



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

# 석유시추선의 전력계통 설계 및 해석

A Study on the Design and Analysis for Electric Power System  
of Drilling Rig using ETAP

指導教授 金潤植

2013年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

김철호

本 論 文 을 김철호의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 李 成 根



委 員：工學博士 權 寧 勳



委 員：工學博士 嚴 相 五



委 員：工學博士 徐 東 煥



委 員：工學博士 金 潤 植



2012年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

김 철 호

# 목 차

목 차 .....	i
표 목차 .....	iii
그림 목차 .....	v
Abstract .....	xii
1. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 동향 1 .....	
1.2 연구목적과 구성 .....	1
2. 석유시추선의 전력계통 .....	3
2.1 전력계통의 구성 .....	3
2.1.1 시추선의 기준 모델 .....	5
2.2 부하의 구성 .....	6
2.3 운전 모드 .....	6
2.3.1 이동 모드 .....	7
2.3.2 시추 모드 1 .....	7
2.3.3 시추 모드 2 .....	8
2.3.4 리밍 모드 .....	8
3. 전력계통의 해석 .....	9
3.1 전력조류방정식 .....	9
3.2 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법 .....	15
3.3 발전기 모델 .....	17
3.3.1 여자기(Exciter) .....	20
3.3.2 조속기(Governor) .....	23
3.3.3 발전기 운전정보 .....	26
3.4 변압기 모델 .....	33
3.4.1 2권선 변압기 .....	34
3.4.2 3권선 변압기 .....	35

3.4.3 변압기 운전정보 .....	37
3.5 전동기 모델 .....	41
3.5.1 유도전동기 .....	41
3.5.2 유도전동기 운전정보 .....	45
3.6 Lumped load .....	47
4. 전력조류 시뮬레이션 및 결과 .....	49
4.1 분석조건 및 기준 .....	49
4.1.1 분석조건 .....	49
4.1.2 분석기준 .....	49
4.2 분석결과 .....	50
4.2.1 모선의 운전전압 .....	50
4.2.2 변압기 여유율 .....	52
4.2.3 운전 모드별 전력조류 .....	53
5. 비상시 전력계통해석 .....	58
5.1 발전기 및 부하의 탈락 .....	59
5.1.1 추진부하의 탈락 .....	59
5.1.2 발전기 1대의 탈락 .....	69
5.1.3 발전기 2대의 탈락 .....	76
5.1.4 고압모선의 3상 단락 .....	80
5.2 단락전류계산 .....	85
5.2.1 단락전류계산 .....	85
5.2.2 고장유형 .....	88
6. 결 론 .....	93

## 표 목차

표 2.1 시추선의 기준 모델	
Table 2.1 Base model of drilling rig	5
표 2.2 전체 부하율(단위 kVA)	
Table 2.1 Load factor(unit : kVA)	6
표 2.3 이동 모드의 부하 구성비	
Table 2.2 Load configuration in transit mode	7
표 2.4 시추 모드 1의 부하 구성비	
Table 2.3 Load configuration in drilling mode 1	7
표 2.5 시추 모드 2의 부하 구성비	
Table 2.4 Load configuration in drilling mode 2	8
표 2.6 리밍 모드의 부하 구성비	
Table 2.5 Load configuration in reaming mode	8
표 3.1 전력계통해석시 모선의 종류	
Table 3.1 Bus types in power system analysis	14
표 3.2 동기발전기의 직축 및 횡축 정수	
Table 3.2 Synchronous generator parameters of $d$ -axis and $q$ -axis	19
표 3.3 IEEE type AC8B 여자시스템 제 정수	
Table 3.3 Parameters of IEEE type AC8B exciter	22
표 3.4 Woodward 조속기 2301의 제 정수	
Table 3.4 Woodward Governor 2301 parameters	25
표 4.1 분석기준	
Table 4.1 Analysis limits and standards	50
표 4.2 운전 모드별 모선의 운전전압	
Table 4.2 Bus voltage in 4 operating modes	51
표 4.3 운전 모드별 변압기 여유율	
Table 4.3 Transformer loading in 4 operating modes	52
표 5.1 3상 단락전류 계산결과	
Table 5.1 Calculation result of 3phase fault current	88
표 5.2 저압 서비스모선의 단락전류 구성	
Table 5.2 Short circuit current of low voltage service feeder	89

표 5.3 1선 지락전류 계산결과

Table 5.2 Calculation result of line-to-ground fault current .....91

표 5.4 2선 지락전류 계산결과

Table 5.3 Calculation result of line-to-line-to-ground fault current ...91



## 그림 목차

그림 2.1 일반적인 시추선의 4분화 모선의 구성	
Fig. 2.1 4-split bus configuration for drilling rig	3
그림 2.2 시추용 저압 교류 구동부의 구성	
Fig. 2.2 Low voltage AC multidrive for drilling	4
그림 3.1 송전선로의 등가회로	
Fig. 3.1 Equivalent circuit of transmission line	10
그림 3.2 변압기 탭의 등가회로	
Fig. 3.2 Equivalent circuit of transformer tap	12
그림 3.3 동기발전기의 등가회로	
Fig. 3.3 Equivalent circuit of synchronous generator	17
그림 3.4 단락시 동기기 리액턴스의 시간적 변화	
Fig. 3.4 Time-varying synchronous machines reactances at bolted-fault	18
그림 3.5 발전기의 여자시스템 블록도	
Fig. 3.5 Block diagram of exciter system for generator	20
그림 3.6 IEEE type AC8B 제어 블록도	
Fig. 3.6 Control block diagram of IEEE type AC8B	21
그림 3.7 조속기의 제어 블록도	
Fig. 3.7 Control block diagram of governor	23
그림 3.8 Droop 모드의 동작특성	
Fig. 3.8 Operating characteristic in droop mode	24
그림 3.9 Woodward 조속기 2301 제어 블록도	
Fig. 3.9 Control block diagram of Woodward governor 2301	26
그림 3.10 발전기의 Information	
Fig. 3.10 Information of generator	27
그림 3.11 발전기의 정격	
Fig. 3.11 Rating of generator	28
그림 3.12 발전기 특성곡선	
Fig. 3.12 Capability curve of generator	29
그림 3.13 발전기의 성능곡선	
Fig. 3.13 Capability input of generator	30

그림 3.14 발전기의 임피던스	
Fig. 3.14 Impedance of generator	31
그림 3.15 발전기의 여자기	
Fig. 3.15 Exciter of generator	32
그림 3.16 발전기의 조속기	
Fig. 3.16 Governor of generator	33
그림 3.17 변압기의 등가회로	
Fig. 3.17 Equivalent circuit of transformer	34
그림 3.18 2차 측을 1차 측으로 변환된 등가회로	
Fig. 3.18 Equivalent circuit that was converted the secondary side to the primary side	35
그림 3.19 간략화된 변압기 등가회로	
Fig. 3.19 Simplified equivalent circuit of transformer	35
그림 3.20 3권선 변압기 회로	
Fig. 3.20 Circuit of 3 winding transformer	36
그림 3.21 3권선 변압기의 임피던스 등가회로	
Fig. 3.21 Equivalent impedance circuit of 3 winding transformer	36
그림 3.22 변압기의 Information	
Fig. 3.22 Information of transformer	37
그림 3.23 2권선 변압기의 정격	
Fig. 3.23 Rating of 2 winding transformer	39
그림 3.24 3권선 변압기의 정격	
Fig. 3.24 Rating of 3 winding transformer	40
그림 3.25 변압기와 유도전동기	
Fig. 3.25 Transformer and induction motor	42
그림 3.26 유도전동기의 출력과 손실	
Fig. 3.26 Output and losses of induction motor	42
그림 3.27 유도전동기의 근사등가회로	
Fig. 3.27 Approximated equivalent circuit of induction motor	43
그림 3.28 유도전동기의 토크-속도 특성	
Fig. 3.28 Torque-speed characteristic of induction motor	44
그림 3.29 유도전동기의 운전 모드	
Fig. 3.29 Operation modes of induction motor	45

그림 3.30 유도전동기의 Information	
Fig. 3.30 Information of induction motor	46
그림 3.31 유도전동기의 명판	
Fig. 3.31 Nameplate of induction motor	47
그림 3.32 일괄부하의 정격	
Fig. 3.32 Rating of lumped load	48
그림 4.1 이동 모드 전력조류 분석결과	
Fig. 4.1 Load flow analysis result in transit mode	53
그림 4.2 시추 모드 1 전력조류 분석결과	
Fig. 4.2 Load flow analysis result in drilling mode 1	54
그림 4.3 시추 모드 2 전력조류 분석결과	
Fig. 4.3 Load flow analysis result in drilling mode 2	55
그림 4.4 리밍 모드 전력조류 분석결과	
Fig. 4.4 Load flow analysis result in reaming mode	56
그림 5.1 추진부하 2대 탈락시	
Fig. 5.1 Load elimination of 2 thrusters	59
그림 5.2 추진부하 2대 탈락시의 HV 모션전압(개루프제어)	
Fig. 5.2 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)	60
그림 5.3 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(개루프제어)	
Fig. 5.3 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)	61
그림 5.4 추진부하 2대 탈락시 발전기속도(개루프제어)	
Fig. 5.4 Generator speed when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)	62
그림 5.5 추진부하 2대 탈락시 발전기전류, time=0~10secs(개루프제어)	
Fig. 5.5 Generator terminal current at time=0~10secs when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)	62
그림 5.6 추진부하 2대 탈락시 발전기전류, time=0~3secs(개루프제어)	
Fig. 5.6 Generator terminal current at time=0~3secs when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)	63

그림 5.7 추진부하 2대 탈락시 HV 모션전압(조속기)	
Fig. 5.7 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated with governor	64
그림 5.8 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(조속기)	
Fig. 5.8 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated with governor	64
그림 5.9 추진부하 2대 탈락시 발전기속도(조속기)	
Fig. 5.9 Generator speed when 2 thrusters were eliminated with governor	65
그림 5.10 추진부하 2대 탈락시 발전기전류(조속기)	
Fig. 5.10 Generator terminal current when 2 thrusters were eliminated with governor	65
그림 5.11 추진부하 2대 탈락시 HV 모션전압(조속기조정)	
Fig. 5.11 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated with adjusted governor	66
그림 5.12 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(조속기조정)	
Fig. 5.12 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated with adjusted governor	67
그림 5.13 추진부하 2대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)	
Fig. 5.13 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated (closed-loop control)	68
그림 5.14 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(폐루프제어)	
Fig. 5.14 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated (closed-loop control)	68
그림 5.15 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(개루프제어)	
Fig. 5.15 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated(open-loop control)	69
그림 5.16 발전기 1대 탈락시 HV 모션주파수(개루프제어)	
Fig. 5.16 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated(open-loop control)	70
그림 5.17 발전기 1대 탈락시 발전기속도(개루프제어)	
Fig. 5.17 Generator speed when 1 generator was eliminated(open-loop control)	70

그림 5.18 발전기 1대 탈락시 발전기전류(개루프제어)	
Fig. 5.18 Generator terminal current when 1 generator was eliminated (open-loop control)	71
그림 5.19 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)	
Fig. 5.19 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated(closed-loop control)	72
그림 5.20 발전기 1대 탈락시 HV 모션주파수(폐루프제어)	
Fig. 5.20 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated (closed-loop control)	72
그림 5.21 발전기 1대 탈락시 발전기속도(폐루프제어)	
Fig. 5.21 Generator speed when 1 generator was eliminated(closed-loop control)	73
그림 5.22 발전기 1대 탈락시 발전기전류(폐루프제어)	
Fig. 5.22 Generator terminal current when 1 generator was eliminated (closed-loop control)	73
그림 5.23 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(조속기조정)	
Fig. 5.23 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated with adjusted governor	74
그림 5.24 발전기 1대 탈락시 HV 모션주파수(조속기조정)	
Fig. 5.24 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated with adjusted governor	75
그림 5.25 발전기 1대 탈락시 발전기속도(조속기조정)	
Fig. 5.25 Generator speed when 1 generator was eliminated with adjusted governor	75
그림 5.26 발전기 1대 탈락시 발전기전류(조속기조정)	
Fig. 5.26 Generator terminal current when 1 generator was eliminated with adjusted governor	76
그림 5.27 발전기 2대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)	
Fig. 5.27 HV feeder voltage when 2 generators were eliminated (closed-loop control)	77
그림 5.28 발전기 2대 탈락시 HV 모션주파수(폐루프제어)	
Fig. 5.28 HV feeder frequency when 2 generators were eliminated (closed-loop control)	78

그림 5.29 발전기 2대 탈락시 발전기속도(폐루프제어)	
Fig. 5.29 Generator speed when 2 generators were eliminated(closed-loop control)	78
그림 5.30 발전기 2대 탈락시 발전기전류(폐루프제어)	
Fig. 5.30 Generator terminal current when 2 generators were eliminated (closed-loop control)	79
그림 5.31 발전기 2대 탈락시 발전기전력(폐루프제어)	
Fig. 5.31 Generator electrical power when 2 generators were eliminated (closed-loop control)	79
그림 5.32 3상 단락사고시 HV 모션전압(폐루프제어)	
Fig. 5.32 HV feeder voltage when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)	80
그림 5.33 3상 단락사고시 HV 모션주파수(폐루프제어)	
Fig. 5.33 HV feeder frequency when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)	81
그림 5.34 3상 단락사고시 발전기속도(폐루프제어)	
Fig. 5.34 Generator speed when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)	82
그림 5.35 3상 단락사고시 발전기전류(폐루프제어)	
Fig. 5.35 Generator terminal current when 3 phase fault occur at HV feeder(closed-loop control)	82
그림 5.36 3상 단락사고시 HV 모션전압(조속기조정)	
Fig. 5.36 HV feeder voltage when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor	83
그림 5.37 3상 단락사고시 HV 모션주파수(조속기조정)	
Fig. 5.37 HV feeder frequency when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor	84
그림 5.38 3상 단락사고시 발전기속도(조속기조정)	
Fig. 5.38 Generator speed when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor	84
그림 5.39 3상 단락사고시 발전기전류(조속기조정)	
Fig. 5.39 Generator terminal current when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor	85

그림 5.40 3상 단락전류  
Fig. 5.40 3 phase fault current .....89  
그림 5.41 1선 지락전류  
Fig. 5.41 Line-to-ground fault current .....90  
그림 5.42 2선 지락전류  
Fig. 5.42 Line-to-line-to-ground fault current .....92



# A Study on the Design and Analysis for Electric Power System of Drilling Rig using ETAP

Chul-Ho, Kim

*Department of Electric and Electronic Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University*

## Abstract

As electricity has been used in ship's propulsion, it is necessary to increase the system voltage and current for the electrical distribution system. So it is required to improve the system safety and efficiency, the power stability, the efficiency of the generation through various analysis of ship's electric power system. In this paper, the electrical service reliability of the power distribution system of Semi Submersible Drilling Rigs(SSDRs) has been analysed and discussed using Electrical Transient Analysis Program(ETAP).

In the case of Semi Submersible Drill Rigs that are being used in most of the deepwater drilling operations, it can move by thrusters with Dynamic Positioning System(DPS), and has equipped a drilling packages like pumps, pipes and drills.

The electrical distribution system of Drilling rigs is quite similar to typical redundancy system of electric propulsion ships made for transportation. However it is required the electrical distribution system

of 2 to 4 split bus or more because of the severe marine environment, the hazards of fire and explosion, 24-hours operation, the standards and regulations related to oil and gas drilling. There are some more difficulties in design and engineering of the off-shore plants electric power system because it is required more severe and strict conditions.

In this paper, to verify the stability of designed power system, the power system of SDRs is modeled at first and load flow is analysed on each operational mode and also analysed on transient characteristics due to start/stop action between generators and loads. On the basis of the analysis the voltage variation in the distribution feeder is discussed.

As a result, the load flow analysis shows the reasonable result with appropriate load distribution and the capacity of generators and transformers are enough to feed the maximum load. The capacity of generators and transformers have an acceptable margin for future load and emergency load.



# 1. 서론

## 1.1 연구배경 및 동향

산업플랜트 또는 육상에서의 전력계통설계란 무한대의 용량으로 여겨지는 국가의 기간 전력망으로부터 수전하는 것이 통상적이다. 상용전원으로부터 공급받는 경우 전체 부하의 규모를 결정하고 배전 및 수전, 비상용 전원시설 등에 대한 설계가 이루어진다. 그러나 전기에너지는 육상에서만 필요한 것이 아니라 석유 또는 해양자원을 채취하는 해양플랜트, 운송 및 수송 등에 사용하는 LNG 수송선, 원유수송선, 해양조사선 등 다양한 해양구조물 등에도 전력을 필요로 한다. 이러한 해양구조물은 육상과 달리 발전과 배전 그리고 부하에 대한 종합적인 설계가 이루어져야 하는 차이점이 있다. 그러나 해양에서의 구조물은 자체가 제한적인 공간을 가질 수밖에 없으며 육상에 비해 더 열악한 전기적, 기후적 조건 등을 가지므로 전력계통의 설계에 더욱 더 많은 제약이 따른다. 1940년대에 선박의 추진시스템에 전기를 사용한 이후 최근 들어 점점 더 많은 대형선박 등의 배전계통전압이 점점 높아져 가고 있다. 조선 강국인 우리나라의 조선건조능력은 세계적이지만 설계분야는 그에 미치지 못하는 것이 현실이다. 대표적 해양플랜트인 석유시추선은 원유가의 상승과 근해의 화석자원의 고갈 등으로 인하여 최근 관심이 높아지고 있다. 그 비용도 천문학적인 만큼 전력계통의 설계 및 검증이 반드시 필요하다 할 것이다.

## 1.2 연구목적과 구성

전력계통의 설계는 획일적이고 직관적인 것이 아니므로 많은 반복적인 계산과 검토를 통하여 시행착오를 겪어야 완성되는 일련의 과정이다. 본 논문에서는 이러한 시행착오를 줄이기 위한 방안으로 석유시추선의 전력계통에 대한 설계와 검증에 있어 반드시 필요한 전력계통에 대한 전력조류분석과 과도상태해

석 등을 수행하고 그 결과를 바탕으로 계통의 신뢰도와 안정성 등을 검증하며 단락전류계산을 함께 수행하여 분석한다.

계산 및 해석 등에는 전력계통의 과도현상해석 프로그램인 Electrical Transient Analysis Program(ETAP)을 사용하여 수치해석의 결과 및 특성을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경과 동향, 연구목적 및 논문구성에 대해 기술하였다.

2장에서는 석유시추선의 전원 및 부하의 구성에 대하여 서술하였으며 3장에서는 전력계통해석에 필요한 전력조류계산 및 수치해석 알고리즘인 뉴턴-랩슨 법에 대하여 기술하였다. 또한 전력계통을 구성하고 있는 발전기, 변압기, 전동기 등에 대하여 수학적 모델을 설명하였고 4장에서는 전력조류분석을 수행하고 그 결과에 대하여 검토하였다.

5장에서는 각각 비상시 전력계통에 대한 해석과 단락전류계산을 수행하고 그 결과를 보였다. 마지막으로 6장에서는 검토된 모든 분석 및 결과를 정리하였으며 미래의 연구과제에 대하여 언급하였다.



## 2. 석유시추선의 전력계통

### 2.1 전력계통의 구성

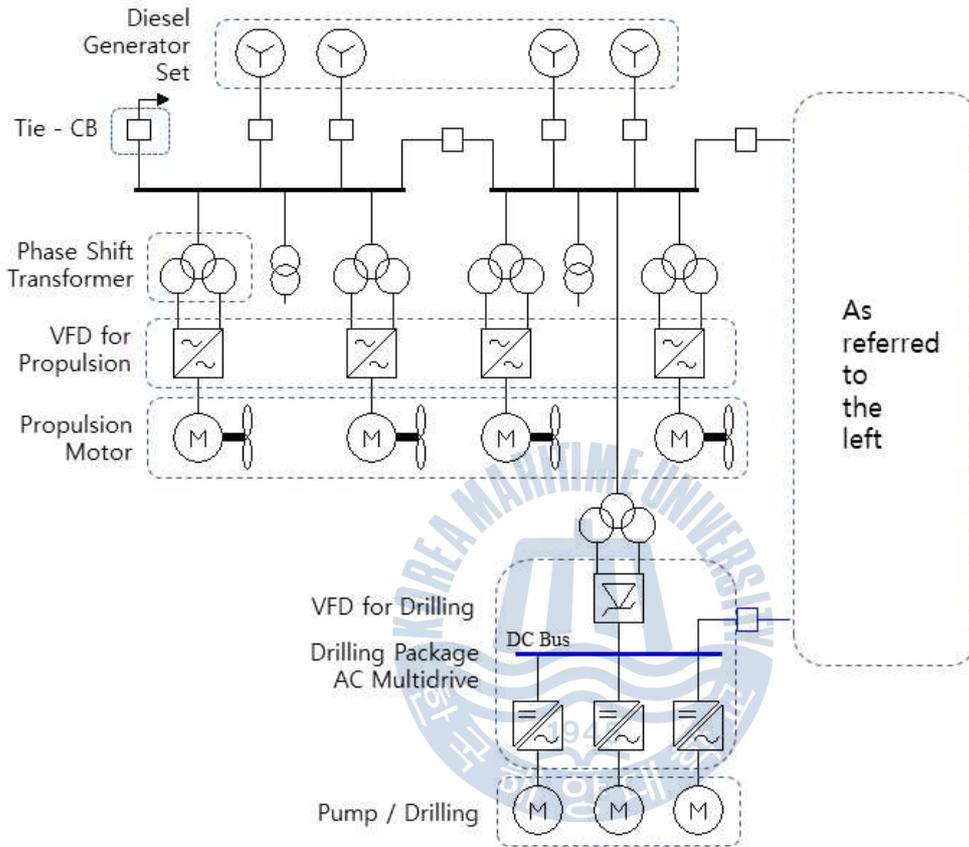


그림 2.1 일반적인 시추선의 4분화 모선의 구성  
Fig. 2.1 4-split bus configuration for drilling rig

일반적인 석유시추선의 4분화 모선의 구성도를 그림 2.1에 나타내었다. 발전기는 디젤 엔진을 사용한 디젤-발전기 세트를 사용하여 한 모선 당 2기의 발전기를 배치하고 전체를 4개의 모선으로 나누어 배전체계를 구성한다. 발전전

압은 부하 규모에 따라 0.69kV, 3.3kV, 6.6kV, 11kV등으로 적절히 구분된다.

부하의 종류는 크게 이동과 Dynamic positioning system(DPS)에 관련된 추진부하와 시추 및 굴착에 관련된 시추부하 그리고 기타 서비스부하로 나뉘어진다. 특히 추진부하는 다른 전기추진선박과 같이 전체 부하 중 60%를 넘어서는 많은 부분을 차지하고 있으므로 고효율, 고역률 운전이 가능한 Insulated gate bipolar transistor(IGBT), Thyristor 등의 전력용 반도체를 사용한 Variable Frequency Drive(VFD)등을 사용한다. 변압기는 VFD용으로 위상천이(Phase shift)용 3권선 변압기를 추진 모터와 1:1로 구성한다.

서비스부하에 공급하는 전력은 2권선 변압기를 통하여 다양한 교류 저압으로 변성하여 공급한다. 시추부하 또한 VFD등으로 구성하지만 추진부하와 달리 3 권선 변압기를 2중화하여 설치한다. 그림 2.2와 같이 AC multidrive system은 2대의 위상천이용 3권선 변압기를 통하여 AC/DC 변환을 거쳐 2분화된 DC 모 선을 통하여 다수의 시추 장비에 DC/AC 인버터를 사용하여 전력을 공급하는 시스템이다.

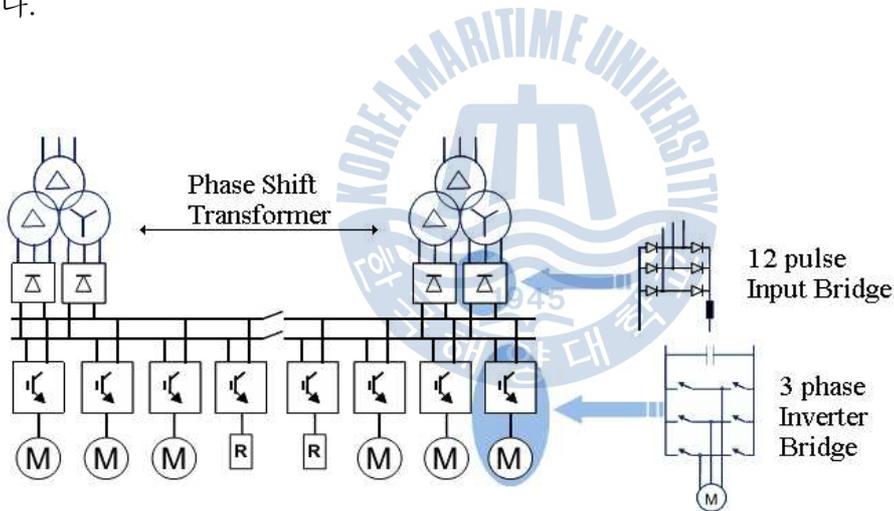


그림 2.2 시추용 저압 교류 구동부의 구성  
Fig. 2.2 Low voltage AC multidrive for drilling

### 2.1.1 시추선의 기준 모델

본 논문에서 구성한 전력계통의 기준이 되는 시추선 모델의 사양은 표 2.1과 같다. 시추선의 크기는 가로 89m, 세로 70m이며 배수량은 53,000mt, 추진기는 3.5MW×8대, 클래스는 DPS-3이며 속력은 8knots이다.

표 2.2 시추선의 기준 모델

Table 2.1 Base model of drilling rig

Classification	Huisman JBF 14000 Semi submersible drilling unit		Remarks
<b>General</b>			
Maximum water depth	4,270 [m]	14,000 [ft]	
Max. drilling depth from water line	12,190 [m]	40,000 [ft]	
Class notation	ABS, DPS-3		
<b>Main dimensions</b>			
Length deck box	89.0 [m]	292 [ft]	
Width deck box	69.6 [m]	228 [ft]	
Height deck box	9.6 [m]	32 [ft]	
Length under water pontoons	110.4 [m]	362 [ft]	
Deck area	4,200 [sq m]	45,200 [sq ft]	
Displacement at operational draught	53,000 [mt]	58,400 [st]	
<b>Marine systems</b>			
Main engines	8 x 4.8 [MW]	8 x 6485 [HP]	
Total installed engine power	38.7 [MW]	51,800 [HP]	
Thrusters, azimuth	8 x 3.5 [MW]	8 x 4690 [HP]	
Total installed thrusters power	28.0 [MW]	37,500 [HP]	
Service speed	8 [knots]		

## 2.2 부하의 구성

서비스부하는 조명, 공조, 저압배전 등 시추부하와 추진부하를 제외한 모든 부하이다. 시추부하는 시추에 사용되는 승강설비, 머드펌프와 관련 보조설비 부하이다. 추진부하는 추진 모터 외 관련 보조설비(냉각, 윤활 등)이다. 표 2.1에 전체 부하에 대한 부하율과 발전용량을 나타내었다.

표 2.3 전체 부하율(단위 kVA)

Table 2.1 Load factor(unit : kVA)

구 분	이동 모드	시추 모드 1	시추 모드 2	리밍 모드
서비스부하	6,222	8,818	8,818	9,044
시추부하	0	5,250	5,250	4,050
추진부하	13,568	13,568	21,712	21,712
부하 합계	19,790	27,636	35,780	34,806
발전기 수량	6	6	8	8
발전용량	34,668	34,668	46,224	46,224
부하율(%)	57.1	79.7	77.4	75.3

## 2.3 운전 모드

시추선의 운전 모드는 여러 가지가 있겠지만 본 논문에서는 계통의 안정성을 우선하므로 최소 부하와 최대 부하를 포함한 4가지의 운전 모드에 대해서만 고려한다.

### 2.3.1 이동 모드

이동 모드는 목적지까지의 이동에 소요되는 운전 모드이며 일부의 추진부하 13,568kVA와 서비스부하 일부 6,222kVA만이 전력을 필요로 한다. 이동 모드는 최소 부하 운전이며 전체 부하에 대한 발전기의 부하율은 57.1%이다.

표 2.4 이동 모드의 부하 구성비

Table 2.2 Load configuration in transit mode

구 분	서비스부하	시추부하	추진부하	비 고
이동 모드	31%	0%	69%	최소 부하
부하율(%)	17.9	0	39.1	

### 2.3.2 시추 모드 1

DPS에 관한 경부하 모드인 시추 모드 1은 시추관련 설비와 DPS에 관한 부하 50%로 운전되는 모드이다. 시추 모드 1과 2는 양쪽 모두 서비스부하와 시추부하가 동일한 상태에서 DPS에 소요되는 추진부하만이 경부하와 중부하로 구분되며 발전기의 운전 효율, 연료 소모율 등이 제일 좋은 운전 모드이다.

표 2.5 시추 모드 1의 부하 구성비

Table 2.3 Load configuration in drilling mode 1

구 분	서비스부하	시추부하	추진부하	비 고
시추 모드 1	32%	19%	49%	경부하
부하율(%)	25.4	15.1	39.1	

### 2.3.3 시추 모드 2

시추 모드 2는 시추 모드 1과 동일하지만 DPS 관련 부하의 중부하 운전 모드이다. 또한 운전 모드 중 가장 전력 소모가 많은 모드이다.

표 2.6 시추 모드 2의 부하 구성비

Table 2.4 Load configuration in drilling mode 2

구분	서비스부하	시추부하	추진부하	비고
시추 모드 2	25%	15%	61%	최대 부하
부하율(%)	19.1	11.4	47	

### 2.3.4 리밍 모드

리밍 모드는 드릴로 천공을 한 후 천공된 직경을 넓히는 작업을 위한 설비 운전 모드이다.

표 2.7 리밍 모드의 부하 구성비

Table 2.5 Load configuration in reaming mode

구분	서비스부하	시추부하	추진부하	비고
리밍 모드	26%	12%	62%	중부하
부하율(%)	19.6	8.8	47	

### 3. 전력계통의 해석

전력계통의 해석은 시스템의 주요 구성요소들에 대한 특성을 정확히 파악하고 구성요소에 대한 수학적 모델을 이해하여야 할 것이다. 그러므로 먼저 계통의 전력조류방정식을 수립하고 그 해를 구하는 뉴턴-랩슨법과 계통의 구성요소에 대한 수학적 모델을 구성한다. 그리고 각 계통요소에 대한 데이터베이스(Database, DB)를 구축한다.

#### 3.1 전력조류방정식

전력조류란 발전기에서 생산된 전력이 송배전 선로를 통해 부하 측(수용가)에 전송되고 소비되는 유효 및 무효전력의 흐름을 말한다. 유효전력은 전원 측에서 부하 측으로 전압의 위상차에 의하여 흐름이 결정되고 무효전력은 전압이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 흐르는 특성이 있다. 전력계통에 흐르는 유효전력과 무효전력의 상태와 계통 내 각 지점에서의 전압이나 조류가 어떤 분포를 하게 될 것인지를 수학적 방법에 의하여 조사하는 것을 전력조류계산이라고 한다.

전력조류계산의 목적은 다음과 같다.

- 전력계통의 안정적이고 효율적인 운영
- 장래의 증설계획 입안
- 전력계통의 사고예방 및 대책수립

모든 모선의 전력조류계산을 위한 전력방정식의 수립에는 그림 3.1과 같은 기본 선로 회로에 대한 복소전압을 계산하여야 한다. 복소전압이 계산되면 모든 선로의 전력조류 흐름을 계산할 수 있다.

전력조류 해석을 하기 전에 모든 계통 내에 있는 발전기, 부하선로 등을 모델링 하여야 한다. 계통은 변압기, 리액터, 발전기, 부하 등으로 구성되며 선로는 그림 3.1과 같이 노드간의 직렬 임피던스를 가진 등가회로로 표현된다.

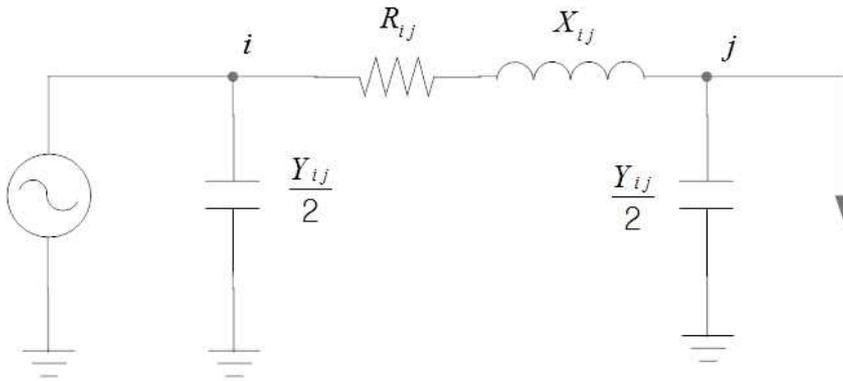


그림 3.1 송전선로의 등가회로  
Fig. 3.1 Equivalent circuit of transmission line

$Y_{ij}$ 는 선로 충전 서셉턴스이다. 그림 3.1에서 노드  $i$ 와  $j$ 에서의 전류는 식 3.1과 같으며

$$I_i = V_i \frac{Y_{ij}}{2} + (V_i - V_j)(G_{ij} + B_{ij}) \quad (3.1 \text{ a})$$

$$I_j = V_j \frac{Y_{ij}}{2} + (V_j - V_i)(G_{ij} + B_{ij}) \quad (3.1 \text{ b})$$

$G_{ij} + B_{ij}$ 는 송전선로의 어드미턴스이다.

식 3.1은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_i = V_i \left( \frac{Y_{ij}}{2} + (G_{ij} + B_{ij}) \right) - V_j (G_{ij} + B_{ij}) \quad (3.2 \text{ a})$$

$$I_j = V_j \left( \frac{Y_{ij}}{2} + (G_{ij} + B_{ij}) \right) - V_i (G_{ij} + B_{ij}) \quad (3.2 \text{ b})$$

식 3.2는 행렬식으로 표현하면 식 3.3, 식 3.4와 같다

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\frac{Y_{ij}}{2} + G_{ij} + B_{ij}) & -(G_{ij} + B_{ij}) \\ -(G_{ij} + B_{ij}) & (\frac{Y_{ij}}{2} + G_{ij} + B_{ij}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.3 \text{ b})$$

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

식 3.4의  $Y$ 행렬은 어드미턴스 행렬이라 하고  $Y_{ij}$ 로 나타낸다.

전력계통의 전압은 부하에 따라 사용 전압이 다르며 이는 변압기에 의해 1차 측과 2차 측에서 전압의 변성이 이루어지게 된다. 이러한 전압의 변성은 전력 방정식에 포함되어야 정확한 조류계산이 될 것이다. 변압기는 전압의 크기를 바꿈과 동시에 전력을 변성하는 장치로서 전력계통 구성에 있어 중요한 요소이다. 변압기는 1차 및 2차 측에 전압 조절용 탭을 갖추고 있으며 탭 조절에 의해 1차 및 2차 측의 전압을 조절 가능하다. 하지만 그 폭은 크지 않으며 일반적으로  $\pm 10\%$  정도이다. 그림 3.2에 변압기 탭을 등가회로로 나타내었다.

변성비의 비율은  $a:1$ 이며 2차 측에는  $aI_i$ 만큼의 전류가 흐르게 되며 전압은  $\frac{V_i}{a}$ 가 된다.

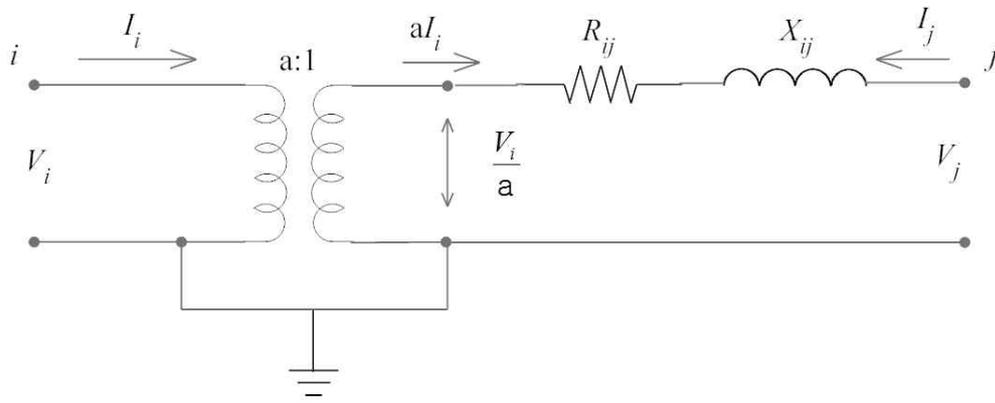


그림 3.2 변압기 탭의 등가회로

Fig. 3.2 Equivalent circuit of transformer tap

$$\begin{bmatrix} aI_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_i}{a} \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

그러므로 계통내의 변압기가 1차 및 2차 측 전압을 탭을 이용하여 변경하게 되면 2차 측에서의 어드미턴스 방정식은 식 3.5와 같게 된다. 식 3.5는 식 3.6과 같이 쓸 수 있다

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{ii}}{a^2} & \frac{Y_{ij}}{a} \\ \frac{Y_{ji}}{a} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Y행렬을 이용하여 각 노드에서의 전력방정식을 구하면 다음과 같다.

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_j (V_j Y_{ij})^* \quad (3.7)$$

$P_i$ 와  $Q_i$ 는 각각 유효전력과 무효전력을 나타내며 \*는 켈레복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 식 3.7은 극좌표 형식으로 나타낼 수 있다.

$$P_i + jQ_i = |V_i| \angle \delta_i \sum_j (|V_j| \angle -\delta_j |Y_{ij}| \angle -\theta_{ij}) \quad (3.8)$$

식3.8을 전개하면  $P_i$ 와  $Q_i$ 는 식 3.9와 같다

$$P_i = \sum_j |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.9 \text{ a})$$

$$Q_i = - \sum_j |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.9 \text{ b})$$

노드  $i$ 에서의 전압이 노드  $j$ 에서의 전압보다 위상각  $\delta$ 만큼 앞선다고 가정한다면 노드  $i, j$ 간의 전력조류의 흐름은 식 3.10과 같다.

$$P + jQ = \frac{V_i(V_i - V_j \angle -\delta)^*}{(R + jX)^*} \quad (3.10 \text{ a})$$

or

$$P + jQ = \frac{V_i(V_i - V_j(\cos\delta + j\sin\delta))}{(R - jX)} \quad (3.10 \text{ b})$$

상기 식 3.10에서 중장거리의 전송 선로에서는  $X \gg R$  이므로 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$P + jQ = \frac{V_i V_j \sin\delta + jV_i(V_i - V_j \cos\delta)}{X} \quad (3.11)$$

또는

$$P = \frac{V_i V_j \sin \delta}{X} \quad \text{and} \quad Q = \frac{V_i (V_i - V_j \cos \delta)}{X} \quad (3.12)$$

상기 전력방정식은 상차각  $\delta$ 의 크기가 증가하면 유효전력  $P$ 는 함께 증가하지만 무효전력  $Q$ 는 감소함을 나타낸다. 하지만 상차각  $\delta$ 의 크기가 작아질수록 전압의 변화에 따른 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다. 전력계통해석에서 모선(버스)은 크게 Swing 모선,  $PV$  모선,  $PQ$  모선 등 3가지로 구분된다.

표 3.1 전력계통해석시 모선의 종류

Table 3.1 Bus types in power system analysis

Bus type	Specified quantities	비 고
Swing/Slack bus	$\delta,  V $	기준모선, 위상각 $\delta=0$
$PV$ bus 또는 Generator bus	$P,  V $	$ V $ = 일정, $P=0$ 동기조상기
	$\delta,  V , Q_{max}, Q_{min}$	$ V $ = 일정, $P=0$ 동기조상기
$PQ$ or Load bus	$P, Q$	부하

$PV$ 모선(발전기 모선)은  $P$ 와  $|V|$ 를 기지량으로 알 수 있으며  $Q$  와  $\delta$ 를 구할 수 있고 Swing 모선은 전력조류계산을 위하여 반드시 필요한 것으로서 계통 내의 다른 모선에 대한 전압 위상각의 기준이 되는 모선으로서 위상각  $\delta=0$ 으로 한다. 부하 모선은  $PQ$ 를 기지량으로 알 수 있으므로 미지량  $|V|, \delta$ 을 구할 수 있다. 그러므로 전력조류계산을 위해서는 한 개의 모선에 대한 두 개의 방정식, 즉 유무효전력을 계산해야 한다.

또한 PV 모선과 발전기 모선에 대한 유효전력 방정식 역시 계산해야 한다. 하지만 전력방정식은 비선형 방정식이므로 직접적인 해는 구할 수 없으므로 수치해석을 통하여 그 해를 구할 수 있다.

### 3.2 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법

$x$ 와  $y$ 변수로 이루어진 함수  $F$ 의 해를  $G=F(x,y)$ 이고 만약 함수  $F$ 가 비선형 방정식이라서 직접적인 해를 구하지 못한다면,  $x$ 와  $y$ 의 초기값을 추정하여 삽입하여 반복 계산하면 해  $G$ 를 계산할 수 있다.

$x, y$ 의 초기 추정 값을 각각  $x^0, y^0$ 라 하고, 테일러 급수를 이용하면

$$G = F(x^0, y^0) + \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x^0, y^0} \Delta x + \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{x^0, y^0} \Delta y \quad (3.13)$$

$\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}$  는 각각  $x^0, y^0$ 를 이용하여 계산한다.

$$G - F(x^0, y^0) = \Delta F = \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y \quad (3.14)$$

위 식을 행렬식으로 표현하면

$$[\Delta F] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3.15 \text{ a})$$

또는

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial y} \end{bmatrix}^{-1} [\Delta F] \quad (3.15 \text{ b})$$

첫 번째 계산에서  $x$ 는  $x^1 = x^0 + \Delta x$ ,  $y^1 = y^0 + \Delta y$ 이며 계산은 반복되어  $\Delta F$ 가 허용오차  $\varepsilon$ 이내가 된다면 함수  $F$ 의 해를 구하게 된다.

식3.15는 자코비안 행렬(Jacobian matrix)인 식 16과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.16 \text{ a})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.16 \text{ b})$$

$\Delta P$ 는  $\delta$ 와  $|V|$ 의 추정 값을 이용하여 계산한  $P$ 와 기지량  $P$ 와의 차이를 말한다. 자코비안 행렬은 매번 재계산되어 저야 하므로 뉴턴-랩슨 알고리즘에 있어 중요한 행렬이다.

뉴턴-랩슨 방법을 이용한 조류 계산 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 계통의 임피던스 맵으로부터 모선의 어드미턴스 행렬  $Y_{bus}$ 를 구성한다.
- ② 각 모션전압에 대한 초기 값을 설정한다.
- ③  $\Delta P_i$ 와  $\Delta Q_i$ 를 계산한다.
- ④ 발전기 모선의 경우 무효전력 상·하한 값이 주어졌을 때는 무효전력 계산결과를 주어진 한계값과 비교하여 한계 값을 벗어났을 때는 무효전력을 한계값으로 고정하고 부하모션으로 취급한다.
- ⑤ 자코비안 행렬을 구성한다.
- ⑥ 비선형 연립 방정식을 뉴턴-랩슨법에 의해 풀어 위상각과 전압 크기에 대한 편차를 구하고 새로운 추정 값을 계산한다. ③부터의 절차를

수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산을 계속한다.

- ⑦ 수렴을 하게 되면 계산된 전압 값을 이용하여 슬랙 모선에 대한 유효 전력 및 무효전력을 계산하고 각 선로를 따라 흐르는 전력조류와 손실 등을 계산한다.

### 3.3 발전기 모델

동기기는 그 역할에 따라 동기전동기, 동기조상기 및 동기발전기 등이 있으나 동기발전기에 대한 모델만 적용키로 한다. 전력계통에서는 과도안정도의 해석처럼 계통의 동적특성을 검토하고자 할 경우에는 동기기를 정밀하게 모델링해야 하지만 전력조류계산 및 고장전류계산을 위한 동기발전기 모델은 동적특성 검토를 위한 모델링만큼 정밀한 모델을 필요로 하지 않는다. 일반적으로 계통이 평형상태에 있을 경우 발전기는 아래의 그림 3.3과 같이 간단한 등가회로로 나타낼 수 있다.

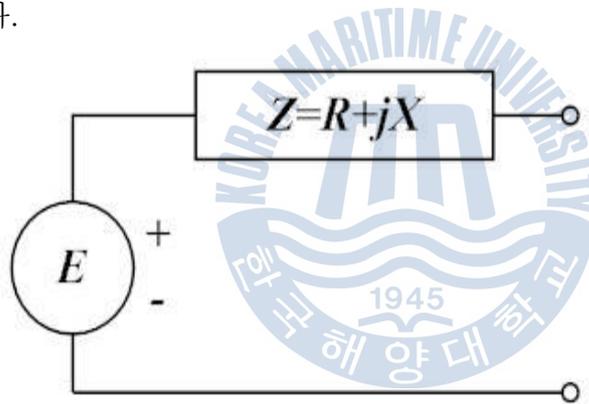


그림 3.3 동기발전기의 등가회로

Fig. 3.3 Equivalent circuit of synchronous generator

동기기는 단락 직후 내부 임피던스가 작기 때문에 순시단락전류는 동기리액턴스  $X_d$ 에 비해서 상당히 작은 값인 초기 과도리액턴스  $X_d''$ 에 의해서 이어서 과도리액턴스  $X_d'$ 에 의해서 제한된다. 이것은 전류가 갑자기 변화하는 상태에서는 제동권선 또는 계자권선에 직류가 유기되어 전기자권선이 이들 권선에 의

해 단락된 상태가 되기 때문이다. 그리고 어느 정도의 시간이 경과하면 정상상태로 안정되어 그 이후 단락전류는 동기리액턴스  $X_d$  에 의해서 제한된다. 그림 3.4는 이러한 단락전류의 변화 과정을 표시하였다.

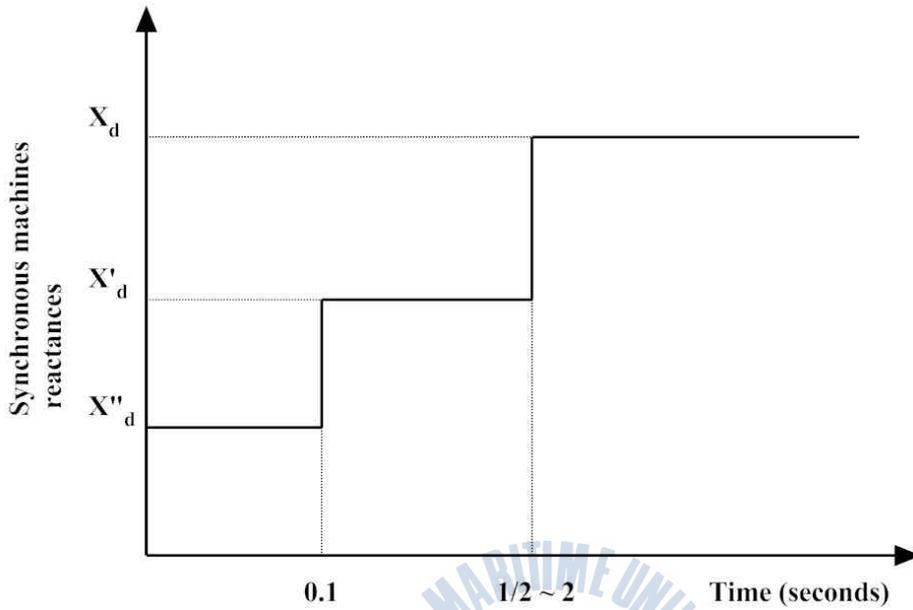


그림 3.4 단락시 동기기 리액턴스의 시간적 변화

Fig. 3.4 Time-varying synchronous machines reactances at bolted-fault

발전기 관련 변수들은 표 3.2와 같다. 통상 과도리액턴스인  $X'_d \approx X'_q$ 를 사용한다. 동기발전기의 정상상태 모델링은 발전기의 계통과 연결 유무를 먼저 고려해야 한다. 발전기가 계통과 연결되어 있지 않은 독립계통의 경우 동기발전기는 정격출력을 가진 정전압 원으로 모델링할 수 있는 반면에 자체 계통보다 현저히 큰 외부 전력계통과 연결되어 있어 자체 계통 내의 교란에 의해 계통 전반이 거의 영향을 받지 않는 경우 동기발전기는 무한계통에 연결된 것으로 가정하고 이때 동기발전기는 고정출력부하(Constant kW, Constant kvar)로 모델링 할 수 있으며 (-)부호의 값을 갖는 부하로 취급하여 해석할 수 있다.

표 3.2 동기발전기의 직축 및 횡축 정수

Table 3.2 Synchronous generator parameters of *d*-axis and *q*-axis

$X_d = X_l + X_{ad}$	직축 동기리액턴스
$X_d' = X_t + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fd}}}$	직축 과도리액턴스
$X_d'' = X_t + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fd}} + \frac{1}{X_{ld}}}$	직축 초기 과도리액턴스
$T_{do}' = \frac{1}{R_{fd}}(L_{fd} + L_{ad})$	직축 과도 개로시정수
$T_{do}'' = \frac{1}{R_{fd}}(L_{fd} + \frac{1}{L_{ad} + L_{fd}})$	직축 초기과도 개로시정수
$X_q = X_l + X_{aq}$	횡축 동기리액턴스
$X_q' = X_t + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{fq}}}$	횡축 과도리액턴스
$X_q'' = X_t + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{fq}} + \frac{1}{X_{lq}}}$	횡축 초기 과도리액턴스
$T_{qo}' = \frac{1}{R_{fq}}(L_{fq} + L_{aq})$	횡축 과도 개로시정수
$T_{qo}'' = \frac{1}{R_{fq}}(L_{fq} + \frac{1}{L_{aq} + L_{fq}})$	횡축 초기과도 개로시정수



### 3.3.1 여자기(Exciter)

동기발전기의 여자기의 기능은 동기발전기를 여자 시키기 위해 계자권선에 직류 전류(계자전류)를 제공하고 계자전압과 계자전류를 제어함으로써 전력계통에 필요한 무효전력을 제어, 공급함으로써 계통전압 유지를 위한 필수적인 제어 및 보호 기능을 수행한다. 여자계통은 전압, 무효전력 및 안정도 향상을 위한 제어기능이 포함되며 동기발전기의 지상(고여자) 및 진상(저여자) 조건에서 발전기의 출력을 안정적으로 유지할 수 있게 하는 보호 기능을 수행하도록 한다. 여자계통의 동작원리는 그림 3.5와 같다.

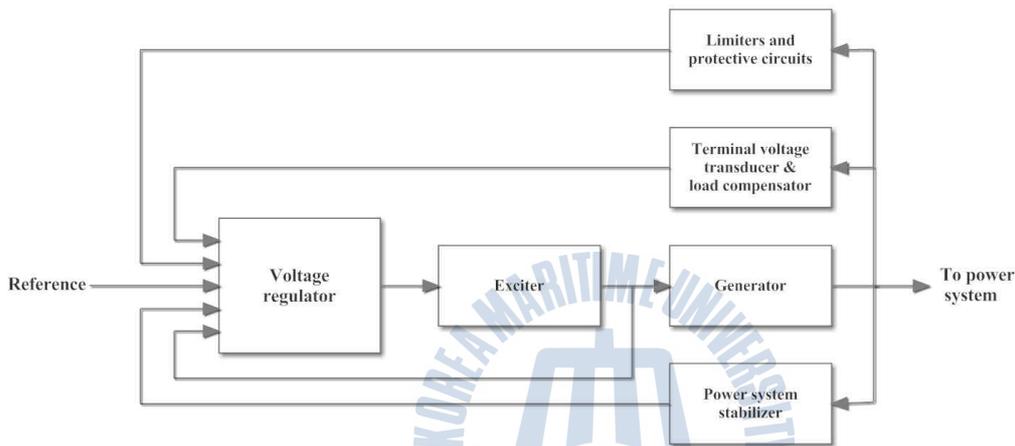


그림 3.5 발전기의 여자시스템 블록도

Fig. 3.5 Block diagram of exciter system for generator

#### 가) 여자기(Exciter)

동기발전기의 계자권선에 직류 전류를 흘려주는 기능을 갖는다.

#### 나) 전압조정장치(Voltage regulator)

여자를 제어하기 위한 입력 제어 신호를 발생하는 장치이다.

#### 다) 단자전압 변환장치/부하보상장치

단자전압 변환장치(Transducer)는 전압조정장치의 기준전압과의 비교를 위해 AC 단자전압을 DC 신호(4-20mA)로 변환해주는 장치이며 부하보상장치(Load compensator)는 발전기 단자전압으로 부터 떨어져 있는 특정 부위의 전압을 유지시키기 위한 부하보상기능을 갖는다.

라) 전력계통 안정화 장치(Power system stabilizer)

동기발전기의 회전자 속도, 편차, 출력 및 주파수 편차를 전압조정장치에 입력으로 보내주는 기능을 갖는다.

마) 제한기(Limiter) 및 보호장치(Protective circuits)

전압/주파수 제한장치(Volts per Hz Limiter), 과여자 제한장치 및 부족여자 제한장치 등 동기발전기가 가지고 있는 고유 Capability 특성의 한계를 어느 정도 초과하여 운전할 수 있게끔 하되 전력계통의 안정도(정태안정도 및 동태안정도)를 벗어나지 않도록 조정해주는 장치이다. 그림 3.6과 표 3.3은 본 논문의 전력계통해석에 사용한 여자시스템인 IEEE type AC8B의 제어 논리도와 관련 변수 등을 나타내었다.

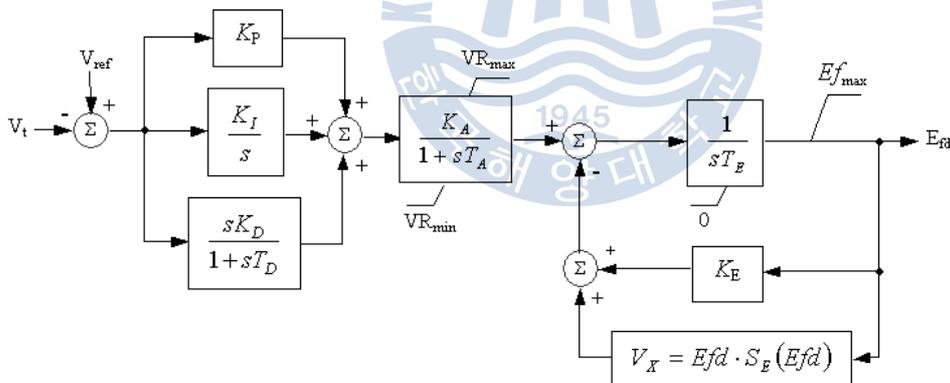


그림 3.6 IEEE type AC8B 제어 블록도  
 Fig. 3.6 Control block diagram of IEEE type AC8B

표 3.3 IEEE type AC8B 여자시스템 제 정수

Table 3.3 Parameters of IEEE type AC8B exciter

Parameter	Value	Unit	Description
$V_{Rmax}$	10	p.u.	Maximum value of the regulator output voltage in per unit
$V_{Rmin}$	0	p.u.	Minimum value of the regulator output voltage in per unit
$S_{Emax}$	1.5	p.u.	Saturation value of exciter at $E_{fdmax}$
$S_{E.75}$	1.36	p.u.	Saturation value of exciter at $0.75 E_{fdmax}$
$E_{fdmax}$	4.5	p.u.	Maximum exciter output voltage in per unit
KP	170	p.u.	Proportional control gain in per unit
KI	130	p.u.	Integral control gain in per unit
KD	60	p.u.	Derivative control gain in per unit
KA	1	p.u.	Regulator gain in per unit
KE	1	p.u.	Exciter constant for self-excited field in per unit
TD	0.03	sec.	Derivative control time constant in seconds
TA	0	sec.	Regulator amplifier time constant in seconds
TE	1	sec.	Exciter time constant in seconds

### 3.3.2 조속기(Governor)

조속기는 부하의 주기적 시간적 변동에 따라 발전기의 출력을 변화시켜 계통 주파수를 일정하게 유지하여 계통을 안정화하는 역할을 하며 일반적인 제어기의 블록도는 그림 3.7과 같다.

- $W_r$  = Rotor speed
- $P_m$  = Mechanical power
- $P_e$  = Electrical power
- $R$  = % Speed or Frequency regulation

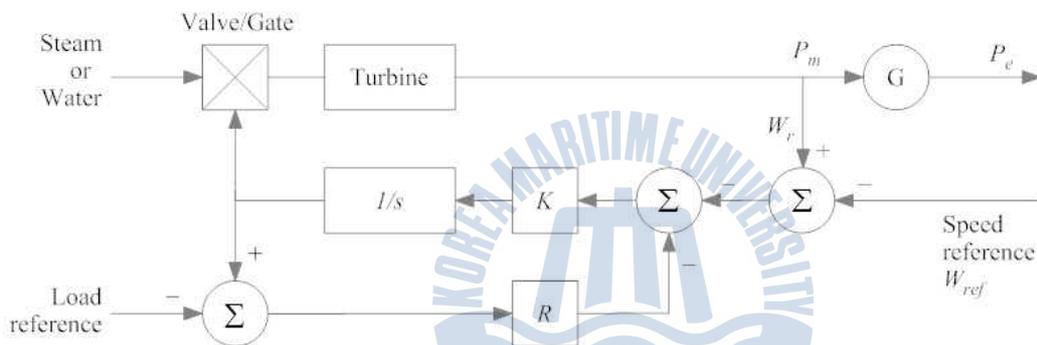
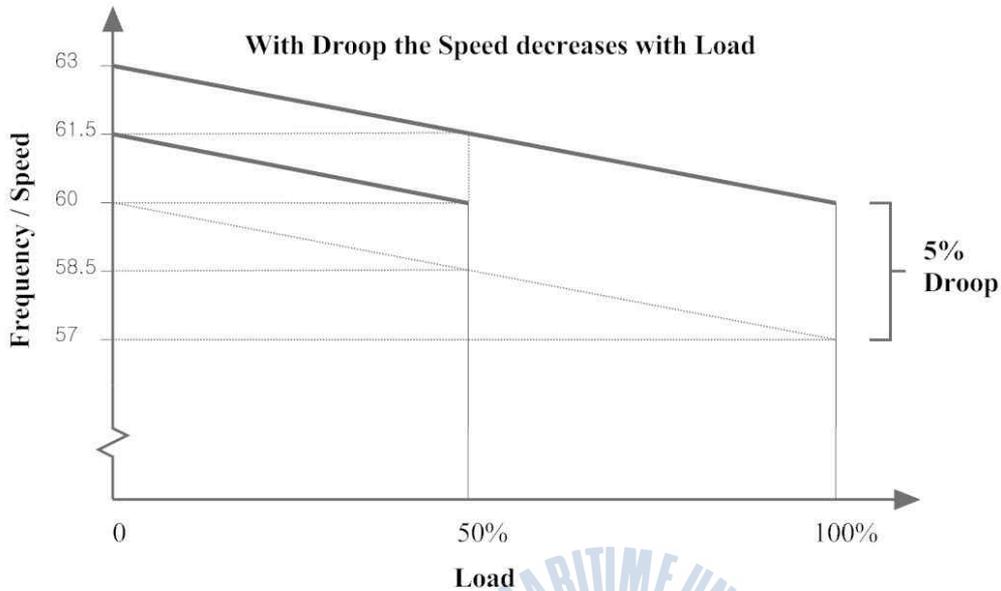


그림 3.7 조속기의 제어 블록도  
Fig. 3.7 Control block diagram of governor

그림 3.8의 운전 개념은 발전기가 계통에 연결되어 운전할 경우 계통 주파수에 맞추어 원동기의 속도(또는 주파수)가 조정되어 운전하는 것을 나타내는 것으로서 발전기가 계통에 연결되어 있을 때에는 계통 주파수에 따라 발전기 Governor controller의 명령에 의한 Valve 또는 Gate의 개폐 대소에 따라 원동기의 속도가 조정(즉 발전기의 출력 주파수)이 이루어진다. 그리고 발전기가 계통과 연결되어있지 않고 발전기가 담당하고 있는 부하가 발전기 정격출력보

다 클 경우에는 발전기 출력 주파수(또는 원동기 속도)가 줄어들며 부하가 발전기 정격출력보다 작을 경우에는 발전기 출력 주파수(또는 원동기 속도)가 상승하여 운전되는 것을 나타내고 있다.



### Droop Mode

그림 3.8 Droop 모드의 동작특성  
Fig. 3.8 Operating characteristic in droop mode

발전기속도/주파수 조정률은 Droop%로 표기되며 5%가 일반적이며 이는 발전기 전부하시 속도 또는 주파수 감소율에 대한 발전기 정격속도의 비를 나타낸다.

표 3.4와 그림 3.9에 계통 해석에 사용된 조속기 2301 모델의 제 정수와 제어 시스템의 블록도를 나타내었다. Woodward 2301 조속기의 정수들은 본 해석에 사용된 수치들이다.

표 3.4 Woodward 조속기 2301의 제 정수

Table 3.4 Woodward Governor 2301 parameters

Parameter	Definition	Value	Unit
Mode	Droop or Isoch	Droop	
LS GP#	Load Sharing Group Number	None	
Droop	Steady-state speed droop in seconds	5	%
$Q_{max}$	Min. shaft position in degrees	0	deg
$Q_{min}$	Max. shaft position in degrees	42	deg
a	Gain setting	0.3	
b	Reset setting	0.2	
r	Actuator compensation setting	0.2	
K1	Partially very high pressure power fraction	6	Deg/A
t	Actuator time constant	0.1	sec.
T1	Engine Dead Time Constant	0.15	sec.
T2	Amplifier / compensator time constant	0.1	sec.
$P_{max}$	Maximum shaft power	5474	MW or kW
$P_{min}$	Minimum shaft power	0	MW or kW

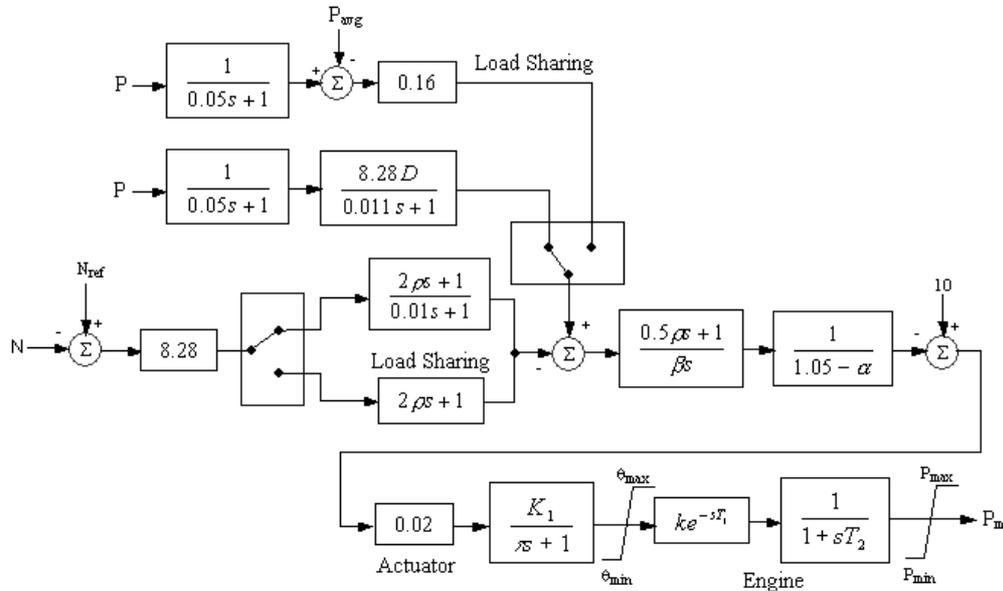


그림 3.9 Woodward 조속기 2301 제어 블록도

Fig. 3.9 Control block diagram of Woodward governor 2301

### 3.3.3 발전기 운전정보

발전기 운전 모드는 4가지이며 각 모드별 운전 조건은 아래와 같으며 발전기의 정보 입력은 그림 3.10과 같다.

#### 가) Swing 모드

- 조속기의 Isochronous 모드 운전
- Automatic voltage regulator(AVR) 운전

#### 나) Voltage control 모드

- 조속기의 Droop 모드 운전
- Automatic voltage regulator 운전

#### 다) Mvar control 모드

- 조속기의 Droop 모드 운전
- Fixed field excitation 운전 고려

#### 라) PF control 모드

- 조속기의 Droop 모드 운전
- 역률의 설정에 따른 AVR 운전

전력조류계산에 있어 모선중 하나는 반드시 Slack 모선 또는 Swing 모선이 되어야 한다. 기타 발전기의 운전 모드는 Voltage control, Mvar control, PF control 등도 가능하다.

Protection	PSS	Harmonic	Reliability	Fuel Cost	Remarks	Comment	
Info	Rating	Capability	Imp/Model	Grounding	Inertia	Exciter	Governor

11 kV 5200 kW Swing

Info

ID: Gen1

Bus: HV1 11 kV

In Service  
 Out of Service

Equipment

Tag #:

Name:

Description:

Configuration

DRILL+DP75

Operation Mode

Swing  
 Voltage Control  
 Mvar Control  
 PF Control

Gen1

OK Cancel

그림 3.10 발전기의 Information  
Fig. 3.10 Information of generator

그림 3.11은 발전기의 정격입력을 나타내며 정격전압, 역률, 효율, 극수등의 자료를 입력한다.

- %V : 발전모선전압에 대한 공칭전압의 백분율
- Vangle : 발전모선의 초기 위상각
- MW/kW, kvar/Mvar : 전력조류분석시 발전기의 유효 및 무효전력의 출력

Gen. Cat.	%V	Vangle	kW	kvar	%PF	Qmax	Qmin
1 Design	100	0					
2 Normal	100	0					
3 Shutdown	100	0					
4 Emergency	100	0					
5 Standby	100	0					
6 Startup	100	0					

그림 3.11 발전기의 정격

Fig. 3.11 Rating of generator

#### 마) Capability curve & Mvar limits

그림 3.12의 발전기 특성곡선은 동기발전기가 가지고 있는 유효 및 무효전력에 대한 성능곡선으로서 아래와 같이 발전기 운전 특성별 발전기 출력의 성능한계를 나타낸다. 그림 3.13에 해석에 사용된 5,200kW 동기발전기의

Capability 항목을 나타내었다.

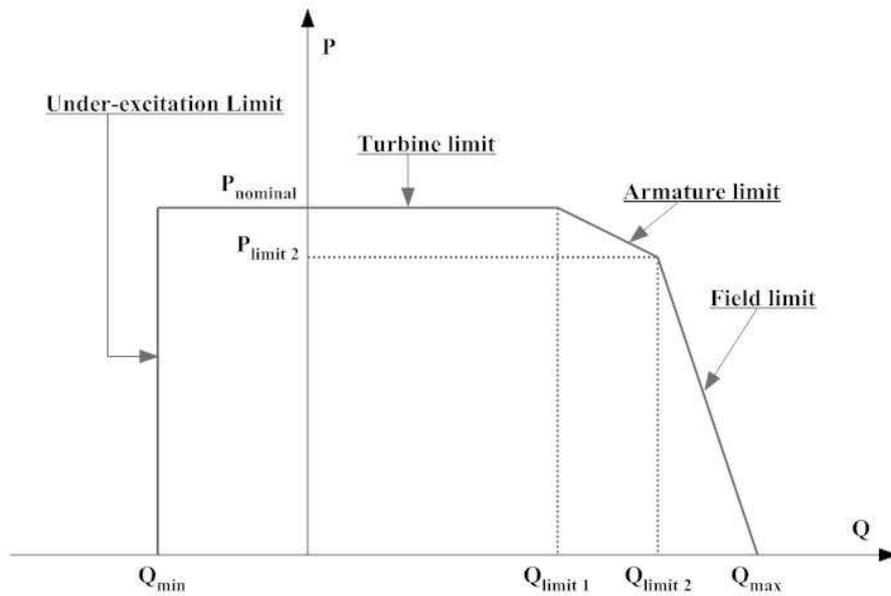


그림 3.12 발전기 특성곡선  
Fig. 3.12 Capability curve of generator

1)  $Q_{min} \leq Q \leq Q_{lim1}$  영역

발전기의 유효전력 조정 없이 무효전력의 발전 및 흡수가 가능하다. 무효전력의 생산단가가 일정한 영역이므로 발전기의 공칭 유효출력  $P_{nominal}$ 의 유지가 가능하고 부족여자의 한계점까지 운전이 가능하다.

2)  $Q_{lim1} \leq Q \leq Q_{max}$  영역

전기자와 계자권선의 열적한계에 도달하는 영역으로서 무효전력의 생산을 위해서는 유효전력의 감소가 동반되어야 한다. 무효전력의 증대에 따라 전기자권선의 열적한계에 의해 1차적으로 유효전력이 감소하게되고 무효전력을 더욱 더 증대하고자 한다면 계자권선의 열적한계로 더 이상 유효 및 무효전력을 생산할 수 없게 된다.

### 3) AVR 유무에 따른 운전

AVR이 없는 경우에는 동기 및 계통 리액턴스에 의한 발전기의 운전한계(정태안정도 한계)를 가지며 AVR이 있을 경우는 발전기 자체가 가지고 있는 고유 운전한계 이상으로 운전할 수 있는 영역(동태안정도 한계)을 나타낸다.

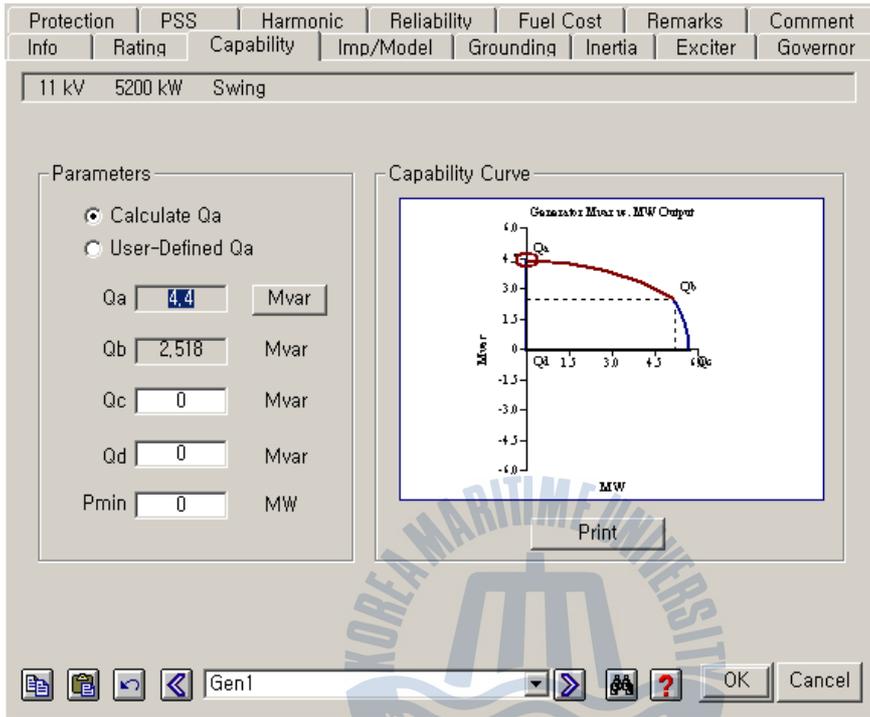


그림 3.13 발전기의 성능곡선

Fig. 3.13 Capability input of generator

### 바) 발전기 임피던스

발전기 공급 업자가 제공하는 발전기 임피던스 값을 입력한다. 입력 값은 단락전류계산시에 발전기로부터 나오는 고장전류에 관계되는 값으로 안정도 계산을 위한 초기 과도리액턴스 값을 제외하고는 모두 단락전류에 관계되는 값이다. 각종 시정수, 정상분 임피던스, 역상분 임피던스, 발전기의 회전자 종류, 발전기의 여자기 종류등 많은 자료를 필요로 하지만 이러한 정보들은 제공되지

않는 경우가 많으므로 제조사의 정보가 제공되지 않는다면 'Typical Data' 선택, 입력하도록 한다.

그림 3.14 발전기의 임피던스  
Fig. 3.14 Impedance of generator

### 사) 여자기

발전기의 무효전력을 제어하는 여자기는 IEEE type AC8B 모델을 선정하였고 관련 변수들을 입력한다. 또한 발전기의 운전 모드중 전압제어 모드에서는 전압을 제어할 모션을 선정하여야 한다.

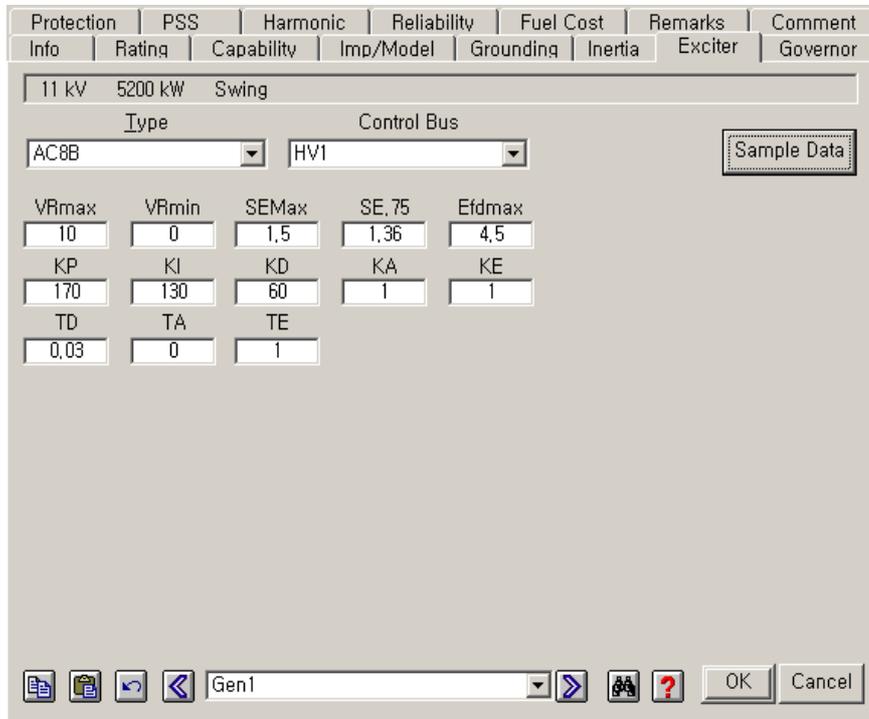


그림 3.15 발전기의 여자기  
Fig. 3.15 Exciter of generator

#### 아) 조속기

발전기를 구동하는 원동기의 조속기는 Woodward 2301을 선정하고 제 정수를 입력한다. 조속기의 운전 모드는 'Droop' 과 'Isoch' 모드 중 선택하고 'LS GP#' 에는 Load sharing group number를 입력한다.

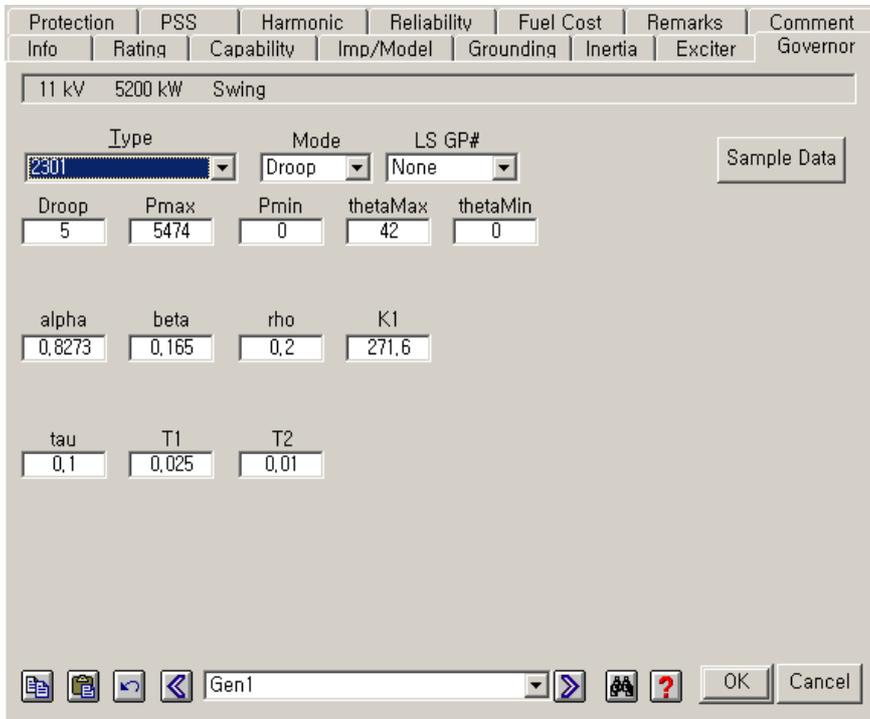


그림 3.16 발전기의 조속기  
Fig. 3.16 Governor of generator

### 3.4 변압기 모델

전력변성설비인 전력용 변압기는 전력계통의 중요한 요소이다 전력계통에 많이 사용하는 변압기로는 3상 2권선 변압기와 3권선 변압기가 있다. 서비스부하에는 많은 전력을 공급하기 위해 2권선 변압기를 사용하고 가변주파수 구동부(Variable frequency drive, VFD)를 많이 사용하는 추진부하 및 시추부하 등에는 AC/DC 정류변환효율을 고려하여 위상천이용 3권선 변압기를 사용한다. 그림 3.17에 변압기에 대한 등가회로를 나타내었다

### 3.4.1 2권선 변압기

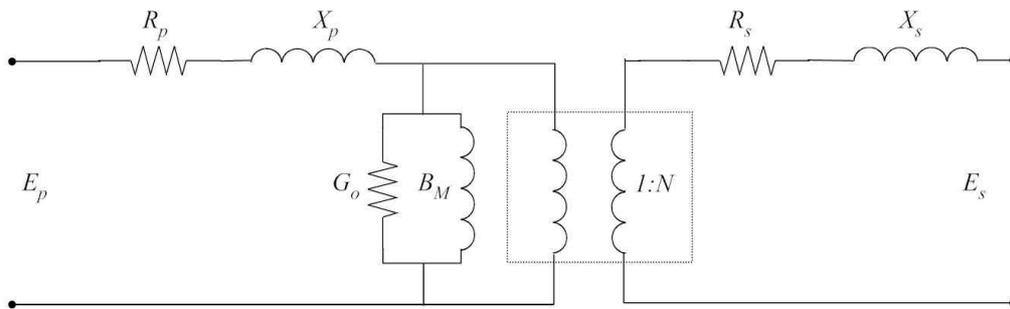


그림 3.17 변압기의 등가회로

Fig. 3.17 Equivalent circuit of transformer

- $R_p$  : 1차 권선의 유효 저항
- $R_s$  : 2차 권선의 유효 저항
- $X_p$  : 1차 권선의 누설 리액턴스
- $X_s$  : 2차 권선의 누설 리액턴스
- $G_o$  : 병렬 콘덕턴스 (변압기 철손 고려)
- $B_M$  : 병렬 서셉턴스 (무부하 여자 전류 고려)

그림 3.17의 등가회로에서 2차 권선의 저항 및 리액턴스를 1차 권선으로 등가화 시켜 그림 3.18과 같이 표현할 수 있다. 그림 3.18에서 병렬부분을 무시한 보다 간략화한 변압기 모델을 그림 3.19와 같이 표현할 수 있다. 대부분의 경우  $X_T$ 에 비해서 상대적으로  $R_T$ 가 값이 작으므로 무시되는 경우가 많으며 이 때,  $X_T$ 는 변압기 임피던스와 동일한 값으로 간주한다.

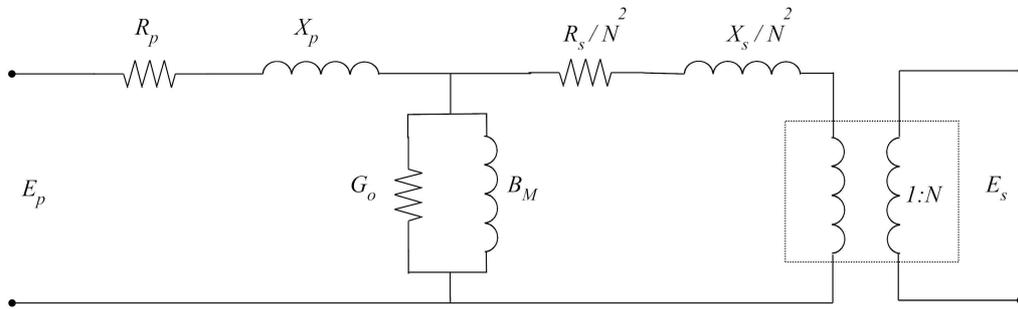


그림 3.18 2차 측을 1차 측으로 변환된 등가회로

Fig. 3.18 Equivalent circuit that was converted the secondary side to the primary side

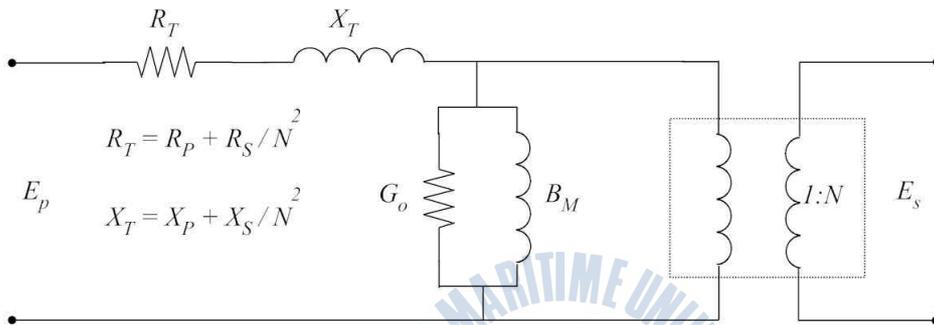


그림 3.19 간략화된 변압기 등가회로

Fig. 3.19 Simplified equivalent circuit of transformer

### 3.4.2 3권선 변압기

그림 3.20의 3권선 변압기의 1차, 2차, 3차 측 전압을 단위법으로 환산하고 각각의 기준전압을  $E_H$ ,  $E_X$ ,  $E_Y$  라고 하면 아래 그림 3.21과 같은 등가 모델로 표현할 수 있다.

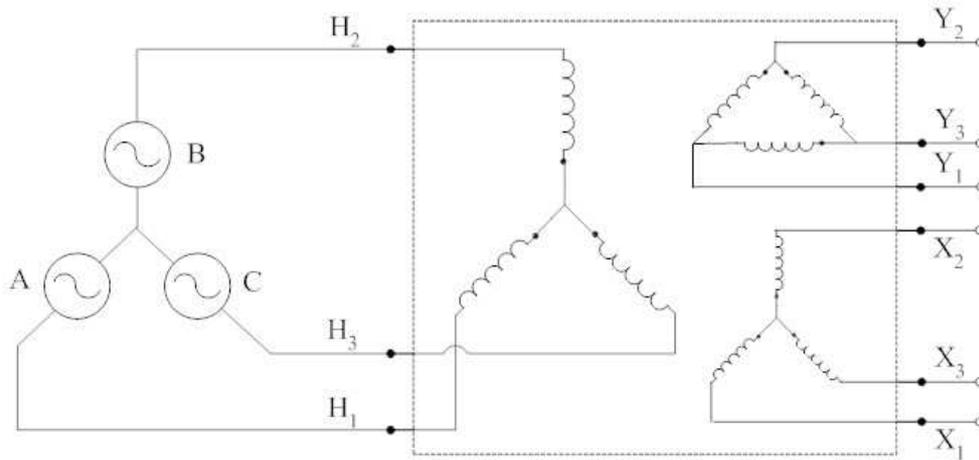


그림 3.20 3권선 변압기 회로

Fig. 3.20 Circuit of 3 winding transformer

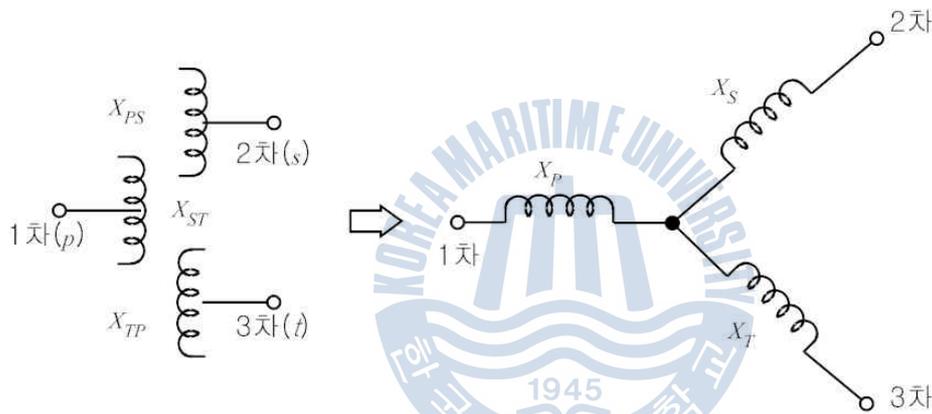


그림 3.21 3권선 변압기의 임피던스 등가회로

Fig. 3.21 Equivalent impedance circuit of 3 winding transformer

정격전압과 임의 용량을 기준으로 해서 1~2차간 (3차 측 개방시), 2~3차간 (1차 측 개방시), 3~1차간(2차 측 개방시) 임피던스가 각각  $X_{PS}$ ,  $X_{ST}$ ,  $X_{TP}$  [%]일 때 1차, 2차, 3차의 각각의 임피던스  $X_P$ ,  $X_S$ ,  $X_T$ 는

$$X_{PS} = X_P + X_S \quad (4.1 a)$$

$$X_{ST} = X_S + X_T \quad (4.1 \text{ b})$$

$$X_{TP} = X_T + X_P \quad (4.1 \text{ c})$$

로부터 각각 아래와 같다.

$$X_P = \frac{X_{PS} + X_{TP} - X_{ST}}{2} \quad (4.2 \text{ a})$$

$$X_S = \frac{X_{PS} + X_{ST} - X_{TP}}{2} \quad (4.2 \text{ b})$$

$$X_T = \frac{X_{TP} + X_{ST} - X_{PS}}{2} \quad (4.2 \text{ c})$$

### 3.4.3 변압기 운전정보

The screenshot shows a software interface for transformer information. At the top, there are tabs for 'Info', 'Rating', 'Tap', 'Grounding', 'Sizing', 'Protection', 'Harmonic', 'Reliability', 'Remarks', and 'Comment'. The 'Info' tab is selected, displaying the following data: 3300 kVA, Liquid-Fill, 0A/FA, 55/65 C, 11, 0.69 kV. Below this, there are several sections: 'Info' with an ID field containing 'T-SVC2'; 'Prim.' and 'Sec.' fields with dropdown menus and voltage values (11 kV and 0.69 kV); 'Standard' with radio buttons for 'ANSI' (selected) and 'IEC'; 'Equipment' with fields for 'Tag #', 'Name', and 'Description'; 'Type / Class' with dropdown menus for 'Type' (Liquid-Fill), 'Sub Type' (Mineral Oil), 'Class' (0A/FA), and 'Temp. Rise' (55/65), plus an 'MFR' field. On the right side, there are radio buttons for 'In Service' (selected) and 'Out of Service', and a 'Connection' section with radio buttons for '3-Phase' (selected), '1-Phase', and a checkbox for 'Secondary Center Tap'. At the bottom, there are navigation icons, a dropdown menu with 'T-SVC2', and 'OK' and 'Cancel' buttons.

그림 3.22 변압기의 Information  
Fig. 3.22 Information of transformer

## 가) 냉각방식

- OA/FA 공기냉각방식/강제통풍방식
- OA/FA/FA 공기냉각방식/강제통풍방식/강제통풍방식
- OA/FA/FOA 공기냉각방식/강제통풍방식/강제오일 순환방식
- OA/FOA/FOA 공기냉각방식/강제오일 순환방식/강제오일 순환방식
- FOA 강제오일 순환방식
- OW 물 냉각방식
- OW/A 물/공기 냉각방식
- OTHER

## 나) 온도정격

변압기의 온도정격을 나타내며 유입식인 경우

- 55/65℃
- 65 ℃

이며, 건식인 경우

- 80℃
- 80/100℃
- 80/115℃
- 80/150℃
- 100℃
- 115/150℃

등의 온도정격을 가진다.



## 다) 변압기의 정격

변압기의 정격은 단락용량계산을 할 때 중요한 변수로 작용하는 것으로 전력계통에서 변압기와 선로의 경우는 동기기와 다르게 정상분과 역상분이 같기 때문에 별도의 입력 항이 없으며 영상분의 경우에는 변압기 중성점의 접지방식에 따라 직접접지방식과 비접지방식에 따라 다르게 입력한다.

변압기 중성점의 접지방식이 비접지방식의 경우에는 고장점에서 전원 측을 바라볼 때 개방회로로 볼 수 있기 때문에 ETAP 계산에는 무시된다. 제조사의 자료가 없다면 'Typical X/R'을 선택한다.

The screenshot shows the 'Rating' tab of a transformer configuration window. The main parameters are: 3300 kVA, Dry AA 80 C, 11 0.69 kV. The 'Rating' section includes: Prim. kV (11), kVA (3300), Max kVA (3300), FLA (173.2), Sec. (0.69), and 2761. The 'Connected Bus' section shows Nom. kV (11) and 0.69. The 'Impedance' section has: Positive % Z (5.75), X/R (11.41), Zero % Z (5.75), X/R (11.41), and a 'Typical Z & X/R' button. The 'Z Variation' section shows: @ -5 % Tap (0 %), @ +5 % Tap (0 %). The 'Z Tolerance' section shows ± 7.5 %. The window title is 'T-SVC2' and it has 'OK' and 'Cancel' buttons.

그림 3.23 2권선 변압기의 정격

Fig. 3.23 Rating of 2 winding transformer

Info	Rating	Tap	Grounding	Protection	Harmonic	Reliability	Remarks	Comment																						
3800 1900 1900 kVA		11 0,71 0,71 kV																												
<b>Rating</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>kV</th> <th>kVA</th> <th>Max kVA</th> <th>FLA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Prim.</td> <td>11</td> <td>3800</td> <td>3800</td> <td>199,4</td> </tr> <tr> <td>Sec.</td> <td>0,71</td> <td>1900</td> <td>1900</td> <td>1545</td> </tr> <tr> <td>Ter.</td> <td>0,71</td> <td>1900</td> <td>1900</td> <td>1545</td> </tr> </tbody> </table>									kV	kVA	Max kVA	FLA	Prim.	11	3800	3800	199,4	Sec.	0,71	1900	1900	1545	Ter.	0,71	1900	1900	1545	<b>Connected Bus</b> Nom. kV 11 0,71 0,71		
	kV	kVA	Max kVA	FLA																										
Prim.	11	3800	3800	199,4																										
Sec.	0,71	1900	1900	1545																										
Ter.	0,71	1900	1900	1545																										
<b>Impedance</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">Positive</th> <th colspan="2">Zero</th> </tr> <tr> <th></th> <th>% Z</th> <th>X/R</th> <th>% Z</th> <th>X/R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PS</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>8</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>PI</td> <td>8</td> <td>12</td> <td>8</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>ST</td> <td>16</td> <td>12</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table> kVA Base: 3800					Positive		Zero			% Z	X/R	% Z	X/R	PS	8	12	8	12	PI	8	12	8	12	ST	16	12	16	12	<b>Z Variation</b> @ - 5 % Tap: 0 % @ + 5 % Tap: 0 %	<b>Z Tolerance</b> ± 10 %
	Positive		Zero																											
	% Z	X/R	% Z	X/R																										
PS	8	12	8	12																										
PI	8	12	8	12																										
ST	16	12	16	12																										
T-THR4																														

그림 3.24 3권선 변압기의 정격  
 Fig. 3.24 Rating of 3 winding transformer

### 라) 임피던스 변화율(Z Variation)

그림 3.23과 그림 3.24의 'Z Variation' 항목은 변압기 탭이 있는 경우 최대 탭과 최소 탭 사이의 임피던스 변화율을 선형으로 근사화하여 정상분과 영상분 임피던스 계산에 이용한다. 탭에 의해 변화된 임피던스의 계산식은 다음과 같다.

- -5% 탭인 경우 변화된 %임피던스,  $Z_{T-5}$
- +5% 탭인 경우 변화된 %임피던스,  $Z_{T+5}$
- -5% 탭인 경우의 %임피던스 변화분(%Variation),  $\Delta\%Z_{V-5}$
- +5% 탭인 경우의 %임피던스 변화분(%Variation),  $\Delta\%Z_{V+5}$
- Nominal tap의 %임피던스,  $Z_{T-NOM}$
- Z Tolerance : %임피던스의 허용 공차이며 7.5 ~ 10%이다.

각각의 변화된 %임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{T-5} = \frac{Z_{T-NOM} \times (100 + \Delta\%Z_{V-5})}{100}$$

$$Z_{T+5} = \frac{Z_{T-NOM} \times (100 + \Delta\%Z_{V+5})}{100}$$

### 3.5 전동기 모델

#### 3.5.1 유도전동기

유도전동기는 회전자계와 회전자계에 의하여 회전자에 유도된 전류와의 사이에서 발생하는 전자력을 이용한 전동기이다. 따라서 회전자에 전류를 계속적으로 발생시키기 위해서는 회전자의 회전속도  $N$ 과 동기속도  $N_s$ 에 차이가 발생해야 하며 이러한 회전속도의 차와 동기속도의 비율을 슬립(Slip,  $S$ )이라 하고 다음 식과 같다.

$$S = \frac{N_s - N}{N} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_r}$$

$$N = N_s(1 - S) = \frac{120f}{p}(1 - S) \text{ [rpm]}$$

$N_s$  : 동기속도,  $N$  : 회전자의 회전속도

$\omega_e$  : 고정자의 전기적 속도(rad/s)

$\omega_r$  : 회전자의 전기적 속도(rad/s)

실제 운전되는 전동기의 슬립  $S$ 의 값은

- 정지,  $S = 100\%$
- 무부하 운전,  $S \approx 0\%$
- 전부하 운전, 소형:  $S = 5\%$ , 중/대형 :  $S = 2\sim 5\%$

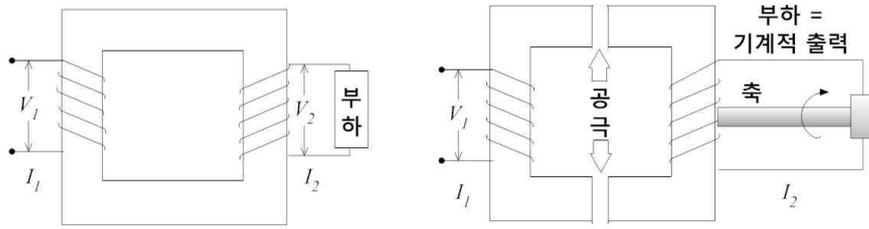


그림 3.25 변압기와 유도전동기

Fig. 3.25 Transformer and induction motor

변압기와 유도전동기는 전기적으로 유사하여 2차 측이 회전하는 기능을 가진 것을 유도전동기라고 볼 수 있다. 유도전동기에서 부하란 기계적 출력과 같아 과부하에는 부하전류가 증가하게 된다. 그림 3.25와 같이 변압기의 전기적 표현과 같이 유도전동기에서 부하의 기계적 출력을 저항으로 변환하여 전기적 회로로 표현할 수 있다. 그림 3.26에는 유도전동기의 출력과 손실 관계를 나타내고 그림 3.27은 전기적 근사등가회로를 나타내었다.

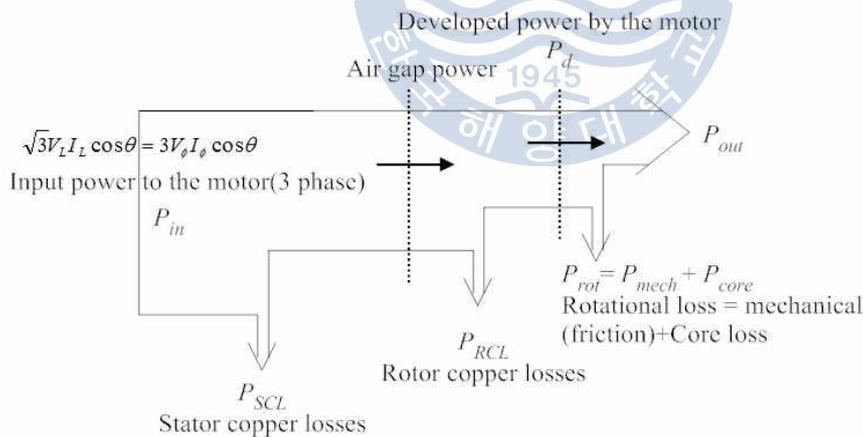


그림 3.26 유도전동기의 출력과 손실

Fig. 3.26 Output and losses of induction motor

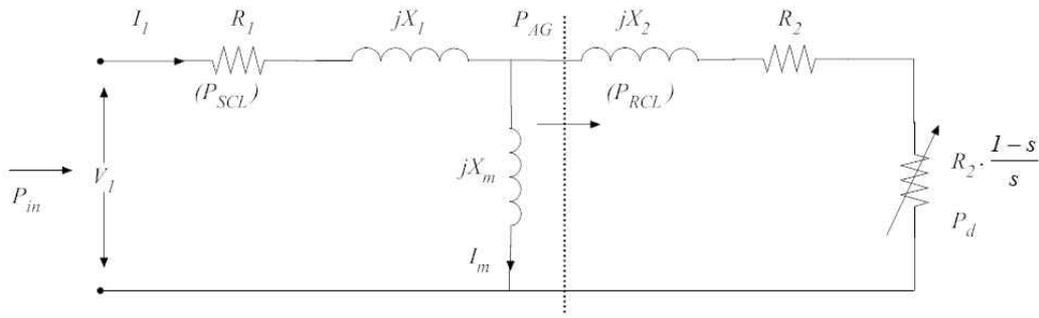


그림 3.27 유도전동기의 근사등가회로

Fig. 3.27 Approximated equivalent circuit of induction motor

유도전동기의 입력, 출력 및 손실에 관한 식은 다음과 같다.

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta, \quad P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} = P_{in} - P_{SCL}$$

$$P_d = P_{AG} - P_{RCL} = 3 P_{AG} (1 - S), \quad P_{out} = P_d - P_{rot}$$

$$T_{out} = \frac{P_d - P_{rot}}{\omega_m}$$

$$T_d = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{P_{AG} (1 - S)}{\omega_s (1 - S)} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

$P_{AG}$  : Air gap power

$P_d$  : Developed power by the motor

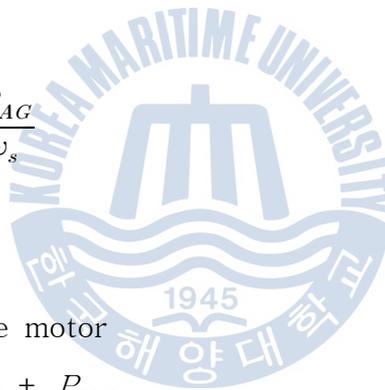
$P_{rot}$  : Rotational Loss =  $P_{mech} + P_{core}$

$P_{mech}$  : Mechanical(friction) loss

$P_{core}$  : Core loss

$P_{SCL}$  : Stator copper losses

$P_{in}$  : Input power to the motor(3 phase)



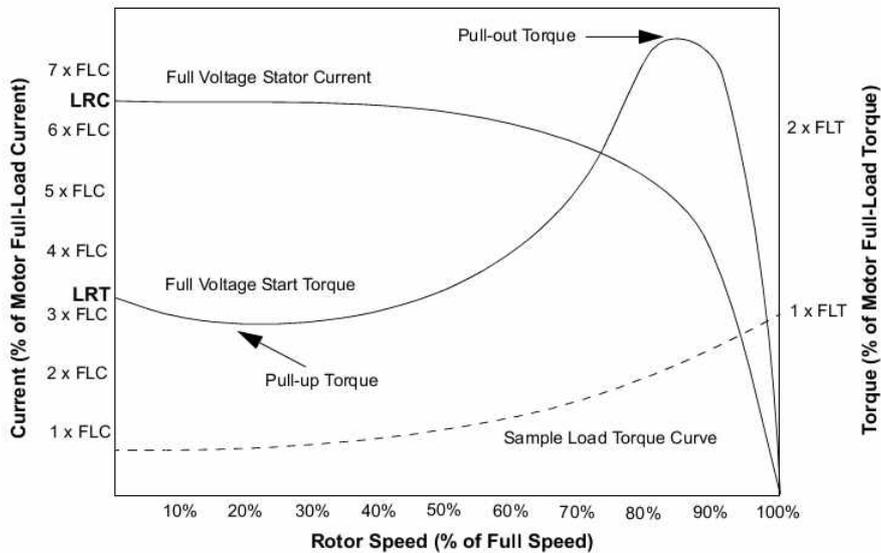


그림 3.28 유도전동기의 토크-속도 특성

Fig. 3.28 Torque-speed characteristic of induction motor

일반적인 유도전동기의 토크-속도 특성곡선을 그림 3.28에, 운전 모드 특성을 그림 3.29에 각각 나타내었다. 슬립이 변화함에 따라 다음 3가지 운전 모드로 구분된다.

- $1 < S$  : 역상제동(Plugging) 영역으로 입력 전원에 의한 토크 방향과 실제 회전자가 회전하는 방향이 반대가 된다.
- $0 > S$  : 회생제동(Regeneration) 영역으로 입력 전원에 의한 토크보다 실제 회전자의 토크가 더 큰 경우로 유도발전기로 동작한다.
- $0 < S < 1$  : 전동기(Motoring)로서 동작되는 영역이다

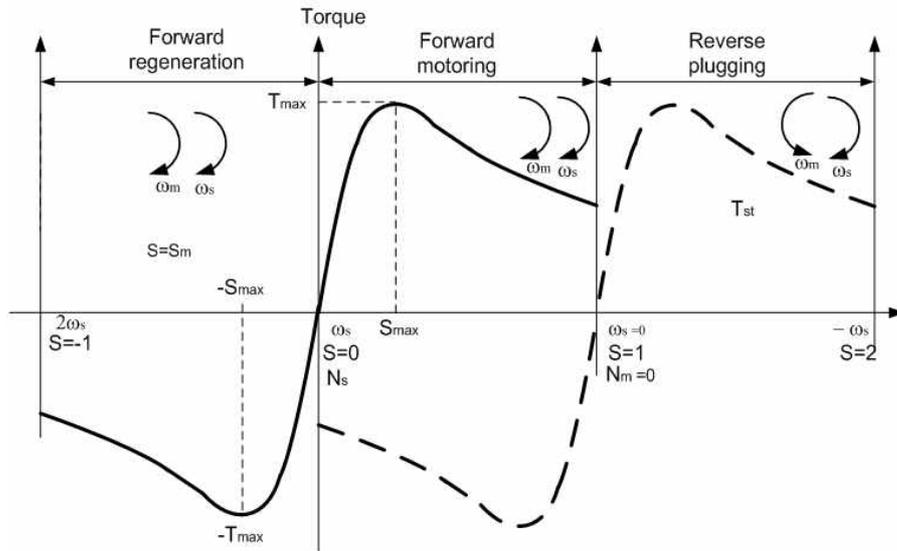


그림 3.29 유도전동기의 운전 모드  
 Fig. 3.29 Operation modes of induction motor

슬립이 0인 상태에서 토크는 0이고 슬립이 증가하면서(회전속도는 감소) 토크는 증가하여 정상운전 지점을 지나서 최대 토크  $T_{max}$ 를 향하게 된다. 최대 토크  $T_{max}$ 에서 손실이 가장 적고 공극자속은 최대를 유지한다. 이후 토크는 감소하여 슬립=1, 정지 상태에서 기동토크  $T_{st}$ 를 유지한다. 슬립이 1인 상태에서 기동전류는 정격전류의 6~8배에 이른다.

### 3.5.2 유도전동기 운전정보

#### 가) 전동기 정격

ETAP의 전동기 정보는 그림 3.30과 같으며 ‘Configuration’ 항목에서 ‘Status’는 전동기의 운전 상태를 의미하며 연속운전(Continuous), 간헐운전(Intermittent), 비운전(Spare)으로 3가지 운전 상태로 구분된다. ‘Connection’ 항목에서는 전동기의 상수(phase)와 수량을 설정 가능하며 이에 대한 수용을

(Demand factor)은 각각 100%, 50%, 0%로 기본 설정되어 있으며 변경 가능하다.

Protection Info	Cable/Vd Nameplate	Cable Amp Model	Reliability Inertia	Remarks Load	Comment Start Dev	Start Cat
1 3200 kW 0,69 kV		Cable Info not available				
<b>Info</b> ID: THR-M4 Bus: HVTHR-4 0,69 kV		<input checked="" type="radio"/> In Service <input type="radio"/> Out of Service				
<b>Equipment</b> Tag #: <input type="text"/> Name: <input type="text"/> Description: <input type="text"/> App. Type: Motor Data Type: Estimated Priority: Critical		<b>Configuration</b> DRILL+DP75 Status: Continuous				
		<b>Connection</b> <input checked="" type="radio"/> 3 Phase <input type="radio"/> 1 Phase Quantity: 1				
		<b>Demand Factor</b> Continuous: 100% Intermittent: 50% Spare: 0%				
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>						

그림 3.30 유도전동기의 Information  
 Fig. 3.30 Information of induction motor

그림 3.31에 나타낸 ‘Nameplate’에서는 해당 전동기의 정격(용량, 전압, 역률 및 효율, 극수, 속도, Service factor)을 입력한다. 제조사의 자료가 없는 경우에는 라이브러리에서 제공하는 모델을 이용할 수 있다. 그리고 ‘Loading’ 항목에서는 부하의 운전 모드를 설정하여 임의의 부하율을 적용할 수 있다.

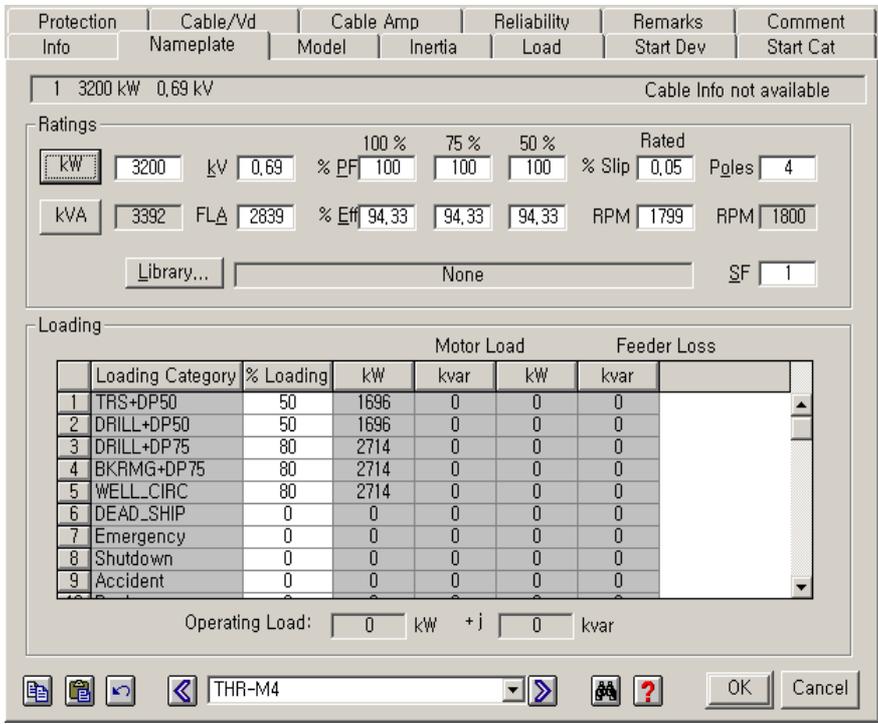


그림 3.31 유도전동기의 명판  
 Fig. 3.31 Nameplate of induction motor

### 3.6 Lumped load

Lumped load는 일괄부하를 말하는 것으로 MCC부하 등과 같이 다수의 개개 부하들을 하나로 묶어 마치 용량이 큰 단일 부하와 같이 처리함으로 편리하고 부하의 종류를 정용량 부하(Constant kVA)와 정임피던스 부하(Constant Z)로 배분하여 그 비율을 조정 가능하므로 다양한 성격의 부하로 설정이 가능하다.



Info Nameplate Short-Circuit Dyn Model Reliability Remarks Comment

3300 kVA 0.69 kV ( 80% Motor 20% Static )

Model Type  
 Conventional Rated kV  
 0.69 Calculator...

Ratings  
 kVA kW kvar % PF Amp  
 3300 2805 1738 85 2761

Load Type  
 Constant kVA 80 %  
 Constant Z 20 %

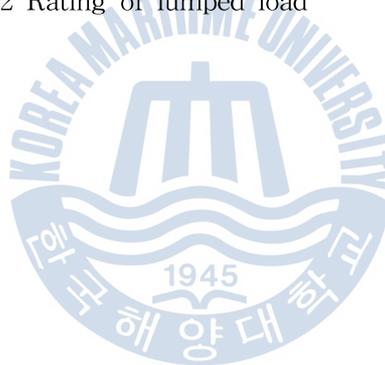
Motor Load			Static Load			
loading Categor	% Loading	kW	kvar	kW	kvar	
1	TRS+DP50	60	1346	834.4	336.6	208.6
2	DRILL+DP50	75	1683	1043	420.8	260.8
3	DRILL+DP75	75	1683	1043	420.8	260.8
4	BKRMG+DP75	75	1683	1043	420.8	260.8
5	WELL_CIRC	65	1459	904	364.6	226
6	DEAD_SHIP	3	67.32	41.72	16.83	10.43
7	Emergency	0	0	0	0	0

Operating 0 0 0 0 kW +j kvar

SVCLOAD-2 OK Cancel

그림 3.32 일괄부하의 정격

Fig. 3.32 Rating of lumped load



## 4. 전력조류 시뮬레이션 및 결과

2장에서 구성한 시추선의 전력계통을 바탕으로 각각의 운전 모드별로 전력조류분석을 수행하여 발전기의 용량, 변압기의 용량, 부하율 등을 검토하고 전력조류의 흐름, 각 간선 및 모선의 전압변동 등 결과에 대하여 분석하였다.

### 4.1 분석조건 및 기준

#### 4.1.1 분석조건

전력조류분석을 위한 조건은 다음과 같다.

- 변압기의 탭은 중간 탭을 기준
- 부동율과 수용율은 적용하지 않음
- 변압기 및 발전기, 전동기 등은 라이브러리내의 모델을 적용함
- 보수적 해석을 위하여 케이블은 적용하지 않음
- Lumped load의 구성 비율은 constant kVA 8 : constant Z 2를 적용
- 발전기 역률 90%, 부하 역률 80% 적용

#### 4.1.2 분석기준

전력조류 분석기준은 표 4.1과 같으며 전력조류분석의 결과에 대한 판단 기준 또한 동일하게 적용한다.

- 전압강하는 해당 모선의 정격전압의 95%를 적용
- 과전압은 공칭전압의 105%를 적용
- 변압기 용량은 운전율 80%를 상한 적용

- 과도상태의 전압은  $\pm 20\%$ , 지속시간 1.5초를 적용
- 과도상태의 주파수는  $\pm 10\%$ , 지속시간 1.5초를 적용
- 모선의 고장전류는 1,000V 초과 시에는 25kA 이하, 1,000V 이하에는 50kA를 적용

표 4.1 분석기준

Table 4.1 Analysis limits and standards

구 분		기 준		비 고
전압강하		$\pm 5\%$ 이하		IEEE Std. 45
전압/주파수 변동	permanent	전압 $\pm 10\%$	주파수 $\pm 5\%$	
	transient 1.5초	전압 $\pm 20\%$	주파수 $\pm 10\%$	
고장 전류	1,000V 초과	25kA 미만		IEC 60056
	1,000V 이하	50kA		IEC 60947-2
변압기	Capacity	여유율 20% 이상		Normal operation

## 4.2 분석결과

### 4.2.1 모선의 운전전압

전력조류 분석결과를 각각 표 4.2에 운전 모드에 따른 중요 모선의 운전전압을 나타내었다. 전체 운전 모드에서의 각 모선에서의 전압강하는 규정치 이내를 만족하였으며 조류의 흐름 또한 정상적이었다. 이는 반복적인 분석을 통하여 부하의 재배치와 전압강하의 검토 그리고 전력조류의 흐름을 파악하여 조정

하여야 하는 것이므로 다양한 해석이 필요한 것이다. 모션전압의 변동은 최저 96.8%에서 최대 100% 이하로 전체적으로 약 2~3%로서 허용범위 내에서 운전되고 있다.

표 4.2 운전 모드별 모션의 운전전압

Table 4.2 Bus voltage in 4 operating modes

모션 구분	정격전압 (V)	운전전압(%)			
		이동 모드	시추 모드 1	시추 모드 2	리밍 모드
HV1	11,000	100	100	100	100
HV2	11,000	100	100	100	100
HV3	11,000	100	100	100	100
HV4	11,000	100	100	100	100
LVSVC1	690	97.7	97.1	97.1	96.8
LVSVC2	690	97.7	97.1	97.1	97.1
LVSVC3	690	98.8	97.9	97.9	97.8
LVSVC4	690	98.4	97.5	97.5	97.5
LVDR1	690	100	100	100	100
LVDR2	690	100	100	100	100

## 4.2.2 변압기 여유율

표 4.3 운전 모드별 변압기 여유율

Table 4.3 Transformer loading in 4 operating modes

변압기 구분	정격용량 (kVA)	운전 용량(%)			
		이동 모드	시추 모드 1	시추 모드 2	리밍 모드
T-SVC1	3,300	60.9	76.4	76.4	81.6
T-SVC2	3,300	60.9	76.4	76.4	76.4
T-SVC3	3,300	30.2	55.7	55.7	57.8
T-SVC4	3,300	40.4	66.0	66.0	66.0
T-DR1	6,000	0.0	46.6	46.6	39.3
T-DR2	6,000	0.0	44.5	44.5	31.0
T-THR1~8	3,800	49.7	49.7	81.1	81.1

표 4.3에 운전 모드별 각 변압기의 용량과 운전율을 나타내었다. 서비스부하용 변압기 T-SVC1~4는 리밍 모드에서 설비 용량의 81.6%로서 최대 부하를 보이고 있으며 이동 모드에서 30.2%로서 최소 부하를 보이고 있다. 또한 시추 부하용 변압기 T-DR1~2는 리밍 모드에서 31%로서 최소를 나타내고 이동 모드를 제외한 3개 모드에서 66%의 운전율을 나타내고 있다. 그리고 추진부하용 변압기 T-THR1~8은 경부하시는 49.7%, 중부하시는 81.1%의 운전율을 보이고 있다.

서비스부하용 변압기는 최대 부하시 각각 여유율이 24%, 43%, 33%, 28%로서 최소 1대의 서비스부하를 전부담할 수 있는 용량이다. 시추부하용 변압기는

시추부하 전체를 1대의 변압기로 운전 가능하여야 하므로 변압기의 부하율이 50%를 넘지 않게 구성되었다.

### 4.2.3 운전 모드별 전력조류

#### 가) 이동 모드

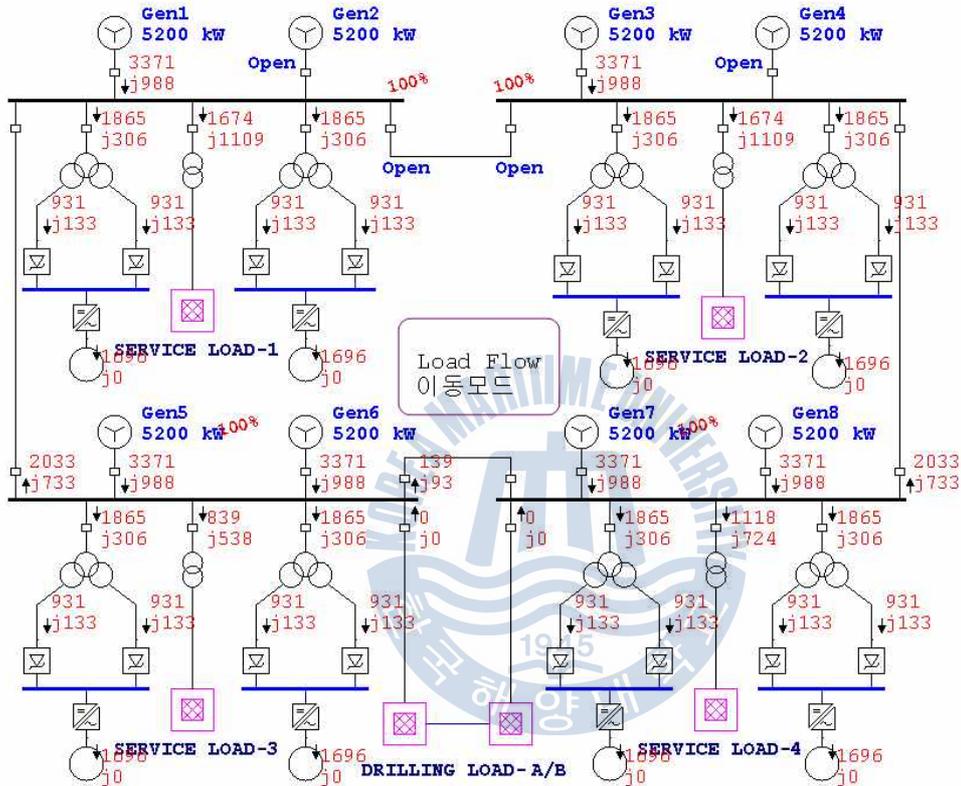


그림 4.1 이동 모드 전력조류 분석결과

Fig. 4.1 Load flow analysis result in transit mode

이동 모드에서는 운전 중인 발전기는 총 6대로서 표 2.1에 나타낸 것과 같이 전체 부하는 합계 19,790kVA이며 발전용량은 34,668kVA이며 부하율은

57.1%이다. 시추부하는 운전하지 않으므로 그림 4.1에서 보는 바와 같이 'Drilling LOAD-A와 B'로 흐르는 전력조류가 흐름이 없음을 나타내고 있다. 서비스부하 31%, 추진부하 69%로 구성되어 있으며 4가지 모드 중 최소의 부하 상태이다. 각 모선의 전압은 표 4.2의 운전전압 결과인 약 2.3%의 전압강하를 보이고 있으며 이는 분석기준인 표 4.1의 IEEE Std. 45에 따라서  $\pm 5\%$ 의 허용범위 내이며 서비스부하 690V 모선에서 나타나고 있다(표 4.2 참조).

### 나) 시추 모드 1

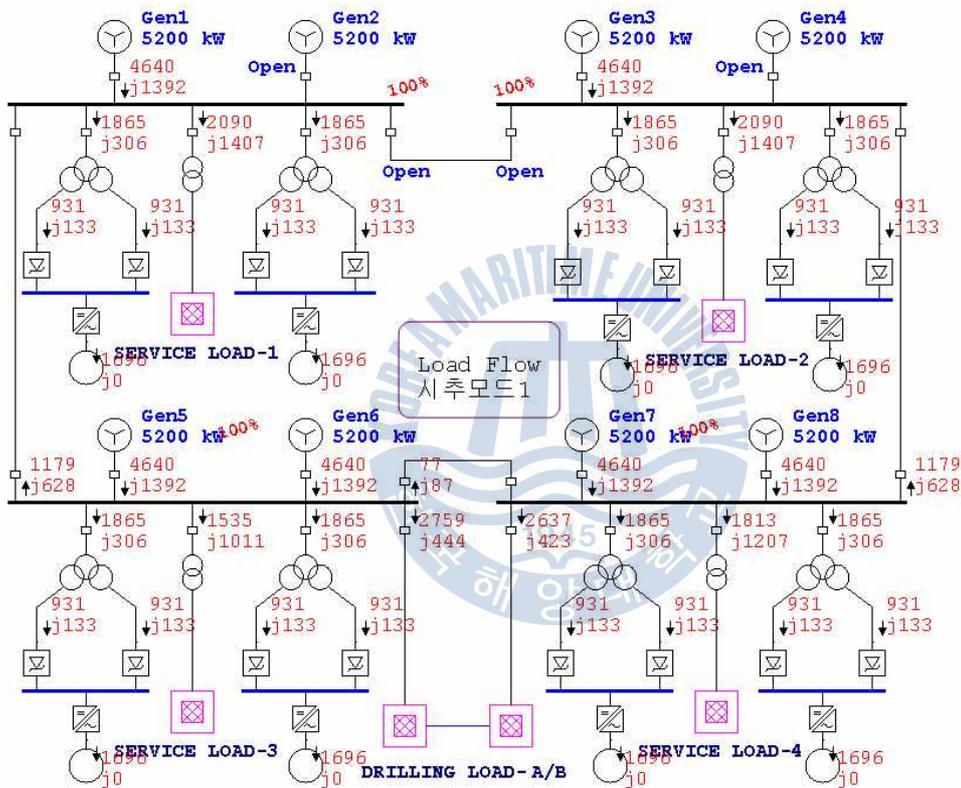


그림 4.2 시추 모드 1 전력조류 분석결과

Fig. 4.2 Load flow analysis result in drilling mode 1

시추 모드 1에서는 서비스부하 31%, 시추부하 19%, 추진부하 49%로 구성

되어 있으며 전체 부하는 27,636kVA로서 발전기 6대의 운전으로 79.7%의 부하율을 나타내고 있다. 운전 효율이 제일 우수한 운전 모드이다. 모선의 전압강하는 표 4.2에서 서비스부하 모션에서 최대 약 2.9%의 전압강하율을 보이고 있으나 허용범위인  $\pm 5\%$ 이내이다.

### 다) 시추 모드 2

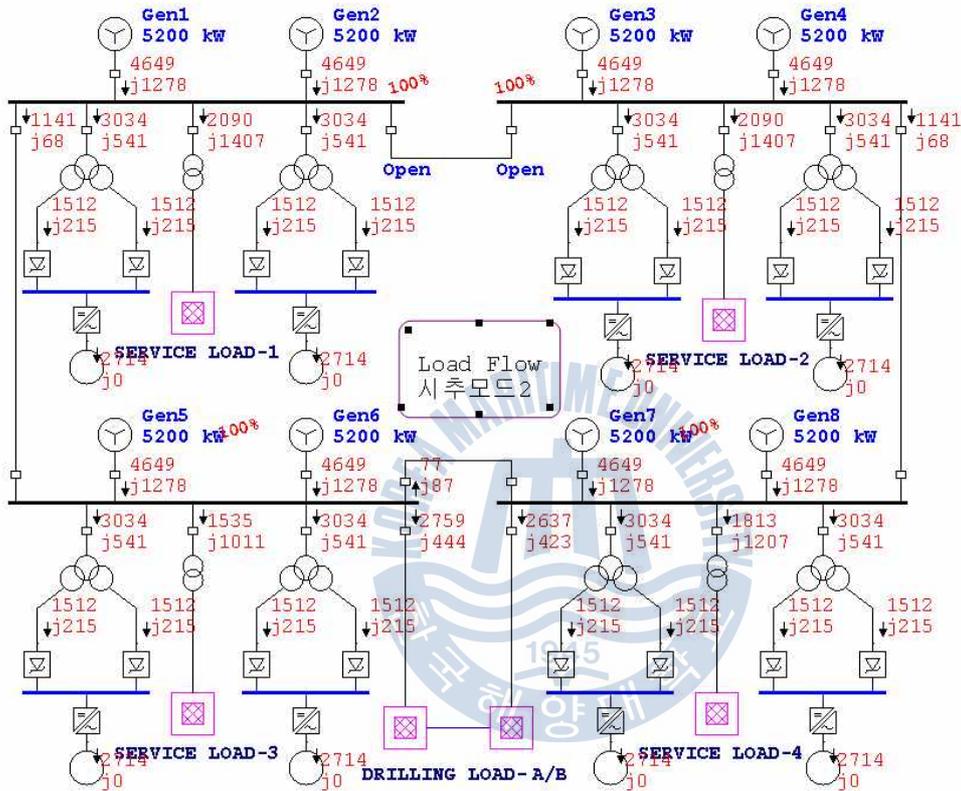


그림 4.3 시추 모드 2 전력조류 분석결과  
Fig. 4.3 Load flow analysis result in drilling mode 2

시추 모드 2는 전체 부하 35,780kVA로서 시추 모드 1에 비해 29.5% 더 많은 부하를 운전하고 있다. 그러므로 발전기의 운전도 8대 전부를 운전하고 있으며 부하율은 77.4%로서 운전 효율이 우수한 편이다. 최대 부하로 운전 중이

나 발전기 운전 여유율이 23%로서 적절하며, 시추부하용 변압기는 54~56%로서 충분히 A/B 부하를 유사시 전부담하여 운전할 수 있는 것으로 판단된다.

서비스부하 모선의 전압강하는 약 2.9%로서 부하의 증대와 더불어 발전량의 증가로 인하여 허용범위 이내를 유지하고 있다.

### 라) 리밍 모드

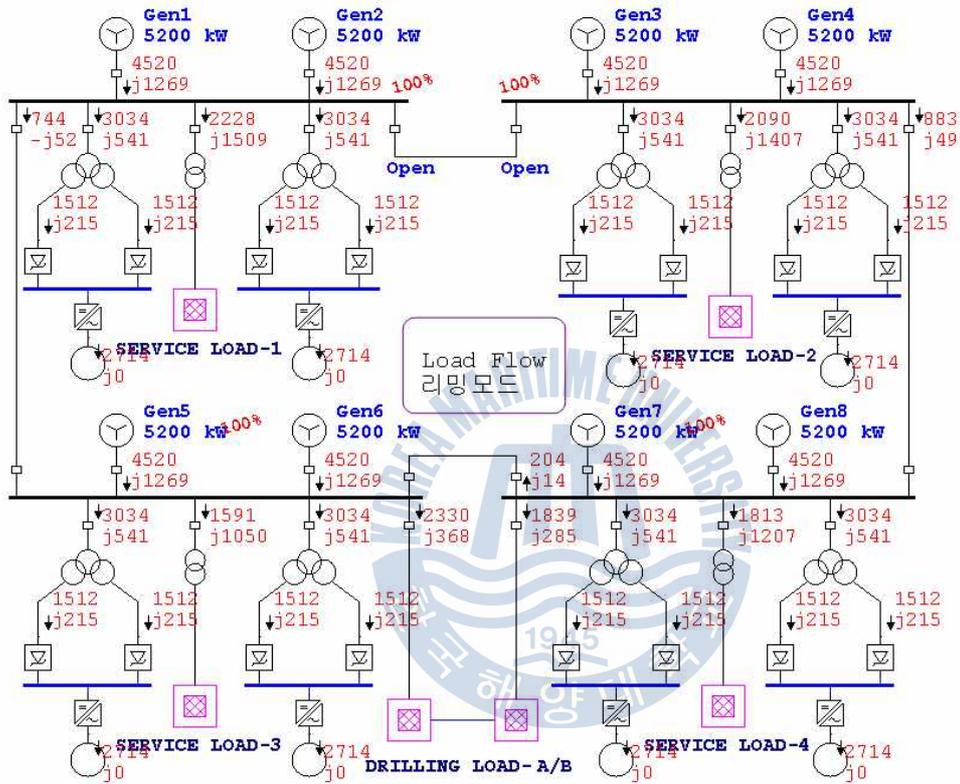


그림 4.4 리밍 모드 전력조류 분석결과

Fig. 4.4 Load flow analysis result in reaming mode

리밍 모드는 최대 부하는 아니지만 시추 모드 2와 비교해 약 1,000kVA밖에 차이가 나지 않을 정도이며 부하율이 75.3%로서 시추모드와 큰 차이가 없다.

4가지 운전 모드 중에서 서비스부하가 9,044kVA로서 최대이며 전체 부하 중 26%를 차지하고 있으며. 추진부하 62%, 시추부하 12% 등이며 발전기 운전 수량도 8대로서 중부하 운전에 해당한다. 서비스부하가 최대인 경우이지만 전압강하는 약 2.9%로서 허용기준을 만족함으로써 계통의 설계가 적정하다 판단된다.



## 5. 비상시 전력계통해석

계통내의 급작스런 부하의 탈락이나 변동, 발전기의 정지, 모선 내에서의 단락사고 등 이러한 현상이 계통 내에 발생하게 되면 모선의 전압이나 주파수 등이 영향을 받게 된다. 사고 초기의 대응이 적절하지 못하다면 과급효과로 인하여 부분 또는 전체 계통이 정전될 수도 있으므로 많은 검토가 필요할 것이다. 비상시 전력계통의 해석에는 ETAP 프로그램의 과도현상해석 모듈을 이용하고 구성된 전력계통에 대한 다양한 과도현상이 계통 내에 미치는 영향과 현상을 고찰하였다. 또한 3상 단락전류와 지락전류를 계산하여 계통내의 고장전류 분포를 검토하였다.

비상시 전력계통해석을 수행할 내용은 다음과 같다.

- 최대 부하 상태에서의 과도현상해석
- 발전기의 탈락
- 추진부하의 탈락
- 단락사고의 발생
- 3상 단락전류 및 지락전류계산

상기 해석을 수행하고 각 모선의 전압, 주파수 그리고 발전기의 출력 등을 검토하여 과도현상이 계통에 미치는 영향을 파악하고 단락전류의 계산을 통하여 전기적 사고시 고장전류의 크기와 특성 등을 살펴 계통내의 영향을 최소화할 수 있는 방안을 고찰하였다.

## 5.1 발전기 및 부하 탈락

### 5.1.1 추진부하의 탈락

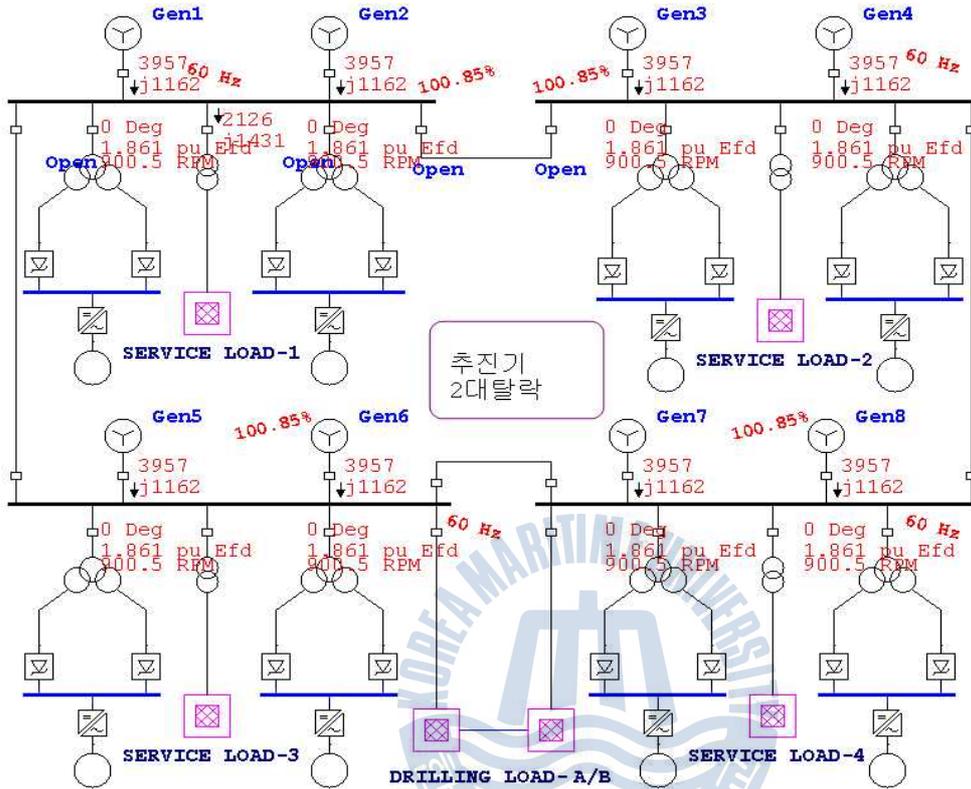


그림 5.1 추진부하 2대 탈락시

Fig. 5.1 Load elimination of 2 thrusters

그림 5.1에 추진부하의 탈락시에 발생한 계통내부의 변화를 나타내었다. 해양플랜트 또는 전기추진 선박의 경우 추진부하의 규모가 전체 부하의 60~70%를 차지하므로 추진부하의 이상 탈락은 독립전원 계통에 고려되어야 한다. 추진부하 2대를 동시에 탈락시킨 후 0.2초 후 재연결한 경우이다. 추진부하의 비중이 크므로 최대 부하에서 해석을 수행하였다. 추진기는 1대당 3200kW의 유

도전동기로서 탈락 순간에는 정격의 약 80%로 운전 중이었다.

가) 고정여자방식과 조속기 없는 경우

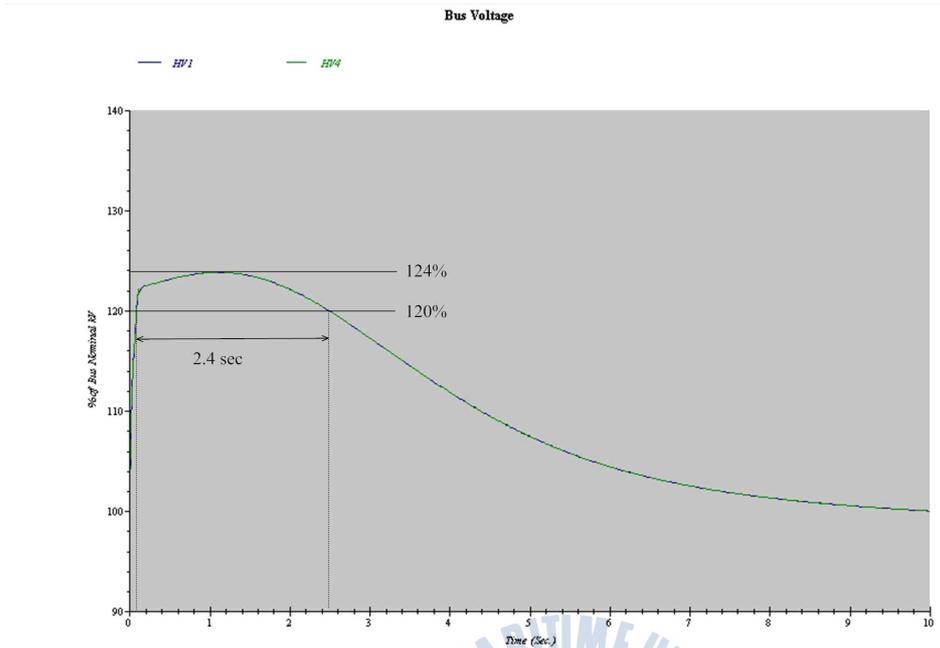


그림 5.2 추진부하 2대 탈락시의 HV 모션전압(개루프제어)  
 Fig. 5.2 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)

그림 5.2 ~ 그림 5.6 등은 그 결과이다. 그림 5.2는 고정여자방식(전압 조정 없음, 개루프제어)의 여자기를 적용하고 조속기가 없는 상태의 고압 HV 모션의 전압을 나타내었다. 고압모션의 전압이 정격전압의 약 124%까지 상승하였다가 완만한 곡선을 그리며 정격전압까지 떨어지고 있다. 표 4.1의 분석기준에 의하면 과도상태의 전압변동은 정격전압의 120%이내, 지속시간 1.5초이내에 회복되어야 한다. 그러나 그림 5.2의 결과는 정격전압의 120%를 넘고 그 지속시간이 2.4초이므로 허용기준을 만족시키지 못하고 있다. 그림 5.3의 고압 HV 모션의 주파수 역시 정격주파수 60Hz의 약 109%까지 상승하였다가 50%이하

로 완만히 하강하고 있다. 과도상태의 주파수 변동 허용범위인  $\pm 10\%$ 를 넘어서  $-50\%$ 이하로 떨어져 회복되지 못하고 있다.

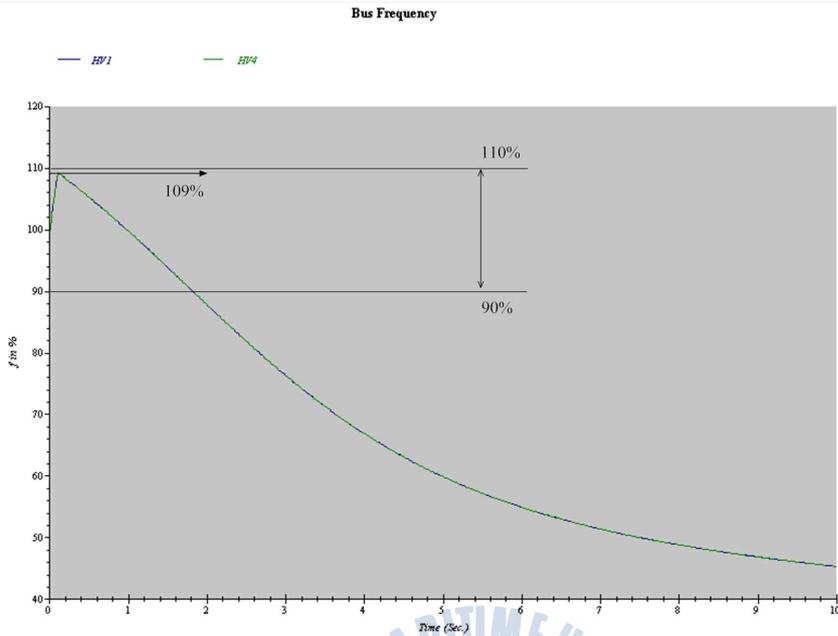


그림 5.3 추진부하 2대 탈락시 HV 모선주파수(개루프제어)

Fig. 5.3 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated (open-loop control)

그림 5.4의 발전기의 속도응답은 정격속도인 900rpm에서 약 980rpm까지 +9% 상승했다가 역시 완만히 약 450rpm까지 정격속도의 50%로 떨어지고 회복되지 못하고 있다. 모선주파수의 변동과 같은 유형의 결과이다. 그림 5.5의 발전기 출력전류의 응답은 부하탈락시 급격히 감소했다가 정상상태로 회복됨을 알 수 있다. 그림 5.6에 발전기 출력 전류 파형의 부분 확대 파형을 보였다.

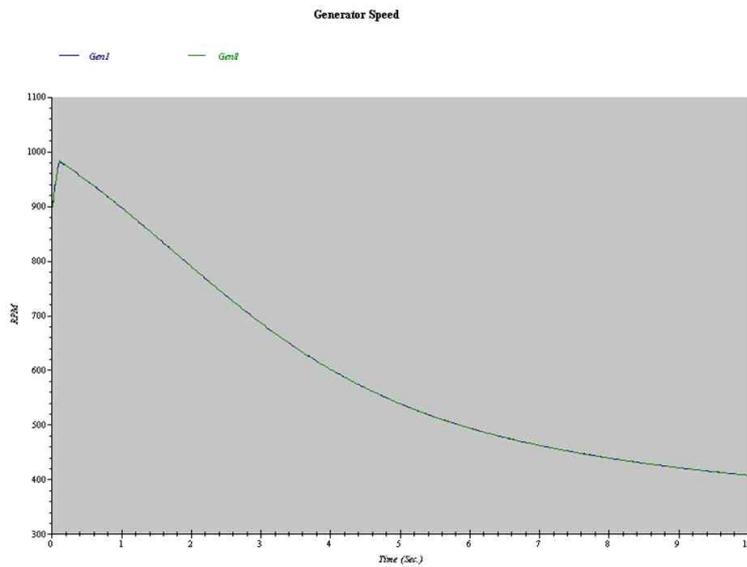


그림 5.4 추진부하 2대 탈락시 발전기속도(개루프제어)  
 Fig. 5.4 Generator speed when 2 thrusters were eliminated (open-loop control)

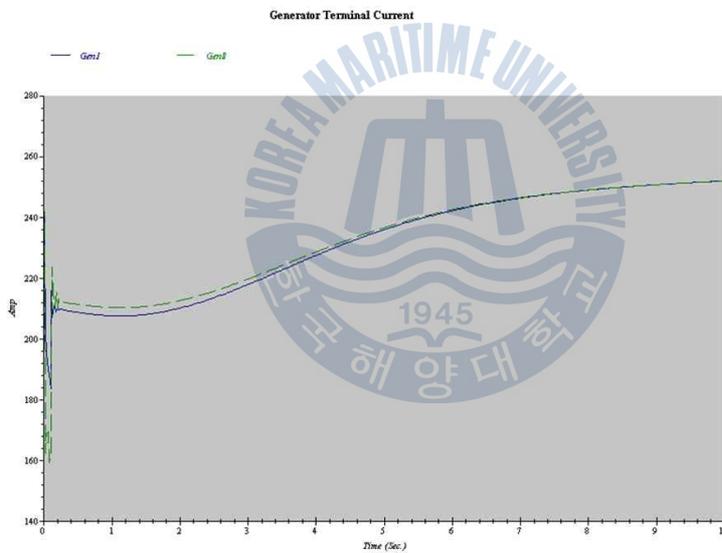


그림 5.5 추진부하 2대 탈락시 발전기전류,  
 time=0~10secs(개루프제어)  
 Fig. 5.5 Generator terminal current at time=0~10secs when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)

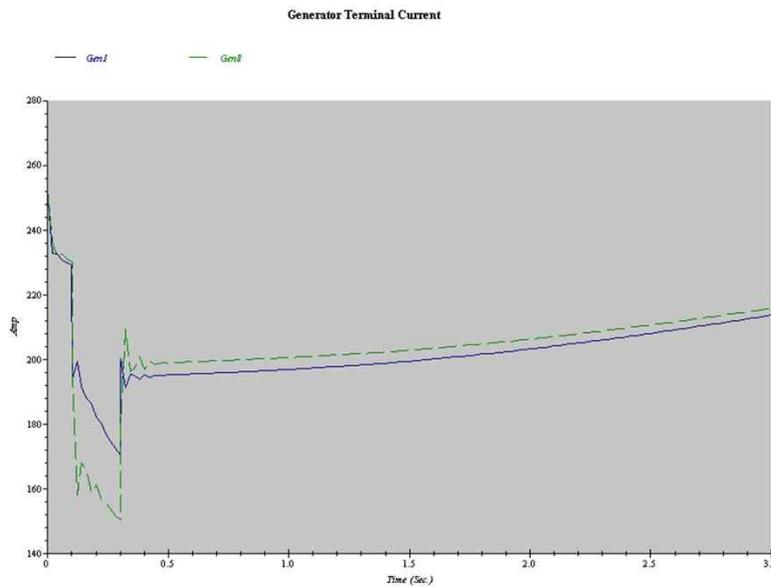


그림 5.6 추진부하 2대 탈락시 발전기전류, time=0~3secs (개루프 제어)

Fig. 5.6 Generator terminal current at time=0~3secs when 2 thrusters were eliminated(open-loop control)

#### 나) 고정여자방식과 조속기 있는 경우

그림 5.7 ~ 그림 5.10등은 고정여자방식의 여자기와 Woodward 2301 조속기를 적용한 경우의 결과이다. 고압모선의 전압이 계속 상승하여 정격전압의 약 178%까지 상승하며 제어되지 못하고 있다. 그림 5.8의 고압모선의 주파수는 정격주파수 대비 +3%와 -4.5%의 상하간 차이로 진동함을 보이고 있다. 그림 5.9의 발전기의 속도응답은 모선주파수와 같은 형태의 응답을 보이고 있으므로 발전기의 속도에 의한 영향은 모선의 주파수와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다. 조속기의 속도 제어로 발전기의 속도는 평균값은 정격속도를 유지하고 있으나 약 30 rpm의 크기로 진동함을 보이고 있다.

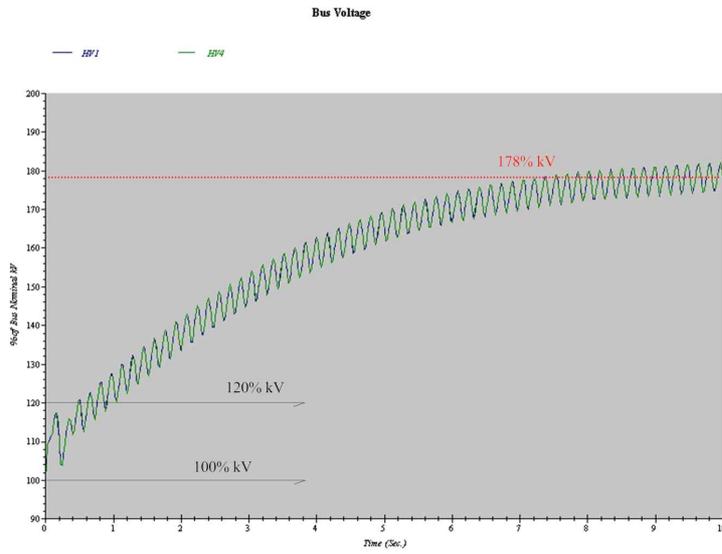


그림 5.7 추진부하 2대 탈락시 HV 모션전압(조속기)  
 Fig. 5.7 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated with governor

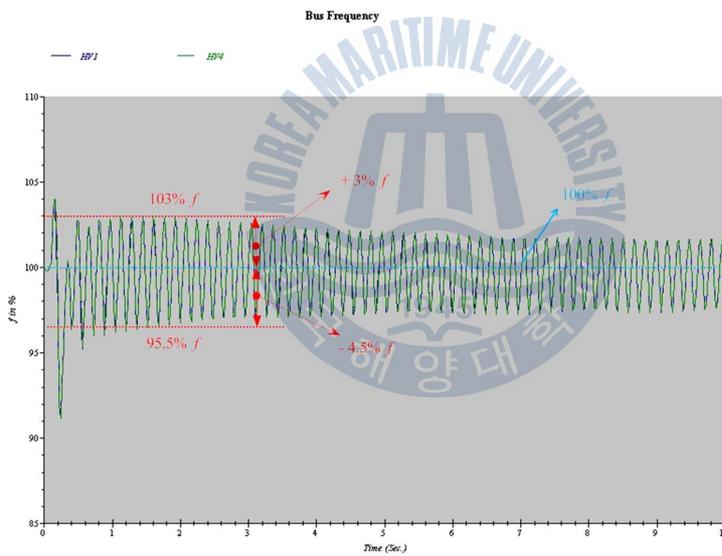


그림 5.8 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(조속기)  
 Fig. 5.8 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated with governor

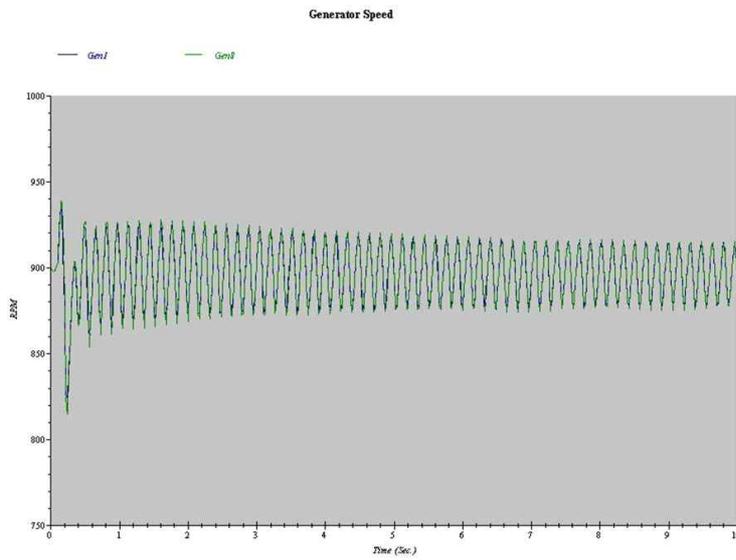


그림 5.9 추진부하 2대 탈락시 발전기속도(조속기)

Fig. 5.9 Generator speed when 2 thrusters were eliminated with governor

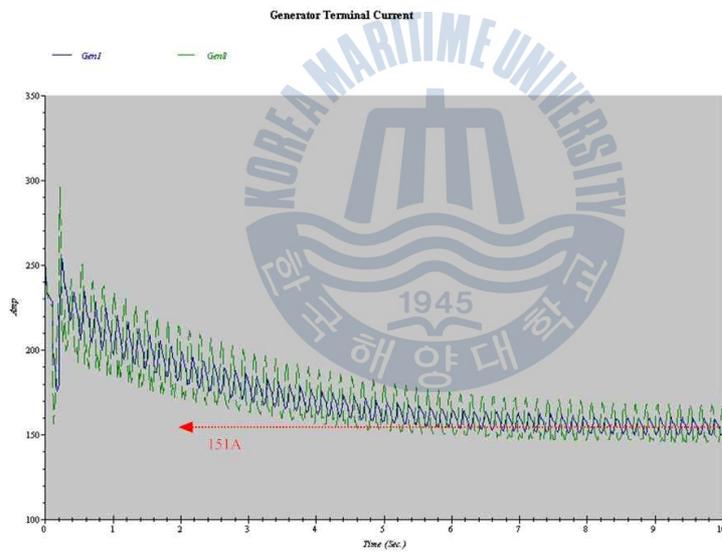


그림 5.10 추진부하 2대 탈락시 발전기전류(조속기)

Fig. 5.10 Generator terminal current when 2 thrusters were eliminated with governor

그림 5.10의 발전기의 출력 전류는 약 151A에서 수렴하고 있지만 부하탈락 직후의 전류는 약 250A이다. 그러므로 여자기의 모선에 전압 조정이 이루어지지 않아 모선의 전압은 상승하고 전류는 감소한 결과이다.

#### 다) 고정여자방식과 조속기의 변수를 조정한 경우

그림 5.11, 그림 5.12은 각각 Woodward 2301 조속기의 제어 변수를 조정하여 얻은 결과이다. 고압모선의 전압은 정격전압의 179%까지 상승하였다. 고정방식 여자기의 전압제어가 이루어지지 못하고 있다. 반면 주파수 응답은 부하탈락시 정격주파수의 107%, 92%까지 변동하였으나 허용기준  $\pm 10\%$ 이내이며 정상상태 오차가 없어지고 정격주파수에 수렴하기까지 1.4초로서 우수한 응답을 보였다.

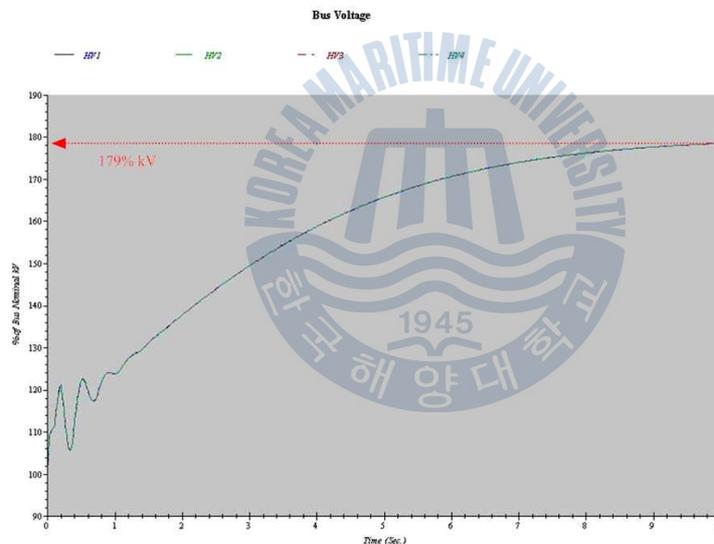


그림 5.11 추진부하 2대 탈락시 HV 모선전압(조속기조정)

Fig. 5.11 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated with adjusted governor

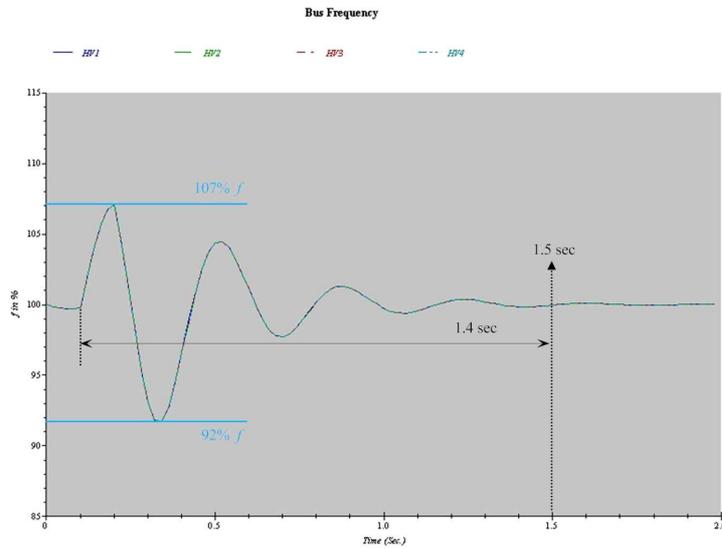


그림 5.12 추진부하 2대 탈락시 HV 모선주파수(조속기조정)

Fig. 5.12 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated with adjusted governor

#### 라) AC8B 여자시스템과 조속기의 변수를 조정한 경우

그림 5.13, 그림 5.14는 각각 Woodward 2301 조속기와 함께 IEEE type AC8B 여자기를 적용한 결과이다. 여자기의 고압모선에 대한 전압제어가 이루어지면서 부하탈락시 전압의 변동은 있지만 정격전압의 114%, 97%까지 변동하였지만 허용기준 이내를 만족하며 회복시간 또한 정격의 5%내로 1초미만의 우수한 응답을 나타내고 있다. 주파수 또한 정격대비 107%, 91.7%로서 과도상태의 규정을 만족하고 있다.

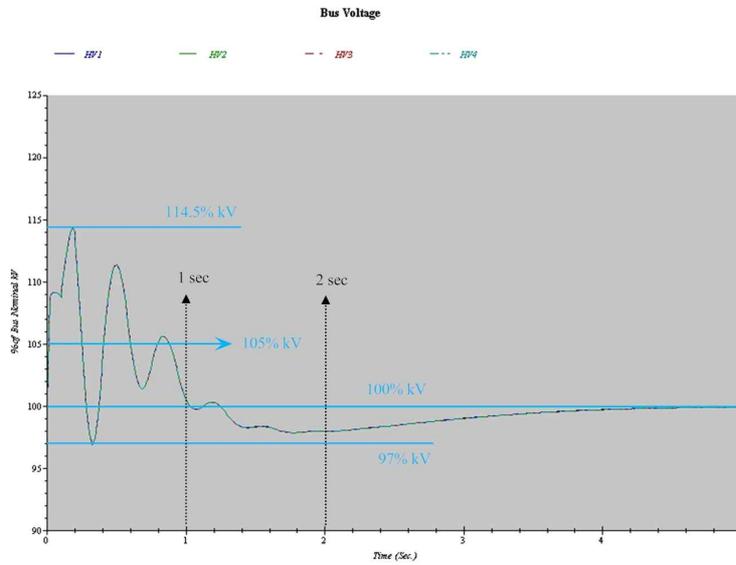


그림 5.13 추진부하 2대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)  
 Fig. 5.13 HV feeder voltage when 2 thrusters were eliminated  
 (closed-loop control)

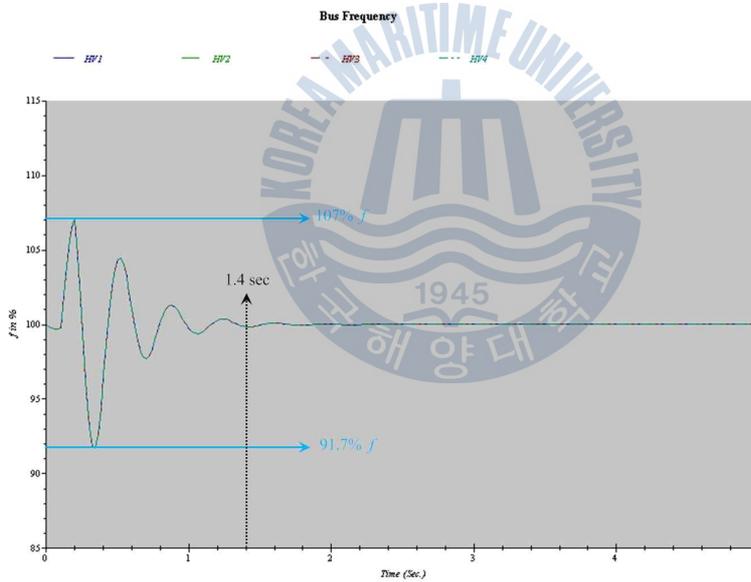


그림 5.14 추진부하 2대 탈락시 HV 모션주파수(폐루프제어)  
 Fig. 5.14 HV feeder frequency when 2 thrusters were eliminated  
 (closed-loop control)

### 5.1.2 발전기 1대의 탈락

운전 모드에서 구성한 전력계통의 발전기는 총 8대이며 정격은 5,200kW, 역률 0.9이다. 최대 부하 운전시의 발전기의 대당 출력은 약 4,649kW이므로 전체 부하 용량 대비 약 13%에 해당한다.

#### 가) 고정여자방식과 조속기 없는 경우

그림 5.15 ~ 그림 5.18은 개루프제어(고정 방식의 여자기와 조속기 없음)시의 발전기 1대의 탈락에 대한 결과이다. 그림 5.15의 고압모선의 전압은 정격 전압의 약 80%의 전압강하가 나타났다. 그림 5.16의 고압모선의 주파수 응답은 정격주파수의 46%에 이르고 있다. 그림 5.17의 발전기의 속도 역시 약 420rpm으로 떨어지고 있으며 계통의 계속 운전이 불가능한 상황이다.

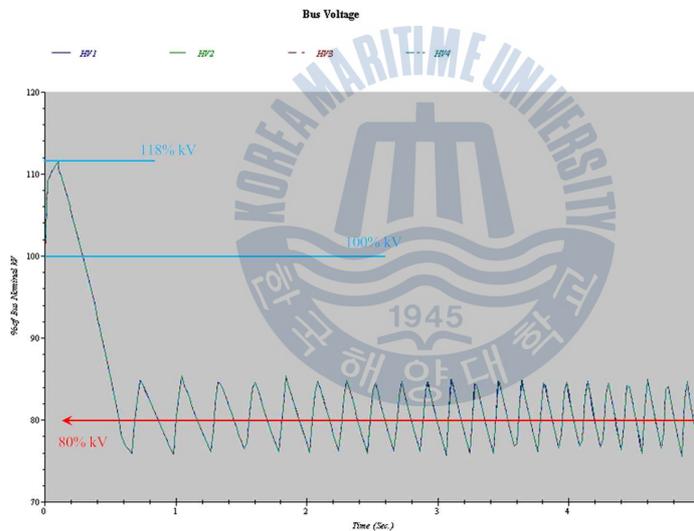


그림 5.15 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(개루프제어)

Fig. 5.15 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated(open-loop control)

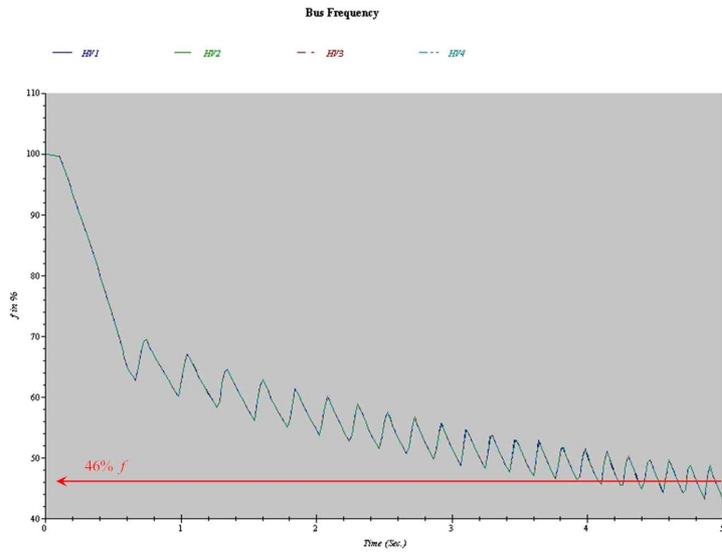


그림 5.16 발전기 1대 탈락시 HV 모선주파수(개루프제어)

Fig. 5.16 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated(open-loop control)

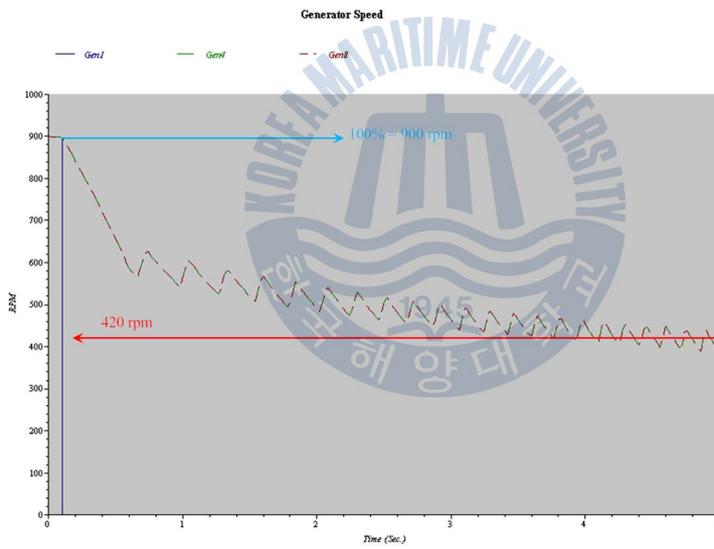


그림 5.17 발전기 1대 탈락시 발전기속도(개루프제어)

Fig. 5.17 Generator speed when 1 generator was eliminated (open-loop control)

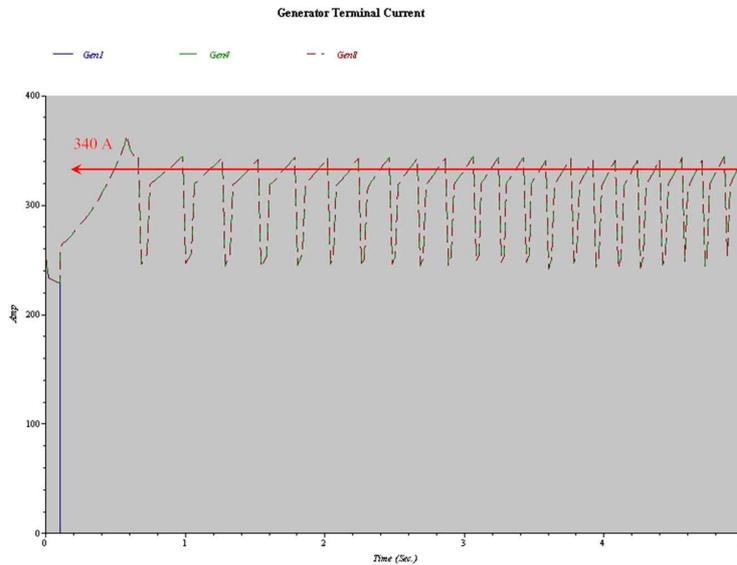


그림 5.18 발전기 1대 탈락시 발전기전류(개루프제어)

Fig. 5.18 Generator terminal current when 1 generator was eliminated(open-loop control)

### 나) AC8B 여자시스템과 조속기 있는 경우

그림 5.19 ~ 그림 5.22등은 Woodward 2301 조속기와 IEEE type AC8B 여자기를 적용한 경우의 응답 결과이다. 개루프제어에 비해 상당히 안정된 결과를 나타내고 있다. 고압모션의 전압은 약간의 상태오차가 있지만 정격전압을 유지하고 있으며 주파수는 약 97%까지 떨어졌으나 0.3초 만에 회복하고 있다. 발전기의 속도 변동은 최저 약 870rpm이며 전류 역시 발전기 1대의 탈락에 의한 전류 보상이 이루어짐을 알 수 있다.

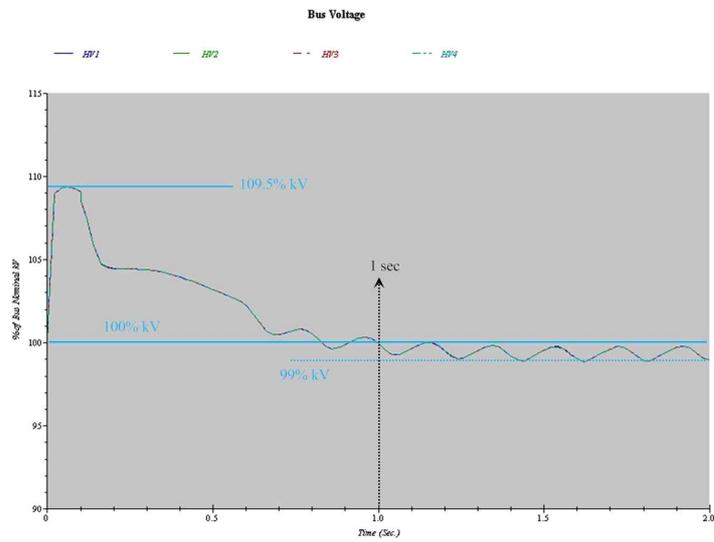


그림 5.19 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)  
 Fig. 5.19 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated (closed-loop control)

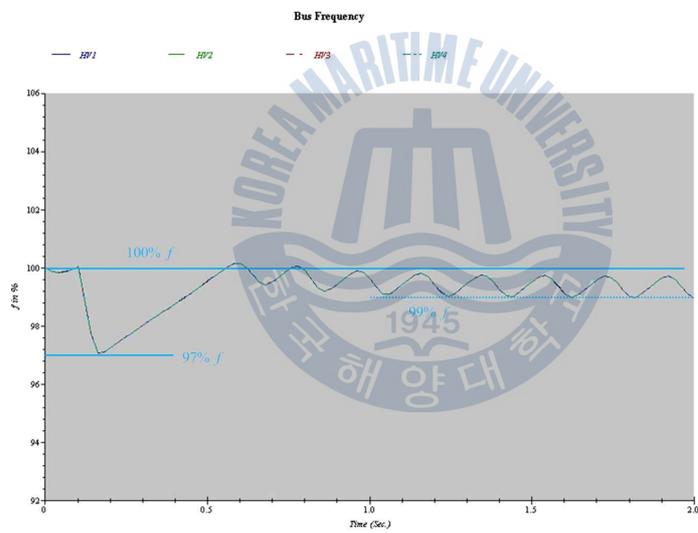


그림 5.20 발전기 1대 탈락시 HV 모션주파수(폐루프제어)  
 Fig. 5.20 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated(closed-loop control)

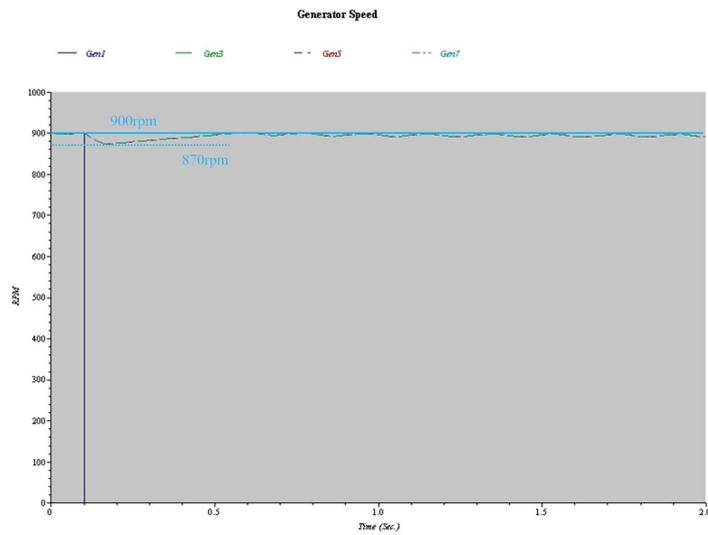


그림 5.21 발전기 1대 탈락시 발전기속도(폐루프제어)

Fig. 5.21 Generator speed when 1 generator was eliminated (closed-loop control)

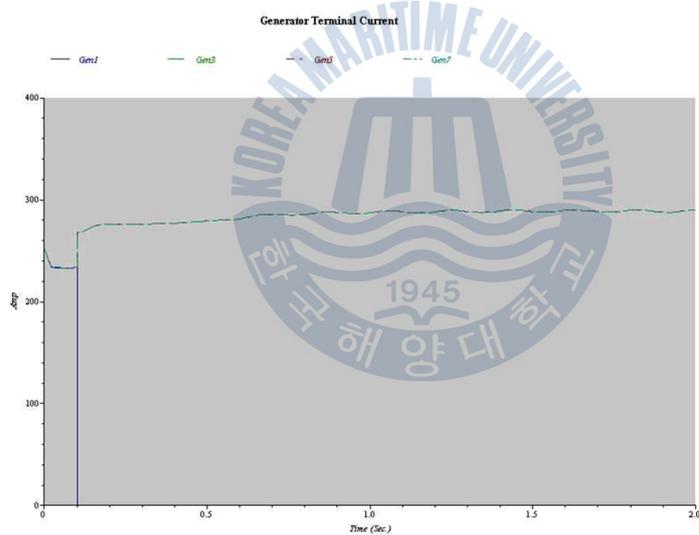


그림 5.22 발전기 1대 탈락시 발전기전류(폐루프제어)

Fig. 5.22 Generator terminal current when 1 generator was eliminated(closed-loop control)

## 다) AC8B 여자시스템과 조속기의 변수를 조정한 경우

조속기의 제어기 변수를 조정하여 얻은 응답 결과를 그림 5.23에서 그림 5.26까지 나타내었다. 제어기 변수 조정전인 그림 5.19의 모션전압에 비교해 정상상태에서의 오차가 거의 없어진 결과를 보이고 있다.

고압모선의 주파수, 발전기의 속도 응답 역시 정상상태 오차가 줄어든 것을 알 수 있다.

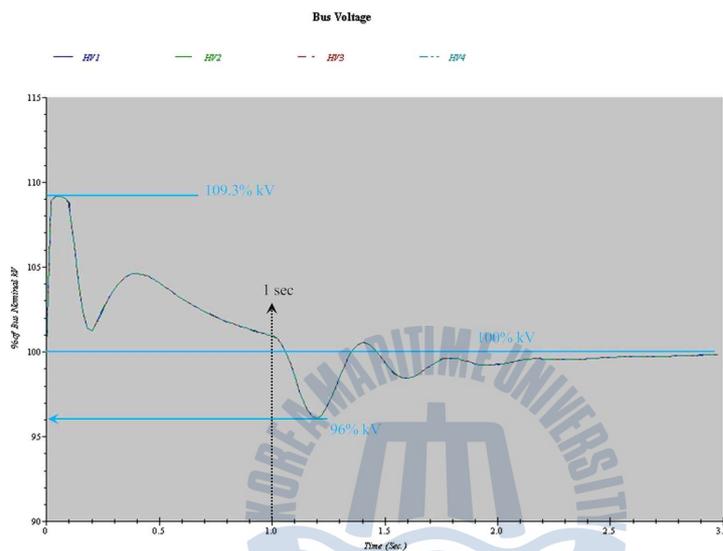


그림 5.23 발전기 1대 탈락시 HV 모션전압(조속기조정)

Fig. 5.23 HV feeder voltage when 1 generator was eliminated with adjusted governor

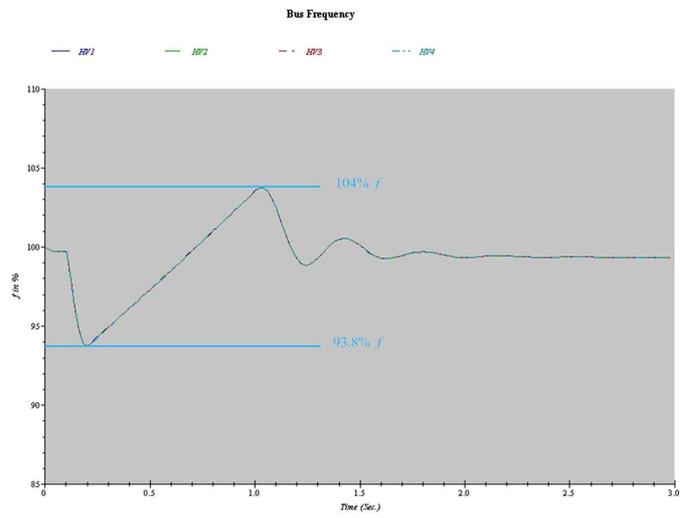


그림 5.24 발전기 1대 탈락시 HV 모선주파수(조속기조정)  
 Fig. 5.24 HV feeder frequency when 1 generator was eliminated with adjusted governor

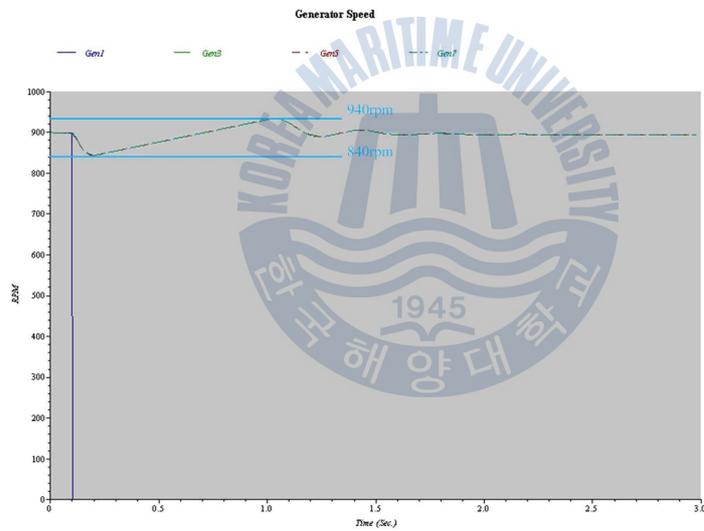


그림 5.25 발전기 1대 탈락시 발전기속도(조속기조정)  
 Fig. 5.25 Generator speed when 1 generator was eliminated with adjusted governor

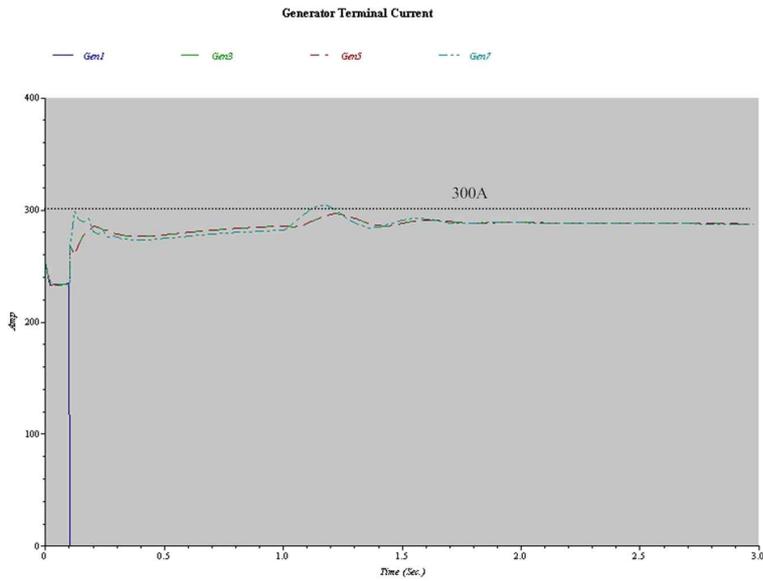


그림 5.26 발전기 1대 탈락시 발전기전류(조속기조정)  
 Fig. 5.26 Generator terminal current when 1 generator was eliminated with adjusted governor

### 5.1.3 발전기 2대의 탈락

#### 가) AC8B 여자시스템과 조속기의 변수를 조정한 경우

앞선 1대 탈락의 경우 모선의 전압, 주파수, 발전기의 속도 등이 정상으로 회복되었다. 발전기 2대가 0.1초의 시간 차이를 두고 연속적으로 탈락한 경우의 모선 및 발전기의 과도응답을 그림 5.27 ~ 그림 5.31등에 나타내었다. 고압모선의 전압이 정격전압을 유지하지 못하고 정격의 약 80%의 전압강하가 나타나고 있다. 모선의 주파수는 정격 60Hz의 40%까지 하락하고 있으며 발전기의 속도도 400rpm까지 떨어지면서 정격속도를 유지하지 못하고 있다.

발전기의 출력 전류도 큰 맥동을 보이면서 제어되지 못하고 있다. 여자기와 조속기 모두가 제어를 하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이유는 그림 5.31에 나

타난 발전기의 유효전력이 정격출력을 넘어서고 있음을 보이고 있으므로 발전기의 정격용량을 넘어서고 있음을 알 수 있다. 이는 여자기의 여자 한계로 인하여 발전기 출력이 부하량에 미치지 못하여 속도가 감소하게 된다.

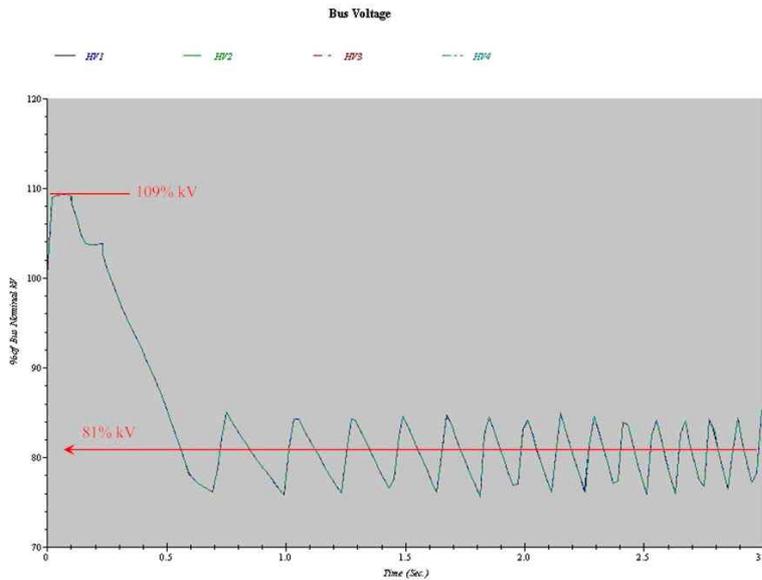
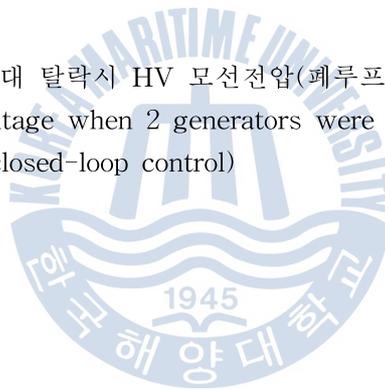


그림 5.27 발전기 2대 탈락시 HV 모션전압(폐루프제어)

Fig. 5.27 HV feeder voltage when 2 generators were eliminated (closed-loop control)



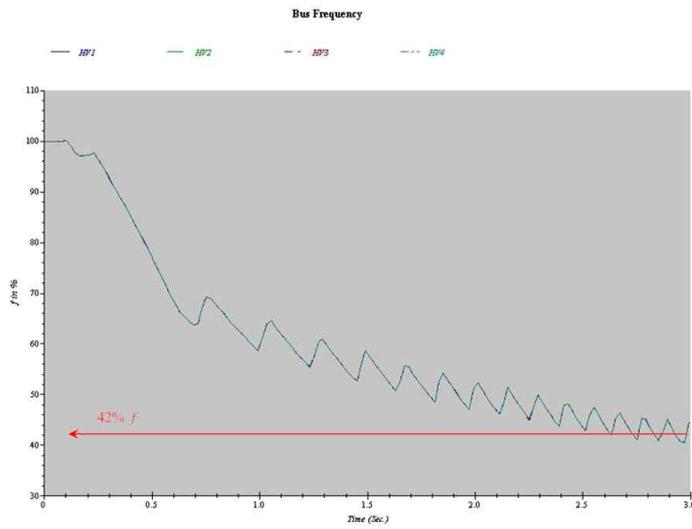


그림 5.28 발전기 2대 탈락시 HV 모선주파수(폐루프제어)  
 Fig. 5.28 HV feeder frequency when 2 generators were eliminated(closed-loop control)

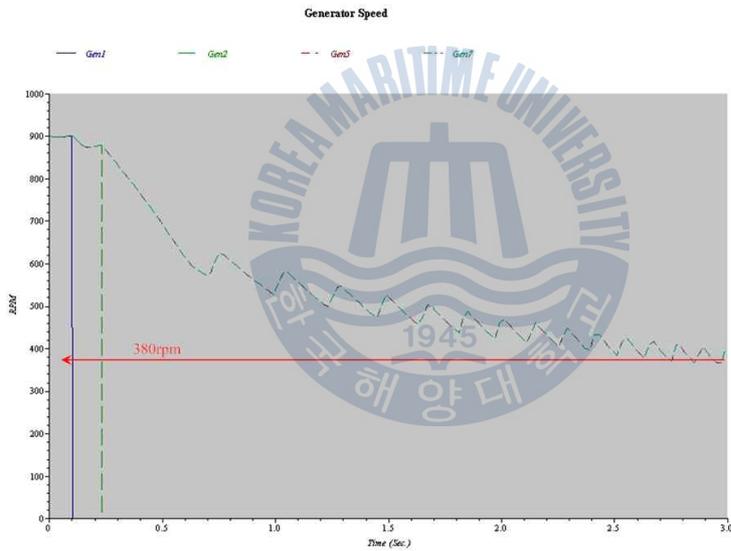


그림 5.29 발전기 2대 탈락시 발전기속도(폐루프제어)  
 Fig. 5.29 Generator speed when 2 generators were eliminated (closed-loop control)

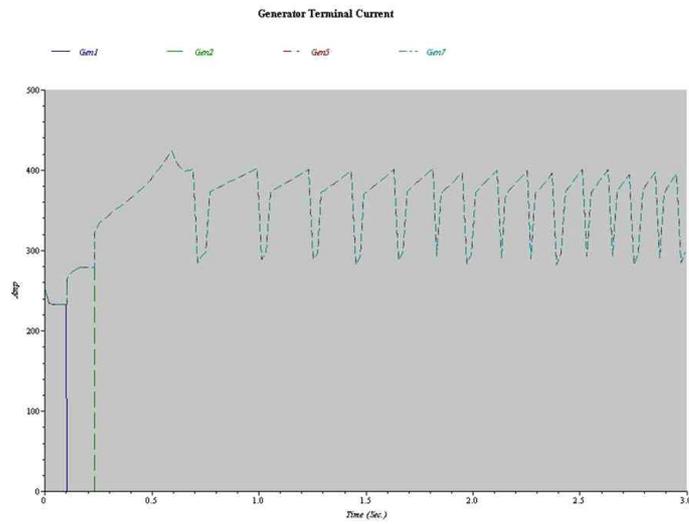


그림 5.30 발전기 2대 탈락시 발전기전류(폐루프제어)  
 Fig. 5.30 Generator terminal current when 2 generators were eliminated(closed-loop control)

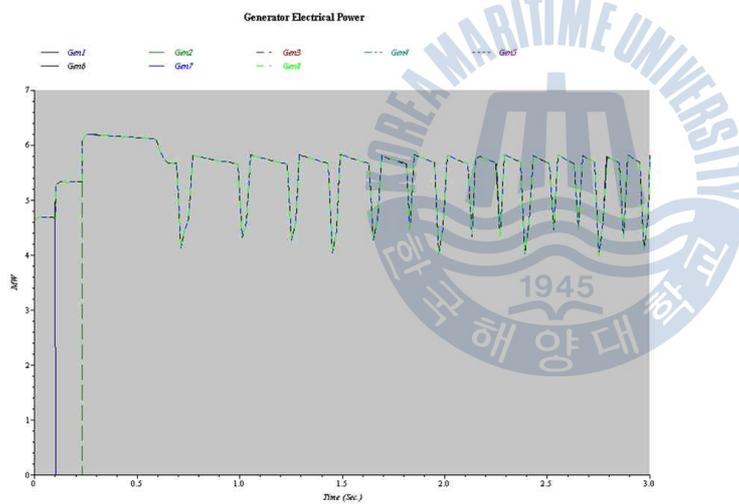


그림 5.31 발전기 2대 탈락시 발전기전력(폐루프제어)  
 Fig. 5.31 Generator electrical power when 2 generators were eliminated(closed-loop control)

### 5.1.4 고압모선의 3상 단락

부하와 발전기의 탈락 등의 변동은 기계적인 고장 등으로 인하여 전기적인 문제를 일으키는 경우가 많으나 3상 단락과 같은 전기적 고장은 고장전류가 단락이나 지락 사고보다 큰 전류가 흐르므로 단락전류계산 등을 통하여 전기적 고장 등에 대한 대비책을 확립하게 된다.

#### 가) AC8B 여자시스템과 조속기 있는 경우

고압모선에 3상 단락사고를 상정하였고 그 결과를 그림 5.32 ~ 그림 5.35에 각각 고압모선의 전압, 주파수, 발전기 출력단 전류, 발전기의 속도 등을 나타내었다. 모든 결과는 페루프제어(여자기와 조속기)된 발전기의 출력이며 단락 시간은 차단기의 차단 시간인 8 CYCLE, 0.13초 동안 발생토록 하였다.

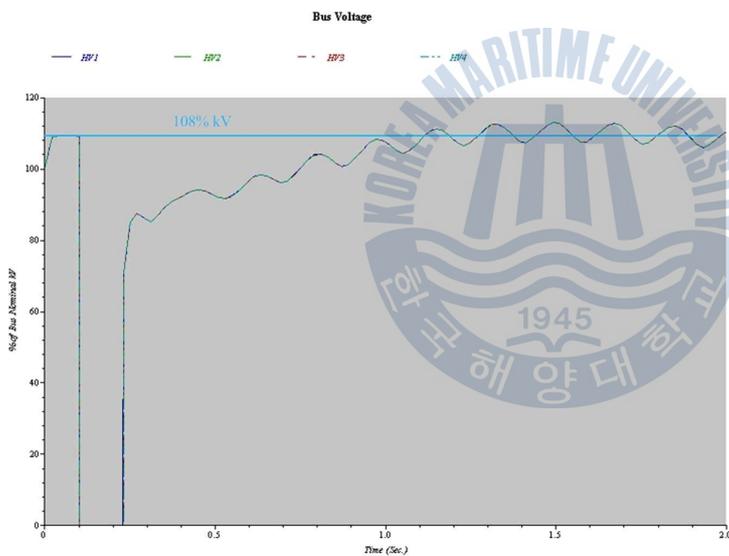


그림 5.32 3상 단락사고시 HV 모선전압(페루프제어)

Fig. 5.32 HV feeder voltage when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)

그림 5.32에서 단락사고 발생시 모선의 전압은 0으로 떨어지고 발전기의 출력 전류가 약 1800A까지 급격히 상승하며 차단 직전 약 110A까지 떨어지고 있다. 사고 후 고압모선의 전압이 서서히 회복되고 있지만 그림 5.33의 고압모선의 주파수는 약 정격의 약 116%까지 급상승함을 보이고 있으며 이후 정격 주파수에서  $\pm 2.5\%$ 의 맥동을 보이고 있다.

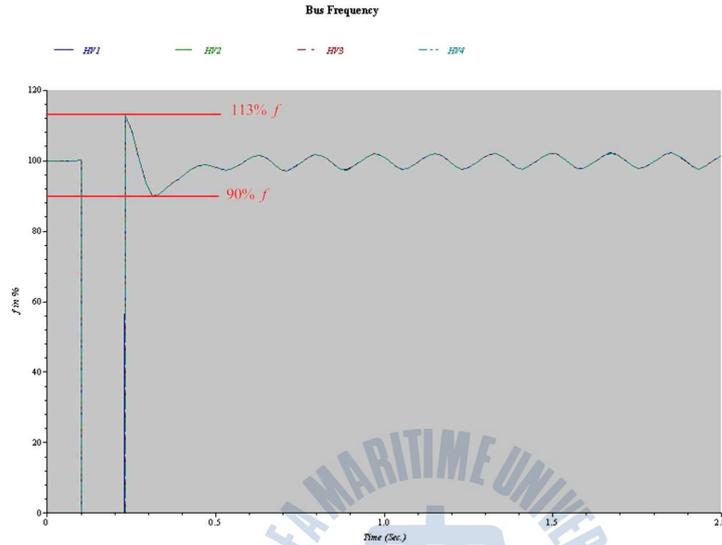


그림 5.33 3상 단락사고시 HV 모선주파수(폐루프제어)  
 Fig. 5.33 HV feeder frequency when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)

그림 5.34의 발전기속도는 단락 발생시 약  $\pm 10\%$ 의 속도 변동이 있었지만 정상상태로 회복되었다. 하지만 약  $\pm 30\text{rpm}$ 의 상태오차를 보이고 있다. 그림 5.35에 나타난 단락시 발생한 발전기의 전류는 약 1820A이며 정상상태의 전류 250A의 768%로서 많은 전류가 단시간에 흐를 수 있다.

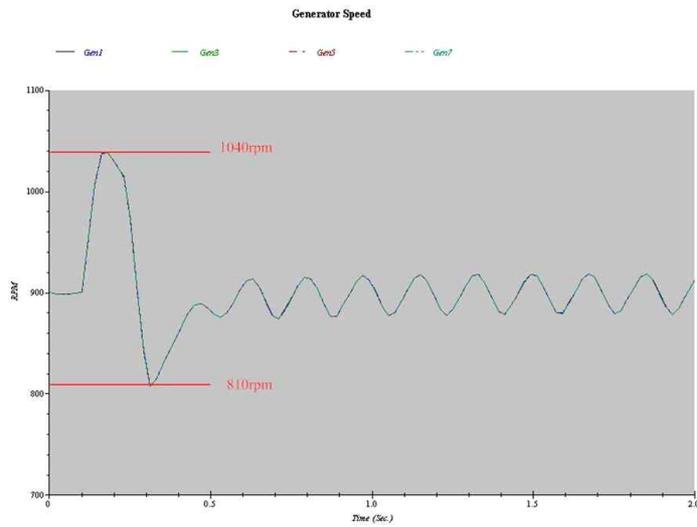


그림 5.34 3상 단락사고시 발전기속도(폐루프제어)  
 Fig. 5.34 Generator speed when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)

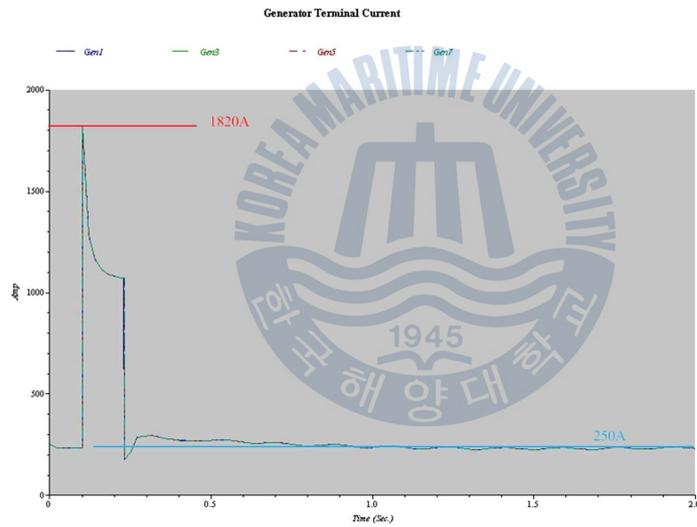


그림 5.35 3상 단락사고시 발전기전류(폐루프제어)  
 Fig. 5.35 Generator terminal current when 3 phase fault occur at HV feeder (closed-loop control)

## 나) AC8B 여자시스템과 조속기의 변수를 조정한 경우

그림 5.36 ~ 그림 5.39에는 조속기의 제어기 변수를 조정한 발전기의 출력을 보이고 있는데 이전과 비교하여 사고 차단 직후에 과도응답을 보이고 있으나 맥동이 거의 없으며 정상상태의 오차가 거의 없음을 나타내고 있다. 결과적으로 사고 전후의 정상상태로의 회복에 있어서도 조속기와 여자기의 제어 변수들의 영향을 받음을 알 수 있다.

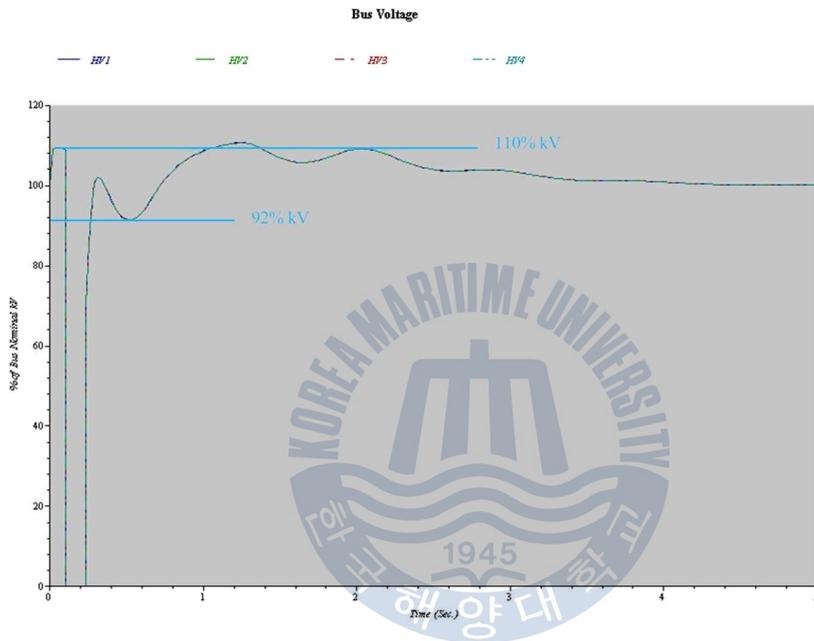


그림 5.36 3상 단락사고시 HV 모선전압(조속기조정)

Fig. 5.36 HV feeder voltage when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor

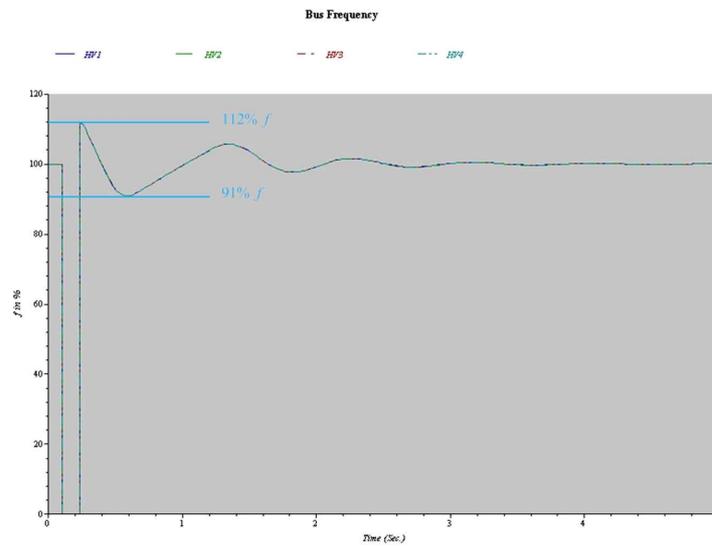


그림 5.37 3상 단락사고시 HV 모선주파수(조속기조정)  
 Fig. 5.37 HV feeder frequency when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor

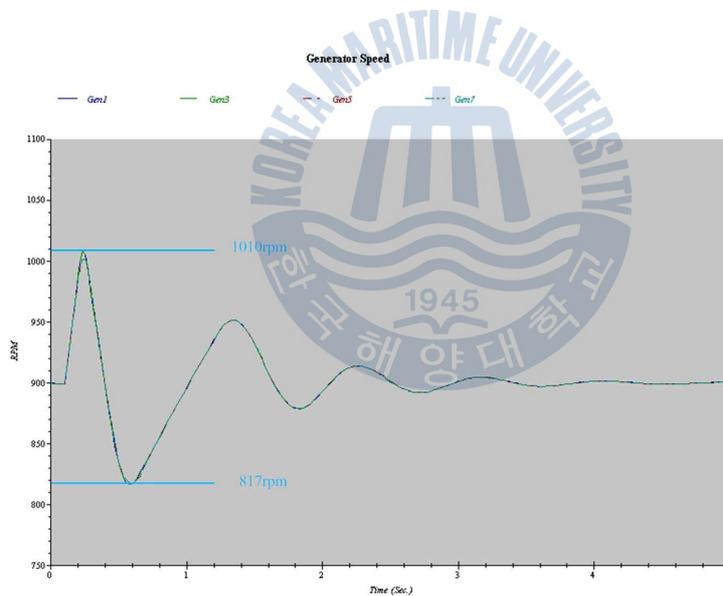


그림 5.38 3상 단락사고시 발전기속도(조속기조정)  
 Fig. 5.38 Generator speed when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor

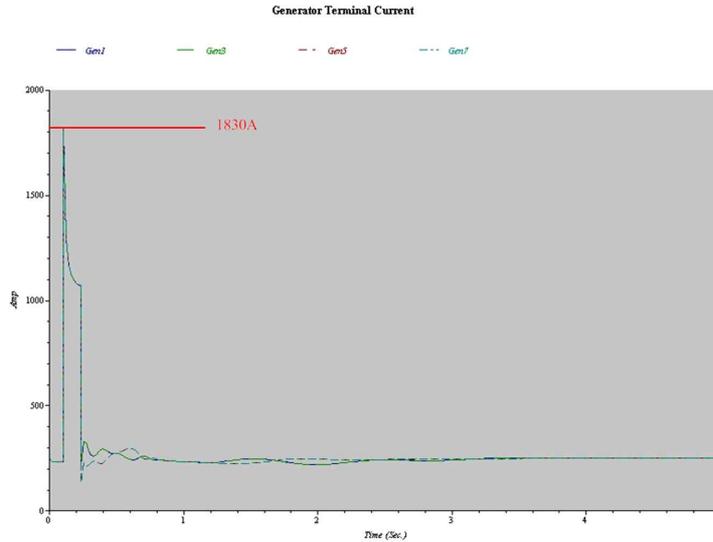


그림 5.39 3상 단락사고시 발전기전류(조속기조정)

Fig. 5.39 Generator terminal current when 3 phase fault occur at HV feeder with adjusted governor

## 5.2 단락전류계산

단락전류계산은 계통의 보호 시스템을 위한 것만이 아니라 발전기, 차단기, 고압반 및 저압반의 모선용량 또는 차단용량 선정 등에 있어서 적정성을 확인하는 지표가 됨으로 전력계통의 설계에 있어서 반드시 필요한 계산이다.

본 논문에서는 3상 단락전류, 1선 지락전류, 2선 지락전류를 계산한다.

### 5.2.1 단락전류계산

3상 단락전류  $I_{sc}$ 는 테브난의 정리에 의해 p.u.(Per unit)로 표시한다.

$$I_{sc} = \frac{E}{Z_{EQ}} [\text{p.u.}]$$

단,  $E$ 는 고장 직전 전압(Pre-fault voltage, 단위:p.u.),  $Z_{EQ}$ 는 고장점에서 본 등가 임피던스이다.

고장 직전의 전압은 정상 운전의 경우 1.0 p.u.로 둔다. 따라서 고장 지점의 등가 임피던스를 구하는 것이 고장전류를 구하는 과정이다. 등가 임피던스를 구하려면 모든 지로(선로 또는 변압기)의 임피던스를 같은 기준용량의 p.u.로 표시하고 회전기(발전기, 유도전동기 및 동기전동기 등)는 회전기의 내부 임피던스를 사용하여 표시하며 선로의 캐패시턴스나 정지형 부하(Static load)는 고장전류에의 기여 효과가 미미하므로 무시한다.

기준용량은 주로 100MVA를 사용하며 100MVA기준의 고장점 등가 임피던스  $Z_{EQ}$ 를 이용하여 고장점의 고장용량을 MVA 단위로 구하면

$$\text{단락용량} = \frac{100\text{MVA}}{Z_{EQ}} \text{ 이다.}$$

### 가) 등가전력계통

전력계통의 단락용량과  $X/R$  비율을 알 경우에는 다음 공식을 이용하여 임피던스 값으로 변환할 수 있다.

$$Z = \frac{100\text{MVA}}{\text{계통의 단락 용량MVA}}$$

$$X_{p.u.} = Z_{p.u.} \times \sin(\tan^{-1} \frac{X}{R})$$

$$R_{p.u.} = Z_{p.u.} \times \cos(\tan^{-1} \frac{X}{R})$$

## 나) 회전기

발전기, 전동기 등 회전기는 다음 식에 의해 임피던스 변환할 수 있다.

$$X''_d = \frac{\%X''_d}{100} \times 100 \frac{\text{MVA}}{\text{MVA}_{\text{motor}}} \times \frac{\text{BaseKV}_{\text{old}}^2}{\text{BaseKV}_{\text{new}}^2}$$

$$X'_d = \frac{\%X'_d}{100} \times 100 \frac{\text{MVA}}{\text{MVA}_{\text{motor}}} \times \frac{\text{BaseKV}_{\text{old}}^2}{\text{BaseKV}_{\text{new}}^2}$$

$X''_d$  : 회전의 차과도리액턴스(Subtransient reactance).

$X'_d$  : 과도리액턴스(Transient reactance).

$\text{MVA}_{\text{motor}}$  : 회전의 정격용량.

$\text{BaseKV}_{\text{OLD}}$  : 회전의 정격전압

$\text{BaseKV}_{\text{NEW}}$  : 회전이 연결된 모선의 단락전류계산을 위한 기준전압.

## 다) 변압기(Transformer)

$$Z_{p.u.} = \frac{\%Z}{100} \times \frac{100 \text{MVA}}{\text{TR}_{\text{MVA}}}$$

$$X_{p.u.} = Z_{p.u.} \times \sin(\tan^{-1} \frac{X}{R})$$

$$R_{p.u.} = Z_{p.u.} \times \cos(\tan^{-1} \frac{X}{R})$$

## 라) 케이블(Cable)과 리액터(Reactor)



$$Z_{p.u.} = Z(Ohm) \times \frac{100MVA}{kV^2}$$

### 5.2.2 고장유형

#### 가) 3상 단락

개방형 링 버스(Open-ring bus) 구조로 연결되어 있는 4개의 고압모선에 대한 3상 단락전류계산을 수행하였다. 그림 5.40에 나타난 단락전류 계산결과는 고압모선이 링 방식으로 연결된 것이 아니므로 모선 간을 연결해 주는 연락용 차단기(Tie-CB)를 통하여 흐르는 단락전류의 크기가 다름을 알 수 있다. 그리고 서비스부하 측에서의 기여분 단락전류도 있음을 알 수 있으며 전체 단락전류 14.822kA에 비하여 기여분 0.538kA는 약 3.6%이다. 3상 단락전류의 계산 결과는 표 5.1과 같고 표 5.2에 저압모선의 단락전류를 나타내었다.

표 5.1 3상 단락전류 계산결과

Table 5.1 Calculation result of 3 phase fault current

모선 구분	Interrupting duty (Symm. kA rms)		Momentary duty	
	1/2 Cycle	1.5 to 4 Cycle	Asymm. kA rms	Asymm. kA Peak
HV1~4	14.822	13.656	22.806	38.294
LVSVC 1~4	48.085	N/A	70.024	118.906

상기 결과를 바탕으로 고압 및 저압배전반의 모선 단락용량, 발전기 차단기 (Generator circuit breaker) 및 고압 및 저압 차단기, 케이블 설계에 반영되어야 할 것이다.

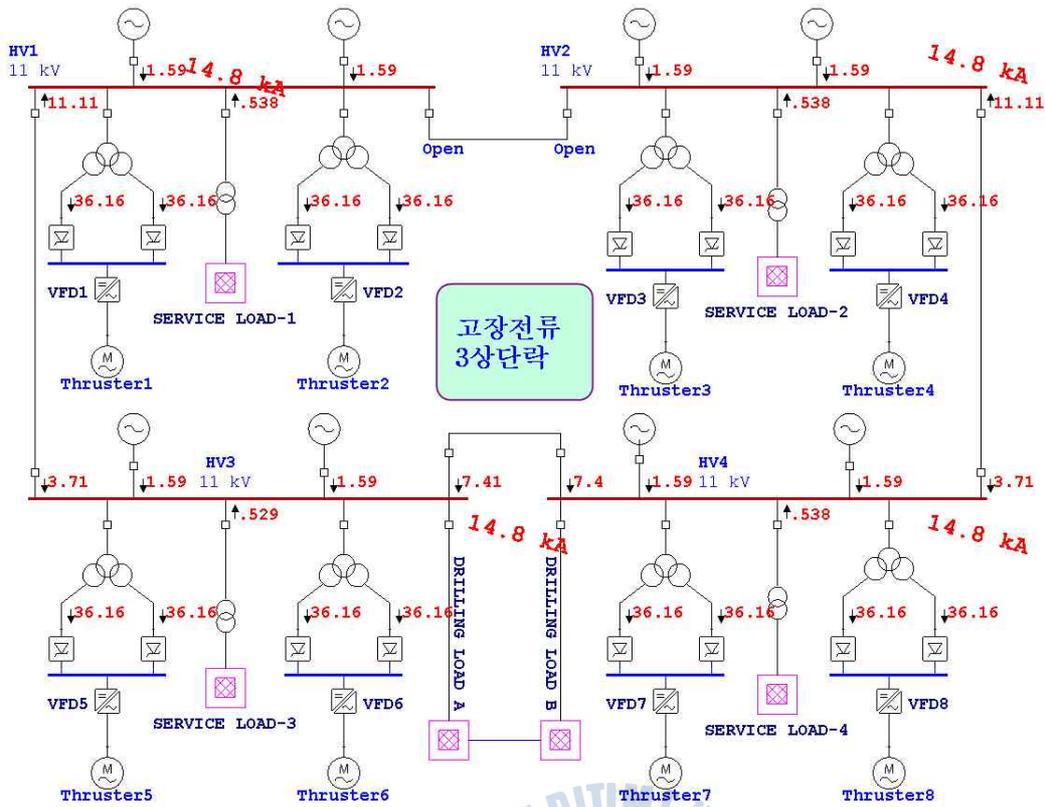


그림 5.40 3상 단락전류  
Fig. 5.40 3 phase fault current

그 결과로서 표 4.1의 고장전류의 허용기준을 만족하며 1,000V이상의 고압 모션에는 25kA, 1,000V미만의 저압 서비스모션에는 50kA의 정격 차단기를 선정하는 것이 적절하다.

표 5.2 저압 서비스모션의 단락전류 구성

Table 5.2 Short circuit current of low voltage service feeder

Contribution		1/2 Cycle	
From Bus	To Bus	%V	kA Symm.
LVSVC-1	Total	0.0	48.085
HV1	LVSVC-1	80.88	41.989
SVCLOAD-1	LVSVC-1	100.0	6.364

## 나) 1선 지락

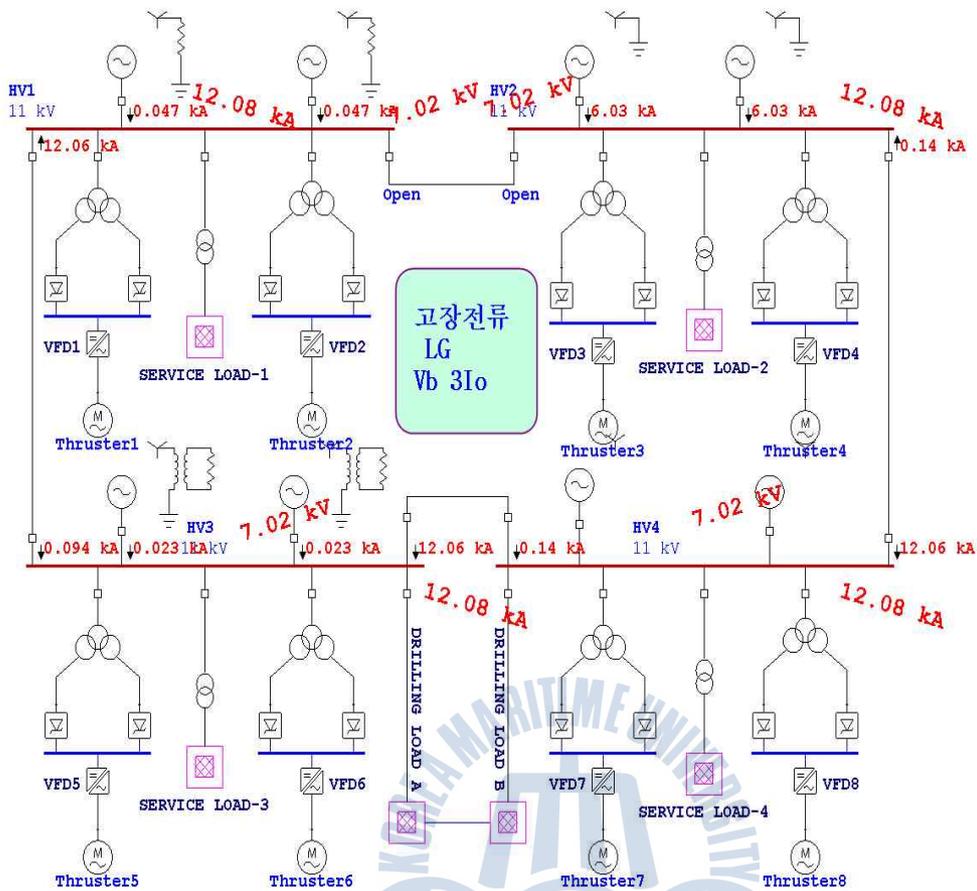


그림 5.41 1선 지락전류

Fig. 5.41 Line-to-ground fault current

그림 5.41에 1선 지락전류의 계산결과를 나타내었다. 각 모선의 단락 발생시 전압은 7.02kV이며 발전기별 고장전류의 값은 다름을 보인다. 이는 접지방식의 차이에 의한 고장전류의 크기와 결과를 비교하기 위해서 모선별로 설정한 것이다. 각 고압모선별 발전기의 접지방식을 달리하여 1선 지락전류를 계산한 결과는 표 5.2와 같다. 접지방식은 저항접지, 직접접지, 변압기-저항접지, 비접지 등이며 각각의 지락전류의 크기 변화를 알 수 있다. 저항접지와 변압기-저항접지는 지락전류의 크기를 동일하게 저항값을 설정한 것이다.

표 5.3 1선 지락전류 계산결과

Table 5.2 Calculation result of line-to-ground fault current

모선 구분	1선 지락전류 (Symm. kA rms)		Grounding	
	Ia	3 Io	Type	Connection
Gen 1, 2	0.871	0.047	Resistor	Wye
Gen 3, 4	2.878	6.028	Solid	Wye
Gen 5, 6	0.87	0.028	Xfmr - resistor	Wye
Gen 7, 8	0.869	0.0	N/A	Delta

### 다) 2선 지락

2선 지락전류의 계산결과는 표 5.3 과 같다. 변압기-저항접지방식이 중성선에 흐르는 지락전류가 1선 지락과 달리 저항접지에 비해 고장전류가 더 적게 나타났다. 이는 1선 지락전류 결과와의 차이점이므로 접지방식의 선정이 사고 유형에 따라 다른 결과를 나타냄을 알 수 있다.

표 5.4 2선 지락전류 계산결과

Table 5.3 Calculation result of line-to-line-to-ground fault current

모선 구분	2선 지락전류 (Symm. kA rms)			Grounding	
	Io	Ib	Ic	Type	Connection
Gen 1, 2	0.013	1.429	1.408	Resistor	Wye
Gen 3, 4	1.634	2.325	2.258	Solid	Wye
Gen 5, 6	0.008	1.424	1.413	Xfmr - resistor	Wye
Gen 7, 8	0.0	1.416	1.420	N/A	Delta

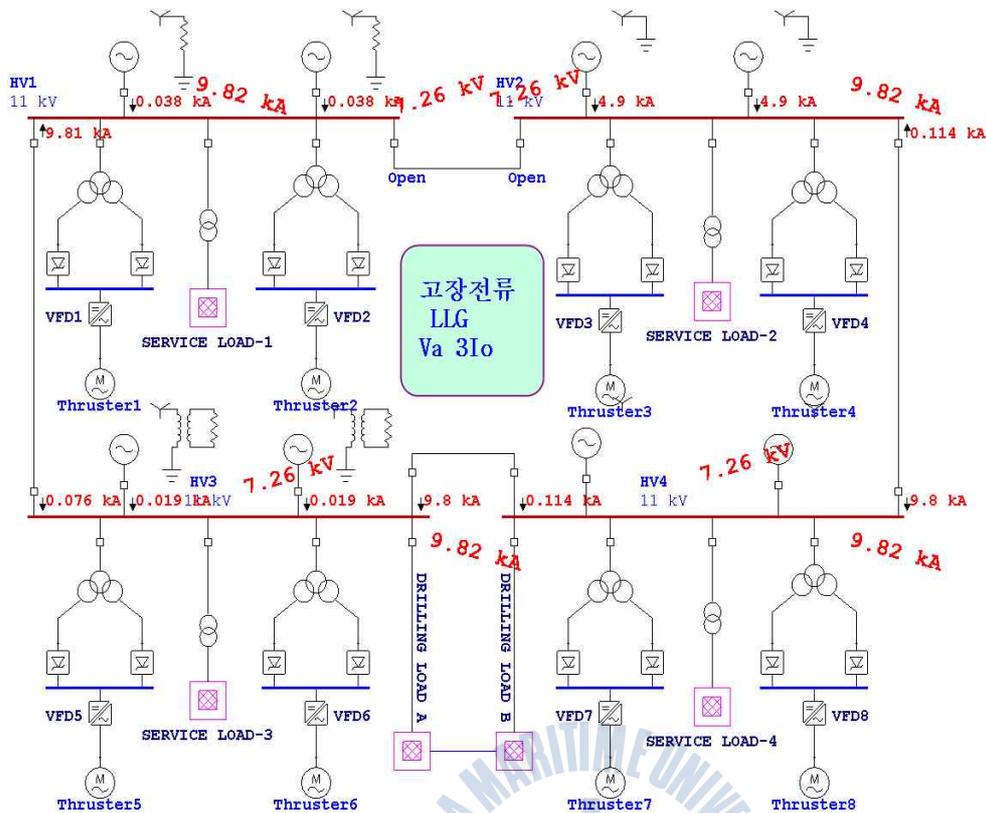


그림 5.42 2선 지락전류

Fig. 5.42 Line-to-line-to-ground fault current

2선 지락전류는 1선 지락전류에 비해 전체적으로 크기가 작음을 알 수 있지만 지락시 흐르는 건전상의 상전류가 지락전류보다 크게 나타났다. 이러한 결과는 단순히 중성선의 영상분 전류뿐만 아니라 건전상의 보호 대책도 함께 강구될 수 있도록 하여야 할 것이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 대표적인 해양플랜트인 석유시추선(Drilling rigs)의 전력계통을 각각의 운전 모드에 맞추어 부하를 구성하고 계통을 선정한 후 전력계통의 안정성 신뢰성 등에 대한 검증을 하기 위하여 전력조류분석을 수행하였다. 그리고 전력조류분석의 수행을 원활히 하고 분석의 오류를 줄이기 위하여 계통을 구성하고 있는 설비들에 대한 수학적 모델링에 대하여 고찰하였다. 그리고 전력조류계산을 하기 위한 비선형 전압 방정식을 유도하고 그 해를 구하는 대표적인 수치해석 방법인 뉴턴-랩슨 법으로 계산을 수행하였다. 또한 그 결과를 바탕으로 전력계통을 해석하여 각 모선의 전압 변동과 모선을 통하여 흐르는 조류의 흐름을 파악하여 적절하고 효율적인 전력계통의 설계가 되도록 하였다. 그 결과, 최소 및 최대 부하시 고압모선, 저압모선 등의 전압강하율 등은 허용 범위 이내이며 전력조류의 흐름도 특정 모선에 치우치지 않고 균등한 흐름을 보였다. 유무효전력의 공급도 발전기의 정격을 넘지 않았으며 변압기의 부하 부담 또한 충분한 여유를 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 과도현상해석을 수행하고 발전기의 탈락등과 같은 전원의 변동에 대한 계통의 응답 특성을 분석하였고 추진부하의 탈락과 재접속등과 같은 대형 부하의 변동에 따른 계통내의 영향을 검토하였다. 또한 여자기와 조속기에 의한 전력계통의 안정도에 영향이 있음을 알 수 있었으며 더불어 3상 단락사고에 대한 과도현상해석과 다중화된 모선의 3상 단락전류계산을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 그 결과로서, 다중 모선의 고장전류 크기는 모선의 연계 방식에 따라 고장전류의 차이가 있음을 알 수 있었으며 1/2 Cycle에서 단락전류의 최대값을 보이고 1.5 Cycle 이후로 점차 감소함을 알 수 있다. 그리고 저항접지, 직접접지, 변압기-저항접지 등 접지방식에 따른 1선 및 2선 지락전류계산을 통하여 그 변화와 차이를 비교, 검토하였다.

본 논문의 연구내용과 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 석유시추선(Drilling rig)의 전력계통을 운전 모드별로 구성하였다.
- 운전 모드별로 구성된 시추선의 전력계통에 대하여 반복적인 전력조류분석을 수행하여 최대 부하 운전 모드에서도 허용범위 이내의 안정된 모션전압이 되도록 하였고 전원과 부하간의 편중되거나 비정상적인 전력조류의 흐름이 없도록 하였다.
- 4가지 운전 모드에서의 안정적 운전 결과를 바탕으로 과도안정도를 향상시키기 위하여 과도현상해석을 수행하고 부하와 전원의 변동에 더 강인한 전력계통을 구성하였다.
- 전기적 고장전류가 제일 큰 3상 단락전류계산을 통하여 차단기의 정격과 고압모션 및 저압모션의 단락정격을 선정하고 접지방식에 따른 1선 및 2선 지락전류를 계산하고 상호 비교, 분석하였다.

해양플랜트의 전력계통이 안전하기 위해서는 사고 또는 문제 발생시 빠른 시간 내에 차단하는 보호계전시스템이 동반되어야 할 것이다. 지금까지 수행한 해석 등에 기초해서 사고 발생시 신속하고 안전하게 사고 지역을 계통으로부터 최대한 빨리 격리시키기 위한 보호 시스템에 대한 연구와 분석을 수행하여 신뢰성과 안전성을 겸비한 전력계통을 구성하는 것이 향후의 연구과제가 될 것이다.

## 참고문헌

- [1] Cameron Craig, "Integrated Power System Design for offshore Energy Vessels and Deepwater Drilling Rigs", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 4, pp 1251-1257, 2012.
- [2] Frank A. Woodbury, "Electrical Design Considerations for Drilling Rigs", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1A-12, no. 4, 1976.
- [3] Alf Kare Adnanes, "Status and Inventions in Electrical Power and Thruster Systems for Drillships and Semi-submersible Rigs", Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, pp 28-30, 2004.
- [4] P. Patil & K. Porate, "Starting Analysis of Induction Motor: A Computer Simulation by Etap Power Station", Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, pp. 494-499, 2009.
- [5] R. M. Calfo, J. A. Fulmer, and J. E. Tessaro , "Generators for use in Electric Marine Ship Propulsion Systems", Proceedings of the IEEE Power Engineering Society, vol. 1, pp. 254 - 259, 2002.
- [6] Harvey, H. Franklin, "Electric Propulsion of Ships ", Transactions of the, American Institute of Electrical Engineers, Vol. XLIV, pp. 497-522, 1925.
- [7] Won Jeon, Yong-Peel and Sang-Yong Jung, "Dynamic Characteristic Analysis at Each Operating Condition for Electric Ship Propulsion System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, pp. 1296-1302, 2008.
- [8] Jin-Seok Oh, Sung-Young Jung, Yeong-Kyung Kong, Jae-Goo Bin,

- Han-Ho Kim, "Control Algorithm Development for Design of Cooling System in High-power Propulsion Motor", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34(1), pp. 195-201, 2010.
- [9] I. C. Evans and A. H. Hoevenaars, "Meeting Harmonic Limits on Marine Vessels", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 115-121, 2007.
- [10] IEEE Std. 45-2000, "IEEE Recommended practices for electrical installations on shipboard", 11 October 2002.
- [11] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems", 12 April 1993.
- [12] American Bureau of Shipping, "Guidance notes on control of harmonics in electrical power systems", May 2006.
- [13] Anderson, P. M., Fuad, A. A., "Power System Control and Stability", IEEE Press, John Wiley and Sons, 2nd Ed., 2003
- [14] Hansen, J. F., "Modeling and Control of Marine Power Systems", PhD thesis, Report 2000:9-W, Dept. Eng. Cybernetics, NTNU, Trondheim, Norway, 2000.
- [15] Ådnanes, A. K., "Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion", Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.
- [16] St. J. Seigne, "Marine electric propulsion", Proceedings of the IEE, vol. 111, no. 12, December 1964.
- [17] Timothy J. McCoy, "Trends in Ship Electric Propulsion", Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 343-346, 2002.
- [18] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book

Company, New York, 1985.

- [19] Thomas Nord, "Voltage Stability in an Electric Propulsion System for Ships", Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006.
- [20] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability Volume I", The Iowa State University Press, 1997.
- [21] Massimo A. G. Mitolo, "Electrical Safety of Low-Voltage Systems", McGraw-Hill Company, 2009.
- [22] Juan M. Gers and Edward J. Holmes, "Protection of Electricity Distribution Networks 2nd Edition", The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2004.
- [23] Alan L. Sheldrake, "Handbook of Electrical Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [24] R. E. Hebner, "Electric Ship Power System-Research at the University of Texas at Austin", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 34-38, 25-27 July 2005.
- [25] Kalsi, Swarn S. and Om Nayak, "Ship Electrical System Simulation", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 63-69, 25-27 July 2005.
- [26] J. V. Amy Jr., "Considerations in the Design of Naval Electric Power Systems", 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. I, pp. 330-335, 2002.
- [27] Clayton D. H., Sudhoff S. D., Grater G. F., "Electric ship drive and power system", Conference Record of the 2000 Twenty-Fourth International Power Modulator Symposium, pp. 85-88, 2000.
- [28] Aradhana Pradhan, Padmaja Thatoi, " Study on the performance

- of Newton-Raphson Load Flow in Distribution Systems”, B.T. thesis, National Institute of Technology Rourkela, India, 2012.
- [29] Apoorva Saxena, “Load-Flow Analysis of Radial Distribution Networks with Reduced Data Preparation”, M.E. thesis, Thapar University, India, 2008.
- [30] Zhiping Ding, “Realtime Dynamic Load Shedding for Shipboard Power Systems”, M.S. thesis, The Florida State University, 2006.
- [31] Ankit Verma, “Alternate Power and Energy Storage/Reuse for Drilling Rigs: Reduced Cost and Lower Emissions provide Lower Footprint for Drilling Operations”, M.S. thesis, Texas A&M University, 2009.
- [32] John C. Joyce, “Current Sharing and Redistribution in High Power IGBT Modules”, PhD thesis, The University of Cambridge, 2001.
- [33] Vladislav Akhmatov, “Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power”, PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- [34] Reza Vafamehr, “Design of Electrical Power Supply System in an Oil and Gas refinery”, M.S. thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2011.
- [35] Sergey Blashov, “Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems”, M.S. thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2011.
- [36] Servet Haziri and Oystein Dyngvold, “Development of simulation model for virtual testing and design of a riser tensioner system”, M.S. thesis, University of Agder, Norway, 2011.
- [37] Jan Fredrik Hansen, “Modelling and Control of Marine Power Systems”, PhD thesis, Norwegian University of Science and

Technology, Norway, 2000.

- [38] Garima Gupta and Alok Ranjan Dhara, "Estimation of exact equivalent parameters of synchronous machines for power system studies", B.T. thesis, National Institute of Technology Rourkela, India, 2010.
- [39] M. Venkatasubramanian and K. Tomsovic, "Power Systems Analysis," Electrical Engineering Handbook, Elsevier Academic Press, 2005, pp. 779-785.
- [40] 양창조, 최민선, "조류발전방식의 최근 동향", 한국마린엔지니어링학회 2007년도 전기학술대회논문집, pp. 213-214, 2007.
- [41] 김준현, 황갑주, 이재규, "뉴턴 최적전력조류계산의 해 특성에 관한 연구", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 171-175, 1989.
- [42] 이봉용, 김정훈, 심건보, "발산가능계통에서의 뉴턴-랩슨전력조류계산", 대한전기학회 논문지 제31권 제12호, pp. 1-8, 1982.
- [43] 이상중, 양성덕, "전력조류방정식과 자코비안 행렬의 성질에 대하여", 한국조명·전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 251-253, 2004.
- [44] 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 제7권 제2호, pp.205-213, 2002.
- [45] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, "직류전력 회생시스템의 역률 개선에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 제6권 제5호, pp.410-415, 2001.
- [46] Henrik Siebel, J. M. Pacas, "Active Front End Inverter with Quasi-resonance", Journal of Power Electronics, vol. 3 no. 1, 2003.
- [47] Mohd Junaidi Abdul Aziz, Christian Klumpner, Jon Clare, "Common Mode Voltage Cancellation in a Buck-Type Active Front-End Rectifier Topology", Journal of Power Electronics, vol. 12 no.2,

2012.

[48] IEC 60947-2, "Low-voltage switchgear and controlgear Part 2: Circuit-breakers Third Edition", 2003.

[49] IEC 60056, "High-voltage switchgear and controlgear", 2012

