와, 발전 출력에 따른 축 진동모드, 시스템 모드, 그리고 발전기 계자권선 모드 등의 고유치 실수부를 분석하였다.

특이하게 순수 전기적 상호작용에 의해서, 한 개의 발전기 계자권선에 관련된 모드가 자기여자(Self-Excited)되어 미소신호안정도가 불안정해지는 것을 확인하였으며, 이를 순시치 프로그램 *EMTDC*를 이용하여 동기화 토오크 부족에 의한 상차각 불안정 현상을 모의하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 정식화

축 비틀림 진동 모드를 해석하기 위해서는 네트워크의 다이나믹까지 고려된 상태행렬을 유도해야 한다. 본 논문에서 상태행렬은 비선형 미분 방정식으로부터 직접 선형화하여 구성된다. 본 절에서 미소변화 기호 Δ는 생략한다.

2.1.1 기기 상태 행렬

계통에서 다이나믹 장치 모델은 많으나 본 논문에서는 가장 중요한 발전소 모델링에 대해서만 기술한다. 발전기의 선형화된 상태 방정식은 식 (1)과 (2)와 같다. 벡터 ug는 발전기의 단자전압으로 입력이 되고, 출력은 식 (2)와 같이 발전기의 전류가 된다.

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

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

각 행렬은 모듈러 기법이 적용되어 각 발전소에 해당되는 블록 대각선 행렬을 갖는다[6]. 제어 신호 v_c가 없다고 가정하면, 행렬 D_g와 D_c는 영(zero)행렬이 된다.

2.1.2 네트워크 상태 행렬

네트워크의 다이나믹 방정식은 식 (3)과 (4)로 구성된다. 발전기의 상태방정식과 달리, 네트워크 방정식에서는 전압이 출력변수가 되고 전류가 입력으로 사용되어, 두 다이나믹 시스템을 서로 인터페이스 할 수 있다. 네트워크의 상태 행렬의 유도는 매우 복잡하나 문헌 [6]에 잘 기술되어 있으므로 생략한다.

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

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

2.1.3 시스템 상태 행렬

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 고려해주어야 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.

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

2.2 모델링.

축비틀림 해석에 있어서 주의해야 할 모델링은 기기모델링과 터어빈-발전기 축 모델링이다. 기기 모델링은 안정도에서 사용하는 모델에서 고정자의 다이나믹 방정식을 추가해야 한다. 터빈-발전기의 축 모델링은 SSR해석에서 요구되는 필수 모델링이 된다. 일반적으로 여자시스템 모델링은 SSR 해석에서 고려하지 않으나, 안정도에서 사용되는 모델을 그대로 선형화해서 사용할 수 있다.

2.2.1 기기 모델링

그림 1은 안정도용 원통형 발전기 모델을 보여주고 있다. 이 모델은 자속모델로써, SSR해석에서는 식 (6)과

(7)과 같이 고정자 다이나믹을 고려해야 한다.

$$p\psi_d = (v_d + r_a i_d + w_0\psi_q + \psi_{q0}w)w_B \quad (6)$$

$$p\psi_q = (v_q + r_a i_q - w_0\psi_d - \psi_{d0}w)w_B \quad (7)$$

여기서, w_B=377 rad/s. 이 두 방정식은 기기의 고정자 다이나믹을 설명한다. 원통형 기기 모델의 차수는 동요 방정식(swing equation)을 제외하면, 6차로 이루어 진다. 덧붙여, 본 논문에서 사용하고 있는 고유치 프로그램에서, 무한 모선을 표현하기 위해서 사용하고 있는 고전기기 모델은 2차의 동요방정식과 2차의 고정자 다이나믹 방정식으로 구성된다.

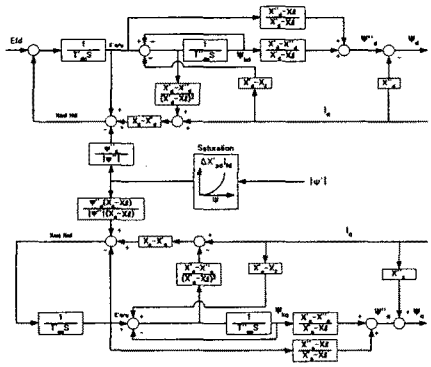

그림 1 원동형 기기 자속 모델

2.2.2 6-질점 축 모델링

본 논문은 터어빈-발전기(TG) 모델을 그림 2와 같은 6-질점 모델로 선형화 하여 모델링 하였다. 이 모델을 이용하면, 6-질점 이하의 어떠한 모델에 대해서도 모델링이 가능하다.

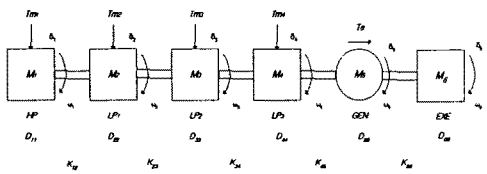

그림 2 6-질점 축 시스템

2.3 IEEE FBM 적용

그림 3의 IEEE FBM의 모든 데이터는 문헌[3]을 참고한다. 본 절에서는 무부하시에 직렬 콘덴서 보상 정도에 따른 고유치 변화를 분석하고, 다음으로 직렬 콘덴서 보상정도를 고정하고 발전기 출력변화에 따른 고유치 모드를 분석한다. 본 논문에서 사용한 고유치 계산 프로그램은 상용 안정도 프로그램의 데이터를 입력으로 사용하여 조류계산을 수행하고 상태행렬을 구성한 다음, *IMSL* 라이브러리[10]를 이용하여 고유치 계산을 수행한다.

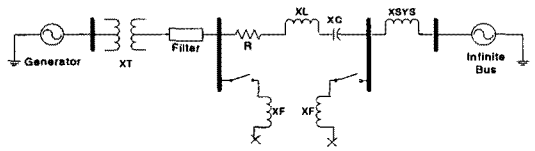

그림 3 IEEE First Benchmark Model

2.3.1 직렬 콘덴서 보상(무부하)

무부하시 직렬 콘덴서 보상을 X_c=0.371pu(74%보상)로 하고 고유치 계산을 수행하면 표 1과 같다. 모드 1~4까지는 TG모드이고, 모드 5는 네트워크와 기기가 서로 진동하는 모드가 된다. 모드 6~9까지는 네트워크 모드이고, 특히 모드 6과 9는 직렬콘덴서에 의해서 발생하는 진동 모드이다. 그리고 모드 7과 8은 기기의 고정자에서 발생하는 모드로써, 하나는 기기에서 발생하고 하나는 무한 모선용으로 사용된 고전기기 모델에서 발생한다. 무한 모선의 표현은 고전기기 모델로 나타내고 관성 계수는 무한으로 설정하였다. 모드 10~13은 기기 자속에서 발생하는 모드이다.

표 1 무부하 IEEE FBM 고유치 계산결과 (X_c=0.371pu)

Mode No.	Real (1/s)	Imag. (rad/s)	Hz	비 고
1	0.002(0.028)*	±202.860	32.286	TG/시스템
2	0.025(0.028)*	±160.392	25.527	모드
3	0.103(0.11)*	±127.233	20.250	( ) * :
4	0.048(0.05)*	±99.809	15.885	Decrement
5	-1.279	±10.805	1.720	Factor[4]
6	-4.374	±619.035	98.523	
7	0.000	±376.991	60.000	네트워크
8	0.000	±298.176	47.456	모드
9	-3.560	±134.303	21.375	
10	-25.414	0.0	0.0	
11	-23.002	0.0	0.0	기기 모드
12	-1.266	0.0	0.0	
13	-0.948	0.0	0.0	

그림 4는 직렬 콘덴서 보상 정도에 따른, TG 모드의 고유치 실수값 변화를 보여준다. 본 논문에서는 지면상 생략되었지만, 직렬 콘데서 보상 정도가 클수록 네트워크 공진주파수는 작아지는 경향이 있다. 이러한 이유로 네트워크의 공진주파수와 TG 모드의 진동 주파수가 일치하는 직력콘덴서 보상치에 대해서, TG모드의 고유치의 실수부가 가장 큰 부분이 그림 4처럼 발생하게 된다.

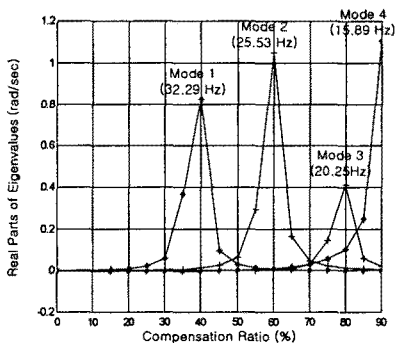

그림 4 무부하시 직렬 콘덴서 보상에 따른 TG모드 변화

그림 5는 직렬콘덴서 보상정도에 따른 고유치 실수부의 변화를 보여주고 있다. 보상정도가 클수록 선로 임피이던스가 보상되어, 시스템 모드인 모드 5의 댐핑 정도는 현저하게 향상됨을 그림 5로써 알 수 있다.

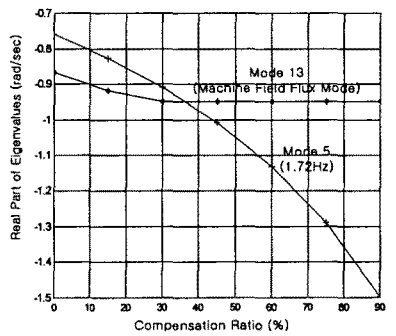

그림 5 무부하시 직렬 콘덴서 보상에 따른 모드 5(시스템 모드)와 모드 13(기기 자속 모드) 변화

2.3.2 운전조건에 따른 모드변화

본 절에서는 발전기 출력변화에 따른 TG모드와 시스템 모드, 그리고 기기 모드를 고찰한다. 그림 6은 직렬콘덴서 보상을 74%로 고정하고 발전기 출력을 변화했을 때의 고유치 실수부 변화를 나타내고 있다. 발전 출력이 클수록 모드 4가 더 불안정 해진다. 이것은 발전출력 상승은 직렬콘덴서 보상 정도를 증가하는 효과를 발생한다는 것을 의미한다.

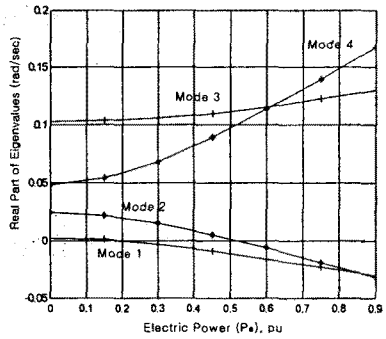

그림 6 운전 조건에 따른 축 모드 변화 (74%보상, X_c=0.371pu)

그림 7은 발전출력에 따른 기기 모드 13과 모드 5의 고유치 실수부의 변화를 보여준다. 발전출력 변화에 있어서 모드 5는 큰 변화가 없으나 모드 13은 갈수록 더 불안정 해지는 것을 보여준다. 모드 13의 불안정은 기기의 전압제어 루프에 문제를 나타내며, 궁극적으로는 동기화 토오크의 감소로 나타나 동기탈조의 가능성을 크게 한다.

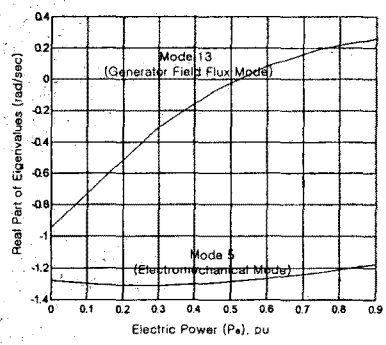

그림 7 운전 조건에 따른 시스템 모드(모드 5)와 기기 모드(모드 13) 변화 (74%보상, X_c=0.371pu)

2.3.3 부하시 삼상단락 사고 모의

부하 시 기기에 관련된 모드 13의 불안정을 확인하기 위하여, 발전출력이 0.9pu이고 송전선로 임피이던스 보상이 74%인 경우, 무한모선에 0.12초 동안 삼상 단락사고를 주고 제거했을 경우, 기기 상차각 불안정이 그림 8처럼 발생하였다. 이때 관성은 TG모드의 불안정을 제거하기 위하여 단일 관성으로 하여 *EMTDC*[11]에서 모의하였다.

사고 후 기기 상차각은 시스템 모드인 모드 5의 진동주파수를 가지고 감쇠되어 정상상태로 수렴하다가, 상차각이 갑자기 발산하였다. 이와 같은 동기 탈조는 동기화 토오크와 관련이 있으며, 이것은 기기의 전압제어루프와 밀접한 관계가 있다. 모드 13은 기기의 계자자속에 관련된 모드이기 때문에 고성능 여자 시스템이 부가된다면 이러한 동기화 토오크 부족에 의한 탈조 문제는 해결될 것이다[12].

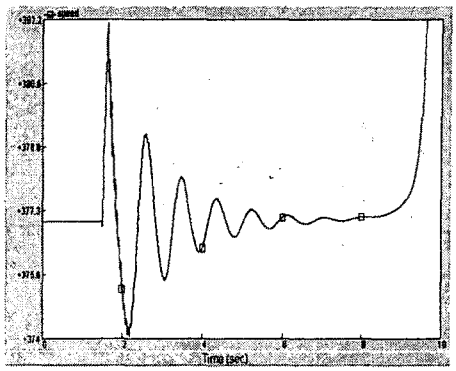

그림 8 무한 모선 삼상단락 사고(0.12sec)후 제거 시 상차각 불안정 (P_e=0.9pu, 선로 임피이던스 74% 보상)

3. 결 론

본 논문은 네트워크의 다이나믹까지 고려된 새로운 고유치 해석 모델링 방법에 대해서 기술하고, 송전선로의 직렬 콘덴서 보상 정도와 발전 출력변화에 따른 축 비틀림 진동현상에 있어서 IEEE FBM를 대상으로 고유치 해석을 적용하여 분석하였다.

본 논문은 발전기 출력 증가에 따라 직렬 콘덴서에 보상된 네트워크의 공진주파수는 감소함을 확인하였고, IEEE FBM에서 순수 전기적 상호작용에 의해서 한 개의 기기모드가 자기여자 되어 미소신호안정도가 불안정해지는 것을 확인하였으며, 이를 순시치 프로그램 *EMTDC*를 이용하여 동기화 토오크 부족에 의한 상차각 불안정 현상을 모의하여 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Kundur.P., Rogers, G.J., Wang, D.Y., and Lauby, M.G., "A comprehensive computer program package for small signal stability analysis of power systems', *IEEE Trans.*, VPWRS-5, (4), pp.1076-1086, 1990

[2] Arabi, Rogers, G.J., Wang.D.Y, and Kundur.P, "Small signal stability program analysis of SVC and HVDC in power systems', *IEEE Trans., 1991, PWRS-6(3), pp. 1147-1153*

[3] IEEE SSR Working Group, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance" , *IEEE Trans.*, Vol. PAS-96, September/October 1977

[4] IEEE SSR Working Group, "Second benchmark model for computer simulationof subsynchronous resonance" , *IEEE Trans.*, Vol. PAS-104, 1985

[5] Bahrman,m., Larsen.E.V.,Piwko.R.W., and Patel.H.S.: "Experience with HVDC-turbine-generator torsional interaction at square butte", *IEEE Trans.*, 1980. PAS-99, (5), pp.966-976

[6] M.Parniani, M.R.Iravani, "Computer anlaysis of small-signal stability of power systems including network dynamics", *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.* Vol.142, No. 6, Novemver *1995*

[7] LARSEN.E.V. and PRICE.W.W.,"MANSTAB/POSSIM power system dynamic analysis programs- a new approach combining nonlinear simulation and linearized state-space/frequency domain capabilities', *IEEE PICA Proceedings*, 1977, pp.350-359

[8] M.R.Iravani, " A software tool for coordination of controllers in power systems", *IEEE, Trans. On Power Systems*, Vol. 5, No-1, February 1990

[9] KUH.E.S., and Rohrer.R.A., "The state variable approach to network analysis", *Proc., IEEE*, 1965, pp.672-686

[10] Visual Numerics, *IMSL Math/Library User/s Manual Vol.1*, 2000.

[11] Manitoba HVDC Research Centre, *PSCAD/EMTDC power systems simulation software tutorial manual*, 1994

[12] F.P. DeMello, C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", *IEEE Trans.*, vol.PAS-88, No. 4, pp.316-329, Apr. 1969

[13] P.M.Anderson, B.L.Agrawal, J.E.Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems , IEEE Press* 1990, pp 233

[14] P.Kundur, *Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994*