

동기 발전기의 평형 및 불평형 고장해석

*박철원, **안준영, **이종수, ***이상성, **신명철
*원주대학, **성균관대학교, ***기초전력연구원

Balanced and Unbalanced Fault Analysis of Synchronous Generator

*WonJu National College, **SungKyunKwan University, ***KESRI

Abstract - In this paper, we simulated transient-state under fault in stator windings of synchronous generator. The fault types are line to ground fault, line to line short fault, and three phase short fault. For fault analysis of generator system, the voltage equation of a synchronous machine using the two-axis theory was used. It can be used to analyze important features of faults and to develop protection methods.

1. 서 론

발전기를 포함한 발전소 설비는 양질의 전력을 공급함과 동시에 인근 계통과 부하 평형을 잘 유지하도록 운전해야 한다. 전력설비 중 발전기의 고장은 전력의 수급에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 특히 발전기 내부 사고나 인근 모선의 사고는 전력계통 운영에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 이중 발전기의 내부고장은 발전기의 설계와 재질을 향상시키므로써 사고의 빈도를 줄일 수 있으나 여전히 사고는 발생하고 있으며 그 결과로 막대한 손해와 장시간의 운전정지를 초래할 수 있다. 이런 관점에서 보면 발전기 보호는 중요한 부분이라 할 수 있다[1~4]. 우리나라 발전소의 보호제어시스템 설비는 전량 해외로부터 완성인도방식(turn-key)으로 도입되어 운용되고 있는 실정이다. 이런 설비들의 국산화를 위하여 발전기 시스템의 모델링과 과도해석은 외산 발전기 보호제어시스템의 최적 운용을 기하고 향후 국산 차세대 디지털 발전소 보호제어시스템 개발의 토대를 마련하기 위하여 원천기술을 확보하는데 선행되어야 한다[5].

본 연구에서는 동기 발전기의 전압방정식으로부터 Park 변환을 이용하여 Machine 방정식을 유도하여 동기 발전기 시스템의 모델링을 수행하였다[6,7]. 또한 MATLAB를 이용하여 발전기 고장자 권선의 평형 및 불평형 사고 즉 단락사고 및 지락사고를 모의하였으며, 이후 DFT 필터를 이용하여 동기 발전기의 과도현상을 해석하였다.

2. 동기 발전기의 모델링 및 수식화

2.1 동기 발전기의 모델링

동기 발전기는 고정자 위에 3개 고정자 권선과 회전자 위에 2개 계자권선으로 구성되어 있다. 또한 회전자에 2개의 가상권선이 추가되는데 이는 덤퍼 권선으로 단락회로 경로 모델로 직축(d축)과 횡축(q축)으로 되어있다. 고전적인 해석 방법에서 이상적인 동기 발전기는 회전자의 각속도와 관련되어 있는 인덕턴스가 자기적으로 결합된 그룹으로 표현할 수 있다. 단, 포화는 무시하고 전기자 mmf의 분포는 정현파라고 가정한다. 그림 1은 상호 결합된 회로도이다.

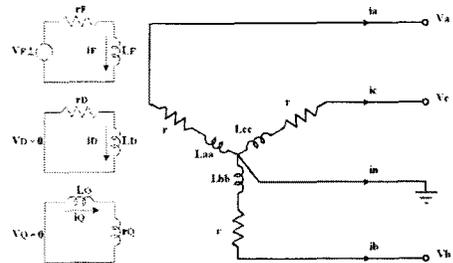


그림 1. 상호 결합된 회로도

그림 1로부터 전압방정식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

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

채고 자속은 자기 및 상호 인덕턴스 함수로 구하는데 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 이용하여 2상(Park) 변환에 따른 동기 발전기의 전압방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \\ -v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & \omega L_d & 0 & 0 & \omega kM_Q \\ 0 & -\omega L_d & r & -\omega kM_F & -\omega kM_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_f & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)을 다시 표현하면 식(4)와 식(5)가 된다.

$$V = -Ri - L \frac{d}{dt} i \quad (4)$$

또는

$$\frac{d}{dt} i = -L^{-1} Ri - L^{-1} V \quad (5)$$

그림 2는 Park변환을 이용한 동기 발전기의 모델링에 대한 흐름도이다.

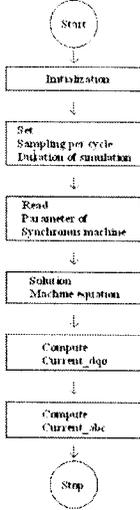


그림 2. 동기 발전기의 모델링 흐름도

2.2 평형 3상 단락고장 회로의 모델링

3상 단락사고 시의 동기 발전기 전압방정식은 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ -v_F \\ 0 \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_Q \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & -\omega kM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 불평형 고장회로의 모델링

2.3.1 2선 단락사고

BC상 단락사고 시의 동기 발전기 방정식은 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sqrt{2}k\omega M_F \cos\theta & r_F & 0 & 0 \\ \sqrt{2}\omega M_D \cos\theta & r_D & 0 & 0 \\ \sqrt{2}\omega M_Q \sin\theta & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{2}(r + \omega(L_d - L_q)) \sin 2\theta & k\omega M_F \cos\theta & k\omega M_D \cos\theta & k\omega M_Q \sin\theta \\ \sqrt{2}k\omega M_F \sin\theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2}\omega M_D \sin\theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2}k\omega M_Q \sin\theta & M_R & L_D & 0 \\ \sqrt{2}(L_q \sin^2\theta + L_q \cos^2\theta) & kM_F \sin\theta & kM_D \sin\theta & -k\omega M_Q \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_b \\ i_F \\ i_D \\ i_c \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3.1 A상 지락사고

A상 지락사고 시의 동기 발전기 전압방정식은 식(8)과

같다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r - 2\omega L_m \sin 2\theta & -\omega M_F \sin\theta & -\omega M_D \sin\theta & \omega M_Q \cos\theta \\ -\omega M_F \sin\theta & r_F & 0 & 0 \\ -\omega M_D \sin\theta & 0 & r_D & 0 \\ \omega M_Q \cos\theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_r + L_m \cos 2\theta & M_F \cos\theta & M_D \cos\theta & M_Q \cos\theta \\ M_F \cos\theta & L_F & M_R & 0 \\ M_D \cos\theta & M_R & L_D & 0 \\ M_Q \sin\theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. 사례연구

3.1 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 3상 500[MVA], 30[kV], 60[Hz]의 정격인 발전기가 사용되었다. 시뮬레이션 조건은 400[V] 여자전압으로 무부하 운전 중에 고장이 발생한 경우로 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 []	0.0020	r_F []	0.4000	r_D []	0.015
r_Q []	0.0150	L_Q [H]	0.0010		

3.2 고장전류 분석

그림 3은 식(6)을 사용하여 MATLAB으로 3상 단락사고 모델링을 모의한 결과이다. 사고 발생위상각은 a상 기준으로 0도이다. 고장발생시점은 정상상태의 5주기로 60번째 샘플인 0.08333[sec]이다. 정상상태에서 정격전류인 9.62[kA]의 전류가 흐르나 고장직후에는 그 발생 위상각에 따라 각 상별로 다르게 직류 옵셋이 포함된 큰 고장전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 정상상태에서의 계자전류는 1000[A]로 흐르다가 고장직후에는 동요하면서 증가하는 것을 알 수 있다. 고장발생전후의 영상전류를 계산해보면 고장발생 직후에도 그 값이 0으로 평형임을 알 수 있다.

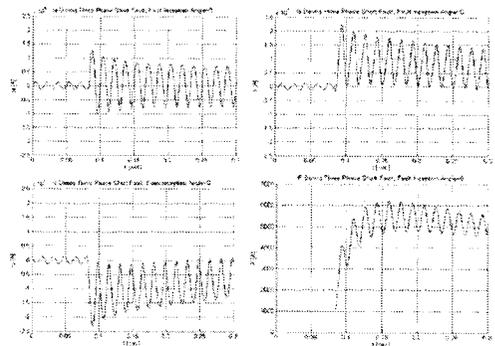


그림 3. 3상 단락사고시 시뮬레이션 결과

그림 4는 식(7)을 사용하여 MATLAB으로 2선 단락사고 모델링을 모의한 결과파형이다. b상 전류와 c상 전류는 그 부호가 다르며, 절대치는 동일한 것을 확인할 수 있다.

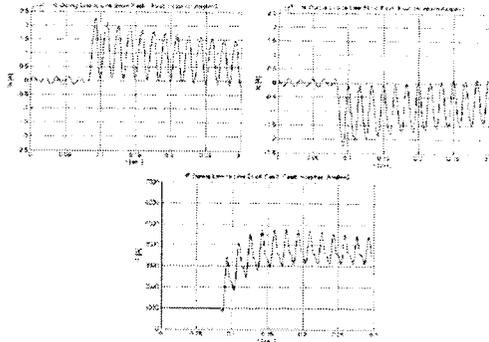


그림 4. 2선 단락사고시 시뮬레이션 결과

그림 5는 식(8)을 사용하여 MATLAB으로 a상 1선 지락사고를 모델링하여 모의한 파형이다. 이때 지락 고장 전류와 계자전류는, 3상 단락고장 및 선간 단락고장 시와 비교하여 그 크기가 가장 작은 것을 알 수 있다.

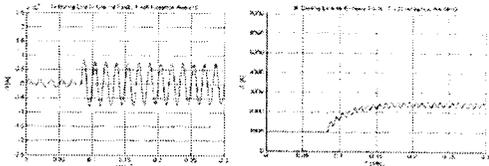


그림 5. 1선 지락사고시 시뮬레이션 결과

3.3 DFT 필터에 의한 과도해석

그림 6은 3상 단락고장 시 DFT를 이용한 전류파형의 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율이다. 고장 발생 직후 과도상태로 기본파에 대한 제2고조파의 비율은 동요를 하지만, 약 1.25주기의 이동원도우 이후에는 약 30%정도를 지속적으로 함유하는 것을 알 수 있다. 또한 기본파에 대한 제3고조파의 비율은 고장발생 직후 동요하다가 약 1.25주기의 이동원도우 이후에는 매우 작은 값으로 감소하는 것을 알 수 있다.

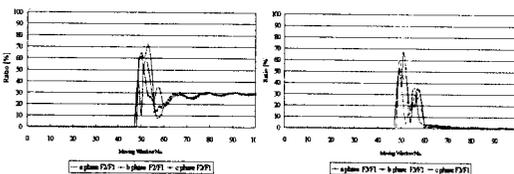


그림 6. 3상 단락사고 시 DFT 필터에 의한 전류의 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율

그림 7은 2선 단락고장 시 DFT를 이용한 전류파형으로 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율이다. 고장 발생 직후 과도상태로 기본파에 대한 제2고조파의 비율은 동요를 하지만, 고장발생 직후 약 1.25주기의 이동원도우 동안 이후에는 약 25%정도를 함유하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 기본파에 대한 제3고조파의 비율은 고장발생 직후 동요하다가 약 1.25주기의 이동원도우 이후에는 약 10%정도 함유하는 것을 알 수 있다.

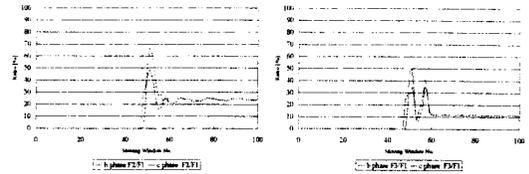


그림 7. 선간 단락사고 시 DFT 필터에 의한 전류의 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율

그림 8은 1선 지락고장 시 DFT를 이용한 전류파형으로 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율이다. 고장 발생 직후 과도상태로 기본파에 대한 제2고조파의 비율은 동요를 하지만, 고장발생 직후 약 1.25주기의 이동원도우 이후에는 매우 작은 값으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 기본파에 대한 제3고조파의 비율은 고장발생 직후 동요하다가 약 1.25주기의 이동원도우 이후에는 약 7-8%정도를 함유하는 것을 알 수 있다.

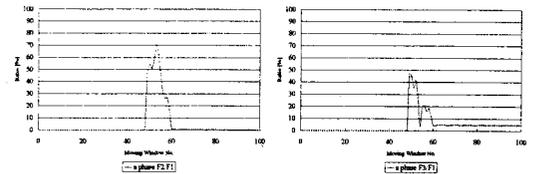


그림 8. 1선 지락사고 시 DFT 필터에 의한 전류의 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 비율

4. 결 론

본 논문은 발전기의 고정자 권선에 대하여 지락과 단락사고 시의 과도상태를 모의하였다. 이를 위하여 동기발전기 방정식을 각 사교별로 유도하였으며, MATLAB을 통하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 고장전류의 과도해석을 위하여 각 고장유형에 대하여 DFT 필터에 의하여 특정 주파수를 추출한 후, 기본파에 대한 제2고조파 및 제3고조파의 함유 비율 변화에 대하여 살펴보았다. 향후 연구에서는 직류 셋셋 여부에 대한 분석도 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 한국전력공사, "원자력발전소 표준화설계를 위한 조사용역", pp. 83-269, 1999.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for AC Generator Protection", IEEE Std. C37.102-1995.
- [4] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Guide for Generator Ground Protection", IEEE Std. C37.101-1993.
- [5] 박철원, 이상성 외, "대용량 발전기 보호를 위한 발전기 모델링", 대한전기학회 학계학술대회 논문집(A) pp. 128-131 July, 2006.
- [6] Hadi Saadat, "Power System Analysis", WCB/McGraw-Hill, pp. 314-335, 1999.
- [7] Manitoba HVDC Research Centre Inc., "EMTDC Transient Analysis For PSCAD Power System Simulation", pp. 97-113, 2004.

감사의 글

* 본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선형연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.