

육상전원공급장치(AMP) 이용한 선내 전원 공급 시 계통 안정도 분석

강승표* · 김장목** · 조현준***†

* 부산대학원 공과대학 전기전자공학과 전기에너지시스템전공 석박사통합과정, (재)한국조선해양기자재연구원,

** 부산대학교 전기공학부 교수,

*** 한국해양대학교 기계IT융합공학과 기계공학전공 박사과정, (재)한국조선해양기자재연구원

Transient Stability Analysis of Vessel Power System Using Alternative Marine Power

Seung-pyo Kang* · Jang-mok Kim** · Hyun-jun Cho***†

* PhD Candidate, M.S., Dept. Electrical Engineering, Pusan National University, Korea, Korea Marin Equipment Research Institute

** Professor, Dept. Electrical Engineering, Pusan National University, Korea

*** PhD Candidate, Dept. Mechanical IT Convergence Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea, Korea Marin Equipment Research Institute

요 약 : 세계적 선박 배출가스 저감에 대한 규제로 인해 항만 및 부두에서 육상전원공급장치(AMP, Alternative Marine Power)가 지속적으로 사용되고 있다. 국내 또한 항만 대기질 개선 특별법에 따라 AMP의 사용이 의무화되고 있고, 다양한 친환경선박과 연계하여 활용하도록 지속적인 시도를 하고 있다. 본 논문에서는 AMP를 통해 선내 전력을 공급하는 상황을 모델링 하여 AC Load Flow Analysis를 수행하였다. 이를 통해 선박에 전력이 공급될 때의 전기적 파라미터와 손실 등에 대해서 분석할 수 있다. 아울러 Transient Stability Analysis를 통해 계통의 사고 발생 시 선내 발전기를 통한 무정전전환에 대한 HSGT(High Speed Generation Transfer)의 한계값을 도출하고 이를 적용하였을 경우 결과에 대해 검토하였다.

핵심용어 : AC Load Flow Analysis, 육상전원공급장치(AMP), Transient Stability Analysis, Power Conversion, Grid Connected Converter

Abstract : Alternative marine power (AMP) is continuously used in ports and on docks because of regulations on global ship emission reduction. In Korea, the use of AMP is also mandatory under the Special Act on Port Air Quality Improvement, and efforts are under way in connection with various eco-friendly ships, such as electric-propulsion ships. In this study, AC load flow analysis was performed by modeling the situation in which onboard power is supplied through AMP. This analysis made it possible to study the electrical parameters and losses when power was supplied to the ship. In addition, through a transient stability analysis, the high-speed generation transfer limit value for uninterruptible conversion through onboard generators in the event of a system accident was derived. The results obtained when it was applied are presented

Key Words : Transient Stability Analysis, Alternative Marine Power, Load Flow Analysis, Power Conversion, Grid Connected Converter

1. 서 론

최근 세계적으로 항만 및 부두에서 발생하는 배출 가스에 대해 규제가 엄격해지고 있다. 선박 수화물의 하역 및 적하 과정에서 필요한 시스템, 공선의 무게 중심을 잡기 위한 평형수 시스템, 선주의 편의성을 위한 공조, 조명 등 부하에 선내 발전기를 구동하여 전력을 공급함에 따라 황산화물 등의

대기 오염 물질을 배출하고 실정이다(Shin and Wang, 2021). 이를 해결하기 위해 정박 시 선내 발전기를 구동하지 않고 육상 계통을 사용하여 필요한 전력을 공급하는 방법이 고안되었고, 2021년까지 항만 및 하역 부두에 정박하는 모든 선박의 선내 발전기 대신 육상전원공급장치(AMP)를 이용하여 필요한 전력을 공급해야 하는 항만 대기질 개선 특별법을 개정하였다(Kim et al., 2015). 하지만 육상 전원을 사용하여 수백 kW 이상의 선내 전력 공급 시 전기 사고가 발생하게 되면 선박과 계통의 안정도에 심각한 영향을 초래할 수 있다. 단락 사고에 따른 아크 전압 발생은 전기기기에 직접적

* First Author : kspkorea77@komeri.re.kr, 051-400-5455

† Corresponding Author : cho1130@komeri.re.kr, 051-400-5432

인 과전압을 제공하여 고장을 초래할 뿐만 아니라, 사고에 따른 계통 불안정 또한 급격한 주파수 변동으로 이어져 주파수 변화에 민감한 전기기기에 영향을 미친다. 또한, 발전기 탈락 시 계통과 연계된 모든 기기에 심각한 영향을 주고 심각한 경우 계통이 붕괴되어 정전이 발생할 수 있다(Kim et al., 2015). 따라서 본 연구를 통해 선박이 육상전원공급장치(AMP)를 사용하는 여러 가지 환경을 모델링하고 이에 대한 안정도 분석을 수행하여 육상전원공급장치(AMP) 사용 시 발생할 수 있는 사고에 대해 모의하고자 한다.

2. 본 론

2.1 계통 안정도 해석

본 계통 안정도 분석에 사용된 도구는 전력개통해석 프로그램인 ETAP으로 세분화된 파라미터에 따른 해석을 수행할 수 있는 장점으로 인해 상황에 대한 구체적이고 정확한 해석이 가능하다. 일반적으로 전력 계통의 유효·무효 전력, 전압 및 전류의 분포를 분석하고 각종 설비의 정격용량, 전력 콘텐츠 투입용량, 부하차단(Load Shedding), 전압 강하 및 전력 흐름 등을 분석할 수 있다. 특히 과도 안정도 해석은 대용량 부하의 분리 및 투입, 고장 발생에 따른 계통의 충격에 지속적인 운전 가능 여부를 확인할 수 있다. 이에 따라 모션 고속 절체 시간의 계산, 발전기 기동 모의와 계전기 설정의 평가가 가능하다(Kim et al., 2000).

Fig. 1은 안정도 해석에 사용한 계통의 블록도이다. 계통의 전력을 육상전원공급장치(AMP)를 통해 선박에 공급할 때 선박의 전체 부하를 부담해야 하므로 계통의 운전은 Swing Mode로 설계하였다. 또한, High Voltage Transform와 Low Voltage Transformer이 각각 사용되는데, High Voltage Transform 경우 여러 척의 선박이 운전될 때 Main TR에 전 부하가 인가되므로 육상전원공급장치(AMP)의 Feeder System을 기준으로 Standard Availability 및 Power Factor를 반영하여 Rating MVA를 산정하였다. Transformer의 Grounding Tap의 경우 1차 측은 Delt, 2차 측은 Wye 결선으로 지정하고 표준값인 Dyn11 \angle 30 Vector로 지정하였다. Low Voltage Transformer 경우 선박의 부하를 고려하여 Rating MVA를 결정하였고, Grounding Tap의 경우 1차 측은 Wye, 2차 측은 Delta로 결선하고, Ynd1 \angle 30 Vector로 지정하였다. 이와 같이 계통과 선박이 연결된 전력 구조는 전기적 부품 간의 상호연계성이 고려되어 설계되었으므로 다양한 동작 상태에서의 전력 흐름을 해석하여 각 BUS의 전압 및 전력 조류가 허용 범위 내인지를 검토하여 시스템의 안정도를 판단하는 것이 매우 중요하다(Lee et al., 2011).

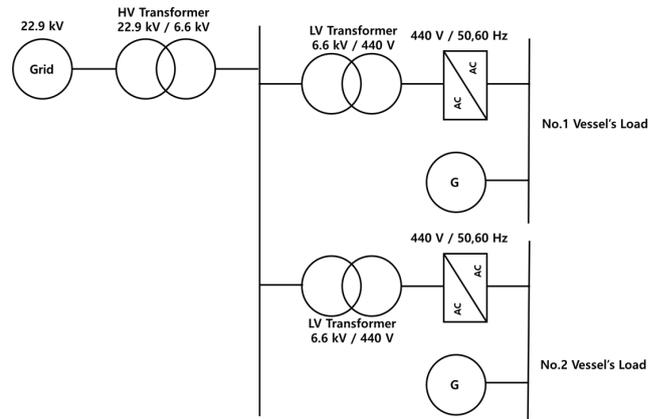


Fig. 1. Alternative Marine Power (AMP)- Ship Power Flow Block Diagram.

2.2 육상전원공급장치(AMP) 모델링

여러 국가에 따라 다른 계통 정격 사양과 선박의 정격 사양의 차이뿐만 아니라 보호 동작과 역률 개선 등의 복합적인 문제를 위해 LV Transformer 후단에 AC/DC/AC 구조의 전력변환장치를 사용하여 선내 전력을 공급한다. 이때, 전력변환장치 정격 사양은 선내 부하의 정격과 동일하게 선정하였다. 하지만 ETAP 21.0.2 Version을 기준으로 AC/DC/AC 시스템의 전력변환장치를 사용하여 해석하는 경우 AC와 DC 시스템 해석에 대한 한계로 인해 기능 구현이 제한적이므로 이를 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 AC/DC와 DC/AC의 시스템으로 각각 분리하고 DC Cable로 Link로 구성하였다.

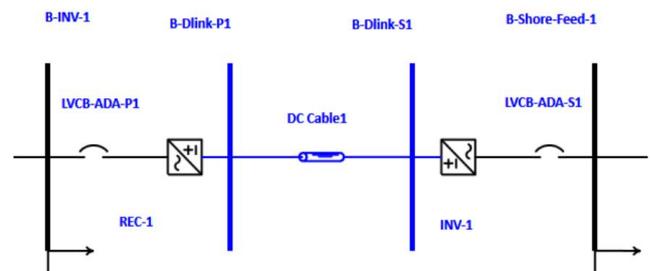


Fig. 2. Alternative Marine Power (AMP) internal configuration diagram.

2.3 대상 선박 모델링

일반적으로 선박의 계통을 구성하기 위해 3개 혹은 4개의 발전기가 좌우 대칭으로 설치되며, 비상 시 계통에 전기를 공급할 수 있는 비상 발전기도 설치된다(Leem et al., 2020). 본 연구에서의 선박은 주 발전기 3대와 비상 발전기를 포함하여 4대의 동기 발전기를 포함하고 있으나 본 연구에서는

비상 발전기의 운전은 안정도 해석에 포함하지 않으므로, 실질적으로 3대의 1,000 kW 동기 발전기(A, B, C)가 대상이다. 발전기의 Operation Mode는 실제 선박과 동일하게 지정하였다. 발전기 A의 경우 Operation Mode는 Isochronous Method인 Swing으로 지정하였다. 이에 따라 발전기 A는 선내 계통 시스템의 기준 운전을 수행하고, Isochronous 동작에 따라 정격 주파수로 설정된 기준 주파수를 유지하며 선내 전력을 공급한다. 발전기 B, C는 Operation Mode는 Droop method 중 Voltage Control로 지정하였다. 따라서 부하 분담을 수행하고 Droop 동작에 의해 결정된 유효 전력, 무효 전력을 공급하여 선내 전력 계통의 조류를 유지한다. 발전기의 제어 장치인 여자기는 안정적 분석을 위해 범용으로 사용되는 Bulit-in-IEEE Type 2를 선정하였는데, Static Regulator를 포함한 회전 정류자의 형태의 EXC 및 AVR 기능을 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 IEEE Type 1과 유사하고 감쇄 제한 제어가 추가되어 있으므로, 여자기 출력이 아닌 AVR을 통해 감쇄 제한의 주입력을 적용할 수 있다. 선박 계통의 정상 상태란 계통 내의 모든 지점에서 전압 및 주파수가 허용 범위 내에 있고, 무효 전력이 평형을 이루고 있는 상태를 말한다. 반면 과도 상태란, 선로의 고장, 발전기 또는 대형 부하의 탈락 등 큰 외란이 발생하였을 경우를 말한다. 이러한 과도 상태가 발생하면, 발전기와 부하의 입·출력 사이에 차이가 발생하게 되고 그 차이에 비례하여 회전자 가속 또는 감속하게 된다. 만약 고장이 제 때 회복되면, 상차각(위상차각)이 새로운 평형점으로 동요하며 이동되나, 고장이 회복되지 못하면 상차각이 계속 증대하여 계통이 불안정해진다(Kim et al., 2009).

3. 해석 결과

3.1 AC Load Flow Analysis

육상전원공급장치(AMP)를 이용하여 선내 전력을 공급하는 경우 전반적인 Power Flow, Active & Reactive Power 및 Voltage Drop 등의 요소를 확인하고, 안정적 운전조건을 결정하기 위해 Load Flow Analysis가 필요하다. 또한, 이를 통해 Unbalanced Load Flow 및 Transient Stability의 기준을 결정할 수 있다. 본 연구에서의 Load Flow Analysis는 모선에 대한 전압 크기, 위상각 등에서 나타나는 Known Quantity와 운전조건을 통해 결정되는 Unknown Quantity를 수직적으로 연산하기 위해 Adaptive Newton-Raphson Method를 활용하였다. Etap 내 Load Flow Analysis를 위한 수치계산 기법으로는 Newton-Rapson Method, Fast-Decoupled Method, Accelerated

Gauss-Seidel Method 등이 있지만, 본 논문에서는 수렴속도가 빠르고 안정적인 Newton-Rapson Method를 적용하였다. 이 방법을 기반으로 발전기 출력량과 총부하량을 비교하여 발전기의 과부하 여부를 관찰하고, BUS 전압의 변동이 전압 제한조건(IEEE Std. 141-1993, 5% 미만)에 적합한지 검토한다. 이와 같은 검토사항은 시스템 모델링의 적절성 여부를 평가하는데 사용된다(Kim and Cha, 2014).

Table 1. Analysis Conditions for AC Load Flow Analysis

No.	Analysis Conditions
1	Power supply using vessel generators
2	Power supply using alternative marine power

Table 1에 따라 분석 No.1은 선내 발전기를 사용하여 전력을 공급할 경우이며, 이에 따른 AC Load Flow Analysis 결과는 Table 2에 나타난다. 3대의 동기 발전기가 모두 운전하여 부하를 분담하고 있으며 발전기 A는 Swing 운전을 하므로 의도적으로 유효전력과 무효 전력의 크기를 높게 설정하였다. 이때 각 모선의 전압 크기 및 위상의 변동분이 앞서 제시한 IEEE Std. 141-1993d 에 따라 5% 마진 범위 이내이며, 특히 Main Source와 근접한 모선에서 0.11%의 전압 강하가 발생하므로 3%의 Flicker를 고려하는 Utility Guide Limit 내에도 부합하는 것을 알 수 있다.

Table 1의 No.2는 육상전원공급장치(AMP)를 사용하여 선내 전력을 공급할 경우이며, 3대의 발전기가 모두 차단된 상태에서 부하에 전력을 계통에서 공급하고 있다. 선내 부하는 분석 No.1과 동일한 상태이다. 이때 Load Flow 결과는 규격에서 요구하는 5% 이내이지만 분석 No.1에 비해 선로 임피던스와 Transformer 등으로 인해 전압 강하가 최대 3배까지 더 나타나는 것을 Table 3의 결과를 통해 확인할 수 있다. 따라서 선로 임피던스, Transformer, 필터류 등 전압 강하가 크게 발생할 수 있는 상황에서는 규격에서 요구하는 값을 만족할 수 없는 상황이 발생하므로, 육상전원공급장치(AMP)와 선박의 계통 구성에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

Table 2. Results of AC Load Flow Analysis when supplying power on board using onboard generators (No.1)

	Unit	Generator A	Generator B	Generator C
Active Power	[kW]	234.17	223.30	233.30
Reactive Power	[kVar]	214.45	177.98	117.15
Apparent Power	[kVA]	317.53	285.55	252.17
Apparent Power	[A]	416.65	374.69	330.88
Power Factor	[%]	73.75	78.20	88.55

	Unit	Main switch gear Bus	Critical Load Bus	LV Load Bus
Voltage Magnitude	[%]	99.89	99.12	99.01
Voltage Angle	[°]	0.01	0.31	-0.07
Active Flow	[kW]	379.89	12.63	3.01
Reactive Flow	[kVar]	284.20	9.47	2.26
Apparent Power	[kVA]	479.09	15.79	3.76
Current Flow	[A]	629.33	20.90	21.95

Table 3. Results of AC Load Flow Analysis during onboard power supply using onboard power generators and onboard power supply using Alternative Marine Power (AMP)

	Unit	Main switch gear Bus		Critical Load Bus		LV Load Bus	
		No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
Active Power	[kW]	99.9	97.9	99.1	97.1	99.0	97.0
Reactive Power	[kVar]	0.01	0.45	0.31	0.76	-0.07	0.37
Apparent Power	[kVA]	379.8	400.2	12.63	12.63	3.01	2.89
Apparent Power	[A]	284.2	289.0	9.47	9.47	2.26	2.17
Power Factor	[%]	479.1	493.6	15.79	15.79	3.76	3.61

3.2 Transient Stability Analysis

육상전원공급장치(AMP)의 사용으로 전력 공급을 받고 선내 발전기 또한 부하 분담을 하기 위해 정상적으로 운전되고 있는 상황에서 부하 급변 및 사고 상황 등과 같은 왜란이 발생하면 계통이 불안정해진다. 이때, 계통과 발전기는 감속 및 가속 과정을 통해 과도 상태를 해소하고 정상 상태에 도달하기 위해 운전을 수행한다. 이러한 상황에서 전력계통의 응답 특성을 확인하고 안정적으로 정상 상태에 도달하기까지 계통에 미치는 영향력을 분석하여 선내 부하 설비의 이상 운전을 방지하여 전체적 전력계통의 신뢰성을 확보해야 한다. 이를 위해 Transient Stability Analysis를 수행한다.

계통에서 육상전원공급장치(AMP) 이용하여 부하단에 전력을 공급하는 경우 계통에 외란이나 사고가 발생하는 경우 외란의 정도에 따라 육상전원공급장치는 차단될 수 있다. 또한 갑작스러운 계통 전력의 차단은 선내 회전기기 및 주요 부하에 전력을 공급하지 못하게 되어 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 육상전원공급장치(AMP)를 이용하여 선내 전력을 공급 중 계통의 예상치 못한 문제로 인해 육상전원공급장치(AMP)가 차단될 때, 선내 발전기는 급격한 기동을 통해 선내 전력의 과도 상태를 거쳐 정상 상태에 도달하게 된다. 이때 발전기의 급격한 기동에 따라 선내 부하는 연속적으로 운전하는 무정전전환이 가능하고, 전원공급원의 무정전전환은 선내 기기들의 안정성과 연속성을 확보할 수 있으므로 전원공급원의 무정전전환 한계값을 도출하고 한계값을 초과하는 조건과 초과하지 않는 조건에 대해 해석하였을 경우 각 결과에 대해 확인하고자 한다.

Table 4. Transient Stability Analysis Time Flowchart for Interpretation

No.	Time [s]	Condition
1	0	Power supply using alternative marine power
2	1	Alternative marine power circuit breaker open
3	1.1	Power supply using vessel generators : Transient state
4	1.5	Power supply using vessel generators : steady state

Table 4에 따라 No.1은 육상전원공급장치(AMP)를 통해 선내 전력을 안정적으로 공급하고 있다. 선박 내 발전기가 차단된 상태이며, 모든 부하는 계통 전력에 의해 운전된다. 선내 부하를 운전하기 위해 계통에서 입력되는 전력은 Table 5와 같이 2122.92 kVA이며 선박 1, 2에 각각 959.46 kVA / 763.93 kW

육상전원공급장치(AMP) 이용한 선내 전원 공급 시 계통 안정도 분석

씩 소모된다.

No.2은 계통 사고에 따라 육상전원공급장치(AMP)의 전력이 차단된다. 부하들이 정지되지 않고 지속해서 운전하기 위해서는 계통 사고 발생에 따라 선박 내 발전기가 급속하게 동작하여 부하를 분담하여야 하는데 이를 HSGT(High Speed Generation Transfer)이라고 한다. 계통에 사고 발생으로 인해 육상전원공급장치(AMP)를 통한 선내 공급이 끊기게 되더라도 선내 주요 장비의 운영에는 지장이 없어야 한다. 따라서 사고 발생 시 무정전전환을 하기 위해 Transient Stability Analysis를 통해 HSGT Limit을 도출해야 한다.

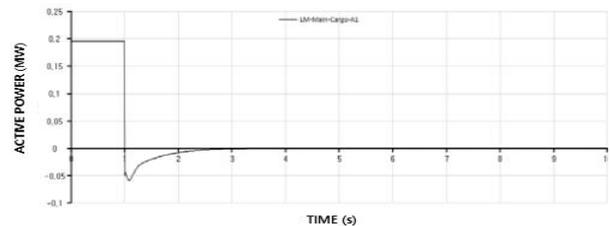
Table 5. Power Parameters in Transient Stability Analysis Mode 1

	Unit	Main-Source Output	AMP-1 Incoming	AMP-2 Incoming
Active Power	[kW]	1531.70	763.93	763.93
Reactive Power	[kVar]	1469.92	709.95	709.95
Apparent Power	[kVA]	2122.92	1042.89	1042.89
Apparent Power	[A]	53.52	92.85	92.85
Power Factor	[%]	72.15	73.25	73.25
	Unit	Vessel No.1 Incoming	Vessel No.2 Incoming LV Load Bus	
Active Power	[%]	700.62	700.62	
Reactive Power	[°]	655.51	655.51	
Apparent Power	[kW]	959.46	959.46	
Apparent Power	[kVar]	1276.74	1276.74	
Power Factor	[kVA]	73.02	73.02	

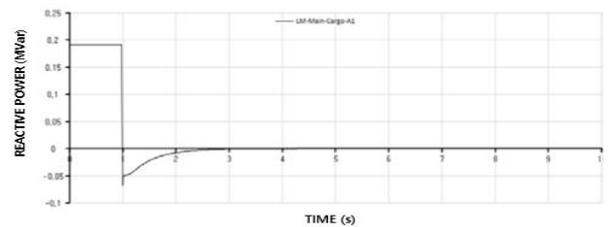
HSGT Limit값은 사고 발생 시 선내 모선에 발생하는 현상을 분석하여 얻을 수 있다. 일반적으로 HSGT Limit값은 모선에 대한 전압 위상 지연과 전압 크기 변화에 대한 기준값을 ANSI C50.41에 따라 선정한다. Transient Stability Analysis에 사용된 LM-Main-Cargo-A1 모선은 Normal Condition에서 최대 180 kW 부하를 차지하는 선내 주요 부하 중 하나이다. 해당 모선에 분석 결과 No.2에서의 운전 변화는 Fig. 3과 같다. No.2에서 육상전원공급장치(AMP) 차단기가 OPEN 되면 모선

으로 공급되던 전력은 일정 시간 후에 차단되는 것을 확인할 수 있다.

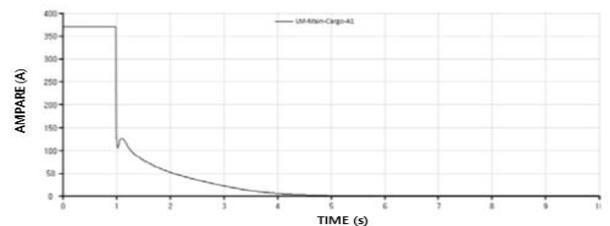
육상전원공급장치(AMP)를 통해 공급되는 전력이 차단됨에 따라 무정전전환을 하기 위해서 해당 모선의 전압 위상과 크기에 대해 분석이 필요하다. 최대 전환 Fig. 3에 따라 모선에 대해 1.28초에서 1.30초 사이에 기준값을 초과하였는데, 1.28초에서 87.81°의 위상 지연, 1.30초에서 98.234°의 위상 지연을 확인할 수 있다. 또한 전압의 크기 변화는 1.06초에서 81.60%, 1.08초에서 79.90%의 결과를 확인할 수 있다. 이를 종합적으로 고려할 때 가장 신속한 투입 시간은 1.06초, 한계 투입 시간은 1.28초임을 확인할 수 있다. 1.28초에서 1.30초 사이에서 V/Hz의 값 또한 125.50% ~ 134.80%의 값을 가지므로 1.28초를 HSGT Limit으로 설정하게 된다면 133%를 초과하지 않는다. 즉 선내 주요 부하로 선정한 Main Cargo에서는 계통의 사고 발생 시 1.06초에서 1.28초 사이 발전기가 투입되어야 무정전전환이 가능하다. 그러나 투입시간을 1.06초로 선정할 경우 Swing Mode로 지정된 발전기 A의 동작이 60 Hz 정현파의 3.6 Cycle 이내에 이뤄져야 하는데 실질적으로 구현이 어려우므로, 1.10초(6 Cycle)의 투입시간으로 선정하였다.



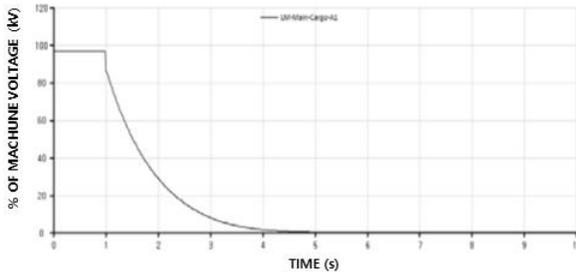
(a) Active Power for LM-Main-Cargo-A1



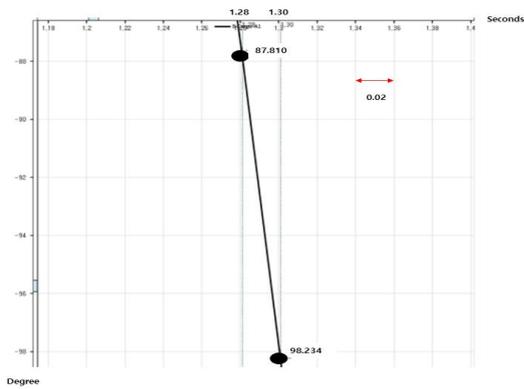
(b) Reactive Power for LM-Main-Cargo-A1



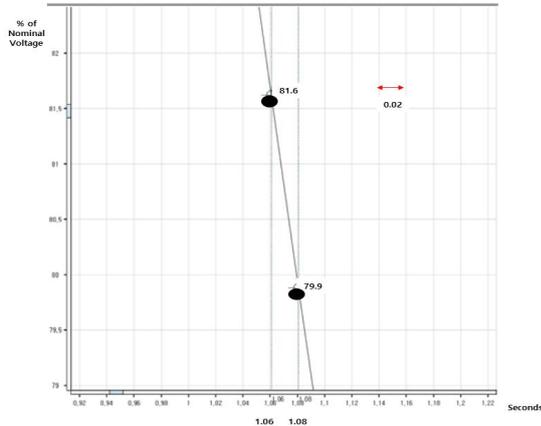
(c) Current for LM-Main-Cargo-A1



(d) Voltage fluctuation(%) for LM-Main-Cargo-A1



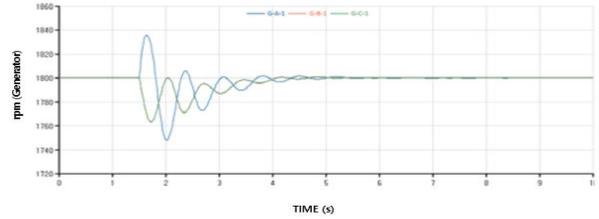
(e) LM-Main-Cargo-A1 Bus Voltage Angle



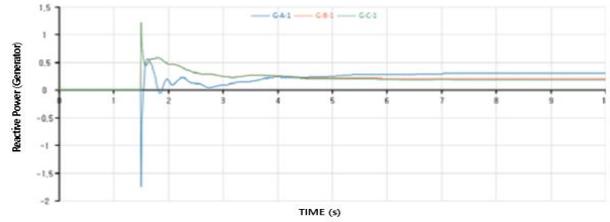
(f) LM-Main-Cargo-A1 Bus Voltage Angle Zoom in

Fig. 3. Transient Stability Analysis Mode 2 Power Parameters in LM-Main-Cargo-A1

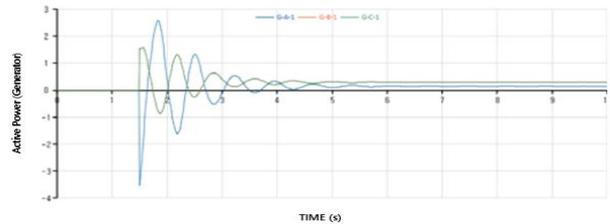
Fig. 4는 앞서 검출된 HSGT Limit을 적용하여 계통의 사고 발생 시 무정전전환 가능 여부를 검토하였다. 먼저 HSGT Limit을 초과하여 발전기가 동작하였을 때의 결과이다. HSGT Limit을 초과한 1.5초(30 Cycle)로 지정하였을 경우 선 내 발전기 A, B, C는 Fig. 4와 같이 일시적 과도 상태를 거쳐 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 속도를 기준으로 Fig. 4와 같이 약 5초에 안정화 구간에 도달한다. 그에 따른 유효, 무효 전력 공급도 점진적으로 안정된다.



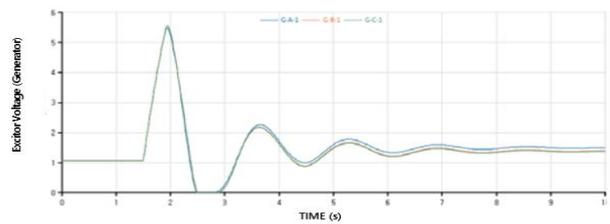
(a) Speed of a generator



(b) Reactive power of the generator



(c) Active power of the generator

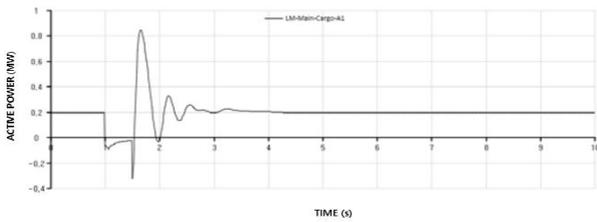


(d) Generator exciter voltage

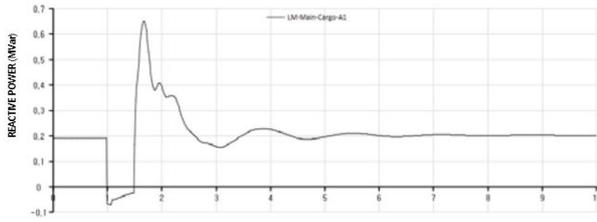
Fig. 4. Generator parameter in Transient Stability Analysis mode 2 (HSGT Limit: 30 Cycle setting)

Fig. 5에서 선내 주요 부하인 LM-Main-Cargo-A1은 사고 발생 후 선내 발전기가 안정화될 때까지 정지 상태로 진행되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 일정 시간 이후에 Re-Acceleration이 나타난다. 결과적으로 HSGT Limit 값이 1.5 초(30 Cycle)에서는 연속적인 부하 운전이 이루어지지 않으며, Dynamic Loads의 영향으로 순간적인 전력 공급 차단 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 최악의 경우 Generator Rating과 Disturbance의 Mismatch가 일어나면, 정전으로 이어질 수 있다.

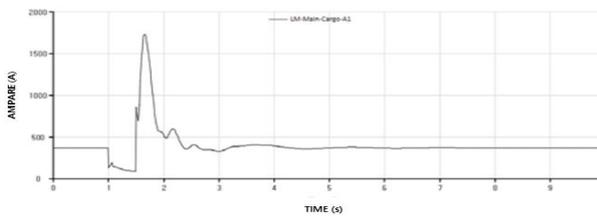
육상전원공급장치(AMP) 이용한 선내 전원 공급 시 계통 안정도 분석



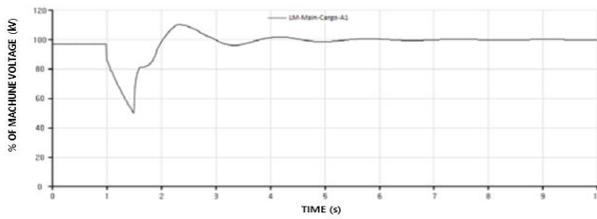
(a) Active Power for LM-Main-Cargo-A1



(b) Reactive Power for LM-Main-Cargo-A1



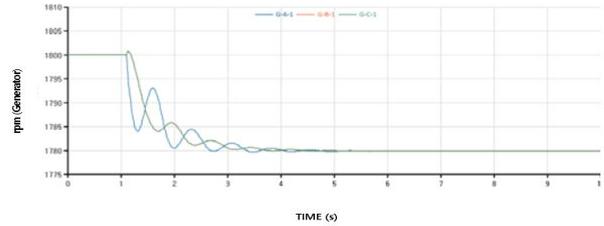
(c) Current for LM-Main-Cargo-A1



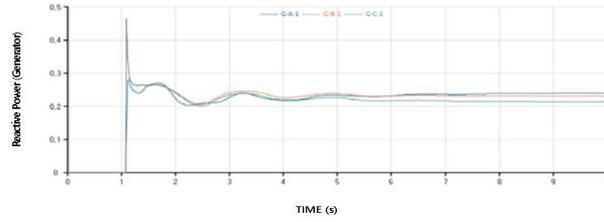
(d) Voltage fluctuation(%) for LM-Main-Cargo-A1

Fig. 5. Power parameter in Transient Stability Analysis Mode 2 LM-Main-Cargo-A1 (when setting HSGT Limit : 30 Cycle).

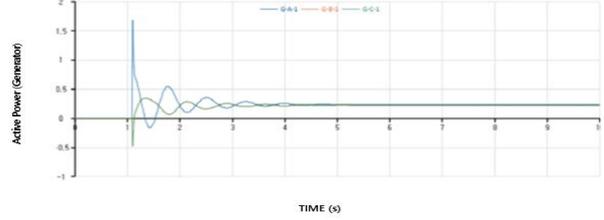
Fig. 6은 사고 발생 시 HSGT Limit를 1.10초(6 Cycle)로 설정하고 HSGT Limit 이내 발전기를 투입할 경우 결과이다. 앞선 상황과 같이 Table 4에 따라 No.1에서 육상전원공급장치(AMP)를 통해 계통에서 안정적으로 선내 전력을 공급하고 있다. No.2에서 선박으로 공급되는 전력은 앞선 경우와 마찬가지로 차단된다. 이때 HSGT Limit을 1.1초로 적용됨에 따라 발전기의 운전 특성은 Fig. 6와 같이 나타난다. 발전기 속도를 기준으로 약 3.98 [sec]에 3대의 동기 발전기가 Steady-State에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라 유효 및 무효 출력의 결과도 과도 상태를 거쳐 리플이 감소되며 정상 상태로 도달하는 것을 확인할 수 있다.



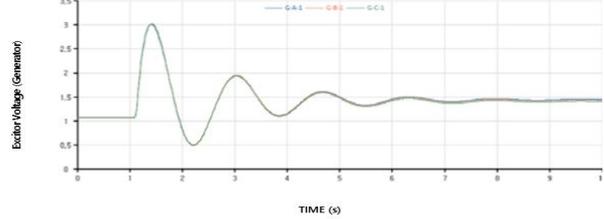
(a) Speed of a generator



(b) Reactive power of the generator



(c) Active power of the generator



(d) Generator exciter voltage

Fig. 6. Generator parameter in Transient Stability Analysis mode 2 (HSGT Limit: 6 Cycle setting).

Fig. 7과 같이 선내 주요 모선인 LM-Main-Cargo-A1의 경우 육상전원공급장치(AMP)의 순간적인 차단에도 불구하고 안정적인 운전을 확인할 수 있다. Instantaneous Interruption이 나타나지만, 정지 상태로 진행되지 않고 Re-Acceleration Current 또한 상대적으로 작다. HSGT Limit이 1.5초(30 Cycle)에서의 Line Current는 1732.00 [A]이었으나 HSGT Limit을 초과한 1.1초(6 Cycle)에서의 Line Current는 588.00 [A]로 표시된다. 결과적으로 1.1초(6 Cycle)의 HSGT Limit에서는 Vessel 내부 부하의 연속적인 운전이 가능하며, Dynamic Loads에 대해 무정전 전환이 가능한 것을 확인할 수 있다.

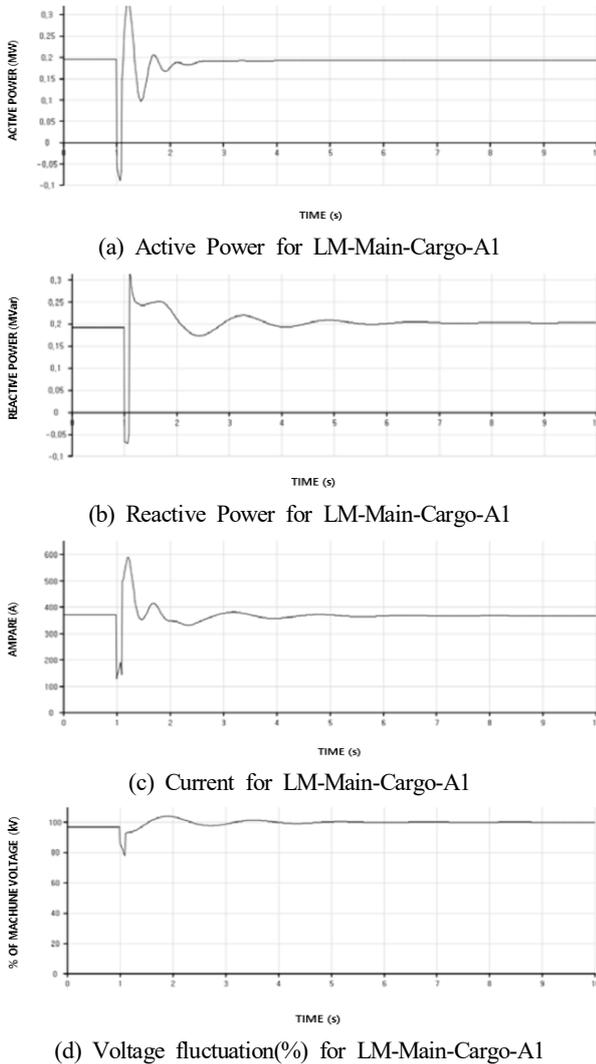


Fig. 7. Power parameter in Transient Stability Analysis Mode 2 LM-Main-Cargo-A1 (when setting HSGT Limit : 6 Cycle).

4. 결론

지속적인 환경 규제에 따라 육상전원공급장치(AMP)의 사용이 늘어나고 있다. 이에 따라 선내 전력 공급 시 전력 계통의 AC Load Flow Analysis와 Transient Stability Analysis를 수행하여 계통에 대한 상태와 안정도에 대해 해석을 수행하였다. AC Load Flow Analysis를 통해 육상전원공급장치를 사용하는 경우 변압기와, 케이블 임피던스, 전력변환 손실 등을 고려할 수 있는데, 이 때 AC Load Flow Analysis와 선박의 발전기만 이용하여 공급하였을 경우 대한 AC Load Flow Analysis 비교를 수행하였다. 또한 육상전원공급장치(AMP)를 통해 전력을 공급하는 상황에서 계통 혹은 전력변환장치 단

에서 사고 발생으로 차단되는 경우 Transient Stability Analysis 해석을 통해 선내 발전기와 육상전원공급장치(AMP)의 상황에 따라 무정전전환에 대한 HSGT(High Speed Generation Transfer) Limit을 도출하고 한계를 초과한 경우와 초과하지 않은 경우에 대해 비교 분석하였다.

사 사

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [과제번호 S3026601]

References

- [1] Kim C. H, and Yun D. O, Lee. S. G, Seo. D. H, Kim Y. S(2009), Analysis of Vessel Power System Using ETAP named Han-nara, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, pp. 95-96.
- [2] Kim, D. S. and H. J. Cha(2014), Analysis of Lead-Acid Battery Sizing Using ETAP, The Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1575-1576.
- [3] Kim H. R., (2000), Application software for design and analysis of power system, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 49, No. 3, pp. 35-38.
- [4] Kim, K. H., D. H. Kim, and S. H. Lee(2015), Design and Analysis of Load Shedding for the Electric Propulsion System, The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64, No. 7, pp. 971-977.
- [5] Lee, S. G., Y. S. Jeong, S. Y. Jung, and C. G. Lee(2011), Characteristic Analysis of Integrated Power System and Propulsion Motor Comparison for Electric Vessels According to the Driving Condition, Journal of IKEEE, Vol. 15, No. 1, pp. 96-103.
- [6] Leem, J. H., E. H. Cho, H. J. Lee, and J. W. Park(2020), Generator capacity calculation method by considering the reserve power of vessel power system, The Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 368-369.
- [7] Shin, Y. H. and Y. P. Wang(2021), Introduction to ETAP for Power System Design and Interpretation, The Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1925-1931.

Received : 2023. 01. 31.

Revised : 2023. 03. 10.

Accepted : 2023. 04. 27.