

도시철도 신호시스템의 절체에 따른 주파수 간섭 연구

정락교^{1*}, 김백현¹, 정의진¹
¹한국철도기술연구원

A Study on the Interference of Harmonic Frequency during the Change of Urban Transit's Signalling Systems

Rag-Gyo Jeong^{1*}, Beak-Hyun Kim¹ and Eui-Jin Joung¹

¹Korea Railroad Research Institute

요약 철도신호시스템은 열차들의 운행간격과 열차진로를 제어하는 기능을 담당함으로써 열차를 안전하고 효율적으로 운영하는 데 있어 핵심적인 역할을 수행한다. 철도신호시스템의 고장은 열차운행중지를 비롯하여 열차충돌이나 탈선등과 같은 치명적인 사고로 직결될 수 있기 때문에 시스템의 신뢰성과 안전성이 매우 중요하다. 현재까지 철도신호시스템에서는 기존의 지상신호방식이 많이 사용되어 왔으나, 지상에 설치된 신호기 현상상태를 기관사가 육안으로 확인하여 열차속도를 제어함에 따른 기관사의 인적오류 등의 사고 위험이 있다. 아울러 시스템의 수명이 다 되어 시스템절체의 필요성이 있다. 이에 따라 최근에는 컴퓨터 및 통신기술을 이용하여 열차속도제어 정보를 차량으로 송신하여 차량에서 열차속도를 제어하는 차상신호방식이 도입 및 적용되어 효과를 나타내고 있다. 수명이 다 된 신호시스템을 교체하기 위하여 승객을 위한 운행서비스를 하면서 새로운 방식으로 절체하는 것이 필요하다. 이에 본 논문에서는 열차를 운영하면서 기존의 시스템과 새로운 시스템을 혼용하여 사용하면서 절체과정의 절차와 시스템 검증을 위한 일련의 과정 중 간섭 문제에 대하여 특정한 기능을 부가하여 해결된 사례를 시험평가를 통해 검증하였다.

Abstract The railway signalling system plays an essential role in the safe and efficient train operation as serving control functions of train operation intervals and train routes. The reliability and safety of the system are very important because the failure of the railway signalling system can lead to train collision or derailment as well as train operation stop. Until now, in railway signalling system the conventional wayside signal mode has been used generally. There are, however, the risk of accidents such as human mistakes caused by that the driver identifies the signal lamp status and controls train speed with the naked eye. It is also necessary to refurbish the obsolete system. Thereby, It is being effective that the onboard signal mode has been recently introduced and applied in order to transmit the speed control information to train by using the computer and communication equipment. It is necessary to switch over the system in a way while providing passengers with an operation service to replace the obsolete signal system. In this paper, we verify the cases through trial assessment which are solved by the way of adding specific functionalities in the problems of interference among the procedure of switch-over processes and a serial of processes for system verification while a train is operated in the new system in parallel to the existing system.

Key Words : Railway Signalling System, Obsolete signal system, New System, Existing System, Switch-over

1. 서론

세계적으로 철도 건설·운영이후 신호시스템의 기술

발전은 현장을 중심으로 지속적으로 이루어져 왔다. 이와 더불어 새로운 철도시스템 개발과 더불어 전기·전자·컴퓨터의 발전과 연계되어 새로운 신호시스템의 개발 및

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업 “승객여정선택형 대중교통(PRT) 운영기술개발”연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 정락교(rgjeong@krrri.re.kr)

접수일 09년 09월 18일

수정일 (1차 09년 12월 05일, 2차 10년 01월 29일)

게재확정일 10년 02월 24일

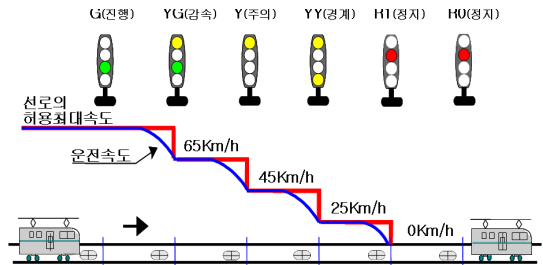
적용이 되고 있다. 국내 도시철도의 경우에도 1974년 서울지하철 1호선 도입·건설 이후 신호시스템은 비약적인 발전을 이룩하여 왔다. 현재 도시철도는 다른 도시교통 수단과의 경쟁 속에서 승객들을 유치하기 위해 이용 방법의 용이함은 물론, 짧은 열차 대기시간과 신속하고 편안한 여행을 제공해야 하며, 동시에 안전성과 신뢰성을 확보해야 한다. 이러한 목적들을 달성하기 위해 신호시스템은 고속주행 및 교통량 증가 시에도 안전한 열차 운행을 위한 자동운전 모드에서의 부드럽고 신속한 열차 운행을 지원해야 하고 안전하게 열차 출입문을 제어하여야 하며, 승강장 및 열차 내의 승객들을 위한 정보를 제공해야 한다. 또한, 신호시스템은 고도의 자동제어가 요구되는 본선과 차량기지에서 열차운행의 감시 및 통제를 위한 수단을 시스템 운영자에게 제공하여야 하며, 유지보수 활동을 지원함으로써 운행경비를 줄일 수 있어야 한다[1, 2].

도시철도 운영 경험 30여년의 시점에서 볼 때, 시스템 개량 방법 및 절차 등에 대하여 준비하고 계획되어져야 한다. 도시철도 차량의 경우는 도시철도법 하에서 25년 운행 후 정밀진단을 통해 5년의 기간 동안 수명을 연장할 수 있도록 정의되어 있으나, 신호시스템의 경우는 체계적으로 정립되어 있지 않으므로 개량 방법 및 절차에 관한 계획 수립시 다양한 요소들을 충분히 검토하여야 한다 [3]. 이상적인 접근 방법들을 포함한 비용 및 효율성과 안전성을 토대로 지속적인 절충을 통한 방안을 마련할 필요가 있다. 특히, 전자장비인 신호시스템은 전 수명주기 측면을 고려하여 선택되어져야 한다. 기존의 계전기 등 기계적인 부분이 줄어들고 전자회로기관으로부터 통신, S/W 등의 결합으로 기능을 구현한다. 운영환경 및 유지보수 체계, 운영할 인력 등을 고려한 검토와 시스템 전체 계획이 수립될 필요가 있다. 신호시스템을 교체하기 위하여 승객을 위한 운행서비스를 유지하면서 새로운 시스템으로 절체하는 것이 필요하다. 이러한 도시철도의 신호시스템을 절체하기 위하여 현재의 신호시스템은 현재 폐색 구간별 지상에 설치된 신호기의 현시 정보와 신호기에 연동되는 ATS (Automatic Train Stop) 장치에 의한 열차 운전 방식을 사용하고 있으나, 고밀도 운전 및 1인 승무 기반 마련 등을 위해 새로운 신호시스템을 설치하여 시험 중에 있다[4]. 이에 본 논문에서는 ATS와 자동운행이 가능한 ATP/ATO (Automatic Train Protection/Automatic Train Operation) 시스템이 일정기간 중첩사용 하다가 궁극적으로 ATP/ATO로 교체되어 열차의 안전운행 확보 및 승객 서비스 향상에 기여할 수 있도록 시스템 절체과정의 절차와 시스템 검증을 위한 일련의 과정 중 간섭의 문제점을 시험평가측면에서 확인하고 보완하여 대안을 제시하였다.

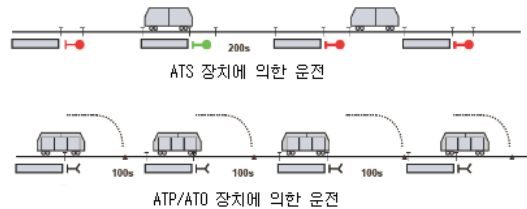
2. 중첩시스템

2.1 중첩사용시스템 비교

서울메트로 2호선은 현재 기존의 선로변 신호기와 ATS 안전장치에 의한 열차운전제어 방식을 ATP/ATO 장치에 의한 자동운전제어방식의 열차제어시스템으로 개량중에 있다. 그림 1은 기존 ATS 지상신호방식의 개념을 설명한 것이다.



[그림 1] ATS 지상신호방식의 개념

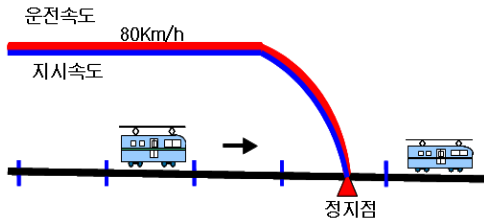


[그림 2] ATS와 ATP/ATO 장치의 개요

그림 2는 기존의 ATS 장치와 새로 도입한 ATP/ATO 장치의 개요를 나타낸 것으로 ATS 장치의 경우 선로변의 신호기 현시정보를 운전자가 육안으로 확인하여 운전하는 방식이며, 신규로 도입한 ATP/ATO 장치는 지상 AF(Audio Frequency) 궤도회로에 의한 차상운행의 통신을 통해 목표속도와 이동거리 정보를 제공해 주고, 이 수신정보를 바탕으로 차상제어장치가 자동으로 선행 열차와의 안전거리를 유지하면서 운전하는 방식을 나타내고 있다.

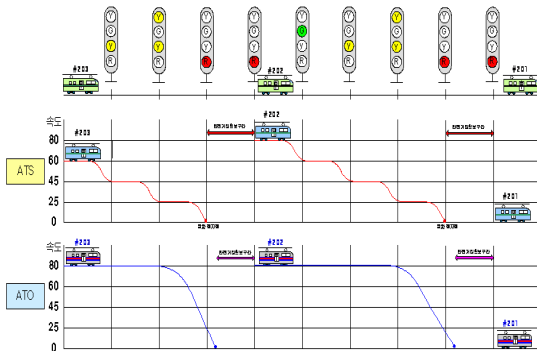
열차이동의 제어기능과 열차간 안전한 이격 기능을 제공하며 열차운전 명령을 자동으로 실행하는 ATP/ATO 장치는 선행열차의 위치, 운행진로 등의 선로의 제반조건에 따른 정보코드가 텔레그램으로 지상과 차상간 궤도회로, TWC(Train Wayside Communication) 루프 등의 전송매체를 통해 차상제어장치로 전송된다. 차상에서는 지상으로부터 전송된 운행정보를 바탕으로 차량의 제동특성을 고려하여 안전거리를 유지하면서 속도제어를 위한 제

동곡선을 생성하고 이에 따라 자동 또는 수동으로 운전하는 시스템이다. 그림 3은 궤도회로를 통해 폐색구간별 차상으로 전송되는 텔레그램의 정보 내용들과 선행열차와의 안전거리를 위한 정지점 계산, 정지점에 열차가 정지하기 위한 차상 제어장치에서 생성하는 목표속도인 운전속도, 그리고 운전속도를 추종하면서 자동으로 운전하는 실제 운전속도인 지시속도 등을 나타낸 ATP/ATO 장치에 의한 자동운전제어 곡선을 나타내었다.



[그림 3] ATP/ATO에 의한 자동운전제어 곡선

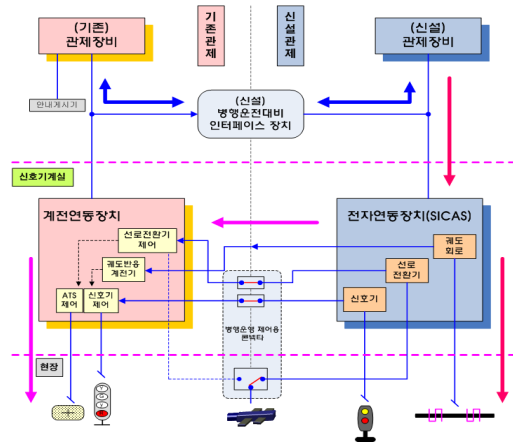
기존의 ATS 시스템을 신규의 ATP/ATO 시스템으로 완전하게 절체하는 동안 승객 서비스의 중단이 없도록 일정기간 시스템을 중첩 사용하는 방안에 대한 개념을 그림 4에 나타내었다.



[그림 4] ATS와 ATP/ATO장치의 중첩운전개념

2.2 중첩사용시스템 인터페이스

그림 5에 기존의 ATS 시스템에 구축되었던 관제 및 계전연동장치와 신규의 ATP/ATO 시스템 구축을 위해 필요한 관제설비 및 전자연동장치 간의 인터페이스 구성도를 나타내었으며, 표 1에 ATS와 ATP/ATO 장치를 비교하였다.



[그림 5] 중첩사용 인터페이스 구성도

[표 1] ATS와 ATP/ATO 장치 비교

구분	현행 ATS	개량 ATP/ATO
제어 방식	<ul style="list-style-type: none"> · 지상신호 중심 다변주식 속도조사식 · 절대안전거리 확보 · 열차간 운행간격 	<ul style="list-style-type: none"> · 차상신호 중심 Distance to go (거리 중심 제어) · 상호안전거리 확보 · 고밀도 운전 기능
차/지상 정보	<ul style="list-style-type: none"> · 점 제어식 ATS 	<ul style="list-style-type: none"> · 연속신호 다양한 정보의 전송 - 텔레그램 정보 - 목표속도 - 목표거리 - 정차지점 - 다음궤도 정보 - 출입문 해정 - 운행방향
제동 방식	<ul style="list-style-type: none"> · 다단계 수동감속 - Free, 40, 25, 0km/h 	<ul style="list-style-type: none"> · One-Step 자동감속 - 일단 제동 (80-0km/h로 한 번에 제동)
비고	<ul style="list-style-type: none"> · 승무원 수동운전 · 2인 승무 	<ul style="list-style-type: none"> · 고밀도 운전 - 선로용량증대 및 운행효율 향상 - 탄력적 열차운행으로 수송력향상 · 1인(유인) 자동운전(ATO)

기존 차량은 차상신호가 아닌 지상신호에 따른 ATS에 의한 열차운행만 가능하므로 기존의 폐색 시스템을 사용한다. 따라서 기존차량을 위한 진로 설정이 이루어지며, 전 역사에 출발신호기 및 ATS장치를 제어한다. 기존설비의 중첩운행 인터페이스를 장치별로 정리하면 다음과 같다.

- 신호방식 : 기존방식과 동일하다.

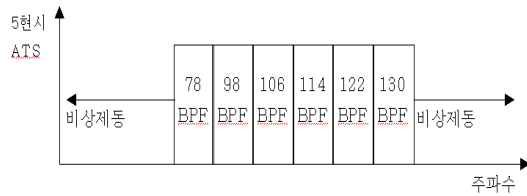
- 선로전환기 : 전자연동장치에서 제어하며, 선로전환기 위치정보를 공유한다.
- 궤도회로 : 궤도회로에서 정보를 수신하여 위상 변환기를 제어하여 기존 계전기 입력 정보로 활용한다.
- 관제 설비 : 기존방식과 동일하며 선로전환기를 새로운 설비가 제어하므로 선로전환기 제어를 위한 정보 교환을 위해서 새로운 설비에 진로제어를 위한 인터페이스가 이루어진다.
- 진로제어 : 제어명령은 기존과 동일하며, 계전연동장치를 위한 선로전환기 위치정보 및 궤도회로 정보를 신설 설비와 공유하여 연동조건을 점검한다.

3. 시험항목 도출 및 시험결과

3.1 시험항목 도출

ATS 지상장치와 ATP/ATO 차상장치 및 ATS 차상장치와 ATP/ATO 지상장치간의 상호 영향을 살펴보기 위한 시험결과에 따르면, ATS 지상 장치로 인한 ATP/ATO 차상장치의 이상동작은 초기 설치상의 에러이외는 없는 것으로 판단되어 시운전 등을 통해 안정화단계에 들어설 것으로 보인다. 다만 ATP/ATO 지상장치에 의해 ATS 차량에 이상 동작이 유발되는 것을 방지하는 차원에서 ATS 차량에 설치된 ATS 차상장치는 ATS 지상자로부터 제한속도 정보를 받고 차량의 차축에 설치된 속도검출기로부터 열차의 실제속도 정보를 수신하여 ATS 수신기에서 논리적 회로에 의해 판단하여 열차의 안전운행을 지원하도록 설계되어 있다.

ATS 차량이 ATS 지상자를 통과할 때, 지상자의 공진 주파수에 해당하는 신호가 차량의 ATS 차상장치에 수신되어 ATS 기능이 동작되도록 설계되어 있다. 동작특성을 살펴보면 78 [kHz] 이하, 130 [kHz] 이상에서는 즉시 비상제동이 체결되며, 또한 기본발진 주파수 78 [kHz], 진행신호 주파수 98 [kHz], 주의신호주파수 106 [kHz], 경계신호 주파수 114 [kHz], 정지신호 주파수 122 [kHz], 130 [kHz] 로써 BPF(Band-Pass Filter)로 선별하여 각각의 제한속도신호를 차상으로 전달하도록 되어 있다. 특히 R₀ 신호구간(지상자 공진주파수: 130kHz) 진입 시에는 ATS차상장치의 제어논리에 따라 즉시 정지하도록 설계되어 있다.



[그림 6] 5현시 ATS 차상장치의 동작 주파수

그림 6과 같은 동작특성은 ATS 차상장치의 주변에 설계 시 고려되지 않은 강한 전자파 환경이 조성될 경우, 정지(R₀) 신호구간과 유사한 현상이 발생할 것으로 분석되었으며, 실제로 ATP /ATO 지상장치 설치 후, 위와 같은 현상이 S 본드[궤도회로 구성설비] 주변에서 발생되었던 경우가 있었으나, ATS 차량 진입시 S 본드의 송신전압을 차단함으로써, S 본드 주변에서의 ATS 차량 이상동작을 방지하는 기능을 특별히 부가한 TODS(Train Occupancy Detection System)를 해당 개소에 설치하였으며, 이를 검증하는 차원에서 시험항목을 도출하여 시험을 실시하였다. 또한 ATP/ATO에 사용되는 궤도회로 주파수는 9.5 [kHz], 10.5 [kHz], 11.5 [kHz], 12.5 [kHz], 13.5 [kHz], 14.5 [kHz], 15.5 [kHz], 16.5 [kHz] 으로서 ATS 주파수인 98 [kHz], 106 [kHz], 114 [kHz], 122 [kHz], 130 [kHz] 와 상당히 떨어져 있어 영향을 미치지 않을 수 있다. 그러나 궤도회로 출력이 높을 경우, 궤도회로 주파수를 기본파로 하는 고조파의 영향이 고려되어야 한다. 고조파의 경우 홀수 고조파가 짝수 고조파보다 출력이 높기 때문에 영향을 미칠 확률이 높으며, ATS 차상장치가 ATS 주파수의 ±3 [kHz] 범위에 대해서 동작한다는 점에 착안하여 궤도회로 고조파의 영향을 확인하여 주파수 범위를 살펴보면 표 2와 같다.

[표 2] ATS 주파수 응답 범위

구분	현시 신호				
	G	Y	YY	R1	R0
기본 ATS 주파수(kHz)	98	106	114	122	130
-3kHz	95.06	102.82	110.58	118.34	126.1
+3kHz	100.94	109.18	117.42	125.66	133.9

ATS 주파수 응답 범위와 각 궤도회로 주파수를 기본파로 하는 주파수의 고조파를 계산하여 서로 영향을 미칠 수 있는 고조파를 계산한 것을 여러 고조파 중 영향이 큰 홀수 고조파를 대상으로 대입해 보면, 표 3과 같이 굵

은 글꼴로 표시한 주파수가 ATS와 관련됨을 알 수 있다.

[표 3] ATS에 영향을 미치는 궤도회로 고조파

고조파차수	궤도회로 주파수							
	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5
1	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5
2	19	21	23	25	27	29	31	33
3	28.5	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5	46.5	49.5
4	38	42	46	50	54	58	62	66
5	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5	72.5	77.5	82.5
6	57	63	69	75	81	87	93	99
7	66.5	73.5	80.5	87.5	94.5	101.5	108.5	115.5
8	76	84	92	100	108	116	124	132
9	85.5	94.5	103.5	112.5	121.5	130.5	139.5	148.5
10	95	105	115	125	135	145	155	165
11	104.5	115.5	126.5	137.5	148.5	159.5	170.5	181.5
12	114	126	138	150	162	174	186	198
13	123.5	136.5	149.5	162.5	175.5	188.5	201.5	214.5
14	133	147	161	175	189	203	217	231
15	142.5	157.5	172.5	187.5	202.5	217.5	232.5	247.5

표 3과 같이 7, 9, 11, 13차수의 고조파가 ATS 동작에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 그러나 고조파 차수가 높기 때문에 ATS에 영향을 미칠지 여부는 ATS 시험을 통해 검증할 필요가 있다.

3.2 ATS 간섭시험 및 결과 분석

3.2.1 시험방법

- TODS를 On/Off한다.
- 시험구간(신도림역~서울대역)을 20 [km/h] 이내로 운행한다.
- 운행중 진행(G) 신호에서 ATS 정지(R₀)신호로 현시 되는 지점을 확인한다.
- 관구도에 따라 신호설비를 확인한다.
- 해당지점까지 퇴행 운전하여 ATS 발진부의 신호를 확인한다.
- FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 수행하여 주파수 분포를 확인한다.
- 기지(신정역)로 회차한다.

3.2.2 본선시험 및 결과

- ① 시험장소(주행방향) : 신도림 - 신대방
 - 조건 : TODS On /ATS On
 - 예상결과 : TODS 설치의 효과 확인, ATS 오동작 미발생

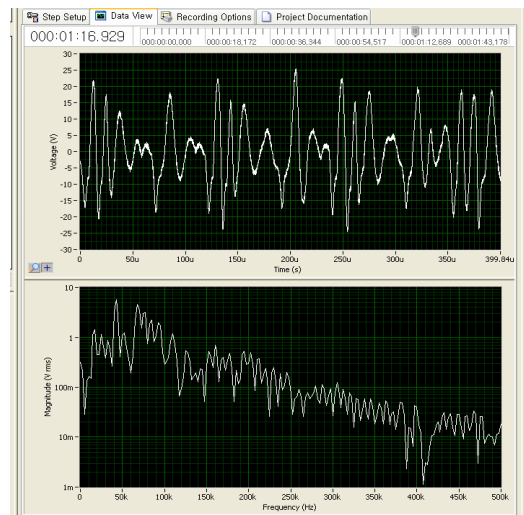
- 결과 : ATS 오동작 발생하지 않음



[그림 7] ATS 차상자 기본 발진주파수

② 신대방 - 서울대입구역

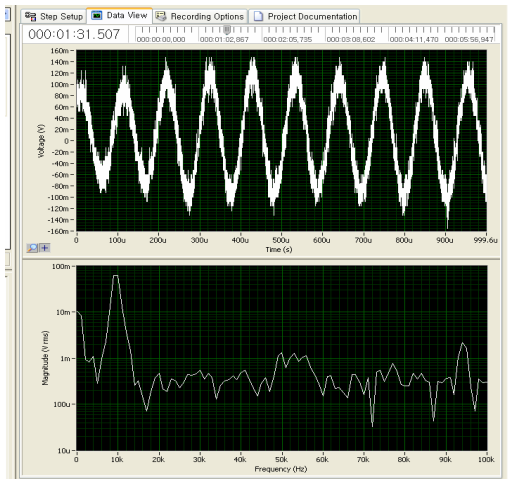
- 조건 : TODS Off/ATS On
- 예상결과 : TODS 없는 경우의 ATS 오동작 상황 파악, ATS 오동작 발생
- 결과 : 구간에 따라 ATS의 오동작 발생



[그림 8] ATS 오동작 발생 구간에서의 궤도회로 신호

③ 서울대입구역 - 신대방

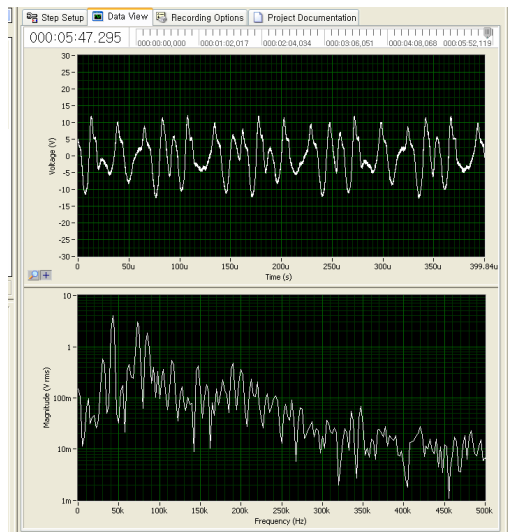
- 조건 : TODS Off/ ATS Off
- 예상결과 : ATS 발진주파수 없을 경우에 궤도회로 주파수 확인
- 결과 : 미약하지만 궤도회로 주파수 수신



[그림 9] ATS 발진주파수 없을 경우의 궤도회로 신호

④ 신대방 - 신도림역

- 조건 : TODS Off/ ATS On
- 예상결과 : TODS 없는 경우의 ATS 오동작 상황 파악, ATS 오동작 발생
- 결과 : 구간에 따라 ATS의 오동작 발생



[그림 10] ATS 오동작 발생 구간에서의 궤도회로 신호

3.2.3 결과분석

본 시험구간의 TODS On 상태의 시험에서는 ATS 장치에 오동작이 일어나는 경우는 없었다. 그러나 TODS의 Off 후 시험에서 ATS 오동작이 발생한 경우의 주파수를 분석하여 보면, 다른 궤도회로에 비하여 많이 왜곡된 형

태로 되어 있다. 특이한 점은 40 [kHz] 부근에서의 신호가 4~6 [Vrms] 정도로 78 [kHz] 기본 발진주파수 보다 큰 경우 오동작이 발생하고 그 이하인 2~3 [Vrms] 경우에는 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

4. 결론

ATP/ATO 동작에 사용되는 궤도회로의 수신레벨을 조정하기 위해 일부구간 송신전압레벨이 높게 설정되어 있으며, 이 구간에서 ATS 오동작이 발생함을 확인하였다. ATS 차상장치가 공진을 이용한 변조회로를 이용하여 ATS 신호를 수신하고, 차상 ATS 수신회로의 주파수 필터회로 특성이 아날로그 회로로 구성되어 있어 필터값이 제대로 설정되어 있지 않거나, 부품의 노후화로 인해 필터기능을 상실할 수 있는 등 정확한 ATS 동작이 어렵다는 점에서 장치 신뢰도에 대한 검토가 필요해 보인다. ATS 장치의 오동작을 방지하기 위해서는 ATS 차상장치의 주파수 필터회로 동작특성의 신뢰도를 높이고, 해당주파수 이외의 주파수 신호를 수신하더라도 ATS 차상장치가 오류로 동작하지 않도록 회로를 보완할 필요가 있다.

현재 새로운 궤도회로 수신레벨에 맞추어서 송신전압을 설정해 놓은 상황에서 궤도회로의 일부 구간은 궤도회로의 특성 및 거리 등에 따라 송신전압을 높게 설정할 수밖에 없는 상황이 있을 수 있으며, 이 경우 궤도회로 송신전압의 조정 없이 해당 구간의 전압을 인위적으로 낮추는 기능을 추가하여 구현한 TODS 장치를 사용하는 것도 하나의 해결 방안이라고 판단된다. 다만 시스템 절체과정을 면밀하게 추적하여 절체과정을 체계화할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 정락교 외, “서울메트로 2호선 ATP/ATO차량도입에 따른 기존 신호설비의 적합성 검토”, 결과보고서, 11월, 2008.
- [2] 정락교 외 “신호시스템 개량에 대한 고찰”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 7월, 2008.
- [3] 정락교 외 “신호시스템 개량에 미치는 인자분석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 10월, 2008.
- [4] 정락교 외, “신호시스템 절체방안 검증연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 7월, 2009.

정 락 교(Rag-gyo Jeong)

[정회원]



- 1991년 2월 : 인하대학교 전기공학(공학사)
- 1999년 8월 : 인하대학교 전기공학(공학석사)
- 2005년 2월 : 인하대학교 전기공학(공학박사)
- 1990년 12월 ~ 1994년 12월 : 한진중공업 사원
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 책임연구원

<관심분야>

전기전자, 열차제어, 시스템엔지니어링

김 백 현(Baek-hyun Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 전자공학(공학사)
- 1996년 2월 : 인하대학교 전자공학(공학석사)
- 2003년 2월 : 인하대학교 전자공학(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 선임연구원

<관심분야>

전기전자, 철도통신, 열차제어

정 의 진(Eui-Jin Joung)

[정회원]



- 1995년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2005년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도시스템 안전성분석, 철도 안전필수 S/W 안전성 연구