대한전기학회 1984년도 하계학술회의 논문집 1984년 7월 20일

동태 안정도 해석 프로그램 개발

Development of Power System Dynamic Stability.

박 종 근* 서울대학교
박 영 문 서울대학교
정 고 범* 서울대학교

1. 서 론

전력 계통이 서로 상호 결합되어 있을 때, 어떤 평형 동작점에서는 작은 외란에 대한 단조 발산 현상 및 진동 발산현상의 동요 모-드(mode)가 문제가 되고 있다.

실제의 예가, 고속, 고게인(gain)인 AVR이 있는 일본 북해도 신관 양수 계통에서 조건에 따라 부제동현상이 기록 되었다. 또, 상대적으로 작은 용량의 장거리 송전선에 의해 전력 계통이 연결되어 있을 때에 동요 모-드가 발생한다. 이것은, 1972년에 미국의 Manitoba Hydro와 the MAPP System을 연결시킬 때, 0.2 Hz의 동요 모-드가 기록되었다. 우리나라에서도 승압, 발전 용량의 대규모화, 송전선 장거리화에 따라서, 이 동요 모-드의 연구가 필요함에 따라 이 프로그램을 개발하게 되었다.

현대의 동태 안정도는 제어장치와 진동의 댐핑(damping)에 중점을 두고, 시간 단면에서의 해석, 즉 직접법 (Runge-kutta법)으로는 대부분의 파형이 여러 모-드의 혼합이므로 이 진동의 성장 혹은 감소의 비율과 주파수를 계산하기가 어려우므로 주파수 단면에서 상태 방정식의 특성근을 구하는 방법에 의한다. 즉, 동작점에서 선형화시킨 모-델을 사용하여, 동요 모-드의 주파수, 댐핑요소를 구해본다.

간단한 예로써, 3기 계통에 적용시켜 보았으며, 대단히 만족한 결과를 얻었다.

2. 본 론

발전기, 제어장치, 부하, 송전망에 의해 구성된 전력 계통의 동특성은 일반적으로 비선형 미분 방정식 (1)에 의해 표시된다.

$$\dot{X} = f(X) \qquad \text{------} \qquad (1)$$

조류 계산에 의해 얻어진 평형 동작점 Xo에 대해서 (1)식을 선형화하여, 선형 상태 미분방정식 (2)를 구한다.

$$\Delta\dot{X} = A \cdot \Delta X$$

$$\text{단,} \quad A = \partial f / \partial X \quad , \quad f(X_o) = 0 \quad \text{----} (2)$$

수십기 이상의 대규모 계통을 해석할 경우에는, 행렬 A의 차수가 대단히 커지므로 계산시간, 기억용량이 증가한다. 그러나, 고유치 해석법에서는 전체의 안정도 판별이 용이하고 계통 전체의 안정도 판별과 동요 모-드가 고유치 및 고유벡터에 의해서 명확하게 파악되며, 계통 현상의 물리적 해석이 용이하며 또한, 각 상태 변수의 시간적 변동을 구할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 안정도 향상 대책을 결정하는 데 극히 우수한 수법이다.

1) 발전기의 상태 방정식

각, 발전기는 Park의 기본식을 선형화한 식과

제어계로 표시된다.

$$\frac{d}{dt}\Delta X_n = A_{Gn}\cdot\Delta X_n + B_{Gn}\cdot\Delta i_{Gn} \quad \cdots\cdots \quad (3)$$

$$n = 1, 2, \cdots, N$$

$$\Delta V_{Gn} = C_{Gn}\cdot\Delta X_n + D_{Gn}\cdot\Delta i_{Gn} \quad \cdots\cdots \quad (4)$$

단, $\Delta i_{Gn} = [\,\Delta i_{qn}, \Delta i_{dn}\,]^T$

$\Delta V_{Gn} = [\,\Delta V_{qn}, \Delta V_{dn}\,]^T$

$\Delta X_n = [\,E'_{qn}, E'_{dn}, \omega_n, \delta_n, \cdots]^T$

2) 송전망의 표현식

어드미턴스 행렬을 이용하여 식으로 표시하면

$$\begin{bmatrix}\hat{I}_G\\ \hat{I}_L\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG}, & Y_{GL}\\ Y_{LG}, & Y_{LL}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{V}_G\\ \hat{V}_L\end{bmatrix} \quad \cdots\cdots \quad (5)$$

단, (5)식의 전류·전압은 계통 기준좌표로 표시된 발전기 단자에서의 값이다.

3) 좌표 변환식

계통 기준좌표 D-Q성분을 각 발전기 축을 기준으로 하는 d-q성분으로 바꾸는 식은 (6)식과 같다.

$$\Delta\hat{V}_{Gn} = R_n\cdot\Delta V_{Gn} + T_n\cdot\Delta\delta_n \quad \cdots \quad (6)$$

$$\Delta\hat{I}_{Gn} = R_n\cdot\Delta i_{Gn} + S_n\cdot\Delta\delta_n \quad \cdots \quad (7)$$

4) 부하특성

부하특성은 다음 (8)식과 같이 표현된다.

$$\left.\begin{aligned} P_m &= P_m(V_m, f_s)\\ Q_m &= Q_m(V_m, f_s)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots \quad (8)$$

단, $V_m = \sqrt{V_{mD}^2 + V_{mQ}^2}$

f_s ; 계통 주파수

부하의 전압 특성만을 고려하고, 동작점에서 선형화하여, 부하 노-드에서 전압, 전류의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta I_L = J_L\cdot\Delta V_L \quad \cdots\cdots \quad (9)$$

5) 계통의 상태 미분 방정식

(1)식 부터 (9)식을 결합하여 정리하면, 결국 계통 전체의 미분 방정식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{d}{dt}\cdot\Delta X = A\cdot\Delta X \quad \cdots\cdots \quad (10)$$

단, $A = A_G + B_G(R_G^{-1}\cdot Y^{-1}\cdot R_G - D_G)^{-1}\cdot\{C_G - R_G^{-1}\cdot Y^{-1}\cdot(S_G - Y\cdot T_G)\}$

$Y = Y_{GG} - Y_{GL}(Y_{LL} - J_L)^{-1}\cdot Y_{LG}$

6) 계통의 상태 방정식의 차수 변경

발전기 로-타(rotor)의 위상각 δ_i 중 어떤 위상각은 타 위상각으로 표시할 수 있다. 즉, 임의의 M 차 행렬 A의 렝크 (Rank) 는 M-1 이므로 임의의 발전기의 위상각을 기준 축으로 잡는 것이 가능하다.

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta_{gn} = -\omega_n \qquad n=1,\cdots,N \quad \cdots (11)$$

$$\left\{\begin{aligned} \frac{d}{dt}\Delta\delta_{gr} &= 0\\ \frac{d}{dt}\Delta\delta_{gn} &= -\omega_{gn} + \omega_{gr}\end{aligned}\right. \quad \cdots\cdots \quad (12)$$

$$n = 1, \cdots, r-1, r+1, \cdots N$$

따라서, (11)식, (12)식에 의해서 (10)식은 최종적으로 M-1차의 선형 미분 방정식 (13)이 얻어진다.

$$\frac{d}{dt}X = \tilde{A}\cdot X \quad \cdots\cdots \quad (13)$$

비대칭 실행렬 $\tilde{A}$ 의 고유치를 구하면, 전계통의 동요 모드 및 각 발전기와 제어기기의 동요비율과 출력을 상세하게 구할 수 있다.

7) 적용 예

앞의 방법으로 해석하여 본 모-델계통은 그림1과 같다. 그림1에서 계산의 간편을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 발전기 : 차과도 효과와 포화를 무시한다.
- 조속기 및 AVR : 1차 모-델로 표현한다.
- 부하 : 정임피던스 부하로 나타낸다.
- 송전선: 과도 특성을 무시하고 π 등가회로

로 나타낸다.

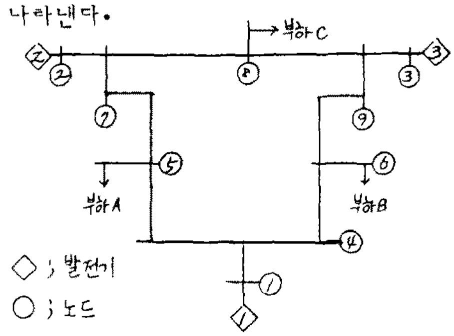

그림 1. 적용 모-델 계통

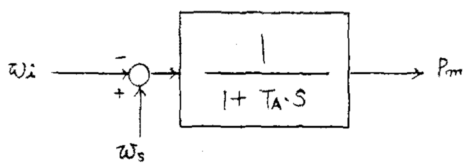

그림 2. 조속기의 구조

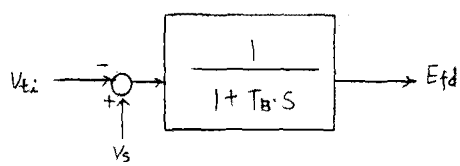

그림 3. AVR의 구조

* 발전기, 부하, 송전선의 자세한 데이터는 참고문헌 (1)을 참조하기 바람.

8) 결 과

그림1의 모-델 계통에 적용하여 얻은 고유치는 표1과 같다. 모-델 계통의 차수는 13차로서 계통 전체의 고유치가 구해진 것이다.

3기 계통인 경우의 주요 진동 주파수는 2개 존재하는데 적용 모-델에서는 표1의 3,4번 고유치로 나타내지는 2.07 Hz , 1.38Hz가 바로 주요 진동 주파수이다. 또한, 표1에서 알 수 있듯이 고유치의 실수부가 모두 음이므로 현행 운전점에서 계통의 동태 안정도가 확보되는 것을 알 수 있다.

No	고 유 치	갯수
1	-0.16129	2
2	-0.09646	2
3	-0.00266+ jo.o34649	2
4	-0.0006215+ j0.02298	2
5	-0.0001988+j0.0001292	2
6	-0.016647	1
7	-0.010374	1
8	-0.0004549	1
		13

표 1. 적용 모-델의 고유치

3. 결 론

본 프로그램에 의한 동태 안정도 해석은 계통내에 존재하는 중요 모드에 대한 정보를 고유치 및 고유 벡터로 효율적으로 얻는다. 본 프로그램을 간단한 모-델 계통에 적용한 결과를 소개하였다. 대규모 실계통의 중요 모-드 해석을 위해서는 계산 시간, 용량 등을 고려할 때, 계통 고유의 저감쇠 진동을 효율적으로 찾아내는 알고리즘의 개발이 요구되고 있다.

4. 참 고 문 헌

(1) P.M. Anderson and A.A.Fouad; "Power System Control and Stability"

(2) 内田直之、長尾待士、植田清隆 上之薗 博、中山道夫; "고유치법에 의한 동작정태 안정도 해석" 전력중앙연구소 보고 No. 178061