

動的制動에 의한 電力系統의 過渡制御 特性 解析

論 文
31~11~1

Transient Control Analysis of Power System by Dynamic Braking

金 俊 鉉* · 樸 龍 泰**
(June-Hyun Kim · Yong-Tae Sul)

Abstract

This paper analyzes the transient control characteristics of power system by dynamic braking. This method, one type of network switching, employs the injection of controllable shunt resistors at or near the generator bus after the disturbances.

First, the power system is simulated mathematically for applying the dynamic braking. And the electrical transient control characteristics are considered by controlling the brake size and insertion time.

Second, the mechanical torque of turbine-generator is calculated for the mechanical characteristics.

This analysis results show that the electrical characteristics are improved but the turbine-generator shaft is impacted by brake switching. However, these problems can be solved by controlling the brake dynamically.

1. 序 論

電力系統이 大型化되고 複雜해짐에 따라 系統의 安定性和 效率의 運用이 문제가 된다.

특히 外亂에 따라 過渡現象은 系統의 電氣的 特性을 악화시킬뿐 아니라, 過渡電流에 따른 脈動토크에 의해서 터어빈-發電機軸에도 심한 衝擊을 줄 우려가 있게 된다.^{[3], [10], [14]}

따라서 이러한 過渡狀態를 적절히 制御하기 위해서 線路에 回路遮斷器, 繼電器등의 保護裝置와 直列리액터를 설치하거나 發電機의 勵磁形式을 超高速應答式으로 한다.^{[11], [13]} 또한, 최근에는 制動抵抗을 이용하여 系統의 過渡狀態를 制御하는 制動抵抗法이 제시되었다.^[11] 하지만, 이러한 制御裝置는 系統의 全般的인 電氣的 特性을 향상시킬 수는 있으나, 動作時의 스윙칭에 따른 영향으로 터어빈-發電機軸에는 機械的인 衝擊을 가하게 된다.^{[14], [15]}

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授

** 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1982年 6月 18日

本 研究에서는, 系統의 過渡狀態를 效果의으로 制御하기 위해, 최근에 제시된 制動抵抗法에서 制動抵抗의 크기 및 投入時間등을 조절하는 動的制動에 관한 制御技法을 제안하여, 發電機의 電氣的 토크, 位相角, 端子電壓등의 電氣的인 特性과 이에 수반되는 터어빈-發電機軸에 가해지는 機械的 衝擊토크의 機械的 效果를 디지털컴퓨터로 시뮬레이션하여 解析하였다.

2. 動的制動的의 適用理論

動的制動法은 系統의 過渡狀態를 制御하기 위하여 制御可能한 短絡抵抗을 發電機母線, 혹은 근처母線에 설치하여 故障後 投入하는 回路網스윙칭으로 일종의 高速應 制御方式이다.

이 技法을 適用하기 위해 系統을 同期發電機와 線路로 나누어 모델링 하였는데, 먼저 同期發電機는 a, b, c 세개의 相捲線과 界磁捲線F, 2개의 制動捲線 D, Q 등 6개의 捲線으로 구성된 凸極型 모델을 이용한다.^{[8], [9]}

이러한 모델은 電流 I를 變數로 잡아 식 (1)과 같

은 電壓方程式으로 표시 할 수 있다.

$$\underline{V} = -\underline{R}\underline{I} - \underline{L}\dot{\underline{I}} \quad (1)$$

여기서

$$\underline{V} = [V_o \ V_d \ V_q \ -V_F \ 0 \ 0]^T$$

$$\underline{I} = [I_o \ I_d \ I_q \ I_F \ I_D \ I_Q]^T$$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r + 3r_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & \omega L_q & 0 & 0 & K\omega M_Q \\ 0 & -\omega L_d & r & -K\omega M_F & -K\omega M_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix}$$

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} L_o + 3L_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & K M_F & K M_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & K M_Q \\ 0 & K M_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & K M_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & K M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

送電系統은 그림 1 과 같은 1機 無限大母線 系統을 택한다.

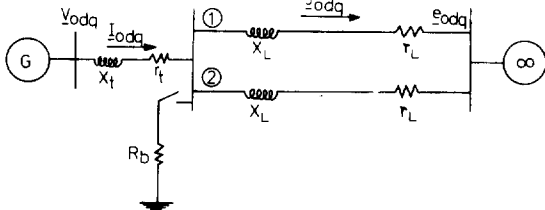


그림 1. 送電系統

Fig.1. Transmission System

이때, 發電機電流를 \underline{I} , 線路電流를 \underline{J} 로 잡아 發電機端子電壓 V_{odq} 에 대한 行列式 형태로 표시하면 식 (2) 와 같이 된다.

$$\underline{V}_{odq} = \underline{C} \begin{bmatrix} \underline{I}_{odq} \\ \underline{J}_{odq} \end{bmatrix} + \underline{D} \begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_{odq} \\ \dot{\underline{J}}_{odq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{e}_{odq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$\underline{V}_{odq} = \begin{bmatrix} V_o \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad \underline{I}_{odq} = \begin{bmatrix} I_o \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

$$\underline{J}_{odq} = \begin{bmatrix} J_o \\ J_d \\ J_q \end{bmatrix} \quad \dot{\underline{I}}_{odq} = \begin{bmatrix} \dot{I}_o \\ \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix}$$

$$\dot{\underline{J}}_{odq} = \begin{bmatrix} \dot{J}_o \\ \dot{J}_d \\ \dot{J}_q \end{bmatrix}$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} (r_t \underline{I}_u - \frac{X_t}{\omega_s} \underline{\Omega}) & (r_L \underline{I}_u - \frac{X_L}{\omega_s} \underline{\Omega}) \\ (-r_L \underline{I}_u + \frac{X_L}{\omega_s} \underline{\Omega}) & (2r_L \underline{I}_u - \frac{2X_L}{\omega_s} \underline{\Omega}) \end{bmatrix}$$

$$\underline{D} = \begin{bmatrix} (\frac{X_t}{\omega_s}) \underline{I}_u & (\frac{X_L}{\omega_s}) \underline{I}_u \\ (-\frac{X_L}{\omega_s}) \underline{I}_u & (\frac{2X_L}{\omega_s}) \underline{I}_u \end{bmatrix}$$

$$\underline{e}_{odq} = \begin{bmatrix} 0 \\ -E_s \sin \delta \\ E \cos \delta \end{bmatrix}$$

$$\underline{I}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{\Omega} = \dot{\underline{P}} \underline{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix}$$

系統에 外亂 (本 研究에서는 平衡三相短絡事故)이 발생하면, 그림 1에서 線路②가 開放되고, 制動抵抗 $R (= R_b)$ 가 投入된다. 이때 식 (2)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{odq} \\ 0 \end{bmatrix} = \underline{C}^F \begin{bmatrix} \underline{i}_{odq} \\ \underline{j}_{odq} \end{bmatrix} + \underline{D}^F \begin{bmatrix} \dot{\underline{i}}_{odq} \\ \dot{\underline{j}}_{odq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{e}_{odq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서

$$\underline{C}^F = \begin{bmatrix} r_t \underline{I}_u - \frac{X_t}{\omega_s} \underline{\Omega} + \underline{Q} & -\underline{Q} \\ -\underline{Q} & r_L \underline{I}_u - \frac{X_L}{\omega_s} \underline{\Omega} + \underline{Q} \end{bmatrix}$$

$$\underline{D}^F = \begin{bmatrix} \frac{X_t}{\omega_s} \underline{I}_u & 0 \\ 0 & \frac{X_L}{\omega_s} \underline{I}_u \end{bmatrix}$$

$$\underline{Q} = \underline{P} \{ R \} \underline{P}^T$$

$$P = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \end{pmatrix}$$

$$\underline{I}_t^T = [I_F \ I_D \ I_Q \ \underline{I}_{odq}^T \ \underline{I}_{odq}]$$

$$\underline{E}^T = [e_x \ 0 \ 0 \ 0 \ (-E \sin\delta) \ (E \cos\delta) \ 0 \ 0 \ 0]$$

同期發電機와 送電系統의 電流를 狀態變數로 잡아 全系統을 하나의 狀態方程式으로 표시하면 식 (4)와 같이 된다.^[12]

$$\underline{A} \dot{\underline{I}}_t = \underline{B} \underline{I}_t + \underline{E} \quad (4)$$

여기서

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} & \underline{0} \\ \underline{A}_{21} & (\underline{A}_{22} - \underline{D}_{11}) & -\underline{D}_{12} \\ \underline{0} & -\underline{D}_{21} & -\underline{D}_{22} \end{bmatrix}$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} -\underline{B}_{11} & -\underline{B}_{12} & \underline{0} \\ -\underline{B}_{21} & (-\underline{B}_{22} + \underline{C}_{11}) & \underline{C}_{12} \\ \underline{0} & \underline{C}_{21} & \underline{C}_{22} \end{bmatrix}$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} (\omega_s M_d) L_F & (\omega_s M_d) M_R & 0 & 0 & (\omega_s M_d) K M_F & 0 \\ r_F & r_F & 0 & 0 & r_F & 0 \\ -M_R & -L_D & 0 & 0 & -K M_D & 0 \\ 0 & 0 & -L_Q & 0 & 0 & -K M_Q \\ \hline 0 & 0 & 0 & -(L_o + 3L_n) & 0 & 0 \\ -K M_F & -K M_D & 0 & 0 & -L_d & 0 \\ 0 & 0 & -K M_Q & 0 & 0 & -L_q \end{array} \right]$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} \underline{B}_{11} & \underline{B}_{12} \\ \underline{B}_{21} & \underline{B}_{22} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \omega_s M_d & 0 & 0 & & & \\ 0 & -r_D & 0 & & \underline{0} & \\ 0 & 0 & -r_Q & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & -(r + 3r_n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K \omega M_Q & 0 & -r & -\omega L_q \\ K \omega M_F & K \omega M_D & 0 & 0 & \omega L_d & -r \end{array} \right]$$

위와 같은 系統의 過渡制御 特性을 解析하기 위해 位相差角 δ 와, 電流 I 로서 動態方程式을 표시하면 각각 식 (5), (6)과 같이 된다.^{[4]~[7]}

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \underline{A} \delta + \underline{B} + f(\underline{I}) & (5) \\ \dot{\underline{I}} &= \underline{C} \underline{I} + \underline{D} + g(\underline{\delta}) & (6) \end{aligned}$$

여기서,

$\underline{A}, \underline{C}$; 리액턴스項

\underline{B} ; 一定機械의 入力토크項

\underline{D} ; 一定勵磁項

$f(\underline{I})$; 發電機의 電氣의 出力토크項

$g(\underline{\delta})$; 無限大母線에 의한項

이때 그림 1의 모델系統에서 制動抵抗 R_b 에 따른 發電機의 運動方程式은 식 (7)과 같이 된다.

$$\left(\frac{H}{\omega_s}\right) \ddot{\delta} = P_m - P_e \sin\delta - B \quad (7)$$

여기서

H ; 慣性定數

ω_s ; 同期化 角周波數

P_m ; 機械的 入力

P_e ; 電氣的 出力

B ; 制動의 有·無, 크기 및 投入時間에 따른 制動項

3. 機械的 特性解析

系統에 外亂이 發生하며 過渡電流와 脈動토크에 의해서 터빈-發電機軸은 심한 機械的인 衝擊을 받게 되며, 制御裝置의 動作에 따른 스윙칭에도 영향을 받는다.

따라서, 本 研究에서는 動的制動에 따른 發電機의 機械的인 영향을 구하기 위해 터빈-發電機軸 사이의 각 부분에 작용하는 機械的 토크를 解析하였다. 먼저 터빈-發電機軸을 그림 2와 같이 6개의 부분 (4개의 터빈, 發電機, 勵磁器)으로 나누어 표시한다.^[2]

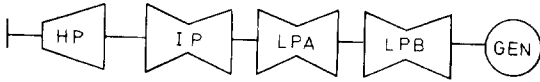


그림 2. 터빈-發電機軸 모델

Fig.2. Turbine - generator shaft model

위와 같은 터빈-發電機軸 모델에서 각 부분간의 相互關係는 식 (8)과 같이 角周波數 ω 와 電氣的 토크 T_e 로 표시할 수 있다.

각 부분의 角周波數

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_{HP} &= \left(\frac{\omega_s}{2H_{HP}}\right) T_{HP\sim IP} + \left(\frac{\omega_s b_{HP}}{2H_{HP}}\right) T_m \\ \dot{\omega}_{IP} &= \left(\frac{\omega_s}{2H_{IP}}\right) (T_{HP\sim IP} - T_{IP\sim LPA}) \\ &\quad + \left(\frac{\omega_s b_{IP}}{2H_{IP}}\right) T_m \\ \dot{\omega}_{LPA} &= \left(\frac{\omega_s}{2H_{LPA}}\right) (T_{IP\sim LPA} - T_{LPA\sim LPB}) \\ &\quad + \left(\frac{\omega_s b_{LPA}}{2H_{LPA}}\right) T_m \\ \dot{\omega}_{LPB} &= \left(\frac{\omega_s}{2H_{LPB}}\right) (T_{LPA\sim LPB} - T_{LPB\sim GEN}) \\ &\quad + \left(\frac{\omega_s b_{LPB}}{2H_{LPB}}\right) T_m \\ \dot{\omega}_{GEN} &= \left(\frac{\omega_s}{2H_{GEN}}\right) (T_{LPB\sim GEN} - T_{GEN\sim EXC}) \end{aligned} \right\} (8)$$

$$- \left(\frac{\omega_s}{2H_{GEN}}\right) T_e$$

$$\dot{\omega}_{EXC} = \left(\frac{\omega_s}{2H_{EXC}}\right) (T_{GEN\sim EXC})$$

또한 각 부분사이의 機械的인 토크는 식 (9)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \dot{T}_{HP\sim IP} &= K_{HP\sim IP} (\omega_{HP} - \omega_{IP}) \\ \dot{T}_{IP\sim LPA} &= K_{IP\sim LPA} (\omega_{IP} - \omega_{LPA}) \\ \dot{T}_{LPA\sim LPB} &= K_{LPA\sim LPB} (\omega_{LPA} - \omega_{LPB}) \\ \dot{T}_{LPB\sim GEN} &= K_{LPB\sim GEN} (\omega_{LPB} - \omega_{GEN}) \\ \dot{T}_{GEN\sim EXC} &= K_{GEN\sim EXC} (\omega_{GEN} - \omega_{EXC}) \end{aligned} \right\} (9)$$

여기서

K : 각 부분사이의 스프링 常數

b : 각 부분의 機械的 定數

이러한 터빈-發電機軸의 토크의 過渡應答은 初期狀態 혹은 勵磁入력에 따라 좌우된다. 따라서 이 軸系統의 應答感度を 單位階段函數, 60 (Hz)와 120 (Hz)의 正弦波函數등 3가지 형태의 勵磁入력을 이용하여 解析한다. 標準化된 感度定數 r 은 다음과 같이 定義된다.

$$r = \frac{\text{最大軸부분 토크 (P.u - norm)}}{\text{最大電氣的 入力토크 (P.u)}}$$

여기서

軸부분 토크 (P.u - norm)

$$= \frac{(\text{어느순간의}) \text{軸부분 토크 [P.u]}}{\text{軸부분 定常狀態 토크 [P.u]}}$$

세가지 형태의 勵磁入력에 따른 터빈-發電機軸의 각 부분의 토크의 感度定數는 표 1과 같이 된다.

표 1. 터빈-發電機軸 각 부분의 感度定數
Table 1. Sensitivity factors of each turbine - generator shaft section

| 부분 | HP ~ IP | IP ~ LPA | LPA ~ LPB | LPB ~ GEN | GEN ~ EXC |
|------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|
| $r_{u.s}$ | 0.62 | 0.68 | 1.42 | 1.26 | 0.07 |
| r_{f60} | 0.30 | 0.24 | 0.34 | 0.44 | 0.03 |
| r_{f120} | 0.12 | 0.11 | 0.20 | 0.16 | 0.01 |

표 1에서 보면 LPA~LPB 사이의 感度定數가 가장 큼을 알 수 있으며, 이 부분 토크의 시간적 변화는 그림 3과 같이 된다.

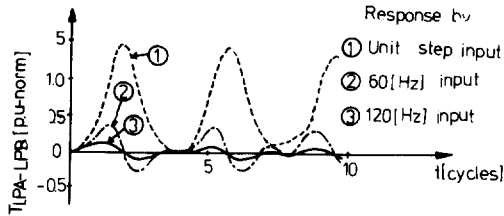


그림 3. LPA~LPB 부분의 機械的 토크.
Fig.3. Mechanical torque of LPA~LPB section

지금까지 제시한 全系統間의 相互連關性을 圖式的으로 표시하면 그림 4 와 같이 된다.

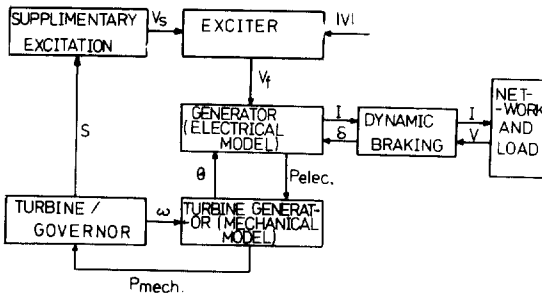


그림 4. 全系統間의 相互關係
Fig.4. Relation of total system

4. 適用事例 및 解析結果

4.1 모델系統

모델系統은 그림 5 와 같은 3機 9 母線系統을 이 용한다.

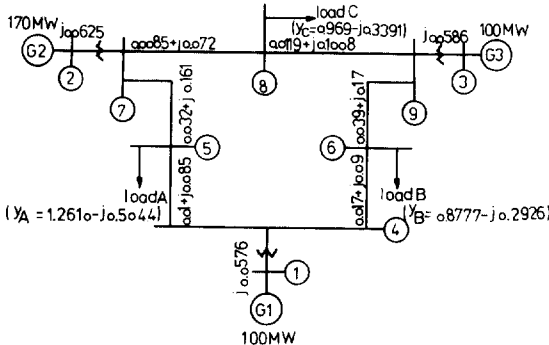


그림 5. 모델系統 (P.u, 100MVA Base)
Fig.5. Model system (P.u, 100MVA Base)

解析方法은 母線① 근처에서 三相短絡事故가 발생 한 경우 制動抵抗의 有·無, 크기 및 投入時間에 따 른 효과를 표 2 와 같이 10 가지 경우로 나누어 解析 하였다.

표 2. 解析事例

Table 2. Analysis case

| Case | 故障持續時間 [cycles] | 制動크기 [p.u] | 制動投入時間 [cycles] | 再閉路時間 [cycles] | 制動除去時間 [cycles] |
|------|-----------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1~10 | 3,6 | 0,0,6,1 | 3,6,12 | 33 | 36 |

위와 같은 解析의 計算過程 흐름도는 그림 6 과 같 이 된다.

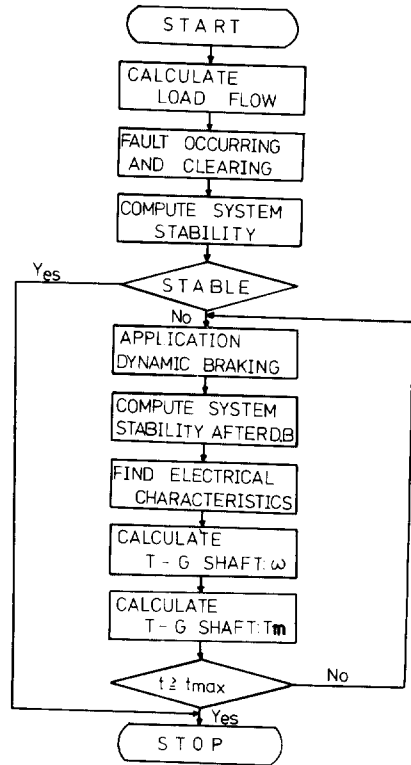


그림 6. 計算 흐름도
Fig.6. Flow chart

4.2 解析結果

그림 5 의 모델系統에서 母線① 근처의 三相短絡事故에 대한 過渡狀態를 解析하였다.

(A) 電氣의 特性은 故障이 3 [cycles] 持續된 후 除去되고 33 [cycles] 에서 再閉路했을 때 ① 制動

이 없는 경우 ② 制動을 3 [cycles] ③ 6 [cycles] 에投入한 경우發電機 2의 端子電壓, 位相角, 電氣的 토오르크를 解析한 結果는 그림 7과 같이 된다. 이때 전반적인 電氣的 特性은 制動의 投入으로 향상되었으며, 系統의 安定性은 投入時間이 짧을수록 좋아짐을 알 수 있었다.

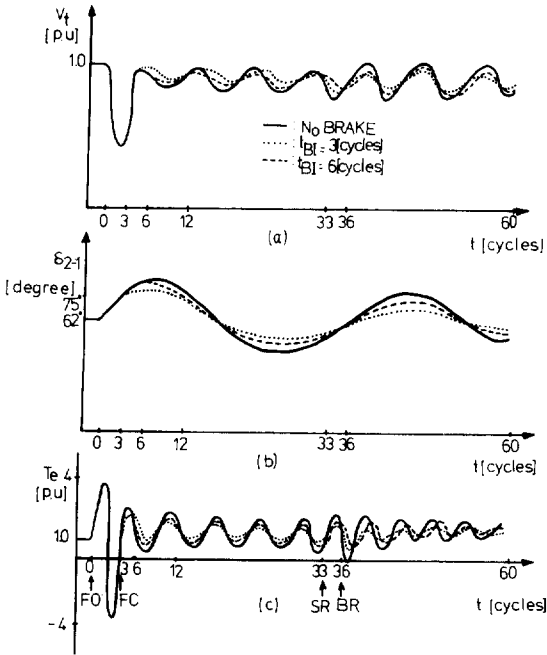


그림 7. $R_b = 1.0$ [p.u]인 경우의 電氣的 特性
 (a) 端子電壓 (b) 位相差角
 (c) 電氣的 토오르크

Fig.7. Electrical characteristics in case of $R_b = 1.0$ [p.u]
 (a) Terminal voltage
 (b) Torque angle
 (c) Electrical torque

(B) 機械的 特性은 (A)와 같은 형태의 故障인 경우, 發電機 2의 터어빈-發電機軸에서 각 부분의 機械的인 토오르크를 解析한 結果는 그림 8과 같이 된다.

그림 8에서 보면 터어빈 LPA~LPB사이의 機械的 토오르크動搖가 가장 심함을 알 수 있다.

따라서 $T_{LPA \sim LPB}$ 에 대해 중점적으로 解析했다.

표 3은 3 [cycles] 三相短絡事故가 발생했을 때 ① 制動이 없는 경우, ② 制動의 크기가 1.0 [p.u] ③ 0.6 [p.u]인 경우와, 投入時間을 3 [cycles] 6 [cycles]로 했을 경우에 $T_{LPA \sim LPB}$ 의 각각에 대한 부분적인 peak 値를 나타낸 것이다.

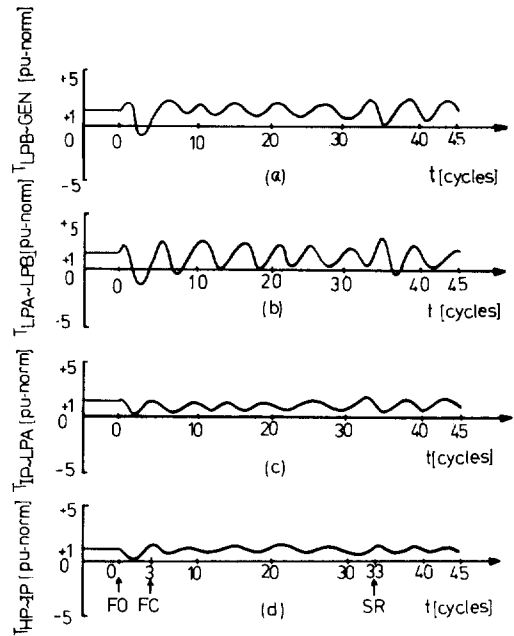


그림 8. 터어빈-發電機軸의 機械的 토오르크

- (a) LPB~ GEN.부분 (c) IP~ LPA 부분
- (b) LPA~LPB 부분 (d) HP~ IP 부분

Fig.8. Mechanical torques of turbine-generator shaft

- (a) LPB~ GEN. section (c) IP~ LPA section
- (b) LPA~LPB section (d) HP~ IP section

표 3. 三相短絡事故 (3 cycles 持續)에 대한 $T_{LPA \sim LPB}$ 의 動搖

Table 3. Swing of $T_{LPA \sim LPB}$ for the three phase fault (Duration time ;3 cycles)

| NO BRAKE | $T_{LPA-LPB}$ [p.u-norm] | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | $R_b = 1.0$ [p.u] | | $R_b = 0.6$ [p.u] | |
| $t_{FC} = 3[C]$ | $t_{BI} = 3[C]$ | $t_{BI} = 6[C]$ | $t_{BI} = 3[C]$ | $t_{BI} = 6[C]$ |
| 2.56 | 2.75 * | 2.56 | 3.14 * | 2.56 |
| 2.27 | 2.38 | 2.58 * | 2.80 | 2.90 * |
| 2.29 | 2.34 | 2.49 | 2.43 | 2.71 |
| 2.20 | 2.29 | 2.43 | 2.31 | 2.14 |
| 1.89 | 2.01 | 2.06 | 2.07 | 2.60 |
| 2.25 | 2.38 | 2.39 | 2.41 | 2.40 |
| 2.07 | 2.21 | 2.18 | 2.30 | 2.61 |
| 2.30 | 2.46 | 2.40 | 2.71 | 2.50 |
| 2.21 | 2.39 | 2.38 | 2.68 | 2.45 |
| 2.10 | 2.34 | 2.30 | 2.49 | 2.39 |

* ; 制動抵抗投入 순간

표 3에서 보면 機械的 토크의 動搖는 電氣的인 特性과는 반대로 制動이 없을 경우가 가장 적으며, 制動的 投入 時間이 짧을수록 커짐을 알 수 있다. 또한 制動的 크기는 0.6 [p.u] 보다 1.0 [p.u] 일때가 더 機械的 토크 動搖폭이 적었다.

표 4. 三相短絡事故 (6 cycles 持續)에 대한

$T_{LPA \sim LPB}$ 의 動搖

Table 4. Swing of $T_{LPA \sim LPB}$ for the three phase fault (Duration time ; 6 cycles)

| $T_{LPA \sim LPB}$ [p.u-norm] | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| NO BRAKE | $Rb = 1.0$ [p. u] | | $Rb = 0.6$ [p. u] | |
| $t_{FC}=6$ (C) | $t_{BI}=6$ (C) | $t_{BI}=12$ (C) | $t_{BI}=6$ (C) | $t_{BI}=12$ (C) |
| 2.16 | 2.41 * | 2.16 | 2.79 * | 2.16 |
| 2.11 | 2.22 | 2.24 * | 2.58 | 2.65 * |
| 2.08 | 2.17 | 2.21 | 2.50 | 2.56 |
| 1.89 | 2.08 | 2.19 | 2.35 | 2.50 |
| 2.12 | 2.15 | 2.15 | 2.42 | 2.47 |
| 2.05 | 2.06 | 2.07 | 2.30 | 2.30 |
| 2.10 | 2.13 | 2.13 | 2.38 | 2.40 |
| 2.04 | 2.11 | 2.05 | 2.24 | 2.19 |
| 2.01 | 2.07 | 2.01 | 2.20 | 2.16 |
| 1.95 | 2.04 | 2.00 | 2.15 | 2.09 |

* ; 制動抵抗投入 순간

표 4는 6 [cycles] 故障인 경우로서 3 [cycles] 故障보다 機械的 토크 動搖폭이 훨씬 적음을 알 수 있다. 이 動搖폭은 0.5 [p.u - norm] 이상이 되면 터어빈 - 發電機軸에 손상을 주게 된다.

따라서 本 解析에 이용한 故障형태에는 그림 7의 電氣的 特性과 표 3, 4의 機械的 特性을 동시에 만족하는, 1.0 [p.u]의 制動을 故障發生後 6 [cycles]에 投入하는 것이 가장 理想的임을 알 수 있었다.

5. 結 論

지금까지 제시한 動的制動法을 이용하여 系統의 過渡制御特性을 解析한 結果

(1) 系統의 전반적인 電氣的 特性은 向上되지만, 發電機와 터어빈에는 機械的인 영향을 미친다.

(2) 특히 制動的 投入에 따른 터어빈 - 發電機軸의 機械的 토크 特性을 解析한 結果, 低壓터어빈 (LPA ~ LPB)의 衝擊토크가 가장 크며, 경우에 따라서는 軸에 손상을 줄 위험성이 있었다.

(3) 本 論文에서의 事例研究結果, 이러한 機械的인 衝擊토크는 制動的 크기 및 投入時間을 적절히 조정된 動的制動으로서 허용가능한 범위까지 줄일 수 있었다.

本 解析은 系統의 過渡狀態制御 및 安定運用に 기여할 수 있을 것으로 본다.

記 號

- θ ; 回轉子角
- δ ; 位相差角 (토크크)
- ω ; 角周波數 ($= \dot{\theta} = \omega_s + \dot{\delta}$)
- r_n ; 中性點低抗
- V_{odq} ; 同期發電機의 odq 軸端子電壓벡터
- I_{odq} ; 同期發電機의 odq 軸電流벡터
- e_x ; 一定勵磁電壓

參 考 文 獻

- [1] Dineley, J.L., Morris, A.J.; "Synchronous generator transient control: Part I theory and evaluation of alternative mathematical models," paper presented at the PICA conference, Boston, Mass, May 24-26, 1971.
- [2] IEEE Committee report; "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-92, pp.1904-1915, Nov./Dec., 1975.
- [3] Dihely, J.L., Fenwick, P.J.; "The effects of Prime-mover and excitation control on the stability of large system turbine generator," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, pp.1613-1623, Sept./Oct., 1974.
- [4] Gross, G. Bergen, A.R.; "A class of new multistep integration algorithms for the computation of power system dynamical response," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-96, No. 1, pp.293-307, Jan./Feb., 1977.
- [5] Barnard, R.D. "Optimal-Aim control for nonlinear regulation systems," IEEE Trans. Auto, control. vol.AC-20, pp.200-208, April, 1975.
- [6] Tomas, R.J. Thorp. J.S., and Pottle, C.; "A model-referenced controller for stabilizing large transient swings in power systems" IEEE Trans. Auto control vol. AC-21, pp.746-750, Oct., 1976.

- [7] Dommel. H.W. Sato. N.; "Fast transient stability solutions," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-91, pp.1643-1650, Jul./Aug., 1972.
- [8] Anderson, P.M. Fouad. A.A.; "Power system control and stability," Ames, Iowa: Iowa state univ. press, 1978.
- [9] Kimbark, E.W.; "Power system stability: synchronous Machines," Dover Publication, New York, 1968.
- [10] Mehta. D.B. Adkins, B.; "Transient torque and load angle of the synchronous generator following several types of system disturbance," Proc. IEEE. 107A. pp.61-74, 1960.
- [11] Shelton M.L. et al.; "Bonneville power administration 1400 MW braking resistor" IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-94, No. 2, pp.602-611, March/Apr., 1975.
- [12] Altalib, H.Y. Krause. P.C. "Dynamic equivalents by combination of reduced order models of system compenents," IEEE Trans, Power App. Syst., vol. PAS-95. No. 5, pp. 1535-45, Sept./Oct., 1976.
- [13] Crenshaw, M.L. et al.; "Althyrex excitation system with power system stabilizer," Stability of large electric power systems (Edited by R.T. Byerly and E.W. Kimbark), IEEE press, pp.82-90, New York, 1974.
- [14] Abolins. A. et al; "Effect of clearing short circuits and automatic reclosing on torsional stress and life expenditure at turbine generator shafts," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-95, No. 1, pp.14-25, Jan./Feb., 1976.
- [15] Rusche. P.A.E.; "Network alternatives to reduce turbine-generator stresses," IEEE Trans. Power App. Syst. vol. PAS-98, No. 2, March/April, 1979.