

## 석유 시추선 전력 계통의 과도 안정도 해석

김윤식<sup>†</sup> · 김철호<sup>1</sup>

(Received September 19, 2014 ; Revised October 2, 2014 ; Accepted October 8, 2014)

### Analysis on transient stability for drilling rigs power system

Yoon-sik Kim<sup>†</sup> · Chul-ho Kim<sup>1</sup>

**요약:** 본 논문은 석유시추선의 전력 계통 시스템의 비상시 전력 계통 해석에 대하여 기술하였다. 특히 석유시추선의 추진부하와 발전기의 탈락으로 인해 발생하는 전력계통 시스템에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 고정 여자방식과 조속기의 제어 변수를 조정하여 임의의 사고 전후 정상상태로의 복귀까지 과도 안정도 해석으로 전력계통에 나타나는 현상을 관찰하였다. 전력계통 설계와 해석 및 과도 현상해석 프로그램인 ETAP(Electrical Transient Analysis Program)을 사용하였으며, 수치해석의 결과를 도출하여 그 특성을 분석하였다.

**주제어:** 석유시추선, 전력계통, ETAP, 과도상태 해석

**Abstract:** This paper describes the emergency situation which occurs in Drilling Rig power system. Especially, we focused on power system transient characteristics on propulsion motor load and generator elimination situation in Drilling Rig operation. We performed numerical simulation and analyzed the result for power system transient stability characteristics on each condition for excitation system and governor control system using ETAP (Electrical Transient Analysis Program).

**Keywords:** Drilling Rigs, Electric Power system, ETAP, Transient analysis

## 1. 서론

산업플랜트 또는 육상에서 전력계통설계시 무한대의 용량으로 간주 할 수 있는 국가의 기간 전력망으로부터 수전하는 것이 통상적이다. 상용전원으로부터 공급받는 경우 전체 부하의 규모를 결정하고 배전 및 수전, 비상용 전원시설 등에 대한 설계가 이루어진다. 전력공급망은 육상에서만 필요한 것이 아니다. 석유 또는 해양자원을 채취하는 해양플랜트, 운송 및 수송 등에 사용하는 LNG 수송선, 원유수송선, 해양조사선 등 다양한 해양구조물 등에도 전력을 필요로 한다.

해양 구조물은 제한적인 공간을 가질 수밖에 없으므로 육상에 비해 더 열악한 전기적, 기계적 조건 등을 가지게 되며, 육상과 달리 발전과 배전, 그리고 부하에 대한 종합적이고 더욱 안정적인 설계가 이루어져야 하는 차이점이 있다. 따라서 해양구조물은 전력계통설계에 많은 제약이 따른다[1]-[3].

해양 구조물의 전력계통설계를 할 경우, 전력계통에 급작스런 부하의 탈락이나 변동, 발전기의 탈락 등의 사고가 계통 내에 발생하게 되면, 모선의 전압이나 주파수 등이 영향을 받게 된다. 사고 초기의 대응이 적절하지 못하다면 과급효과로 인하여 부분 또는 전체 계통이 정전되어 대형사고로 이어질

수도 있으므로 충분한 검토가 필요할 것이다[4].

본 논문에서는 해양 구조물 중 석유시추선의 전력계통을 각 운전모드에 맞게 설계 구성하고, 발전기의 여자시스템과 조속기 선정을 통하여 부하와 전원의 변동으로 인한 사고 발생시 나타나는 계통 과도현상을 해석하였다.

## 2. 전력 계통도 설계와 구성

### 2.1 부하의 구성

석유시추선 부하의 모델링은 각 운전모드에 맞게, 부하가 한쪽 모선에 치우치지 않고 균등하도록 부하를 구성하여야 한다. Figure 1은 석유시추선의 모선의 구성도를 나타낸다.

발전기는 한 모선 당 2기의 발전기를 배치하고 전체를 4개의 모선으로 나누어 배전체계를 구성한다. 발전전압은 부하규모에 따라 변압기를 통해 0.69kV, 3.3kV, 6.6kV, 11kV등으로 추진부하, 서비스 부하 등으로 구분된다.

추진부하는 주파수 가변을 위해 Charger와 인버터를 사용한다.

전력 계통 구성은 부하의 구성에 의해서 달라진다.

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6739-6458>): Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, E-mail: [benkys@kmou.ac.kr](mailto:benkys@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-4411

<sup>1</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Maritime University, E-mail: [kimchulho\\_@naver.com](mailto:kimchulho_@naver.com), Tel: 051-410-4892

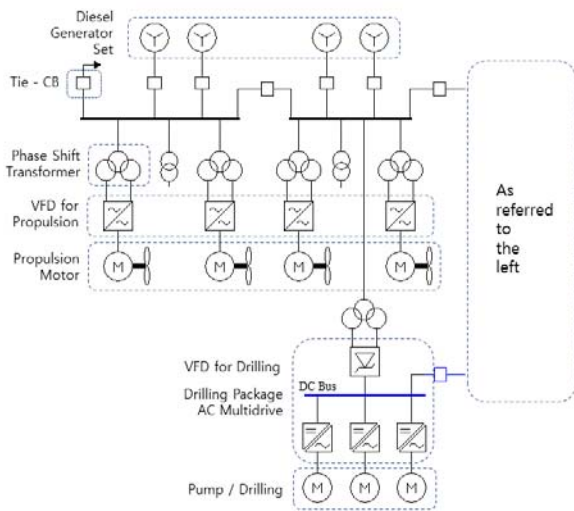


Figure 1: Electrical power system for drilling rig

부하는 석유시추선의 운전 모드에 따라 부하의 변동이 생긴다. 서비스 부하는 조명, 공조, 저압배전 등 시추부하와 추진부하를 제외한 모든 부하이다. 시추부하는 시추에 사용되는 승강설비를 포함한 머드 펌프 관련 보조설비 부하이다. 추진부하는 추진 모터와 관련 보조설비이다. Table 1은 발전용량과 전체부하의 부하율을 나타내었다.

Table 1 : Load Factor

Type	Transit +1/2DP	Drilling +1/2DP	Drilling +3/4DP
Service Load	6222	8818	8818
Drilling Load	0	5250	5250
Thruster	13568	13568	21712
Total Load	19790	27636	35780
G/E	34668	34668	46224
No. of Gen.	6	6	8
%Load	57	80	77

\* DP : Dynamic Positioning, Unit : kVA

석유시추선 건조 후 사용기간 동안 충분한 발전용량을 확보하고, 향후 부하 증가분을 포함한 설계여유 용량과 건조여유 용량을 고려하였다.

2.2 전력 계통 설계

석유시추선 전력계통 설계를 위한 추진부하의 구성과 서비스 부하의 구성, 더불어 발전기의 선정과 전력변환을 위한 장비는 Table 2와 같다. 전력 계통의 안정성 판단을 위한 기준은 전력조류분석 기준과 동일하게 Table 3에 나타난 IEEE Std. 45를 적용을 한다.

Table 2: Electrical Equipment's specification

Type	Specification
Generator	5778kVA 11kV P.F=0.9 8poles 900rpm
VFD	4600kVA 690VAC
Charger	AC690V/DC690V 1900kWDC In = 2754A
Transformer	1. Propulsion TR 3800/1600/1600kVA %Z=8% 11/0.69/0.69kV 2. Service TR 11/0.69kV 3300kVA
Propulsion Motor	3200kW 690V 10poles 720rpm Efficiency = 94.3%

Table 3: Analysis limits and standard

Division	Standard		Remark
Voltage drop	±5 % less		
Permanent	Voltage	Frequency	IEEE Std. 45
	±2.5%	±5%	
Transient 1.5sec	Voltage	Frequency	
	±20%	±10%	

2.3 여자기와 조속기

여자계통은 전압, 무효전력 및 안정도 향상을 위한 제어 기능이 포함되며, 동기 발전기의 지상 및 진상 조건에서 발전기의 출력을 안정적으로 유지할 수 있게 하는 보호 기능 또한 수행한다. 여자기의 기능은 계자권선에 계자전류를 제공하고, 계자전압과 계자전류를 제어함으로써 전력계통에 필요한 무효전력을 제어, 공급하게 된다. 따라서 계통 전압 유지를 위한 필수적인 보호 기능을 수행한다[5].

본 논문에서 발전기에 적용한 여자기는 IEEE Type의 AC8B를 적용하였으며, 제어 블록도는 Figure 2와 같다.

조속기는 부하의 주기적, 시간적 변동에 따라 발전기의 출력을 변화시켜 계통 주파수를 일정하게 유지하여 계통을 안정화하는 역할을 한다. 발전기가 계통에 연결되어 있을 때에는 계통 주파수에 따라 발전기의 출력 주파수가 결정된다[6].

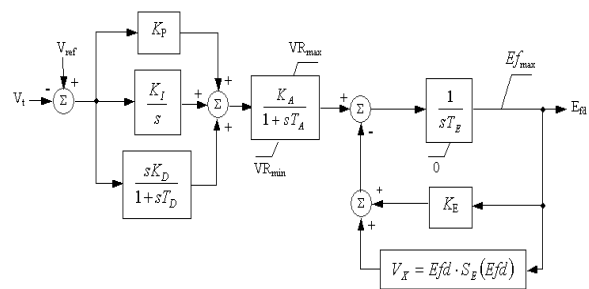


Figure 2: Control block diagram of IEEE type AC8B

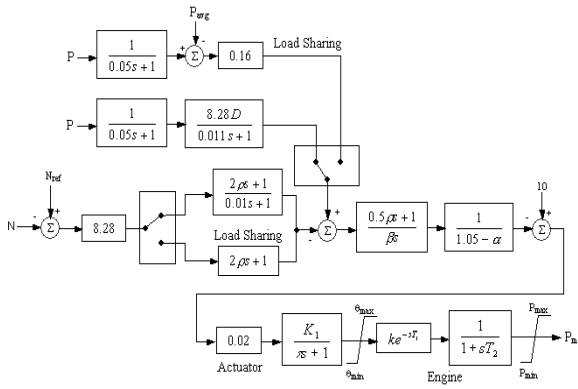


Figure 3: Control block diagram of Woodward 2301

본 논문에서 적용한 조속기 Woodward 2301의 제어 블록도는 Figure 3과 같다.

운전 개념은 발전기가 계통에 연결되어 운전 될 경우, 조속기를 통하여 계통 주파수에 맞게 원동기의 속도가 조정되어 운전되는 것이다.

### 3. 비상시 전력 계통 해석

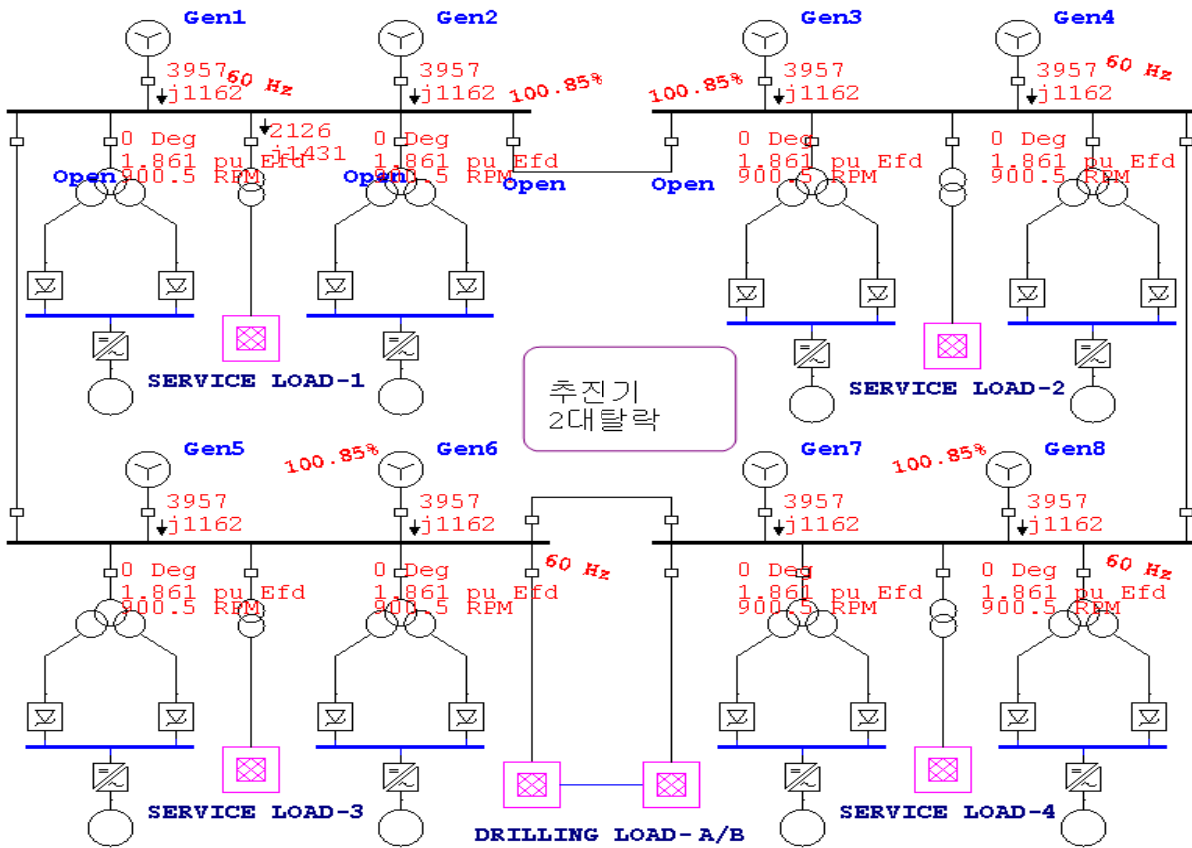


Figure 4: Load elimination of 2 thrusters

전력 구조는 다양한 전력 부품들로 이루어져 있으며, 선정된 운전모드 및 부하상태에 따라 효율적으로 사용할 수 있도록, 좌우 대칭적으로 전력사용 장비를 배치하였다.

최대부하모드 상태인 시추 모드에서 구성한 전력계통의 발전기는 총 8대이며, 정격은 5200kW, 역률은 0.9이다. 최대 부하 운전시의 발전기의 대당 출력은 약 4649kW이므로 전체 부하 용량 대비 약 13%에 해당한다. 부하율은 77.4%로 이며 발전기의 여유율도 23%로 안정적이다.

#### 3.1 추진부하의 탈락

추진부하의 규모가 전체 부하의 60~70%를 차지하므로 추진부하의 이상 탈락은 독립전원 계통에 고려되어야 한다[7].

추진부하의 비중이 크므로 최대 부하에서 해석을 수행하였다. 추진기는 1대당 3200kW의 유도 전동기로서 탈락 순간에 정격의 약 80%로 운전중이다.

Figure 4는 최대부하 상태에서 추진부하의 탈락시 발생한 계통 내부의 변화를 나타낸 것이다.

##### 3.1.1 개루프 여자방식과 조속기를 채용한 경우

Figure 5과 Figure 6은 각각 개루프 여자방식과 조속기를 채용, 추진기 2대가 탈락된 경우 각각 모선의 전압과 주파

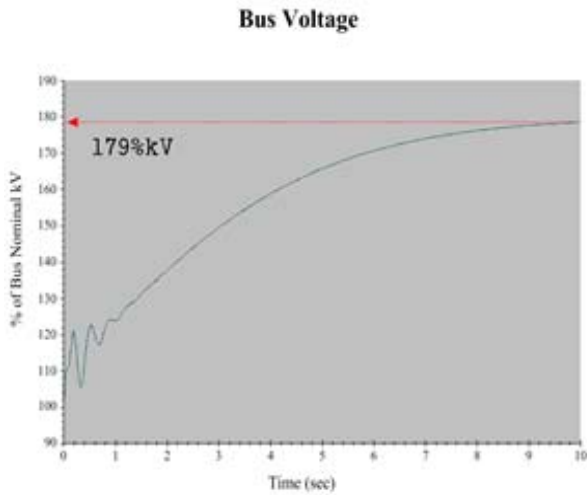


Figure 5: HV feeder voltage when 2 thrusters limited with open loop excitation and governor

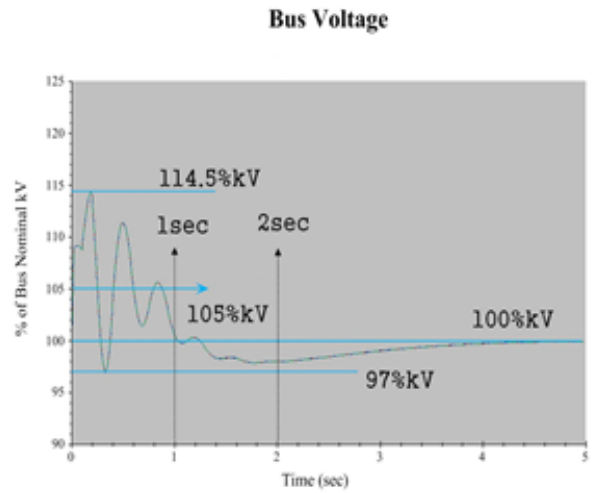


Figure 7: HV feeder voltage when 2 thrusters eliminated with AC8B exciter and governor

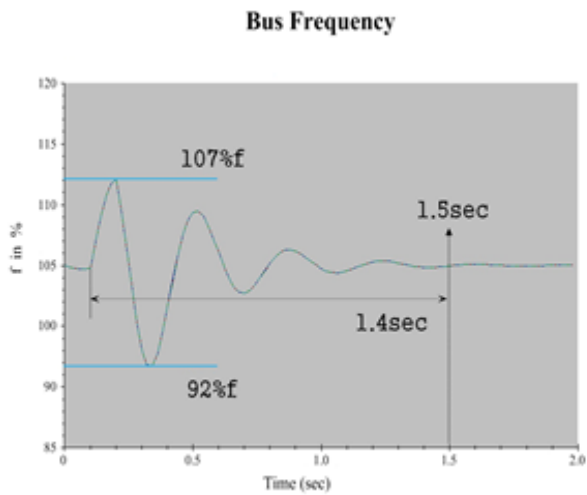


Figure 6: HV feeder frequency when 2 thrusters eliminated with open loop excitation and governor

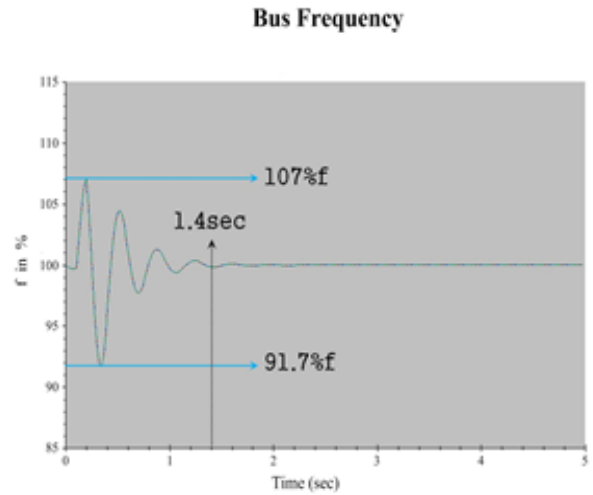


Figure 8: HV feeder frequency when 2 thrusters eliminated with AC8B exciter and governor

수 변동을 나타내었다. 추진부하의 탈락과 동시에 고압 모선의 전압은 제어되지 못하고 정격 전압의 179%까지 급격히 상승하였다. 개루프 여자방식으로 인하여 전압제어가 이루어지지 못하고 있다.

반면 주파수 응답은 조속기를 채용하여 부하 탈락시 정격주파수의 107%, 92%까지 변동하였으나, 허용기준  $\pm 10\%$  이내이며, 1.4초에서 정상상태 오차가 없어지고 정격주파수에 수렴한다.

### 3.1.2 AC8B 여자기와 조속기를 채용한 경우

Woodward 2301 조속기와 함께 type AC8B 여자기를 적용한 결과를 각각 Figure 7와 Figure 8에 나타내었다. 부하 탈락시 모선의 전압이 정격 전압의 114%, 97%까지 변동하였

지만, 허용기준을 만족한다.

회복시간 또한 정격의 5%내로 수렴하기까지 1초 미만의 우수한 응답을 나타내고 있다. 주파수 또한 정격 대비 107%, 91.7%로서 과도 상태의 규정을 만족하고 있다. 개루프 여자방식과 비교하여 AC8B 여자기의 고압모선에 대한 전압제어가 이루어지면서 부하에 안정적인 전원을 공급할 수 있을 만큼 정상상태로 회복된다.

### 3.2 발전기 1대의 탈락

전력시스템에 공급전원이 불안정하게 될 경우 시스템이 전반적으로 불평형 상태가 되어 정상운전 중인 발전기마저 탈조하거나 전력계통이 붕괴되는 사고가 발생한다.

3.2.1 개루프 여자방식과 조속기가 없는 경우

Figure 9와 Figure 10는 개루프 제어시 발전기 1대 탈락에 대한 전압과 주파수 응답 결과이다.

고압모선의 전압은 정격 전압의 약 80%의 전압강하가 나타나며, 회복되지 못하고 있다. 주파수 응답 또한 정격 주파수의 46%에 이르고 있으며, 안정적이지 못한 전압과 주파수 변동으로 인하여 계통의 연속 운전이 불가하다.

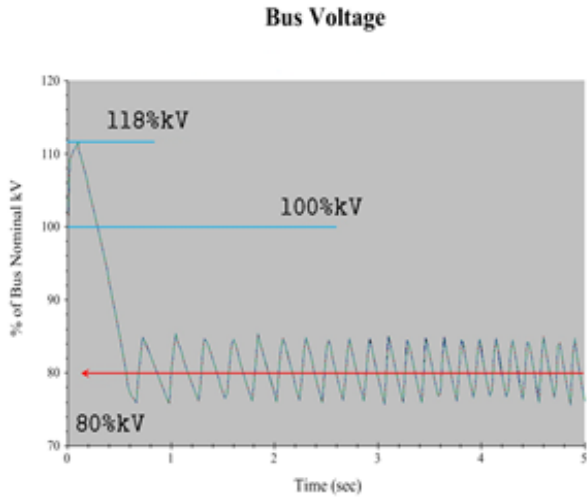


Figure 9: HV feeder voltage when 1 generator eliminated with open loop excitation

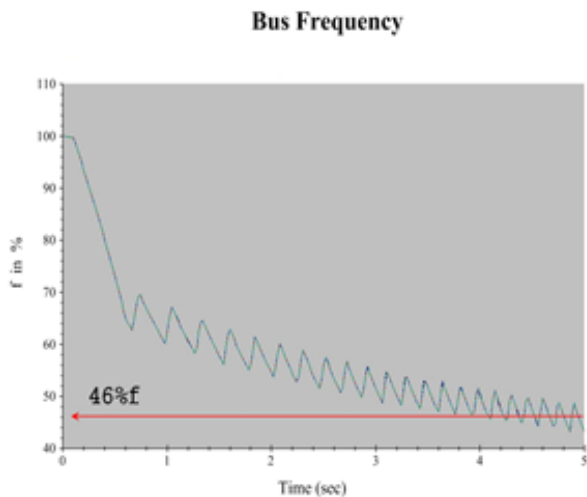


Figure 10: HV feeder frequency when 1 generator eliminated with open loop speed control

3.2.2 AC8B여자 시스템과 조속기의 채용시

조속기의 채용과 함께 여자기를 페루프로 형성하여 얻은 응답 결과를 Figure 11과 Figure 12에 나타내었다.

모선의 전압은 109.3%에서 96%로 전압의 변동이 있으나, 오버슈터가 제어되어 1.5초 이내에 정격전압의 5% 이

내로 안정된다. 주파수도 104%에서 93.8%로 규정을 만족하고 1.5초 전후로 정상상태에 도달된다.

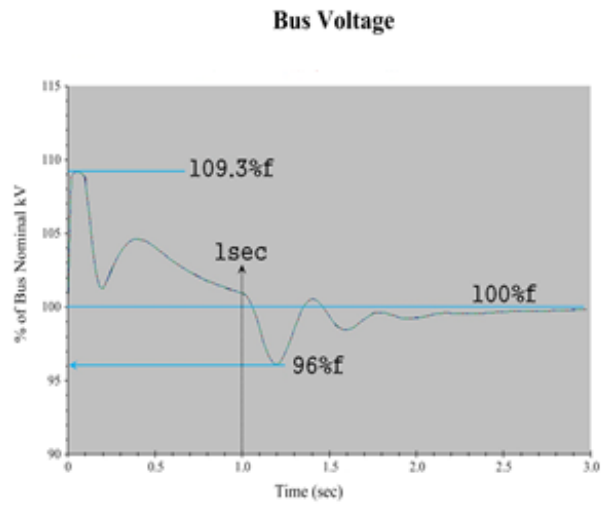


Figure 11: HV feeder voltage when 1 generator eliminated with AC8B exciter and governor

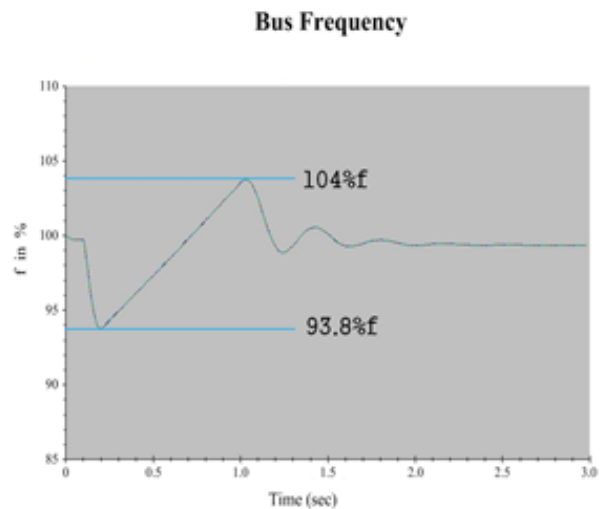


Figure 12: HV feeder frequency when 1 generator eliminated with AC8B exciter and governor

4. 결 론

본 논문에서는 석유시추선의 전력계통에 추진기의 탈락, 발전기의 계통탈락 등 비정상 상태가 발생하였을 시 계통의 과도현상 해석을 수행하였다. 석유시추선의 발전기의 여자기와 조속기를 선정하고 모델링하여 추진부하의 탈락으로 인한 부하 변동, 발전기의 탈락과 같은 전원의 변동에 대한 계통의 응답특성을 분석하여 과도상태의 특성이 규정에 적합한지의 여부를 비교 검토하였다.

연구 결과 여자기와 조속기의 선정이 전력 계통 안정도

에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 여자시스템으로 인하여 사고가 발생하더라도 모선의 전압이 제어되고, 조속기의 영향으로 주파수의 특성이 사고 발생 후 정상상태로 복귀까지 규정에 만족하고 있음을 확인하였다.

또한 지금까지 수행한 해석 등에 기초해서 사고 발생시 신속하고 안전하게 사고 구역을 계통으로부터 최대한 빨리 격리시키기 위한 보호 시스템에 대한 연구와 분석을 수행하여 신뢰성과 안전성을 겸비한 전력계통을 구성하는 것이 향후의 연구과제가 될 것이다.

## References

- [1] C. 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] F. A. Woodbury, "Electrical design considerations for drilling rig," IEEE Transactions in Industry Application, vol. 1A-12, no. 4, pp. 421-431, 1976.
- [3] A. K. Adnanes, "Status and inventions in electrical power and thruster systems for drillships and semi-submersible rig," proceedings of the Dynamic Positioning Conference, pp. 28-30, 2004.
- [4] P. Patil and 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. Calfio, J. A. Fulmer, and J. E. Tessaro, "Generators for use in electric marine ship propulsion systems," Proceedings of the IEEE Power Engineering and Society, vol. A, pp. 254-259, 2002.
- [6] W. Jeon, Y. P. Wang, and S. Y. Jung, "Dynamic characteristic analysis at each operation condition for electric ship propulsion system," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1296-1302, 2008.
- [7] J. S. Oh, S. Y. Jung, Y. K. Kong, J. G. Bin, and H. H. Kim, "Control algorithm development for design of cooling system in high-power propulsion motor," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 195-201, 2010 (in Korean).