

열차내 연산시스템용 AF궤도회로 신뢰성향상 방안 연구

박재영^{1*}

¹우송대학교 철도전기시스템학과

Reliability improvement methods of AF track circuits for the train control system

Jae-Young Park^{1*}

¹Division of Railroad Electrical System Engineering, Woosong University

요 약 열차의 위치를 검지하고 열차내연산(DTG)을 위한 각종 열차제어데이터를 차상으로 전송하는 AF궤도회로장치는 단일계로 구성되어 있다. 만약, 고장이 발생할 경우 선로전환기 및 신호기제어가 불가능하여 시스템이 복구되기 까지 기관사에 의해 수동으로 열차를 운전하여야 한다. 이 과정에서 인적 오류는 열차지연, 충돌, 탈선 등 치명적인 안전사고 발생요인으로 작용한다. 따라서, 본 논문에서는 고장모드마다 시스템과 열차에 미치는 영향을 분석하였으며, 고장평점 및 고장등급을 계량화하였다. 계량화된 분석결과를 토대로 전원장치 독립설치, 증폭PCB의 결함콘덴서 원인 분석 및 교체, 저항자 냉각시스템설치, 작업방법개선을 통해 고장발생건수 감소 및 신뢰성의 척도인 평균고장간격(MTBF)의 증가와 평균복구간격(MTTR)이 감소되었다. 그리고, 지금까지 경험에 의한 유지보수체계를 계량화된 방법에 의해 예측정비를 수행토록 하여 AF 궤도회로에 대한 신뢰성을 향상할 수 있도록 하였다.

Abstract The AF track circuit that detecting train position and transmitting various train control data for DTG to the train on-board is composed of single operation system. If a failure occurs on this system, the driver should be operate the train by manually until the system is restored, because the system cannot control switch machines and signals by automatically. In this process the human error affects to the train delay, collision, derailment and critical safety accident. Therefore, this document has analyzed the effects that each failure mode influences on system and train, and quantified the failure valuation point and class. Basis on this quantified analysis result, MTBF increased and MTTR decreased and failure number also decreased by adopting the independent installation of power supply, the replacement of defected capacitors, the installation of resistor cooling system and the improvement of maintenance methods. And the failure factors of AF track circuits were decreased by conducting the preventive maintenance which is a quantitative way of maintenance system by experience.

Key Words : Distance to go, Audio frequency track circuit, FMEA, MTBF, MTTR

1. 서론

열차내연산(DTG:Distance To Go)시스템은 지상 자동 열차제어시스템에서 가청주파수(AF:Audio Frequency)궤도회로를 통해 전송한 목표거리(Target Distance), 제한속도, 진입속도 등 궤도데이터를 차상 안테나에서 수신하여

열차내 자동열차보호장치(ATP:Automatic Train Protection)에 의해 연산 후 권고속도를 산출하면 자동열차운전장치(ATO:Automatic Train Operation)는 선행열차와 안전거리를 자동으로 유지하면서 주행하며, 정거장에 도착 시 안내방송 및 출입문과 플랫폼 스크린도어(PSD)를 제어한다. 열차를 검지하여 속도코드만 전송하는 일반 가청주파

*Corresponding Author : Jae-Young Park

Tel: +82-10-5315-3141 email: pjy6573@daum.net

접수일 12년 09월 11일

수정일 12년 10월 05일

게재확정일 12년 10월 11일

수궤도회로와 달리 열차내연산을 위한 각종 열차제어데이터를 전송하는 AF궤도회로의 신뢰성확보는 열차의 안전운행과 직결되는 중요한 요소이다.

그러나 경험에 의한 비과학적인 무리한 점검으로 인적 오류(Human Error)에 의한 유발고장과 사후정비(CM:Corrective Maintenance)에 의한 열차지연 및 안전운행을 저해하는 요인으로 작용하였다.

따라서 본 논문에서는 여러 부품으로 조합되어 구성된 AF궤도회로의 고장모드 및 영향분석(FMEA:Failure Mode and Effect Analysis)에 의한 고장해석을 통해 사전정비(PM : Preventive Maintenance)를 실시하고, 고장사례별 평균고장간격(MTBF : Mean Time Between Failure)과 평균복구간격(MTTR:Mean Time to Repair), 가용률(Availability)을 산출, 관리하여 시스템 신뢰성향상에 기여하고자 한다[1].

2. FMEA에 의한 고장해석

2.1 FMEA 적용

미국의 항공우주국(NASA)에서 인공위성을 비롯한 우주개발계획에 고장모드 및 영향분석(FMEA)을 활용하여 신뢰성보증과 안전성평가에 많은 성과를 얻었다. 이와 같은 검증된 신뢰성기반 유지보수기법(RCM:Reliability Centered Maintenance)을 AF궤도회로 유지보수에 도입하여 설계된 시스템이나 기기의 잠재적인 고장모드를 찾아내고 시스템 가동 중 고장이 발생하였을 경우 열차운행에 미치는 영향을 검토하여 평가하고 영향이 큰 고장모드에 대하여는 적절한 예방대책을 세워 고장을 사전에 방지해야한다[2-3].

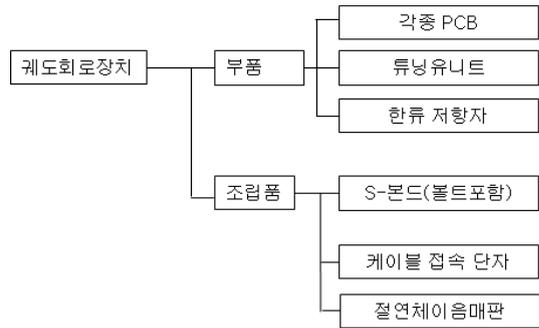
2.2 분석절차

2.2.1 기기의 구성과 기능

AF 궤도회로는 선로전환기 제어 및 신호기 현시, 차상 자동열차제어장치로의 데이터전송을 위한 핵심 설비이며 시스템 특성상 예비계를 구성할 수 없는 시스템으로 표 1과 같이 구성되어 있다.

2.2.2 분해레벨 결정

AF궤도회로는 각종 PCB와 저항자, 튜닝유닛, S-본드로 구성되어 분해레벨을 최소단위까지 설정하여 그림 1과 같이 고장모드 및 영향분석(FMEA)를 실시하였다.



[그림 1] FMEA 분해 단계
[Fig. 1] FMEA disintegration level

[표 1] AF궤도회로의 기능
[Table 1] Function of Audio frequency track circuit unit

구성 요소	기능	구성 요소	기능
전원 장치	궤도회로 장치에 전원공급	방향 제어 PCB	양방향궤도회로 전송위치 변경
송신 PCB	열차검지 및 텔레그램 전송주파수 생성	전송 제어 PCB	열차점유시 FSK 신호를 PSK신호로 변경
증폭 PCB	송신전압을 현장 궤도회로로 증폭하여 전송	한류 저항	열차점유시 과전류에 의한 증폭PCB보호
수신 PCB	현장 궤도전압을 수신, 복조 PCB로 전송	S-본드	인접회로와 전기적 분리 및 전차선전류 분배
복조 PCB	현장수신주파수 및 레벨 이상 유무 검증	튜닝 유닛	S본드와 직병렬 공진, 궤도회로 분리
수신 2PCB	복조PCB 수신 데이터 검증	절연 이음매판	분기부궤도회로의 물리적, 전기적 절연
계전기 PCB	열차유무 검지, 전자연동장치로 정보전송	케이블	신호기계실⇔현장간 정보 송·수신

2.2.3 고장모드 구분 및 평가

고장등급을 설정하기 위해 부품 별 기능적 고장의 중요도 및 고장모드, 고장발생횟수 등 열차운행에 지장을 주는 부분을 검토하였으며, 신뢰성보증을 위한 대책을 결정하는 중요한 절차이기 때문에 유지보수요원들의 심도 있는 의견을 충분히 반영하여 결정하였다.

[표 2] C1 평가점과 C2 평가점

[Table 2] C1 Valuation point & C2 Valuation point

구분	기능적 고장의 중요도	C1 평가점	고장 모드	열차 지연	C2 평가점
즉시 조치 가능	논리접유	1	치명 고장	10분 이상	15
	퓨즈단선	2			
	전원장치	3			
즉시 조치 불가능	각종 PCB 고장	4	운행 지연	5분 이상 ~ 10분 미만	10
	한류저항	5	기능 고장	2분 이상 ~ 5분 미만	5
현장 튜닝유닛	6				
인터페이스 케이블	7				
즉시 조치 불가능	S-본드 고정볼트	8	단순 고장	2분 미만	2
	절연체이음매판 절연파괴	9			
	현장 케이블 절연파괴	10			

[표 3] C3 평가점과 고장 등급

[Table 3] C3 Valuation point & Fault class

발생 횟수	C3 평가점	발생 횟수	C3 평가점	고장 등급	CS 치명도 평점
3이하	1	8	6	I	9점이상 ~
4	2	9	7	II	5점이상 ~ 8점미만
5	3	10	8		
6	4	11	9	III	2점이상 ~ 5점미만
7	5	12이상	10	IV	2점이하

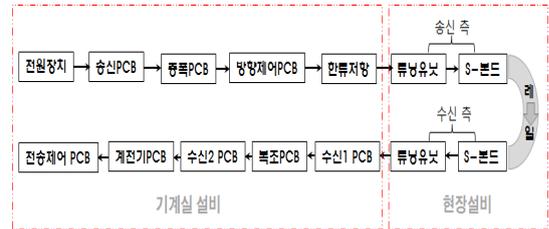
또한 고장등급은 고장이 어떤 영향을 미치는 가를 객관적으로 평가하기 위해 결정하는 것으로 표 2, 표 3과 같이 기능적 고장의 중요도를 C₁, 고장이 열차에 미치는 영향을 C₂, 발생횟수를 C₃로 구분하였고 식 (1)에 의해 고장등급 C_s를 계산하였다[4-5].

$$C_s = \sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3} \quad (1)$$

2.1.4 신뢰성 블록

전자연동장치 및 자동열차제어장치는 2 Out of 3시스템으로 구성되어 한 대의 시스템에 고장이 발생하더라도 정상적으로 열차를 제어할 수 있으나 AF궤도회로의 경우 그림 2와 같이 직렬계로 구성되어 하나의 구성요소가

고장이 발생하면 선로전환기 및 신호기를 제어 할 수 없어 열차를 자동으로 운행시킬 수 없다.



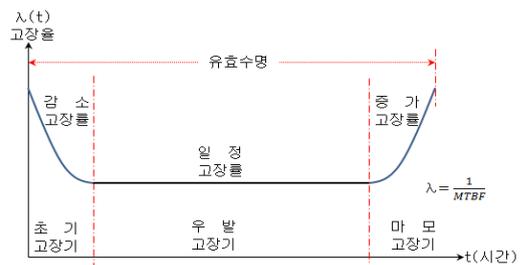
[그림 2] AF궤도회로 신뢰도 블록

[Fig. 2] Audio frequency track circuit reliability block

전원과 한류저항, 계전기로 구성된 직류, 교류궤도회로와는 달리 열차검지와 열차제어데이터를 전송하는 AF 궤도회로는 높은 신뢰도가 요구되어 신뢰성블록도 (Confidence Block)를 작성하여 고장모드 및 영향분석 (FMEA)을 실시하였다[6-7].

2.1.5 고장유형 분석

AF궤도회로는 기계실에 각종 PCB가 설치되어있고 현장에는 튜닝유닛과 S-본드로 구성되어 설비의 고장은 시간적 변화에 의해 그림 3의 욕조곡선(Bath-tub curb)과 같이 세 가지 유형으로 분류 할 수 있다. 감소고장률형 (DFR : Decreasing Failure Rate)은 설계결함, 설치오류등으로 초기에는 고장률이 높으나 시간에 따라 결함이 제거되어 고장률이 낮아지며, 일정고장률형(CFR : Constance Failure Rate)은 시간에 관계없이 고장률이 일정하고, 증가고장률형(IFR : Increase Failure Rate)은 고장률이 사용 시간에 따라 고장률이 상승한다[1,4]. 이러한 점을 착안하여 고장사태에 대해 평균고장간격(MTBF)과 평균복구간격(MTTR), 유효성(Availability)을 산출하고 초기고장기, 우발고장기, 마모고장기 별 고장유형 분석을 통해 신뢰성 기반유지보수(RCM)를 실시하였다.



[그림 3] 욕조 곡선

[Fig. 3] Bath-tub curve

2.1.6 FMEA 분석

AF궤도회로의 부품은 전기적 고장과 기계적 고장으로 구분할 수 있으며, 전기적 고장은 기계실의 각종 전자부품의 소손과 접속불량, 선로 변에 설치된 튜닝유닛 내부 전자부품에서 고장이 발생하고, 기계적인 고장은 기계실의 궤도계전기 점접촉 불량과 선로 변에 설치된 S-본드 고정볼트 절손 및 이완에 따라 궤도회로 낙하 또는 논리점유가 발생한다[6]. 표 4는 대전도시철도 275개소 궤도회로에서 2007년부터 2012년까지 발생한 고장사례를 고장모드 및 영향분석(FMEA)을 실시하여 고장등급을 산출하고 고장유형 예측한 결과이다[8].

3. 개선방안

3.1 신뢰성향상 대책

AF궤도회로장치는 궤도회로마다 각종 PCB 및 현장 튜닝유닛이 주파수별로 다르기 때문에 2중계 방식을 구성할 수 없어 FMEA분석결과를 반영하여 전원장치는 2개의 궤도회로 당 1개의 전원장치가 설치된 것을 1개 궤도회로에 전원장치를 독립설치하여 테스트 중에 있으며, 퓨즈단선 여부 확인이 용이하도록 외부에 LED를 설치하여 유지보수시간을 단축하였다.

[표 4] FMEA 분석과 고장 종류 추정
[Table 4] FMEA Analysis and fault type estimate

명칭	고장 모드	발생 횟수	발생 원인	고장 영향	평균 열차 지연	고장 평점				고장 등급	고장 유형 예측
						C1	C2	C3	CS		
전원 장치	기능	4	퓨즈 단선	궤도 낙하, 비상 제동	4	3	5	2	5.48	II	DFR
송신 PCB	기능	1	접속 불량		4	4	5	1	4.47	III	DFR
증폭 PCB	기능	4	부품 소손		4	4	5	2	6.32	II	DFR
한류 저항	기능	1	열화		4	5	5	1	5	II	DFR
논리 점유	단순	9	튜닝 불량		1	1	2	11	4.69	III	CFR
S-본드	치명	3	볼트 절손		10	8	15	1	10.95	I	IFR
수신 1PCB	기능	1	부품 소손		4	4	5	1	4.47	III	DFR
복조 PCB	기능	2	부품 소손		4	4	5	1	4.47	III	DFR
수신 2PCB	기능	1	부품 소손		4	4	5	1	4.47	III	DFR

계전기 PCB	기능	1	접촉 불량	3	4	5	1	4.47	III	CFR
정보 절체 PCB	기능	1	접촉 불량	4	4	5	1	4.47	III	DFR
튜닝 유닛	지연	2	부품 소손	5	6	10	1	7.74	II	DFR
절연 이음매판	지연	2	이물 질 제거	5	9	10	1	9.48	I	DFR

증폭PCB 소손은 기존 콘덴서(MKT : Metalized Polyester Film Capacitor)양단에 인가된 전압이 내압한계 40[V]를 1.5배 초과하여 소손된 사례로 설계결함으로 판단되어 내압성능이 우수한 콘덴서(MKP : Metalized Poly-propylene Film Capacitor)로 교체하여 200[V]범위에서도 안정적으로 동작할 수 있도록 하였다.

한류저항은 저항자체에서 발생한 140℃의 열이 캐비닛 내부에 한류저항과 각종 PCB에도 치명적인 요소로 작용하여 발열부에 자동냉각시스템을 설치하여 10℃이상 감소시킴으로서 열화에 의한 소손을 방지하였다.

논리점유는 지상~지하 인접구간 온도차에 의해 결로가 발생되어 레벨이 저하된 경우로 하절기 진입 전 수신 전압을 조정하여 논리점유 발생을 방지하였다.

수신1 PCB 및 계전기 PCB는 점검 중 인적에러에 의한 것으로 수신1 PCB 레벨측정 시 전용 계측도구를 사용토록하였고, 계전기 PCB의 접점은 인위적인 접촉을 할 수 없도록 봉인하여 탄성변화에 의한 점접촉 불량을 근본적으로 차단하였다.

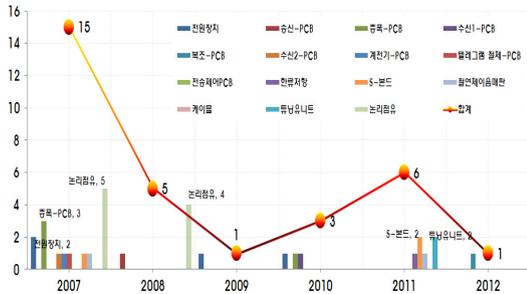
S-본드 고정용 볼트는 열차운행시 진동 등 충격과 유지보수 시 무리한 힘으로 체결하여 과조임에 의한 스트레스로 절손될 우려가 있어 토크렌치를 사용하여 80[N.m]으로 체결토록 작업방법을 개선하였다.

3.2 개선결과

3.2.1 고장발생건수 감소

그림 4와 같이 주요 고장요소는 31건 중 유지보수 시행착오에 의한 논리점유가 10회(29%)로 가장 많았으며, 전원장치 퓨즈소손 4회(12.9%), 증폭-PCB 콘덴서소손이 3회(9.7%)등이었으며, 개통 6년차인 2011년에 노후화 금속스트레스에 의한 고정볼트 절손 2회(6.45%), 신형튜닝 모듈의 콘덴서소손 2회(6.45%), 열화에 의한 저항자소손 1회(3.2%), 선로전환기 연결간 절연파괴 1회(3.2%)등으로 노후화가 진행되어 설비를 개선 보완한 결과 2012년 6월 기준 기계실설비인 복조- PCB에서만 1회(3.2%)발생

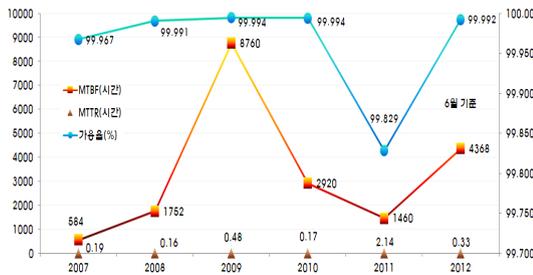
되었으며 노후·열화에 의한 고장은 발생되지 않을 것으로 판단된다.



[그림 4] 고장 곡선
[Fig. 4] Trouble curve

3.2.2 신뢰성 향상

신뢰성의 척도는 평균고장간격(MTBF)을 길게 하고, 평균복구간격(MTTR)을 짧게 하며 부품의 가용률을 높이는 것이 가장 중요하다.



[그림 5] MTBF, MTR 유효 곡선
[Fig. 5] MTBF, MTR, Availability curve

그림 4와 같이 부품노후화 및 열화가 진행되었던 2011년을 기점으로 고장모드 및 영향분석(FMEA)결과를 반영하여 설비보완 및 작업방법 개선결과 그림 5와 같이 가용률 및 평균고장간격(MTBF)이 증가되었고 평균복구간격(MTTR)이 단축되어 시스템의 신뢰성이 향상되었음을 확인할 수 있다.

4. 결론

신뢰성기반 유지보수를 위해 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)이론 연구가 활발하게 이루어 졌으나 실무에 적용시키지 못하고 경험에 의존한 유지보수를 시행함으로써 과잉정비, 유발고장 등으로 철도신호시스템의 안전성확보에 큰 문제로 대두되는 시점

에서 AF궤도회로장치의 신뢰성 및 안전성 향상을 위해 구성부품의 분해레벨을 결정하고 기능적 고장의 중요도 및 고장모드, 발생횟수, 고장 등급 별 평가점, 계량화방법 등을 제시하였고 고장모드 및 고장영향분석(FMEA) 결과에 대한 객관성을 확보하였다.

분석결과와 신뢰성확보를 위해 제작사에서 평균고장간격(MTBF)를 제공하지 않은 상태에서 개통초기 안정화단계에 진입하기 전 1년간 고장데이터는 분석데이터에서 제외하고 안정기에 도달한 최근 5년간의 고장발생현황을 고장모드 및 고장영향분석(FMEA)을 실시하여 얻은 결과로 시스템을 보완, 개선한 결과 고장발생건수 감소와 평균고장간격(MTBF) 및 가용율을 향상시켰고 평균복구간격(MTTR)을 단축시켰다.

또한 욕조곡선(Bath-tub curb)을 AF궤도회로의 모든 부품에 일괄적으로 적용하는 방법이 아닌 부품별 감소고장율형(DFR), 일정고장률형(CFR), 증가고장률형(IFR)등 고장주기에 맞게 신뢰성기반유지보수(RCM)를 시행할 수 있도록 하여 업무효율화 및 신뢰성이 향상 되었음을 확인할 수 있었다[4,9].

References

- [1] Young-Tae. Kim, Signal Control System, pp. 451-459, Tech-media, 2003.
- [2] John Moubray, Reliability-centred Maintenance, pp. 4-13, Industrial Press Inc, 1992.
- [3] Anthony M. Smith, Glenn R. Hinehcliffe, Gateway to World Class Maintenance, pp. 107-110, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [4] Sang-Young Lee, Reliability Engineering, pp 25-220, Hyungseul Publishing, 2011.
- [5] Byoung-Noh Park, Hae-Jin Joo, Chang-Hwan Lee, Sung-Soo Lim, A Study on FMEA for Railway Vehicle, 2009 Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp. 162-168, 2009.
- [6] Han-Young Kim, Jin-Choon Lee, A Study on improving for operating ATC/O system using FMECA, 2012 Spring Conference the Korean Society for Railway, pp. 711-719, 2012.
- [7] Bong-Kwan Cho, Jong-Ki Kim, Hyeon-Chyeol Hwang, Sang-Hwan Ryu, Shin-Ju Kang, Technical Consideration of Non-Insulated Audio Frequency Track-Circuit Device, 2011 Spring Conference the Korean Society for Railway, pp. 1709-1715, 2011.
- [8] In-Taek Lim, The Result Report of RCM Analysis,

Daejeon Metropolitan Transit Corp, pp. 22-24, 2011.

- [9] Ho-Yong Lee, Seok-Youn Han, Kee-Jun Park, Chul-Ho Bae, Myung-Won Suh, A Study on the Construction Methodology of Preventive Maintenance System for Urban Transit, Journal of the Korean Society for Railway, Vol 3, No. 3, pp. 129-134, 2004.

박재영(Jae-Young Park)

[정회원]



- 1996년 8월 : 고려대학교 산업대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 (공학박사)
- 2005년 1월 ~ 2007년 2월 : 한국철도공사 오송고속철도전기사무소장
- 2007년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도전기시스템학과 교수

<관심분야>

자동제어, 철도신호제어시스템, 제어계측