

동기 발전기의 과도 해석

*박철원⁰ · **박창수 · ***신광철
*원주대학 전기과 · (주)그랜드 · 삼안건설기술공사(주)

Transient Analysis of Synchronous Machine

*Chul-Won Park⁰ · **Chang-Soo Park · ***Kwang-Chul Shin
*Wonju National College · **Grand · ***Saman

Abstract - In this paper, the voltage equation of a synchronous machine is established using the two-axis theory. And we were simulated model of the synchronous generator for power system fault analysis. It can be used to analyze important features of faults and to develop enhanced protection methods.

1. 서 론

전력시스템은 시시각각으로 변하는 중요 부하의 개폐나 사고로 인하여 과도상태 및 외란 문제에 직면하게 된다. 이때 전력시스템은 일반적으로 발전기의 여자기, 터빈 조속기 제어시스템 등의 도움으로 인해 새로운 정상상태조건에 적응하게 된다. 최근 대용량화 추세 있는 발전소 건설에 비추어 볼 때 동기 발전기는 전력시스템에서의 가장 중요한 요소 중의 하나임에 틀림없다[1,2].

대규모의 외란은 전형적으로 여러 가지 단락회로에서 비롯되게 되는데, 이런 대규모의 단락사고는 전력시스템에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 고장이 발생하는 동안에 단자전압은 뚝(dips) 하고, 여러 가지 비 정상상태 특성을 나타내게 된다. 이때 여자기는 계자회로의 여자전류가 증가되도록 그 출력전압을 최고한도로 증가시키게 된다. 그러면 대용량 발전기 선로의 원치 않는 개폐로 결과로 인하여 전력계통의 다른 유니트는 과부하가 된다. 이에 따라 사고는 가능한 신속하게 제거되어서 전력공급의 연속성이 유지되어야만 한다. 전력시스템에서 외란이 발생한 동안, 바람직하지 않는 계통 운영을 피하기 위하여 구성을 최적화하는 동안에 보호를 제공하는 계전기의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 따라 전력공급의 원천인 터보 발전기나 돌극형 동기 발전기의 신뢰성 있는 보호를 위하여 많은 연구들이 수행되어왔다[3-5].

동기 발전기의 4가지 주요부는 고정자 권선, 회전자 권선과 댐퍼, 계자권선, 자성체 코어이다. 그러나 유지비용과 시간을 고려해 볼 때, 고정자 권선의 사고가 가장 심각한 고장으로 고려되어 왔다. 이런 고장들은 내부 단락 고장 및 지락고장으로 대개 절연파괴와 관계가 있다. 내부 단락고장은 큰 과도한 단락전류에 의하여 대단히 심각한 손상 즉, 계통 붕괴를 가져 올 수도 있다. 반면에 지락 고장은 그 발생 초기단계에서는 덜 파괴적으로 계통에 가벼운 손상을 주게 되나 오랫동안 방치하여 지속되게 되면

내부 단락고장으로 진전될 수도 있다. 이런 사고들을 검출하기 위한 많은 보호계전기법들이 연구되었다[6-9].

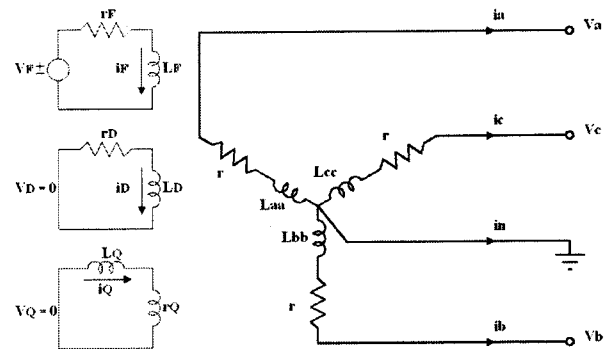
그러나 국내 발전소의 보호제어시스템 설비는 전량 해외로부터 완성인도방식(turn-key)으로 도입되어 운용되고 있는 실정이다. 이에 외산 발전기 보호제어시스템의 최적 운용을 기하고 향후 국산 차세대 디지털 발전소 보호제어 시스템 개발의 토대를 마련하기 위하여 원천기술인 발전기 시스템의 모델링과 과도해석이 선행되어야 한다[10].

본 연구에서는 동기 발전기의 전압방정식으로부터 Park 변환을 이용하여 Machine 방정식을 유도하여 동기 발전기 시스템의 모델링을 수행하였다. 또한, MATLAB을 이용하여 발전기 고정자 권선의 평형 및 불평형 사고 즉, 단락사고 및 지락사고를 모의하여 동기 발전기의 과도현상을 해석하였다[11-13].

2. 동기 발전기의 과도현상 모델링

2.1 동기 발전기 모델링

동기 발전기[11]는 고정자 위에 3개 고정자 권선과 회전자 위에 2개 계자권선으로 구성된다. 또한 회전자에 2개의 가상권선이 추가되는데 이는 댐퍼 권선의 단락회로 경로 모델로 직축(d축)과 횡축(q축)에 있다. 고전적인 해석 방법에서, 이상적인 동기 발전기는 회전자의 각속도에 의존되는 인덕턴스가 자기적으로 결합된 그룹으로 표현된다. 단, 포화는 무시하고 전기자 mmf의 분포는 정현파라고 가정한다. 그림 1은 상호 결합된 회로의 도식도이다.



〈그림 1〉 상호 결합된 회로의 도식도

동기기 단자에서 나가는 방향을 +로 고정자 전류를 가정하면, 전압방정식은 식(1)이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)을 분리하여 다시 표현하면 식(2)가 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$v_{FDQ} = \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i_{FDQ} = \begin{bmatrix} i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad \lambda_{FDQ} = \begin{bmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

쇄교자속은 자기 및 상호 인덕턴스의 함수로서 식(4)로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)를 간단한 형태로 표현하면 식(5)가 된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 Park 변환

소위 two-axis 이론에 근거한 변환에 의하여 전기자 전류 i_a, i_b, i_c 는 3개의 가상 전류 i_d, i_q, i_0 로 대체할 수 있게 된다. 전류에 대한 Park 변환은 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

행렬 형태로는,

$$i_{0dq} = P i_{abc} \quad (7)$$

유사하게 전압과 쇄교자속에 대해서는,

$$v_{0dq} = P v_{abc} \quad (8)$$

$$\lambda_{0dq} = P \lambda_{abc} \quad (9)$$

Park 변환 행렬은 직교로 $P^{-1} = P^T$ 이기 때문에 역 Park 변환 행렬은 식(10)이 된다.

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos\theta & \sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

그러므로 식(9)는, 식(11)과 식(12)가 된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(3)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (13)$$

또는

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (14)$$

P, P^{-1} 대신에 인덕턴스[11]를 대입하면, 식(15)로 간소화된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서, $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$ 이고, 새로운 파라미터를 얻을 수 있다.

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad (16)$$

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \quad (17)$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \quad (18)$$

고정자에 근거한 3상전류 i_a, i_b, i_c 를 회전자 근거한 전류 i_d, i_q, i_0 로 변환하면, 식(19)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (19)$$

또는

$$\begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (20)$$

유사하게 전압에 대해서도

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (21)$$

식(12),(20),(21)를 식(2)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (22)$$

또는,

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (23)$$

식(23)은 식(24)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \left[P \frac{d}{dt} P^{-1} \quad 0 \right] \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$P \frac{d}{dt} P^{-1}$ 에 대한 표현식은 식(25)로 다시 표현 할 수 있다.

$$P \frac{d}{dt} P^{-1} = P \frac{d\Theta}{dt} \frac{d}{d\Theta} P^{-1} = \omega \frac{Pd}{d\Theta} P^{-1} \quad (25)$$

P 를 식(6)에 대입하고, 식(10)로부터 P^{-1} 의 미분을 하면,

$$P \frac{d}{dt} P^{-1} = \frac{2}{3} \omega \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\Theta & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\Theta & \sin(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

식(15)와 식(26)을 식(24)에 대입함으로써 회전자 프레임(dq0)에서의 동기 발전기 방정식을 정리하면 식(27)이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & \omega L_q & 0 & 0 & \omega kM_Q \\ 0 & -\omega L_d & r & -\omega kM_F & -\omega kM_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$- \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (27)$$

2.3 평형 3상 단락 고장회로

일정한 여자전압을 갖는 동기속도로 운전 중인 3상 동기 발전기에 대하여 전기자 권선의 단자에서 3상 단락고장이 발생한 경우, 계자전류 및 3상 전기자 전류의 특성에 대하여 알아본다. 동기기는 초기에 무부하라고 가정하면,

$$i_a(0^+) = i_b(0^+) = i_c(0^+) = 0$$

이 초기 조건으로부터

$$i_0(0^+) = i_d(0^+) = i_q(0^+) = 0$$

계자전류의 초기값은,

$$i_F(0^+) = \frac{V_F}{r_F}$$

동기기의 단자에서의 3상 단락고장에 대하여

$$v_a = v_b = v_c = 0$$

식(8)에 대하여 이 조건은

$$v_0 = v_d = v_q = 0$$

$i_0 = 0$ 이기 때문에, 3상 단락고장시의 회전자 프레임에서의 동기 발전기 방정식은 식(28)이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ 0 \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_Q \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & -\omega kM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (28)$$

상태공간에서의 이 방정식은, 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$v = -Ri - L \frac{d}{dt} i \quad (29)$$

또는,

$$-\frac{d}{dt} i = -L^{-1} Ri - L^{-1} v \quad (30)$$

만약에 속도가 일정하다고 가정하면, 상태공간에서의 방정식은 선형이 되고, 분석 해는 라플라스 변환 기법에 의하여 얻을 수 있다. 그러나 행렬형태의 동기발전기의 비선형 미분방정식은 강력한 시뮬레이션 패키지로 손쉽게 해결할 수 있다. 직축과 횡축으로부터 하나의 해를 얻게 되면, 상전류는 역 Park 변환을 통하여 구할 수 있게 된다.

$$i_{ax} = P^{-1} i_{0dx} \quad (31)$$

식(10)으로부터 $i_{ax} = P^{-1} i_{0dx}$ 대입하면, 상전류는 식(32)가 된다.

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos \theta + i_q \sin \theta \\ i_b &= i_d \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c &= i_d \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

2.4 불평형 고장회로

2.4.1 선간 단락 고장회로

a와 b사이의 단락회로일 경우

$$v_b = v_c = 0$$

이고,

$$i_b = -i_c$$

발전기는 초기에 무부하이므로 a상이 고장회로에 포함되지 않기 때문에 $i_a = 0$

그러므로,

$$i_0 = i_a + i_b + i_c = 0$$

$$\text{식(27)로 부터, 초기조건을 식(7),식(8)에 대입하면,} \\ v_d \sin \theta - v_q \cos \theta = 0 \quad (33)$$

$$i_d = \sqrt{2} i_b \sin \theta \quad (34)$$

$$i_q = \sqrt{2} i_b \cos \theta \quad (35)$$

직축과 횡축의 전류의 미분은 식(36)과 식(37)이 된다.

$$\frac{di_d}{dt} = \sqrt{2} \frac{di_b}{dt} \sin \theta + \sqrt{2} \omega i_b \cos \theta \quad (36)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \sqrt{2} \frac{di_b}{dt} \cos \theta - \sqrt{2} \omega i_b \sin \theta \quad (37)$$

식(34)-(37)을 식(28)에 대입하고, 식(33)을 식(28)에 적용하면, 선간 단락 고장시 회전자 프레임에서의 동기 발전기 방정식은 식(38)이 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \\ - \begin{bmatrix} \sqrt{2} k \omega M_F \cos \theta & r_F & 0 & 0 \\ \sqrt{2} \omega M_D \cos \theta & r_D & 0 & 0 \\ \sqrt{2} k \omega M_Q \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{2} (r + \omega (L_d - L_q)) \sin 2\theta & k \omega M_F \cos \theta & k \omega M_D \cos \theta & k \omega M_Q \sin \theta \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} i_b \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} \sqrt{2} k \omega M_F \sin \theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2} \omega M_D \sin \theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2} k \omega M_D \sin \theta & M_R & L_D & 0 \\ \sqrt{2} (L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) & k M_F \sin \theta & k M_D \sin \theta & -k \omega M_Q \cos \theta \end{bmatrix} &\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_b \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (38)$$

2.4.2 1선 지락 고장회로

a상과 대지사이에 1선 지락 고장회로일 경우

$$v_a = 0 \text{ 이고,}$$

초기에 무부하이므로,

$$i_b = i_c = 0$$

1선 지락 고장에 대한 전압 방정식은 3상 영역에서의 동기기 전압 방정식(1)에서 유도하면 된다. 고장 조건을 적용하고 dq0 리액턴스로 인덕턴스를 표현하면, 식(39)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \\ - \begin{bmatrix} r - 2\omega L_m \sin 2\theta & -\omega M_F \sin \theta & -\omega M_D \sin \theta & \omega M_Q \cos \theta \\ -\omega M_F \sin \theta & r_F & 0 & 0 \\ -\omega M_D \sin \theta & 0 & r_D & 0 \\ \omega M_Q \cos \theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & M_F \cos \theta & M_D \cos \theta & M_Q \cos \theta \\ M_F \cos \theta & L_F & M_R & 0 \\ M_D \cos \theta & M_R & L_D & 0 \\ M_Q \sin \theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} &\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (39)$$

여기서,

$$L_s = \frac{1}{3} (L_0 + L_d + L_q) \quad (40)$$

$$L_m = \frac{1}{3} (L_d - L_q) \quad (41)$$

3. 사례연구

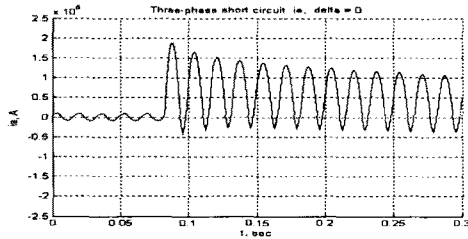
사례연구에 사용된 발전기 정격은 3상 500[MVA], 30[kV], 60[Hz]이다. 시뮬레이션 조건은 400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 고장이 발생한 경우로 국한 하였다. 발전기 정수는 표 1과 같다.

〈표 1〉 발전기 정수

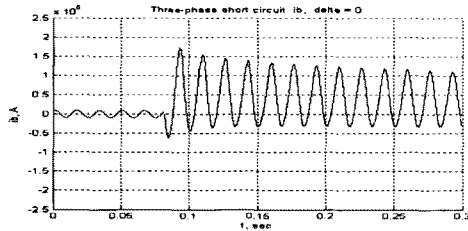
L_d [H]	0.0071	L_q [H]	0.0070	L_F [H]	2.500
L_D [H]	0.0068	L_Q [H]	0.0016	M_F [H]	0.100
M_D [H]	0.0054	M_Q [H]	0.0026	M_R [H]	0.125
r [Ω]	0.0020	r_F [Ω]	0.4000	r_D [Ω]	0.015
r_Q [Ω]	0.0150	L_0 [H]	0.0010		

3.1 평형 3상 단락 고장

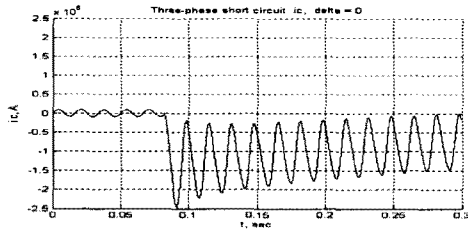
400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 3상 단락고장이 발생한 경우이다. 그림 2는 3상 단락고장시의 전류신호이다. 정상상태에서는 9.62[kA]의 전류가 흐르나, 고장직후에는 그 발생 위상각에 따라 직류웁셋이 함유된 큰 고장 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 정상상태에서의 계자전류는 1000[A]로 흐르다가 고장직후에는 동요하며 증가하는 것을 알 수 있다. 고장발생후의 영상전류를 계산하여 그 값이 0이 됨으로 평형고장임을 확인할 수 있었다.



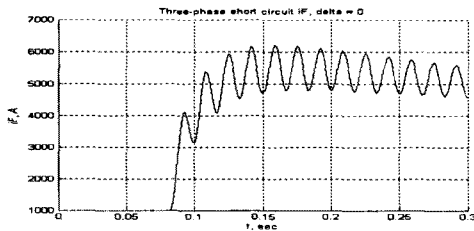
(a) Ia



(b) Ib



(c) Ic

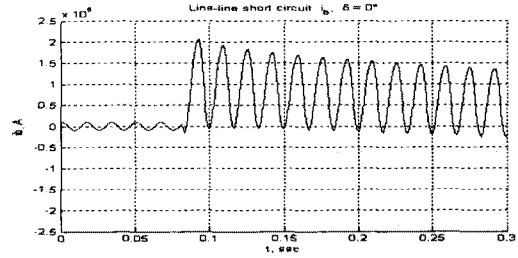


(d) IF

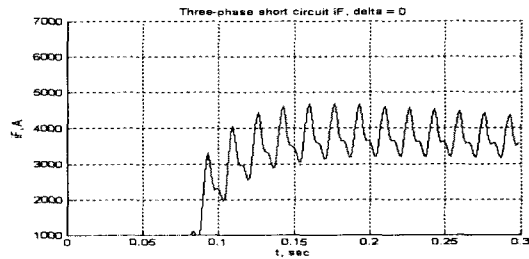
〈그림 2〉 3상 단락 고장시의 전류신호

3.2 2선 단락 고장

400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 전기자 단자에서 b상과 c상 사이에 단락고장이 발생한 경우이다. 그림 3은 2선 단락고장시의 b상 전류 및 계자전류 신호이다. 이때의 고장전류는 3상 단락고장에 비교하여 그 값이 다소 적을 것을 알 수 있다. 2선 단락고장시의 계자전류도 역시 3상 단락고장에 비하여 적은 것을 알 수 있다. 한편 a상 전류는 b상 전류의 부호가 반대이며 동일한 값이 흐르게 된다.



(a) Ib

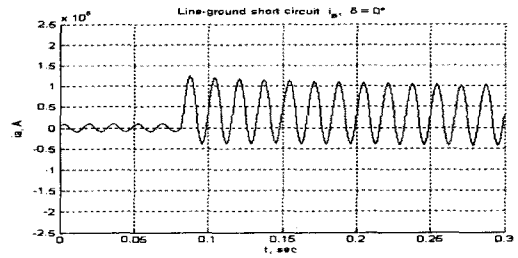


(b) IF

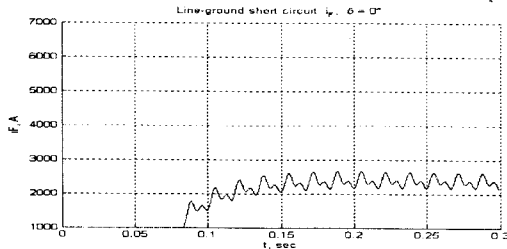
〈그림 3〉 2선 단락 고장시의 전류신호

3.3 1선 지락 고장

400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 전기자 단자에서 a상 지락고장이 발생한 경우이다. 그림 4는 1선 지락 고장시의 a상 전류와 계자전류 신호이다. 이때 지락 고장 전류와 계자전류는, 3상 단락고장 및 선간 단락고장시에 비교하여 그 크기가 가장 적은 것을 알 수 있다.



(a) Ia



(b) IF

<그림 4> 1선 지락 고장시의 전류신호

4. 결 론

본 논문에서는 동기 발전기의 고정자 권선 고장시의 과도상태를 모의하기 위하여 여러 가지 고장시의 전압방정식을 유도하였다. 또한 선정된 발전기의 정수를 활용, MATLAB을 이용하여 평형 및 불평형 고장에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 사례연구를 통한 3상 단락, 선간단락 및 1선 지락고장시의 고장전류에 대하여 과도특성을 살펴보았다. 이들은 향후 동기 발전기의 상세 모델링 및 보호 계전시에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업 연구개발 사업 전력 선형연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. L. Blackburn, "Applied Protective Relaying", Westinghouse Electric Corporation, pp. 6-1-6-18, 1979.
- [2] IEEE Tutorial Course, "Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication", Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, pp. 1-81, 1997.
- [3] D. Bi, X. Wang, W. Wang, Z. O. Zhu, and Howe, "Improved transient simulation of salient-pole synchronous generators with internal and ground faults in stator winding", IEEE Trans. Energy Conversion vol. 20, no. 1, pp. 128-134, Mar. 2005.
- [4] Working Group 16 Report of Rotating Machinery Protection, Power System Relaying Committee, "Performance of generator protection during major system disturbances", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, pp. 1650-1662, Oct. 2004.
- [5] Wang Xiangheng, Wang Weujuan, Wang Shanming, "Research on internal faults of generators and their protection schemes in Three Gorges Hydro Power Station" Power Engineering Society Winter Meeting, 2000 IEEE Volume 3, pp. 1883-1887, 23-27 Jan. 2000.
- [6] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-1995.
- [7] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for Generator Ground Protection(C37.101- 1993)

- [8] N.L. Tai and O. Ai, "Protection technique based on delta-zero sequence voltages for generator stator ground fault", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 5, pp.651-657. Sep., 2004.
- [9] O. Ozgonenel, E. Arisoy, M.A.S.K Khan, M.A. Rahman, "A Wavelet Power Based Algorithm For Synchronous Generator Protection", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting July 2006, pp. 128-134.
- [10] 박철원, 이상성 외, "대용량 발전기 보호를 위한 발전기 모델링", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A) pp. 128-131 July 2006
- [11] Hadi Saadat, "Power System Analysis", WCB/Mc Graw-Hill, pp. 314-335, 1999.
- [12] ATP Short Course Text, Minneapolis Minnesota 1990.
- [13] Manitoba HVDC Research Centre Inc., "EMTDC Transient Analysis For PSCAD Power System Simulation", pp. 97-113, 2004.