

工學碩士 學位論文

HIL을 이용한 증기터빈 발전기
시뮬레이터 개발에 관한 연구

A Study on the Simulator Development of Steam
Turbine Generator using HIL

指導教授 金 潤 植

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科 張 珉 閔

本 論 文 을 張 珉 閨 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으
로 認 准 함 .

審 查 委 員 長 : 工 學 博 士 全 泰 寅 印

審 查 委 員 : 工 學 博 士 張 樂 元 印

審 查 委 員 : 工 學 博 士 金 潤 植 印

2 0 0 3 年 1 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 電 子 工 學 科 張 珉 閨

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 증기터빈 발전기의 수학적 모델링	3
2.1 증기 터빈의 모델링	3
2.1.1 증기터빈 시스템	6
2.2 철극형 동기 발전기의 모델링	14
2.2.1 모델에 대한 가정	14
2.2.2 모델 방정식과 등가회로	15
2.2.3 정현파 정상 상태 동작	21
2.2.4 파라미터 동정	24
제 3 장 증기터빈 발전기 시뮬레이터의 H/W 구성	29
3.1 증기터빈 발전기 시뮬레이터 구성	29
3.2 증기터빈 발전기 시뮬레이터의 H/W	32
3.2.1 Host PC	33
3.2.2 Target PC	33
3.2.3 V/F 컨버터	34
제 4 장 시뮬레이션 및 결과	37
4.1 HIL 시뮬레이션	37
4.2 시뮬레이터의 내부 구성도	41
4.3 시뮬레이션 및 결과	42
제 5 장 결 론	46
참 고 문 헌	48

A Study on the Simulator Development of Steam Turbine Generator using HIL

by Jang Min-Kyu

Department of Electrical and Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Busan, Republic of Korea

Abstract

Steam turbine that is run using steam among industry plant, power plant or facilities of vessel is selected the usage in electricity generating mainly. This steam turbine generator's composition department is consisted of steam turbine, generator and governor. It is difficult of search and expensive equipments are bulk.

Can consult together driving of turbine and generator to cyber by embodying from engine of this high price to simulator. Like this, can control or confirm the function even if do not combine governor physically in steam turbine development stage by doing.

Developed device is ideal that connect and test at the surrounding environment division directly but a lot of times, research expenses

and risk bearing are required to equip the surrounding environment. So, do test for device using simulator. Can improve efficiency of examination composing this test environment by HILS.

In this paper, embodied simulator including this steam turbine and generator by HILS. Heighten space utilization and composed as industry PC of a PC 104 bus that hardly be influenced in surroundings environment.

Coded by C code modeling steam turbine and generator. Through D/A board of simulator, appeared speed of revolution signal goes by digital governor through V/F converter. Compare input value with speed command in digital governor. So, send signal that control displacement of actuator at A/D board of simulator. Can confirm speed signal and actuator displacement signal that become input and output of simulator by real-time.

Confirmed whether simulator displays idle speed and rated speed command of digital governor properly, and confirmed whether output of simulator changes along the raise · low rate of the speed. Confirmed effectiveness of steam turbine simulator that design and manufactures using HILS from result of above.

제 1 장 서 론

산업 플랜트, 발전소 혹은 선박의 설비 중 증기를 이용하여 구동되는 증기터빈은 그 용도가 주로 발전용으로 채택이 된다. 그 구동원인 증기의 발생이 보일러, 주기관 폐열 혹은 여타의 재생열을 이용하기 때문이다. 이러한 발전기의 운전을 통하여 자체 계통에 전력을 공급하거나 전력선으로 전력을 공급하게 된다.

증기터빈 발전기는 그 구성부가 압력증기와 증기터빈, 터빈 부속설비, 발전기와 제어시스템으로 구성되어있으며 일반적으로 구하기도 어렵고 고가의 장비들이 대부분이다. 이러한 고가의 엔진을 디지털 시뮬레이터로 구현함으로써 터빈 및 발전기의 운전을 가상으로 모의 할 수 있다. 즉, 증기터빈 발전기와 제어시스템을 물리적으로 결합시키지 않더라도 엔진 형태를 구성할 수 있다.

시뮬레이터를 개발하는 이유는, 시험 대상물을 실제 환경에 직접 연결해서 테스트하는 것이 이상적이지만, 이는 그 주변 환경을 갖추는데 많은 시간과 연구비 및 위험부담이 요구되기 때문이다. 그래서 이러한 경우 대부분 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 기법을 사용하여 보다 경제적이며 효과적으로 연구를 수행하여 왔다. 그러나 소프트웨어 시뮬레이션만으로 개발된 시스템은 실제 하드웨어로 구현할 때 하드웨어 설계 및 제작에 따른 여러 가지 문제점으로 인하여 시스템의 신뢰성을 저하시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 동일한 조건으로 반복시험이 가능하여 시험의 효율성을 향상시킬 수 있는 HIL 시뮬레이션이 각광 받고 있다.

한편, 현재 발전소에서 사용되는 증기터빈에는 다양한 종류의 조속기들이 있으며, 이러한 조속기들은 구성방식에 따라 기계식, 기계유압식, 전기전자식 및 디지털 조속기 등의 형태를 보여주고 있다. 현존하는 발

전소 원동기의 경우 대부분이 기계유압식 및 전기전자식 조속기를 채용하고 있다. 이러한 조속기들의 문제점으로는 기계유압식 조속기의 경우, 작동부분의 마모 혹은 주기적인 수리 후의 각 설정값들의 변동이 문제가 될 수 있고, 제작 후 오랜 시간의 경과로 제작사의 여유부품 공급의 중단도 문제점으로 발생할 수 있다. 전기전자식 조속기의 경우는 이러한 문제들이 조금은 가벼울 수 있겠으나, 그 역시 전자회로를 구성하고 있는 소자들의 특성이 시간이 지남에 따라 변화하여 설정값 및 출력변동 등 다양한 문제가 발생할 수 있다. 비록 이러한 문제들이 현재의 운전에는 치명적이지 않지만, 장기적인 발전소의 운용 및 양질의 전력공급에 차질을 빚을 수 있다는 우려를 없애지는 못 할 것이다. [1-4]

본 연구에서는 유용성, 효율성, 신뢰성, 경제성 및 정확한 성능 등 그 고유한 장점을 배경으로 성장 추세가 급격히 커지고 있는 디지털 조속기를 가지고 HIL(Hardware In-the Loop) 시뮬레이션을 이용한 증기터빈 발전기 시뮬레이터를 개발하였다.

1차 지연 요소로 표현되는 증기터빈과 d-q변환을 이용하여 표현한 발전기를 Matlab/Simulink/Realtime Workshop으로 모델링하여 C 코드를 생성하였다. 하드웨어로는 공간 활용도를 높이고 주위 환경에 둔감한 PC104 버스의 산업용 PC를 사용하였다.

HIL 시뮬레이션의 구성은 시뮬레이터의 D/A 보드를 통해 나온 회전 속도 신호는 V/F 컨버터를 통해 디지털 조속기로 간다. 디지털 조속기에서는 속도 설정값과 입력값을 비교하여 액츄에이터의 변위를 조정하는 신호를 시뮬레이터의 A/D 보드로 보낸다. 시뮬레이터의 입력과 출력인 액츄에이터 변위 신호와 속도 신호를 실시간으로 확인할 수 있다.

디지털 조속기의 Idle 속도와 정격 속도 설정값을 시뮬레이터가 제대로 출력하는지 확인하였고, 속도의 상승·하강율을 따라 시뮬레이터의 출력이 변화하는지 확인하였다. 이상의 결과로부터 HIL을 이용하여 설계·제작한 증기터빈 시뮬레이터의 효율성을 확인하였다.

제 2 장 증기터빈 발전기 시스템의 수학적 모델링

제어기를 해석 또는 설계하기 위해서는 제어대상인 시스템의 수학적 모델을 알아야 한다. 이와 같은 모델을 구하는 과정을 모델링 또는 모형화라 한다. 모델링 방법에는 크게 나누어 다음과 같이 분류할 수 있다.

- (1) 물리법칙에 의한 방법
- (2) 시스템 식별법

대부분의 시스템은 물리법칙, 원리 등에 의하여 그 주된 특성이 알려져 있다. 이러한 물리법칙에 의한 수식적 모델은 경제성이나 정밀도에 따라 수식적 모델의 구체화 또는 간략화가 가능하다. 그러나 주로 시스템 파라미터가 불변이거나 제어기 파라미터가 고정된 경우에 양호한 특성을 가진다.[5]

본 논문에서도 물리적 현상이나 원리를 이용하여 증기터빈과 동기 발전기를 표현하는 수학적 모델을 구하였다.

한편 고속, 정밀한 제어기 설계의 필요성과 시스템 및 제어기의 다양화에 따라 적절한 모델을 선정해야하는 경우, 시스템 식별 방식으로 모델링을 한다. 이는 입·출력 데이터를 먼저 수집해 놓은 후, 가정된 수식적 모델의 파라미터를 찾아내는 방법이다.

2.1 증기터빈의 모델링

터빈이란 증기, 가스 와 같은 압축성 유체의 흐름을 이용하여 충동력 또는 반동력으로 회전력을 얻는 기계장치이다. 그 중 증기터빈은 증기의 열 에너지(thermal energy)를 기계적 에너지(회전력)으로 변환시키

고, 같은 축에 연결된 발전기는 터빈에서 변환된 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킨다.

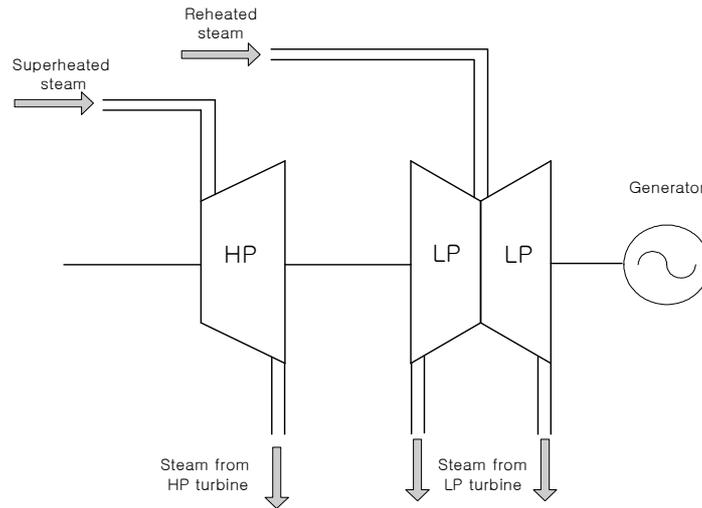


그림 2.1 증기터빈 - 개략도

고압단의 노즐에서 분출된 증기는 회전날개에 부딪혀 일을 한 후 일부 에너지를 소비한다. 저압단은 약간 낮은 압력으로 터빈 회전을 돌리고, 이렇게 통과한 증기는 배기 증기(exhaust steam)로 터빈을 빠져 나온다.

그림 2.1에서는 중압단을 저압단의 한 부분으로 보고 포함시키지 않았다. 여기서, 터빈의 구성에 따라 다양한 형태의 모델이 있을 수 있지만, 가장 중요한 입력과 출력 변수는 다음과 같다.

- 터빈의 입구와 배출구에서 증기 파라미터 : 온도, 압력
- 발전기의 전기적 파라미터
- 안정도

터빈의 형태는 입구와 배출구의 개수에 의해 좌우되지만, 증기 파라미터의 일반적인 값은 다음과 같다.

- 고압 터빈 : 입구 압력 : 50~170 bar, 입구 온도 : 550. C
- 중압 터빈 : 입구 압력 : 30~40 bar, 입구 온도 : 550. C
- 저압 터빈 : 입구 압력 : 4~8 bar, 입구 온도 : 250. C,
출구 압력 : 95 mbar (콘덴서를 사용했을 때)

또한, 발전기의 전기적인 파라미터는 출력 파워, 즉 부하와 회전속도와 관련되는 주파수이다. 안정도는 터빈 회전자의 떨림과 발전기 고정자 부근의 온도 분포를 생각한다. 결국, 증기터빈은 그림 2.2의 블록으로 표현할 수 있다.[6]

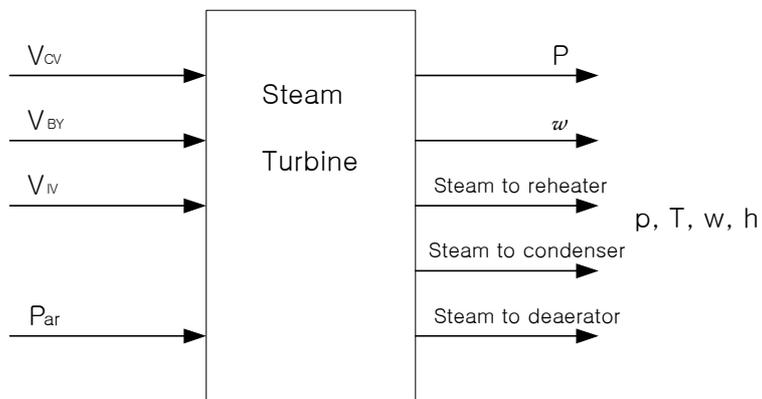


그림 2.2 증기터빈 - 블록 다이어그램

여기서, V_{CV} -컨트롤 밸브 세팅, V_{BY} -바이패스 밸브 세팅, V_{IV} - 인터셉트 밸브 세팅, P_{ar} -입구 증기의 온도, 압력 그리고 엔탈피, P - 기계적 파워, ω -회전 속도, p -압력, T -온도, w -흐름, h -엔탈피를 나타낸다.

2.1.1 증기터빈 시스템

모든 복합 증기터빈 시스템은 증기 흐름을 제어하기 위해서 고압(또는 초고압) 터빈의 입구에서 증기 조절 밸브를 사용한다. 처음의 터빈 실린더와 재가열기에서 증기 체스트(steam chest)와 입구 파이프(inlet piping) 그리고 크로스 오버 파이프(crossover piping) 모두는 밸브의 움직임과 증기 흐름의 변화 사이에 지연을 초래한다.

증기 조절 밸브와 고압 터빈 사이에는 증기 체스트(steam chest)가 있다. 이 용기는 고압 터빈에 증기 흐름과 밸브의 증기 흐름 사이에 시간 지연을 초래한다. 따라서 수학적 모델은 그림 2.3(b)에 나와 있는 것처럼 시정수 T_{CH} 로서 이 영향을 나타낸다.

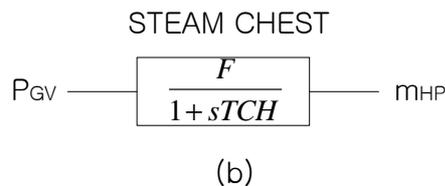
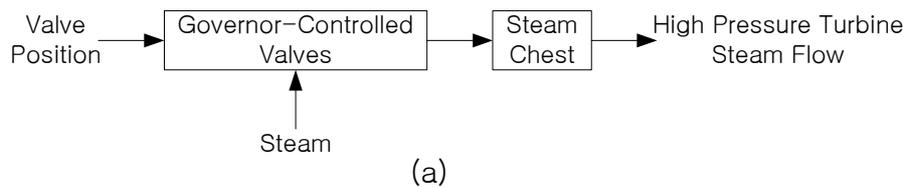


그림 2.3 증기 체스트와 고압 파이프 묘사:
(a)기본적인 블록도 (b) 선형 모델

6개의 일반적인 증기터빈 시스템이 그림 2.4에 나와 있다. 일치하는 수학적 모델은 그림 2.5에 나타내었다. 시정수 T_{CH} , T_{RH} , 그리고 T_{CO} 는 각각 증기 체스트(steam chest)와 입구 파이프(inlet piping), 재가열기(reheaters), 그리고 크로스-오버 파이프(crossover piping)로 인한 지

연을 나타낸다. F_{VHP} , F_{HP} , F_{IP} , 그리고 F_{LP} 는 다양한 실린더에서 전개된 전체 터빈 전력의 일부를 나타낸다.

그리고 시정수와 실린더 프렉션(fraction)에 대한 일반적인 값은 표 2.1에 나와 있다.

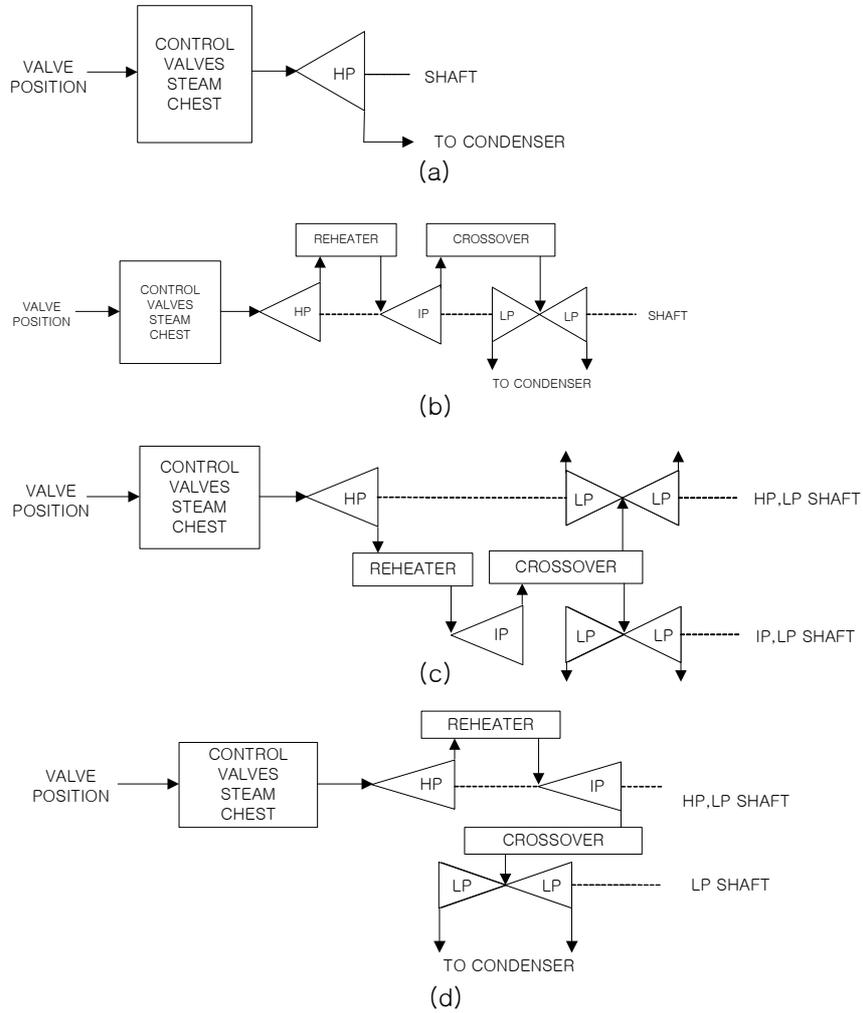
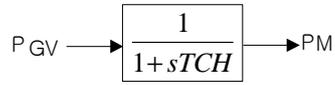
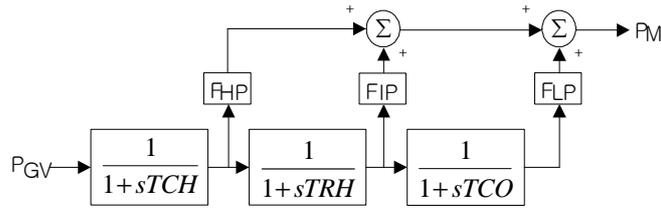


그림 2.4 일반적인 증기 시스템 구성

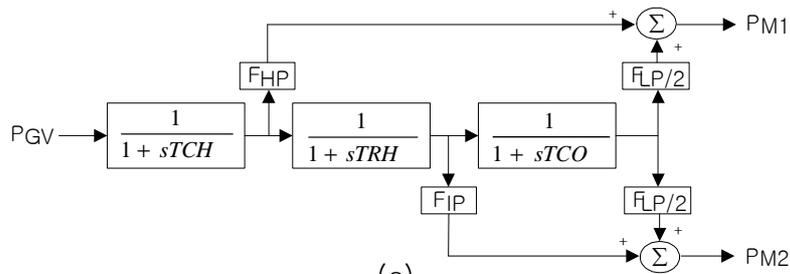
- (a) Nonreheat
- (b) Tandem Compound, Single Reheat
- (c) Cross Compound, Single Reheat
- (d) Cross Compound, Single Reheat



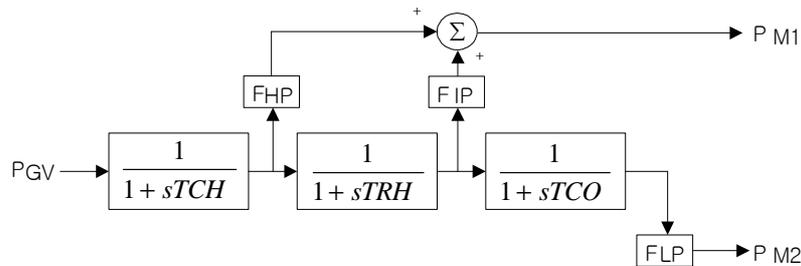
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2.5 증기 시스템의 선형 모델

- (a) Nonreheat
- (b) Tandem Compound, Single Reheat
- (c) Cross Compound, Single Reheat
- (d) Cross Compound, Single Reheat

표 2.1 증기터빈 시스템에 대한 일반적인 파라미터

Steam System Configuration	Typical Cylinder Fractions				Typical Time Constants			
	F_{VHP}	F_{HP}	F_{IP}	F_{LP}	T_{CH}	$\frac{T_{RH}}{T_{RH}}$	T_{RH2}	T_{CO}
Nonreheat Fig. 11(a)	·	·	·	·	.2-.5	·	·	·
Tandem Compound Single Reheat Fig. 11(b)	·	.3	.4	.3	.1-.4	4-11	·	.3-.5
Cross Compound Single Reheat Fig. 11(c)	·	.3	.3	.4	.1-.4	4-11	·	.3-.5
Cross Compound Single Reheat Fig. 11(d)	·	.25	.25	.5	.1-.4	4-11	·	.3-.5

일반적으로 직면하게 되는 증기 시스템의 모든 구성들은 그림 2.6에 나와 있다. 표 2.2는 그림 2.5와 그림 2.6의 파라미터들 사이에 관계를 보여준다. [7-12]

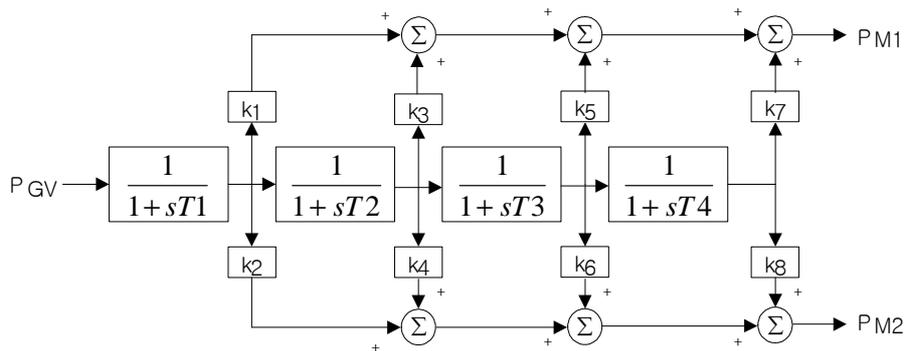


그림 2.6 터빈 시스템에 대한 일반적인 모델

표 2.2 일반적인 터빈 모델에서 사용된 파라미터

System Description	Time Constants				Fractions							
	T_1	T_2	T_3	T_4	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
Nonreheat (Figure 12a)	T_{CH}	·	·	·	1	0	0	0	0	0	0	0
Tandem Compound, Single Reheat (Figure 12b)	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	·	F_{HP}	0	F_{IP}	0	F_{LP}	0	0	0
Cross Compound, Single Reheat (Figure 12c)	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	·	F_{HP}	0	0	F_{IP}	$F_{LP}/2$	$F_{LP}/2$	0	0
Cross Compound, Single Reheat (Figure 12d)	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}	·	F_{HP}	0	F_{IP}	0	0	F_{LP}	0	0

본 논문에서는 표 2.1과 표 2.2를 참고로 증기 시스템의 표준 모델을 사용하여 직렬형 재열 터빈을 모델링하였다. 따라서 터빈 모델은 시정수를 가지는 1차 시스템이 된다. 전형적으로 1차 시스템 모델에 대하여 정의되는 시정수는 경우에 따라서 초기치에 대하여 63% 감소되는 시간(초기치의 37%가 되는 시간) 또는 최종치의 63%에 이르는 시간으로 정의된다.

터빈 모델에 사용된 모델과 파라미터를 그림 2.8과 표 2.3에 나타내었다. 그리고 증기 체스트(steam chest)의 응답을 확인하기 위해 스텝 입력을 주고 모델에 사용된 시정수 대로 응답이 나오는지 확인하였고 전체 증기터빈 시스템에 대해서도 시뮬레이션을 수행하였다.

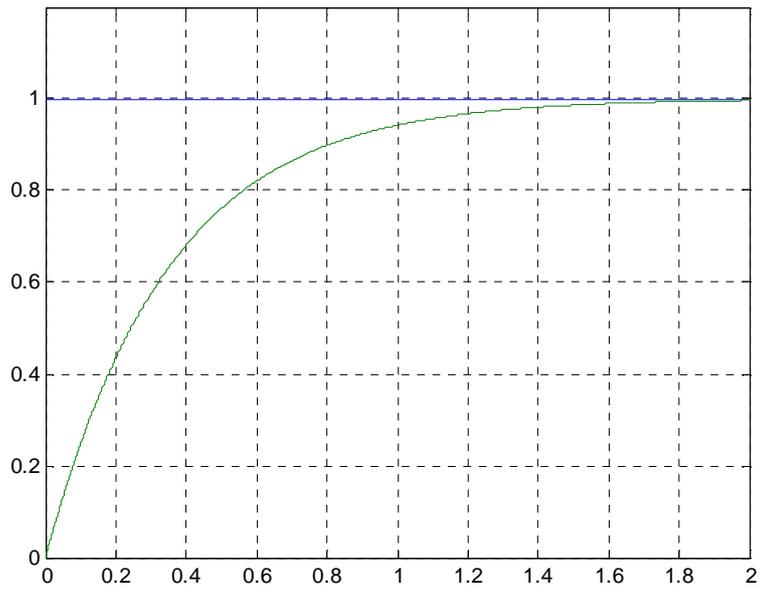
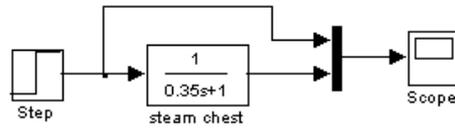


그림 2.7 증기 체스트의 모델과 응답

그림 2.7의 증기 체스트 모델에서 시정수는 0.35초이다. 스텝 입력의 크기를 1로 하고 시뮬레이션한 결과 0.35초에서 0.63의 응답을 얻을 수 있었다.

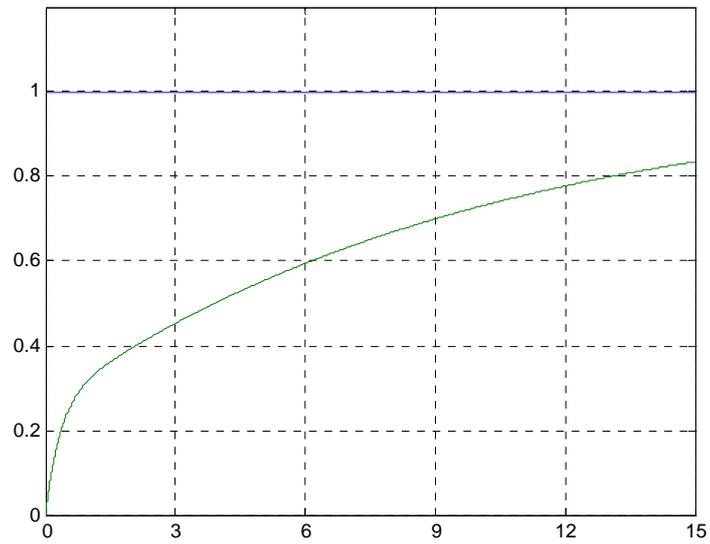
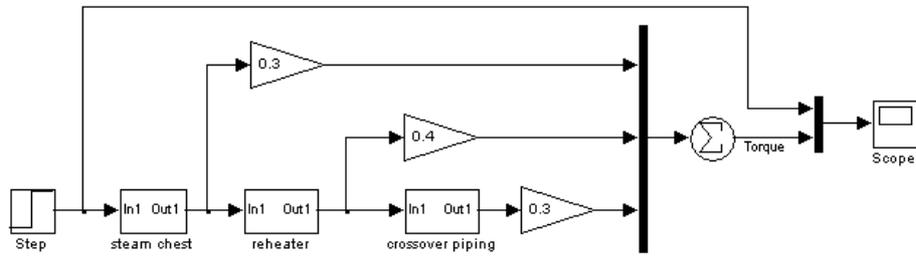


그림 2.8 증기 시스템 모델과 응답

전체 증기 시스템은 초기 기동이 빠르고 약 1초 이후에는 완만히 증가하였다.

표 2.3 증기 시스템의 파라미터

System Description	Time Constants			Fractions		
	T_1	T_2	T_3	K_1	K_3	K_5
직렬형 재열 터빈 (그림 15)	T_{CH} 0.35	T_{RH} 10	T_{CO} 0.45	F_{HP} 0.3	F_{IP} 0.4	F_{LP} 0.3

2.2 철극형 동기 발전기의 모델링

2.2.1 모델에 대한 가정

3상 동기 발전기는 에어 갭 주변에 대칭적으로 분포한 3개의 동일한 전기자(armature) 권선과 하나의 계자(field) 권선을 가지고 있다. 하나 또는 그 이상의 제동(damper) 권선이 있을 수 있다. 일반적으로, 전기자 권선은 고정자(stator)에 위치해 있고, 계자 그리고 제동 권선은 회전자에 위치해 있다. 하지만 여자기에서 처럼, 전기자 권선이 회전자에 위치해 있고, 계자 권선이 고정자에 있는 같은 경우도 있다. (여자기는 제동 권선이 없다.) 이것은 고정자와 회전자 권선 사이에 상대적인 움직임이 중요하기 때문에, 기기의 모델링에는 영향을 미치지 않는다. 그러므로, 회전자 권선이라고 할 때, 항상 계자(그리고 있다면 제동) 권선을 암시한다. 이 권선은 3상 전기자 권선에 대해서 에어 갭의 맞은 편에 위치해 있다. [13]

몇가지 가정은 실제의 동기기를 간략하게 해준다.

- (1) 기기에서 나타나는 모든 권선은 에어 갭을 따라서 정형의 MMF 를 발생한다고 가정한다.

(2) 기기의 철 투자율은 무한대로 가정한다. 이것은 자기 포화로 인한 모든 영향과 자속 프린징을 무시하는 것과 같다.

(3) 회전자 구조가 기기에서 비대칭적인 자기를 발생하는 유일한 요소로 가정한다. 고정자 또는 회전자 슬롯의 영향은 Carter's factor에 의해 설명할 수 있다. 이 가정은 $\lambda = \lambda_0 - \lambda_2 \cos(\theta)$ 와 같이 자기 도전을 함수로 근사화 할 수 있게 해주고, λ_0 와 λ_2 는 에어 갭의 기하학적인 형상에 좌우된다.

이러한 가정으로 발생하는 에러는 특히 기기의 다이내믹한 운전의 관점에서 볼 때, 일반적으로 무시할 수 있을 만큼 작다.

2.2.2 모델 방정식과 등가회로

동기기 하나는 $n+1$ 개 방정식으로 하나의 시스템을 표현할 수 있다. n 은 전기적 방정식이고 1은 기계적 방정식이다. 전기적 방정식의 수 n 은 기기를 설명하는데 필요한 독립 전기적 변수의 수와 동일하다. 이들 변수들은 전류 또는 누설 자속 중의 하나일 것이다. 여기서는 전류를 독립 변수로 선택한다.

전기 방정식은 모든 권선에 대한 Kirchoff's 전압 법칙을 사용해서 얻는다. 제동 권선이 있다면, 항상 short되어 있는 것으로 한다. 그러므로 제동 권선의 단자 전압은 0이 된다.

권선 양단의 인덕터 전압 강하를 정확하게 계산하기 위해서, 권선에 쇄교되는 전체 자속을 계산해야한다. 그것은 인덕턴스 매트릭스로 계산할 수 있다. 매트릭스는 모든 권선의 누설 자속 대 모든 권선의 전류와 관련이 있다. 돌극형 동기기일 때, 회전자 위치에 영향을 받는 인덕턴스 매트릭스를 만든다. 이러한 종속관계는 회전자의 비대칭적인 자기 때문이다. 돌극기의 회전자가 뽀족하기 때문에, 보다 바람직한 방향으로 자

계 경로가 존재한다. 이 경로는 계자 권선에 의해 만들어진 자속의 경로와 일치한다. 그 경로를 기기의 d축이라고 정의한다. 기기의 q축은 기기의 d축에 대해서 전기적으로 반 시계방향으로 90°에 위치한다. 그러면, θ 로 표기되는 회전자 위치는 전기자 a상의 자기 축과 회전자의 q축 사이의 각도로 표현된다.

일정한 기기 파라미터를 제공하는 기준 프레임은 회전자 또는, dq 기준 프레임뿐이다. 여기서 모든 변수들은 회전자에 위치한 가상의 관찰자가 변수들을 측정하는 한가지 형태로 표현된다. 그러므로 abc를 dq 기준 프레임으로 변환하는 것은 다음의 변환 매트릭스로 구할 수 있다.

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

역 변환은(dq를 abc 기준 프레임으로) 다음과 같다.

$$T_{inv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

(2.2)

식 (2.1)과 (2.2)에서 θ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta_0 \quad (2.3)$$

여기서 ω 는 회전자의 (전기적) 속도를 나타낸다.

그러므로, abc 기준 프레임에서 표현된 변수 f_a, f_b , 그리고 f_c 는 dq 기준 프레임 변수인 f_d, f_q 에 T 를 곱해서 변환할 수 있다. 즉,

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

역 변환은,

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = T_{inv} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

(2.1)와 (2.2)에서 정의한 변수의 변환은 전체 시스템 전력을 보존한다. 매시간 마다, abc 기준 프레임에서 전력은 dq 기준 프레임에서 전력과 같다.

기기의 전기적 방정식이 abc에서 dq 기준 프레임으로 변환될 때, 다음의 형태가 되도록 한다.

· 전기자 방정식

$$v_d = -R_s i_d - \omega \lambda - (L_{ls} + L_{md}) \frac{di_d}{dt} + L_{md} \frac{di_{fd}}{dt} + L_{md} \frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_q = -R_s i_q + \omega \lambda - (L_{ls} + L_{mq}) \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{di_{kq}}{dt} \quad (2.7)$$

여기서,

$$\lambda_d = -(L_{ls} + L_{md}) i_d + L_{md} (i_{fd} + i_{kd}) \quad (2.8)$$

$$\lambda_q = -(L_{ls} + L_{mq})i_q + L_{mq}i_{kq} \quad (2.9)$$

• 계자 방정식

$$v_{fd} = R_{fd}i_{fd} - L_{md}\frac{di_d}{dt} + (L_{lfd} + L_{md})\frac{di_{fd}}{dt} + L_{md}\frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.10)$$

• 제동 권선 방정식

$$0 = R_{kd}i_{kd} - L_{md}\frac{di_d}{dt} + L_{md}\frac{di_{fd}}{dt} + (L_{lkd} + L_{md})\frac{di_{kd}}{dt} \quad (2.11)$$

$$0 = R_{kq}i_{kq} - L_{mq}\frac{di_q}{dt} + (L_{lkq} + L_{mq})\frac{di_{kq}}{dt} \quad (2.12)$$

위 방정식에서 사용된 파라미터와 변수들은 다음을 의미한다.

- ω : 회전자 속도
- v_d : 전기자 d축 단자 전압
- v_q : 전기자 q축 단자 전압
- i_d : 전기자 d축 단자 전류
- i_q : 전기자 q축 단자 전류
- v_{fd} : 계자 권선 단자 전압 (고정자에 나타난)
- i_{fd} : 계자 권선 단자 전류 (고정자에 나타난)
- i_{kd} : d축 제동 권선 전류 (고정자에 나타난)
- i_{kq} : q축 제동 권선 전류 (고정자에 나타난)
- λ_d : d축 전체 전기자 자속

- λ_q : q축 전체 전기자 자속
- R_s : 전기자 상당 권선 저항
- L_{ls} : 전기자 상당 누설 인덕턴스
- L_{md} : d축 상호 인덕턴스
- R_{fd} : 계저 권선 저항 (고정자에 나타난)
- L_{lfd} : 계저 권선 누설 인덕턴스 (고정자에 나타난)
- R_{kd} : d축 제동 권선 저항 (고정자에 나타난)
- L_{lkd} : d축 제동 권선 누설 인덕턴스 (고정자에 나타난)
- L_{mq} : q축 상호 인덕턴스
- R_{kq} : q축 제동 권선 저항 (고정자에 나타난)
- L_{lkq} : q축 제동 권선 누설 인덕턴스 (고정자에 나타난)

(2.6) - (2.12)의 방정식은 그림 2.9에서 동기 발전기의 등가 회로를 나타낸다.

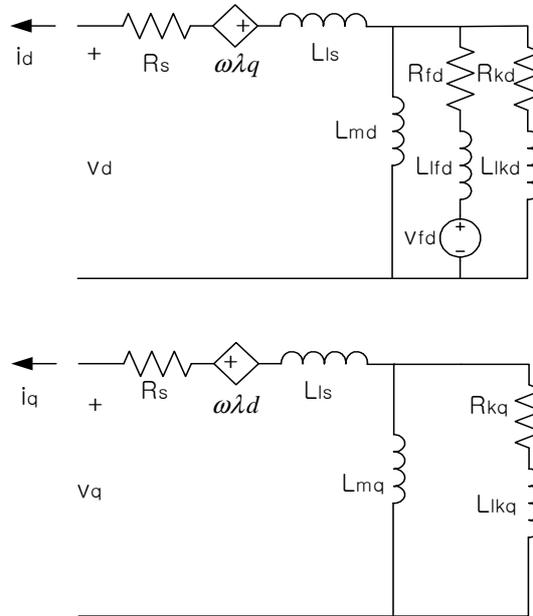


그림 2.9 동기 발전기의 등가회로

이 등가회로는,

(1) D와 q축 등가 회로는 변압기 등가 회로와 유사하다. 얼마의 저항과 누설 인덕턴스에 의해 특징 지워지는 몇 개의 권선들이 상호 인덕턴스로 연결되어 있다. 차이점은 변압기의 경우 등가회로가 ac 회로인 반면, 발전기는 정현파 정상 상태에서 동작할 때, 모든 전압, 전류 그리고 누설 자속은 dc라는 것이다.

(2) 전기자 권선이 회전자 기준 프레임에 나타내었다고 하더라도, 인덕턴스가 시간 변수는 아니다. 사실 자기적으로 결합된 전기자 권선은 d와 q축의 등가 회로의 전기자 가지의 양단 구간에 나타내고 있다. 각 축에 대해, 그러한 구간은 회전자 속도와 다른 축의 전기자 권선에 쇠교된 전체 자속의 곱과 같다

(3) 기기가 제동 권선을 가지고 있지 않다면, 등가 회로는 제동 권선을 나타내고 있는 가지로부터 그것을 제거함으로써 쉽게 나타낼 수 있다. 회로의 나머지는 변경하지 않는다.

(4) 모든 회전자 파라미터들은 전기자로 나타낸다. 그러므로, 이 회로가 시뮬레이션에 사용된다면, 회전자 변수의 실제 값에 관심이 있기 때문에, 회전자와 전기자 사이에 권수비를 고려할 필요가 있다.

이 등가 회로는 전기적인 동기 발전기를 묘사하고 있다. 기계적 변수는 회전자 속도 ω 로 나타내고, 시스템의 기계적 방정식이 모델을 완성하기 위해 필요하다. 이 방정식은 기기가 내부에서 발생한 전자기 토크 대 발전기의 샤프트에 가해지는 외부 토크와 관련이 있다. 여기서는 회전자 속도는 알고 있는 것으로 한다.

기기의 전기적 과도 상태는 기계의 과도 상태보다 훨씬 빠른 것으로 간주할 수 있기 때문에 기계의 과도 상태는 엔진의 다이내믹과 관성 그리고 발전기의 관성을 포함한다.

위의 고려 사항에 따라, 회전자 속도 ω 는 변수가 아니라, 시스템의 파라미터이다.

2.2.3 정현파 정상 상태 동작

발전기가 정현파 정상 상태에서 동작한다면, 상 전압은 abc 기준 프레임에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_a = V_p \cos \theta_v \quad (2.13)$$

$$v_b = V_p \cos \left(\theta_v - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.14)$$

$$v_c = V_p \cos(\Theta_v + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.15)$$

여기서,

$$\Theta_v = \omega_v t + \Theta_{v0} \quad (2.16)$$

정상 상태에서, 분명히, $\omega_v = \omega$ 이다. 하지만 정상 상태에 도달하기 위해서, 발전기는 회전자 전기적 속도가 단자 전압의 각 주파수와 다른 과도 상태를 지나야만 한다. 그것은 기기가 회전자 각도 δ 의 값이 정상 상태 값에 도달하도록 해주는 과도 상태이다. 회전자 각도 δ 는 a 상의 단자 전압의 기본 요소의 최대 (+) 값과 관련된 회전자의 변위로 정의된다. 라디안으로 표현하면, 다음과 같다.

$$\delta = \Theta - \Theta_v = \int_0^t (\omega(\xi) - \omega_v(\xi)) d\xi + \Theta(0) - \Theta_v(0) \quad (2.17)$$

그러면, (2.1)에서 (2.13)-(2.15)까지 적용한 후, dq 기준 프레임으로 변환된 다음을 얻는다.

$$v_d = \sqrt{\frac{3}{2}} V_p \sin(\Theta - \Theta_v) = \sqrt{\frac{3}{2}} V_p \sin \delta \quad (2.18)$$

$$v_q = \sqrt{\frac{3}{2}} V_p \cos(\Theta - \Theta_v) = \sqrt{\frac{3}{2}} V_p \cos \delta \quad (2.19)$$

(2.18)과 (2.19)의 표현은, 같은 다이어그램에서 dq 기준 프레임 변수들과 ac 공간 벡터를 나타내기 위해서, 복소 평면(가우시안 평면)을 기기의 '실제적인' dq 평면과 관련시킨다. 가우시안 평면의 실수축은 기기

의 q축과 같이 정렬시키고, 가우시안 평면의 허수축은 기기의 d축과 같이 정렬시킨다. 그래서 다시 쓰면,

$$\bar{V} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_q + jv_d) \quad (2.20)$$

(2.20)에서 \bar{V} 은 (2.13)~(2.15)에서 정의한 v_a, v_b , 그리고 v_c 과 관련된 공간 벡터를 나타낸다. 그리고 j 는 허수축 방향으로 단위 벡터를 나타낸다. 공간 벡터의 길이는 변수의 rms 값과 같다. 그림 2.10은 dq 기준 프레임의 위치와 $t=0$ 에서 공간 벡터 $\sqrt{3}\bar{V}$ 를 보여준다. 공간 벡터 $\sqrt{3}\bar{V}$ 와 dq 기준 프레임은 반 시계 방향으로 일정한 속도 ω 로 회전한다. 그리고 v_a, v_b , 그리고 v_c 의 순서치는 a, b, 그리고 c축에서 $\sqrt{2}\bar{V}$ 의 투영으로 얻을 수 있다.

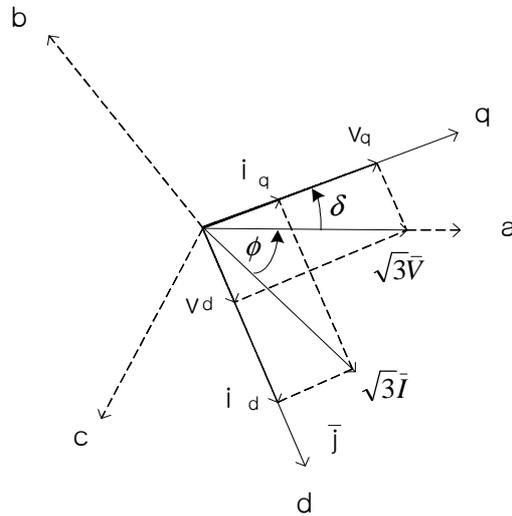


그림 2.10 정현파 정상 상태 동작을 위한 발전기의 상태 벡터도

상 전류를 나타내는 공간 벡터 $\sqrt{3}\bar{I}$ 는 \bar{I} 와 관련해서 부하 각 ϕ 에 의해 이동한다. abc 기준 프레임에서 상 전류의 순시치는 a, b, 그리고 c축 상에서 $\sqrt{2}\bar{I}$ 를 투영해서 얻을 수 있다. 그리고 회전자 기준 프레임에서 상 전류의 (일정한) 값은 d와 q축에서 전류 상태 벡터를 투영해서 얻을 수 있고 나타내면 다음과 같다.

$$i_d = \sqrt{\frac{3}{2}} I_p \sin(\delta + \phi) \quad (2.21)$$

$$i_q = \sqrt{\frac{3}{2}} I_p \cos(\delta + \phi) \quad (2.22)$$

여기서 I_p 는 상 전류의 피크치를 나타낸다.

2.2.4 파라미터 동정

그림 2.9의 동기 발전기 등가 회로는 기기 파라미터의 많은 부분을 알 수 있도록 해준다. 이들 파라미터들은 발전기의 설계 데이터 또는 측정 중 한가지를 통해 얻을 수 있다.

동기 발전기의 파라미터를 측정하는 가장 일반적인 방법 2가지는 단락 회로 특성과 고정 주파수 응답 특성이 있다. 이들 방법 둘 다 다음의 표준 인덕턴스와 시정수를 통하여 기기의 파라미터를 결정하는데 기초가 된다. [14]

· D축 동기 인덕턴스 L_d

$$L_d = L_{ls} + L_{md} \quad (2.23)$$

• D축 과도 인덕턴스 L_d'

$$L_d' = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lfd}}{L_{md} + L_{lfd}} \quad (2.24)$$

• D축 차과도 인덕턴스 L_d''

$$L_d'' = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lfd}L_{lkd}}{L_{md}L_{lfd} + L_{md}L_{lkd} + L_{lfd}L_{lkd}} \quad (2.25)$$

• Q축 동기 인덕턴스 L_q

$$L_p = L_{ls} + L_{mq} \quad (2.26)$$

• Q축 차과도 인덕턴스 L_q''

$$L_q'' = L_{ls} + \frac{L_{mq}L_{lka}}{L_{mq} + L_{lka}} \quad (2.27)$$

• D축 오픈 회로 과도 시정수 T_{d0}'

$$T_{d0}' = \frac{L_{lfd} + L_{md}}{R_{fd}} \quad (2.28)$$

· D축 단락 회로 과도 시정수 T_d'

$$T_d' = \frac{L_{fd} + \frac{L_{md}L_{ks}}{L_{md} + L_{ks}}}{R_{fd}} \quad (2.29)$$

· D축 오픈 회로 차과도 시정수 T_{d0}''

$$T_{d0}'' = \frac{L_{kd} + \frac{L_{md}L_{fd}}{L_{md} + L_{fd}}}{R_{kd}} \quad (2.30)$$

· D축 단락 회로 차과도 시정수 T_d''

$$T_d'' = \frac{L_{kd} + \frac{L_{md}L_{fd}L_{ks}}{L_{md}L_{fd} + L_{md}L_{ks} + L_{fd}L_{ks}}}{R_{kd}} \quad (2.31)$$

· Q축 오픈 회로 차과도 시정수 T_{q0}''

$$T_{q0}'' = \frac{L_{kq} + L_{mq}}{R_{kq}} \quad (2.32)$$

· Q축 단락 회로 차과도 시정수 T_q''

$$T_q'' = \frac{L_{kq} + \frac{L_{mq}L_{ks}}{L_{mq} + L_{ks}}}{R_{kq}} \quad (2.33)$$

단락 회로 특성 측정은 3상 단락 회로가 전기자 단자에 이행된 후 바로 전기자 전류 파형을 측정하도록 한다. 과도 상태 동안, 기기는 일정한 속도로 회전하고 있고, 계자 전압은 일정하게 유지된다. 측정된 전기자 전류 파형으로부터 L_d , L_d'' , T_d' 그리고 T_d'' 의 값을 추출할 수 있고, 그것들을 가지고 d축 파라미터를 계산한다.

주파수 응답 특성 측정은 d(또는 q)축이 전기자 권선에 의해 발생된 자속과 같은 위치에서 회전자를 블록킹하도록 한다. 단락된 계자 권선을 가지고, 주파수 응답은 그 전기자 단자를 측정한다. 얻어진 보드 선도는 L_d , L_d'' , L_q , L_q'' , T_d' , T_d'' , T_{d0}'' , T_q'' , T_{q0}'' 을 결정하도록 해주고, 그로부터 d와 q축의 모든 파라미터를 결정하도록 해준다.

이들을 측정하는 것은 어려운 일이다. 여자기의 전기자 단자와 주요 발전기의 계자 단자에 접속하는 것이 어렵기 때문이다. 그것들은 샤프트와 같이 회전한다. 자세한 설계 데이터 시트가 메인 발전기를 위해 필요하고, 모든 메인 발전기의 파라미터들은 이들 데이터 시트를 통해 얻는다.

여자기의 경우, 믿을 수 있는 설계 데이터 시트가 없다. 그러므로 샤프트없이 여자기의 고정자와 회전자는 제조회사, 고정 주파수 응답 측정과 비슷한 개념의 측정을 통해 얻는다.

발전기 파라미터를 실제 측정하는 것이 어려워, 프랑스 Delle-Alsthalm 사의 발전기 사양을 가지고 파라미터를 얻었다. 표 2.4에 발전기 파라미터를 나열하였다. 여기서 SSFT는 StandStill Frequency Response이고, RTDR는 Rotating Time Domain Response이다.[15]

표 2.4 발전기 파라미터

d-q Parameters per Adkins and Harley	Units Base MVA 20.65 Base kV 13.8	Mfr Data [1]	Second Order			Third Order	
			SSFR		RTDR	SSFR	
			[2]	[3]	[4]	[5]	[6]

Synchronous

x1	pu	0.12	0.1066			0.1066	0.0366
Ra@100 ° C	Ω		0.00183			0.00183	
xd	pu	1.67	1.703			1.703	1.824
xq	pu	1.58	1.41			1.41	1.484

Transient

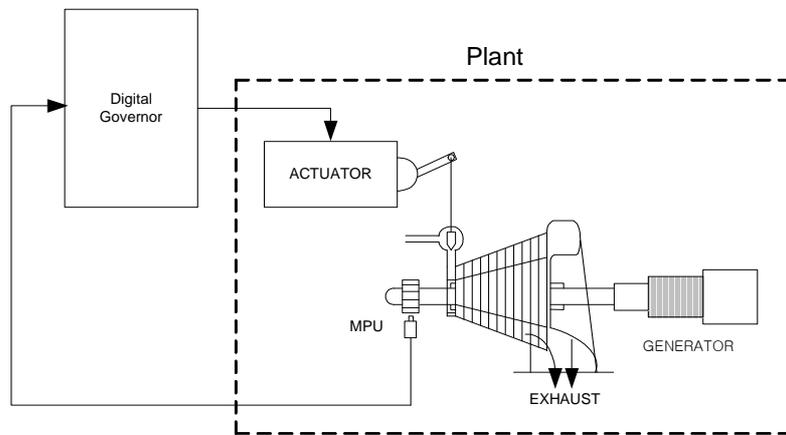
x'd	pu	0.149	0.1675			0.1745	0.1906
T'do	sec	4.61	6.326			5.954	5.273
x'q	pu	1.58	0.5653			0.9206	1.110
T'qo	sec	0.39	0.6206			2.436	3.858

Subtransient

x''d	pu	0.116	0.1404			0.1721	0.157
T''do	sec	0.023	0.0336			1.0610	1.008
x''q	pu	0.124	0.2747			0.5465	0.5502
T''qo	sec	0.065	0.0620			0.3879	0.4009

제 3 장 증기터빈 발전기 시뮬레이터의 H/W 구성

3.1 증기터빈 발전기 시뮬레이터의 구성



3.1 증기터빈 발전기의 개략도

터빈회전수를 MPU(Magnetic pickup)에서 검출하여 조속기(Governor)로 보내주게 되면 액츄에이터(Actuator)의 변위에 따라 터빈 입구의 증기조절밸브 개방도를 조정하여 회전수를 일정하게 유지한다.

터빈회전수를 감지하는 MPU는 기본적으로 자석의 한쪽 극을 구리선으로 둘러싸서 한쪽 극의 끝단에 자성을 지닌 물체가 통과할 때 영구자석의 자속이 끊겨 발생하는 기전력을 이용한다. 이는 일종의 발전기이며, 자속을 끊어주는 자성체와의 간격 및 크기에 따라 다양한 형태의 파형이 나타난다. 이러한 펄스 신호를 완전한 구형파 신호로 바꾸고, 이 구형파 신호를 속도에 비례하는 직류 전압으로 변환시켜 요구하는 설정치와 비교, 그 편차를 유압으로 바꾸어 증기조절밸브를 조절하게 된다.

터빈에 걸리는 전력부하가 증가한다면, 터빈회전수는 저하하여 액츄에

이터는 증기조절밸브의 개방도를 증가시키는 방향으로 움직일 것이다. 이에 따라 터빈으로의 유입증기량이 증대하여 전력부하에 대응하는 출력을 발생하게 된다.

증기터빈 발전기 시스템 즉, 증기터빈 시뮬레이터를 구성하기 위해서는 앞에서 살펴 본 모델을 코딩하는 단계까지 구체화하여야 한다. 그림 3.2에 개발하고자 하는 증기 터빈 시뮬레이터의 개발 환경을 나타내었다.

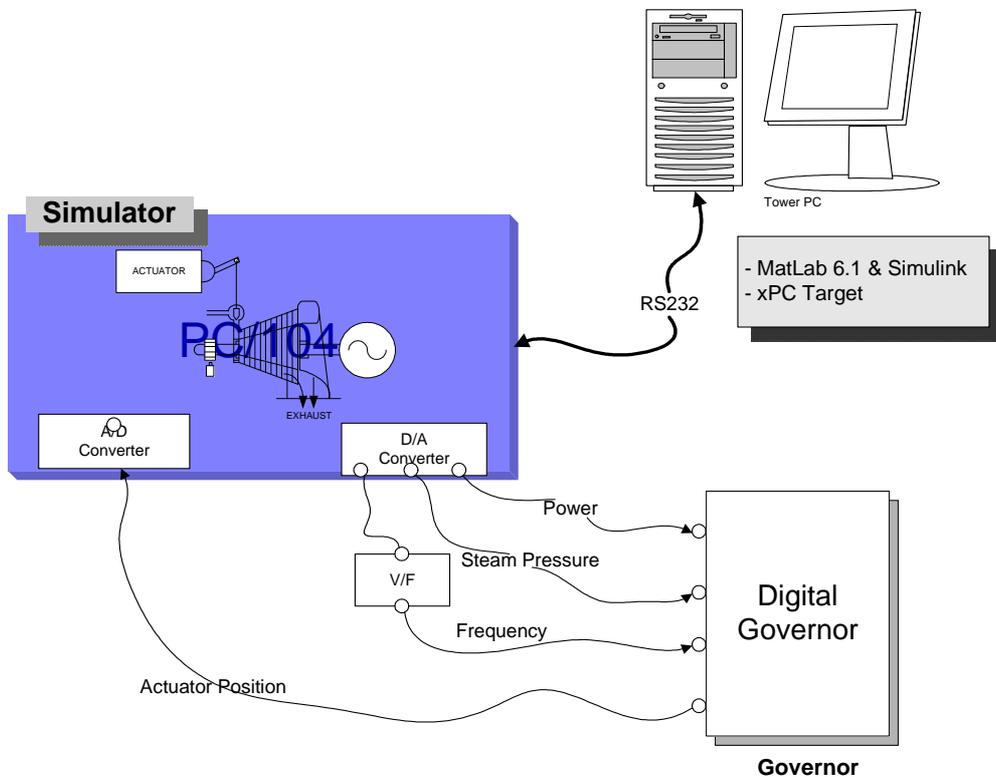


그림 3.2 증기 터빈 시뮬레이터의 개발 환경

여기에 나타난 증기 터빈 시뮬레이터를 개발하기 위해서는 크게 4가지 하드웨어로 나눌 수 있다.

(1) 호스트 PC라 일컬어지는 일반 컴퓨터로서, 앞에서 살펴 본 모델을 코딩하고 그 코드를 타겟 PC 즉, 시뮬레이터로 다운로드하는 역할을 한다. 여기에는 Matlab/Simulink/xPC Target과 같은 프로그램이 필요하며, 코드를 컴파일 하기 위해서 Visual C++를 사용하였다.

(2) 다음으로 타겟 PC가 있다. 이것은 개발하고자 하는 증기터빈 시뮬레이터가 된다. 실제로 호스트 PC에서 코드를 다운로드받게 되면 증기 터빈과 발전기 모델이 이 타겟 PC에 존재하는 것이 되며 이로서 디지털 조속기와 연결하여 시뮬레이터로 사용하게 된다.

(3) 디지털 조속기가 있어야 한다.

(4) 디지털 조속기는 MPU에서 나온 구형파로 회전속도 신호 ω 를 받기 때문에 시뮬레이터의 출력단에 V/F 컨버터가 필요하다.

이러한 환경이 갖추어지면 호스트 PC를 이용해 증기 터빈과 동기 발전기에 대한 각각의 모델을 C 코드로 만들어 준다. 만들어진 코드는 타겟 PC로 RS-232를 통해 다운로드 한다. 코드가 다운로드되면 타겟 PC는 증기터빈 시뮬레이터로서의 역할을 수행할 수 있게 된다.

시뮬레이터의 화면은 다음과 같다. 전체를 4분할하여 디지털 조속기에서 온 신호, 즉 시뮬레이터의 입력 신호를 그래픽과 숫자로 표기하였고 터빈 회전수, 즉 시뮬레이터의 출력 신호를 그래픽과 숫자로 표기하였다. 시뮬레이터는 pu 단위로 계산되기 때문에 화면에 표기되는 값도 pu값으로 표기하였다. 먼저, X-축은 시간 축으로 1000ms/div의 스케일을 가지며 실시간으로 모니터링할 수 있다. Y-축은 -0.2~1.2까지 0.2씩 증가하는 스케일을 가지고 있다.

시뮬레이터를 운전 중이더라도 모델에 사용된 파라미터를 변경하게 되면 즉시 정보가 업데이트된다. 이는 여러 가지 경우에 대해 빠른 결과를

얻을 수 있게 해준다.



그림 3.3 시뮬레이터의 모니터 화면

3.2 증기터빈 발전기 시뮬레이터의 H/W

H/W는 호스트 PC, 타겟 PC, 타겟 PC의 I/O 보드, 그리고 호스트와 타겟 PC 사이를 연결할 RS-232로 구성되어 있다.

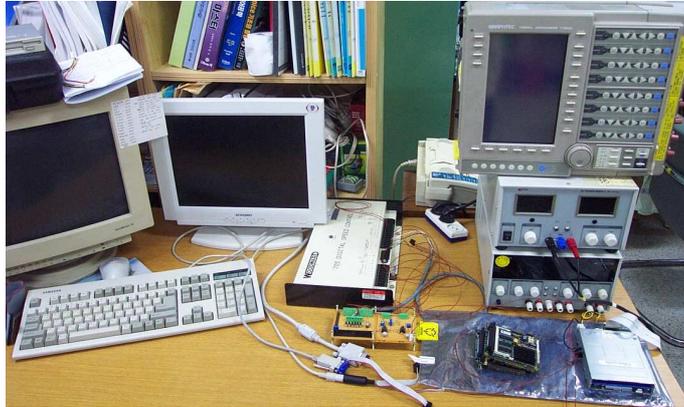


그림 3.4 실험 세트

3.2.1 호스트 PC (Host PC)

xPC Target에서는 호스트 PC로 Windows 95, windows 2000, 아니면 window NT를 설치할 수 있는 어떤 시스템이든지 사용할 수 있다. 또한 3.5인치 플로피 디스크 드라이브, 하나의 직렬 포트와 Ethernet 어댑터 카드가 있어야만 한다.

본 연구에서는 호스트 PC로 일반 데스크 탑 PC를 사용하였다. CPU는 펜티엄 4 2.4GHz에 RAM은 256MB이다. 필요한 소프트웨어로는 Matlab/Simulink/xPC Target과 Visual C++이다.

3.2.2 타겟 PC (Target PC)

타겟 PC로서 Intel 386/486/Pentium 또는 AMD K5/K6/Athlon processor을 가진 실제로 어떤 시스템이든지 사용할 수 있다. 또한 3.5인치 플로피 디스크 드라이브, 그리고 하나의 직렬 포트 아니면 ethernet 어댑터 카드가 반드시 있어야 한다. xPC Target Embedded Option을 사용해서 3.5인치 디스크에서 하드디스크 또는 플래시 메모리로 파일을 보

낼 수 있다.

본 연구에서는 타겟 PC로 다음과 같은 특징을 가진 산업용 PC의 PC104 버스 타입을 선택하였다.

- 매우 작고, 유동적인 적용에 적합하다.
- 다루기 어려운 시스템과 조작법이 복잡한 시스템등의 배치에 적합하다.
- DC 전원으로 동작한다.
- 동작 가능 온도 범위가 넓다.
- 저 출력 소비로 팬 없이도 연속적인 사용이 가능하다.
- 입·출력 확장성이 좋다.



그림 3.5 타겟 PC와 I/O 카드

3.2.3 V/F 컨버터

시뮬레이터에서 나온 회전속도 ω 는 타겟 PC의 I/O 보드를 통해 0~10V의 전압 레벨로 출력되어 디지털 조속기로 들어가게 된다. 그러나

디지털 조속기의 회전속도 입력 단자는 MPU에서 나온 신호를 받기 때문에 V/F 컨버터가 필요하다.

V/F 컨버터인 LM331 IC를 시뮬레이터의 출력단과 연결하였는데, 이것은 그림 3.5로 간단히 나타낼 수 있다. 커패시터 C_L 을 통해 흐르는 평균 전류 즉, DC 전류는 V_{CL} 과형이 안정화 될 때 0A가 된다.

$$I_{SM(ave)} = I_{RL(ave)} + I_{CL(ave)} \quad (3.1)$$

$$\frac{PW}{T} \times I_s = \frac{V_{in} + 0.5\Delta V_C}{R_L} + 0 \approx \frac{V_{in}}{R_L}, \text{ if } V_{in} \gg \Delta V_{CL} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} F_{out} &= \frac{1}{T_{out}} \approx \frac{V_{in}}{I_s R_L \times PW} = \frac{V_{in} \times R_s}{V_{ref} R_L \times \ln(3) \times R_T C_T} \\ &= \frac{V_{in} \times R_s}{2.09 \times R_L \times R_T C_T} \end{aligned} \quad (3.3)$$

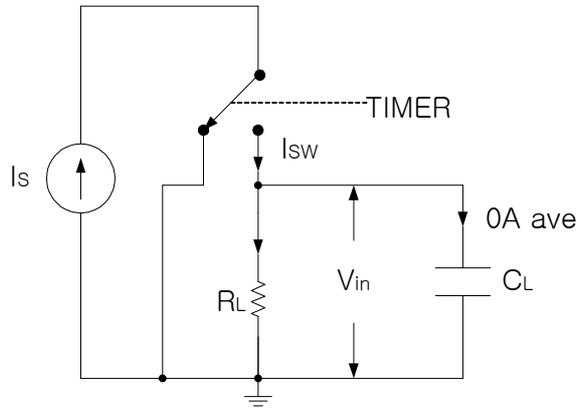


그림 3.6 LM331의 개략도

입력 전압 V_{in} 의 낮은 값에서 좋은 선형성을 얻기 위해서는 리플 전압 ΔV_L 이 아주 작아야 한다. 이것은 시정수 $R_L C_L$ 이 매우 크다는 것을 의미하고 V_{in} 의 변화에 대해서 매우 천천히 변환한다. 리플이 아주 작

으면, V/F의 주파수는 노이즈나 엉뚱한 동작 주파수의 결과로 만들어진 다른 신호와 같은 아주 작은 신호에도 쉽게 반응하게 된다.

그러므로 V_{in} 의 값이 작을 때, 유도된 식은 리플 백터가 추가되기 때문에 비선형 함수가 된다.[16]

이 시스템에서는 입력을 10mV ~ 10V로, 출력을 10Hz ~ 10kHz의 범위에서 사용하였다.

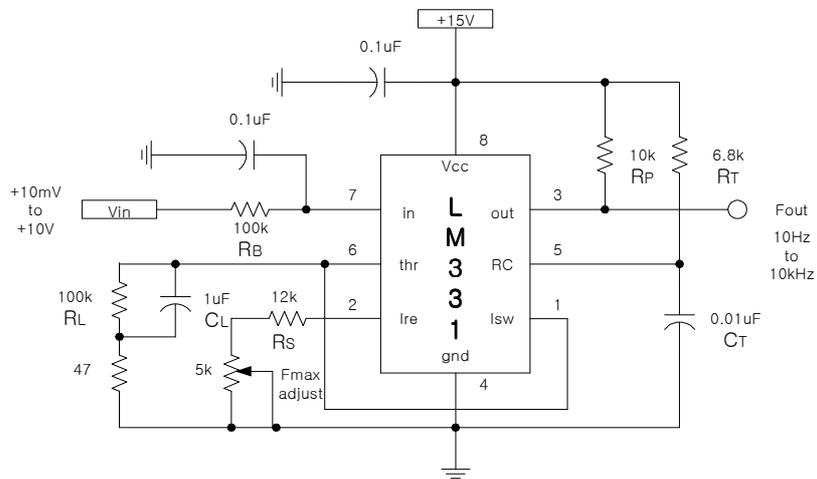


그림 3.7 V/F 컨버터

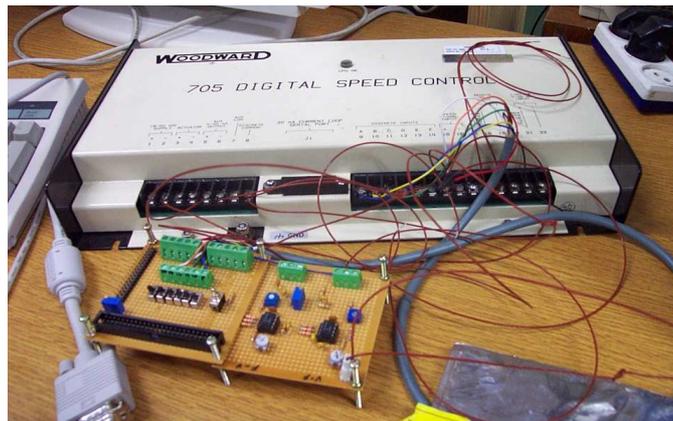


그림 3.8 705 조속기와 V/F 컨버터

제 4 장 시뮬레이션 및 결과

4.1 HIL 시뮬레이션

임베디드 시스템은 안전을 중요시하는 곳에서 많이 사용되고 있다. 임베디드 시스템이 그 운전 환경에서 쉽고, 철저하게 그리고 반복해서 테스트할 수 없을 때, HIL 시뮬레이션은 쉽고, 저렴하며, 반복해서 시스템 레벨 테스트를 수행할 수 있게 해준다.

HIL 시뮬레이션은 임베디드 SUT(System Under the Test)의 특정 부분과 SUT의 운전 환경 그리고 모든 중요한 상호작용을 모델화하는 실시간 시뮬레이션을 요구한다. 이 시뮬레이션은 SUT의 출력 신호를 감시하고 적절한 지점에서 임베디드 시스템에서 발생된 입력 신호들을 종합해서 입력한다. SUT로부터의 출력 신호들은 일반적으로 액츄에이터 명령과 운전자를 위한 표시정보를 포함하고 있다. SUT로 가는 입력은 센서 신호와 운전자로부터의 명령을 포함하고 있다. SUT의 출력은 시뮬레이션에 입력으로서 작용하고 시뮬레이션은 임베디드 시스템에 입력이 되는 출력을 발생한다. 그림 4.1은 HIL 시뮬레이션의 흐름을 보여준다.

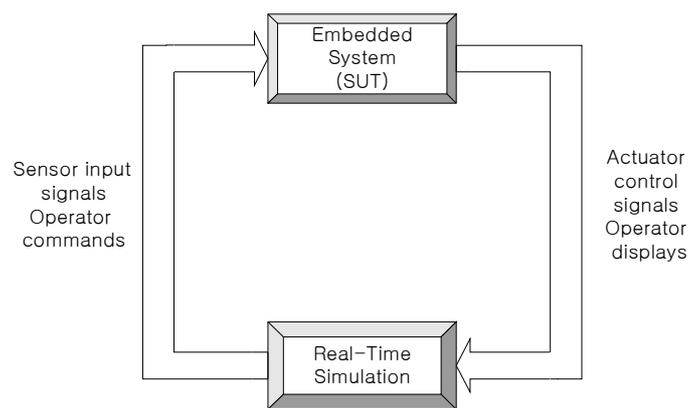


그림 4.1 HIL 시뮬레이션의 흐름도

그림4.1에서 SUT는 센서와 액츄에이터뿐만 아니라 정보를 보고 명령 입력을 받아들이는 운전자 인터페이스를 가지고 있는 것으로 나타나 있다. 이 예에서, 운전자 명령은 테스트하는 동안 SUT를 시뮬레이션 하는 동안 발생된다. 발생된 운전자 명령은 테스트가 수행되는 동안 연속적으로 업데이트가 되고 정확한 반복 테스트를 수행할 수 있다. 즉, 디지털 I/O 카드를 통해 운전자가 시뮬레이션 도중 원하는 입력을 줄 수 있다. 이 모드는 유용성 테스트와 운전자 트레이닝에 사용할 수 있다.

HIL 시뮬레이션 테스트 개념은 방 온도 제어기와 같은 비교적 단순한 장치에서부터 비행기 제어 시스템과 같은 복잡한 시스템까지 광범위하고 다양하게 응용할 수 있다. 이것은 역사적으로 전술상의 미사일, 비행기 제어 시스템, 위성 제어 시스템, 그리고 핵 원자로 제어기와 같은 값비싼 시스템에서 사용되어왔다.

또한 생산품이 생산을 시작한 후에 심각한 문제점들이 발견되는 가능성을 상당히 줄여줄 수 있다. 생산품 개발 시기동안에 설계 최적화와 하드웨어/소프트웨어 디버깅을 실행하는데 유용하게 사용할 수 있다.

하지만 HIL 시뮬레이션에서 시뮬레이션된 환경이 실제의 충분한 표현이라는 것을 증명하는 것이 중요하다. 유용한 결과를 산출하는데 사용되기 전에 시뮬레이션의 옳음과 성능이 충분한지를 기록하고 설명하는 과정으로 verification과 validation이 있다.

verification은 SUT와 그 환경에 대한 수학적 모델들이 정확한지를 설명하는 과정이다. 이 단계는 SUT의 원형이 아직 개발되기 전에 실행할 수 있다. verification은 전형적으로 분석한 계산들 또는 독립적으로 개발된 SUT의 시뮬레이션 결과들을 가지고 HIL 시뮬레이션 결과와 비교하면서 실행된다.

validation의 기본적인 접근법은 시뮬레이션 결과들과 비교하기 위해 실제 시스템 운전상의 테스트 결과를 사용하는 것이다. validation 테스트의 이러한 형태는 운전 환경에서 실제 시스템과 동일한 테스트 시나리

오를 통해 HIL 시뮬레이션에서 임베디드 시스템을 구동하게 된다. 두 테스트의 결과를 비교해서 그 값들이 시뮬레이션과 실제 계 사이에 상당한 편차를 나타낸다면 허용오차 내에 들도록 다시 재조정해야 한다. 운전상의 테스트 결과들이 HIL 시뮬레이션 결과들과 정확히 일치하지 않는다면, 개개의 영역에서 시뮬레이션 모델링의 기능을 향상시키는 것이 필요하다.

시뮬레이션 소프트웨어는 실시간 시뮬레이션을 하는 동안에 필요한 일을 수행하는 코드 부분을 포함하고 있다. HIL 시뮬레이션의 기본 소프트웨어 흐름도가 그림 4.2에 나와 있다. 흐름도에서 나와 있는 것처럼 HIL 시뮬레이션은 세 가지 기본적인 부분으로 나눌 수 있다.

- 시뮬레이션 소프트웨어와 외부 하드웨어의 초기화
- I/O, 시뮬레이션 모델 평가와 상태 변수 적분을 포함하는 동특성 루프
- 시뮬레이션 소프트웨어와 외부의 하드웨어 shutdown

동특성 루프를 통해 각각 통과되는 밑에서 내부 타이머는 다음 프레임 시작의 실행 전에 끝나야한다. 이 간격의 길이 즉 시뮬레이션 프레임 시간으로 알려진 이것은 HIL 시뮬레이션을 위해 중요한 파라미터이다. 프레임 시간은 시뮬레이션 모델 정확성과 수적인 안정성을 유지하기 위해 충분히 짧아야 한다. 동시에 동특성 루프의 I/O 동작과 모든 계산을 완성하기 위한 최악의 경우에 대한 시간을 고려해서 충분히 길어야한다. 너무 짧은 프레임 시간은 계산이 유효한 시간 안에 완성될 수 있도록 하기 위해 시뮬레이션 모델의 간소화를 요구하게 된다. 프레임 시간이 길어짐에 따라 시뮬레이션의 정확성은 낮아진다.

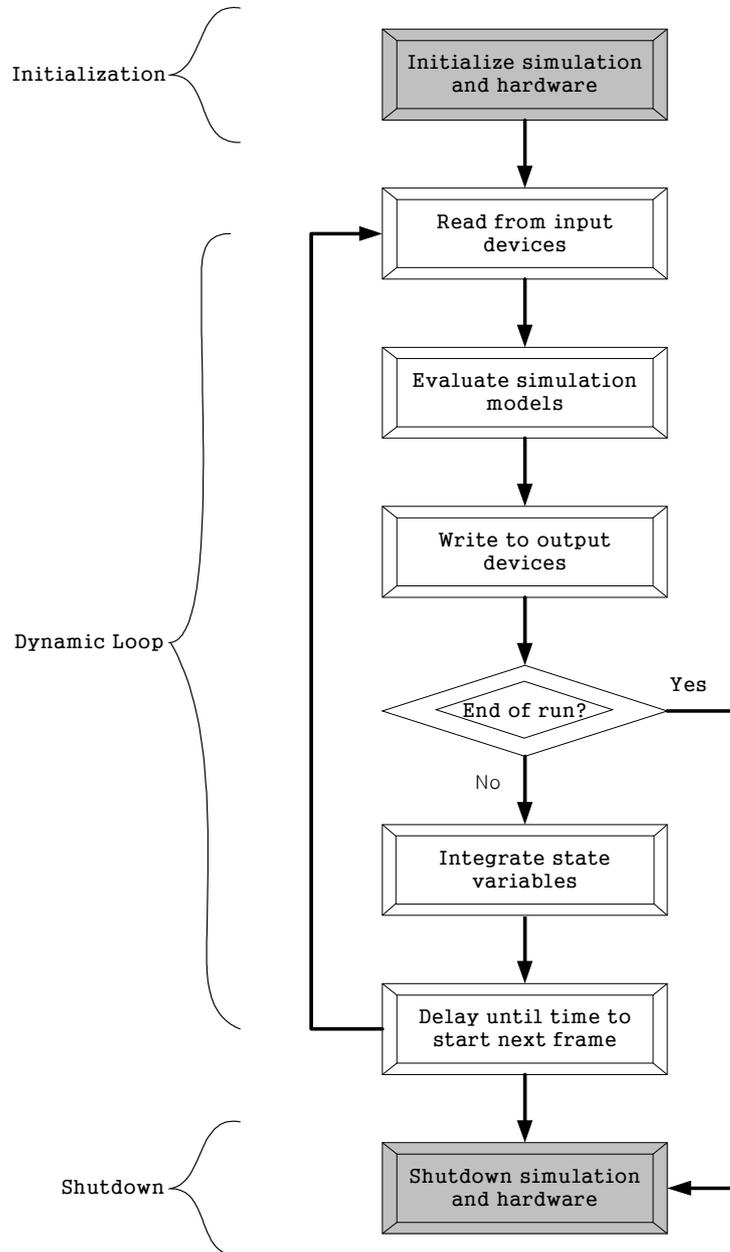


그림 4.2 HIL 시뮬레이션 소프트웨어 흐름도

4.2 시뮬레이터의 내부 구성도

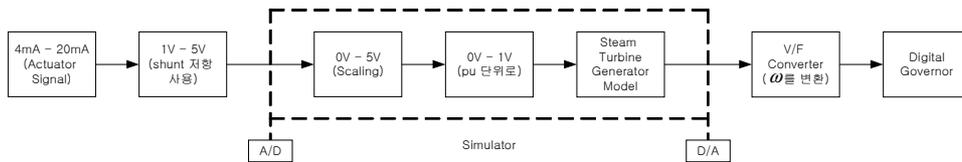


그림 4.3 시뮬레이터의 내부 구성도

디지털 조속기의 액츄에이터 신호는 4~20mA의 전류 신호이기 때문에 이것을 shunt 저항을 사용해서 1~5V의 전압 신호로 변환하였다. 여기서 사용된 모델은 전부 pu단위로 계산이 되기 때문에 다시 0~1V로 변환하기 위해 스케일링 블록을 추가하였다.

그림 4.4는 증기터빈과 발전기를 모델링하여 Matlab/Simulink로 구성한 모델이다. 디지털 조속기의 고장 속도 검출기 때문에 시동 블록을 만들고 디지털 조속기와 증기 터빈 그리고 발전기가 하나의 루프로 연결되어 있다. 제어 방법은 회전속도를 제어하는 방식으로 구성하였다.

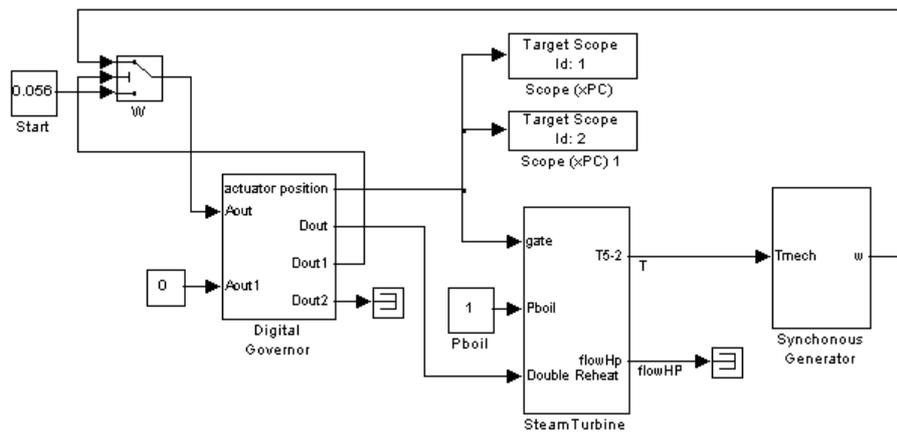


그림 4.4 증기터빈 발전기 모델

4.3 시뮬레이션 및 결과

705 디지털 조속기의 설정값을 표 4.1과 같이 하여 HIL 시뮬레이션을 수행하였다.

2가지를 실험을 하였으며, 먼저 초기 기동에서 Idle 속도로 가는 것과 Idle 속도에서 정격 속도까지 가는 것을 실험하였다. 이때 조속기에서 설정한 설정값으로 가는지 확인하고, 액츄에이터의 변위를 %로 나타내었다.

다음으로 상승율과 하강율을 설정하고 조속기의 디지털 입력을 통해 회전속도를 임의로 상승 및 하강시켰다. 이때의 기울기가 설정값과 같은지 확인하였다. 상승 곡선은 1초당 20 [rpm] 상승하고, 하강 곡선은 1초당 약 31 [rpm]이 하강하도록 설정하였다.

표 4.1 705 디지털 조속기의 초기 설정값

	Setting		Dynamics
Raise limit	2000 [rpm]	Gain 1	0.1379
Lower limit	505 [rpm]	Reset 1	0.06 초
Rated speed	1200 [rpm]	Compensation 1	0.4 초
Idle speed	600 [rpm]	Gain 2	0.10279
Raise rate	1200 [rpm/min]	Reset 2	1.0 초
Lower rate	1854 [rpm/min]	Compensation 2	0.2 초
droop	0 [%]		

여기서 gain, reset 그리고 compensation은 각각 P, I 그리고 D의 이득을 나타낸다. gain은 기준값과 회전속도의 에러를 얼마나 빨리 응답하는지를 조정한다. gain 설정시 무 부하나, 저 부하에서 안정된 제어가 되도록 미리 설정한다. reset는 응답지연을 보상한다. 부하변동 후 에러가 0이 될 때까지의 시간을 조정한다. 즉, slow hunting을 방지하고 overshoot을 보상한다. compensation은 속응성을 높이는데 사용된다.

그림 4.5와 4.6은 조속기에서 설정한 600rpm의 Idle 속도와 1200rpm의 정격 속도가 시뮬레이터에서 출력되는지 실험한 것이다. 액츄에이터 변위가 변하더라도 회전속도는 일정 시간이 지난 뒤에 출력하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 증기터빈의 증기 체스터와 여러 파이프라인에 의한 시간 지연 때문이다.

본 논문에서는 증기터빈의 시정수를 짧게 주어 응답이 빠른 시스템으로 모델링하였다. 조속기의 PID 게인 값은 많은 실험결과에 따른 경험적인 값을 사용하였으며, 정격 속도에서의 응답은 오버슈트나 오프셋이 거의 없는 양호한 출력을 얻었다.

그림 4.7과 4.8은 조속기의 디지털 입력 스위치를 통해 시뮬레이터에 임의의 원하는 입력을 주었을 때 그 출력이 제대로 나오는지 확인한 것이다. 터빈 회전속도가 1200rpm으로 동작시 액츄에이터는 약 12%의 개방도를 보이고 있다. 약 46초 될 때 1200rpm/min의 상승 기울기를 입력으로 주고, 8초 후 스위치를 닫게 되면 터빈은 1340rpm이 되고 13.4%까지 개방하는 것을 알 수 있다. 다시 1854rpm/min의 하강 기울기를 입력으로 주게 되면 초당 약 31rpm씩 하강하는 것을 알 수 있다.

이를 토대로 시뮬레이터가 양호하게 동작하는 것을 확인하였다.

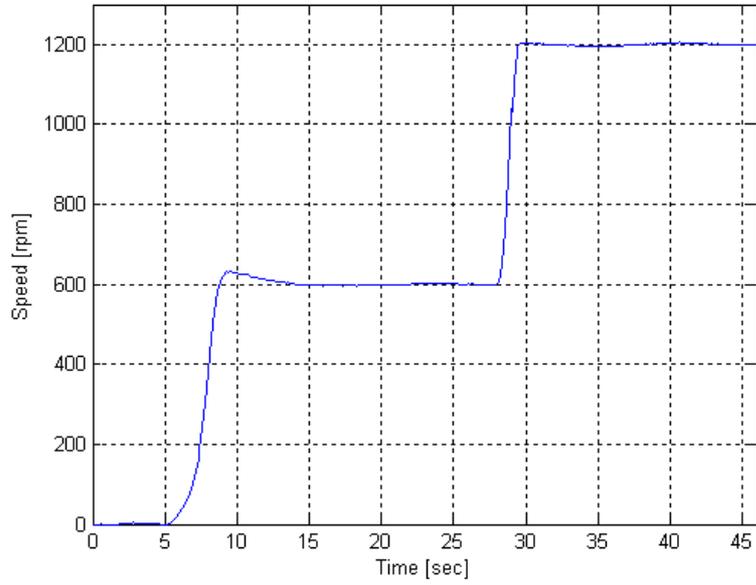


그림 4.5 Idle-Rated 터빈 회전속도

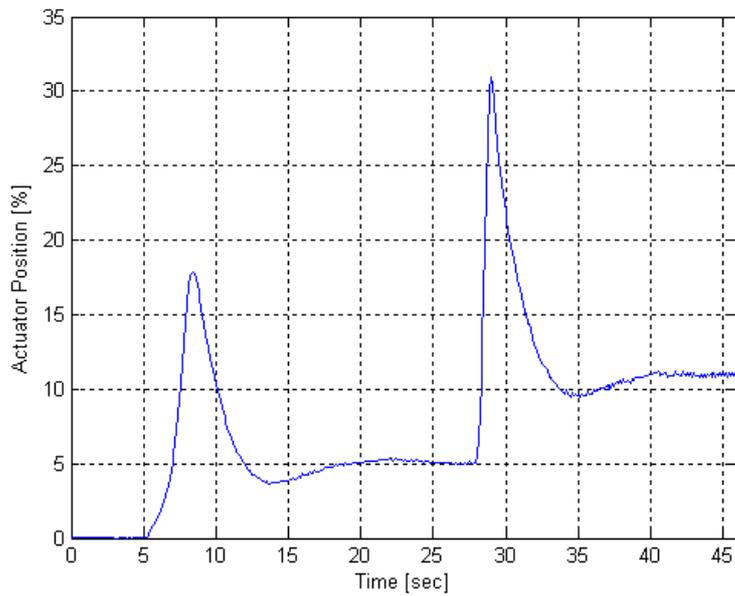


그림 4.6 액츄에이터 변위

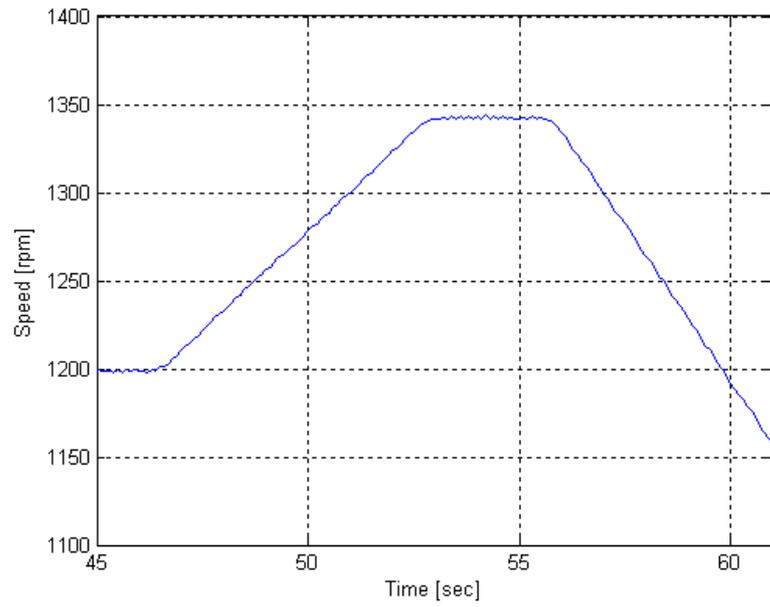


그림 4.7 터빈 회전속도 상·하강시 기울기

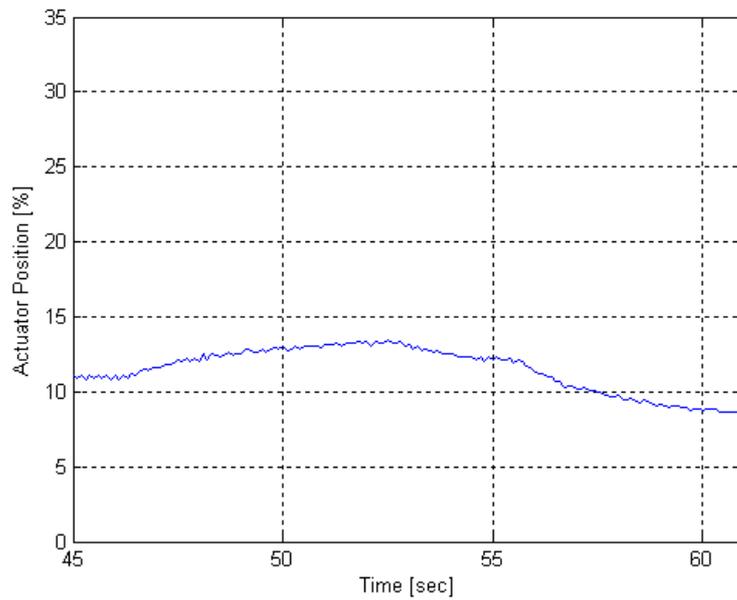


그림 4.8 상하강 조작에 따른 액츄에이터 변위

제 5 장 결 론

본 논문에서는 HIL 시뮬레이션을 이용한 증기터빈 발전기 시뮬레이터를 개발하였다. 이러한 시뮬레이터 개발은 제어시스템을 증기터빈 발전기에 물리적으로 결합시키지 않더라도 제어시스템을 조정하거나 그 기능을 확인하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 실제의 증기터빈 시스템을 구축하지 않더라도 가상 터빈 시스템 형태를 구성할 수 있다.

시뮬레이터는 산업용 마이크로 프로세서를 이용하여 메모리에 탑재된 운영 체제하에서 응용프로그램이 수행되며, 이 응용프로그램에는 증기터빈의 모델이 적용되어 터빈의 운전을 그대로 시뮬레이션 할 수 있다.

개발된 시뮬레이터와 디지털 조속기를 연결하여 HIL 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증기터빈 발전기 시뮬레이터를 개발하기 위해 직렬형 재열 터빈 시스템의 모델링을 행하였으며, 이와 더불어 경험적으로 PID 게인 값을 선정하였다.
2. 시뮬레이터 모델의 정상적인 동작을 확인하기 위해서 Matlab 계열군의 하나인 xPC Target으로 시스템을 제작하였으며, 디지털 조속기와 함께 속도 신호와 액츄에이터 변위 신호를 주고받는 HIL 시뮬레이션을 제안하였다.
3. 조속기에서 설정한 600rpm의 Idle 속도와 1200rpm의 정격 속도가 오버슈트나 오프셋이 거의 없이 출력되며, 증기터빈의 증기 체스터와 여러 파이프라인에 의한 시간 지연을 확인하였다.
4. 1200rpm 동작시 액츄에이터는 약 12%의 개방도를 보이고 있다가 속

도를 1200rpm/min으로 상승하라는 명령을 받았을 때, 7초 동안 1340rpm으로 상승하는 것을 확인하였다. 이 후 1854rpm/min의 하강 기율을 주었을 때, 초당 약 31rpm의 기율기로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 증기터빈 발전기 시뮬레이터를 개발하는데 있어서 디지털 조속기와 함께 HIL 시뮬레이션을 이용하여 그 효용성을 확인하였다. 각 모델에 대한 수학적 모델이 좀 더 구체화된다면 보다 나은 응답을 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 다른 종류의 터빈 시스템 시뮬레이터 개발을 앞으로의 연구과제로 남겨둔다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사, "삼천포연수원, 발전 기초 II", 한국전력공사, 1995.
- [2] 장민규외 7인, "디지털 조속기의 성능 시험을 위한 HILS 시스템 개발에 관한 연구", 한국해양정보통신학회, Vol. 7, No. 1, pp. 317-319, 2003.
- [3] 전일영, "발전용 증기 터빈의 디지털 조속기 시스템 설계 및 적용에 관한 연구", 한국해양대학교, 석사학위논문, 1999.
- [4] 박도영외 6인, "상용차용 ABS ECU의 성능시험을 위한 HILS 시스템 개발", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 연구기관 특별 Session, pp. 104-106.
- [5] 김성덕, "제어시스템 해석", 북두출판사, 1999.
- [6] A. W. Ordys, A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi and M. J. Grimble, "Modelling and Simulation of Power Generation Plants", Great Britain, 1994.
- [7] IEEE Std 122-1991, "IEEE Recommended Practice for Functional and Performance characteristics of Control Systems for Steam Turbine-Generator Units", Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991.
- [8] IEEE Power System Engineering Committee Report, "Dynamic models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, Nov./Dec., pp. 1904-1915, 1973.

- [9] IEEE Power System Engineering Committee Report, "Dynamic models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, Nov./Dec., pp. 1904-1915, 1973.
- [10] T.J. Hammons, R.J. Fleming and M.H. Ewer "Bibliography of literature on steam turbine-generator control systems", IEEE committee report, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-109, (9), pp. 2959-2970, 1983.
- [11] 문영현 외 4, "전력 시스템 공학", 사이텍미디어, 1998.
- [12] 장도현외 3인 공역, "전기기공학", 사이텍미디어, 1998.
- [13] "Modeling and Control of a Synchronous Generator with Electronic Load", Ivan Jadric, <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-22198-124235/unrestricted/etdtext.pdf>.
- [14] Kyung-Sun Choi, "A study on the modeling of generator control sytem using load rejection Test & Enhancement of power system stability by Fuzzy-Pss", 영남대학교, 석사학위 논문, 1998.
- [15] P. A. E Rusche. PE, Gregory J Brock, Louis N hannett, Johnny R Willis, "Test and Simulation of Network Dynamic Response Using SSFR and RIDR Derived Synchronous Machine Models", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 5, No. 1, March 1990, pp. 145-151.
- [16] <http://elearning.algonquincollege.com/coursemat/saurioc/ELE-3/ELE-3-NOTES/V-F-CONVERTER.pdf>.