

유도무선에 의한 위치검지장치의 신뢰도 및 안전성 향상

윤여원^o, 박석하, 김양모
충남대학교 전기공학과

Improvement of Reliability and Safety in Position Detection Unit by Induced Radio Line

Y.W. Yoon^o, S.H. Park, Y.M. Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper presents microprocessor-based Digital Position Detection Unit using the inductive radio line and the antennas in train signaling system. This comprises the Fail-Safe system due to the dual controlled system to drive with safe-side even in events of faults, and designs the FSC(failure safe comparator). And the method of Markov Modeling is described for the reliability evaluation of system.

1. 서 론

차륜과 레일의 접촉이 없는 MAGLEV나 고무타이어식 열차와 같은 신교통 시스템에서는 전통적인 캐드 회로에 의한 열차의 위치검지가 불가능하며, 따라서 유도무선루프와 안테나에 의한 위치검지 방법이 사용될 수 있다.^[1]

이러한 위치검지 시스템의 소형 경량화와 열차의 고속, 고밀도 운전, 열차운전 시스템의 인тели전트(Intelligent)화에 부응하기 위해 시스템의 전자화, 디지털화, 마이크로프로세서화가 불가피하게 되었다.

그러나, 마이크로프로세서를 비롯한 디지털 소자들은 외란에 약하고 고장의 가능성이 높으며, 고장 발생시 그 고장의 원인 및 위치를 찾아내는 것 또한 쉽지 않은 단점을 지니게 되므로 이러한 문제점을 극복하고 보다 신뢰성 높고 안전한 시스템을 구성하기 위해 종복구조의 시스템을 설계하여야 한다.

본 논문은 아날로그 방식으로 구성된 기존의 위치검지회로의 디지털화와 결함의 발생시 안전측으로 운행하도록 하는 2중계에 의한 Fail-Safe 시스템에 적용하였으며, 2중계 시스템의 신뢰도(Reliability)와 안전도(Safety)에 대한 평가 방법을 알아 보고 상기 시스템의 적용 가능성을 알아 보고자 한다.

2. 위치 검지 시스템의 디지털화

2.1 유도무선에 의한 위치검지

지상에 설치되어 있는 패턴벨트(Pattern Belt)의 속도·위치검출용 유도선에 고주파 신호를 인가한 후 차체에 안테나를 설치한 열차가 유도선 위를 이동하면 안테나에는 유도선의 고주파 신호에 의해 유도전압이 발생한다. 이 유도전압은 유도선이 넓혀진 부분에서는 크게, 좁혀진 부분에서는 두 선간 장이 서로 상쇄되어 거의 0으로 나타난다. 이와 같이 차상의 안테나에 유도되는 전압이 지상 유도선의 넓혀지고 좁혀진 형태에 따라 유도 신호가 변하므로 이를 위치신호로 이용하여 열차의 위치 및 속도 신호를 얻을 수 있다. 또한 안테나 3개를 유도선 한 주기의 1/3간격으로 설치하면 각 안테나에 유도되는 전압은 서로 120°의 위상차를 갖게 되므로 이 3개의 신호를 순시적으로 합하면 유도선 주기의 1/3주기를 갖는 신호를 얻을 수 있고, 또 이

신호의 상승 및 하강할 때 모두 신호를 얻으면 유도선의 1/6주기의 정확도로 위치검지가 가능하게 된다. 또한 각 안테나 유도신호의 전후 관계를 파악하여 열차의 전·후진을 알 수도 있다.

그림 1은 유도무선에 의한 위치 검지 시스템의 원리를 나타내고 있다.

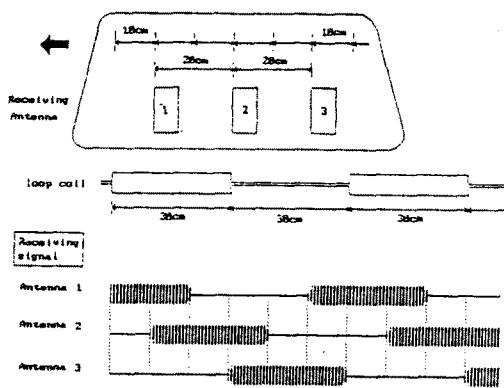


그림 1. 유도무선에 의한 위치검지의 원리

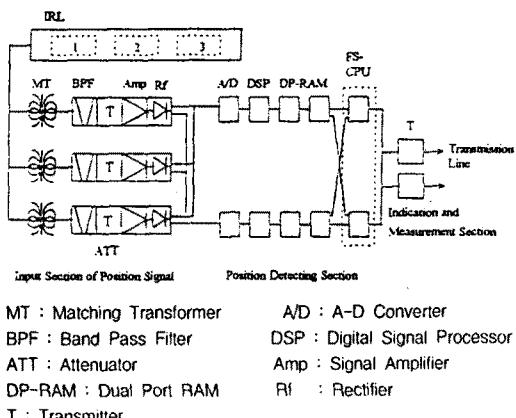


그림 2. 디지털화된 시스템의 불력도

2.2 위치검지 시스템의 디지털화
기존의 아날로그 방식에 의한 위치검지 시스템은 정확한 위치

검지에 의한 열차의 운전제어와 안전 운전제어에 고도의 안전성을 줄 수 있는 디지털 방식으로 전환되어야 한다.^[2]

위치검지의 디지털화는 다음과 같은 이점을 갖게 된다

- 1) 전파지연 시간과 확률적인 편차를 보상하여 정확한 위치검지를 이용할 수 있다.
- 2) 여러 종류의 논리검사(Logic Checks)에 의한 사고의 감지율을 통하여 이상상태(Abnormality Case)에도 안전한 제어가 가능하도록 한다.
- 3) 중복구조의 시스템을 구성하여 높은 신뢰성의 위치검지 시스템이 구현 가능하다.
- 4) 보전성(Maintainability)의 향상을 가져온다.

그림 2는 디지털화된 시스템의 불록도를 나타낸다.

3. 2중계 시스템 및 고장안전 비교기

3.1 2중계 시스템

2중계로 구성되는 고장안전 시스템은 각각의 모듈을 버스레벨(Bus level)에서 비교하여 두 모듈의 결과가 같을 경우 출력을 내보내며 그렇지 않을 경우에는 미리 설정되어 있는 안전축으로 운행하도록 한다. 하지만 단순한 버스레벨의 비교 방법은 다음과 같은 경우에 오류를 갖게 된다.^[3]

- 1) 두 개의 모듈에 동일한 결함이 발생하였을 경우
- 2) 비교기 자체에 결함이 발생했을 경우

따라서 각각의 모듈 안에 소프트웨어에 의한 비교를 실행하여 모듈 자체의 결함을 진단할 수 있도록 하고, 비교기 자체의 결함으로 인한 오류를 방지하기 위하여 비교기에 고장안전 특성을 부여한 고장안전 비교기(FSC : Fail-Safe Comparator)를 설계하도록 한 것이 그림 3과 같은 본 시스템의 Fail-Safe 개략도이다.

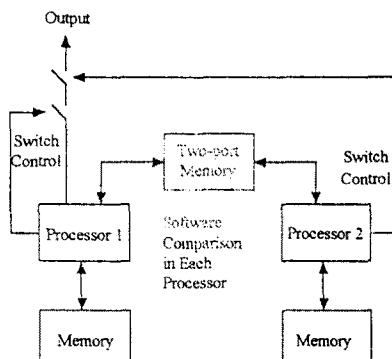


그림 3. 2중계에 의한 Fail-Safe의 개략도

3.2 고장안전 비교기

설계하고자 하는 고장안전 비교기의 내부 구조가 그림 4에 보이고 있다.

버스 A의 데이터가 반전되어 래치되기 때문에 자기진단 회로의 일종인 2-Rail Checker는 (01,10)의 코드화된 출력일 때에 정상동작을 의미한다. 즉 출력 측에 "00" 혹은 "11"이 나타나면 어느 한 모듈에 고장이 발생한 것으로 진단된다.^[4]

4. 신뢰도 모델링 기법

위에서 언급하고 있는 열차운전 시스템의 인텔리전트화는 경

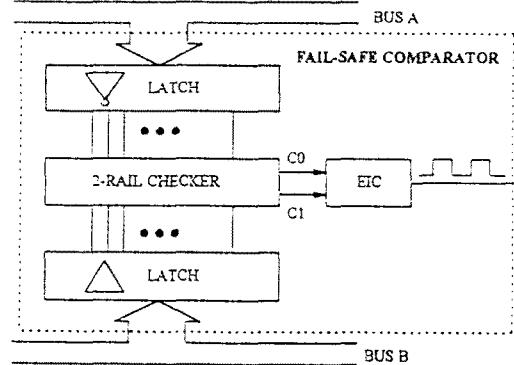


그림 4. 고장안전 비교기의 구조

제성 및 소형경량화에 유리하고 적은 소비전력으로도 제어가 가능하고 아울러 유지보수 및 고장진단이 간편하다는 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 이에는 무엇보다도 선결조건이 열차운전 시스템의 신뢰도 및 안전성 확보에 달려 있다. 본 절에서는 시스템의 인텔리전트화에 따른 열차운전 시스템에 적합한 신뢰도 평가법을 알아보고 이를 실제 시스템에 적용 가능한지를 알아보겠다.

4.1 신뢰도 모델링을 위한 용어

우선 본 시스템의 신뢰도 평가를 위한 모델링 시에 필요한 용어를 정의하겠다.

시스템의 신뢰도(Reliability) $R(t)$ 는 시간 $t = 0$ 에서 결함이 없었고 일정 시간 t 내에 결함이 없을 확률로 정의된다. 시스템의 결함의 확률 즉 비신뢰성은 시간 $t = 0$ 에서 결함이 없었고 일정 시간 t 내에 결함이 있을 확률로 정의되고 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1)$$

시스템의 MTTF(The Mean-Time-To-Failure)는 다음 식 (2)와 같이 주어지며 시스템의 평균 고장 시간으로 정의된다. 여기에서 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 이고, λ 는 동작 기간 동안의 고장률이다.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(\sum_{i=1}^n \lambda_i)t} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2)$$

MTTR(Mean-Time-To-Repair)은 시스템의 평균 보수 시간이고, 지수(exponential) 분포에 대하여 $t/\mu(\mu : \text{보수율})$ 이 된다. 그리고 정상상태 가능성(Availability) Ass 는 시스템이 일정시간 t 에서 동작하는 확률로 정의되며 식 (3)과 같다.

$$Ass = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3)$$

MTBF(Mean-Time-Between-Failures)는 보수가 가능한 시스템의 평균 수명이다. 고장 과정과 보수의 조합으로부터 유도된다. MTBF의 가장 근접한 근사치는 다음 식 (4)와 같다.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (4)$$

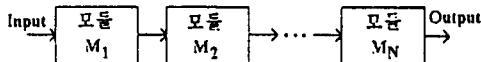
4.2 조합 모델링 기법

시스템 신뢰도의 조합 모델링 방법으로는 직렬(Series), 병렬(Parallel) 시스템 등이 있다. 그림 5(a)는 전체 시스템을 구성하는 모듈의 하나라도 고장이 나면, 전체 시스템이 그 기능을 상실하게 되도록 모듈이 직렬로 결합되어 있는 직렬결합 모델링이고, 그림 5(b)는 병렬로 결합되어 있는 각 모듈의 한 개만 작동하면 전체가 그 기능을 발휘할 수 있는 병렬결합 모델링을 보이고 있다.

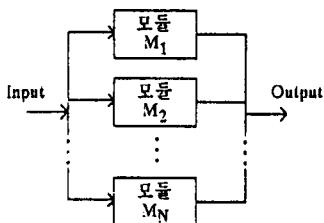
직렬결합 모델링의 신뢰도는 각 블록의 신뢰도를 곱한 식 (5)와 같다.

$$R_{series}(t) = R_1(t)R_2(t)\cdots R_N(t) \quad (5)$$

반면에 병렬결합 모델링의 비신뢰도는 모든 N 블록이 실패한



(a) 직렬결합 모델링



(b) 병렬결합 모델링

그림 5. 조합 모델링 신뢰도 불록도

경우의 확률로 계산될 수 있다. 병렬결합 모델링 시스템의 비신뢰도 $Q_{parallel}(t)$ 는 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

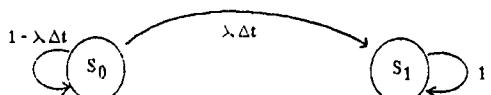
$$Q_{parallel}(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_N(t) \quad (6)$$

수학적으로 어떤 시스템이라도 $R(t) + Q(t) = 1$ 이므로 결과적으로 병렬결합 모델링의 신뢰도는 식 (7)과 같이 계산된다.

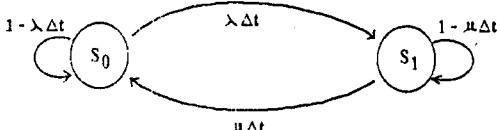
$$R_{parallel}(t) = 1 - Q_{parallel}(t) \quad (7)$$

4.3 Markov 모델링 기법

조합 모델링의 근본적인 어려움은 시스템이 복잡할수록 모델링이 어려워지며 신뢰도 표현도 매우 복잡해지고, 아울러 실제 시스템을 수정해야 할 때에 조합 모델링 형태로는 적용하기가 어렵다. 이러한 이유 때문에 Markov 모델링 기법이 자주 이용된다.^[5]



(a) 보수가 없는 경우



(b) 보수가 있는 경우

그림 6. 단일 구성품 시스템의 Markov 모델링

그림 6은 간단한 단일 구성품 시스템에 대한 두 개의 Markov 모델링을 보이고 있다. 상태 S_0 는 정상 기능을 하는 시스템이고 상태 S_1 은 결함있는 시스템이다. 그림 6(a)는 보수가 없을 경우의 시스템인데, 고장이 발생할 때 시스템은 결함 상태로 남아 있다. 상응하는 진이 확률은 다음 식 (8)과 같은 행렬이 된다.

$$P = \begin{bmatrix} 1 - \lambda\Delta t & \lambda\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

상태 S_0 와 S_1 에서의 확률을 P_0 와 P_1 이라 하고, 일정 시간 $t + \Delta t$ 에서 상태 확률은 식 (9)와 같이 된다.

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda\Delta t)P_0(t) \quad (9a)$$

$$P_1(t + \Delta t) = \lambda\Delta t P_0(t) + P_1(t) \quad (9b)$$

식 (9)를 미분방정식으로 풀면, 시스템의 신뢰성 R 과 시스템의 고장의 확률 F 를 식 (10)과 같이 얻게 된다.

$$R(t) = P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (10a)$$

$$F(t) = P_1(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10b)$$

위에서 언급한 시스템을 Markov 모델링에 적용하기 위해, 두 개의 서로 다른 프로세서 P_1 과 P_2 로 구성되어 있는 디중프로세서(Multiprocessor) 시스템을 예로 들겠다. 그림 7은 시스템의 특성을 보여주는 연속 Markov 모델링이다.

두 개의 프로세서가 정상 동작 시에 프로세서 P_1 과 P_2 에 결함 발생이 각각 r_1 과 r_2 의 비율로 분산되고, 두 개의 프로세서가 동시에 결함이 있는 공통 결함 시에는 결함비율이 r_c 로 지수적으로 분산된다. P_1 만이 정상 기능을 할 때는 그 결함 비율이 r'_1 이고 P_2 만이 정상 기능을 할 때는 그 결함비율이 r'_2 이다.

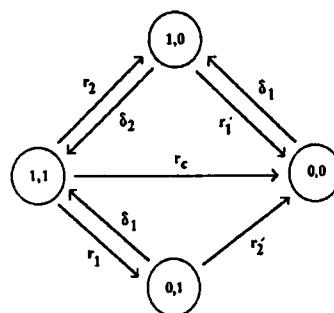


그림 7. 두 프로세서 시스템에 대한 연속시간 Markov 모델링

5. 결 론

본 논문에서는 신교통 시스템의 열차제어를 위한 유도무선크로스와 인테나에 의한 열차 위치검지 방법을 실현하기 위한 연구를 수행하였으며, 열차의 고속화, 고밀도화 운전, 그리고 열차제어의 인터리전트화에 따른 시스템의 디지털화 및 마이크로프로세서화를 본 시스템에 적용시키고 있다.

특히 신뢰도와 안전도 측면에서 시스템의 형상을 위하여 2중계에 의한 Fail-Safe 시스템을 구성하며, 시스템의 중요 부분인 고장안전 비교기(FSC)를 설계하였다. 또한 본 시스템의 신뢰도 평가를 위하여 Markov Modeling 기법을 적용하여 그 타당성을 연구하였다.

차후 디지털 위치검지장치를 사용하여 2중계에 의한 Fail-Safe 시스템으로 구축하여, 보다 신뢰성이 있고 안전도 높은 시스템에 대한 연구를 계속해 나가겠다.

참 고 문 헌

- [1] 정의진, 함상웅, 김봉섭, 김양모, "최전원판형 비접촉식 열차 위치검지", 전기학회 논문지, 44-3-6, pp.292-297, 1995.3
- [2] Y. Yokata, T. Watanabe, Y. Sakai, "The Maglev Train Protection Systems and Train Position Detection", QR of RTRI, Vol. 35, No.3, Aug. 1994
- [3] Barry W. Johnson : Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems, Addison-wesley Pub., 1989
- [4] H. Nakamura , K. Takeshi, "Fault-tolerant Microcomputer design and Application for Railway Train Control", IFIP Trans. on A Computer Science Technology, 1992, pp. 652-658
- [5] J. K. Muppala, S. P. Woodel, K. S. Trivedi, "Real-Time Systems Performance in the Presence of Failures", IEEE Computer, May, 1991, pp. 37-47