

MATLAB-SIMULINK를 이용한 동기발전기 과도-차과도 특성 모델링

이 강, 조종민, 김지찬, 차한주
 충남대학교 전기공학과

Transient-Sub transient Characteristic Modeling of Synchronous Generator using MATLAB-SIMULINK

Gang Lee, Jongmin Jo, Jichan Kim, Hanju Cha
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 3상 동기발전기의 과도 특성을 분석하기 위해 MATLAB/ SIMULINK를 이용하여 모델링하였으며 동기발전기 출력단의 개방 및 3상 단락 회로 조건에 따른 특성곡선을 분석하였다. 정상상태, 과도상태 및 차과도상태 구간에서 고정자 권선, 회전자 권선 및 댐퍼 권선 등이 갖는 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스 특성 관계와 자속 변화특성 등을 수학적 모델 기반의 소신호 모델링을 통해 3상 동기발전기를 등가적으로 모델링하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 값에 의해 과도상태와 차과도상태의 모터 데이터를 분석하고 단락상태의 시간 상수를 계산하여, 동기발전기의 3상 단락 조건에서 초기 과도 및 과도상태의 특성을 검증하였다. 최종적으로, 이론적 공식에 의해 계산된 동기발전기의 파라미터는 시뮬레이션 결과와 일치하며 오차는 2% 범위 내에 있다.

1. 서 론

단락 오류는 전원 오류에서 더 심각하고 일반적인 오류이다. 단락 서지 전류는 종종 정격 전류의 몇 배 이상이다. 서지 전류는 도체를 손상시키고, 장비를 태우고, 그리드 작동의 안정성에 영향을 미치며, 심한 경우 그리드가 붕괴될 수 있다. 전력 시스템에서 3상 단락이 발생할 확률은 최소이지만 이러한 결과의 결과는 종종 가장 심각하다. 따라서 이 단락 오류에 주의를 기울여야 한다. 동기발전기의 작동 특성에 따라 전력 시스템의 작동 상태가 결정된다. 전력 시스템의 과도 과정을 더 잘 연구하려면 동기발전기의 과도 과정을 연구해야 합니다. 발전기 단락에 대한 과도 과정을 연구하면 터빈의 안전성과 안정성을 위해보다 합리적인 설계를 제공할 수 있으며 터빈과 관련된 전기 장비 선택, 릴레이 보호 및 자동 제어 매개 변수에 대한 신뢰할 수 있는 기반을 제공할 수 있다^[1].

2. 동기발전기 표준 파라미터

동기발전기의 3상 단락조건에서 고정자 회로와 여자 회로에는 과도 성분과 초기 과도 성분으로 구분할 수 있다. X'_d 는 과도 상태에서 발전기 리액턴스를, X''_d 는 초기 과도 상태의 리액턴스를 의미하며 식 (1), (2)와 같으며, 본 논문에서는 단위 값 (p.u)을 기준으로 한다. 발전기 파라미터가 $X_l = 0.07$, $X_{ad} = 2.25$, $X_{fd} = 0.2092$, $X_{fd} = 0.6524$ 일 때, 식 (1), (2)로부터 과도 리액턴스와 초기 과도 리액턴스는 $X'_d = 0.26$, $X''_d = 0.21$ 와 같이 계산될 수 있다.

$$X'_d = X_l + \frac{X_{ad}X_{fd}}{X_{ad} + X_{fd}} \quad (1)$$

$$X''_d = X_l + \frac{X_{ad}X_{fd}X_{ld}}{X_{ad}X_{fd} + X_{fd}X_{ld} + X_{ad}X_{ld}} \quad (2)$$

동기발전기의 3상 단락 발생 시 초기 과도상태, 과도상태, 정상상태의 3가지 영역이 존재한다. 단락 순간에는 감쇠속도가 매우 빠른 초기 과도상태가 발생한다. 이후, 초기 과도 성분의 감쇠보다 느린 과도 상태 영역이 존재하고 이후 정상상태 조건이 된다. 과도 성분과 초기 과도 성분의 감쇠 시간 상수는 T'_d , T''_d 이다. 시간 상수의 계산 공식은 식(3), (4)와 같다^[1].

$$T'_d = \frac{1}{R_{fd}} \left(X_{fd} + \frac{X_{ad}X_l}{X_{ad} + X_l} \right) \quad (3)$$

$$T''_d = \frac{1}{R_{ld}} \left(X_{ld} + \frac{X_{fd}X_{ad}X_l}{X_{fd}X_{ad} + X_{ad}X_l + X_{fd}X_l} \right) \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 대입하고 $T'_d=0.047$, $T''_d=0.0091$ 을 얻을 수 있다. X_l : 누출, X_{ad} : d 축 상호리액턴스 X_{fd} : 여자리액턴스 X_{ld} : d 축 댐퍼 리액턴스. 단락 후에 회로의 플럭스 링키지 ($\Delta\Psi_{fd}$, $\Delta\Psi_{ld}$)가 0으로 증가하므로 그림 1과 같이 등가 회로를 그릴 수 있습니다.

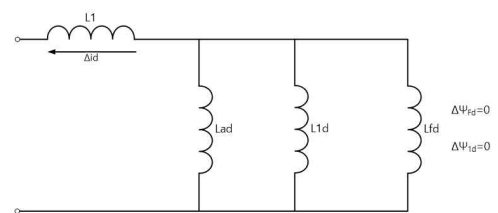


그림 1 단락 후의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit after short circuit
 파라미터를 통해 동기발전기의 특성을 결정할 수 있다.

3. 동기발전기 모델링 및 검증

본 시뮬레이션 이용한 발전기는 60HZ, 460V, 100KVA 동기발전기이다. 그림 2는 동기발전기는 정격 속도와 정격여자전압으로 공급된다. 동기발전기의 3상 단자는 차단기의 3상 커넥터에 연결된다. 차단기는 0.1초 이전에 스위치 먼저 열리므로 동기발전기가 무부하 상태에서 작동하고 0.1초 이후에 스위치가 닫히므로 동기발전기가 단락 상태가 되고 단락 전류 파형이 스코프에 의해 기록된다.

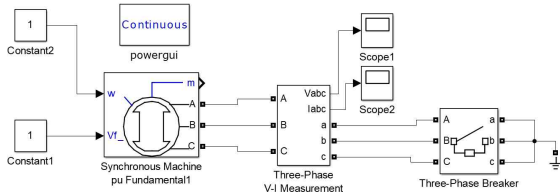


그림 2 3상 단락의 회로 구조
Figure 2 Circuit structure of three-phase short circuit

그림 3은 3상 단락이 발생할 때의 전압과 전류이다.

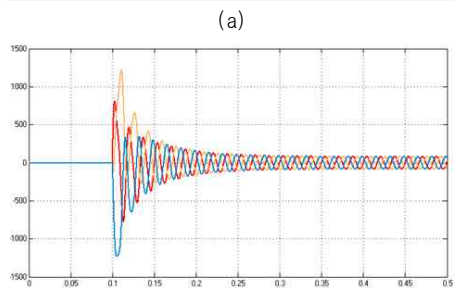
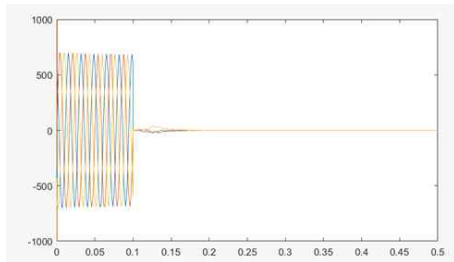


그림 3 3상 전류 및 전압
Fig. 3 Three-Phase Current and Voltage

그림 3의 (a)는 3상 전압이고 (b)는 3상 전류이다. 동기 발전기는 0.1초에 단락이 발생한다. 전압은 정격전압을 유지하다가 단락 발생 이후 0V로 떨어지고, 전류는 0A에서 단락 발생 이후 과도 상태 들어간다.

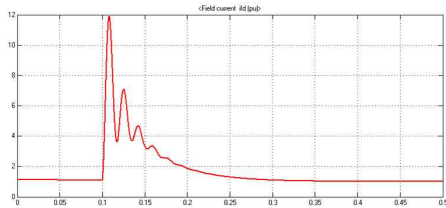


그림 4 여자 전류
Figure 4 Excitation Current

여자 전류는 0.1초 이전에 정격전류이고 0.1초 이후에 단락 시작한다. 0.35초에 정격전류로 떨어진다.

4. 동기발전기 표준 파라미터 분석

3상 단락 전류의 각 위상의 피크 값을 기록하고(예 a상), ((최대 값 - 최소 값) / 2 - 0.47) 의 값을 y축 로그 스케일로 하여 3상 AC 단락 전류 변화 곡선 a를 만든다. 곡선 A의 변곡점에서 선A를 단락 지점까지 연장하여 얻은 값 A는 과도 성분이다. 둘의 차이는 초기 과도 성분 곡선 1이다^[2].

동기 발전기의 과도 리액턴스와 초기 과도 리액턴스의 방정식은 각각 식 (5)와 같다.

$$X'_d = \frac{E}{I} \quad X''_d = \frac{E}{I'} \quad (5)$$

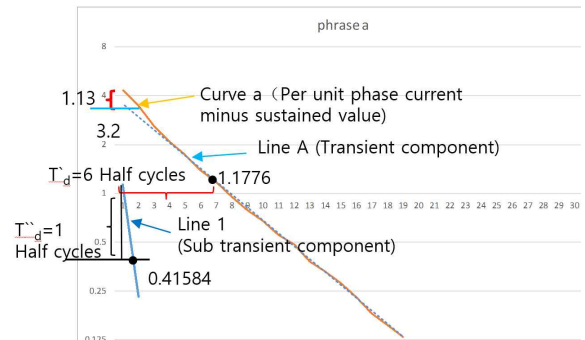


그림 5 단락 회로 전류의 AC 성분

E 는 정격 주파수에서 3상 단락 이전 평균 p.u 전압, I 는 단락 전류의 과도 p.u 성분과 정상 p.u 성분의 합. I' 는 단락 전류의 초기 p.u AC성분이다.

표 1 과도 및 초기 과도 리액턴스 선정

Table 1 Selection of transient and initial transient reactances.

과라미터	a상	b상	c상	평균
① Initial voltage	-	-	-	1
② Steady-state current	0.47	0.47	0.47	-
③ Initial transient component	3.2	3.2	3.6	-
④ Transient current → $I' = ② - ③$	3.67	3.67	4.07	3.8
⑤ Transient reactance → $X'_d = ① / ④$	-	-	-	0.26
⑥ Initial sub-transient Component	1.13	0.88	1.155	-
⑦ Sub-transient current → $I'' = ④ + ⑥$	4.8	4.55	5.225	4.8
⑧ Sub-transient reactance → $X''_d = ① / ⑦$	-	-	-	0.205
⑨ Transient time constant → $\tau'_d = 1/60 * (N/2)$ (s)	0.05	0.048	0.041	0.046
⑩ Sub-transient time constant → $\tau''_d = 1/60 * (N/2)$ (s)	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083

과도 시간 상수는 표 1에서 구한 값을 통해 단락 전류의 과도 p.u성분과 정상 pu성분의 합이 초기 값의 0.368배 까지 감소하는데 그림4 같이 걸리는 시간으로 구할 수 있다. 초기 과도 시간 상수는 단락 전류의 초기 pu AC성분치음부터 0.368배 까자 감소시간이다^[2].

5. 결론

이론적으로 발전기를 단락시킨 후 일련의 물리적 과정과 단락 전류의 성분 변화를 분석하고, 분석 후 시뮬레이션 결과와 이론적 결과가 일치하며 과도 상태를 분석하여 발전기의 전체 설계 및 최적 작동을 위한 분석 기반을 제공한다.

참고 문헌

- [1] Power System Stability and Control Kundur, 1994.
- [2] IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part 2 Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis, 2010