



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](#)

공학전문석사 학위 연구보고서

**확률적 방법을 이용한
터빈제어시스템 전자기판
수명관리에 관한 연구**

**A Study on the Life Management of Turbine
Control System Circuit Boards using the
Stochastic Method**

2018년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
손 병 집

확률적 방법을 이용한 터빈제어시스템 전자기판 수명관리에 관한 연구

지도교수 정 현 교

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2018 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
손 병 집

손병집의 공학전문석사 연구보고서를 인준함
2018년 2월

위 원 장 윤 용 태 (인)

부위원장 정 현 교 (인)

위 원 진 영 규 (인)

국문초록

2017년 현재 국내에서 운전되고 있는 24기의 원자력발전소는 제어봉 제어시스템, 공정계통 제어시스템, 터빈제어시스템, 급수터빈 제어시스템, 여자기 제어시스템 등 다양한 제어시스템으로 보호 및 제어기능을 수행하고 있다. 원자력발전소의 중요 제어시스템은 수많은 전자기판으로 구성되어 있기 때문에 전자기판의 신뢰도 향상은 원자력발전소의 안전성 향상으로 연결된다. 전자기판 신뢰도 향상을 위한 방법으로 전자기판의 부품단위 시험, 전자기판 주기 교체, 전자기판 성능시험 등 여러 방법들이 있으며 특정한 하나의 방법만으로 최상의 신뢰도를 유지할 수 없다. 전자기판 주기 교체는 적절한 교체주기 선정 시 제어시스템의 신뢰도 향상에 매우 효과적인 방법이나 제작사에서 교체주기를 제공하지 않고 있어 현장에서 적절한 교체주기를 선정하지 못하고 있다. 최적화된 교체주기 부재로 잦은 교체 수행 시 불필요한 정비비용을 발생시키게 되며 사용연한을 초과하여 사용 시에는 제어시스템 고장을 유발시키는 문제점이 있다.

사용자 입장에서 전자기판 수명 예측 시 수동소자로 구성된 전원공급용 전자기판의 경우 회로분석을 통한 주요부품 선정, 주요부품인 전해커패시터의 수명을 통해 교체주기를 선정하는 결정론적인 방법으로 가능할 수 있으나, 마이크로프로세서, 메모리 등 수백개의 디지털 소자로 구성된 중앙연산처리용 및 아날로그, 디지털 입출력 처리용 전자카드의 경우 회로분석 및 주요부품 선정이 불가능하며 수많은 부품에 대한 고장메커니

증이 다양하기 때문에 결정론적인 방법으로 교체주기를 선정하는 것은 불가능하므로 확률론적인 방법이 필요하다.

본 연구에서는 국내 원자력발전소에서 사용하는 제어시스템 중에서 가장 많이 사용하는 GE사 디지털 터빈제어시스템 Mark-V 전자기판에 대해 Telcordia SR-332 Issue3을 이용한 신뢰성 예측방법에 기반하여 전자기판 별 신뢰도를 산출하고자 한다. 또한 터빈제어시스템 고장수목과 신뢰도 블록 선도를 작성하여 터빈제어시스템 신뢰도를 정량적으로 산출하고 취약부분을 도출한다. 마지막으로 교체비용 목적함수와 IEC61508의 Safety Integrity Level의 신뢰도를 사용하여 사용자입장에서 최소의 비용을 통해 터빈제어시스템의 적정 신뢰도를 유지할 수 있는 전자기판 교체주기를 선정한다.

주요어 : 전자기판 신뢰도, Telcordia SR-332, Fault Tree Analysis

학 번 : 2016-22209

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경	1
제 2 절 연구의 구성 및 개요	4
제 2 장 이론적 배경	6
제 1 절 전자기관 신뢰도 예측	6
1. 개 요	6
1.1 신뢰도, 고장률의 정의 및 관계	6
1.2 Bathtub Curve	7
2. 전자기관 신뢰도 예측 방법	8
2.1 현장 데이터를 이용한 신뢰도 예측 방법	9
2.2 시험 데이터를 이용한 신뢰도 예측 방법	9
2.3 Stress 및 Damage 모델링을 이용한 신뢰도 예측 방법	10
2.4 Handbook을 이용한 신뢰도 예측 방법	10
제 2 절 시스템 신뢰도 모델링	12
1. 신뢰도 블록 선도	12
1.1 직렬 시스템	12

1.2 병렬 시스템	13
1.3 k out of n 시스템	14
2. 고장수목분석	15

제 3 장 터빈제어시스템 및 전자기판 신뢰도

분석	17
제 1 절 터빈제어시스템 분석	17
1. 터빈제어시스템 구성	17
제 2 절 터빈제어시스템 신뢰도 분석	19
1. 터빈제어시스템 고장수목 및 신뢰도 블록 선도 분석 ·	19
2. 터빈제어시스템 신뢰도 모델링 결과	23
제 3 절 터빈제어시스템 전자기판 신뢰도 분석	24
1. Telcordia사 SR-332 개요	24
2. Telcordia사 SR-332를 이용한 전자기판 신뢰도 분석 ·	26

제 4 장 터빈제어시스템 전자기판 교체주기 선정 · 33

제 1 절 전자기판 교체주기 최적화 모델링	33
1. 전자기판 교체주기 목적함수	33
2. 제약조건	34
제 2 절 전자기판 교체주기 최적화 결과	35
1. 전자기판 교체주기 최적화 결과	35

2. 최적화 결과분석	36
제 5 장 결 론	38
참고문헌	40
Abstract	42

표 목 차

[표 2-1] 지수분포를 가진 부품에 대한 신뢰도 및 고장률 관계	7
[표 2-2] 터빈제어시스템 전자기관 2종에 대한 사용현황 ..	11
[표 3-1] 터빈제어시스템 전자기관 종류와 고장영향	20
[표 3-2] 고장률 공식의 변수 설명	25
[표 3-3] TCPS 전자기관 부품별 고장률	27
[표 3-4] SDCC 전자기관 부품별 고장률	28
[표 3-5] SLCC 전자기관 부품별 고장률	28
[표 3-6] TCCA 전자기관 부품별 고장률	28
[표 3-7] TCEA 전자기관 부품별 고장률	29
[표 3-8] TCDA 전자기관 부품별 고장률	29
[표 3-9] TCPD 전자기관 부품별 고장률	30
[표 3-10] TCTL 전자기관 부품별 고장률	30
[표 3-11] 터빈제어시스템 전자기관 신뢰도 함수	31
[표 4-1] 목적함수의 변수 설명	34
[표 4-2] 전자기관 수량 및 단가	35
[표 4-3] 전자기관 교체주기	36
[표 4-4] 전자기관 총 교체비용 및 터빈제어시스템 신뢰도	36

그 립 목 차

[그림 1-1] 국내 원전 분야별 고장정지 비율	2
[그림 1-2] 계측분야 고장요소별 분포	3
[그림 2-1] Bathtub Curve	7
[그림 2-2] 직렬시스템 신뢰도 블록 선도	13
[그림 2-3] 병렬시스템 신뢰도 블록 선도	14
[그림 2-4] 2 out of 3 시스템 신뢰도 블록 선도	15
[그림 2-5] 고장수목과 신뢰도 블록 선도의 관계	16
[그림 3-1] <R>모듈 고장수목	21
[그림 3-2] <R>모듈 신뢰도 블록 선도	21
[그림 3-3] 터빈제어시스템 고장수목	22
[그림 3-4] 터빈제어시스템 신뢰도 블록 선도	22

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

2017년 현재 국내에서 운전되고 있는 24기의 원자력발전소는 제어봉 제어시스템, 공정계통 제어시스템, 터빈제어시스템, 급수터빈 제어시스템, 여자기 제어시스템 등 다양한 제어시스템으로 보호 및 제어기능을 수행하고 있다. 각 제어시스템은 다양한 전자기관으로 구성되어 있으며 중요 제어시스템의 경우 단일기기 고장에 의한 발전소 고장정지를 방지하기 위해 다중화로 구현되어있다. 또한 전자부품산업의 발달로 과거의 아날로그 시스템에서 디지털 시스템으로 전환하는 경향이 있으며 신규로 건설되는 원자력발전소의 경우 대부분의 제어시스템이 디지털로 구현되어 있다.

그림 1-1은 1978년부터 2014년까지 총 684건의 발전정지 및 주요 고장에 대해 외부영향, 인적 실수, 기계 결함, 전기 결함 및 계측제어 결함 5개 분야에 대해 간략히 나타내고 있다[2]. 계측분야에 의한 주요 고장은 총 192건으로 전체 28.1%를 나타내고 있으며 그 중 전자기관 고장에 의한 것이 30%로 가장 높은 비율을 나타내고 있다. 전자기관은 IC, 저항, 커패시터 등 수많은 전자부품으로 구성되어 있으며 , 캐비넷, 랙 등 좁은 공간에 설치되어 있어 온도, 습도 등 환경에 의한 영향을 많이 받기 때문에 타 기기대비 고장률이 높은 것으로 판단된다. 각 발전소에는 약

10,000매의 수많은 전자기판이 설치되어 운전되고 있으며 전자기판 고장으로 발전소 정지 또는 출력감발 등 과도상태를 유발할 수 있으므로 원자력발전소의 안정적인 운전을 위해 전자기판 정비를 통한 제어시스템의 신뢰성 확보가 요구된다.

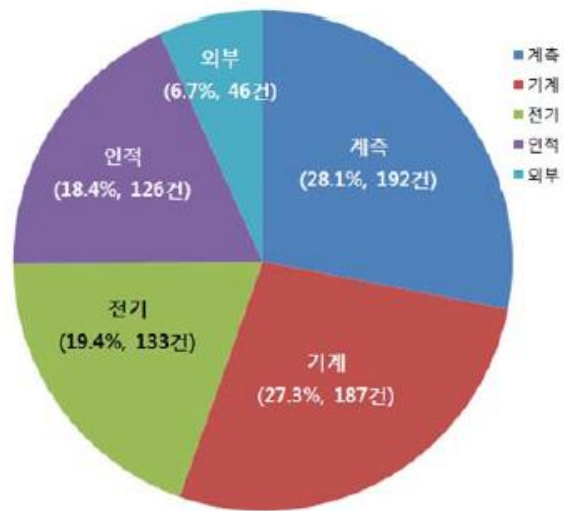


그림1-1 국내 원전의 분야별 고장정지 비율[2]

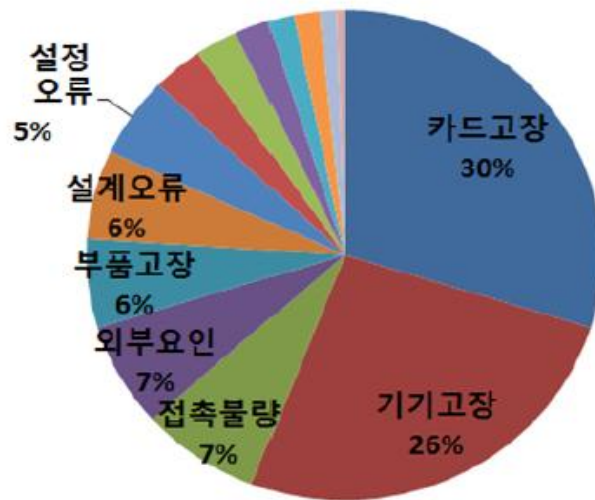


그림1-2 계측분야 고장요소별 분포[2]

전자기판 신뢰도 향상을 위한 방법으로 미국 ERPI에서는 Gold Card Project를 통해 전자기판 취급, 저장 및 정비 등 전자기판 사용에 대한 전반적인 분야에서 133개의 지침을 제시하고 있다[5][6]. 전자기판 정비 등 특정한 하나의 방법만으로 최상의 신뢰도를 유지할 수 없다. 그러나 사용자가 전자기판 신뢰도 향상에 기여할 수 있는 가장 좋은 방법은 정비이다. 그 중 적절한 교체주기 선정 시 전자기판 교체는 매우 효과적인 방법이다.

전자기판의 교체는 제작사에서 제공하는 정보를 이용하여 수행하게 되는데, 보증기간 등과 같은 문제로 명확한 정보를 제공하지 않고 있어 전자기판의 적절한 교체주기가 선정되어 있지 않다. 이 경우 정비담당자의 경험에 따른 교체를 수행하게 되며 동일 전자기판에 대한 경험이 정

비담당자 마다 상이하기 때문에 동일한 제어시스템을 사용하더라도 전자기관 교체주기는 각 발전소별 상이하게 선정되어있다. 최적화된 교체주기 부재로 잦은 교체 수행 시 불필요한 정비비용을 발생시키게 되며 사용연한을 초과하여 사용 시에는 제어시스템 고장을 유발시키는 문제점이 있다.

본 연구에서는 국내 원자력발전소에서 사용하는 제어시스템 중에서 가장 많이 사용하는 GE사 디지털 터빈제어시스템 Mark-V 전자기관에 대해 Telcordia SR-332 Issue3을 이용한 신뢰성 예측방법에 기반하여 고장률을 정량적으로 산출할 것이다. 또한 사용자입장에서 최소의 비용을 통해 터빈제어시스템의 적정 신뢰도를 유지할 수 있는 전자기관 교체주기를 제안한다.

제 2 절 연구의 구성 및 개요

본 연구에서는 신뢰성 예측방법 중 Telcordia SR-332 Issue3 Handbook을 이용해 GE사 디지털 터빈제어시스템 전자기관 고장률 산출 후 최소의 전자기관 교체비용으로 터빈제어시스템의 적정 신뢰도를 유지할 수 있는 교체주기를 선정할 것이다.

제 1장에서는 연구의 배경과 필요성, 그리고 연구구성에 대해 설명한다.

제 2장에서는 연구를 이해하는데 필요한 이론적 배경을 설명한다. 신뢰도 예측방법 중 IEEE 1413.1 (Guide for Selecting and Using

Reliability Predictions Based on IEEE 1413, 2002) 에서 제시하는 4가지 방법과 터빈제어시스템의 신뢰도를 정량적으로 분석하기 위한 고장수목에 대해 설명한다.

제 3장에서는 Handbook을 이용한 신뢰도 예측방법 중 Telcordia SR-332 Issue3을 통해 터빈제어시스템 전자기판의 고장률을 산출한다. 또한 고장수목을 이용해 터빈제어시스템의 신뢰도를 정량적으로 분석한다.

제 4장에서는 최소의 전자기판 교체비용으로 터빈제어시스템의 신뢰도가 적정 수준 이상 유지될 수 있는 전자기판 교체주기를 선정한다.

제 5장에서는 본 연구의 결론으로 연구 결과를 정리하고, 추후 연구 사항들에 대해 언급한다.

제 2 장 이론적 배경

제 2장에서는 연구의 전체 주제에 대한 이론적 배경으로 신뢰도의 정의와 예측 방법과 제어시스템 신뢰도의 정량적 평가를 위한 고장수목에 대해 설명한다.

제 1 절 전자기판 신뢰도 예측

1. 개 요

1.1 신뢰도, 고장률의 정의 및 관계

신뢰도란 부품 또는 시스템이 주어진 환경 및 운전조건에서 규정된 기간 동안 요구되는 기능을 수행할 수 있는 능력을 뜻한다. 신뢰도는 단위시간당 부품 또는 시스템의 고장이 발생하는 빈도를 뜻하는 고장률로도 나타낼 수 있다. 신뢰도 및 고장률 함수는 아래와 같이 나타난다[10].

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서 $R(t)$ 는 신뢰도 함수를 의미하고, $f(u)$ 는 고장시간에 대한

확률밀도함수이다. $f(u)$ 의 경우 부품 또는 시스템에 따라 지수분포, 감마 분포, Weibull 분포, 표준분포 등 다양한 확률분포로 나타날 수 있다. 식 (2.1)을 통해 신뢰도는 부품 또는 시스템이 t 시간동안 정상동작 할 확률임을 알 수 있다.

부품 또는 시스템의 수명측정에 사용되는 단위로 Mean Time Between Failure(MTBF)가 있다. 이는 부품 또는 시스템의 그룹에서 고장이 발생하는 평균시간을 의미하며, MTBF는 고장률의 함수로 나타낼 수 있다. 지수분포를 가진 부품 또는 시스템에 대해 표2-1에 나타냈다.

Distribution	확률밀도 $f(u)$	신뢰도 $R(t)$	고장률 $z(t)$	MTBF
Exponential	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	λ	$\frac{1}{\lambda}$

표2-1. 지수분포를 가진 부품에 대한 신뢰도 및 고장률 관계

1.2 Bathtub Curve

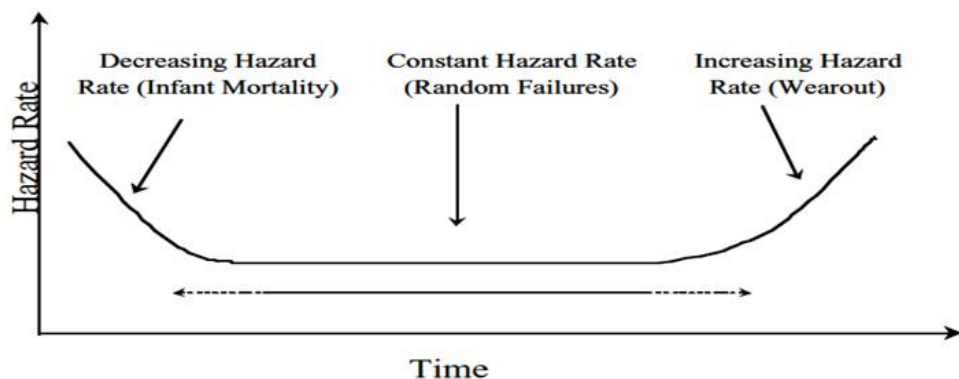


그림2-1 Bathtub Curve

전자 부품의 일반적인 고장률은 Bathtub Curve로 나타낼 수 있다. Bathtub Curve에서 고장률은 사용시간에 대해 3단계로 구성되어 있다. 1단계는 초기고장기로 설계미흡, 제작결함, 저장 및 운송 시 불량 등에 의해 나타난다. 이 단계 동안은 고장률이 감소하는 경향이 있다. 2단계는 우발고장기로 전자 부품 사용시간 중 대다수를 차지하며 실제 사용되는 수명이라 할 수 있다. 과부하 또는 부적절한 사용으로 인한 고장으로 이 단계 동안 고장률은 일정하게 유지되는 경향이 있다. 3단계는 마모고장기로 부품의 기대 수명의 끝에서 나타난다. 부품의 사용으로 인한 마모나 축적된 피로에 의해 발생하며 이 단계에서 고장률은 증가한다.

국내 원자력발전소의 경우 전자기판 입고 시 검수, 교체 시 사전검사, 교체 후 시스템 성능확인을 수행하고 있다. 따라서 본 연구에서는 초기 고장기의 고장률에 대한 고려는 제외하고, 전자부품 수명 중 대다수를 차지하는 우발고장기의 고장률을 이용하였다.

2. 전자기판 신뢰도 예측 방법

신뢰도 예측 방법을 위해 시스템 구성, 운전환경 등 많은 정보들이 필요하며 신뢰도 예측의 품질은 일반적으로 수집된 정보의 품질에 의존하게 된다. 수집되는 정보를 기반으로 하여 수행하는 신뢰도 예측 방법 중 IEEE 1413.1에서는 4가지 방법을 제안한다. 아래 세부 항목을 통해 IEEE 1413.1에서 제안하는 신뢰도 예측 방법을 소개한다[9].

2.1. 현장 데이터를 이용한 신뢰도 예측 방법

현장 데이터는 실제 운전환경에서 부품의 실제 신뢰도를 나타낸다. 이미 현장에 설치되어 운전되고 있는 부품에 대한 신뢰도 예측에 적용하기 적당한 방법이다. 통계적인 신뢰도를 확보할 수 있는 충분한 현장 데이터를 취득할 수 있다면 가장 이상적인 방법이다. 또한 다른 신뢰도 예측 방법으로 도출한 결과와 비교하여 조정하는데 사용된다. 현장 데이터를 이용한 신뢰도 예측 방법의 가장 큰 장점은 운전환경 등 신뢰도에 영향을 미치는 많은 부분에 대해 시뮬레이션이나 예측이 아닌 실제 운전환경에서의 데이터를 바탕으로 신뢰도를 도출하는 것이다. 하지만 정확한 신뢰도 예측을 위해서는 충분한 시간 동안 광범위한 데이터가 수집되어야 한다.

2.2. 시험 데이터를 이용한 신뢰도 예측 방법

사용되는 부품의 고장 데이터 획득량을 증가시키기 위해 실제 운전환경을 고려하여 시간을 단축하여 시험 수행 및 데이터 취득을 통해 신뢰도를 예측한다. 취득된 시험 데이터는 다른 예측 방법과 조합으로 사용되기도 하며 다른 예측 방법의 검증에 사용되기도 한다. 정확한 결과 분석을 위해 시험 시 발생한 고장 메커니즘이 현장에서 발생하는 고장 메커니즘과 동일해야 한다. 실제 운전환경과 동일한 조건에서 시험 수행을 못하기 때문에 오차가 발생 가능하며 고장 데이터의 결과에 따라 시험시

간을 벗어난 고장에 대해 외삽법을 적용하지 못할 수 있다.

2.3. Stress 및 Damage 모델링을 이용한 신뢰도 예측 방법

부품 또는 시스템의 잠재적인 고장발생 부위와 고장발생 최소 시간의 중요도에 따라 모델링하여 평가하는 방법이다. 부품 또는 시스템의 재질과 구조적인 특성, 사용이 예상되는 운전환경 등을 통해 모델링하게 된다. 특정 고장 부위에 대한 다양한 고장 메커니즘 모델링 결과를 조합하거나 고장시간을 정량화하여 표현하는 것에 한계가 있으나 지속적인 연구와 개선이 수행되고 있다.

2.4. Handbook을 이용한 신뢰도 예측 방법

시간에 따른 고장률 변화가 일정하게 나타난다고 가정하는 신뢰도 예측 방법이다. 과거에 축적된 경험 데이터를 근거로 부품의 기본적인 고장률을 예측하고 부품이 사용될 운전환경에 대한 조정 계수를 반영하여 최종 고장률을 산출하는 방법이다. 이 신뢰도 예측 방법은 1960년에 출판된 MIL-HDBK-217에서 적용한 방법으로 이후 많은 제작사가 개별로 Handbook을 개발하였으나 대부분 동일한 방법을 적용했다. Handbook을 이용한 신뢰도 예측 방법은 쉽고, 현장 데이터 수집을 할 필요가 없는 장점이 있다. 하지만 고장모드 및 메커니즘 규명을 할 수 없는 단점이 있다.

사용자 입장에서 신뢰도 예측을 위한 충분한 현장 고장데이터 취득은 불가능하다. 사용자들은 제어시스템의 안정적인 운영을 위해 전자기관 고장이 발생하기 전 교체를 수행하고 있으며, 고장품에 대한 상세한 데이터를 기록하지 않는 경향이 있다. 표2-2에 2003년부터 2017년 까지 국내 원자력발전소 9기의 터빈제어시스템 전원공급용, 중앙연산처리용 전자기관 2종에 대한 사용현황을 나타냈다.

	TCPS	SDCC
교체주기	3년, 5년, 교체주기 없음	7년, 교체주기 없음
설치 수량	93ea	93ea
고장정비용 교체 수량	6ea	8ea
고장품의 사용기간	① 약 118,080 hr (=13.47 yr) ② 약 96,000 hr (=10.95 yr) ③④⑤⑥ 알 수 없음	알 수 없음
예방정비용 교체 수량	112ea	65ea

표2-2. 터빈제어시스템 전자기관 2종에 대한 사용현황

전자기관 고장데이터 취득을 위한 시험과 전자기관 고장과정 모델링은 추가적인 비용이 발생하므로 사용자 입장에서 부적절한 방법이다. 따라서, 본 연구에서는 전자기관 신뢰도 예측을 위해 IEEE 1413.1에서 제안한 방법 중 Handbook을 이용한 신뢰도 예측 방법을 선정하였으며, Telcordia사의 SR-332 Database를 사용하여 전자기관 신뢰도를 산출하였

다.

제 2 절 시스템 신뢰도 모델링

시스템 신뢰도 예측은 시스템의 아키텍처를 근거로 하위 레벨 부품의 신뢰도를 결합하여 도출된다.

1. 신뢰도 블록 선도

신뢰도 블록 선도는 시스템 구성품의 논리적인 관계를 표현한 것이다. 기본적인 확률이론을 사용하여 시스템을 분석하며 본 연구에서 각 부품 및 시스템은 독립적이라고 가정한다.

1.1 직렬 시스템

시스템의 기능이 정상적으로 동작하기 위해 모든 하위 레벨 부품 또는 시스템의 기능이 모두 정상이어야 한다. 하나의 하위 레벨 부품 또는 시스템의 고장은 시스템 전체의 고장을 유발한다. 그림2-2 및 식 (2.2)에서 직렬 시스템의 신뢰도 산출방법을 나타낸다.

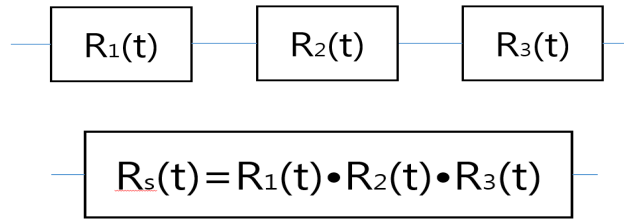


그림2-2 직렬 시스템 신뢰도 블록 선도

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.2)$$

시스템 신뢰도 $R_S(t)$ 는 하위 레벨 부품 또는 시스템 신뢰도의 곱으로 나타난다.

1.2 병렬 시스템

시스템의 모든 하위 레벨 부품 또는 시스템의 고장이 발생하여야 시스템 고장이 발생한다. n out of n 시스템이라고 표현될 수도 있으며 시스템의 하위 레벨 부품 또는 시스템 중 하나만 정상적으로 동작하여도 시스템은 정상동작이 가능하다. 그림2-3 및 식 (2.3), (2.4)에서 병렬 시스템의 신뢰도 산출방법을 나타낸다.

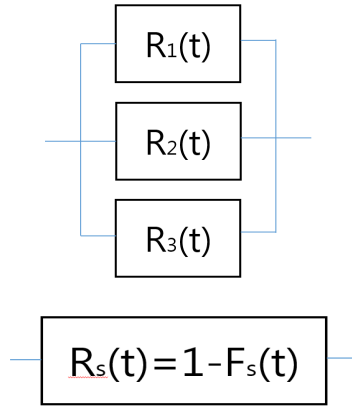


그림2-3 병렬 시스템 신뢰도 블록 선도

$$F_S(t) = [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - R_n(t)] = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.3)$$

$$R_S(t) = 1 - F_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.4)$$

시스템 고장률 $F_S(t)$ 는 하위 레벨 부품 또는 시스템 신뢰도의 곱으로 나타나며 시스템 신뢰도 $R_S(t)$ 는 시스템 신뢰도가 명백히 건전한 $R_S(0)=1$ 상태와 차로 나타난다.

1.3 k out of n 시스템

n개의 하위 레벨 부품 또는 시스템으로 구성되어 있으며 k개의 하위 레벨 부품 또는 시스템이 정상동작하면 시스템은 정상동작이 가능하다.

그림2-4는 2 out of 3 시스템의 신뢰도 블록 선도를 나타내며 식 (2.5)에서는 n개의 하위 레벨 부품 또는 시스템에서 k out of n 시스템의 신뢰도 산출방법을 나타낸다.

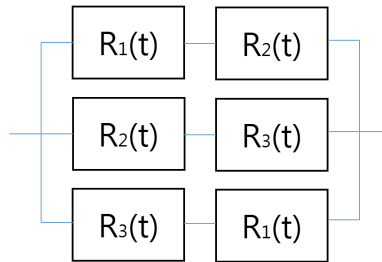


그림2-4 2 out of 3 시스템 신뢰도 블록 선도

$$R_S(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} [1 - F(t)]^i \cdot [F(t)]^{n-i} \quad (2.5)$$

2 고장수목분석

고장수목분석(Fault-tree analysis)이란 시스템에서 발생 가능한 이벤트들의 조합을 논리적으로 표현하는 기법이다. 최상위 이벤트가 발생하는 여러 하위 레벨 이벤트들을 논리 게이트로 조합 및 연결하여 나타내며 시스템 고장을 상위 레벨에서부터 연역적으로 추적할 수 있고 시스템의 신뢰도를 정량적으로 분석할 수 있다.

시스템의 구조를 고장수목 또는 신뢰도 블록 선도를 통해 나타낼 수

있으며 두 가지 방법은 서로 변환이 가능하다. 그림2-5에서는 고장수목과 신뢰도 블록 선도의 관계를 나타내었다.

본 연구에서는 터빈제어시스템의 구조를 고장수목을 통해 분석 후 신뢰도 블록 선도로 변환하여 시스템 신뢰도를 산출하고자 한다.

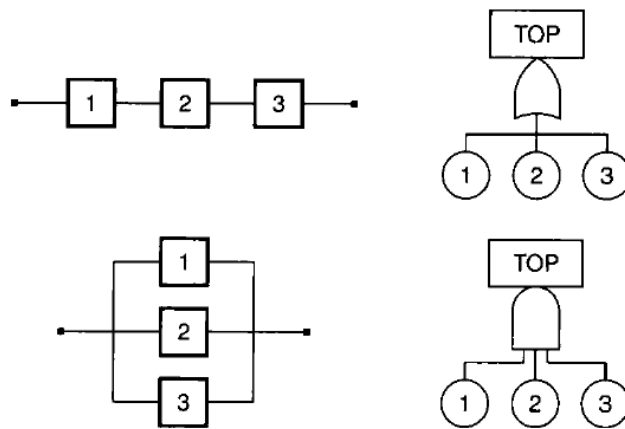


그림 2-5 고장수목과 신뢰도 블록 선도의 관계[10]

제 3 장 터빈제어시스템 및 전자기판 신뢰도 분석

제 1 절 터빈제어시스템 분석

터빈제어시스템은 정상운전 시 터빈에 유입되는 주증기량을 조절하여 터빈의 속도를 일정하게 유지하고, 발전기 출력을 제어하며, 터빈과속도 및 이상 상태 발생 시 터빈의 모든 증기제어밸브를 신속히 폐쇄하여 터빈을 보호하는 기능을 한다. 현재 국내 원자력발전소 24기 중 9기에서 GE사 디지털 터빈제어시스템 Mark-V를 사용하고 있으며, 상기 시스템은 마이크로프로세서와 전기-유압 제어기술의 결합으로 터빈에 설치되어 각 기기들과 연결된 센서들이 아날로그 신호와 논리 신호 등의 정보들을 교환, 공유, 실행하게 된다. 주요 제어기는 3가지의 모듈형태로 구성되어 정상운전 중 일부 고장을 허용할 수 있는 구조로 되어 있다.

본 장에서는 터빈제어시스템의 구성을 살펴본 뒤, 터빈제어시스템의 고장수목과 신뢰도 블록 선도를 도출한다. 또한 하위 레벨 시스템인 전자기판의 신뢰도를 계산하여 터빈제어시스템의 신뢰도를 도출한다.

1. 터빈제어시스템 구성

제어기는 Core라 불리는 전자기판의 조합으로 구성된 모듈로 되어 있다. 주요 제어기는 속도, 출력제어를 위한 <R>,<S>,<T> Core, 비상 과속

보호를 위한 <P>,<PLU> Core, 운전원 인터페이스와 통신을 담당하는 <C>,<D> Core가 있으며, 논리신호 입출력을 처리하는 <QD> Core, 전원공급을 담당하는 <PD> Core가 있다.

<R>,<S>,<T> Core는 모든 하드웨어와 소프트웨어를 포함하여 물리적으로 완전히 독립된 모듈이다. 3개의 모듈 중 1개의 모듈 고장 발생 시 경보를 발생하며 정상운전 중 전원을 개별 전원을 차단하여 모듈별 정비를 수행할 수 있으나 2개의 모듈 고장 시 터빈제어시스템 고장이 발생한다.

<P> Core는 3개의 독립된 <X>,<Y>,<Z> 전자기판과 터빈을 정지시키는 전자기판 1개로 구성되어 있다. <X>,<Y>,<Z>의 경우 3개의 전자기판 중 1개 고장 발생 시 개별 전원을 차단하여 정비를 수행할 수 있으나 2개 고장 시 터빈제어시스템 고장이 발생한다. 터빈을 정지시키는 별도의 전자기판의 경우 1개의 고장으로 터빈제어시스템 고장을 발생시킬 수 있다.

<PLU> Core는 3개의 독립된 <U>,<V>,<W> 전자기판으로 구성되어 있으며 각 갑작스런 발전기 부하 상실 시 터빈 비상 과속보호기능을 수행한다. <R>,<S>,<T>에 종속되어 동작하고 있으며 3개의 전자기판 중 1개 고장 발생 시 개별 전원을 차단하여 정비를 수행할 수 있으나 2개 고장 시 터빈제어시스템 고장이 발생한다.

<C>,<D> Core는 시스템의 자가진단을 수행하며 운전원 인터페이스 및 타 제어시스템과의 통신을 담당하며 2개 고장 시 터빈제어시스템 고장이 발생하지는 않는다.

<QD> Core는 3개의 독립된 전자기판으로 구성되어 있으며 <R>,<S>,<T>에 종속되어 논리신호 입출력처리를 담당하고 있다. 3개의 전자기판 중 1개 고장 발생 시 개별 전원을 차단하여 정비를 수행할 수 있으나 2개 고장 시 터빈제어시스템 고장이 발생한다.

<PD> Core는 모든 모듈에 전원공급을 담당하는 모듈로 1개 고장 시 터빈제어시스템의 고장을 발생시킨다.

제 2 절 터빈제어시스템 신뢰도 분석

본 연구에서 최상위 이벤트인 터빈제어시스템 고장은 전자기판 고장에 의한 터빈제어시스템 기능상실을 의미하며 터빈제어시스템 공급전원 상실 등 공통원인과 정비담당자의 인적오류에 의한 고장은 신뢰도 분석에서 제외하기로 하였다.

1. 터빈제어시스템 고장수목 및 신뢰도 블록 선도 분석

터빈제어시스템은 하위 레벨 시스템인 모듈과 전자기판으로 구성되어 있으며 최상위 이벤트인 터빈제어시스템 고장관련 고장수목과 신뢰도 블록 선도 작성을 위해 각 모듈을 구성하는 전자기판을 종류별로 분류하였다.

모듈명	전자기관 종류		고장영향
	전자기관명	기능	
<R> <S> <T>	SDCC	중앙연산처리	1개 고장 시 모듈 고장
	SLCC	통신처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCQA	아날로그 입출력신호 처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCQB	아날로그 입출력신호 처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCQC	아날로그 입출력신호 처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCPS	모듈 전원공급	1개 고장 시 모듈 고장
<P>	TCEA(3)	중앙연산처리	3개 중 2개 고장 시 모듈 고장
	TCTL	논리신호 입출력 처리	1개 고장 시 시스템 고장
<PLU>	TCPA(3)	중앙연산처리	1개 고장 시 해당 <R>,<S>,<T> 모듈 고장
<C> <D>	SDCC	중앙연산처리	1개 고장 시 모듈 고장
	SLCC	통신처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCCA	아날로그 입출력신호 처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCCB	아날로그 입출력신호 처리	1개 고장 시 모듈 고장
	TCPS	모듈 전원공급	1개 고장 시 모듈 고장
<QD>	TCDA(3)	논리신호 입출력 처리	1개 고장 시 해당 <R>,<S>,<T> 모듈 고장
	TCRA	논리신호 출력	고장영향 없음
<PD>	TCPD	전원공급	1개 고장 시 시스템 고장

표3-1 터빈제어시스템 전자기관 종류와 고장영향

표3-1은 터빈제어시스템을 구성하는 전자기관의 고장영향을 나타낸 것이다. 대부분의 전자기관은 고장 시 해당 모듈 고장을 발생시키며, TCPD 및 TCTL의 경우 전자기관 단일기기의 고장이 터빈제어시스템 고장을 유발하였다. 표3-1을 바탕으로 작성한 <R> 모듈의 고장수목과 신뢰도 블록 선도, 터빈제어시스템의 고장수목과 신뢰도 블록 선도는 아래 그림3-1, 3-2, 3-3, 3-4와 같다. 아래 그림에서 $R_n(t)$ 은 n 에 해당하는 전자기관 또는 모듈의 신뢰도를 의미한다.

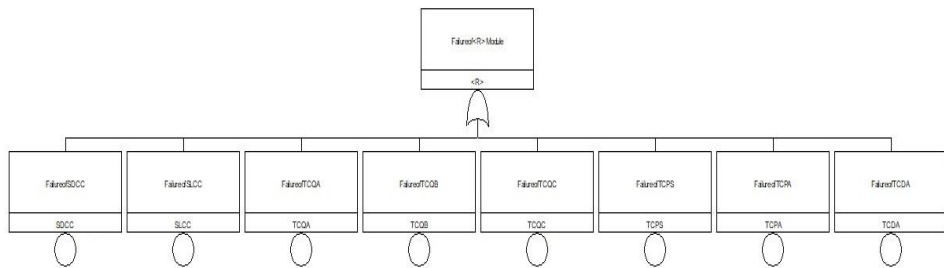


그림3-1 <R>모듈 고장수목

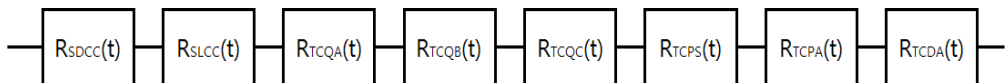


그림3-2 <R> 모듈 신뢰도 블록 선도

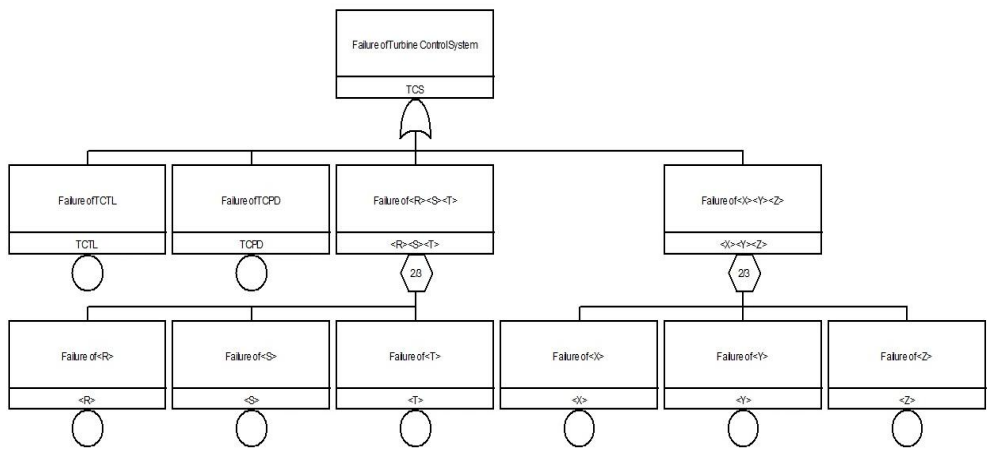


그림3-3 터빈제어시스템 고장수목

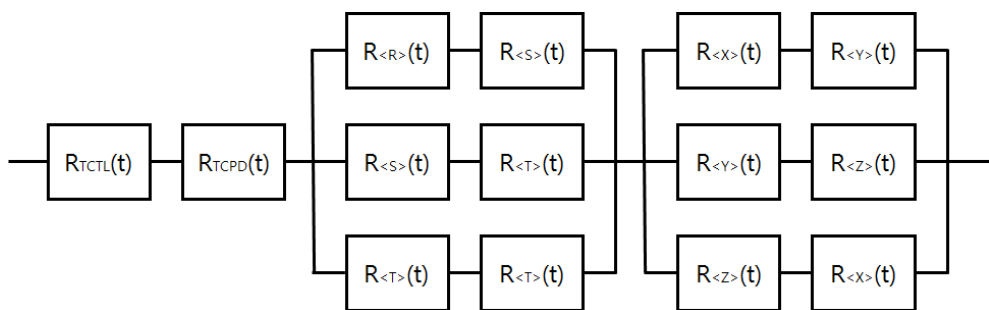


그림3-4 터빈제어시스템 신뢰도 블록 선도

2. 터빈제어시스템 신뢰도 모델링 결과

터빈제어시스템 신뢰도 블록 선도 분석 결과 <R>,<S>,<T> 모듈은 전자기판 SDCC 등 7개의 직렬 시스템으로 구성되어 있었고, 터빈제어시스템의 경우 <R>,<S>,<T> 모듈의 2 out of 3 시스템, <X>,<Y>,<Z> 전자기판의 2 out of 3 시스템, TCPD 전자기판, TCTL 전자기판의 직렬 시스템으로 구성되어 있었다. 각 모듈 및 전자기판의 신뢰도 및 식 (2.2), (2.4), (2.5)를 이용해 터빈제어시스템 신뢰도를 모델링하였다. $R_n(t)$ 은 n 에 해당하는 전자기판 또는 모듈의 신뢰도를 의미하며 $F_n(t)$ 는 n 에 해당하는 전자기판 또는 모듈의 고장률을 의미한다.

$$\begin{aligned} R_R(t) &= R_S(t) = R_T(t) \\ &= R_{SDCC}(t) \cdot R_{SLCC}(t) \cdot R_{TCQA}(t) \cdot R_{TCQB}(t) \cdot R_{TCQC}(t) \\ &\quad \cdot R_{TCPS}(t) \cdot R_{TCPA}(t) \cdot R_{TCDA}(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$R_{RST}(t) = 3[R_R(t)]^2 \cdot [1 - R_R(t)] + [R_R(t)]^3 \quad (3.2)$$

$$R_X(t) = R_Y(t) = R_Z(t) = R_{TCEA} \quad (3.3)$$

$$R_{XYZ}(t) = 3[R_{TCEA}(t)]^2 \cdot [1 - R_{TCEA}(t)] + [R_{TCEA}(t)]^3 \quad (3.4)$$

$$R_{TCS}(t) = R_{RST}(t) \cdot R_{XYZ}(t) \cdot R_{TCPD}(t) \cdot R_{TCIL}(t) \quad (3.5)$$

제 3 절 터빈제어시스템 전자기관 신뢰도 분석

터빈제어시스템 신뢰도 도출을 위해 하위 레벨 시스템인 전자기관의 신뢰도가 필요하며 IEEE1413.1에서 제안한 방법 중 Handbook을 이용한 신뢰도 예측 방법 중 Telcordia사의 SR-332 Issue3 Database를 이용하여 전자기관 신뢰도를 산출하였다.

1. Telcordia사 SR-332 개요

Telcordia SR-332는 전기, 전자 시스템에 대한 민수분야의 대표적인 신뢰성 규격으로 1984년 Bellcore사에서 미 국방부에 의해 제시된 MIL-HDBK-217을 바탕으로 실무영역에 좀 더 잘 반영되도록 모형을 수정 및 단순화하여 개발하였다. SR-332는 MIL-HDBK-217을 기반으로 개발되었기 때문에 분석 결과는 고장률이나 MTBF로 나타나며 부품의 수명분포는 지수분포로 가정한다.[3]

SR-332에서는 모든 부품별 고장률 공식이 동일하다. 부품의 고장률은 안정상태 고장률에 품질, 온도, 스트레스, 환경 등 4가지 요소에 대한 보정계수를 사용하여 고장률을 산출한다. 기본 고장률 단위는 10억 동작시간 당 고장수로 정의한다. 식 (3.6), (3.7)은 SR-332의 고장률 공식이며 각각의 변수에 대해 설명을 다음 표3-2에 나타내었다.

$$\lambda_{SS} = \lambda_G \cdot \pi_Q \cdot \pi_S \cdot \pi_T \cdot \pi_E \quad (3.6)$$

$$\lambda_{System} = \sum_{i=1}^n \lambda_{SS_i} \cdot N_i \quad (3.7)$$

λ_{SS_i}	부품 안정상태 고장률
λ_G	부품의 일반 안정상태 고장률
π_Q	부품의 품질 보정계수
π_S	부품의 스트레스 보정계수
π_T	부품의 온도 보정계수
π_E	부품의 환경 보정계수
λ_{System}	시스템 고장률
N_i	부품 종류별 수량
n	부품 종류 수

표3-2 고장률 공식의 변수 설명

2. Telcordia사 SR-332를 이용한 전자기판 신뢰도 분석

부품의 품질 보정계수 π_Q 는 0, I, II, III 등 총 4가지 품질수준을 사용하고 있다. 국내 원자력발전소는 ASME NQA-1, ISO9001등 품질규격에 따른 공급업체 자격관리를 하고 있으며, 자격획득을 위해 각 제조사는 부품과 부품업체들의 자격과 승인된 부품업체 목록을 관리해야한다. 터빈제어시스템을 공급하는 GE사의 경우 국내 원자력발전소 공급업체 자격을 획득하고 주기적으로 갱신을 하고 있어 SR-332 규격에 따라 품질 수준 II로 결정하였다.

부품의 스트레스 보정계수 π_S 는 해당 부품에 인가되는 전기적 스트레스가 수명에 미치는 영향에 대해 정량화한 것으로 백분율로 표현된다. 다품종 소량의 전자기판에서 전자부품은 수천 개에 이르며 해당 전자기판을 사용하는 사용자는 이를 정확히 파악하기 불가능하기 때문에 모든 부품에 50% 수준의 스트레스 보정계수를 적용하였다.

부품의 온도 보정계수 π_T 의 경우 전기, 전자 부품의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 SR-332 규격은 아레니우스 공식에 기반하여 계산된다. 터빈제어시스템은 온도 21 ~ 25℃, 습도 35 ~ 60%를 유지하는 제어실에서 운영되고 있어 매우 안정적인 온도 및 환경조건을 만족하고 있다. 하위 레벨 시스템인 모듈의 경우 여러 장의 전자카드가 밀집하여 있고 연속운전으로 인한 내부온도 상승이 있기 때문에 제어실의 최고 온도인 25℃에 내부온도 상승 10℃를 가정하여 운전온도는 35℃를 적용하였고, 환경 보정계수 π_E 의 경우 전자기기를 동작하기 위한 최적의 환

경요건을 만족하며 제어되고 있기 때문에 G_B 를 적용하였다.

일반적으로 전자기판의 신뢰도 분석은 전자기판의 모든 부품이 직렬 시스템을 구성하고 있다고 가정하고 부품별 고장률을 산출한 뒤 조합하게 되어있다. 그러나 SR-332 규격을 이용해 계산된 고장률의 경우 지수 함수 분포를 나타낸다고 가정하기 때문에 전자기판의 부품별 고장률을 모두 합하여 전자기판의 신뢰도를 산출한다. 터빈제어시스템 전자기판 신뢰도 분석을 위해 표3-1의 전자기판에 대해 ALD사 Reliability Software 의 SR-332 규격을 사용하여 신뢰도 분석을 수행하였다[4]. 각 전자기판 별 신뢰도 분석결과는 아래와 같다.

부품 종류	수량	고장률 ($1/10^9$ h)	MTBF (years)
저항	82	382.7776	298.2286
커패시터	43	24.0886	4738.9740
퓨즈	4	1.6	71347.032
다이오드	35	16.2278	7034.5488
트랜지스터	12	98.5062	1158.8636
IC	16	25.6356	4452.9970
인덕터	4	-	-
변압기	2	-	-
커넥터	6	-	-
종합	204	548.8358	207.9952

표3-3 TCPS 전자기판 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	101	254.64	448.3005
커패시터	116	23.7403	4808.5007
다이오드	9	4.2015	27170.1181
IC	89	417.255	273.5862
커넥터	6	-	-
총합	321	699.8368	163.1169

표3-4 SDCC 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	31	103.162	1106.5629
커패시터	24	5.7676	19792.5049
다이오드	3	1.4005	81510.3543
IC	24	54.9743	2076.5203
트랜지스터	1	1.5505	73624.7992
커넥터	4	-	-
총합	87	166.8549	684.1588

표3-5 SLCC 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	44	461.8476	247.1708
커패시터	15	44.9624	2538.9047
다이오드	26	10.6708	10697.9094
IC	102	290.9693	392.3274
Relay	2	3.472	32878.8166
커넥터	8	-	-
총합	197	811.9221	140.5987

표3-6 TCCA 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	113	590.6892	193.2577
커패시터	108	30.0734	3795.8877
퓨즈	3	1.2	95129.376
다이오드	35	11.8722	9615.3409
트랜지스터	11	57.8172	1974.4168
IC	48	188.8217	606.3003
인덕터	4	-	-
변압기	2	-	-
커넥터	6	-	-
종합	330	879.9337	129.7316

표3-7 TCEA 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	152	204.2084	559.0134
커패시터	90	19.1548	5959.6159
다이오드	9	2.846	40110.7699
IC	153	203.9349	559.7631
커넥터	7	-	-
종합	411	430.1441	265.3883

표3-8 TCDA 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	60	402.6688	283.4966
커패시터	15	5.7746	19.7685
다이오드	30	3.9124	29.1778
IC	5	2.6223	43.5324
스위치	8	48.424	2.3574
퓨즈	37	14.8	7.713
커넥터	30	-	-
총합	185	463.4021	246.3416

표3-9 TCPD 전자기관 부품별 고장률

부품 종류	수량	고장률 (1/10 ⁹ h)	MTBF (years)
저항	84	478.0888	238.7741
커패시터	7	5.4878	20801.642
Relay	21	36.456	3131.3158
다이오드	17	9.7135	11752.2264
IC	27	8.741	13059.7473
커넥터	11	-	-
총합	168	538.4871	211.9925

표3-10 TCTL 전자기관 부품별 고장률

8종의 전자기관, 1903개의 전자부품에 대해 고장률을 계산하였다. 각 전자카드의 커넥터는 매 계획예방정비 시 접촉부위 점검을 수행하므로 고장률 계산에서 제외하였다. 또한 EPRI 기술보고서에 따르면 변압기와 인덕터의 경우 경년열화에 가장 영향을 많이 미치는 요소는 온도이며 현장 경험을 기반으로 판단하면 일정 온도 유지 시 사용가능 수명이 20년 이상으로 판단되어 규격을 알 수 없는 12개의 인덕터, 변압기는 고장률

계산에서 제외하였다[7][8]. 또한 아날로그 입출력신호 처리용 전자기판 TCQA, TCQB, TCQC와 중앙연산 처리용 전자기판 TCPA의 경우 분석 가능한 전자기판 부재로 유사 전자기판인 아날로그 입출력신호 처리용 전자기판 TCCA와 중앙연산 처리용 전자기판 TCEA의 신뢰도 분석결과를 대체하였다. 각 전자기판의 고장률을 사용하여 아래 식 (3.8)에 따라 신뢰도 함수를 도출하였으며 결과는 표3-11와 같다.

$$R_n = \exp[-\lambda_m \cdot t] \quad (3.8)$$

R_n 은 n에 해당하는 전자기판 또는 시스템의 신뢰도 함수이며, λ_m 은 m에 해당하는 전자기판 또는 시스템의 고장률을 의미한다.

전자기판 종류	MTBF	$R_n(t)$, t=hour
SDCC	163.1167 year	$\exp(-6.99837E-07 \cdot t)$
SLCC	684.1588 year	$\exp(-1.66855E-07 \cdot t)$
TCQA(≡TCCA)	140.5987 year	$\exp(-8.11922E-07 \cdot t)$
TCQB(≡TCCA)	140.5987 year	$\exp(-8.11922E-07 \cdot t)$
TCQC(≡TCCA)	140.5987 year	$\exp(-8.11922E-07 \cdot t)$
TCPS	207.9952 year	$\exp(-5.48836E-07 \cdot t)$
TCPA(≡TCEA)	129.7316 year	$\exp(-8.79934E-07 \cdot t)$
TCDA	265.3883 year	$\exp(-4.30144E-07 \cdot t)$
TCEA	129.7316 year	$\exp(-8.79934E-07 \cdot t)$
TCPD	246.3416 year	$\exp(-4.63402E-07 \cdot t)$
TCTL	211.9925 year	$\exp(-5.38487E-07 \cdot t)$

표3-11 터빈제어시스템 전자기판 신뢰도 함수

상기 신뢰도 도출 결과 중 TCPS 전자기판의 고장이 발생하는 평균시간인 MTBF는 207년으로 207년 뒤 약 36.7% 확률로 건전하게 동작할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 현장 데이터 취합결과인 표2-2의 고장시간인 10년, 13년을 바탕으로 고려해보면 207년을 전자기판의 교체주기로 선정할 수 없다. 그러므로 터빈제어시스템 신뢰도 모델과 전자기판 MTBF만으로 적정 신뢰도를 유지하는 전자기판 교체주기 선정은 불가능함을 알 수 있다.

제 4 장 터빈제어시스템 전자기판 교체주기 선정

제 3장에서는 터빈제어시스템의 신뢰도 모델과 하위 레벨 시스템인 전자기판의 신뢰도를 도출하였으나 적정 수준의 신뢰도를 유지하는 전자기판 교체주기를 선정할 수 없었고 추가적인 기준이 필요함을 알 수 있었다.

제 4장에서는 발전소 운영 예상기간을 10년으로 가정하고, 터빈제어시스템 신뢰도 기준을 선정하여 최소비용으로 적정 수준의 신뢰도를 유지할 수 있는 전자기판 교체주기를 선정한다.

제 1 절 전자기판 교체주기 최적화 모델링

1. 전자기판 교체주기 목적함수

전자기판의 교체비용을 이용한 교체주기 선정을 위해 발전소의 설계 수명 종료시점 까지 남은 운영 예상기간이 필요하며 본 연구에서는 10년으로 선정하였다. 최소비용으로 적정 수준의 신뢰도 유지를 위해 목적함수는 발전소 운영 예상기간 중 교체될 전자기판의 총 비용을 최소화 하였다.

$$\text{Minimize : } C_{Total} = \sum_{i=1}^k N_i \cdot C_{Unit} \cdot \left(\frac{T}{t_{PCB}} \right) \quad (3.9)$$

C_{Total}	전자기판 총 교체비용
C_{Unit}	전자기판별 단가
N_i	전자기판 종류별 수량
T	발전소 운영 예상기간(10yr=8760hr)
t_{PCB}	전자기판 교체주기
k	전자기판 종류 수

표4-1. 목적함수의 변수 설명

2. 제약조건

본 연구의 목적은 교체비용을 최소화하며 적정 수준의 신뢰도를 유지하는 전자기판 교체주기 선정이므로 교체비용을 최소화하는 목적함수의 제약조건으로 터빈제어시스템의 신뢰도 기준이 필요하나 제작사에서 제공하는 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 안전관련 전기, 전자설비의 국제표준인 IEC 61508의 Safety Integrity Level(SIL)을 이용하였다. SIL은 위험 저감의 목표 수준을 나타내는 것으로 Safety Instrumented Function(SIF)에 요구되는 성능 측정의 척도이다[11]. 터빈제어시스템은 발전에 사용되는 제어시스템으로 안전관련 계측 및 제어시스템은 아니지만 보수적인 신뢰도 관리를 위해 SIL 1등급을 목표로 하여 90% 이상 수준의 신뢰도를 유지하고자 한다. $R_{TCS}(t)$ 는 터빈제어시스템 신뢰도를 의미한다.

$$R_{TCS}(t) \geq 0.9 \quad (3.10)$$

제 2 절 전자기관 교체주기 최적화 결과

1. 전자기관 교체주기 최적화 결과

전자기관 단가 선정을 위해 국내 원자력발전소에서 2010년 이후 구매한 전자기관의 최근 구매단가를 선정하여 표4-2에 나타내었다. 식 (3.9), (3.10), 표4-2 조건과 Matlab의 fmincon 함수를 이용해 전자기관 교체비용 최소화 목적함수를 풀었으며 교체주기, 발전소 운영 예상기간 중 교체횟수 및 총 비용, 개별 전자기관 및 터빈제어시스템 최저 신뢰도를 표 4-3, 4-4에 나타냈다.

전자기관 종류	수량	단가(원)
SDCC	3	7,800,000
SLCC	3	12,300,000
TCQA(≡TCCA)	3	11,400,000
TCQB(≡TCCA)	3	12,600,000
TCQC(≡TCCA)	3	10,300,000
TCPS	3	11,700,000
TCPA(≡TCEA)	3	11,400,000
TCDA	3	8,300,000
TCEA	3	13,100,000
TCPD	1	6,200,000
TCTL	1	14,100,000

표4-2 전자기관 수량 및 단가

전자기관 종류	최적화 결과	최종 교체주기	교체 횟수	전자기관 최저 신뢰도
SDCC	29963 hr	3 years	3	98%
SLCC	77060 hr	8 years	1	98%
TCQA(≡TCCA)	33631 hr	3 years	3	97%
TCQB(≡TCCA)	35356 hr	4 years	2	97%
TCQC(≡TCCA)	31967 hr	3 years	3	97%
TCPS	41439 hr	4 years	2	98%
TCPA(≡TCEA)	32305 hr	3 years	3	97%
TCDA	39425 hr	4 years	2	98%
TCEA	57811 hr	6 years	1	95%
TCPD	16463 hr	2 years	2	99%
TCTL	23032 hr	2 years	2	98%

표4-3 전자기관 교체주기

발전소 운영기간 중 전자기관 총 교체 비용	766,600,000 원
터빈제어시스템 최소 신뢰도	91 %

표4-4 전자기관 총 교체비용 및 터빈제어시스템 신뢰도

2. 최적화 결과분석

교체비용 목적함수 최적화 결과 교체주기는 시간으로 계산되었으나 원자력발전소는 매년 계획예방정비 시 교체를 수행할 수 있으므로 최종 교체주기 단위는 1년으로 선정하였다. 10년간 전자기관 총 교체비용은 7.6억원으로 매년 약 7,600만원의 교체비용이 수반되어야 90%이상의 신

뢰도를 유지할 수 있다. 현재 월성2호기의 경우 터빈제어시스템 고장과 관련이 없는 전자기판 교체비용을 포함하여 매년 평균 약 5,000만원 정도의 전자기판 교체비용을 사용하고 있어 본 연구의 목표 신뢰도를 만족하고 있지 않았다. 90%이상의 신뢰도 유기를 위해 상기 연구결과를 반영하여 전자기판 교체주기에 대해 조정을 할 필요가 있다. 특히 단일 전자기판의 고장으로 터빈제어시스템 고장을 유발하는 TCPD, TCTL은 관리를 더욱 강화해야 될 것으로 판단된다.

제 5 장 결 론

국내 원자력발전소의 중요 제어시스템은 수많은 전자기관으로 구성되어 있기 때문에 전자기관의 신뢰도 향상은 원자력발전소의 안전성 향상으로 연결된다. 전자기관 신뢰도 향상을 위한 방법으로 전자기관의 부품 단위 시험, 전자기관 주기교체, 전자기관 성능시험 등 여러 방법들이 있으며 특정한 하나의 방법만으로 최상의 신뢰도를 유지할 수 없다. 전자기관 주기교체는 적절한 교체주기 선정 시 제어시스템의 신뢰도 향상에 매우 효과적인 방법이나 제작사에서 교체주기를 제공하지 않고 있어 현장에서 적절한 교체주기를 선정하지 못하고 있다. 불필요한 교체비용이 소요되거나 사용연한 초과에 따른 고장 등 많은 문제점이 발생할 수 있어 적정 신뢰도를 유지하는 교체주기 선정은 매우 중요하다.

수동소자로 구성된 전원공급용 전자기관의 경우 회로분석을 통한 주요부품 선정, 주요부품인 전해커패시터의 수명 계산을 통해 교체주기를 선정하는 결정론적인 방법으로 가능할 수 있었다[1]. 그러나 마이크로프로세서, 메모리 등 수백개의 디지털 소자로 구성된 중앙연산처리용 및 아날로그, 디지털 입출력 처리용 전자기관의 경우 회로분석 및 주요부품 선정이 불가능하며 수많은 부품에 대한 고장메커니즘이 다양하기 때문에 결정론적인 방법으로 교체주기 선정은 불가능하다.

본 연구에서는 터빈제어시스템 각 전자기관의 신뢰도, 터빈제어시스템

의 신뢰도를 전자부품 신뢰도 예측 규격인 Telcordia사 SR-332를 사용하여 도출하였고, 발전소 운영기간 중 전자기관 교체비용을 사용하여 최소 교체비용으로 적정 수준의 신뢰도를 유지하는 확률론적인 방법으로 전자기관 교체주기를 선정하였다. 10년간 매년 약 7,600만원의 교체비용으로 해당 전자기관 교체 수행 시 터빈제어시스템 신뢰도를 90%이상, 각 전자기관의 신뢰도는 95%이상으로 유지할 수 있었다.

또한 터빈제어시스템 고장수목 분석을 통해 단일 전자기관 고장으로 터빈제어시스템 고장을 발생시킬 수 있는 전자기관을 도출하였고 이를 통해 전자기관 다중화 변경에 대한 검토를 수행할 예정이다.

본 연구에서 제안한 방법은 터빈제어시스템이외의 제어시스템에도 확대적용 가능하므로 원자력발전소 제어시스템 전자기관의 교체주기 선정에 기준을 제시할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 사용한 Telcordia사 SR-332 규격을 이용한 전자기관 신뢰도 예측방법은 규격을 확인하지 못한 부품의 고장률에 대해 무시하였으므로 오차가 반드시 발생할 것이다. 또한 안전관련 제어시스템이 아닌 터빈제어시스템에 SIL 1등급의 신뢰도를 적용하여 10년간 총 전자기관 교체비용이 과도하게 산출되었을 가능성도 있다. 제어시스템 제작사가 아닌 사용자 입장에서 제한된 정보를 이용하여 최적의 결과를 도출하기 위해 가정하여 발생한 것이다. 정확한 정보를 이용한 제어시스템 신뢰도 향상을 위해 제어시스템 구매단계부터 관련 엔지니어가 적극적으로 개입하여 정확한 데이터와 데이터를 이용한 정비방법을 요구할 필요가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 손병집, 진영규, 윤용태, 민문기, “ 디지털 터빈제어시스템 전원 공급모듈의 수명에 관한 연구“, 대한전기학회 하계학술대회, 2017.7, p.929-930
- [2] 이광대, 김민석, 류호선, 이의중, “원자력발전소 전자카드 신뢰도 관리“, 대한전자공학회 학술대회, 2016.4, p.241-243
- [3] 전태보, 『전기 • 전자시스템 신뢰도 예측』, 교우사, 2010.
- [4] ALD Reliability Software, “MTBF Calculator, Telcordia Issue3”, 2011
- [5] EPRI, “Gold Card Project”, EPRI TR-1022990, 2011
- [6] EPRI, “Gold Card Project”, EPRI TR-3002002642, 2014
- [7] EPRI, “Power Supply Maintenance and Application Guide”, EPRI TR-1003096, 2001
- [8] EPRI, “Collected Field Data on Electronic Part Failures and Aging in Nuclear Power Plant Instrumentation and Control(I&C) System”, EPRI TR-1003568, 2002
- [9] IEEE, “IEEE Guide for Selecting and Using Reliability Protections Based on IEEE 1413“, IEEE 1431.1, 2003
- [10] Marvin Rausand, System Reliability Theory, John Wiley & Sons Inc., 2004
- [11] International Electrotechnical Commission, “IEC61508-1, General

Requirements“, IEC 61508, 2010

Abstract

A Study on the Life Management of Turbine Control System Circuit Boards using the Stochastic Method

Byeong Jip Son

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

Nuclear power plants consist of various control systems, which they perform protection and control functions. Most critical control systems in the nuclear power plants are composed of numerous circuit cards, therefore improving reliability of the circuit cards are concluded to increased safety of nuclear power plant. There are various methods for reliability improvement of circuit cards such as components test, periodic replacement and function test of them. But with only one methods of those, the best performance of reliability cannot be maintained. Even though periodic replacement of circuit cards is very effective for improving reliability, users could not decide the appropriate cycle of circuit cards because of not providing

the data on replacement cycle from the manufacturers. Under the lack of optimal replacement cycle, the frequent replacement of circuit cards generate the excessive cost. In the contrast, the circuit cards in excess of the service life cause the various trouble of the control systems

In this research it is calculated the reliability of each circuit cards that is the units of the digital turbine control system, Mark-V of General Electric Inc which are popular in domestic nuclear power plants, based on the prediction method of reliability using Telcordia SR-332 Issue3. Also the reliability of the whole system is calculated quantitatively and from that the vulnerability is derived using the fault tree analysis and reliability block diagram. Lastly, the optimum replacement cycle of the circuit cards with minimum cost is proposed using the objective function of the replacement cost and safety integrity level of IEC61508.

keywords : Circuit Card Reliability, Telcordia SR-332, Fault Tree Analysis

Student Number : 2016-22209