

수중함 전기 계통의 고 신뢰도 설계를 위한 고장나무분석과 적용

Fault Tree Analysis and its Application for Designing High Reliability Electrical System in Underwater Vehicle

김진산* · 최진성* · 빈재구** · 강필순†
(Jin-San Kim · Jin-Sung Choi · Jae-Goo Bin · Feel-soon Kang)

Abstract - A top priority in the design of underwater vehicle is to guarantee the dependability of the electric system because failure of the electrical power supply system is directly related to the life of the passengers. In this paper, we present four kinds of alternative designs to improve reliability of electrical system in underwater vehicle. To reduce the risk and to increase availability of the electrical system, we use the redundancy of the grid structure and power converter. For all design alternatives, we carry out Fault Tree Analysis. Based on the FTA result, we implement RAM simulation to compare the risk and availability for the proposed design alternatives.

Key Words : Fault tree analysis (FTA), Underwater vehicle, Redundancy, Integrated power system (IPS), Reliability, availability, and maintainability (RAM)

1. 서론

수중함의 전기 설비는 계통의 고장이나 손상 시에도 전력공급의 연속성과 연쇄적인 손상발생 방지를 위한 특별한 설계가 요구되며 전기 계통의 손상으로 함 추진 및 작동 계통 등의 주요 기능에 취약성을 초래하지 않도록 설계해야 한다. 특히 전기 계통의 고장은 함 탑승자의 생존 문제에 직접적인 영향을 미치기 때문에 수중함의 초기 설계 단계에서 전기 계통의 위험도(Risk)를 분석하고 이를 바탕으로 안전성 및 신뢰성에 대한 평가를 통해 위험도를 효과적으로 낮출 수 있는 설계가 요구된다[1]-[5].

일반적인 수중함의 경우 전기 계통의 주요 네 가지 전력공급 기능 (AC 115V/60Hz 전력공급, AC 115V/400Hz 전력공급, DC 24V 전력공급, 추진전동기 전력공급) 중 DC 24V 전력공급 기능의 위험도가 다른 기능과 비교하여 상대적으로 높고 가용도는 낮게 평가된다. 그러므로 설계 초기 단계에서 DC 24V 전력공급부의 위험도를 감소시키기 위한 전기 계통의 설계 변경이 필요하다. 위험도를 낮추기 위해서 DC-DC 컨버터, 차단기와 같은 구성품을 추가하여 병렬 운전하거나 계통을 교차 결선시켜 계통의 고장 확률을 감소시키는 방안을 고려할 수 있다[6]-[8].

본 논문에서는 수중함 전기 계통의 위험도를 낮추기 위해서

(특히 DC 24V 전력공급라인) 네 가지의 설계 대안을 제시하고 위험도와 가용도를 비교하여 가장 효율적이고 높은 신뢰도를 갖는 전기 계통을 제안하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 먼저 1) 구성품과 계통의 예비율을 증가시킬 수 있는 네 가지의 서로 다른 전기 계통을 제시한다. 2) 각각의 전기 계통에 대해 고장나무분석(FTA)을 수행한다. 3) FTA 결과를 기반으로 한 RAM 시뮬레이션으로 가용도 및 위험도를 평가한다. 4) 네 가지 모두에 대해 상기 절차를 반복하고 결과를 비교하여 최상의 결과를 선정한다.

2. 수중함 전기 계통의 설계대안

2.1 수중함의 일반적인 전기 계통 구조

수중함의 전기 계통은 통합전력체계(Integrated Power System: IPS)에 의해 운용되며 IPS는 함의 주요부하에 전력을 공급하기 위해 AC 115V/60Hz, AC 115V/400Hz, DC 24V, 추진전동기 전력공급 기능이 요구된다. 그림 1은 일반적인 수중함 전기 계통의 한 예를 보여준다. 추진 및 함 소요전력(통신, 제어, 일반 서비스 부하)을 공급하기 위해 Main, DC 220V, DC 24V, AC 115V/400Hz, AC 115V/60Hz의 5개 Bus를 가지는데, Main Bus의 전압은 배터리 직·병렬 구조에 따라 결정되는 함의 기본 전압으로 발전기(G)에 의해 생산되는 전압이며, 또한 배터리(B)에 저장되는 전압, 추진용 전동기(M)를 구동시키기 위한 기본 DC 전압을 의미한다. 이 Main DC Bus 전압은 강압과정을 거쳐 DC220V Bus를 생성하게 된다. DC 24V 전원은 수중함의 제어전원, AC 115V 400Hz는 통신용 전원, AC 115V 60Hz는 일반 서

† Corresponding Author : Dept. of Electronics and Control Engineering, Hanbat National University, Korea.
E-mail: feelsoon@hanbat.ac.kr

* Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Hanbat National University, Korea.

** Agency for Defense Development, Korea.

Received : March 7, 2016; Accepted : December 5, 2016

비스 전원을 나타낸다. 일반적으로 수중함의 전기계통은 케이블 길이 및 수량의 최소화 와 전기 장비 분리를 통한 신뢰성 확보를 위해 구역배전개념이 적용되어, Main Bus의 중앙 차단기(Circuit Breaker)를 중심으로 좌우 대칭 구조를 가진다. Main Bus의 좌측과 우측은 각각 전력생산부인 디젤발전기와 배터리로 연결되며, DC-AC 인버터를 통해 추진전동기를 구동한다. 그리고 DC 24V Bus는 DC 220V Bus를 통해 연결되며 각 Bus 사이에는 DC-DC 컨버터가 위치한다. 또한 Main Bus로부터 DC-AC 인버터를 통해 AC 115V/400Hz Bus와 AC 115V/60Hz Bus로의 전력 배전이 이루어지며 각각의 주요 구성품 사이에는 차단기가 위치하고 있다.

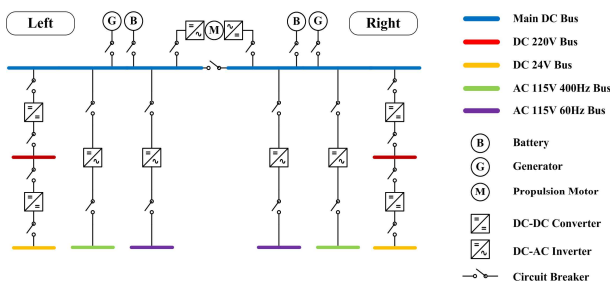


그림 1 수중함의 일반적인 전기 계통 구조

Fig. 1 General configuration of electrical grid in underwater vehicle

2.2 수중함의 일반적인 전기 계통에 대한 RAM 분석 결과

고장모드들의 발생빈도를 산출하는 기법은 시스템을 수학적으로 모형화 해서 발생빈도를 계산하는 해석적 기법과 부품의 고장 시간과 수리시간 같은 불확실성을 고려해서 발생빈도를 추정하는 확률적 기법이 있다. 수중함 전기 계통은 다소 복잡해서 해석적 기법으로 발생빈도를 산출하기에는 어려움이 있다. 따라서 RAM(Reliability, Availability, and Maintainability) 시뮬레이션을 이용해서 그림 1의 일반적인 수중함 전기 계통의 고장발생빈도를 추정한다.

전기 계통의 위험도 분석을 수행하기 위해서는 수중함의 운용 시나리오, 물리적 구조, ALDT(Administrative and Logistics Delay Time)과 같은 정보들이 필요하다. 본 시뮬레이션에서 수중함은 1년 동안 수중/수상운전(1,200시간), 유지보수(720시간) 그리고 수상(1,080시간)의 조합으로 운용된다는 운용시나리오를 가정하였으며, 표 1은 시뮬레이션에 적용된 부품별 수량(그림 1), 각 구성품의 고장률, MTBF(Mean Time Between Failure), MTTR(Mean Time To Repair)을 나타낸다. 모든 부품들의 MTTR은 20시간으로 동일하게 적용하고, MTBF와 MTTR은 지수 분포를 따른다고 가정하며, 총 시뮬레이션 시간은 30년, 반복횟수는 1,000회, 시스템 ALDT는 71.2시간으로 수행한 결과이다.

표 2는 고장나무별 가용도 및 위험도 시뮬레이션 결과를 나타내는데, IPS의 다른 전력공급기능과 비교해 볼 때 DC 24V 전력공급부의 가용도가 0.6566으로 상대적으로 낮고 위험도가 19.98로 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 DC 24V 전력공급부 구조는

다른 전력공급부 구조와 달리 전력변환과정 중간에 DC 220V Bus를 거치게 되어 부품 수가 증가하고 이에 따른 고장률이 증가함으로써 위험도가 증가한 결과이다. 따라서 그림 1에 주어진 전기 계통의 구조는 DC 24V 전력공급부에 대한 신뢰도 개선을 위한 설계 수정이 요구됨을 알 수 있다.

표 1 수중함의 일반적인 전기계통의 부품별 수량, 고장률, MTBF, MTTR

Table 1 The number of components, failure rate, MTBF, and MTTR of general electrical grid in underwater vehicle

명칭	수량	고장률	MTBF	MTTR
차단기 (Circuit Breaker)	23	6.8 /8,760	exp(1,288)	exp(20)
케이블 (Wire)	22	5.12 /8,760	exp(1,711)	exp(20)
컨버터 (Converter)	4	5.48 /8,760	exp(1,599)	exp(20)
인버터 (Inverter)	4	5.48 /8,760	exp(1,599)	exp(20)
배터리 (Battery)	2	3.4018 /8,760	exp(2,575)	exp(20)
발전기 (Generator)	2	3.5913 /8,760	exp(2,439)	exp(20)
모선 (Bus)	10	0.24 /8,760	exp(36,500)	exp(20)

표 2 고장나무별 가용도 및 위험도

Table 2 Availability and risk rate according to fault tree

	AC115V 60Hz 전력공급기능	AC115V 400Hz 전력공급기능	DC 24V 전력공급기능	추진전동기 전력공급기능
가용도	0.8444	0.8326	0.6566	0.9294
위험도	12.05	10.06	19.98	5.00

2.3 위험도 개선을 위한 설계대안

그림 1의 전기 계통에 대한 RAM 시뮬레이션 결과로부터 DC 24V 전력공급부의 위험도가 높음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수중함 전기 계통의 위험도를 낮추기 위해 예비율(Redundancy)을 증가시키는 방법으로 네 가지의 설계 대안을 제시한다. 수중함과 같이 제한적인 환경에서 전기계통의 예비율을 증가시키는 방법으로는 전력공급부와 구성품의 이중화를 통한 여유율(Redundancy) 확보가 일반적으로 사용된다. 본 논문에서는 위험도 감소를 위해 부품의 DC 24V 전력공급부에 대한 위험도 저감 및 가용도 향상에 초점을 두지만 IPS의 다른 전력공급 기능들도 DC 24V 전력공급부의 위험도와 가용도에 연관 관계를 가지므로 동시에 고려하도록 한다.

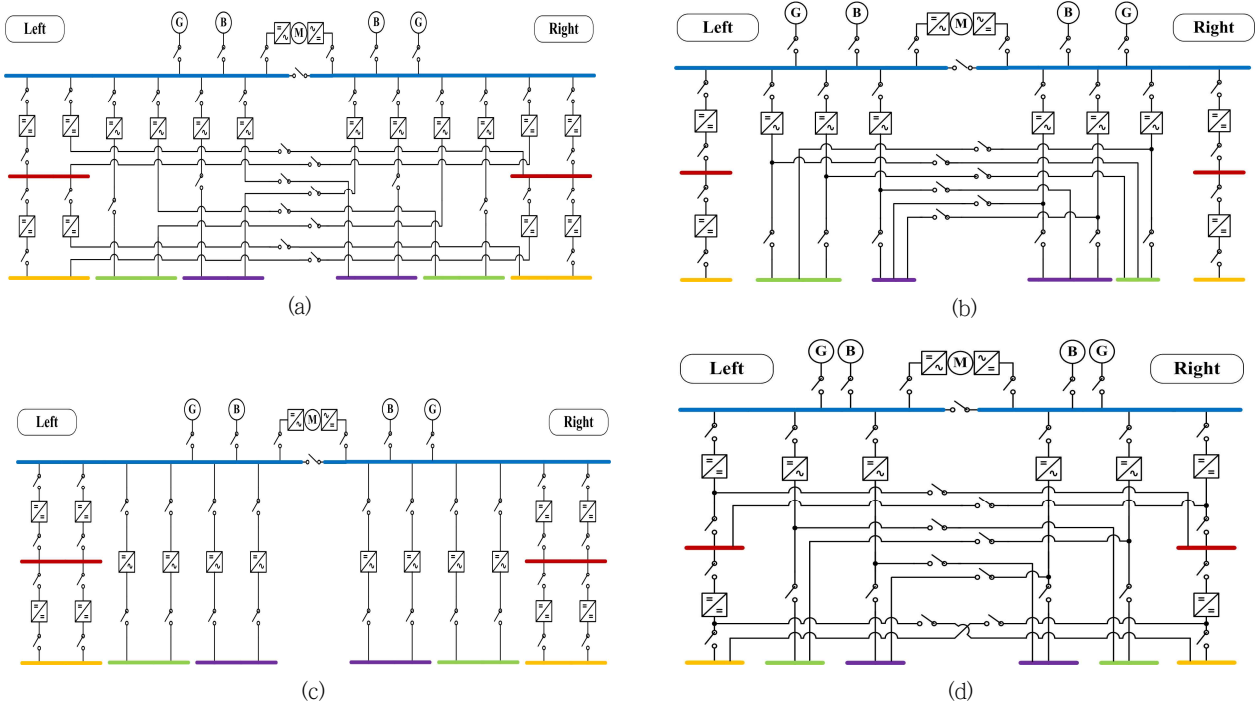


그림 2 예비율을 증가시킨 설계대안, (a)모든 변환기와 계통라인의 교차결합, (b)좌측 AC 115V 400Hz 컨버터와 우측 AC 115V 60Hz 병렬구조와 좌·우측 계통 교차 결합, (c)전 변환기의 병렬구성, (d)전 계통의 교차결합

Fig. 2 Design alternatives with increased redundancy, (a) cross-connection of all converters and grid, (b) parallel structure of left AC 115V 400Hz converter and right AC 115V 60Hz converter, and left-right grid cross-connection, (c) parallel configuration of all converters, (d) cross-connection of all grids

그림 2는 위험도 감소를 위해서 예비율을 증가시킨 설계 대안을 나타낸다. 그림 2(a)는 좌우측 모든 전력변환기를 병렬 운전시키고 계통라인의 교차결합을 이용하여 전원공급라인을 이중화시킨 구조이다. 그림 2(b)는 좌측 AC 115V/400Hz 컨버터와 우측 AC 115V/60Hz 컨버터를 병렬 운전시키고 좌우측 계통 교차 결합시킨 구조이다. 그림 2(c)는 계통의 교차결합은 없고 모든 전력 변환기를 병렬 운전시키는 경우이다. 마지막으로 그림 2(d)는 전력변환기의 추가 없이 모든 계통만 교차 결합시켜 전원공급라인을 이중화시킨 구조이다[7],[8]. 그림 2에 제시된 설계 대안들 중 “그림 2(a)의 전기 계통 구조가 위험도 측면에서 가장 우수할 것이다”라는 사실을 직관적으로 예상할 수 있다. 모든 구성품의 예비율을 100%로 설계함으로써 병렬관계인 모든 전력변환기가 고장이 발생되어야만 IPS의 고장이 발생하고, 전기 계통 역시 이중화하여 Back-up 기능을 가지기 때문에 전체 전기 계통의 위험도가 낮아질 것으로 예상하는 것은 당연하다. 본 논문에서는 이 당연한 결과를 수치화하고 다른 설계 대안과 비교하여 위험도와 가용도가 수치적으로 얼마만큼 향상되는지를 계량화하는 것이 중요한 달성 목표 중의 하나이다.

2.4 설계대안별 고장나무분석

본 절에서는 제시된 네 가지의 설계 대안에 대하여 고장나무

분석(Fault Tree Analysis: FTA)을 수행하여 수중합 전기 계통의 고장을 유발하는 고장들을 분석한다. FTA는 시스템의 고장을 나타내는 정상사상(Top Event)과 원인들의 관계를 하향식으로 표시하는 체계적인 고장분석 방법이다. 고장나무분석을 수행하기 위해서는 고장나무(Fault Tree)가 작성되어야 한다. 고장나무는 정상사상으로 연결되는 원인 분석을 통해 중간사상과 기본사상을 정의하며 작성한다. 전기 계통의 통합전력시스템 가동 기능 고장 [IPS.F]을 정상사상으로 하여, 중간사상과 기본사상을 식별하였다. 정상사상과 중간사상은 기능들의 고장으로 정의하고 기본사상은 부품들의 고장모드로 정의하며 표 3과 같다.

표 3 전기 계통의 사상 정의

Table 3 Event definition of electrical grid

사상종류	명칭
정상사상	통합전력시스템 가동 기능 고장 [IPS.F]
중간사상	AC 115V 60Hz 전원공급 기능 고장 [115/ 60.PS], AC 115V 400Hz 전원공급 기능 고장 [115/400.PS], DC 24V 60Hz 전원공급 기능 고장 [24.PS], 추진전동기 전원공급 기능 고장 [PM.PS] 등 총 100개의 중간사상
기본사상	단락유지, 개방실패, 간헐적 개방 등 총 189개의 기본사상

네모상자 부분이 추가됨을 알 수 있다. 즉 [L.24.BUS.PS]는 [L.24.CON1.PS]와 [R.24.CON2.PS]가 동시에 고장날 경우에 해당되므로 고장의 확률이 감소한다. 또한 하위사상 중 [L.220.BUS.PS]의 고장도 [L.220.CON1.PS]와 [R.220.CON2.PS]가 동시에 고장이 발생할 경우에 해당하므로 고장 확률이 줄어든 것을 알 수 있다. 전력변환기와 전력공급라인의 예비율(Redundancy)을 100%로 함으로써 DC 24V 전력공급 [24.PS] 기능의 고장을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 3(c)는 설계 대안 3의 고장나무를 보여준다. 설계 대안 3은 모든 전력변환기의 대수를 두 배로 증가시켜 병렬운전 구조로 구성한다. 그림 3(b)에 주어진 설계 대안 1의 고장나무와 유사하게 점선 네모상자 부분이 추가되지만 설계 대안 1의 [R.24.CON2.PS]가 [L.24.CON2.PS]로 변경되고 아래쪽 네모상자에서도 [R.220.CON2.PS]가 [L.220.CON2.PS]로 변경됨을 알 수 있다. 이는 설계 대안 3에서는 구성품의 예비율만 100%로 구성하고 전력공급 라인의 교차 결합은 적용하지 않음으로 인해 나타나는 결과이다.

그림 3(d)는 설계 대안 4의 고장나무로써 구성품을 증가시키지 않고 전력공급 라인의 이중화만을 이용할 경우에 해당한다. 설계 대안 1, 설계 대안 3과 같이 점선 네모상자가 추가되어 [L.24.BUS.PS]의 기능 실패는 좌측 DC 24V 컨버터로 좌측 Bus 전력공급 [L.24.CON.PS.toL] 기능과 우측 DC 24V 컨버터로 좌측 Bus로 전력공급 [R.24.CON.PS.toL] 기능이 동시에 실패하는 경우 고장이 발생함을 알 수 있다. 또한 [L.220.BUS.PS]는 [L.220.CON.PS.toL]과 [R.220.CON.PS.toL]이 동시에 실패하는 경우 고장이 발생하게 됨으로써 위험도가 확률적으로 감소함을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션을 통한 위험도 분석

전기 계통의 고장나무(Fault tree)가 만들어지면 기본 사상들(Basic event)이 가지고 있는 발생률(고장률)을 기초로 전기 계통 및 각 고장모드들의 발생빈도를 산출한다. 본 논문에서는 RAM(Reliability, Availability, and Maintainability) 시뮬레이션을 이용해서 전기 계통의 고장발생빈도를 추정한다. 전기 계통의 위험도 분석을 수행하기 위해 필요한 수증함의 운용시나리오, 물리적 구조, ALDT(Administrative and Logistics Delay Time) 등의 시뮬레이션 조건은 본 논문의 2.2절에서 RAM 시뮬레이션 조건과 동일하며 표 4는 기본 설계와 설계대안별 부품수량, 고장률, MTBF, MTTR을 보여준다.

전기 계통의 시뮬레이션이 시작되면 부품의 MTBF를 바탕으로 확률적으로 기본 사상인 고장모드의 고장사상이 발생한다. 이 때, 부품의 고장모드가 2개 이상일 경우 각 고장모드의 발생 확률에 따라 고장사상이 발생하는 고장모드가 정의된다. 고장모드의 고장사상 발생은 신뢰성 구조를 따라 상위의 고장사상을 발생시킨다. 이러한 방식으로 최상위 고장사상인 [IPS.F]의 고장사상까지 도달하면 전기 계통의 고장이 발생하게 되며, 고장이 발생한 부품이 복구될 때까지 전기 계통은 임무를 수행하지 못한다. 고장이 발생한 부품이 수리가 되면, 최상위 고장사상부터 기본 사상

까지 순차적으로 상태를 확인하여 전기 계통이 임무를 정상적으로 수행할 수 있는지 판단한다. 전기 계통이 임무를 수행하기 위해 필요한 기능들이 정상적으로 수행될 수 있다면, 전기 계통은 다시 임무 수행을 시작한다. 이러한 흐름은 시뮬레이션 수행시간 동안 반복적으로 이루어진다.

표 4 설계대안별 부품 수량, 고장률, MTBF, MTTR

Table 4 The number of components, failure rate, MTBF, and MTTR according to design alternatives

명칭	기본	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	고장률	MTBF	MTTR
차단기	23	39	33	39	31	6.8 /8,760	exp (1,288)	exp(20)
케이블	22	38	32	38	30	5.12 /8,760	exp (1,711)	exp(20)
컨버터	4	8	4	8	4	5.48 /8,760	exp (1,599)	exp(20)
인버터	4	8	6	8	4	5.48 /8,760	exp (1,599)	exp(20)
배터리	2	2	2	2	2	3,4018 /8,760	exp (2,575)	exp(20)
발전기	2	2	2	2	2	3,5913 /8,760	exp (2,439)	exp(20)
모선	10	10	10	10	10	0.24 /8,760	exp (36,500)	exp(20)

표 5 기본 설계 및 설계대안의 RAM 시뮬레이션 결과

Table 5 RAM simulation result for the basic design and alternatives

대안	기본 설계	설계 대안 1	설계 대안 2	설계 대안 3	설계 대안 4
통계량					
가용도	0.8466	0.9697	0.8874	0.9692	0.9181
위험도	892.39	247.89	681.53	250.68	517.30
MTBF	249.31	1027.98	342.19	1016.04	466.41
MTTR	45.18	32.17	43.41	32.27	41.61
고장횟수	25.00	14.98	24.95	14.99	20.00

표 5는 기본 설계 및 설계 대안의 RAM 시뮬레이션 결과이다. 가용도가 높고 위험도가 낮은 순으로 대안을 정렬하면 설계 대안 1, 설계 대안 3, 설계 대안 4, 설계 대안 2, 기본 설계 순서이며 설계 대안 1이 가장 좋은 대안으로 평가할 수 있다. 설계 대안 1의 경우 모든 구성품이 중복되어 다른 대안을 보다 가용도가 높고 위험도가 낮은 결과가 산출되었다.

설계 대안 1의 경우는 컨버터와 인버터의 하부 케이블이 좌우가 서로 교차되어 양측의 전력공급이 가능하지만 설계 대안 3의 경우는 컨버터와 인버터의 하부 케이블이 양측으로 교차되지 않고 한쪽만의 전력공급을 담당하기 때문에 설계 대안 1과 유사한 결과를 보이지만 가용도가 조금 낮고 위험도 또한 조금 높은 결과가 산출되었다.

설계 대안 2의 경우 AC 115V 400Hz 계통과 AC 115V 60Hz 계통 부분이 중복된 구조로 모든 구성품에 중복이 적용된 설계 대안 1, 설계 대안 3 그리고 컨버터와 인버터의 하부케이블이 모두 교차된 설계 대안 4보다는 운용가용도가 낮고 위험도가 높게 나왔지만 구성품 중복이 없는 기본 설계 보다는 가용도가 높고 위험도가 낮은 결과가 산출되었다.

설계 대안 4의 경우는 모든 컨버터와 인버터의 하부 케이블이 좌우로 교차되어 Bus에 연결된 구조로 모든 구성품이 중복된 설계 대안 1과 설계 대안 3보다는 가용도가 낮고 위험도가 높지만 구성품 중복이 없는 기본 설계와 AC 115V 400Hz 계통과 AC 115V 60Hz 계통 부분이 중복된 설계 대안 2보다는 가용도가 높고 위험도가 낮은 결과가 산출되었다.

표 6 초기사상을 유발하는 기능 분석 결과

Table 6 Function analysis result for the cause of initial event

		AC110V/ 60Hz 전력공급 기능	AC115V/ 400H 전력공급 기능	DC 24V 전력 공급기능	추진전동기 전력공급 기능
기본	가용도	0.8444	0.8326	0.6566	0.9294
	위험도	12.05	10.06	19.98	5.00
대안 1	가용도	0.9331	0.9318	0.9363	0.9209
	위험도	5.00	5.00	5.21	8.91
대안 2	가용도	0.9625	0.9469	0.6551	0.9245
	위험도	5.01	5.00	20.00	5.00
대안 3	가용도	0.9326	0.9316	0.9340	0.9210
	위험도	5.00	5.00	5.29	9.19
대안 4	가용도	0.9082	0.8892	0.8200	0.9197
	위험도	10.00	7.79	14.16	5.00

각 설계 대안들의 중요 기능들을 분석한 결과는 표 6과 같다. 설계 대안들의 중복 구조에 따라 4개의 주요 기능의 운용가용도 및 위험도가 달라진다. AC 115V 60Hz 전원공급 기능과 AC 115V 40Hz 전원공급 기능의 경우 설계 대안 2가 운용가용도가 가장 높고 위험도가 가장 낮다. 본 논문에서 초점을 두고 있는 DC 24V 전원공급 기능의 경우 설계 대안 1의 가용도가 가장 높고 위험도가 가장 낮다. 마지막 추진전동기 전원공급 기능의 경우 모든 대안의 추진전동기 계통의 구조가 동일하지만 가용도와 위험도의 차이가 발생하는데, 이는 구성품의 고장발생시간과 수리시간이 확률 분포를 따르기 때문에 시뮬레이션 분석 시 약간의 표준편차가 발생하기 때문이다.

설계 대안 1과 설계 대안 3의 경우 AC 115V 60Hz 계통이 모두 이중화 되어 AC 115V 60Hz Bus로 전력이 공급 되는 경로가 많아지므로 기본 설계보다 가용도가 높고 위험도가 낮게 나왔으며 설계 대안 4의 경우 AC 115V 60Hz 계통의 인버터 하부 케이블이 중복이 되어 AC 115V 60Hz Bus로 연결되는 경로의 수가 설계 대안 1과 설계 대안 3과 동일하지만 구성품 전체를 중복한 설계 대안 1과 설계 대안 3보다는 낮은 가용도와 높은 위험도를 가진다. 설계 대안 2의 경우 AC 115V 60Hz 계통에서 인

버터가 하나만 중복이 되었지만 중복된 인버터의 하부케이블이 좌우측 양방향으로 연결이 되어 설계 대안 1, 설계 대안 3, 설계 대안 4 보다 AC 115V 60Hz Bus로 연결되는 경로가 더 많으므로 AC 115V 60Hz 전력공급 기능에 있어 가장 높은 가용도와 가장 낮은 위험도를 가진다.

AC 115V 400Hz 전원공급 기능의 경우 앞서 설명한 AC 115V 60Hz 전원공급 기능과 동일한 해석이 가능하다. 이 기능 또한 설계 대안 2가 다른 대안들에 비해서 가장 높은 가용도를 가지고 가장 낮은 위험도를 가지고 있는데 AC 115V 60Hz와 마찬가지로 AC 115V 400Hz 계통의 인버터 하나가 추가되고 인버터 하부케이블이 좌우측 양방향으로 연결이 되어 다른 대안들에 비해 AC 115V 400Hz Bus로 연결되는 경로가 많기 때문이다.

DC 24V 전원공급 기능의 경우, 설계 대안 1이 모든 구성품이 중복 되고 인버터와 컨버터의 하부 케이블이 좌우측으로 연결되기 때문에 모든 구성품이 중복되지만 케이블이 단 방향으로만 내려오는 설계 대안 3보다는 가용도가 높고 위험도가 낮음을 알 수 있다. 설계 대안 2의 경우 AC 115V 60Hz 전원공급 기능과 AC 115V 400Hz 전원공급 기능의 가용도와 위험도 결과가 가장 좋지만 DC 24V 전원공급 기능의 경우는 기본 설계와 비슷한 결과가 산출되었다. 이는 설계 대안 2의 DC 24V 계통의 구조가 기본 설계 구조와 동일하기 때문이다. 마지막으로 설계 대안 4의 경우는 DC 24V 계통의 하부 케이블이 양방향으로 연결되도록 중복이 되어 계통 전체의 중복이 이루어진 설계 대안 1과 설계 대안 3보다는 가용도와 위험도 결과가 좋지 않지만 중복이 하나도 이루어지지 않은 기본 설계와 설계 대안 2보다는 가용도와 위험도가 우수함을 알 수 있다.

결론적으로 DC 24V 전력공급 기능뿐만 아니라 전기 계통 전체의 가용도(Availability)와 위험도(Risk) 측면에서도 설계 대안 1이 가장 우수함을 확인할 수 있다. 이는 계통과 구성품의 예비율(Redundancy) 증가가 전기 계통 설계에 있어 위험도와 가용도 향상에 유리함을 보여준다. 하지만 계통 공급라인의 이중화 및 구성품의 증가는 함 내의 공간 제약, 연비 저하, 비용 증가 등의 문제를 발생시키므로 이들 제약 요건들과의 적절한 Trade-off가 요구된다.

4. 결 론

수중함 전기 계통의 신뢰도는 생존과 직결되기 때문에 단순히 신뢰도만 높은 전기 계통이 아닌 보다 안전성이 높은 전기 계통의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 수중함 전기 계통의 위험도를 낮추기 위해서 네 가지의 설계 대안을 제시하고 위험도와 가용도를 비교하여 가장 효율적이고 높은 신뢰도를 갖는 전기 계통을 제시하였다. 먼저 구성품과 계통의 예비율(Redundancy)을 증가시킬 수 있는 네 가지의 서로 다른 전기 계통을 제안하고, 고장나무분석(FTA)을 수행하였다. FTA 결과를 기반으로 한 RAM 시뮬레이션으로 가용도 및 위험도를 비교·분석한 결과, 모든 전력변환기를 병렬구조로 하고 전력공급라인을 이중화 시킨 설계 대안 1이 가장 높은 가용도와 가장 낮은 위험도를 가짐을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 위험도 평가 및 분석 방법은 위험도와 가용

도 개선 여부 및 개선 수준에 대해 수치적으로 확인할 수 있으므로 위험도 개선 효과를 정성적 평가결과가 아닌 정량적 평가치로 표현 가능하므로 수중함 전기 계통 초기 설계 단계에서 고 신뢰도의 설계 대안을 찾을 수 있는 효과적인 방법으로 활용될 수 있다. 또한 전기차, 신재생발전시스템, 마이크로그리드 등에 적용함으로써 높은 신뢰도의 시스템 설계가 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] Kevin P. Logan, "Intelligent Diagnostic Requirements of Future All-Electric Ship Integrated Power System," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 43, No. 1, pp. 139-149, 2007.
- [2] C. N. H. Doerry and D. H. Clayton, "Shipboard Electrical Power Quality of Service," ESTS (IEEE Electric Ship Technologies Symposium), pp. 274-279, 2005.
- [3] G. Buja, A. da Rin, R. Menis, and G. Sulligoi, "Dependable design assessment of integrated power systems," ESARS (Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion), pp. 1-8, 2010.
- [4] R. Menis, A. da Rin, A. Vicenzutti, and G. Sulligoi, "Dependable design of All Electric Ships Integrated Power System: Guidelines for system decomposition and analysis," ESARS (Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion), pp. 1-6, 2012.
- [5] R. R. Soman, E. M. Davidson, and S. D. J. McArthur, "Using functional failure mode and effects analysis to design the monitoring and diagnostics architecture for the zonal MVDC shipboard power system," ESTS (Electric Ship Technologies Symposium), pp. 123-128, 2009.
- [6] Jin-sung Choi, Jin-San Kim, Feel-soon Kang, and Jae-Goo Bin, "Fault Tree Analysis of an Underwater Vehicle Power System," KIEE Conf., pp. 296-297, 2015.
- [7] Jin-San Kim, Jin-sung Choi, Feel-soon Kang, and Jae-Goo Bin, "Fault Tree Analysis for Underwater Vehicle Power System Considering Redundancy of the Grid," KIEE Conf., pp. 298-299, 2015.
- [8] Jin-San Kim, Jin-sung Choi, Feel-soon Kang, and Jae-Goo Bin, "Fault Tree Analysis for Underwater Vehicle Power System Considering Redundancy of Equipments," KIPE Conf., pp. 437-438, 2015.
- [9] Reliability Analysis Center, "Failure Mode/Mechanism Distributions (FMD-91)", 1991.
- [10] Reliability Analysis Center, "Failure Mode/Mechanism Distributions (FMD-97)", 1997.
- [11] Reliability Prediction of Electronic Equipment, "Military Handbook", 1991.

저 자 소 개



김 진 산 (Jin-San Kim)

1990년 5월 14일생. 2015년 한밭대 제어계측공학과 졸업(학사). 2015년~현재 한밭대 일반대학원 제어계측공학과 석사과정.

Tel : 042-821-1164

E-mail : godqjdl@naver.com



최 진 성 (Jin-Sung Choi)

1990년 2월 24일생. 2015년 한밭대 제어계측공학과 졸업(학사). 2015년~현재 한밭대 일반대학원 제어계측공학과 석사과정.

Tel : 042-821-1164

E-mail : cjs7117@naver.com



빈 재 구 (Jae-Goo Bin)

1973년 3월 2일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원

Tel : 055-540-6224

E-mail : jgbin@add.re.kr



강 필 순 (Feel-soon Kang)

1973년 9월 5일생. 1998년 경상대 전기공학과 졸업(학사). 2000년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년 3월~2004년 8월 일본 오사카대학 전기공학과 박사후 과정. 2012년 1월~2013년 1월 미국 콜로라도주립대 전기컴퓨터공학과 방문교수. 2004년 9월~현재 한밭대 전자제어공학과 교수.

Tel : 042-821-1172

E-mail : feelsoon@hanbat.ac.kr