

動態安定度研究을 위한 半導體 速應勵磁方式 發電所의 簡易電力系統 模型

논문
24~5~1

Simplified Power System Model of the Generator with the High Speed Solid State Exciter for Dynamic Stability Studies

韓 松 曄* · 成 世 鎮**
(Song Yup Hahn) (Sei Jin Seong)

Abstract

A dynamic stability analysis of a large interconnected power system takes much time even though the modern large computer is used because of the high order of the system dynamic equations.

By the necessity of the low order power system models, a simplified power system model of the generator with the high speed solid state exciter is developed in this paper.

The usefulness of the reduced model is confirmed by comparing its eigenvalues and the transient responses with those of the original model in the single machine to infinite bus power system.

1. 序 論

近來에 와서 電力系統의 規模가 점차 커짐에 따라 電力系統의 動態安定度에 對한 問題가 크게 擡頭되게 되었다.

動態安定度 問題를 取扱하려면 系統의 動特性方程式을 세워야 하는데 보통 하나의 發電機(勵磁機와 調速機 포함)는 대략 11個의 聯立微分方程式¹⁾으로 表示되므로 100여대의 發電機가 同時에 連結되어 運轉되는 大電力系統의 경우 1,100여개의 聯立微分方程式을 取扱하여야 한다. 즉 大電力系統의 動態安定度 問題는 大型電子計算機로서 取扱하여야 하고 또한 많은 計算時間을 要하므로 電力系統方程式의 次數를 줄이는 方法이 절실히 要望되고 있다.

一般的으로 發電機에서 制動捲線의 影響을 無視하고 電機子의 transformer EMF를 無視하여 發電機를 一次微分方程式으로 나타내고 勵磁機를 二次微分方程式, 調速機를 二次微分方程式, 回轉子의 運動을 二次微分方程式으로 나타내어 하나의 發電所를 7個의 聯立微分方程式으로 나타내어 取扱하는 方法이 많이 쓰이고 있다²⁾.

Kupurajula와 Elangovan은³⁾ state variable grouping technique와 eigen value grouping technique를 使用하여 電力系統方程式을 時定數가 짧은 state variable로 이루어진 方程式과 時定數가 긴 state variable로 이루어진 方程式으로 分類하여 系統方程式의 次數를 낮추는 方法을 提示하였다.

本 研究에서는 特히 近來에 많이 使用되고 있는 solid state exciter를 使用한 發電所의 動特性方程式의 次數를 줄이는 方法에 對하여 取扱하였다.

從來의 勵磁機는 보통 直統發電機를 使用하여 왔는데 그 等價回路를 그려보면 대략 그림 1과 같다⁴⁾.

從來의 勵磁機는 보통 直統發電機를 使用하여 왔는데 그 等價回路를 그려보면 대략 그림 1과 같다⁴⁾.

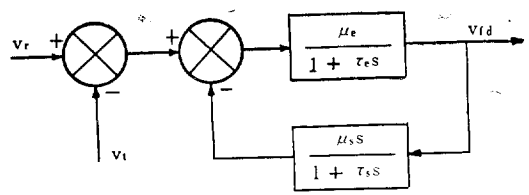


그림 1. 直統發電機를 使用한 發電所 勵磁系統 等價回路

Fig. 1. Equivalent circuit of excitation control system with D.C. Generator.

여기서 τ_e , τ_s 는 勵磁機 및 stabilizer의 時定數인데 보통 1~2 [S] 정도이므로 계통의 時定數에 比하여 無視할 수가 없다.

近來에 使用되기 始作한 半導體勵磁機의 代表的인 것을 紹介하면 그림 2와 같다⁴⁾. 이것을 等價回路로 그려보면 그림 3과 같이 된다. Stabilizer로서는 勵磁機의 速應度를 높이기 爲하여 端子電壓의 微分値를 귀환하는 回路로 하였다.

* 正會員: 서울大學校 助教授 · 當學會 編修委員

** 正會員: 忠南大學校 助教

接受日字: 75年 3月 20日

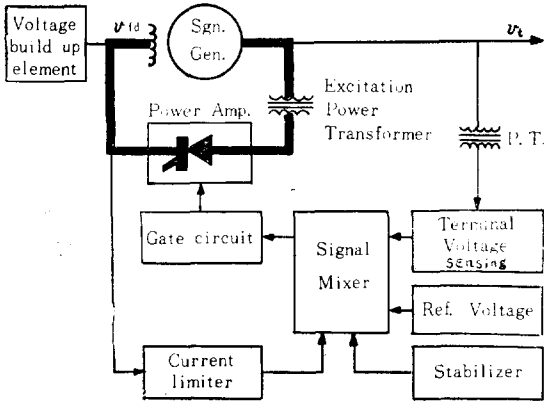


그림 2. 半導體를 사용한 發電所 勵磁系統
 Fig. 2. Exciter control system with solid state device

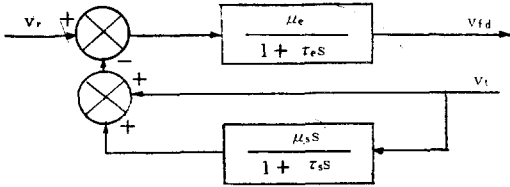


그림 3. 半導體를 사용한 勵磁機의 等價回路
 Fig. 3. Equivalent circuit of exciter control system with solid state device

그림 3으로 부터

$$v_{fd} = \frac{\mu_e}{1 + \tau_e s} (v_r - v_t - \frac{\mu_s s}{1 + \tau_s s} v_t) \quad (1)$$

이다. 式(1)을 微小信號 線性化하면

$$\Delta v_{fd} = \frac{-\mu_e}{1 + \tau_e s} (1 + \frac{\mu_s s}{1 + \tau_s s}) \Delta v_t \quad (2)$$

가 된다.

그림 2에서 Power amplifier 및 Terminal voltage sensing을 3상전파정류회로로 하면 勵磁機의 時定數 τ_e, τ_s 가 0.002~0.003[S]⁵⁾ 정도 밖에 되지 않아 식 (2)는

$$\Delta v_{fd} = -\mu_e (1 + \mu_s s) \Delta v_t \quad (3)$$

과 같이 쓸 수 있다.

本 研究에서는 위에서와 같이 時定數가 짧은 勵磁機를 갖인 發電所의 簡易 動特性 方程式을 유도하고 이것을 하나의 發電機와 無限母線으로 이루어진 간단한 電力系統에 적용하여 그 精確도와 유용도를 검토하였다.

2. 電力系統 方程式

그림 4는 1台的 發電機와 無限母線으로 이루어진 電力系統이다. 電機子의 抵抗강하, transformer EMF 및 界磁極面의 damper winding의 영향을 무시하면

Park's equation⁶⁾ 은

$$\begin{aligned} v_d &= -\omega \phi_q \\ v_q &= \omega \phi_d \\ v_{fd} &= r_{fd} i_{fd} + \frac{d}{dt} \phi_{fd} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 이것을 微小信號 線性화하면

$$\Delta V_{d,q} = A \Delta \Psi_{d,q} + \Phi_0 \Delta n \quad (5)$$

$$\Delta v_{fd} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Delta \phi_{fd} + r_{fd} \Delta i_{fd} \quad (6)$$

이고 여기서

$$\Delta V_{d,q} = \begin{pmatrix} \Delta v_d \\ \Delta v_q \end{pmatrix}, \quad \Delta \Psi_{d,q} = \begin{pmatrix} \Delta \phi_d \\ \Delta \phi_q \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Phi_0 = \begin{pmatrix} -\phi_{d0} \\ \phi_{q0} \end{pmatrix}$$

$$\Delta n = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$$

이다. 전류와 자속의교수 사이에는

$$\begin{pmatrix} \Delta i_{fd} \\ \Delta I_{d,q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \phi_{fd} \\ \Delta \Psi_{d,q} \end{pmatrix} \quad (7)$$

이고 여기서

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{21} \\ Y_{12} & Y_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{ffd} & \dots & -x_{afd} & 0 \\ x_{afd} & \dots & -x_d & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -x_q \end{pmatrix}^{-1}$$

이다. 발전기와 무한모선 사이에는

$$\begin{aligned} v_d &= r_e i_d - x_e i_q + v_b \sin \delta \\ v_q &= x_e i_d + r_e i_q + v_b \cos \delta \end{aligned} \quad (8)$$

의 관계가 있는데 이것을 微小信號 線性化하면

$$\Delta V_{d,q} = Z_e \Delta I_{d,q} + V_b \Delta \delta \quad (9)$$

이고 여기서

$$Z_e = \begin{pmatrix} r_e & -x_e \\ x_e & r_e \end{pmatrix}, \quad V_b = \begin{pmatrix} v_b \cos \delta_0 \\ -v_b \sin \delta_0 \end{pmatrix}$$

이다.

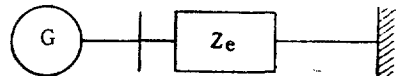


그림 4. 一機 一無限母線系統
 Fig. 4. One machine-infinite bus system

式(7)을 式(9)에 代入하고 이것과 式(5)에서

$$\Delta \Psi_{d,q} = [C_1, C_2, C_3] [\Delta \phi_{fd}, \Delta \delta, \Delta n]^T \quad (10)$$

이고 여기서

$$C_1 = [A - Z_e Y_{22}]^{-1} Z_e Y_{21}$$

$$C_2 = [A - Z_e Y_{22}]^{-1} V_b$$

$$C_3 = [A - Z_e Y_{22}]^{-1} \Phi_0$$

이다. 式(7)과 式(10)에서

$$\Delta i_{fd} = [d_1, d_2, d_3][\Delta\psi_{fd}, \Delta\delta, \Delta n]^T \quad (11)$$

이고 여기서

$$d_1 = y_{11} + Y_{12}C_1$$

$$d_2 = Y_{12}C_2$$

$$d_3 = Y_{12}C_3$$

이다. 발전기측의 Swing equation은

$$\frac{d}{dt}(\Delta\delta) = \omega_0 \Delta n \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta n) = \frac{1}{2H}(\Delta P_m - \Delta P_g - k_d \omega_0 \Delta n) \quad (13)$$

이다. 式(13)에서

$$\begin{aligned} \Delta P_g &= \Phi_0^T \Delta I_{d,q} + I_0^T \Delta \Psi_{d,q} \\ &= \Phi_0^T (Y_{21} \Delta \psi_{fd} + Y_{22} \Delta \Psi_{d,q}) + I_0^T \Delta \Psi_{d,q} \\ &= [P_1, P_2, P_3][\Delta\psi_{fd}, \Delta\delta, \Delta n]^T \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 여기서

$$P_1 = \Phi_0^T (Y_{21} + Y_{22}C_1) + I_0^T C_1$$

$$P_2 = (\Phi_0^T Y_{22} + I_0^T) C_2$$

$$P_3 = (\Phi_0^T Y_{22} + I_0^T) C_3$$

이다.

式(11)과 式(14)를 각각 式(6), 式(12), 式(13)에 넣어 정리하면

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ 0 & 0 & a_4 \\ a_5 & a_6 & a_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_{fd} \\ \Delta P_m \end{pmatrix} \quad (15)$$

이고 여기서

$$\begin{cases} a_1 = -\omega_0 r_{fd} d_1 & a_2 = -\omega_0 r_{fd} d_2 \\ a_3 = -\omega_0 r_{fd} d_3 & a_4 = -P_2 / 2H \\ a_7 = -(P_3 + k_d \omega_0) / 2H & b_1 = \omega_0 r_{fd} \\ b_2 = 1 / 2H & \Delta V_{fd} = \Delta i_{fd} / r_{fd} \end{cases}$$

일반적으로 발전기의 조속기는 그림 5와 같이 표시되므로 式(15)는

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 \\ a_5 & a_6 & a_7 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 \\ 0 & 0 & a_9 & a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_{fd} \\ \Delta P_m \end{pmatrix} \quad (16)$$

과 같이 되고 여기서

$$\begin{aligned} a_8 &= 1, & a_9 &= \frac{\mu_g}{\tau_g \tau_h} \\ a_{10} &= \frac{-1}{\tau_g \tau_h}, & a_{11} &= -\frac{(\tau_g + \tau_h)}{\tau_g \tau_h} \end{aligned}$$

이다.

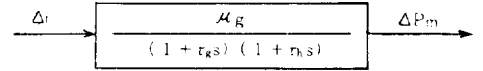


그림 5. 전형적인 조속기

Fig. 5. Typical governor block diagram

발전기의 단자전압은

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (17)$$

인데 이것을 미소신호 선형화하면

$$\begin{aligned} \Delta v_t &= V_0^T \Delta V_{d,q} \\ &= V_0^T (Z_e I_{d,q} + V_b \Delta\delta) \\ &= V_0^T Z_e (Y_{21} \Delta\psi_{fd} + Y_{22} \Delta\Psi_{d,q}) + V_0^T V_b \Delta\delta \\ &= [f_1, f_2, f_3][\Delta\psi_{fd}, \Delta\delta, \Delta n]^T \end{aligned} \quad (18)$$

이고 여기서

$$\begin{aligned} V_0 &= \begin{pmatrix} v_{d0} \\ v_{t0} \\ v_{q0} \\ v_{i0} \end{pmatrix} \\ f_1 &= V_0^T Z_e (Y_{21} + Y_{22}C_1) \\ f_2 &= V_0^T (Z_e Y_{22}C_2 + V_b) \\ f_3 &= V_0^T Z_e Y_{22}C_3 \end{aligned}$$

이다.

式(3)에 式(18)을 代入하여 이것을 式(16)에 代入하여 정리하면

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 \\ a_5 & a_6 & a_7 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 \\ 0 & 0 & a_9 & a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} \quad (19)$$

와 같이된다. 여기서

$$\begin{aligned} a_{12} &= (a_1 - b_1 \mu_e f_1 - a_3 b_1 \mu_e \mu_s f_3) / (1 + b_1 \mu_e \mu_s f_1) \\ a_{13} &= (a_2 - b_1 \mu_e f_2 - a_6 b_1 \mu_e \mu_s f_3) / (1 + b_1 \mu_e \mu_s f_1) \\ a_{14} &= (a_3 - b_1 \mu_e f_3 - a_6 b_1 \mu_e \mu_s f_2 - a_7 b_1 \mu_e \mu_s f_3) / (1 + b_1 \mu_e \mu_s f_1) \end{aligned}$$

이것을 보면 여자기의 시정수를 무시하였으므로 系

統의 動特性 方程式은 5個의 聯立微分方程式으로 表示됨을 알 수 있다.

3. 簡易 電力系統 模型

式 (18)에서

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{1}{f_1}(\Delta v_i - f_2\Delta\delta - f_3\Delta n) \quad (20)$$

이다. 앞에서 언급한 바와 같이 過度應答이 매우 빠른 Solid state exciter를 使用한 경우

$$|\Delta v_i| \ll |f_2\Delta\delta + f_3\Delta n| \quad (21)$$

이므로 式 (20)은

$$\Delta\psi_{fd} = -\frac{f_2}{f_1}\Delta\delta - \frac{f_3}{f_1}\Delta n \quad (22)$$

가 된다.

式 (19)에 式 (22)를 代入하면

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a_4 & 0 & 0 \\ a_{15} & a_{16} & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_8 \\ 0 & a_9 & a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} \quad (23)$$

이 된다. 여기서

$$a_{15} = a_6 - a_5 f_2 / f_1$$

$$a_{16} = a_7 - a_5 f_3 / f_1$$

이다.

式(23)이 solid state exciter가 있는 發電機의 簡易 電力系統 方程式이다.

재래식 발전기의 전력계통 방정식이 일반적으로 7個의 聯立微分方程式²⁾인데 반하여 solid state exciter가 있는 發電機의 電力系統 方程式은 4個의 聯立微分方程式으로 表示될 수 있다.

4. 數值例

전형적인 계통정수를 代入하여 簡易電力系統의 過度

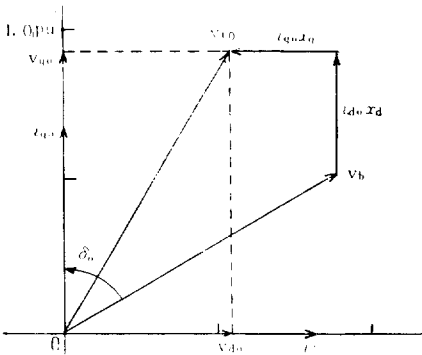


그림 6. 발전기의 전압전류 vector diagram

Fig. 6. Voltage and current vector diagram of generator

應答을 原系統과 比較하여 보기로 하자.

계통의 정수는 아래와 같다.

$$x_{ffd} = 1.1(\text{pu}), \quad x_{afd} = 1.0(\text{pu})$$

$$x_d = 1.2(\text{pu}), \quad x_q = 0.8(\text{pu})$$

$$H = 5(\text{KW/KVA}), \quad K_d = 0.1(\text{pu/rad})$$

$$r_e = 0, \quad x_e = 0.5(\text{pu})$$

$$r_{fd} = 0.001(\text{pu}), \quad \mu_s = 0.4$$

$$\mu_e = 200, \quad \tau_g = 0.5(\text{sec})$$

$$\tau_h = 0.1(\text{sec}), \quad \mu_g = 15.7$$

교란이 일어지기 前의 系統의 평형상태 (pu)는

$$\delta_0 = 1,047(60^\circ), \quad P_{g0} = 1.032$$

$$v_b = 1.0, \quad v_{t0} = 1.05$$

$$v_{d0} = 0.533, \quad v_{q0} = 0.905$$

$$i_{d0} = 0.81, \quad i_{q0} = 0.665$$

$$\phi_{a0} = 0.904, \quad \phi_{q0} = -0.533$$

$$\phi_{fd0} = 1.25, \quad i_{fd0} = 1.876$$

이고 이 정수를 Vector diagram로 그려보면 그림 6과 같고 式 (19)와 式(23)에 代入하면

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.25 & 0.641 & 68.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 314 & 0 & 0 \\ -0.0996 & -0.0968 & -1.0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -314 & -20 & -12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\psi_{fd} \\ \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} \quad (19')$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 314 & 0 & 0 \\ -0.121 & -0.88 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -314 & -20 & -12 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta n \\ \Delta P_m \\ \Delta P_n \end{pmatrix} \quad (23')$$

이다.

式(19')와 式(23')의 固有值를 求하여 보면 各各 式 (24), 式 (25)와 같이 된다.

$$\lambda_1 = -2.318 \quad \lambda_2 = -0.389 - j6.301$$

$$\lambda_3 = -0.389 + j6.301 \quad (24)$$

$$\lambda_4 = -10.295 \quad \lambda_5 = -1.859$$

$$\lambda_2 = -0.384 - j6.352 \quad \lambda_3 = -0.384 + j6.352 \quad (25)$$

$$\lambda_4 = -10.289 \quad \lambda_5 = -1.824$$

式(24)와 式(25)를 比較하여 보던 原 系統方程式과 簡易 系統方程式에서의 固有値는 거의 一致함을 알 수 있다.

다음에 구체적인 계산 예로서 제통에

$$\Delta\psi_{fd}|_{t=0} = 0.048 \quad \Delta\delta|_{t=0} = 0.2 \quad \Delta n|_{t=0} = 0$$

의 교란을 주었을 때 原 系統[式 (19)]와 簡易 系統 [式 (23)]의 $\Delta\psi_{fd}$, $\Delta\delta$, Δn 의 시간에 대한 변화를 전자계산기로 구하여 그려보면 그림 7과 같이 된다. 이 그림에서 $\Delta\psi_{fd}$, $\Delta\delta$, Δn 는 原系統(실선)과 簡易系統(점선)에서 거의 一致함을 볼 수 있다.

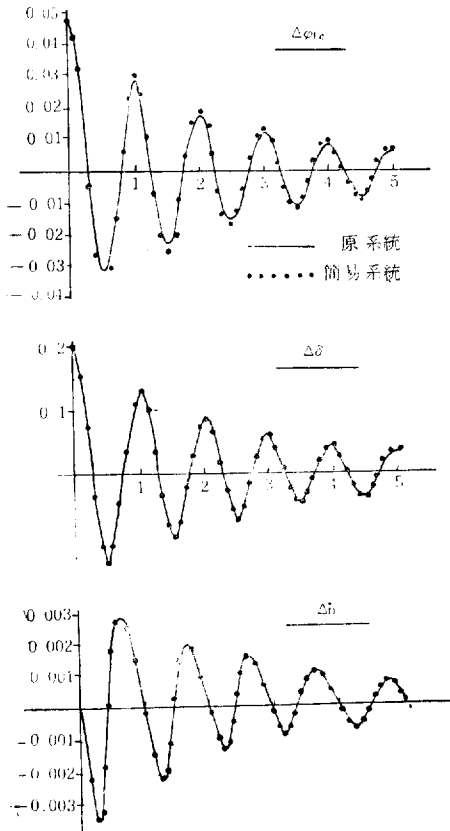


그림 7. $\Delta\psi_{fd}$, $\Delta\delta$, Δn 의 過渡應答
Fig. 7. Transient response of $\Delta\psi_{fd}$, $\Delta\delta$, Δn

5. 結 論

Solid state exciter를 갖인 發電機의 簡易動特性 方程式을 유도하고 이것을 原系統 方程式과 比較 검토하였다.

Solid state exciter를 使用하면 系統의 過渡期間 동안에 勵磁回路의 應答速度가 빨라 原 系統方程式에서 電氣的인 要素에 해당하는 상태변수가 모두 제거되어

보통 7차 연립미분방정식으로 表示되는 發電所 動特性 方程式이 4차 연립미분방정식으로 간단하게 되었다.

本 研究에서 유도된 簡易 電力系統 模型을 一機一無 限母線으로된 간단한 電力系統에 적용하여 그 과도응답을 구하여본 결과 간략화하지 않은 原 電力系統 模型의 過渡應答과 거의 一致하였다.

本 研究에서는 簡易 電力系統 模型을 구하여 그 정확도를 전자계산기로 비교 검토하였으나 앞으로 실제 電力系統에서의 실험이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

- 1) J.M. Undrill, "Dynamic stability calculation for an arbitrary number of interconnected synchronous machines", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-87, pp.835-844, March 1968.
- 2) J.H. Anderson, "The control of synchronous machine using optimal control", Proceeding of IEEE, Vol. 59, No.1, pp25-34, January 1971.
- 3) A. Kuppurajula and S. Elangovan, "Simplified power system models for dynamic stability studies", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-90, No.1, pp.11-22, January/February 1971.
- 4) IEEE Committe Report, "Proposed excitation system definitions for synchronous machine", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-88, No.8, pp.1248-1258 August 1969.
- 5) W. Watston and M.E. Coult, "Static exciter stabilizing signals on large generators", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-92, pp.204-211, January/February 1973.
- 6) R.H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machine-part 1", AIEE Trans., Vol.48, pp.716-730, July 1929.

記 號 說 明

v_d, v_q	전기자 직축 및 횡축 전압	
v_t	전기자 단자전압	
i_d, i_q	전기자 직축 및 횡축 전류	
ϕ_d, ϕ_q	전기자 직축 및 횡축 자속최고	
x_d, x_q	전기자 직축 및 횡축 리액탄스	
x_{afd}	전기자와 제자 상호 리액탄스	
i_{fd}	제자전류	φ_{fd} 제자 자속최고
x_{ffd}	제자 리액탄스	r_{fd} 제자 저항
r_e, x_e	송전선 저항 및 리액탄스	
v_s	모션전압	δ 부하각
n	회전속도	P_m 회전자 축 입력
P_g	전기자 출력	H 관성 정수
τ_e, τ_s	여자기 시정수	μ_e, μ_s 여자기 증폭율
k_d	회전자 제동계수	μ_a 조속기 증폭율
τ_g, τ_h	조속기 시정수	