

보터의 구조에 따른 TMR 시스템의 신뢰도 평가 및 설계에 관한 연구

김현기, 신석균, 이기서  
 광운대학교 제어계측공학과 시스템공학 연구실

A study on the Reliability evaluation and Design of TMR system  
 according to the structure of voter

Kim Hyun Ki, Shin Suk Kuin, Lee Key Seo  
 Dept. of control & instrumentation Eng. Kwangwoon Univ.

**ABSTRACT** - This paper shows two models of the TMR system- fail passive system - having a fault tolerant system characteristic used in airplane and railway system. We design the single system, single-voter TMR system and triplicated voter TMR system based on MC68000 and calculate the failure rate of components using MIL-SPEC-217F and evaluate the reliability and MTTF(Mean Time To Failure) of the designed systems by Markov model.

1. 서 론

오늘날 우리는 눈부신 과학 발전을 이루는 산업 사회에서 살고 있다. 이러한 산업 사회에서 인간이 할 수 있는 일을 전자 시스템이 대신하는 부분이 더욱더 증가하고 있다. 이러한 시스템은 또한 점점 더 복잡해지고 다양한 기능을 갖도록 시스템이 개발되고 있다. 시스템이 복잡하고 많은 기능을 갖도록 발전함으로써 고장에 대한 연구가 필요하게 되었고, 결함(fault), 오류(error), 고장(failure) 사이에 상관 관계가 있음을 알게 되었으며, 지금은 고장 발생 단계 중에서도 처음 단계인 결함을 연구하여 시스템의 신뢰도(reliability)를 향상시키는 방법이 연구되고 있다.

시스템의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로는 전자 부품의 질을 향상시키고 많은 테스트를 거쳐서 완벽한 시스템을 만드는 결함 회피(fault avoidance) 방법과 결함 허용(fault tolerance) 방법이 사용되고 있다. 하지만, 전자 부품의 속성상 시간이 경과함에 따라 결함이 발생하게 되므로 완벽한 결함 회피는 이룰 수 없다. 그러므로, 결함이 발생하여도 정상 동작을 계속 수행하도록 하는 결함 허용 방법에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 결함 허용 방법은 본래의 시스템 외에 따로 여분(redundancy)을 두어 결함의 발생을 허용하는 방법으로 하드웨어 여분, 소프트웨어 여분, 시간 여분, 정보 여분 구조가 있다. 하드웨어 여분을 두는 방법에는 수동적인(passive) 방법과 능동적인(active) 방법, 하이브리드(hybrid) 방법이 있다.

본 논문은 수동적인 방법인 순수한 TMR 시스템의 구조를 사용하여 하드웨어 보터를 TTL 소자로 설계한 경우와 EPLD를 사용하여 설계한 차이점을 보고, 각각의 구조에서 사용되는 소자의 고장율은 MIL-SPEC-217F를 이용하여 계산하고, 마코브 모델을 이용하여 시스템의 신뢰도(reliability)와 MTTF를 구하여 각각의 시스템에 대한 비교를 한다. 이렇게 평가된 시스템은 특성에 따라서 항공기나 철도 시스템에 적용될 수 있다.

2. 본 론

2.1. 시스템 평가

2.1.1. 고장률 계산

고장률(Failure rate)은 시스템 평가, 즉 시스템의 신뢰도, 안전도와 MTTF를 평가를 하는데 가장 중요한 요소로 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{1}{\text{Operating Time}} \quad (\lambda: \text{고장률}) \quad (1)$$

실제된 소자의 고장율은 MIL-HDBK-217F를 이용하여 표1과 같이 계산하였다.

표1. 설계된 시스템에 사용된 전자소자 고장율

부품	고장률	부품	고장률
MC68000	4.9200	ROM(27C010)	0.6700
RAM(681000)	2.2700	SIO(8530)	1.8240
RTC(DS1284)	1.0240	74LS244	0.0260
PIO(8255)	0.0620	OSCILLATOR	0.0180
74LS00	0.0232	EPM7128LC84	0.0012
74LS10	0.0232		

(단위: failure/million hours)

2.1.2. 신뢰도(reliability)

시스템과 전자 소자의 신뢰도는 시간  $t_0$ 에서 올바르게 동작하고 있을 때, 시간 간격  $[t_0, t]$ 에서 올바르게 동작을 하는 조건적인 확률이다. 그러면,  $N$ 개의 똑같은 요소를 시간  $t_0$ 에서 시작하여  $N$ 개의 시스템을 검사한다고 가정할 때,  $N_x(t)$ 는 시간  $t$ 에서 고장나는 시스템 개수이고,  $N_o(t)$ 는 시간  $t$ 에서 올바르게 동작하고 있는 시스템의 개수이다. 시스템의 신뢰도는 식(2)와 같다.

$$R(t) = \frac{N_o(t)}{N_o(t) + N_x(t)} = e^{-\lambda t} \quad (\lambda: \text{고장율}) \quad (2)$$

2.1.3. MTTF(Mean Time To Failure)

MTTF(Mean Time To Failure)는 시스템이 동작을 시작해서 시스템이 멈추는 시간적인 확률값을 나타낸다. MTTF는 식(3)과 같이 신뢰도 함수를 이용해서 구할 수 있다.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3)$$

2.2. 설계된 시스템 구조

여기서는 단일 시스템(single system), 단일 보터 TMR 시스템(single voter TMR system) 와 3중보터

TMR 시스템(Triplicated voter TMR system)을 MC68000을 기반으로 한 시스템을 설계하여, 각 시스템에 따른 신뢰도, 와 MTTF를 구하여 각각의 시스템의 특성을 비교한다. 그리고, 각 시스템은 동시에 두 개의 결합은 발생하지 않는 것으로 가정한다.

### 2.2.1. 단일 시스템

단일 시스템은 가장 기본적인 구조로 그림1과 같이 설계될 수 있다. MC68000을 기반으로 하여, 메모리, RTC(Real Time Clock), PIO(8255),SIO(82530),EPLD를 사용한 구조이다.

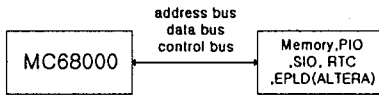


그림 1. 단일 시스템의 블럭도

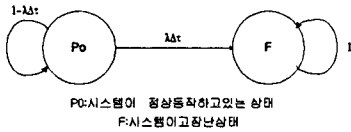


그림 2. 단일 시스템의 마코브 모델

그림 2는 시스템의 마코브 모델을 구성하고 있다.  $\lambda$ 는 전체 시스템의 고장율이다.

### 2.2.2. 단일 보터 TMR 시스템

우선 TMR시스템에 사용되는 하드웨어 보터의 구조를 보면 그림 3과 같다.

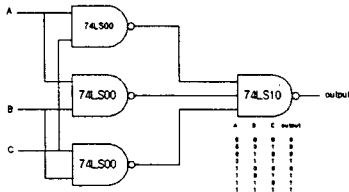


그림 3. 보터의 구조

그림3에 나타나 있는 것과 같이 A,B,C입력에 대해서 같은 입력이 2개 이상일 때 output출력을 내는 회로이다. 이 회로는 단 방향 구조를 나타내고 있다. 하지만 데이터 버스와 같은 양방향 버스라인에 적용될 때는 보터가 한 개의 데이터 라인에 두 개가 방향성을 가지는 보터가 연결된다. 이러한 양방향 보터의 방향성 있는 동작은 MC68000의 R/W신호와 74LS244를 이용해서 결정할 수 있게된다. 이러한 로직을 이용하여 단일 보터 TMR시스템을 그림 4와 같이 설계할 수 있다. 이 시스템의 상태도는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 프로세서의 고장율은  $\lambda_p$ , 보터의 고장율은  $\lambda_v$ , 모듈의 고장율은  $\lambda_m$ 이다. 그림5를 볼 때 시스템이 동작을 하고 있는 순간은 F 상태를 뺀 나머지 상태에서 정상동작을 하는 것을 알 수 있다. 즉, 한 개의 프로세서나 한 개의 모듈부(메모리,PIO,RTC,SIO)가 고장이 발생을 하여도 보터의 특성으로 인하여 시스템이 정상적으로 동작을 한다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 한 개의 보터를 가지는 경우는 보터가 고장이 발생하면 시스템 전체가 오동작을 일으키는 구조가 된다는 것을 알 수 있다.

### 2.2.3. 3중화된 보터 TMR 시스템

이 시스템은 한 개의 보터를 가지는 시스템의 단점을

보완하기 위해 나타난 시스템이라고 볼 수 있다. 즉, 단일 시스템과 똑같은 보터를 사용한다면, 보터가 한 개가 고장이 발생을 해도 계속해서 동작하는 특성을 가지게 된다. 이 시스템은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

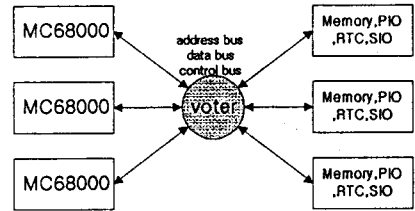


그림 4. 단일 보터 TMR 시스템

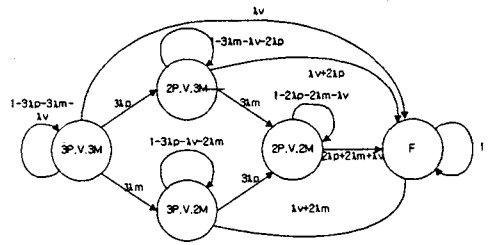


그림 5. 단일 보터 TMR 시스템 상태도

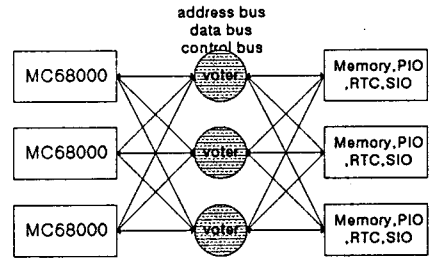


그림 6. 3중화 보터 TMR 시스템

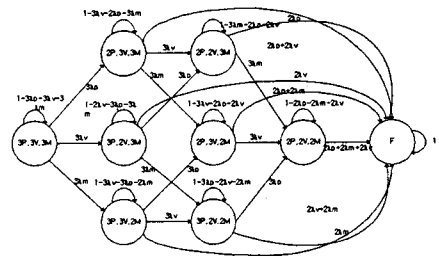


그림 7. 3중보터 TMR 시스템 상태도

그림7은 3중화된 보터의 TMR시스템의 상태도를 나타내고 있다. 여기서 상태는 9개로 나눌 수 있다. 이때 작동을 하는 상태는 시스템의 각각의 TMR 요소가 한 개 이상의 고장이 발생을 할 때까지 동작을 한다. 즉, 프로세서가 한 개고장이 나고, 보터가 한 개고장, 모듈부가 한 개고장이 발생했을 경우까지 동작을 하게 된다.

### 3. 시뮬레이션

시스템의 신뢰도는 각 시스템의 상태도에 의해서 구할 수 있다. 즉, 시스템이 고장이 발생한 상태인 F를 제외

한 모든 상태의 확률값을 더한 것으로 볼 수 있다. 단일 시스템에 사용된 소자의 개수는 표1과 같다. 이 소자의 고장율을 더한 것이 단일 시스템 전체의 고장율이라고 볼 수 있다. TMR 시스템에 사용된 소자는 단일 시스템의 3배에 보터에 사용된 소자수라고 볼 수 있다.

표1. 단일 시스템에 사용된 전자소자 개수

부품	개수	부품	개수
MC68000	1	ROM(27C010)	2
RAM(681000)	2	SIO(8530)	1
RTC(DS1284)	1	OSCILLATOR	1
PIO(8255)	1	EPROM7128LC84	1

### 3.1. 보터를 TTL로 구성한 경우

우선 TTL로 보터를 설계한 경우는 한 개의 보터를 구성하기 위해서 74LS00(2NAND 4개)과 74LS10(3NAND 3개)을 사용하고, 데이터버스를 위해서 74LS244를 이용해서 양방향 보터를 구성해야 한다. 그러므로, 단방향 버스가 MC68000은 44편이고, 양방향 버스는 16개이다. 그러므로, 한 개의 보터에 사용되는 소자는 74LS00이 60개, 74LS10이 28개 필요하게 된다. 이때 각 시스템의 신뢰도 곡선은 다음과 같다. 3중화 보터는 3배의 전자소자가 더 들게된다. 그림 8에서 보는 바와 같이 단일 시스템보다 TMR시스템의 신뢰도가 높게 나타나고, 3중화 시스템의 신뢰도가 더 우수하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 단일 보터의 MTTF는 73355.9이고, 3중보터는 73213.4, 단일 시스템은 71994.2로 나타났다.

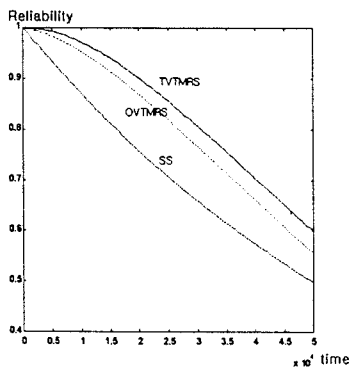


그림 8. 시스템의 신뢰도(TTL소자 사용한 경우)

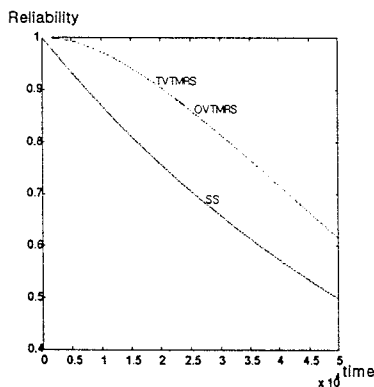


그림 9. 시스템의 신뢰도(EPLD 사용한 경우)

### 3.2. 보터를 EPLD를 이용한 경우

EPLD(ALTERA-EPM7128LC84)를 사용하여 보터를 설계하는 경우는 EPLD소자는 단일 보터를 구성할 때는 3개의 EPLD가 필요하다. 그러므로, 3중화 구조인 보터를 설계할 때는 9개의 소자가 필요하게 된다. 시스템의 신뢰도는 그림9와 같다.

그림9에 나타나 것은 단일 시스템보다 TMR의 신뢰도가 우수하며, 단일보터나 3중보터의 시스템의 신뢰도가 차이가 없게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 이유는 보터로 설계되는 소자의 고장율이 시스템의 신뢰도를 결정짓는 요소가 된다는 것을 알 수 있는 것이다. 단일보터일 경우 MTTF는 73228.9이고, 3중보터일 경우는 73214.8로 나타났다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 단일 시스템과 보터의 구조와 사용되는 소자에 따라 단일 보터 TMR시스템과 3중보터 TMR시스템의 구조에 대한 신뢰도를 MC68000을 기반으로한 시스템에 적용해서 알아보았다. 즉, 단일 시스템보다는 TMR 시스템의 신뢰도가 보터가 설계되는 구조에 관계없이 우수하다는 것을 알았다. 그리고, 시스템을 설계할 때 보터에 사용된 소자에 따라서 시스템의 신뢰도가 단일 보터와 3중 보터 시스템에 큰 영향을 끼친다는 것을 알았다. 또한, 시스템의 수명은 단일 시스템보다 신뢰도와 마찬가지로 TMR시스템이 우수한 것으로 나타나고, 단일 보터구조가 보터에 사용된 소자에 관계없이 3중구조보다 약간 더 길다는 것을 알 수 있다.

추후과제로는 보터의 결함을 검출할 수 있는 자기 검사 기능이 있는 보터의 설계가 중요한 과제라고 생각된다.

## 참고 문헌

- [1] Barry W. Johnson, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems", Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] Dhiraj K. Pradhan, "Fault-Tolerant Computer System Design", Prentice Hall, 1996.
- [3] 김 현기, "결함 허용 실시간 시스템 개발에 관한 연구", 광운대 석사학위 논문, 1995.
- [4] David G. Robinson and Marcel F. Neuts, "An Algorithm Approach to Increased Reliability Through Standby Redundancy", IEEE Tran. on Reliability, Vol.38, NO.4, 1989 October
- [5] Daniel P. Siewiorek and Robert S. Swarz, "Reliable Computer System" Second Ed, Digital Press, 1992
- [6] "MC68000 Data Book", MOTOROLA.
- [7] "MILITARY HANDBOOK 217F", Department of defense, U.S.A
- [8] Jeffrey A. Clark and Dhiraj K. Pradhan, "Reliability Analysis of Unidirectional Voting TMR systems through Simulated Fault-Injection" IEEE Tran. on Reliability, Vol.38, NO.7, 1992 July
- [9] JOHN F. WAKERLY, "Microcomputer Reliability Improvement Using Triple Modular Redundancy", PROCEEDING OF THE IEEE, VOL.64, No.6, JUNE 1976