선박용 동기발전기 시스템의 동적 시뮬레이션

조현철*, 이현석**, 허만진***, 오상태***, 안정학*** 울산과학대학교 전기전자공학부 부교수*, 울산과학대학교 연구원**, 가우스엔지니어링***

Dynamic Simulation of Synchronous Generator Systems for Ships

Hyun Cheol Cho*, Hyun Seok Lee**, Man Jin Heo***, Sang Tae Oh***, Jeong Hak Ahn*** Associate Professor*, Researcher**, Dept of Electrical Eng., Ulsan College, Gauss Engineering Corp.***

Abstract - Prior to constructing real-time electric power systems in industry fields, a numerical study is generally carried out for demonstrating its reliability by using professional simulation tools. This paper presents a dynamic simulation for synchronous generator systems including excitor and governor systems in ships via the ETAP software. Moreover, we accomplish numerical studies for its dynamics and stability through simulation results applying generic disturbances in practice to constructed electric power systems in shins

1. 서 로

선박의 동기 발전기 시스템은 사전에 해석적 방법론이나 컴퓨터 시뮬 레이션과 같은 모의실험을 통해 그 동특성을 충분히 검토한 후 산업현 장에 실제로 설치가 이루어진다. 따라서 ETAP이나 PTW와 같은 전력 계통 전문 소프트웨어를 통해 이러한 특성 분석이 이루어지고 있다. 하 지만 이러한 시뮬레이션 도구들은 가격이 비싸고 일반적인 기술자 또는 공학자들이 사용하기가 매우 어렵고 적용하기 위하여 시간적 경제적 여 건이 많이 들고 있다. 이러한 어려운 점을 해결하기 위하여 본 논문은 동기발전기 시스템의 시뮬레이터 개발을 목표로 하여 그 첫 단계로서 선박용 동기발전기 시스템의 시뮬레이션을 실시하여 동특성을 분석하였 다. 선박용 동기발전기 시스템의 경우 주로 선박의 디젤엔진을 원동기로 사용하고 여자기 및 조속기를 일반적으로 구성하고 있다[1]. 따라서 이 러한 3가지 장치에 대한 특성을 포함하는 모의실험을 요구하고 있다. 본 논문은 일반적으로 구성할 수 있는 동기기, 여자기, 조속기 시스템의 조 합적인 구성에 대하여 ETAP을 통해 모의실험을 실시하고 산업현장에 서 발생할 수 있는 전력계통형 외란에 대한 시스템 응답을 출력하고 특 성을 분석하였다.

2. 선박용 동기 발전기 시스템

선박용 동기 발전기 시스템은 여자기와 조속기를 포함하고 있으며 여 자는 동기기의 계자전류를 제공하는 장치이며 조속기는 동기기의 회전 속도를 조절함으로서 발전기 출력을 제어하는 장치이다. 일반적으로 동 기기의 입력 변수로는 여자기의 직류전압과 조속기의 출력 토크를 포함 하고 있으며 상태 공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$
 (1)

여기서 각 벡터 $x \in R^3$, $u \in R^2$ 및 행렬 변수 $A \in R^{3 \times 3}$, $B \in R^{2 \times 3}$ 는 다 음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \tilde{E} & \omega & \delta \end{bmatrix}^T, \ u &= \begin{bmatrix} E & T \end{bmatrix}^T \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 \tau_d} & 0 & -\frac{K_4}{\tau_d} \\ -\frac{K_2}{\tau_j} & 0 & -\frac{K_1}{\tau_j} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_d} & 0 \\ 0 & \tau_j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 *E*는 발전기의 출력전압(실효치), ω는 발전기의 회전속도, *E*는 여자기로부터의 입력전압, T는 조속기로부터의 토크 변수를 각각 나타 낸다. 그 외의 파라미터들에 대한 정의는 참고문헌 [2]에서 제공하는 수 식을 그대로 이용하였다.

3. 여자기(Excitor) 시스템 모델링

본 논문에서 고려하는 여자 제어 시스템은 IEEE Type AC8B 모델을 적용한다. 이러한 시스템 모델은 그림 1과 같은 블록선도로 표현된다. 그림 1에 표시된 파라미터들은 다음과 같다.

- VR_{max}, VR_{min}: 레귤레이터의 최대 및 최소 출력 전압
 SE_{max}: 조속기의 포화(saturation) 출력 값

- *S_E*(•) : 조속기 시스템 함수
- Efmax : 조속기의 최대 출력 전압
- K_P, K_b, K_D: 비례, 적분, 미분 제어 파라미터
- K_A : 레귤레이터 파라미터
- K_E : 조속기의 자여자(self-excitation) 상수
- *T_D* : 미분 제어 시간
- T_A : 레귤레이터 증폭기의 시정수(time constant) •
- T_F : 여자기의 시정수



<그림 1> IEEE AC8B 여자 시스템 모델의 블록선도 <Fig. 1> A block diagram of the IEEE AC8B excitor system

4. 조속기(Governor) 시스템 모델링

본 논문에서 고려한 동기발전기 시스템에 적용한 조속기 시스템은 디 젤 터빈 시스템을 원동기로 사용하고 부하 분담 기능을 포함하고 있는 Woodward 2301 모델을 이용하였으며 그림 2와 같은 블록선도로 주어 진다. 마찬가지로 그림 2의 파라미터에 대한 정보는 참고문헌 [2]에 포 함되어 있다.



<그림 2> Woodward 2301 조속기 시스템 모델의 블록선도 <Fig. 2> A block diagram of the Woodward 2301 governor system

5. 컴퓨터 시뮬레이션

앞서 언급한 동기발전기와 여자기 및 조속기 시스템에 대하여 ETAP 를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였으며 그 특성을 분석하였다. 이 시뮬 레이션에 적용한 동기 발전기 시스템에 대한 주요 파라미터들은 표 1과 같다. 그림 3은 73MW의 부하에 운전 중인 동기발전기가 13.8kV의 주 배전반에 있는 전동기 시스템의 동작으로 인하여 13.5MW로 trip이 된 경우의 시스템 응답들을 보여준다. 이 결과로부터, trip이 발생한 5초 이 후에 일시적인 과도응답(transient response) 상태가 발생하며 발전기 출 력 전압 및 속도(rpm)의 경우는 약 9초 부근에서 정상상태(steady state)에 도달하는 것을 볼 수 있다. 한편 부하각의 경우는 trip이 발생 한 이후로 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 16MVA급의 변압기에 접속되어 있는 13.8kV의 차단기가 동 작하였을 때 시스템 응답특성을 보여준다. 그림 3과 유사하게 발전기 출 력 전압 및 속도는 trip이 발생한 이후 마찬가지로 과도응답 특성을 보 이고 있으며 출력의 경우 약 10초 부근에서 정상상태로 도달하는 것을 볼 수 있으나 그 후에 약간의 리플현상이 발생하는 것을 관측할 수 있 다. 한편 이 경우 속도는 약 7초 부근에서 안정한 정상상태 응답특성을 보여주고 있으며 부하각은 마찬가지로 지속적으로 증가하는 형태를 갖 는다.

다음으로, 그림 4의 경우와 유사한 환경이지만 단지 6.6kV의 변압기 한 대가 9.2MW의 부하에 접속된 상태에서 발전기 시스템 응답특성을 시뮬레이션을 하였으며 결과 파형은 그림 5와 같다. 여기서 5초 이후에 과도응답이 발생하며 발전기 출력 전압은 약 8초, 회전 속도는 약 9초 부근에서 정상상태로 도달하는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, 690V의 배 전반에 진입하는 3상 전력 케이블에 고장(fault)이 발생한 경우를 시뮬 레이션을 실시하였다. 이러한 시뮬레이션 시나리오는 전력 공급 케이블 에 있는 퓨즈(fuse)의 melt로 인하여 3상 회로가 단락이 된 경우로 간주 할 수 있다. 그림 5는 이러한 시나리오 환경에 따른 발전기 시스템의 응 답 특성 파형을 보여준다. 우선 발전기의 출력 전압의 경우 5초 이후에 과도응답 상태를 보이고 곧 바로 전압의 크기가 다소 감소한 정상상태 이후로 다소 증가하여 정상상태로 도달하는 것을 볼 수 있다. 이 경우 부하각은 마찬가지로 계속 상승하는 것을 관측할 수 있다.

〈표 1〉	동기발전	^년 기 시스템의	주요 ፲	다라미터		
<table< td=""><td>1> Main</td><td>parameters</td><td>for the</td><td>asynchronous</td><td>generator</td><td>system</td></table<>	1> Main	parameters	for the	asynchronous	generator	system

파라미터	값	
정격 용량	123.75kVA(99kW)	
정격 전압	480V	
정격 주파수	60Hz	
정격전류	148.85A	
역률	0.8 lag	
효율	0.950	
극수	4	
회전속도	1,800rpm	
여자방식	Self-excited, Brushless	







system (closing of an 13.8kV breaker)



〈그림 5〉 동기발전기 시스템 응답 곡선(13.8kV의 차단기 개방) 〈Fig. 5〉 Response curves for the synchronous generator system (opening of an 13.8kV breaker)



<그림 6> 동기발전기 시스템 응답 곡선(3상 전력 케이블의 고장발생) <Fig. 6> Response curves for the synchronous generator system (3-phase fault in feeder cables)

6. 결 론

본 논문은 ETAP 소프트웨어를 이용하여 선박용 동기발전기 시스템 을 시뮬레이션 하였으며 다양한 외란이 적용되었을 경우 그 특성을 분 석하였다. 시뮬레이션에 적용한 외란은 산업현장에서 일반적으로 발생하 는 전력계통 분야의 일반적인 4가지 사항을 고려하였으며 다음과 같다.

- 전동기 부하의 trip
- 변압기 부하의 차단기의 동작 및 개방
- 3상 전력 케이블의 고장 발생

이러한 외란을 적용한 시뮬레이션 시나리오에 대하여 구성한 동기발 전기 시스템의 출력 전압, 회전속도, 부하각에 대한 동특성을 각각 분석 하였다. 이 외란이 발생한 이후에 출력 전압 및 회전속도는 일정한 과도 응답 상태를 가지다가 그 이후에는 정상상태로 도달하는 응답을 관측할 수 있었다. 한편 부하각의 경우 시간의 경우에 따라 지속적으로 증가하 는 것을 볼 수 있었다. 본 논문은 선박용 동기발전기 시스템에 대한 시 뮬레이터 개발의 첫 단계로서 앞으로 연구를 지속적으로 전개해 나갈 것이며 주요 향후 연구로는 다음과 같다.

- 범용 소프트웨어를 사용한 동기발전기 시뮬레이터 개발
- 다양한 여자기 및 조속기 방식의 시뮬레이션 실시
- 기존의 ETAP 및 PTW와의 비교 연구 실시

[감사의 글]

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력 기 술개발사업(기업부설연구소 신규설치)(No. C0238956)의 연구수행 으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

[참 고 문 헌]

- 이영찬, 정병건, "선박용 동기 발전기의 여자 제어시스템 설계," 한 국마린엔지니어링, vol. 39, no. 3, pp. 298-305, 2015.
- [2] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power system control and stability*, Wiley Inter-Science, New Jersey, 2003.