



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](#)

2019年 2月

2019年 2月
博士學位論文

博士學位論文

가칭주파수 궤도회로의
고조파분석에 의한 최적화 방안 연구

가칭주파수 궤도회로의
고조파분석에 의한
최적화 방안 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

安 鍾 伯

安 鍾 伯

가청주파수 궤도회로의 고조파분석에 의한 최적화 방안 연구

A Study on Optimized Method by Harmonics Analysis
of Audio Frequency Track Circuit

2019年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

安 鍾 伯

가칭주파수 궤도회로의 고조파분석에 의한 최적화 방안 연구

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學博士學位 申請 論文으로 提出함.

2018年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

安 鍾 伯

安鍾伯의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 김남훈 印

委員 韓國鐵道公社 工學博士 박채옥 印

委員 韓國鐵道技術研究院 工學博士 김용규 印

委員 朝鮮大學校 教授 최연옥 印

委員 朝鮮大學校 教授 조금배 印

2018年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이론적 배경	5
제1절 열차제어시스템	5
1. ATS 장치	9
2. ATP 장치	10
3. ATO 장치	11
4. ATC 장치	12
5. CBTC 장치	13
제2절 궤도회로장치	16
1. 궤도회로의 원리	17
2. 궤도회로의 역할	19
3. 궤도회로의 구성	21
4. 궤도회로의 분류	22
제3절 AF 궤도회로 인터페이스	28
1. AF 궤도회로의 구조 및 기능	28
2. 고조파 특성	38
3. 전차선 귀선전류	39

제3장 귀선전류 고조파 측정 및 분석	42
제1절 시험 및 측정	42
제2절 귀선전류 고조파 측정방법 및 기준	43
제3절 귀선전류 고조파 측정	45
1. 귀선전류 측정	45
2. 귀선전류 고조파 측정	48
3. 측정결과	51
제4절 고장(장애)사례 분석	52
1. 운행선 구간 AF 궤도회로 장애분석	52
2. 건설 구간 AF 궤도회로 장애분석	53
제5절 측정결과 및 장애 고찰	53
제4장 궤도회로 최적화 설계	54
제1절 변조방식	54
1. BPF(Band Pass Filter)	54
2. FSK(Frequency Shift Keying)	55
3. BPSK(Binary Phase Shift Keying)	56
제2절 AF 궤도회로의 고조파 영향에 대한 설계 요구조건	57
1. 기존 고조파 측정자료 분석	57
2. 설계 요구조건	61

제3절 설계방안	63
1. 기존 설계방식 분석	63
2. 고조파 영향 저감을 위한 최적화 설계	66
제4절 시뮬레이션 및 결과고찰	74
1. BPSK 방식 송/수신 모듈 변/복조 시험	74
2. 고조파 영향 비교 시험	78
3. 고조파 영향 시험	91
4. 시험결과	93
제5장 결 론	99
참고문헌	101

표 목 차

표 1. 지상장치 방식과 차상장치 방식의 비교	7
표 2. 궤도회로 구성기기	21
표 3. 전압 안정기의 출력전압 변동	25
표 4. 일반철도 AF 궤도회로의 주파수 사용 대역	29
표 5. 송신모듈 특성	30
표 6. 수신모듈 특성	31
표 7. 수신입력 전류	31
표 8. 주파수 유형별 궤도전압	33
표 9. 주파수 유형별 인접궤도 허용전압	33
표 10. 주파수 유형별 저출력 궤도전압	34
표 11. 주파수 유형별 궤도전압(중단용)	34
표 12. 주파수 유형별 저출력 궤도전압(중단용)	35
표 13. 궤도회로 길이와 케이블의 길이	36
표 14. 고조파관련 궤도회로 주파수 비교	39
표 15. 귀선전류 고조파 측정장소 선정	43
표 16. 귀선전류 시험항목 및 기준	45
표 17. 궤도회로 주파수별 고조파 제한치	45
표 18. 160km/h 주행시 정상상태 귀선전류 측정 결과	46
표 19. 160km/h 주행시 정상상태 귀선전류 고조파 측정 결과	49
표 20. 최근 3년간 AF궤도회로 구성부품별 장애 현황	52

표 21. 모의시험 구성품	58
표 22. AF케도회로장치 면역성 시험방법	59
표 23. 모의시험 측정 결과	59
표 24. 부정 낙하 현황	61
표 25. 설계 요구사항	62
표 26. T121 FSK 반송파 주파수와 인접 고조파 주파수	67
표 27. BPSK 반송파 주파수와 인접 고조파 주파수	67
표 28. BPSK 타입별 데이터 코드 사양	73
표 29. BPSK 고조파 입력 시 필터 출력 FFT 분석	91
표 30. 레일단 고조파 인가 시 수신 데이터	93
표 31. BPSK 고조파 레벨에 따른 수신 데이터 오류율	94

그림 목차

그림 1. 국내에서 개발된 차량	5
그림 2. 열차제어시스템 변천 과정	6
그림 3. 열차제어방식	7
그림 4. 열차제어시스템의 구성	8
그림 5. ATS 장치 구성도	9
그림 6. ATS 장치 동작계통	10
그림 7. ATO 속도제어곡선	11
그림 8. ATC, ATP, ATO, ATS 사이의 상관관계	12
그림 9. CBTC 장치의 기본 구성	13
그림 10. 철도교통관제센터	16
그림 11. 평상시 궤도회로 구성도	18
그림 12. 열차 점유시 궤도회로 구성도	19
그림 13. 궤도회로의 구성	21
그림 14. 교류궤도회로 구성	22
그림 15. 정류궤도회로 구성	23
그림 16. 고전압 임펄스 궤도회로 구성	24
그림 17. 고전압 임펄스 궤도회로 구성도	24
그림 18. 송신기 구성도 및 임펄스 파형	25
그림 19. 수신기 구성도	26
그림 20. Impedance bond의 원리	26

그림 21. AF 궤도회로 구성도	27
그림 22. AF 궤도회로의 구성	29
그림 23. 송신기 회로 구성도	30
그림 24. 수신기 회로 구성도	31
그림 25. AF 궤도회로의 전기적 분리 이음매	32
그림 26. 귀선 전류 귀환 회로도	40
그림 27. 귀선 전류와 접지 전류 예측값	41
그림 28. 귀선전류 및 귀선전류의 고조파 측정대상 위치	44
그림 29. 귀선전류 및 귀선전류 고조파 측정 시험 구성도	44
그림 30. 노안역 인근 임피던스 본드 및 센서 설치	46
그림 31. 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 1회	47
그림 32. 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 2회	47
그림 33. 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 3회	48
그림 34. 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 1회	49
그림 35. 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 2회	50
그림 36. 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 3회	50
그림 37. 최근 3년간 원인별 장애현황	52
그림 38. BPF 필터 주파수 응답곡선	54
그림 39. FSK 변조	55
그림 40. BPSK 변조	56
그림 41. BPSK 복조 및 데이터 처리	57
그림 42. 모의시험 구성	58

그림 43. 임피던스 본드 고조파 측정 - 시간 그래프	60
그림 44. 임피던스 본드 고조파 측정 - 주파수 그래프	61
그림 45. 연구 및 시험계통도	62
그림 46. 수신모듈 필터부	63
그림 47. 수신모듈 Sweep 입력 신호에 대한 BPF 출력 파형	63
그림 48. 필터부 입력 파형	64
그림 49. 필터부 출력 파형	64
그림 50. 고조파 노이즈가 인입된 필터부 입력 파형	64
그림 51. 고조파 노이즈가 제거되지 못한 필터부 출력 파형	65
그림 52. 수신모듈 복조(검파)부	65
그림 53. 고조파 노이즈가 제거되지 못한 필터부 출력 파형	66
그림 54. 비정상적으로 검파된 하측 주파수 코드	66
그림 55. 송신모듈 블록 다이어그램	68
그림 56. 수신모듈 블록 다이어그램	69
그림 57. BPSK Generator	69
그림 58. BPSK Phase Detector	70
그림 59. BPSK Carrier Extraction Circuit	70
그림 60. NRZI Clock Extraction Circuit	71
그림 61. 4 th Low Pass Filter(송신 모듈)	71
그림 62. BPF(Band Pass Filter)(수신 모듈)	72
그림 63. 수신모듈 Sweep 입력 신호에 대한 BPF 출력 파형	72
그림 64. Matched Filter(수신 모듈)	73

그림 65. Non-zero-crossing 변조 시 비트에러 측정 결과	74
그림 66. Zero-crossing 변조 시 측정 결과	75
그림 67. 송신모듈 시험 구성	76
그림 68. 송신모듈 신호 출력	76
그림 69. 수신모듈 시험 구성	77
그림 70. 수신모듈 필터 입/출력 및 복조 데이터	78
그림 71. 코드 방식 BPSK 송수신 모듈 고조파 인가 시험	79
그림 72. FSK 방식 송수신 모듈 고조파 인가 시험 측정 포인트	80
그림 73. 코드방식 BPSK 송수신 모듈 고조파 인가 시험 측정 포인트	80
그림 74. 송신 : ON / FG : OFF	81
그림 75. 송신 : ON / FG : ON (1620Hz 고조파 인가)	82
그림 76. 송신 : ON / FG : ON (1640Hz 고조파 인가)	82
그림 77. 송신 : ON / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)	83
그림 78. 송신 : OFF / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)	84
그림 79. 송신모듈 필터부 및 검파회로 출력	84
그림 80. 송신 : ON / FG : OFF	85
그림 81. 송신 : ON / FG : ON (1620Hz 고조파 인가)	86
그림 82. 송신 : ON / FG : ON (1640Hz 고조파 인가)	86
그림 83. 송신 : ON / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)	87
그림 84. 송신 : ON / FG : ON (1670Hz 고조파 인가)	88
그림 85. 송신 : OFF / FG : ON (1670Hz 고조파 인가)	88
그림 86. 송신 : ON / FG : OFF	89

그림 87. 송신 : ON / FG : ON (1,620Hz 고조파 인가)	89
그림 88. 송신 : ON / FG : ON (1,640Hz 고조파 인가)	90
그림 89. 송신 : ON / FG : ON (1,660Hz 고조파 인가)	90
그림 90. 송신 : ON / FG : ON (1,670Hz 고조파 인가)	90
그림 91. 고조파 영향 시험 구성	92
그림 92. FSK와 BPSK에 적용된 대역통과 필터의 주파수별 입/출력 특성	95
그림 93. FSK와 BPSK에 적용된 대역필터 선택도(Q) 비교	95
그림 94. 고조파 영향 저감을 위한 데이터 처리	96
그림 95. 안전성 확보를 위한 데이터 처리	97
그림 96. 데이터 복구 처리	98

ABSTRACT

A Study on Optimized Method by Harmonics Analysis of Audio Frequency Track Circuit

An, Jong Baek

Advisor : Prof. Cho, Geum-Bae, Ph. D.

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

From the point of view in the development of high-speed rail technology, change of the relationship between South Korea and North Korea, and the saturation of road traffic. the 21st century is the era of railways.

Korea Railroad is also continuing to move forwards to advance and upgrade of the world's railway technology, and is facing an era of continental railways that will revolutionize transportation, including logistics.

In railway infrastructure, signal control devices are representative facilities that measure the level of railroad technology in the country, which is very important for securing safety and efficiency of train operation. Signalling facilities that can improve train safety, speed, and track capacity are the final aggregation of railway technology that can realize railway abnormalities.

Among them, the train control system plays an very important role in improving the safe operation of trains and the transportation capacity, and even small errors in the train control system cause the train to stop running, but usually cause a collision or a rear collision.

In such a train control system, the track circuit device for detecting the train position or transmitting train running information is installed adjacent

to the track, so it is often caused of component failure due to weather conditions and vibration occurring when train is running. In particular, the return current and harmonics that affect the track circuit through the operation of electric trains such as KTX are important factors that require technical review for stable operation of the track circuit.

In this paper, an optimized method was presented for eliminating the obstacles in the track circuit through analysis and test of the return current harmonic characteristic. To do this, we measured the harmonics due to the return current of the track circuit using in the domestic conventional line, and to analyzed the problems associated with the failure of the AF track circuit. As a result, the immunity to harmonics of the AF track circuit was improved by 20% or more, and the data error rate during signal demodulation was reduced

Therefore, the research results of this paper are expected to contribute to ensuring safe operation of trains and safety of signaling facilities as well as to improving reliability of the train control system.

약 어 표

- ABS(Automatic Block System) ; 자동폐색장치
 ACSU(Axle Counter System Central Unit) ; 액슬 카운터 중앙감시장치
 AF(Audio Frequency) ; 가청주파수
 ATC(Automatic train Control) ; 열차자동제어장치
 ATO(Automatic Train Operation) ; 열차자동운전장치
 ATP(Automatic Train Protection) ; 열차자동방호장치
 ATS(Automatic Train Supervision) ; 열차자동감시장치
 ATS(Automatic Train Stop) ; 열차자동정지장치
 AWS(Automatic Warning System) ; 자동경보장치
 BEC(Buried Earth Cable) ; 매설 접지 케이블
 BPF(Band Pass Filter) ; 대역통과필터
 BPSK(Binary Phase Shift Keying) ; 2진 위상 편이변조방식
 CBTC(Communication Based Train Control) ; 무선통신열차제어시스템
 CPW(Contact Protective Wire) ; 공중보호선
 CTC(Centralized Traffic Control System) ; 열차집중제어장치
 DDS(Digital Date Storage) ; 디지털 데이터 저장장치
 DLM(Data Link Module) ; 데이터 링크 모듈
 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) ; 직접 확산 스펙트럼
 EMC(Electro Magnetic Compatibility) ; 전자기파 적합성
 EMI(Eletro Magnetic Interfernece) ; 전자방해잡음
 EPLRS(Enhanced Position Location Reporting System) ; 개량위치확인 및 자동보고시스템
 ESJ(Electrical Separation Joint) ; 전기적 절연이음매
 ETCS(European Train Control System) ; 유럽형 열차제어시스템
 ETSI(European Telecommunications Standards Institute) ; 유럽통신규격협회
 FEM(Finite Element Method) ; 유한요소법
 FM(Frequency Modulation) ; 주파수 변조
 FSK(Frequency Shift Keying) ; 주파수 편이변조방식
 GPS(Global Positioning System) ; 위성항법장치

GSM(Global System for Mobile Communications) ; 세계무선통신시스템
ICT(Information and Communication Technology) ; 정보통신기술
IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) ; 전기전자학회
IL(Inductive Loop) ; 유도성 루프
IL-CBTC(Inductive Loop CBTC) ; 유도루프기반 무선통신열차제어시스템
ISM(Industrial Scientific and Medical Equipment) ; 공업용, 과학용, 의료용 고주파
KTX(Korea Train Express) ; 한국형 고속열차
LEAE(Liaison Equipotentielle between CPW & BEC) ; 반건넘선
LTI(Liaison Transversale Integrale) ; 건넘선
MBS(Moving Block System) ; 이동폐색장치
MMI(Man-machine Interface) ; 인간-컴퓨터시스템 인터페이스
OS(Onboard Sensor) ; 내장형 센서
PSK(Phase Shift Keying) ; 위상 편이변조방식
RF-CBTC(Radio Frequency CBTC) ; 지능형 열차제어시스템
Tachometer ; 회전 속도계
TD(Train Detection) ; 열차검지
TG(Tacho Generator) ; 속도발전기
TR(Track Relay) ; 궤도계전기
TWC(Train to Wayside Communication) ; 열차정보송신장치

제1장 서론

철도신호란 열차의 운행조건을 제시하여 열차의 진행 가부 및 위험의 유무 등을 알려주는 것으로 열차 또는 차량운행의 안전을 확보하고, 정확성과 신속성으로 수송능률의 향상을 도모하기 위하여 설정한 것이 곧 열차제어시스템이다[1,2,3]. 열차제어시스템은 열차의 안전운행뿐만 아니라 수송능률의 향상을 도모하는데 매우 중요한 역할을 한다. 또한 철도수송에 있어서 수송력의 증강과 경영의 합리화를 이루게 하는 한편 열차속도의 향상, 열차운행의 횟수 및 수송단위의 증가가 급속하게 이루어지는데 기여하고 있다[4]. 무엇보다도 철도수송은 대량수송을 할 수 있다는 특징이 있는데 여기에는 반드시 안전, 정확, 신속, 쾌적함이 뒷받침 되어야 한다. 따라서 철도수송에 있어서 가장 중요한 열차의 안전운행을 확보하고, 열차소통의 원활을 기하기 위하여 열차제어시스템이 필요하다. 1개의 선로에 1개의 열차만이 운행된다면 열차제어시스템의 필요성은 그리 큰 문제는 없겠으나 제한된 선로에 다수의 열차를 운행하게 함으로서 발생하는 사고 즉, 선로의 이상이나 선로의 개통 여부, 선행열차의 운행상태 등을 알 수 없는 상태에서 운행한다면 열차의 추·충돌 등과 같은 중대한 운전상의 사고가 일어나게 된다. 그러므로 열차가 진입 또는 진행할 레일 위의 이상 유·무, 선행열차의 레일 점유상태, 분기기의 개통 및 밀착상태 등을 파악하여 하나의 신호로 집약한 다음 기관사에게 운행조건을 제시하여 사고의 예방과 열차의 운용효율을 높일 수 있는 체계를 갖추어야 한다.

최근에는 이동폐색시스템(MBS : Moving Block System), 열차자동제어장치(ATC : Automatic Train Control), 열차자동방호장치(ATP : Automatic Train Protection), 열차집중제어장치(CTC : Centralized Traffic Control System), 전자연동장치(EI : Electronic Interlocking System) 등 컴퓨터를 이용한 첨단기술의 열차제어시스템이 설치되면서 철도신호의 자동화, 전산화가 이루어지고 있다[5].

열차제어시스템은 신호기장치, 선로전환기장치, 궤도회로장치, 폐색장치, 연동장치, 건널목보안장치, 열차자동정지장치(ATS : Automatic Train Stop), 열차자동제어장치(ATC), 열차집중제어장치(CTC), 열차자동방호장치(ATP), 열차자동운전장치(ATO : Automatic Train Operation), 통신기반열차제어장치(CBTC : Communication Based Train Control), 안전설비 등으로 구성되며, 열차 또는 차량의 안전운행과 수송능력 향상을 목적으로 설치한 종합적인 시설을 말한다[6,7].

이중 궤도회로는 신호기장치, 선로전환기장치, 기타 신호보안장치를 위해 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 회로를 구성하고, 그 회로를 차량의 차축에 의해 레일을 단락함에 따라 신호기장치, 선로전환기장치, 기타 보안장치를 직접 또는 간접으로 제어할 목적으로 설치되어 열차의 유무를 검지하기 위한 전기회로이다[8].

열차위치를 검지하기 위한 궤도회로장치는 19세기 미국에서 처음 개발되었으며, 그 이후로 점차 새로운 방식의 궤도회로가 개발되어 현재는 안전한 열차 운행에 없어서는 안 될 중요한 철도신호 보안장치가 되었다. 궤도회로에 사용하는 전원의 종류도 초창기의 직류궤도회로에서 상용 주파수의 교류궤도회로로 바뀌어 졌으며, 이로 인하여 열차 유무의 검지 외에 열차로의 정보 전달이라는 기능을 추가하게 되었다. 궤도회로의 절연방식도 유절연 궤도회로방식에서 무절연 궤도회로 방식으로 개선되고, 무절연 궤도회로 방식은 레일을 절단하여 물리적인 절연물을 삽입하여 궤도회로를 분리하지 않고 전기적으로 인접 궤도회로와의 분리를 하는 방식으로 발전하여 열차의 고속운전과 쾌적한 열차운행이 가능하게 되었다[9, 10, 11].

신호제어설비인 궤도회로장치는 실시간으로 열차의 운행 위치 파악을 통한 신호기 및 선로전환기 제어, 열차 간격 조정, 열차접근 예고를 통한 추돌사고 예방 등 안전운행을 위한 필수적인 신호시스템이다. 따라서 철도차량과 궤도회로의 전자기파 적합성(EMC : Electromagnetic Compatibility)의 확인은 철도차량의 운행에 있어서 필수적인 사항으로 철도차량과 궤도회로의 전자기파 적합성을 위해 전자기파 노이즈의 발생원(發生源)인 차량의 전자파/고조파 특성 및 전자파의 영향권에 있는 궤도회로의 전자파 특성 분석이 필요하다[12, 13]. KTX와 같은 전기차량에서 발생된 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 주파수에서 공진되고, 고조파 전류 확대현상을 일으켜 인접 궤도회로의 부정 낙하와 같은 각종 문제를 야기 시킬 수도 있으며, 고조파 전류는 인접 통신선에서의 유도장애를 일으켜서 철도신호 장애 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용 콘덴서의 과열 및 진동을 유발시키고, 해당 계전기를 오동작 시킬 위험성을 지니고 있다[14, 15, 16, 17].

열차검지용 궤도회로는 전원, 회로구성 방법, 궤도절연 설치방법 등에 따라 분류하고 있으며, 그 종류로는 직류궤도회로, 교류궤도회로, 정류궤도회로, 코드궤도회로, 고전압 임펄스궤도회로, AF(Audio Frequency) 궤도회로 등을 들 수 있다[5]. AF궤도회로는 ‘무절연’ 형으로 인접 궤도회로와 2개의 Tuning unit을 사용하여 전기적으로 분리하여 약 20m 궤도구간에 인덕턴스 동조회로를 구성한다. 또한 B1, B2 본드를 궤도회로에 설치하여 AF궤도회로 신호전류는 차단하고, 전기차량에서 발생하는 고조파 귀선

전류는 접지와 연결된 임피던스 본드를 통해 흘러 나간다. 따라서 귀선전류와 궤도회로 신호전류는 상호 전자파 간섭을 일으키지 않도록 설계한다[18, 19].

현재 우리나라의 경부 및 호남고속선 궤도회로는 프랑스 Ansaldo사의 UM71 AF 궤도회로로 열차검지와 함께 선로에서 차량으로 열차운행 관련 정보를 전송하는 방식을 사용하고 있으며, 일반선 전철화구간의 궤도회로는 스웨덴 Bombardier사의 TI21 AF 궤도회로로 단지 열차의 검지역할만 하는 방식을 사용하고 있다[20,21].

한국철도공사에서 운영 중인 궤도회로 중 최근 3년간 AF궤도회로 고장(장애)으로 일반선 및 고속선에서 열차지연 등 중대 장애가 발생한 사례는 총 82건이고, 특히, KTX 산천 운행시 인접 궤도회로 오동작을 유발할 수 있는 수신모듈, 송신모듈, 전원모듈 장애는 총 65건으로 전체의 79%를 차지하고 있다[22]. 건설구간(호남선 및 강릉선)에서는 KTX 산천이 상행선으로 운행시 열차가 없는 하행선 AF궤도회로(C-type) 구간이 비정상적으로 궤도가 점유되는 장애현상이 발생하였는데 만약, 궤도점유구간에 열차가 진입하였을 경우 안전 측 동작으로 열차는 비상 제동하여 자동으로 정지되는 긴급 상황이 발생하였을 것이나 다행히 그 당시 반대편 열차가 운행하지 않아 비상 정차하는 사례는 없었다. 이와 같은 KTX 산천 운행시 외부에서 유입되는 불명확한 특정주파수 등 외부요인에 의한 인접 궤도회로의 오동작을 개선하고자 분석 및 연구하여 수신모듈의 디지털방식 적용 및 운영소프트웨어 개선, 특정주파수의 감응시간 조정, 귀선전류와 궤도주파수의 상관관계 합리성 개선 등으로 궤도회로의 문제점을 일부 개선하여 운영하고 있다[15,23].

본 논문은 궤도회로와 밀접한 관계를 갖는 열차제어시스템과의 관계를 고려하여 제2장에서는 열차제어시스템에 대한 정의와 열차제어시스템의 종류에 대한 사항과 열차제어시스템의 핵심기술인 궤도회로장치의 원리, 역할, 구성 및 종류에 대하여 검토하였으며, 제3장에서는 AF 궤도회로의 고조파 및 귀선전류, 한국철도공사에서 운영 중인 구간과 건설구간에서의 고조파 측정 및 장애사례를 고찰하였으며, 제4장에서는 송수신기의 기존 모델인 FSK(Frequency Shift Keying) 방식과 개선(안)으로 검토된 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 방식을 비교분석 하였고 분석된 데이터를 기초로 최적화된 시스템 설계 방안을 모색하였다. 이를 위해 본 논문에서는 호남선 AF 궤도회로에서 KTX 산천 운행 중 인접 궤도회로의 부정낙하 및 오동작에 관한 분석을 통해 향후 차량과 신호설비간 인터페이스를 안정적으로 운영할 수 있는 발전방향을 제시하려고 한다. 구체적으로는 “KTX 산천 운행시 발생하는 전자파 노이즈에 대한 AF 궤도회로 신뢰성 확보방안 기술연구[12]”, “KTX 산천과 무절연 AF 궤도회로간 귀선전류 고조파

이동경로 분석연구[16]” 등 관련 논문의 사례연구를 통하여 KTX 산천 차량에서 발생하는 고조파와 궤도회로에서 사용하는 신호주파수에 대한 국내외 전자기파 상호 적합성을 검토하고, 궤도계전기 부정동작의 원인인 KTX 산천 열차의 고조파가 어떤 경로로 유입이 되어 장애를 일으키는지에 대한 검토를 통하여 고조파 영향으로 인한 궤도회로 부정 낙하 방지를 위한 개선방안을 검토하고 최적화된 시스템 개발을 통해 열차안전운행 및 신호설비의 안전성을 확보하고자 한다.

제2장 이론적 배경

제1절 열차제어시스템

철도 시스템은 철도 차량, 선로, 역 설비, 차량 에너지 공급설비, 통신설비, 신호설비 등이 종합적으로 구성되어 상호 호환성을 가지고 운영되는 시스템 엔지니어링으로 주어진다. 철도 차량은 사용 에너지의 특성에 의해 증기 기관차, 내연기관차, 전기기관차 등으로 분류되며, 수송 대상에 따라 여객 전용의 여객차와 화물 위주의 화물차로, 그리고 동력 구동 방식에 따라 전기기관차, 디젤 기관차 및 새마을호 동차와 같이 동력이 집중되어 있는 동력 집중식과 여객차에 동력원을 분산하여 열차를 견인하는 전동차 및 일반 동차와 같은 동력 분산식으로 분류된다. [그림 1]은 국내에서 개발된 차량으로 고속 열차는 동력 집중식, 틸팅 열차는 동력 분산식으로 주어진다[1,4].



a) KTX 산천

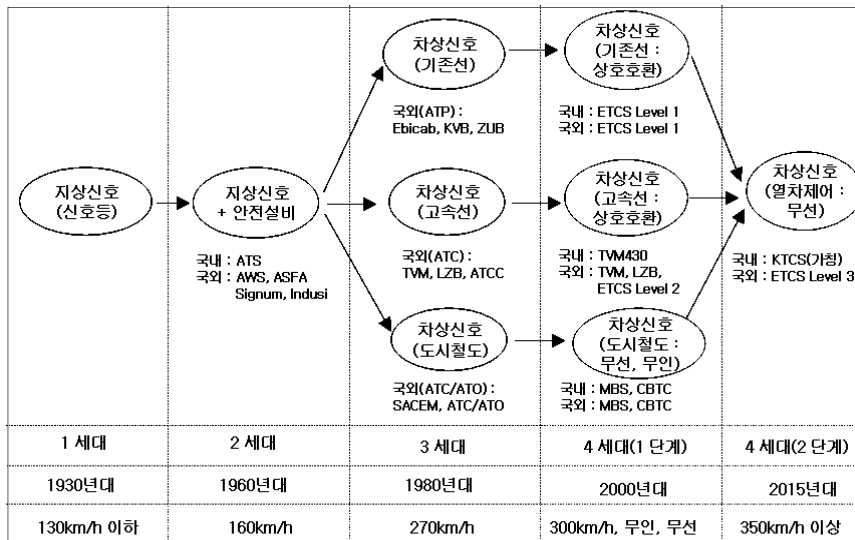


b) 틸팅 열차

[그림 1] 국내에서 개발된 차량

철도 차량의 안전 운행에 연관된 초기의 열차제어설비는 지상에 신호등을 설치함으로써 신호등의 색상에 의해 기관사의 열차 운행 허용 속도를 제한하였다. 그러나 기관사가 신호등을 인지하지 못하는 사고가 자주 발생함으로써 기관사의 오류를 최소화하기 위한 보완장치를 지상에 설치하게 되었다[6]. 이러한 장치의 기본은 기관사가 신호등을 인지하지 못함으로써 신호등에 의해 주어진 열차 운행 최고 속도 한계를 초과하

는 경우, 약 5초간 경보를 발령하며, 기관사의 추가 조치가 없는 경우에는 안전을 위해 열차를 강제로 정지하는 시스템이 대표적인 예로서 주어진다. 국내의 경우, 1960년대에 발생한 대형 열차 참사 이후 일본에서 도입된 열차자동정지장치(ATC : Automatic Train Stop)가 대표적인 경우이며, 유럽에서는 자동경보장치(AWS : Automatic Warning System), Indusi(독일) 등이 유사한 기능을 위해 사용되었다. 그럼에도 불구하고 1980년대의 열차 사고는 지상신호장치가 열차의 속도를 제어하는 개념보다는 단지 문제점 발생시에 열차 운영을 중단시키는 단순한 스위치 개념으로 주어진다. 열차 운행 속도가 160km/h를 초과함으로써 더 이상 기관사의 시각에 의존하여 열차를 운행하는 것이 불가능하다는 점, 그리고 철도 교통에 대한 많은 여객 의존도로 인해 고밀도 운영을 실행한다는 점이 기관사의 인적 오류로 인한 사고를 빈번하게 유발하였다. 따라서 열차제어시스템의 연구 방향을 기존의 지상신호방식에 적용된 기관사의 의존 체계에서 자동으로 열차의 운행속도를 제어하는 방향으로의 변환을 유도하였으며, 이는 현재의 차상신호방식이라는 새로운 개념을 탄생시켰다[5,6].

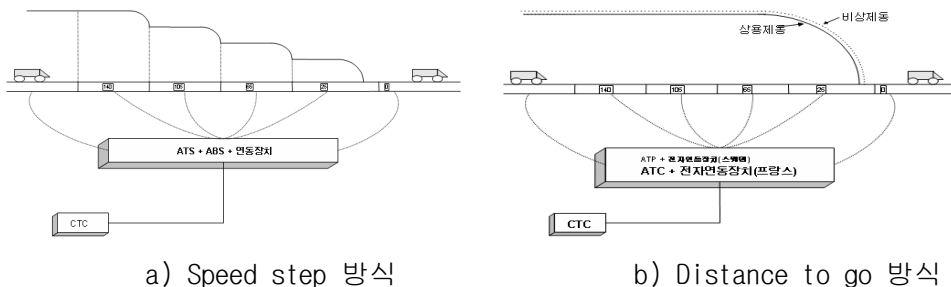


[그림 2] 열차제어시스템 변천 과정

[표 1] 지상장치 방식과 차상장치 방식의 비교

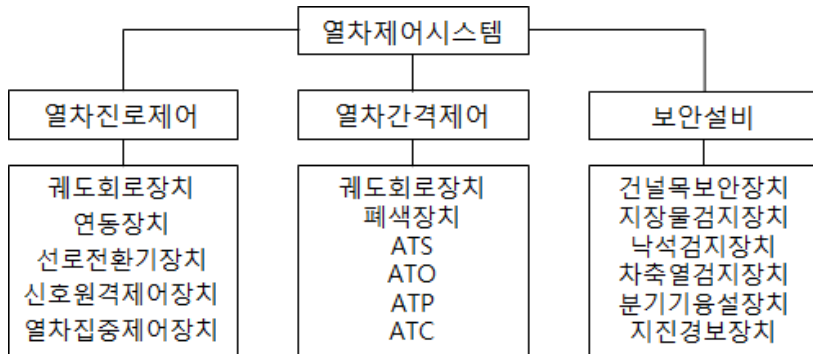
특 성	지상 장치	차상 장치
건설비	낮 음	높 음
활 용	지선, 저속, 저밀도 운행	본선, 고속, 고밀도 운행
속도제어 주체	기관사	차량 컴퓨터
악천후 기후 조건	저속 운행	무 관
신뢰성	낮 음	높 음
안전성	낮 음	높 음
최고 속도	160km/h 이하	160km/h 이상

기존의 지상 신호등과 기관사의 역할을 차량 컴퓨터로 대체함으로써 기관사는 더 이상 신호등에 의존하지 않고, 컴퓨터에 의해 계산된 열차 및 선로변 열차 운행 환경 조건의 분석을 통해 기관실에 설치된 MMI(Man Machine Interface) Display 장치를 현시함으로써 열차의 운행을 구현한다. 또한 열차의 운행은 선로를 일정한 구간으로 분할한 후, 신호등을 통해 열차의 속도를 단계적으로 제어하는 Speed step 방식에서 후속 열차가 지상의 신호기계실로부터 선행열차의 위치, 속도 및 전방 선로 환경 등의 상태 정보를 수신한 후, 실시간으로 열차의 운행 최고 속도를 설정함으로써 항상 열차의 운행 안전거리를 확보한 상태에서 열차의 운행을 제어할 수 있는 Distance to go 방식으로 변환되었다[1].



[그림 3] 열차제어방식

차상신호방식은 선로 조건에 따라 다양한 형태로 분류된다. 경부 고속선에서는 열차 이동에 대한 제어 및 열차의 안전성과 열차 운행 명령을 자동으로 실행하는 열차자동 제어장치(ATC : Automatic Train Control)가 사용된다. 이는 선행열차의 위치, 운행 진로 등 선로의 제반 조건에 따라 정보 코드가 선로를 통해 열차로 전송되며, 열차에서는 지상에서 전송된 정보를 MMI Display 장치를 통해 기관사에게 현시한다. 이러한 ATC 장치는 열차자동방호장치(ATP : Automatic Train Protection), 열차자동운전장치(ATO : Automatic Train Operation), 열차자동감시장치(ATS : Automatic Train Supervision)의 하부 시스템으로 구성된다. ATP 시스템은 전방 열차와 후방 열차의 안전거리를 유지함으로써 열차의 안전 운행을 보호하는 개념으로 국내의 경우에도 2002년부터 ATP 도입 타당성 조사를 기본으로 송정리-함평 구간에서의 시험선 시험 운행을 완료한 후 2008년부터 경부선, 호남선을 중심으로 운영하고 있다. ATO 시스템은 미리 설정된 프로그램에 의해 역에서의 열차 속도 감소 및 정지 관련 열차제어 기능을 실행하며, ATS 시스템은 열차상태 감시 및 열차운행 패턴을 유지하기 위해 열차 운행 명령에 대한 적절한 통제를 실시한다. 일반적으로 도시철도의 경우에는 역간 거리가 짧음에 따라 빈번한 열차의 정지 및 출발 등의 동작 실행을 위해 ATS와 ATO 기능이 주로 사용됨으로서 ATC/ATO 또는 ATP/ATO라는 명칭을 많이 사용하고 있다[6].



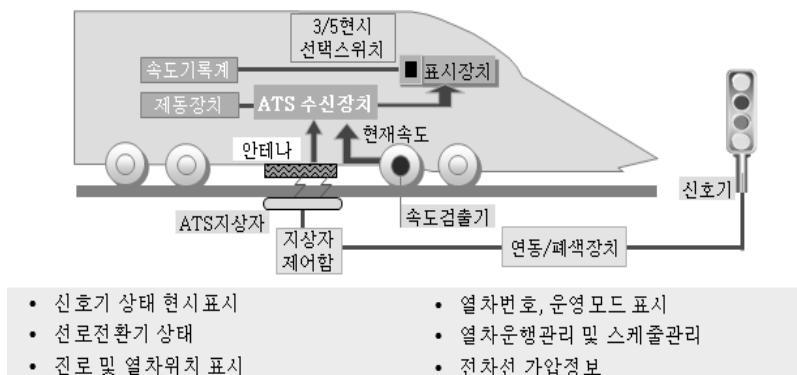
[그림 4] 열차제어시스템의 구성

1. ATS 장치(Automatic Train Stop)

눈보라, 안개, 폭풍우 등의 자연현상에 의하여 기관사의 신호현시 확인이 어려울 경우에는 열차속도를 낮추어 운전하여야 하며, 기관사의 돌발적인 육체적 결함 등으로 신호 확인의 누락이나 착오로 인한 사고가 발생하는 경우가 있다. 이때 벨과 경보등으로 기관사에게 주의를 환기시켜 정상적인 운전취급을 하도록 하고, 자동으로 열차를 안전하게 정지시키기 위한 것이 열차자동정지장치(ATS)이며, 1969년 경부선 서울~부산 간 444km구간에 처음 설치되었다.

ATS 장치는 차상장치와 지상장치로 구성되어 있으며, 동력차 하부에 설치된 차상자가 궤도내에 설치되어 있는 지상자를 통과할 때 제한속도정보를 차상자에서 감응하여 열차가 안전하게 운행이 되도록 한다. ATS 장치의 기본조건은 열차를 정지신호가 현시된 신호기 앞에서 정지시켜야 한다. 즉, 정해진 속도이상으로 운행할 경우에는 속도를 감지하여 제동을 취급하여야 한다. 또 ATS 장치로 운행 중인 다른 열차에 지장을 주지 않아야 하며, 정지신호가 현시된 경우 기관사가 제동을 취급하지 않을 경우에는 자동으로 비상제동이 체결되어야 한다[7].

ATS 장치의 구성도는 [그림 5]와 같다. 신호현시에 따라 지상정보를 차상으로 보내주는 지상장치와 지상으로부터 정보를 수신하여 동작하는 차상장치로 구성되어 있다.



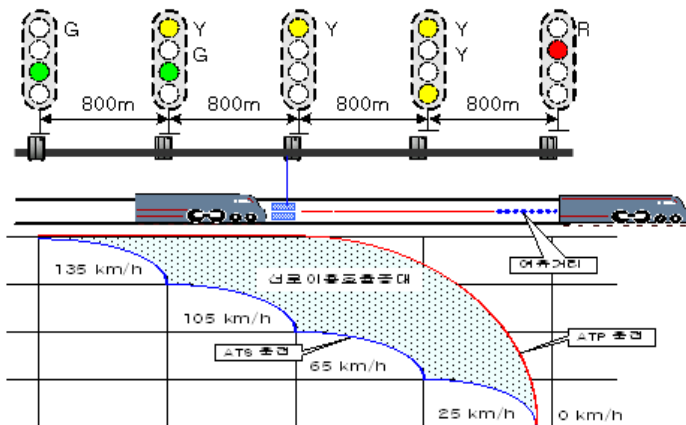
[그림 5] ATS 장치 구성

2. ATP 장치(Automatic Train Protection)

열차자동방호장치(ATP)는 과속도 방어, 선행열차와 후속열차 사이의 거리유지, 궤도 및 열차감시, 진로연동 등을 통해 안전한 열차 운영을 유지하는 시스템으로 폐색구간 경계지점에 설치한 지상자(발리스, 비콘, 루프 등)를 통하여 열차간 운행정보를 상호 교환하여 최소 제동거리를 확보함으로써 운전시각의 단축, 선로용량 증가 및 열차 추돌에 따른 열차보호를 실행하는 장치이다.

ATP 장치는 과거의 고정폐색 ATC 속도코드방식에서 현재에는 열차운전이 고밀도 고속화되면서 차상연산방식으로 발전하였다. 차상연산방식은 고정폐색 Distance to go 방식과 궤도회로를 이용하지 않은 CBTC 방식이 있다. 우리나라 일반철도는 차상연산방식을 사용하고 있으며, ATP 장치의 구성은 차상설비와 지상설비로 구성된다[5].

운행 중인 열차는 지상설비로부터 폐색구간의 길이, 선로의 구배 및 곡선, 분기위치, 선행열차의 위치, 진로개통조건, 열차운행 제약조건 등과 같은 연속정보(가변정보)와 불연속정보(불변정보)를 차상안테나를 통해 차상 ATP장치로 이송한다. 정보를 수신한 열차는 [그림 6]과 같이 지상정보와 열차길이, 제동력, 열차종별 등의 차상정보를 결합하여 목표속도 및 제동목표거리 등을 자동으로 연산하고 운행속도가 목표속도보다 높은 경우 정보를 제공하고 제동장치를 작동시킨다.



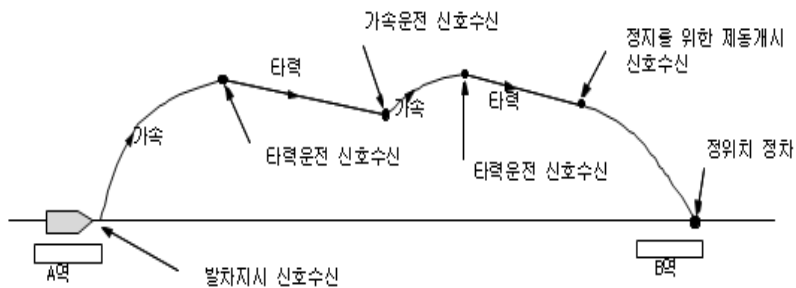
[그림 6] ATP 장치 동작 계통

3. AT0 장치(Automatic Train Operation)

열차자동운전장치(AT0)란 열차가 정거장을 출발하여 다음 정거장에 정차할 때까지 가속, 감속 및 정거장에 도착할 때 정위치에 정차하는 일을 자동으로 수행하게 하며 ATC의 기능도 함께 하고 있다. 열차에 출발신호가 나타나면 자동적으로 가속되고, 주행구간의 규정 속도에 이르면 다시 타력운전으로 열차를 운행하게 한다.

열차자동운전장치는 기관사의 업무를 경감하거나 숙련도 보완, 열차운전사고 예방, 에너지 절감 등의 목적으로 도입되어 기관사를 보조하였으나 현재는 각종 운전 사고를 근본적으로 예방하기 위하여 무인운전방식을 도입하고 있다.

AT0 장치는 컴퓨터의 소프트웨어 프로그램에 의하여 열차의 운행을 자동으로 수행하는 기능을 한다. 열차가 정거장을 발차하여 다음 정거장에 정차할 때까지 가속, 감속 및 정거장에 도착할 때 정위치에 정차하는 기능을 자동적으로 수행하며, ATC의 기능도 함께 한다. [그림 7]과 같이 열차에 발차 지시가 주어지면 자동으로 가속되고 주행구간의 규정 속도에 이르면 다시 타력운전으로 열차를 운행하게 된다. 과속도 방어, 선행열차와 후속열차 사이의 거리유지, 열차검지, 궤도 및 열차감시, 진로연동 등을 통해 안전한 열차 운영을 유지하는 시스템으로 폐색구간 경계지점에 설치한 지상자(발리스, 비콘, 루프 등)를 통하여 열차간 운행정보를 상호 교환하여 최소 제동거리를 확보함으로써 운전시각의 단축, 선로용량 증가 및 열차 추돌에 따른 열차보호를 실행하는 장치이다[5,6].



[그림 7] AT0의 속도제어 곡선

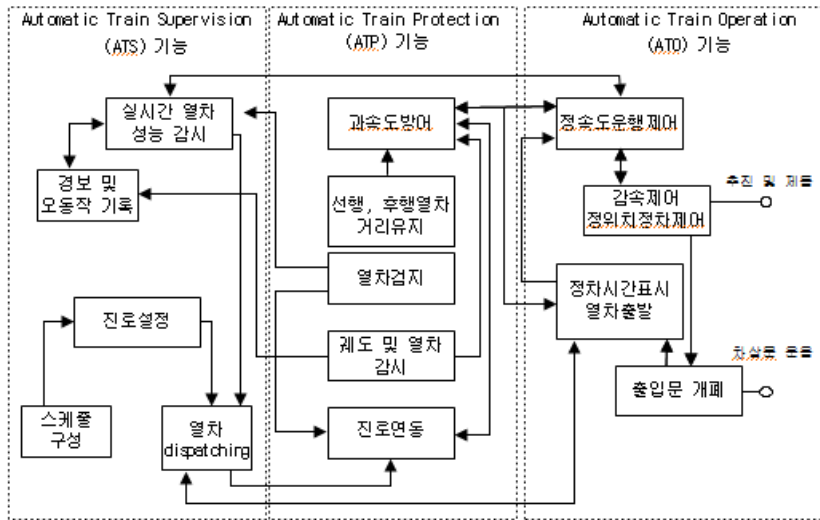
4. ATC 장치(Automatic Train Control)

열차자동제어장치(ATC)는 열차가 현재 점유하고 있는 궤도회로부터 선행 열차의 속도, 선행 열차와의 간격, 진로 또는 선로의 상태 등의 정보를 연속적으로 수신 받아 그 구간을 운행할 수 있는 최대 허용속도를 산출하여 열차의 실제속도가 허용속도보다 빠르면 허용속도 이하로 자동으로 감속시키는 장치이다.

한편 열차이동에 대한 제어 및 열차의 안전성과 열차 운영명령을 자동으로 실행하는 장치로 열차자동운전장치(ATO), 열차자동방호장치(ATP), 열차자동감시장치(ATS) 등과 연계 시스템의 기능을 갖는다[24,25].

또한 선행열차의 위치, 운행진로 등 선로의 제반조건에 따른 속도코드가 선로를 통하여 차상으로 전송되며, 차상에서는 지상에서 전송된 정보를 표시장치에 현시한다.

열차제어시스템은 열차를 안전하고 효율적으로 운행시키기 위해 주로 사용하며, 이에 대한 구조는 각각의 사용 시스템에 따라 약간의 차이를 가져오지만 [그림 8]과 같은 구조 및 기능을 가진다[26,27,28].

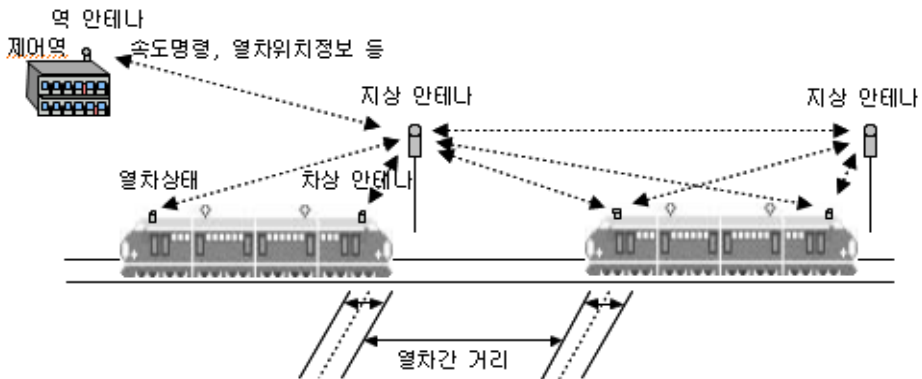


[그림 8] ATC, ATP, ATO, ATS 사이의 상관관계

5. CBTC (Communication-Based Train Control) 장치

최근 들어 도로 교통의 포화상태에 따른 혼잡문제로 인해 정시성과 대량수송 능력을 갖춘 철도시스템의 효용성이 새롭게 주목되고 있으며, 이에 따라 점점 철도시스템이 차지하는 비중이 증가하면서 새로운 철도시스템이 요구되어 왔으며, 철도 선진국을 중심으로 새로운 열차제어시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 즉 통신기술을 이용한 새로운 열차제어방식에 대한 개발 및 적용이 철도 선진국을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 이 결과 궤도회로에 의존하지 않고 무선통신을 이용한 열차제어시스템(CBTC : Communication-Based Train Control)을 개발하거나 개발 중에 있고, 이를 이용해 이동폐색시스템(MBS : Moving Block System) 또한 구현하고 있다.

이동폐색시스템은 열차자신의 속도에 따른 제동거리를 열차 스스로가 판단하고, 제동하는 방식으로 열차간의 거리는 더 이상 폐색구간의 길이에 의해 제한을 받지 않기 때문에 정차거리가 감소되고, 승객의 열차 대기시간 및 열차간의 운전시각이 단축되어 열차 편성수를 확보할 수 있다. 또한 유지보수의 측면에서도 열차 점유상태를 검지하기 위해 매 폐색구간마다 궤도회로를 설치할 필요가 없고, 정보의 전송은 무선통신을 통해 구현됨으로서 지상에 설치되는 궤도회로 또는 발리스를 필요로 하지 않기 때문에 지상설비의 수가 감소되어 유지보수 비용의 감소로 이어진다[29].



[그림 9] CBTC 장치의 기본 구성

이동폐색방식에 있어 열차간의 간격은 궤도회로로 구성된 고정폐색구간에 좌우되지 않으며, 각각의 열차는 정지 또는 주행 중인 선행열차 및 분기점에서의 신호로 구성된 정차지점을 비교하여 안전한 충돌방지를 위한 제동곡선을 계산해 낸다. 이러한 제동곡선은 어떠한 상황 하에서도 계산된 정차지점에 도달하기 전에 열차가 정지될 수 있도록 열차에 목표주행속도 또는 이동권한을 인가하게 된다.

고정폐색방식에 의한 열차제어는 선로가 많은 폐색구간으로 분할되며, 선행열차가 폐색구간을 완전히 통과하였을 때에만 후속열차가 그 폐색구간에 진입할 수 있다. 폐색구간의 길이는 최대 허용속도를 주행할 때 안전제동거리를 확보할 수 있도록 결정이 된다. 반면 이동폐색방식의 지상설비는 선행열차의 위치 및 전방신호의 상태를 각 열차에 전송하고, 각 열차는 자신의 현재 위치와 속도정보를 파악하여 이를 지상설비로부터 열차로 전송된 정보와 비교를 한 후 자신이 주행해야 할 최대속도를 계산하게 된다. 열차는 이 최대 주행속도에 따른 안전제동거리도 산출해 낸다. 이 안전제동거리는 열차 전방의 고정 또는 이동 장애물과 열차 사이의 거리보다 항상 짧게 된다.

오늘날 상용운전 중인 대부분의 CBTC 시스템이 독일에서 개발 발전된 유도루프 통신을 사용하는 시스템 즉, IL-CBTC(Inductive Loop CBTC) 시스템이다. 이것을 1세대 CBTC 라고 한다면, 2세대 CBTC는 무선통신을 이용한 시스템으로서 RF-CBTC(Radio Frequency CBTC)라 부르고 있으며, 이 시스템을 지능형 열차제어시스템이라 한다.

무선통신 기술을 이용한 RF-CBTC 시스템은 CBTC 기술의 기준으로 사용되고 있다. 도시철도 개량은 이러한 기술을 적용하여 무인운전 시스템으로 운영을 추진하며, 현재 영업운전 중인 프랑스 파리의 도시철도 1호선과 2호선이 대표적인 사례이다.

또한, RF-CBTC 시스템은 NYCT, SF-BART, RATP 등의 중전철 시스템, 필라델피아 SEPTA의 경전철 시스템, 그리고 San Francisco, Dallas 와 Las Vegas, Seattle 등의 무인자동 대중교통에 설치 및 운영 중에 있다. 이러한 여러 시스템들은 극히 일부를 제외하고는 모두가 미국 FCC의 2.4 GHz ISM(Industrial Scientific and Medical) 비허가 대역에서 동작하는 DSSS 방식(Direct Sequence Spread Spectrum) 무선통신 기술에 기반으로 한 독점적 무선통신을 사용하고 있다. 즉 무선통신 주파수 대역은 ISM 대역의 2.4 [GHz] 대역을 사용하지만 그 상위의 통신 기술은 모두 제작사가 모든 저작권을 가진 고유의 통신 기술을 사용하고 있다.

그러나 예외로는 Bombardier사에 의한 최근의 Las Vegas 모노레일 시스템에 적용하고 있는 시스템으로 이는 Alcatel SelTrac CBTC 기술로서 상용규격인 최근의 IEEE 802.11 (Wireless LAN Std.)을 사용하고 있는 시스템이다. 프랑스의 RATP에서도 기존

의 Line 13을 Alcatel의 상용 RF기술을 사용하여 운행 중에 있다. RF는 선로상의 유도 루프의 필요성을 없애 주지만 기술적으로 훨씬 더 어려운 기술이며, 특히 지하의 터널 구간에서는 더욱 구현하기가 어려운 기술이다.

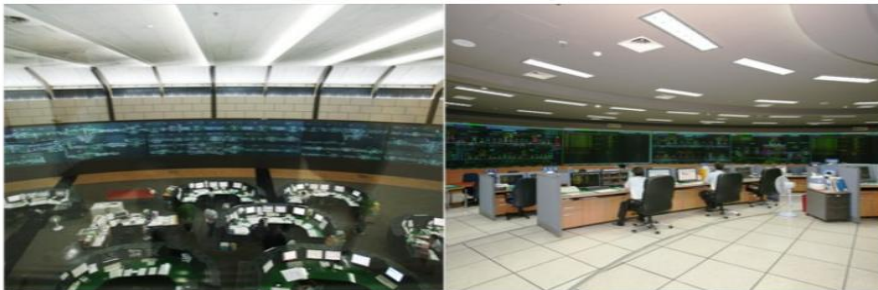
RF-CBTC 시스템에는 열차위치를 검지하는 방법은 매우 다양하게 적용되고 있다. 그러나 RF-CBTC 시스템에 적용되고 있는 열차검지 방법은 하나를 제외하고는 거의 대부분 지상의 RF Tag 같은 보조설비를 이용한 방식을 사용하고 있다. 즉, 기본적으로 차상에서 타코미터 등에 의한 열차위치를 계산하고, 선로변의 RF-ID의 정보를 위치 보정용으로 활용하는 방식을 사용하고 있다. 최근에 일부 회사들은 차상에서 열차의 위치계산의 정확도를 높이기 위해 타코미터를 대신한 다른 방법을 이용한 열차위치를 계산하는 시스템을 개발하여 시험하는 경우도 있다.

대부분의 RF-CBTC 시스템에서는 앞에서 언급한 열차위치 검지방법을 사용하지만, GE사의 AATC RF-CBTC 시스템은 다른 방식이 사용되고 있으며 Radio Ranging의 특별한 방법이 적용되고 있다.

제2절 궤도회로장치

철도시스템은 철도차량·선로·철도역과 에너지 공급 시설·철도관리시스템 등이 종합적으로 맞물려야 비로소 움직일 수 있는 과학기술의 집합체로서 기술적으로 전기, 전자, 기계, 건축, 토목, 컴퓨터, 정보통신공학 등이 다양하게 혼합되어 있다. 또한, 철도는 자동차, 선박, 항공기 등 다른 교통수단과 비교하여 대량수송과 친환경성 및 안전성은 물론 도시내 또는 도시간에서의 정시성과 접근성이 좋아 국가 기간교통망으로서 중요한 역할을 하고 있다.

우리나라는 2004년 4월 경부고속철도 개통으로 전국이 반나절 생활권이 되었고, 2015년 4월 호남고속철도는 서울(용산)과 광주광역시를 1시간 40분 만에 주파하여 명실공히 대한민국 철도의 르네상스 시대를 맞이하였다.



[그림 10] 철도교통관제센터

선로, 차량과 함께 철도 3대 안전설비중의 하나인 철도신호설비는 1899년 경인선 노량진~제물포가 개통되면서 완목식 신호기와 통표폐색방식을 적용한 이래 지속적인 신호설비에 대한 기술개발 및 설비개량을 통하여 현재에는 열차의 고속·고밀도 운전으로 선로의 효율적 이용은 물론 다양한 운전정보 제공 등 철도통합관리시스템과 연계하여 열차제어 및 철도안전의 핵심적인 역할을 하고 있다.

궤도회로(Track circuit)란 신호기장치, 선로전환기장치, 기타 신호보안장치를 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 회로를 구성하고, 그 회로를 차량의 차축에 의해 레일을 단락함에 따라 신호기장치, 선로전환기장치, 기타의 보안장치를 직접 또는 간접으

로 제어할 목적으로 설치되어 열차의 유무를 검지하기 위한 전기회로이다[6,8].

열차유치를 검지하기 위한 최초의 궤도회로는 1869년 미국의 윌리엄 로빈슨(William Robinson)에 의해 발명되어 당초 안전성이 낮은 개전로식(Open Track-circuit)이었으나 1872년부터 폐전로식(Closed Track-circuit)으로 개량되는 등 그 이후로 점차 새로운 방식의 궤도회로가 개발되어 현재는 안전한 열차 운행에 없어서는 안 될 중요한 철도신호 보안장치가 되었다. 궤도회로에 사용하는 종류도 초창기의 직류궤도회로에서 상용 주파수의 교류궤도회로로 바뀌어 졌다. 이로 인하여 열차 유무의 검지 외에 열차로의 정보 전달이라는 기능을 추가하게 되었다. 궤도회로의 절연방식에 있어서도 유절연 궤도회로방식에서 무절연 궤도회로 방식으로 바뀌어 졌다. 무절연 궤도회로 방식은 레일을 절단하여 물리적인 절연물을 삽입하여 궤도회로를 분리하지 않고 전기적으로 인접궤도회로와의 분리를 하는 방식으로 열차의 고속운전과 쾌적한 열차운행이 가능하게 되었다[9, 10, 11].

1. 궤도회로의 원리

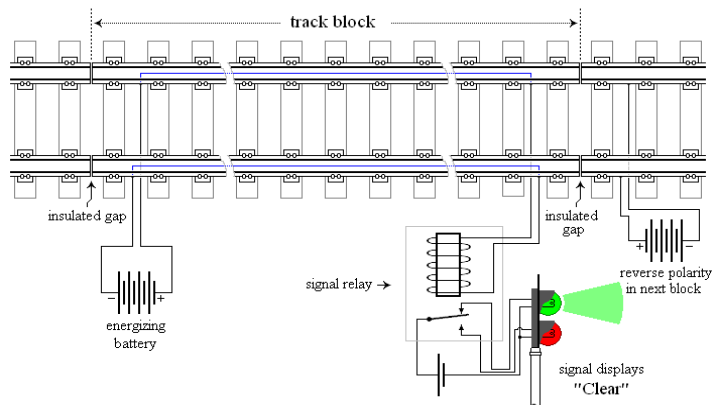
궤도회로가 개발되던 1800년대에는 궤도신호 전송 및 수신을 위하여 송신부와 수신부가 분리되지 않고 열차에 의한 단락시 단락전류를 감소시키기 위하여 한류 저항을 송신부에 첨가하여 사용하였지만 이후에 송신부와 수신부의 분할이 이루어졌고, 철도의 전기철도화가 이루어지고, 교류 궤도회로가 사용되면서 궤도회로의 경계점에 임피던스본드(Impedance Bond)를 설치하여 전차선전류와 신호전류의 분리가 이루어지도록 회로를 구성하였다. 궤도회로의 신호를 교류신호로 사용하면서 상용주파수 교류신호를 사용하였지만, 전차선전류와의 간섭을 최소화하기 위하여 분주 또는 배주 주파수를 사용하였다. 그러나 궤도회로를 통한 정보전송이 증대되면서 수십에서 수백 Hz에 이르는 가청주파수 대역으로 주파수 영역이 전이 되었다. 송수신부도 초기의 진공관 식에서 트랜지스터를 이용한 방식으로 바뀌었으며, 최근에 와서는 집적회로화 되었다[30,31].

궤도회로는 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 열차의 유무를 검지하기 때문에 레일의 전기적인 특성인 회로정수를 해석하는 일은 궤도회로의 설계 시 중요하다. 이것은 사용되는 궤도신호의 주파수 및 귀선전류의 고조파 영향을 받으며, 또한 궤도레일이 설치되어 있는 장소의 환경적인 요인으로부터도 영향을 받기 때문이다. 이 회로정수를 해석하기 위한 방법으로는 고전적 방법인 전송선로 이론의 4단자 회로망 해석법

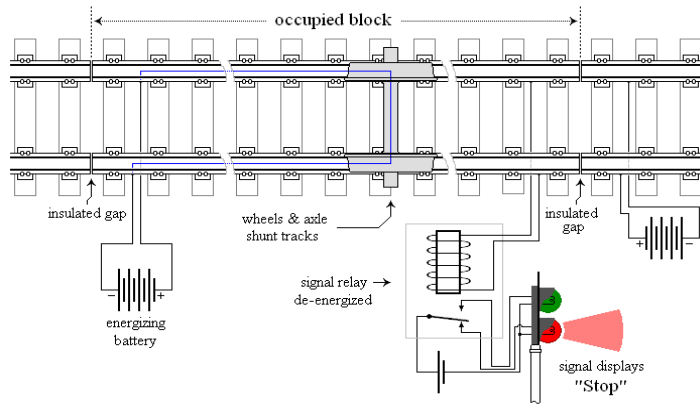
과 대지의 계층화를 이용한 Carson-Pollaczek 방정식의 해석학적 방법, 그리고 궤도 레일의 전자장을 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 실험적으로 해석하는 방법 등 다양한 방법이 연구되고 있다[32,33,34,35,36,37].

궤도회로에 사용하는 주파수는 가청주파수 대역의 궤도 신호를 사용하며, 열차로의 정보전송도 단순한 속도코드에 국한되지 않고 열차운행정보 신호를 직접 전송하기도 한다. 이를 위하여 변조방식도 단순히 속도코드를 변조하기 위한 온오프 변조(On-Off Keying)에서 디지털 정보전송을 위한 FSK 뿐만 아니라 주파수 변조(FM: Frequency Modulation) 방식이 사용되고 있는 추세이다. 전기적 절연을 통한 무절연 궤도회로를 구현하기 위하여 독일과 프랑스에서는 S-bond와 전기적 절연이음매(ESJ : Electrical Separation Joint)를 사용하고 있으며, 정보전송기술의 발전에 따라 궤도구간의 길이도 200여 미터에서 2,000미터 이상으로 늘어났다[38,39,40,41].

궤도회로는 전기회로의 개/폐(ON/OFF)에 의하여 궤도회로 구간 또는 폐색구간의 상태를 알려준다. 궤도회로가 제공하는 정보는 철도신호 자동제어의 기본으로 필수적인 안전 요소이다. 궤도회로는 특별히 분기기의 전기적 쇄정(철사쇄정), 열차간격 이격(폐색장치에 의한 공간이격), 열차운행 예고(홍안내 방송장치), 스크린 도어의 개폐, 건널목 경보, 차축온도검지장치의 온도검지 준비 등에 사용한다[42,43].



[그림 11] 평상시 궤도회로 구성도



[그림 12] 열차 점유시 궤도회로 구성도

[그림 11]은 평상시 열차가 없을 때를 나타낸 것이며, [그림 12]는 열차점유 시 궤도회로의 구성도를 나타낸 것으로 레일을 적당한 구간으로 구분하여 인접 궤도회로와 전기적으로 절연하기 위하여 궤도절연을 설치하고, 궤도회로내 이음매 부분의 접속지향을 적게 하기 위하여 본드(bond)로 접속한 다음 시단측에는 전원장치를, 반대편 종단측에는 궤도계전기를 연결하여 전기적인 폐회로를 구성한 것이다. 궤도회로 내에 열차가 없을 때에는 전원으로부터 흐르는 전류에 의하여 계전기가 동작(여자 : Relay On)되고, 궤도회로 내에 열차가 진입하면 차축에 의하여 전기회로가 단락되어 계전기는 낙하(무여자 : Relay Off)된다. 또한 궤도회로의 장애 또는 고장이 발생하는 경우에도 계전기는 회로에 흐르는 전류가 차단되어 낙하된다. 신호기는 계전기의 여자접점(a접점)을 통할 때에는 녹색등이 현시되고, 무여자 접점(b접점)을 통할 때에는 적색등이 현시되는데 이것은 열차의 차축에 의한 단락으로 자동 제어된다[44,45].

2. 궤도회로의 역할

궤도회로는 고정폐색방식에서 사용되며, 열차검지 또는 속도정보를 전송하는 것을 목적으로 한다. 궤도회로는 궤도를 분할하고 분할된 궤도에 신호기계실의 송신부에서 전압을 레일에 전송하고, 레일을 전송매체로 이용하여 다시 신호기계실의 수신부에서 전압을 수신하여 궤도계전기를 여자 시키는 회로이다. 이때 궤도계전기가 정상적으로

여자하면 열차가 미점유하는 것으로 표시하고, 궤도의 단락, 궤도회로장치의 고장이 발생하면 열차가 점유한 것으로 표시된다.

궤도회로는 레일의 단락을 이용하여 운행 중인 열차를 검지하는 것으로서 열차검지는 신호보안장치의 기초적인 조건이 되며, 궤도회로의 주요역할은 궤도 내에 운행 중인 모든 열차의 위치를 검지함으로서, 열차 간의 간격제어 및 속도선정을 위한 기초자료가 되며, 관계진로의 쇄정 및 자동진로 조건에도 적용된다[46].

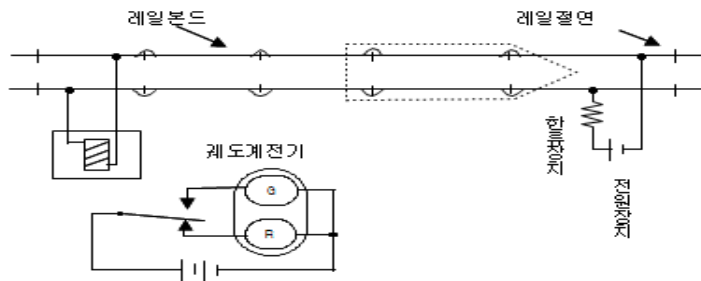
열차의 유·무를 검지하여 신호기를 자동적으로 제어시키므로 소극적이었던 신호 보안 설비는 적극적으로 개선되어 선로용량의 증대, 열차 횟수의 증가 등 열차 운행 능력의 향상에 큰 공헌을 하였으며, 경제적인 면에서도 많은 이득을 가져왔다. 궤도 회로의 원리는 레일을 적당한 구간으로 구분하여 인접 궤도 회로와 전기적으로 절연하기 위하여 궤조 절연(Rail Insulation)을 설치하고, 궤도 회로 내의 레일 이음매 부분의 접속 저항을 작게 하기 위하여 레일 본드(bond)로 접속한 다음 송전 측에는 전원(energizing battery)을, 착전 측에는 궤도 계전기(TR : track or signal relay)를 연결하여 전기 회로를 구성한다[47,48].

신호기에 정지신호 이외의 신호를 현시시키는 경우나 선로전환기를 전환하는 경우, 운행 중인 열차의 안전을 확보하기 위하여 일정한 범위 내에 열차가 존재하지 않는다는 것을 확인할 필요가 있다. 이러한 확인행위를 열차검지라고 하는데 이 범위 안에 열차가 존재하면 그 열차의 차축에 의하여 양 레일은 단락이 되므로 한 쪽 끝에서 보내진 궤도회로 신호전류는 다른 쪽 종단에 도달할 수가 없게 된다. 따라서 수신부의 궤도전류는 감소하게 되고, 궤도계전기는 낙하(무여자) 하게 된다. 이 신호전류의 량을 이용하여 열차를 검지한다. 궤도회로 시스템은 안전 측으로 동작(fail-safe) 하도록 구성되어 있어 고장이 나면 반드시 열차점유 상태 즉, 안전 측으로 동작한다.

자동폐색구간에서는 궤도회로에 보내는 전류의 극성을 바꾸어줌으로서 후방신호기의 현시를 변화시킨다. 또한 열차자동제어(ATC) 구간에서는 궤도회로를 통해 열차운행정보를 전송하도록 하여 차상의 신호정보를 송수신할 수 있다. 이처럼 궤도회로는 해당 구간에서 자기 및 전방의 정보를 열차에 전송하는 기능을 가지고 있으며, 또 다른 기능은 레일의 절손검지 및 전기철도 구간에서의 전차선 귀선전류의 귀선회로로 사용된다[49,50].

3. 궤도회로의 구성

[그림 13]은 궤도회로의 구성을 나타낸 것으로 궤도를 적당한 구간으로 구분하여 인접 궤도회로와 전기적으로 절연용 궤조절연을 설치하고, 궤도회로내의 궤조이음매 부분의 접촉저항을 적게 하기 위하여 본드(bond)로 접속한 다음 한쪽에는 전원을, 부하 쪽에는 궤도계전기를 연결하여 전기회로를 구성한 것이다. 궤도회로의 구성기기는 종류에 따라 차이가 있으나 전원장치, 한류장치, 궤조절연, 레일본드, 점퍼선 및 궤도계전기로 구성되어 있다[8,47].



[그림 13] 궤도회로의 구성

[표 2] 궤도회로 구성기기

궤도회로 방식	송 전 측			착 전 측		
	송전방식	구성기기	비 고	계전기	회로방식	사용구간
직 류 궤도회로	DC 2/4[V]	가변저항기	부동충전식	DC바이어스 계	복구조	비전철구간 단선건널목용
DC바이어스 궤도회로	궤도송신기 DV 1-16[V]	가변저항기 변 압 기	입력 AC110/220[V]	DC바이어스 계	"	비전철구간
고 압 임펄스형	펄스전압660[V] 임펄스주파수 3[Hz]	송 신 기 전압안정기	임피던스본드 (200[A]), (430[A])	임펄스궤도 계전기	복구조	교류전철구간
AF궤도회로 (유절연)	궤도주파수	송 신 기	입력 AC110/220[V]	계전기	"	"
AF궤도회로 (유절연)	궤도주파수	소형변압기	DC24[V]	계전기	"	"

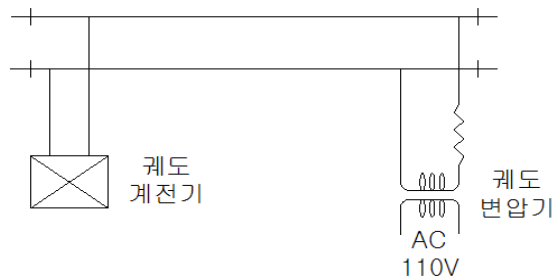
4. 궤도회로의 분류

가. 직류궤도회로

직류궤도회로는 직류(DC) 전원을 이용한 궤도회로로서 궤도 계전기(track relay)는 직류용 궤도계전기를 사용한다. 직류 궤도회로의 전원은 정전에 대비하여 부동식 충전 방식(floating system)이 사용되고 있는데, 이것은 평상시에 축전지에 충전된 전원을 정전이 되었을 때 사용하기 위한 것이다.

나. 교류궤도회로

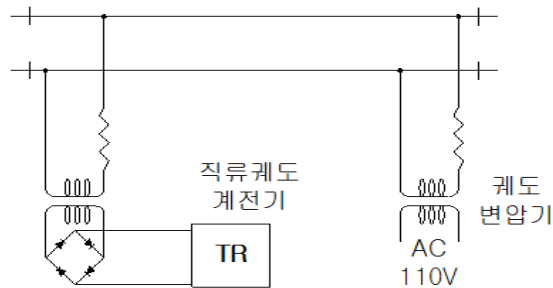
교류궤도회로는 교류(AC)전원의 무정전 확보가 가능한 지역에서 많이 사용된다. [그림 14]와 같이 사용주파수에 따라 50Hz 또는 60Hz를 사용하는 상용주파수방식, 25Hz 또는 30Hz를 사용하는 분주 궤도회로방식, 100Hz 또는 120Hz를 사용하는 배주 궤도회로방식 등이 있다. 교류궤도회로의 특징은 가동부품이나 트랜지스터 등이 없으므로 수명이 길고 신뢰성이 높으며 제어구간이 길고 보수하기가 쉽다.



[그림 14] 교류궤도회로 구성

다. 정류궤도회로

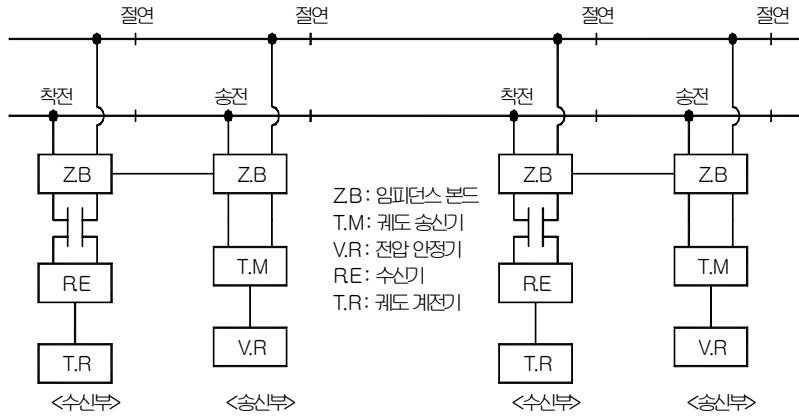
회로구성 방법에 따른 분류는 교류를 정류한 맥류를 전원으로 사용하는 정류궤도회로(Commutation track circuit) 방법을 들 수가 있다. 궤도계전기는 직류용을 사용하고 여기에는 전파정류식과 반파정류식이 있다. [그림 15]는 정류 궤도회로의 구성을 나타내고 있다[5,6,9].



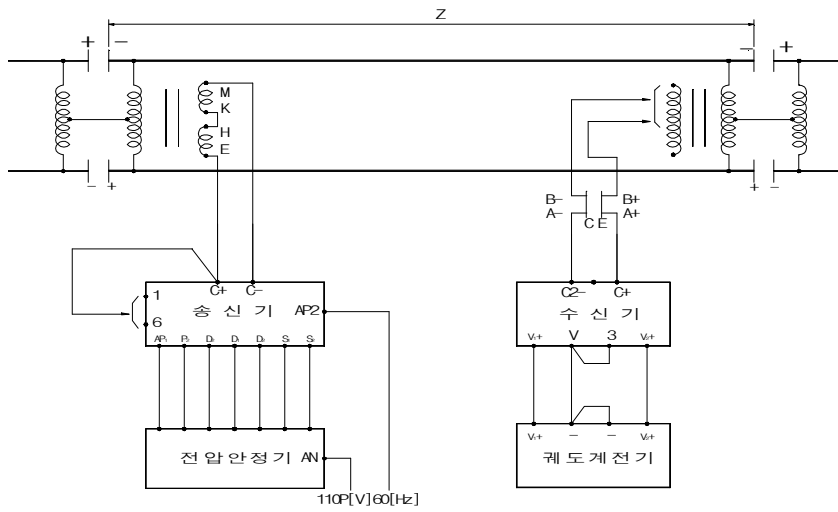
[그림 15] 정류궤도회로 구성

라. 고전압 임펄스 궤도회로

고전압 임펄스 궤도회로(High voltage impulse track circuit) 장치는 교류 25,000[V] 전철구간에 사용되는 복궤조 궤도회로에서 전차선의 귀선전류(전차전류)는 레일을 통해 변전소로 흘러보내고, 신호전류는 임피던스 본드에서 차단하여 궤도회로 구성이 가능하다. 임펄스 궤도회로는 DC 임펄스를 사용하므로 전압강하가 적고, 1개 궤도회로의 소비전력이 50 ~ 60[VA]정도 이며, 우천 시에도 사리누설 저항의 변화가 적어 안전성이 우수하고, 장애발생이 적다. [그림 16]과 같이 고압임펄스 궤도회로 장치는 전압안정기, 송신기, 수신기, 임피던스본드(송신, 수신단), 궤도계전기로 구성된다[52,53,54,55,56].



[그림 16] 고전압 임펄스 কে도회로 구성도



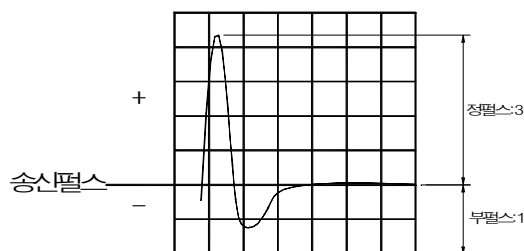
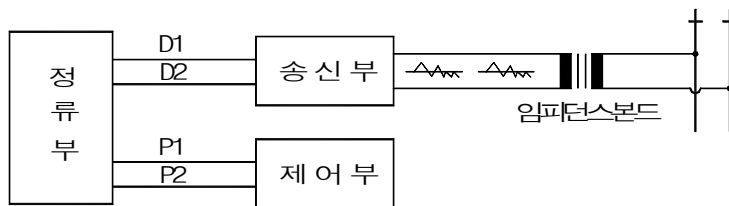
[그림 17] 고전압 임펄스 কে도회로도

전압 안정기는 송신기에 정격의 AC 전원을 안정되게 공급하기 위한 장치이며, 110[V] 및 220[V]를 공용으로 사용할 수 있으며, 입력 전압 변동 시 출력 전압 변동은 [표 3]과 같다.

[표 3] 전압 안정기의 출력전압 변동

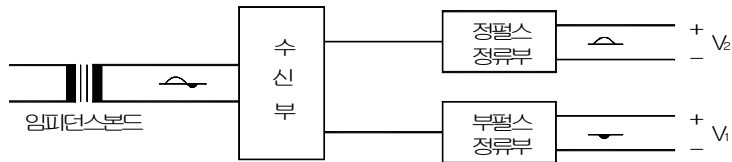
구 분	입력 전압[V]	출력 P ₁ , P ₂ 단자전압	출력 D ₁ , D ₂ 단자전압
110 결선 시 220[V] 결선 시	90 ~ 120 [V] 200 ~ 230 [V]	40 ~ 60 [V]	400 ~ 600 [V]

송신기는 정류부, 제어부, 송신부로 구성되는데 정류부는 제어부, 송신부에 정격 DC전원을 공급하는 장치이다. 또한 송신부는 제어부의 R, C 충전 및 방전 회로 작동에 의해 일정한 간격(180펄스/분±5[%])으로 작동되는데 임피던스 본드를 통해서 정펄스와 부펄스(3:1)로 구성되는 비대칭 파형의 임펄스를 궤도로 송신한다.



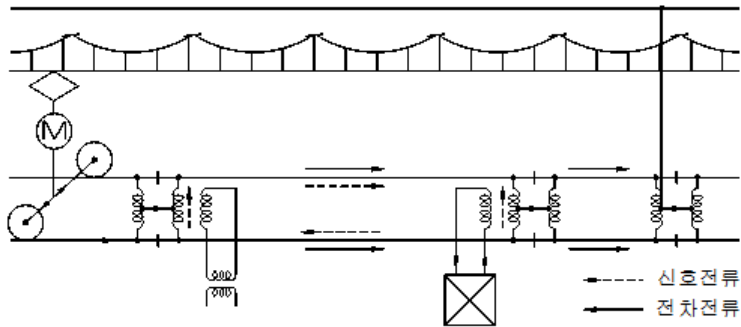
[그림 18] 송신기 구성도 및 임펄스 파형

수신기는 임피던스 본드로 부터 수신된 비대칭 파형의 임펄스는 [그림 18]과 같이 궤도계전기를 작동시키기 위한 적정 비율의 파형인 V_1 및 V_2 로 나타나게 된다. 인접 궤도회로와의 송, 수신 파형은 상호 반대가 되도록 접속되기 때문에 인접 궤도회로와의 궤조 절연이 파괴될 경우 정, 부펄스가 대칭이 됨으로서 궤도 계전기는 낙하된다.



[그림 19] 수신기 구성도

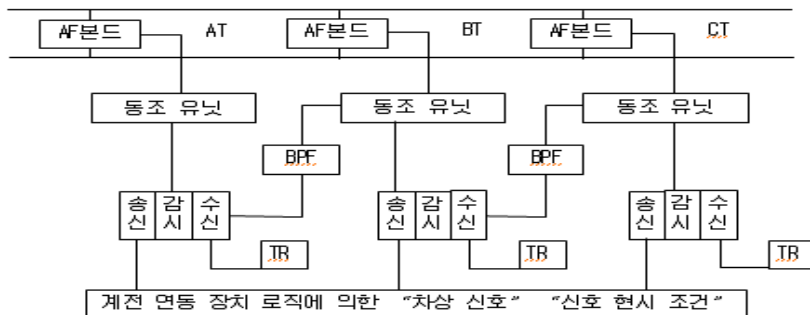
임피던스 본드는 궤도회로를 구분하는 각 절연 개소의 임피던스 본드는 전차선의 귀선 전류를 흐르게 하고, 인접 궤도회로에 신호 전류의 흐름을 막는 역할을 한다. 또한 임피던스 본드에 흐르는 전차선 귀선 전류의 허용 범위는 평상시 200[A], 피크 시 800[A]를 흘릴 수 있는 구조로 되어 있다.



[그림 20] Impedance bond의 원리

마. AF 궤도회로

AF 궤도회로(Audio Frequency track circuit)는 신호전류에 1[kHz] 부근의 가청주파수(AF : Audio Frequency)를 변조기로 변조하여 송신하고, 수신 측에서 변조된 주파수 중 선택증폭기로 해당주파수를 증폭, 정류하여 궤도계전기를 동작시키는 방식이며 [그림 21]과 같은 구성으로 나타낸다[18,20,47,50,57,58].



[그림 21] AF 궤도회로 구성도

AF 궤도회로는 열차검지, 속도검지와 차량 신호에 대하여 필요한 정보를 안전하게 전송하며, 전송 채널로서 레일을 사용하고 송신기는 주파수변조(FM)된 정현파 신호의 형태로 궤도에 메시지를 보낸다. 이 신호는 속도, 궤도 경사도, 목표에 대한 거리, 기타 등등과 같은 정보를 포함한다. 열차는 첫 번째 축의 앞쪽에 놓인 두개의 안테나(Antenna)를 통하여 이 신호를 포착한다. 그런 후에 차상수신기는 이중화 기술(redundancy technique)을 사용하여 신호를 복조하고 이중화 복조된 결과를 비교하여 차상장치로 전송한다. 궤도절연은 설치방법에 따라서 전기적 절연이음매를 설치 할 수 있으며, 무절연 궤도회로는 전차선 방식에 관계없이 역간에서 사용되고 순차적 궤도회로는 레일의 비연속성을 요구하지 않는 "전기적 절연이음매 접속(ESJ)"으로 분리된다. 고속선에 사용하는 UM71 궤도회로는 2040 ~ 3120 Hz 범위 내에 있는 주파수의 교대신호를 사용한다. 이 범위는 궤도회로(최대길이)의 성능 특성과 무절연 궤도회로 기능의 정확성을 고려하며, 적용주파수 선택이 이루어진다[21,39,50,51,59,60].

제3절 AF 궤도회로 인터페이스

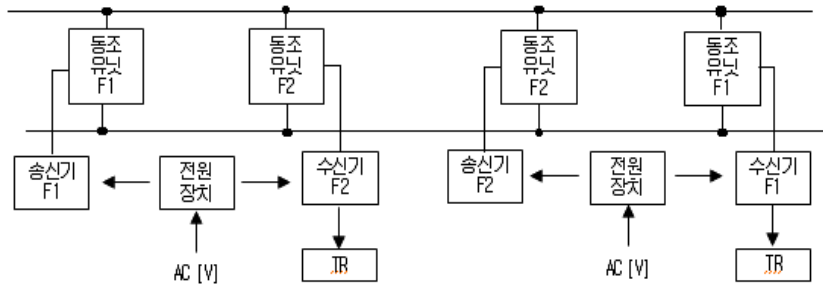
우리나라의 일반철도 및 고속철도에서는 주로 AF 궤도회로가 사용되고 있다. 일반철도는 기존선 전철화 및 시설물 개량사업에 따라 기존의 임펄스 궤도회로를 대체하여 스웨덴의 봄바르디아사에서 도입된 T121 AF 궤도회로가 설치되어 있다. 2004년부터 운영을 시작한 고속철도는 프랑스 안살도社에서 공급한 UM71 AF 궤도회로가 사용되고 있다. 이러한 AF 궤도회로의 특징은 주어진 열차제어시스템의 구성에 따라, 단순히 열차를 검지할 것인지, 또는 열차 검지 기능에 추가하여 열차의 속도를 제어할 수 있는 열차 운행 정보를 전송하는 역할을 할 것인지가 부수적으로 선택된다. 일반선의 T121 AF 궤도회로는 단순히 열차 검지의 역할을 하며, 관련 열차 운행 정보 전송은 ATP 시스템에 의해 선로에 설치된 발리스를 이용하여 지상에서 차량으로 정보를 전송한다. 그러나 고속선에서 사용되는 UM71 AF 궤도회로는 열차검지와 지상에서 차량으로의 열차운행정보전송의 두 가지 역할을 모두 취급함으로써 T121 AF 궤도회로보다 복잡한 구조로 구성되어 있다[1, 11, 41]. 본 논문에서는 일반선에서 주로 사용되는 T121 AF 궤도회로를 기반으로 관련설비에 대한 기술분석 및 장애 발생현황에 따른 해결 방안에 대해 중점적으로 검토하였다.

1. AF 궤도회로의 구조 및 기능

일반철도에 사용되고 있는 AF궤도회로는 1,549 ~ 2,593Hz(± 17 Hz)의 범위내의 주파수를 사용하고 있다. 8개의 공칭 주파수는 단선과 복선 및 복복선에 따라 한 개의 쌍은 각 궤도별로 사용되며, 각 궤도에서 주파수는 교대로 사용된다. 이때 동일궤도에 연속되는 구간과 반대편 선로궤도와와의 주파수 영향을 최소화하기 위하여 주파수범위를 최대한 고려하여 지그재그로 설치한다. [표 4]와 같이 A~H 8종류의 AF궤도회로 주파수를 4조로 구성하여 사용한다. AF 궤도회로 구성은 [그림 22]와 같이 송신기, 수신기 및 궤도계전기, 동조유닛, 임피던스 본드 등으로 구성된다[1, 11, 41].

[표 4] 일반철도 AF 궤도회로의 주파수 사용 대역

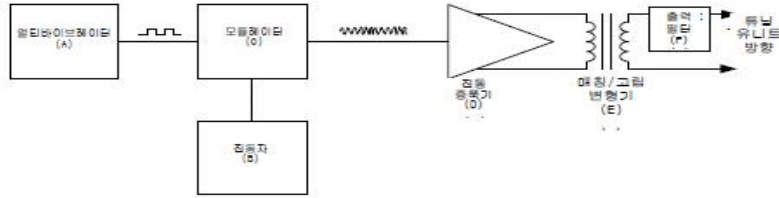
궤도	주파수 유형	공칭 주파수 [Hz]	저주파수 [Hz]	고주파수 [Hz]	복선	복복선
1	A	1,699	1,682	1,716	상선	상1선
	B	2,296	2,279	2,313		
2	C	1,996	1,979	2,013	하선	하1선
	D	2,593	2,576	2,610		
3	E	1,549	1,532	1,566	상선	상2선
	F	2,146	2,129	2,163		
4	G	1,848	1,831	1,865	하선	하2선
	H	2,445	2,428	2,462		



[그림 22] AF 궤도회로의 구성

가. 송신기

멀티바이브레이터는 4.8Hz의 구형파 신호 주파수를 생성한다. 구형파 주파수는 발진기의 출력을 변조하여, 변조기로부터 출력신호를 생성한다. 신호는 4.8Hz의 비율로 공칭 신호주파수 $\pm 17\text{Hz}$ 로 변화하는 신호이다. 증폭기는 이 신호를 궤도로의 전송에 적합한 출력 수준까지 증가 시킨다. 변압기는 증폭기 출력을 부하에 적합하게 한다. 필터는 불필요한 직/교류 전압으로부터 유닛을 격리한다. 송신기의 회로 구성도와 송신모듈의 특성은 각각 [그림 23], [표 5]와 같다.



[그림 23] 송신기 회로 구성도

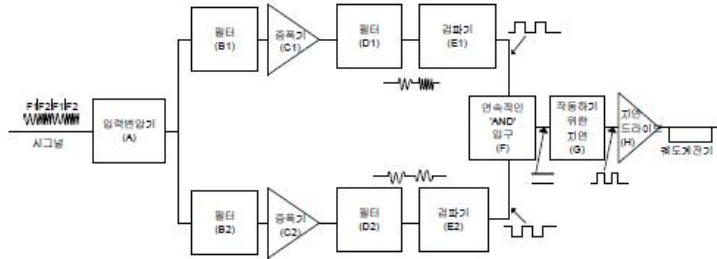
[표 5] 송신모듈 특성

정격전압	DC 24V
동작전압	DC 22.5 ~ 30.5V
소비전류	2.2A 이하
출력전류	3 ~ 40W
변조속도	174ms ~ 260ms(4.8Hz ± 20%)
절연저항	DC 500V/50MΩ

나. 수신기

궤도 동조 유닛으로부터의 신호는 입력변압기로 전송된다. 이 변압기는 수신기 회로를 동조 유닛에서 분리시키고 권선비를 바꾸는 스트랩에 의하여 수신기 감도를 미리 설정한다. 이 신호는 주파수에 따라 더 높은 신호주파수(공칭 신호주파수 +17Hz)는 필터(B1)에서 여과되고, 더 낮은 신호주파수(-17Hz)는 필터(B2)에서 여과된다. 각 필터에서 출력되는 2개의 신호는 각 증폭기에서 증폭되고, 추가로 필터에서 여과되고, 복조기에서 복조된다. 이 신호들은 회로에서 결합되어 1개의 일정한 출력이 동작 지연회로에 주어지며, 이때 복조에 의해 생성된 양쪽 주파수의 신호는 서로 역상으로 존재한다. 만약 출력되는 신호가 2초 이상 계속 유지되면, 출력 계전기 증폭기를 경유하여 여자 된다. 수신기에 유입되는 과전압/전류는 인입 신호케이블에 설치된 회로보호 차

단기나 서지 어레스터로부터 보호된다. 동조유닛의 궤도성분은 우수한 수신기 분리 기능을 갖는다. 수신기의 회로 구성도, 수신모듈의 특성, 수신입력 전류는 각각 [그림 24], [표 6], [표 7]과 같다.



[그림 24] 수신기 회로 구성도

[표 6] 수신모듈 특성

전원특성	정격전압: DC 24V 동작전압: DC 22.5V ~ 30.5V, 소비전류: 1A 이하
계전기 동작전원 출력지연시간	여 자: 2초 ±0.5초 무여자: 1ms 이하
계전기 출력전압	정격 동작전압범위에서 DC 19.2 ~ 31.2V
절연저항	DC 500V / 50MΩ 이상

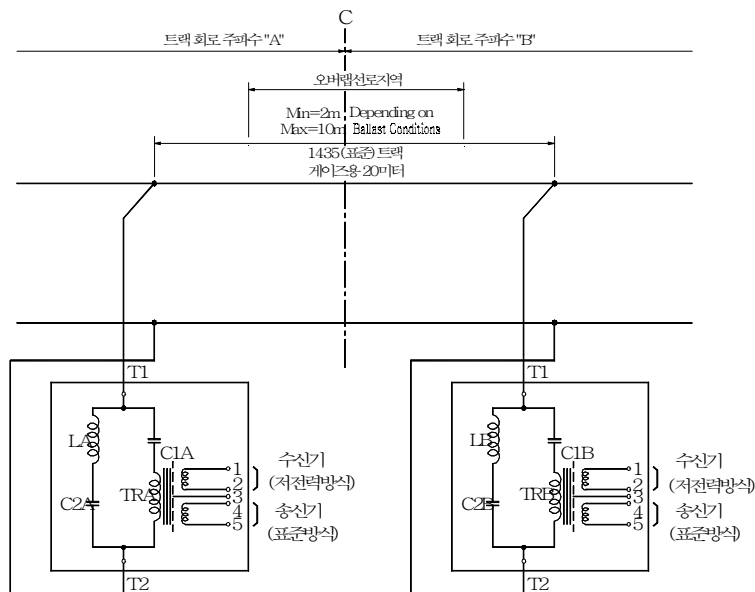
[표 7] 수신입력 전류

수신감도	입력전류
1	172mA 이상
2	86mA 이상
3	57mA 이상
6	28mA 이상
9	19mA 이상
13	14mA 이상

다. 동조유닛

동조유닛 AF케도회로의 전기적 분리 이음매를 생성하기 위하여 사용된다. 동조 유닛의 동작주파수에 따라 A타입, B타입, C타입, D타입으로 구분된다. 동조 유닛의 설계는 수동 소자만을 이용하며, 케도 측면에 설치되는 동조 유닛에 별도 전원은 요구되지 않는다. 종단유닛은 동조구역이 없는 곳의 케도에 신호를 결합시키는데 사용되며, 이는 동조구역의 특성을 모방함으로써 수행된다. 종단유닛은 통상 중앙 공급방식 및 AF 케도회로가 아닌 회로와 인접되는 케도회로를 위해 사용된다. 각각의 주파수에 대해서는 종단 유닛이 설치되며 주파수 유형별 케도 전압은 [표8]과 같다[61,62,63,64].

- ① 케도회로의 전기적 절연을 구성하기 위하여 A/B, C/D, E/F, G/H 쌍으로 이루어지며, A형 TU에 B형 TU의 주파수전압을 인가 시 유입되는 전압인 인접케도 허용전압은 주파수 유형별로 [표 9]와 같다.
- ② 케도회로 길이가 짧은 구간에서 사용하는 저출력 케도전압은 [표 10]과 같다.
- ③ 무절연으로 구성할 수 없는 케도회로에서 케조절연을 사용하여 케도회로를 구성할 경우 사용하는 것으로 주파수 유형별 케도전압 종단용은 [표 11]과 같다.
- ④ 케도회로 길이가 짧은 구간에서 사용하는 저출력 케도전압 종단용은 [표 12]와 같다.



[그림 25] AF 케도회로의 전기적 분리 이음매

[표 8] 주파수 유형별 궤도전압

주파수유형	공칭주파수 (Hz)	저주파수 (Hz)	고주파수 (Hz)	궤도전압(V)	저·고주파 전압편차(V)
A	1,699	1,682	1,716	2.4 ~ 3.5	0.18 이하
B	2,296	2,279	2,313	3.4 ~ 5.1	0.27 이하
C	1,996	1,979	2,013	2.5 ~ 3.7	0.20 이하
D	2,593	2,576	2,610	3.7 ~ 5.6	0.30 이하
E	1,549	1,532	1,566	2.2 ~ 3.3	0.17 이하
F	2,146	2,129	2,163	3.1 ~ 4.8	0.26 이하
G	1,848	1,831	1,865	2.4 ~ 3.6	0.20 이하
H	2,445	2,428	2,462	3.5 ~ 5.3	0.29 이하

[표 9] 주파수 유형별 인접궤도 허용전압

주파수 유형	인접주파수			인접궤도전압 (mV)	저·고주파 전압편차(mV)
	공칭주파수 (Hz)	저주파수 (Hz)	고주파수 (Hz)		
A	2,296	2,279	2,313	50 이하	15 이하
B	1,699	1,682	1,716	65 이하	20 이하
C	2,593	2,576	2,610	50 이하	15 이하
D	1,996	1,979	2,013	65 이하	20 이하
E	2,146	2,129	2,163	50 이하	15 이하
F	1,549	1,532	1,566	65 이하	20 이하
G	2,445	2,428	2,462	50 이하	15 이하
H	1,848	1,831	1,865	65 이하	20 이하

[표 10] 주파수 유형별 저출력 궤도전압

주파수유형	시험주파수(Hz)	궤도전압(V)
A	1,699	0.7 ~ 1.4
B	2,296	1.0 ~ 1.9
C	1,996	0.8 ~ 1.4
D	2,593	1.2 ~ 2.1
E	1,549	0.6 ~ 1.3
F	2,146	0.9 ~ 1.8
G	1,848	0.8 ~ 1.4
H	2,445	1.0 ~ 2.0

[표 11] 주파수 유형별 궤도전압(중단용)

주파수유형	공칭주파수(Hz)	저주파수(Hz)	고주파수(Hz)	궤도전압(V)	저·고주파 전압편차(V)
A	1,699	1,682	1,716	2.4 ~ 3.5	0.18 이하
B	2,296	2,279	2,313	2.9 ~ 4.4	0.23 이하
C	1,996	1,979	2,013	2.4 ~ 3.5	0.19 이하
D	2,593	2,576	2,610	3.2 ~ 4.9	0.26 이하
E	1,549	1,532	1,566	2.0 ~ 3.0	0.16 이하
F	2,146	2,129	2,163	2.9 ~ 4.4	0.23 이하
G	1,848	1,831	1,865	2.2 ~ 3.3	0.17 이하
H	2,445	2,428	2,462	3.5 ~ 5.3	0.27 이하

[표 12] 주파수 유형별 저출력 궤도전압(종단용)

주파수유형	시험주파수(Hz)	궤도전압(V)
A	1,699	0.7 ~ 1.3
B	2,296	1.0 ~ 1.8
C	1,996	0.8 ~ 1.4
D	2,593	1.2 ~ 2.0
E	1,549	0.6 ~ 1.2
F	2,146	1.0 ~ 1.8
G	1,848	0.7 ~ 1.3
H	2,445	1.2 ~ 2.1

라. 임피던스 본드

전차선 전류와 신호전류가 동일한 궤도를 사용하며, 이때 신호전류는 1개의 궤도회로 내에만 흘러야 하고, 전차선 전류는 변전소까지 연속으로 회로가 구성되어야 한다. 이를 위해 임피던스 본드는 궤도회로 경계지점에서 전차선 전류는 통과시키고, 신호전류는 차단시킨다. 전차선 전류는 (-)극성이 레일의 양쪽에 반반씩 반대 방향으로 흐르므로 임피던스 본드의 철심은 자화되지 못하여 2차 코일로는 유기되지 못하고, 중성점을 거쳐 인근 궤도회로로 흐른다. 신호전류는 한 방향으로만 흐르므로 철심을 자화시켜 2차 코일에 전압을 유기 후 계전기를 여자 시킨다. 이 때 철심의 전기적 중성점에는 전위차가 발생하지 않으므로 인접 궤도회로로 신호전류는 유출되지 않는다.

이런 특성에 의해 전원주파수의 고조파 성분이 신호전류나 귀선전류에 동일하게 존재하더라도 신호전류에 포함된 고조파 성분은 필터링 된다. 그리고 서로 다른 폐색구간의 경계지점에서 신호전류가 차단되기 때문에 해당 type의 주파수는 차단된다. 또한 차량의 유무에 관계없이 임피던스 본드는 이와 같은 특성을 유지한다. 궤도회로의 제어거리는 누설 콘덕턴스가 0.5~0.1 mho/km일 때 별도 부가설비 없이 50~1,000m를 유지할 수 있어야 하며, 최대 제어거리는 1,500m 이상이어야 한다[65].

[표 13] 궤도회로 길이와 케이블의 길이

궤도회로 길이	송신케이블 길이(최대)	비 고
50m~300m	950m	수신케이블 길이 : 480m 사용케이블 : 2.5mm ² 의 경우 표준수치로서 현장조건에 따라 달라질 수 있음
300m~600m	480m	
600m~800m	220m	
800m~900m	120m	
900m~1,000m	30m	

궤도회로의 단락감도는 0.1Ω~1.7Ω이어야 하며, 중첩궤도(Post shunt 및 Pre shunt) 전기절연의 허용범위는 동조구역 내(인접한 TU 상호간)에서 최대 10m~최소 0.5m 범위 내에서 조정이 가능하여야 하며, 역구내에서는 2m 이하로 하여야 한다. 차량에서 발생하는 노이즈 또는 고조파에 의하여 궤도계전기가 오동작하지 않도록 하여야 하며, 지락 또는 뇌해로부터 장치가 보호될 수 있도록 반드시 보호회로를 구비하여야 한다. 또한 궤도회로 경계구간을 정확하게 설정하여 열차가 통과할 때 순간적인 사구간이 발생하지 않아야 한다.

마. 감도한계

AF 궤도회로는 신호기를 여자 시킬 때, 일반적으로 2초간 수신기에 변조 신호를 적용하도록 요구한다. 그 이유는 수신기가 궤도회로가 비 점유 상태인 것을 표시하기 전에 수신기에 내장된 지연 시간이 최소 2초이기 때문이다. 따라서 궤도회로는 2초 미만으로 지속되는 송신기 신호를 광범위하게 모방하지 않는 과도 간섭에 대해 본질적으로 내성을 가지고 있다.

AF 궤도회로 수신기를 여자 시킬 때 요구되는 주파수에서의 최소 레일 전류는 궤도회로 수신기와 관련 구성요소를 모델로 하여 계산할 수 있다. 허용 간섭 전류 레벨은 적절한 간섭 허용오차를 적용한 값에서 도출된다. 수신기를 여자 시킬 때 알려진 속도

의 변조가 신호 시스템의 안전 측 고장을 유발할 정도로 충분히 길게 지속되지 않는다 면, 높은 수준의 간섭 전류를 허용할 수 있다. 앞서 설명되어 있는 궤도회로 구성요소는 모델의 궤도회로로 갖추어져야 한다.

한 쌍의 레일로 궤도를 모델화시키기 위해서 필요할 뿐이다. 즉, 발라스트 저항을 모델화 시킬 필요가 없기 때문에, 전철화 시스템과 독립적으로 궤도를 모델화 한다. 관리대상의 주파수 범위가 상대적으로 좁기 때문에 각 레일을 직렬 저항과 인덕턴스로서 단순히 모델화 한다. 먼저, 수신기를 작동시키기 위해서는 동조 구역(또는 ETU : End Tuning Unit)의 초반에 레일 전류를 계산할 필요가 있다. 수신기 입력 감도는 궤도회로에 대해 유일하게 정의된 입력 레벨이다. 간섭 전류를 레일에 직접 삽입한다. 예컨대, 어떠한 병렬 ‘단락’ 경로도 가정하지 않는다[47,65].

추가적인 간섭 소스를 허용하도록 허용 간섭 레벨에 간섭 허용오차를 적용한다. 전도 간섭의 경우, 간섭 허용오차 50%를 사용한다. 차축 대 차축 전압의 경우, 간섭 허용오차 33%를 사용한다. 송신기 피드쓰루(feedthrough : 어떤 면의 양쪽에 있는 두 회로를 연결하는 도체)의 레벨은 대개 열차 입환 임피던스와 독립적이며, 임피던스가 증가하면 피드쓰루 레벨도 증가하게 된다. 열차에 의해 생성된 간섭은 위상에서 주파수가 동일해야 하며, 송신기가 문제가 되려면 동일 속도로 변조되어야 한다. 이것은 가장 발생가능성이 적다. 다른 궤도회로의 피드쓰루는 기반시설이 온전한 수신기에서 8mA로 제한되고, 궤도회로의 설계와 배치도에 따라 축소된다. 송신기 스위치를 끈 상태에서 궤도회로 운용 시, 작동 주파수에서 궤도회로 수신기에 흐르는 전류 레벨을 측정한다. 만약 이 전류가 8mA를 초과하게 될 경우에는 이 시험은 실패한 것으로 간주되고, 시험을 통과할 때까지는 궤도회로를 작동시킬 수 없다. 특정 궤도회로를 흐르는 간섭 전류의 레벨을 궤도회로 기록 카드에 기록한다[66,67,68].

인접 동조 유닛의 차단은 ‘현시된 고장(revealed failure)’이며, 수리될 때까지 피드쓰루가 증가될 수 있다. 그러나 특히 결함 측 고장(2초)을 유발하는데 필요한 지속시간을 고려할 때, 열 주파수의 피드쓰루와 필적하는 차가 생성하는 간섭의 개연성, 위상, 변조속도는 무시 가능한 것으로 가정한다. 열차를 크로스 본드로 배열할 때, 병렬 궤도에서 열차의 차축 대 차축 전압은 상당한 영향을 인가 할 뿐이다. 궤도회로에서 멀리 떨어져 있는 열차로 인한 기여도는 작을 것이다. 이들 소스는 위상에서 주파수가 동일해야 하며, 이것이 문제가 되려면 분석된 열차의 간섭과 유사한 속도로 변조되어야 한다. 이것은 가장 발생가능성이 적으며, 이는 주파수, 위상, 열차에 의해 생성된 간섭의 변조 속도와 일치하는 요구사항 때문에 다른 소스로 인한 일반적인 주변

노이즈는 하찮은 것으로 간주될 수 있다.

AF 수신기의 레벨 감지는 순수 전자식으로 인상전류 및 낙하전류 레벨도 동일하게 주어진다. 이것은 수신기 내에서는 어떠한 히스테리시스에도 가깝지 않다. 수신기 증가 설정은 궤도회로 길이와 임피던스 본드의 존재 유무에 따라 좌우된다. 최대 증가 설정은 13단계이며, 이는 수신기 입력에서 여자 전류 15mA에 해당된다. 만약 15mA 임계치 이하의 신호를 궤도회로 수신기에 적용할 경우, 신호는 변조에도 불구하고 수신기를 여자 시키지 않는다[65,66,69].

2. 고조파 특성

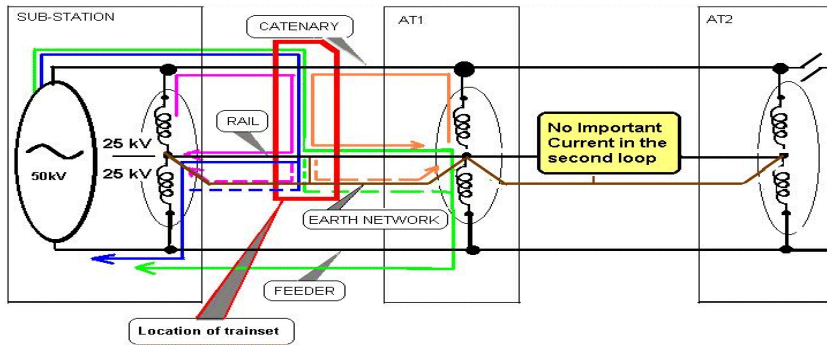
무절연 AF궤 도회로에서 고조파 환경에 따른 간섭 현상의 검토가 필요하다. 유럽의 경우 16Hz, 50Hz 및 DC 1500V, AC 2,5000V, AC 2×2,5000V 등 여러 종류의 주파수와 전력원의 조합이 사용됨에 따라 이들 전원에 적합하도록 궤도회로 주파수가 주어지는 반면, 우리나라의 경우에는 기본 60Hz에 AC 2×2,5000V가 사용되므로 궤도회로 제작업체에서 사용 주파수를 그대로 적용하기에는 고조파에 의한 안전성 문제의 유발 가능성이 있다. 현재 경북 고속선에서 사용하는 UM71 AF궤도회로의 경우에도 유럽에서 사용하는 전력원 주파수 50Hz에 대한 궤도회로 주파수를 우리나라의 60Hz 주파수에 적합하도록 변경하여 관련 궤도회로 구성품에 대한 주파수 범위를 설계하였다. [표 14]는 고속선에서 사용하는 UM71C AF궤도회로에 대한 60Hz 고조파 시험결과를 주파수 영역으로 표시한 결과이다. [표 14]에서 궤도회로는 안전측 동작원리에 따라 기본 공칭주파수를 주파수 축으로 이동(FSK : Frequency Shift Keying)한 두 개의 축 이동 주파수($F-\Delta F=1700-10=1690$, $F+\Delta F=1700+10=1710$)로 정보 전송을 실행하며, 주어진 두 개의 이동 주파수(1690, 1710)는 공칭 기본 주파수를 중심으로 $F\pm 50\text{Hz}$ 의 주파수범위(1650Hz~1750Hz)내에서 동작한다. 이러한 결과를 우리나라의 60Hz 환경에 적용하기 위해 1700Hz는 2040Hz로, 나머지 주파수는 [표 14]와 같이 변경하였다. 이것은 적용 대상 주파수를 60Hz의 짝수 고조파에 인접하게 하여 차량에서 발생하는 기수 고주파에 의한 궤도회로 영향을 최소화하기 위해서 이다[70,71,72,73,74,75].

[표 14] 고조파관련 궤도회로 주파수 비교

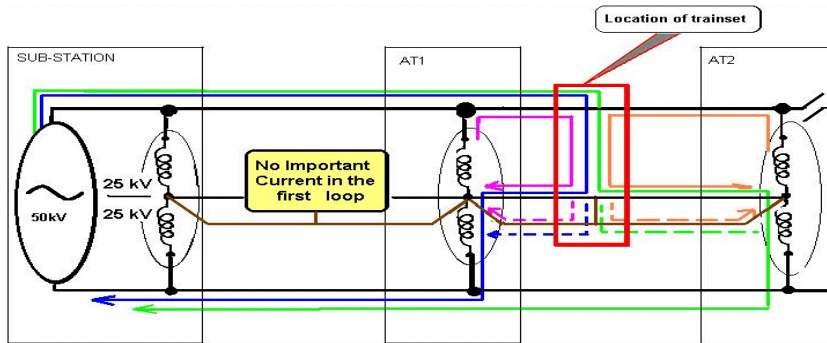
궤도회로 주파수	제1주파수	제2주파수	제3주파수	제4주파수
프랑스의 UM71 궤도회로 주파수(50Hz)	1700	2300	2000	2600
UM71 궤도주파수관련 차량고조파(50Hz)	1700 (34차 고조파)	2300 (46차 고조파)	2000 (40차 고조파)	2600 (52차 고조파)
유럽의 T121 궤도회로주파수(50Hz)	1699	2296	1996	2593
T121궤도회로 주파수관련 차량고조파(50Hz)	1700 (34차 고조파)	2300 (46차 고조파)	2000 (40차 고조파)	2600 (52차 고조파)
경부고속선의 UM71궤도회로주파수(60Hz))	2040	2760	2400	3120
UM71궤도회로 주파수관련 차량고조파(60Hz)	2040 (34차 고조파)	2760 (46차 고조파)	2400 (40차 고조파)	3120 (52차 고조파)
기존선의 T121궤도회로주파수	1699	2296	1996	2593
T121궤도회로 주파수관련 차량고조파(60Hz)	1680 (28차 고조파)	2280 (38차 고조파)	1980 (33차 고조파)	2580 (43차 고조파)

3. 전차선 귀선전류

귀선 전류는 주로 변전소, 급전 구분소 및 전력 관련구분소와 관련 궤도의 임피던스 본드 위치에 의존하며, 궤도 회로의 임피던스 본드를 통해 흐르는 귀선 전류의 크기는 해당 역보다는 인근 변전소에서 더욱 중요한 역할을 한다. 귀선 전류의 크기는 주어진 영역에 설치된 병렬 선로의 수에 의존하며, 각각의 궤도 회로의 임피던스본드 중성점은 상호 연결된다. 또한 선로를 통해 흐르는 전체적인 귀선 전류 값을 측정하기 위해서는 동일 장소에서 동시에 운행되는 열차의 수 및 이들 열차에 의해 소모되는 소비 전력을 충분히 고려해야 하며, 접지 전류는 변전소에서 가장 작고 변전소로부터 멀어질수록 비례하여 증가하지만, 귀선 전류는 변전소에서 가장 크고 변전소로부터 멀어질수록 거리에 따라 감소하는 것으로 프랑스 철도청의 귀선 전류 관련 규정에 따라 제시되었다[16, 19, 76, 77, 78, 79, 80].



a) 열차가 변전소 부근에 위치할 경우



b) 열차가 AT(단권 변압기) 사이에 위치할 경우

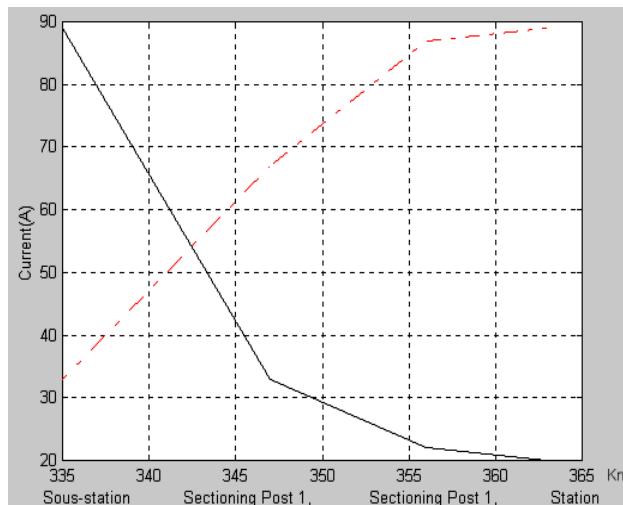
[그림 26] 귀선 전류 귀환 회로도

하나 또는 여러 대의 열차가 동일 선로 상에서 운행될 경우, 전차선 및 급전선에 의해 전송되는 견인 전류는 주어진 구간에 위치한 레일 수, 공중보호선(CPW), 접지선으로 구성된 [그림 26]과 같은 귀선 전류 귀환 통로에 의해 변전소로 귀환된다.

[그림 26]의 a)에서 열차가 변전소 부근에 위치할 경우, 변전소와 AT1, AT1과 AT2 사이의 귀선전류 루프가 형성되며, AT1과 AT2 사이의 루프는 변전소의 귀선 전류에 영향을 주지 않게 된다. 따라서 대부분의 귀선 전류는 변전소와 AT1 사이의 루프를 통해 변전소로 귀환되며, 공동 접지망의 크기는 상대적으로 작아지기 때문에 귀선 전류가

높게 나타나게 된다. 또한 [그림 26]의 b)에서 열차가 AT1과 AT2 사이에 존재하는 경우, 변전소와 AT1 사이의 루프는 귀선 전류에 영향을 거의 주지 않고 접지 전류망은 변전소와 AT1, AT2를 통합하는 루프로 형성된다. 따라서 이러한 경우, 귀선 전류는 [그림 26]의 a)에 비해 상대적으로 작아지지만, 접지 전류는 증가하게 된다. 특히 전철화 구간에서의 귀선 전류의 흐름을 예측하는 것은 매우 복잡하며, 선로변 자갈 도상의 임피던스, 공중보호선(CPW)의 길이, 전력 공급 장소에 대한 열차의 상대적인 위치에 의존한다.

전차선 전류에 따른 최대 귀선 전류 예측 시 필요로 하는 기본 자료는 예측을 실행하려는 구간에 적용될 견인 전력에 의존한다. 열차의 운행 속도, 사용 전력 및 역률을 150km/h, 4,500kW 및 0.9로 가정할 경우, 전차선 전류는 200A로 주어진다. 따라서 SNCF(프랑스 철도청)의 귀선 전류 예측 방법에 의해 예상되는 귀선 전류와 접지 전류에 대한 값은 [그림 27]과 같이 주어질 것으로 예상된다. [그림 27]의 시뮬레이션 결과를 보면 귀선 전류는 변전소에서 높게 나타나는 반면, 접지 전류는 변전소에서 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 역 구내의 경우에는 이와 대조적으로 접지 전류 값이 최대가 되는 반면, 귀선 전류는 최소가 된다.



(실선 : 귀선 전류, 점선 : 접지 전류)

[그림 27] 귀선 전류와 접지 전류 예측값

제3장 귀선전류 고조파 측정 및 분석

제1절 시험 및 측정

열차가 전철화 구간을 운행 시 전차선으로 공급된 전류가 차량을 통하여 변전소로 귀환하는 전류를 귀선 전류로 정의하며 전력, 전차선, 접지 및 신호 시스템과 밀접한 관계를 갖는다. 전기철도 차량에 의해 발생하는 귀선전류는 선로변 직원의 안전과 전철화에 따른 철도관련 전기시스템의 보호를 위해 고려할 중요한 요소 중의 하나이다. 또한, 귀선전류는 전철화 선로의 궤도회로 구성 요소인 임피던스 본드의 용량에도 연관되며, 변전소, 급전 구분소 및 전력관련 개소의 위치와 밀접한 관계가 있다.

최근의 열차제어시스템은 ICT(Information and Communication Technology)를 적용한 무선통신에 의한 가상폐색 및 이동폐색시스템을 실현하는 열차제어시스템으로 전환되어 가는 추세이나 일반 철도의 경우 AF 무절연 궤도회로가 대부분 설치되어 있기 때문에 귀선전류의 불평형 및 과전류상태에 의한 시스템 유도장해, 시스템 고장 등이 보다 심각하게 분석될 필요가 있다. 또한 전기철도차량에서 사용하는 전력변환장치로 인한 부하전류에는 고조파가 함유되어 있고, 이 고조파 전류로 인해 전기차량은 물론 변전소, 신호시스템, 데이터 전송 및 감시시스템에 영향을 주게 된다[23,82,83,84].

열차운행의 안전을 책임지는 열차제어시스템이 귀선전류의 고조파 영향에 의해 오동작을 일으키는 경우, 열차운행의 중단 등과 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 기존의 논문들을 살펴보면 귀선전류의 접지유형 및 크기, 고조파 분석에 대한 연구 내용과 결과가 주를 이루고 있다[15,16,49]. 철도안전법과 관련된 시설물 검증시험의 하나로서 궤도회로 귀선전류의 적합 여부를 확인해야 하므로 다양한 노선에 대한 적합성 여부를 위한 시험방법과 기준에 대해 많은 논의가 이루어지고 있지만 체계적인 시험방법과 기준은 아직 많이 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 호남선 구간에 대한 체계적이고 신뢰성이 높은 귀선전류 및 귀선전류 고조파의 측정 방법 및 기준을 제시하였으며, 이에 따른 시험 결과를 토대로 영향 분석을 하였다. 보다 구체적으로는 호남선 구간에서 차량운행에 따른 궤도회로 임피던스 본드의 귀선전류 최대값 및 좌우측 레일의 귀선전류 불평형 정도를 측정하여 안전성을 평가하였으며, 귀선전류 고조파 영향 분석을 통해 적합성을 확인하였다[72,73,85].

제2절 귀선전류 고조파 측정방법 및 기준

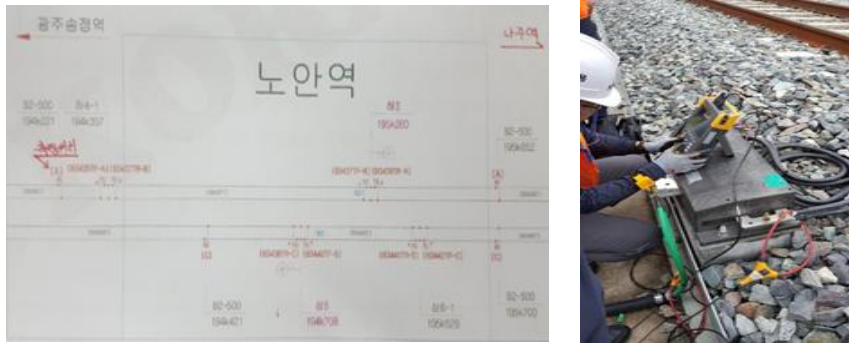
귀선전류 고조파 측정의 용이성, 운행열차의 다양성, 변전소 인접여부 등 귀선전류 고조파 측정을 위한 장소 선정 기준을 마련하여 노안역 등 3개 측정 후보 장소에 대한 측정 적합성을 검토하였다. 먼저 장성역의 경우 측정은 용이하였으나 KTX와 같은 고속 열차가 운행하지 않고 변전소와도 떨어져 있으며, 무안역은 모든 열차가 운행되고 있으나 역시 변전소와 상당한 거리를 두고 있고, 마지막으로 노안역은 측정이 용이하고 KTX, ITX, 무궁화, 화물열차 등 모든 전기차량이 운행되고 있으며, 변전소와 가장 인접한 장소에 위치하고 있다. 따라서 3개 측정 장소 중 [표 15]와 같이 노안역이 가장 적합한 것으로 선정되어 측정 장소로 채택하였다.

[표 15] 귀선전류 고조파 측정 장소 선정

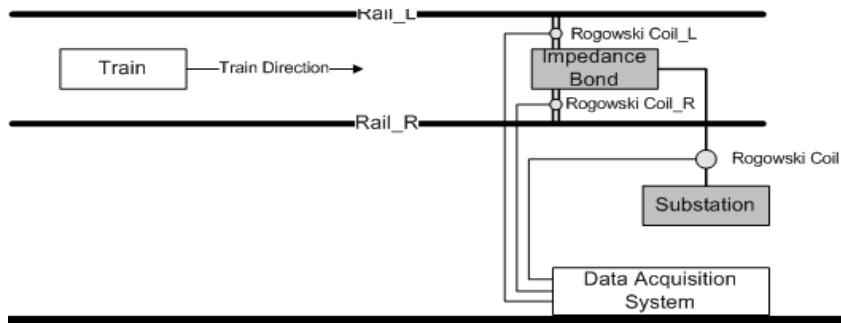
구분	선정결과	측정 용이성	운행열차 다양성	변전소 인접여부
장성역 인근	-	◎	△	×
노안역 인근	채택	◎	◎	◎
무안역 인근	-	◎	◎	×

[범례 : ◎ 적합, △ 보통, × 부적합]

귀선전류 및 귀선전류 고조파는 열차운행속도를 160km/h로 설정하여 시험하고 [그림 28]과 같이 노안역부근 하선에 위치한 임피던스 본드에 계측장비인 데이터 수집 프로그램이 설치된 노트북 컴퓨터에 연결하여 측정한다. 또한, 귀선전류 및 고조파 측정과 함께 [그림 29]과 같이 좌우측 레일에 흐르는 귀선전류의 불평형을 동시에 측정하기 위하여 임피던스 본드와 레일 사이의 좌/우측을 분리하여 귀선전류를 측정한다. 특히 귀선전류가 최대일 것으로 예상되는 변전소 및 전력구분소의 임피던스 본드 귀선케이블에서 귀선전류 및 귀선전류 고조파 측정을 수행함으로써 궤도회로장치에 대한 귀선전류의 한계치 초과 여부와 고조파 간섭 및 영향 여부 확인이 가능할 것으로 예상된다[74,75].



[그림 28] 귀선전류 및 귀선전류의 고조파 측정 대상 위치



[그림 29] 귀선전류 및 귀선전류 고조파 측정 시험 구성도

귀선전류의 시험항목 및 기준은 [표 16]에 나타난 것처럼 귀선전류의 측정치가 한국 철도표준규격 “KRS-SG-0038 무절연 가청주파수(AF) 궤도회로”에 따라 1,000A 이하여야 하며, 임피던스 본드 귀선 케이블에서 측정된 좌/우측의 귀선전류의 경우 국내에는 규정이 없기 때문에 프랑스 SNCF의 좌/우측의 귀선전류 차이가 총 귀선전류의 10% 이상일 경우 불평형을 해소하기 위해 유지보수를 시행하는 규정을 참고하여 불평형이 총 귀선전류의 10% 이상일 경우에는 좌/우측의 불평형을 기록하였다[86,87].

[표 16] 귀선전류 시험항목 및 기준

시험항목	기 준
전철화구간에서의 귀선전류 확인	귀선전류의 측정치 ≤ 1000A 좌/우측의 귀선전류 불평형이 총 귀선전류의 10% 미만이어야 함.

귀선전류 고조파 시험의 경우, 사용되고 있는 궤도회로 기준 주파수(1699Hz, 2296Hz, 1996Hz, 2593Hz)별로 중심주파수의 측면주파수($F_0 \pm 17\text{Hz}$)에서 측정된 고조파를 [표 17]의 궤도회로 주파수별 고조파 제한치를 초과하지 않아야 하며, 측정된 고조파가 비교적 클 경우에는 해당주파수에서 노이즈의 지속시간을 같이 검토하여 판단해야 한다. 이러한 기준의 의미는 측정된 고조파가 궤도회로 수신 장치의 수신기 입력전류 허용치인 14mA(궤도의 임피던스 본드에서는 238mA)를 시험기준으로 설정하는 것이 타당하나, 국내 제작사들의 자체 시험 결과 약 5% 정도 높은 300mA까지는 궤도회로 수신기의 동작이 영향을 받지 않는다는 의견을 반영하였다[4].

[표 17] 궤도회로 주파수별 고조파 제한치

궤도회로 주파수	1699Hz	2296Hz	1996Hz	2593Hz
측면주파수(중심주파수(F_0)+17Hz)의 고조파 제한치	300mA	300mA	300mA	300mA

제3절 귀선전류 고조파 측정

1. 귀선전류 측정

2018년 9월 7일 호남선 노안역부근 하선에 위치한 임피던스 본드에 [그림 30]과 같이 귀선전류 및 고조파 측정 시험용 계측장비 및 측정센서를 설치하고 시험하였다. 시험 당일 기상은 맑은 날씨였으며, 현장여건 또한 계측시험에 적합하였다. 정상상태에

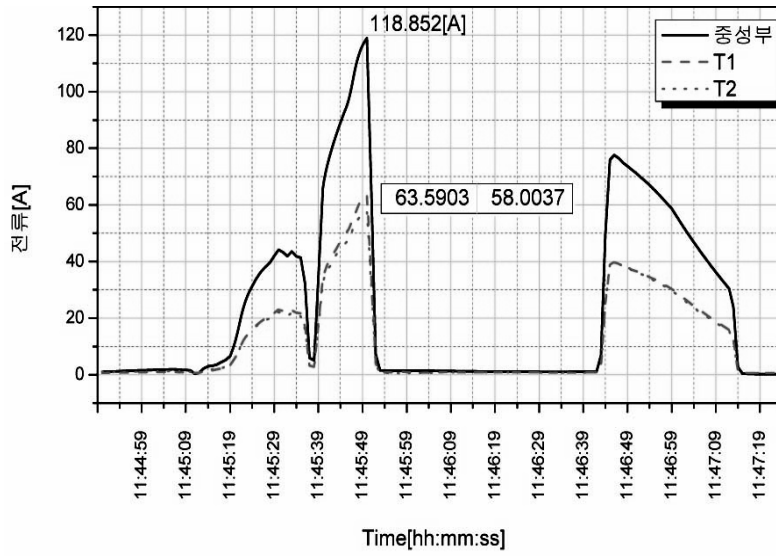
서 열차속도가 160km/h로 운행 중일 때 귀선전류를 측정하였으며, 이러한 귀선전류의 측정결과 값에 대해서는 [표 18] 및 [그림 31], [그림 32], [그림 33]으로 나타났다. 측정된 귀선전류의 최대값은 좌/우측 레일에서 측정된 최대 전류 측정 값을 합한 값과 거의 동일하였으며, [표 18] 및 [그림 31], [그림 32], [그림 33]에서 나타난것과 같이 좌/우측 레일에서 측정된 값의 합이 거의 동일함을 알 수 있었다.



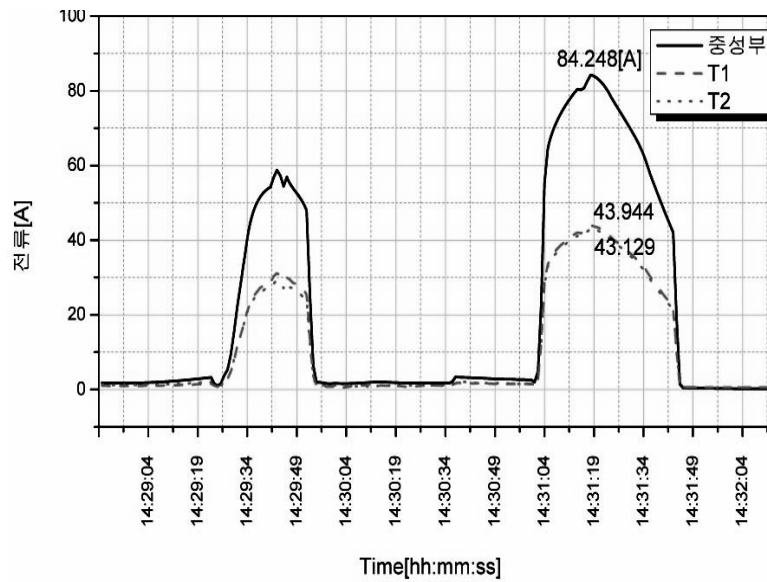
[그림 30] 노안역 인근 임피던스 본드 및 센서 설치

[표 18] 160km/h 주행 시 정상상태 귀선전류 측정 결과

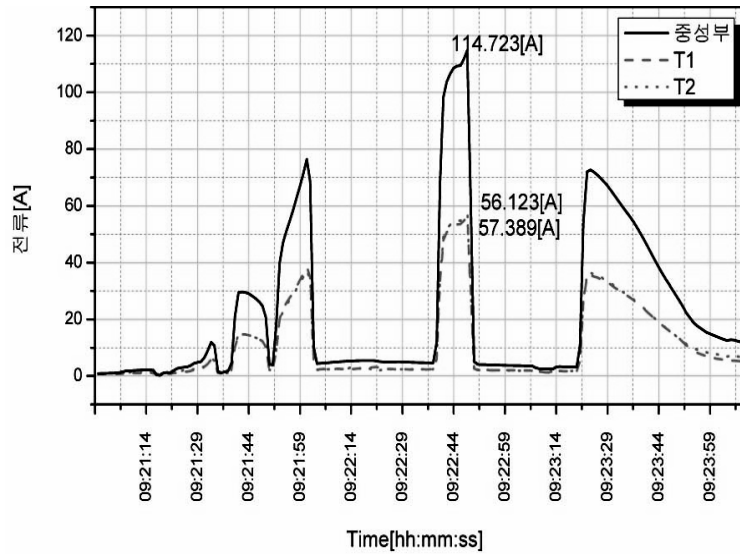
평가항목	차량조건	판정기준	시험결과	판정	
귀선전류	1회	정상상태	귀선전류의 최대측정치	118.9A	적합
			좌/우측 불평형	4.7% (5.59A)	적합
	2회	정상상태	귀선전류의 최대측정치	84.2A	적합
			좌/우측 불평형	0.97% (0.815A)	적합
	3회	정상상태	귀선전류의 최대측정치	114.A	적합
			좌/우측 불평형	1.11% (1.27A)	적합



[그림 31] 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 1회



[그림 32] 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 2회



[그림 33] 차량 정상상태의 귀선전류 최대측정치 3회

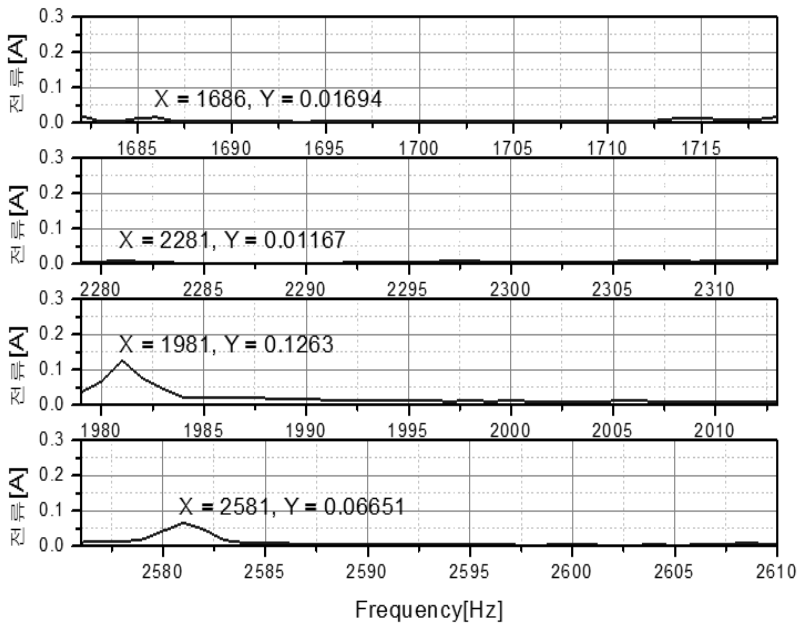
열차가 160km/h로 주행할 때 노안역부근 임피던스 본드에서 측정된 귀선전류에 대해서는 [표 18]에 나타내었고, [그림 31], [그림 32], [그림 33]과 같이 열차 진행방향에 따른 귀선전류 최대 측정값을 중성부, T1과 T2의 그래프로 보여주고 있다. [그림 31], [그림 32], [그림 33]과 같이 노안역 부근의 임피던스 본드에서 정상상태 열차가 통과할 때의 귀선전류 측정값이 최대값인 1,000A보다 모두 낮게 측정되었고, 좌/우측 불평형이 총 귀선전류의 10% 미만이므로 적합함을 알 수 있었다.

2. 귀선전류 고조파 측정

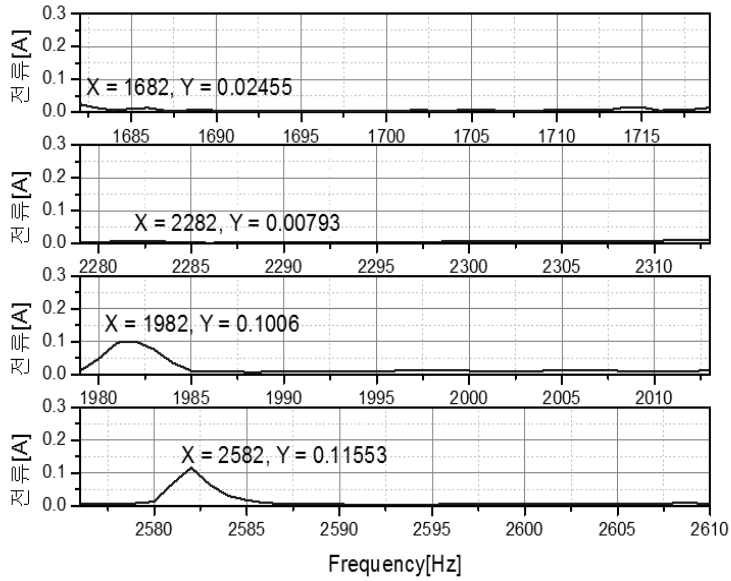
하행방향, 정상상태에서 160km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 귀선전류 고조파 측정결과는 [표 19]에 제시하였으며, 궤도회로 기준 주파수별 고조파 측정값이 300mA에 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 각 기준 주파수별 귀선전류 고조파에 따른 영향을 분석하기 위해 주파수에 따른 귀선전류 변동 값을 [그림 34], [그림 35], [그림 36]과 같이 데이터 수집 프로그램을 사용, 분석하여 그래프로 제시하였다. 귀선전류 고조파를 측정한 결과 기준치인 300mA보다 낮게 나타났기 때문에 기준에 적합함을 알 수 있다.

[표 19] 160km/h 주행 시 정상상태 귀선전류 고조파 측정 결과

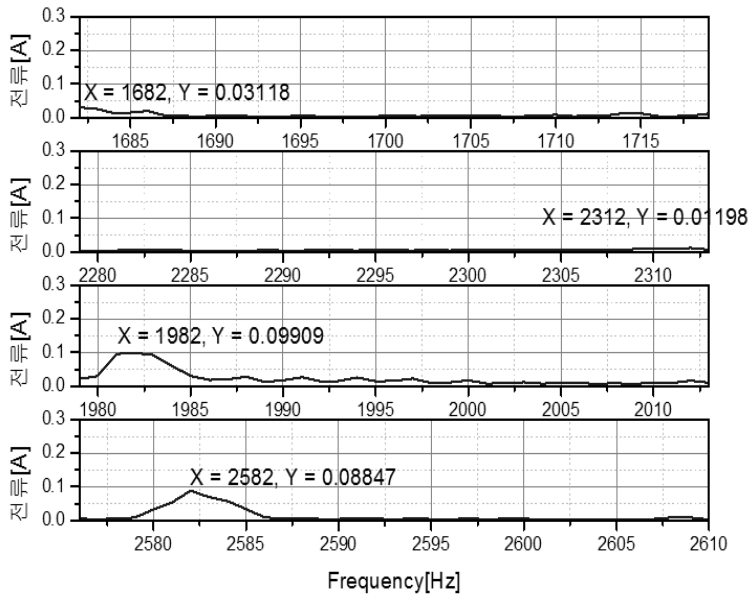
평가항목	차량조건	판정기준	시험결과	판정
1699 ± 17Hz	정상상태	≤ 300mA	16.9mA	적합
2296 ± 17Hz			11.7mA	
1996 ± 17Hz			126.3mA	
2593 ± 17Hz			66.5mA	
1699 ± 17Hz	정상상태	≤ 300mA	24.6mA	적합
2296 ± 17Hz			7.9mA	
1996 ± 17Hz			100.6mA	
2593 ± 17Hz			115.5mA	
1699 ± 17Hz	정상상태	≤ 300mA	31.2mA	적합
2296 ± 17Hz			12.0mA	
1996 ± 17Hz			99.1mA	
2593 ± 17Hz			88.5mA	



[그림 34] 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 1회



[그림 35] 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 2회



[그림 36] 차량 정상상태의 궤도회로 고조파 측정치 3회

3. 측정결과

신설되거나 성능에 영향을 줄 수 있는 개량 노선의 경우, 종합 시설물 검증시험을 수행하여야 하며, 이러한 시험의 한 분야로서 철도전기차량 운행에 따라 발생하는 귀선전류 시험과 귀선전류 고조파에 의해 궤도회로 사용주파수 영향 평가시험이 요구된다. 귀선전류가 시험 기준인 1,000A를 넘을 경우나 좌/우측의 귀선전류 불평형이 총 귀선전류의 10%이상인 경우, 궤도회로의 시스템 유도장해 및 시스템 고장 등을 유발하게 되는데, 위 시험에서 귀선전류 시험의 경우 분석결과 정상 상태와 비정상상태 열차 모두 최대값 1,000A에 훨씬 못 미치기 때문에 궤도회로에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

귀선전류 고조파는 궤도회로를 운행하는 전기차량에 의하여 발생한 고조파 성분이 임피던스 본드의 귀선을 통하여 인접 궤도회로에 영향을 미치게 되어 궤도회로가 부정낙하되는 현상이 발생할 수가 있다[88,89,90]. 따라서 이러한 부정 낙하 발생을 예방하기 위한 귀선전류 고조파의 영향 분석 시험은 보조 급전 구분소 부근 임피던스 본드를 대상으로 귀선전류 고조파를 측정할 필요가 있으며, 궤도회로 수신 장치의 수신기 입력전류 허용치인 14mA(궤도의 임피던스 본드에서는 238mA)를 시험기준으로 설정하여야 하나, 약 5% 정도까지는 문제가 발생하지 않는다는 궤도회로 제작사의 의견을 반영하여 300mA의 기준을 설정하여 시험하였다.

시험 결과를 보면, 각각의 사용주파수에서 열차 정상상태와 비정상상태 모두 귀선전류 고조파 전류의 측정값이 300mA를 초과하지 않았기 때문에 적합하다는 결론을 얻을 수 있다. 하지만 귀선전류 고조파 시험 및 분석방법에 있어서 측정 당일의 기후조건이 최악의 경우가 아닌 맑고 쾌청한 날씨였던 점, 측정구간 내 운행 열차 빈도가 최대가 아니었던 점, 다양한 선로 조건을 반영 하지 못했다는 점, 측정과정이 운행 중 부정낙하 사례가 발생하는 상황과 동일한 환경이 아니었다는 점과 향후 열차 운영계획 등을 고려할 경우, 충분한 시간과 체계적인 분석이 필요하며, 종합적으로 적합여부를 판단하고 측정된 고조파가 비교적 클 경우에는 해당 주파수에서 노이즈의 지속시간을 같이 검토하여 적합성 여부를 분석해야 한다[38,71,91,92].

따라서 본 논문에서의 분석결과를 기반으로 한국철도공사의 일반선 및 고속선 등 운행선 구간에서 사용하고 있는 AF궤도회로의 귀선전류 및 고조파 영향 등에 기인한 장애사례의 추가적인 분석은 향후 궤도회로의 장애 또는 이상 현상을 조기에 예방할 수 있는 중요한 지표로 주어질 수 있음을 제시하였다.

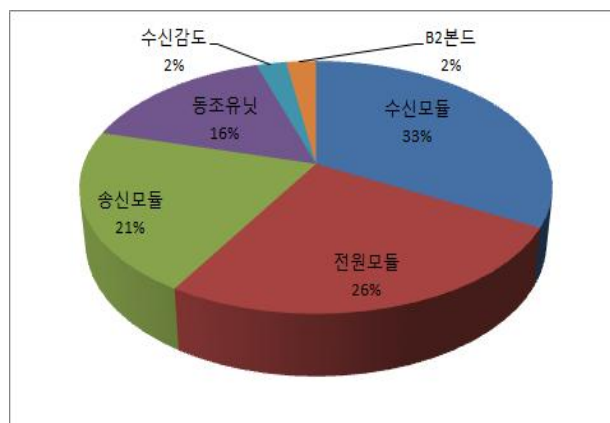
제4절 장애사례 분석

1. 운행선 구간 AF 궤도회로 장애분석

2016년 1월부터 2018년 10월까지 최근 3년간 한국철도공사 일반선 및 고속선 등 운행선 구간 AF 궤도회로장치의 장애중 구성부품의 기능저하 및 불량에 의한 사례는 총 82건으로 조사되었다. [표 20]과 같이 장애부품별로 분류하면 수신모듈 27건(33%), 전원모듈 21건(26%), 송신모듈 17건(21%), 동조유닛 13건(16%) 순으로 발생하였으며, 그중 수신모듈 고장이 가장 많이 발생한 것으로 분석되었다[22,81].

[표 20] 최근 3년간 AF궤도회로 구성부품별 장애현황

구분	수신모듈	전원모듈	송신모듈	동조유닛	수신감도	B2본드	합계
2016년	8	10	4	6	0	1	29
2017년	9	8	4	5	1	0	27
2018년	10	3	9	2	1	1	26
합계	27	21	17	13	2	2	82
비율	33%	26%	21%	16%	2%	2%	100%



[그림 37] 최근 3년간 원인별 장애현황

2. 건설구간 AF 궤도회로 장애분석

앞에서는 현재 일반선 및 고속선에서 운행되고 있는 구간의 장애현황을 살펴보았으며, 건설 및 개량구간으로는 최근 2018년 평창 동계올림픽 개최에 맞춰 건설된 강릉선(서원주 ~ 강릉구간)을 모델로 검토하였다. 검토기간은 개통초기인 2018년 1월부터 3월까지이며, 이 기간 동안 장애는 총 36건이 발생하였고, 장애현상은 KTX가 상행선 궤도회로 구간 운행시 C Type의 하행선 궤도회로 구간에 영향을 끼친 것으로 분석되었다. 따라서 운행구간의 AF궤도회로의 장애 정밀분석과 함께 개선 방안으로 수신모듈의 소프트웨어를 개선하고, 인접 궤도회로의 특정 주파수가 유입되었을 때의 감응시간 조정 및 수신모듈의 아날로그 타입을 디지털 타입으로 변경하여 귀선전류와 궤도주파수 상관관계의 합리성을 향상시켜 현재까지 동종 원인에 의한 AF궤도회로의 장애는 발생하지 않고 안정화 단계에서 운용되고 있다.

제5절 측정결과 및 장애 고찰

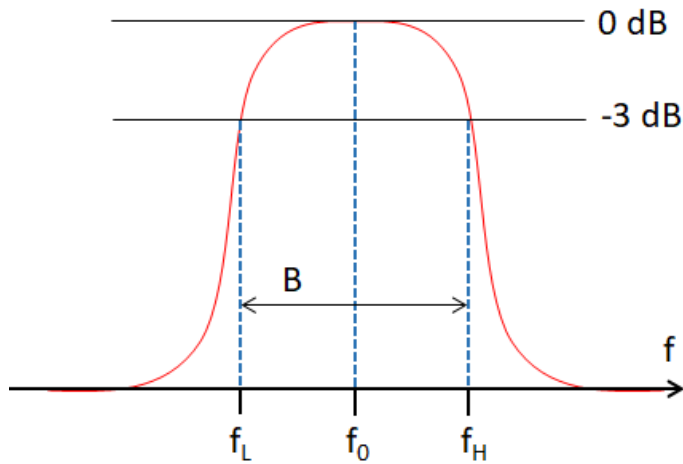
귀선전류 및 귀선전류 고조파에 의한 궤도회로의 유도장해, 시스템 고장을 예방하기 위해 측정 및 분석 방법뿐만 아니라 실제 현장에서의 시험을 통해 결과를 확인하였다. 특히, 최근에 신설되는 철도 노선의 운영을 위해서는 궤도회로에 대한 귀선전류 및 귀선전류 고조파의 적합성을 확인해야 하므로 위 시험에서 제시한 시험방법 및 결과를 기초로 하되, 열차운행선 및 건설구간에서 귀선전류 고조파에 의한 인접 궤도의 부정낙하 등과 같은 장애사례를 종합적으로 분석해 볼 때, 현재 사용되고 있는 AF 궤도회로 구성품 중 FSK방식의 송/수신 모듈은 반송파 주파수와 인접 고조파 주파수와와의 간섭현상에 대하여 안정적으로 동작하지 못하므로 이를 예방하기 위해서는 송/수신 모듈에 대한 기술적 검토와 분석을 통하여 새로운 타입(Type)의 개선방안이 요구된다. 본 논문에서는 이러한 현안사항 및 장애현황을 기반으로 현재 철도공사에서 사용중인 궤도회로에 대한 성능 개선을 위해 고조파 특성을 중심으로 한 기술 분석을 통해 궤도회로의 최적화를 구현하는데 중점을 두고 연구하였다.

제4장 궤도회로 최적화 설계

제1절 변조방식

1. BPF(Band Pass Filter)

필터에는 낮은 주파수만 통과시키는 LPF(Low Pass Filter), 높은 대역의 주파수만 통과시키는 HPF(High Pass Filter), 특정 대역의 주파수만 통과시키는 대역통과필터(BPF ; Band Pass Filter)가 있다. 이 중 BPF는 통과 대역(Bandpass) 내의 신호만을 통과시키며, 신호가 통과하는 주파수 대역과 통과하지 못하는 주파수 대역의 경계를 차단주파수(Cut-off Frequency)라 한다[93].



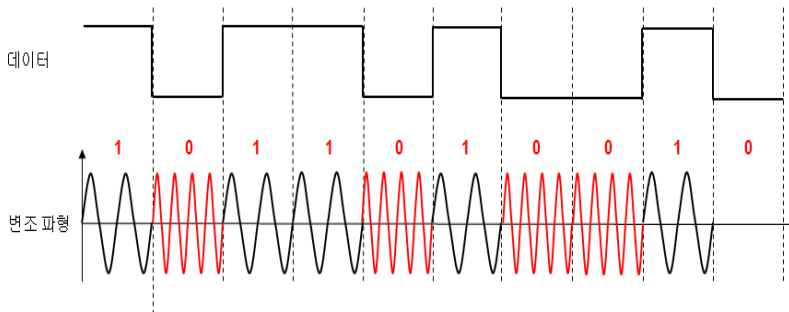
[그림 38] BPF 필터 주파수 응답곡선

[그림 38]과 같이 f_L (저역 차단주파수)과 f_H (고역 차단주파수)가 BPF의 차단주파수이고, 두 차단주파수의 차이가 대역폭(Bandwidth)이다. f_0 는 BPF의 중심주파수(Center Frequency) 또는 공진주파수(Resonant Frequency)라 한다. 또한 필터의 성능을 나타내

는 지표로 Q-factor가 있으며, $Q = \frac{f_0(\text{Center frequency})}{B(3\text{dB bandwidth})}$ 로 정의된다. 저역 차단주파수와 고역차단주파수의 차이인 대역폭이 좁아지면 좁아질수록 Q 값은 커지게 된다. 따라서 통과시키고자하는 주파수 대역에 따라 적절한 Q 값을 갖는 BPF를 설계해야 한다[94].

2. FSK(Frequency Shift Keying)

주파수 편이 변조방식(FSK ; Frequency Shift Keying)은 디지털 데이터에 대응하여 반송파 주파수를 여러 개의 주파수로 스위칭 시켜 반송파의 주파수를 변화시키는 변조 방식이다. 예를 들어 2진 데이터가 0과 1에 따라 반송파의 주파수를 각각 다르게 전송하는 개념으로 두 개의 On-off 변조를 합한 것과 동일하다. FSK 방식의 변조 파형은 [그림 39]와 같다.



[그림 39] FSK 변조

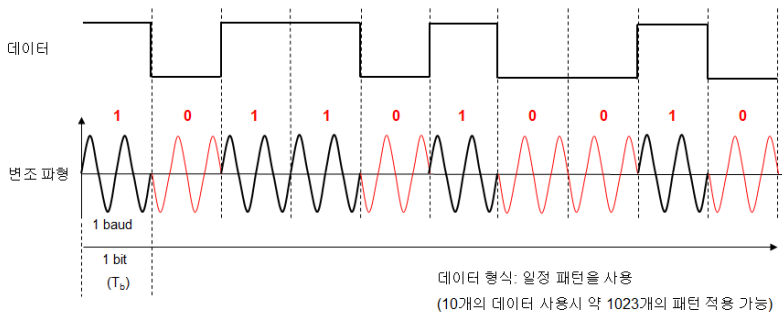
수신 시 검파된 각 심볼이 겹치지 않도록 하는 반송파 주파수 사이의 최소간격은 $TRIANGLEf = f_2 - f_1 = 1/2$ 이다. 만약 2,000bps의 데이터를 FSK 방식으로 전송하는 경우 두 반송파 사이의 간격 $trianglef$ 는 $2,000/2$, 즉 1,000Hz가 된다. 따라서 FSK는 진폭 편이 변조방식(ASK : Amplitude Shift keying)에 비해 더 넓은 대역을 필요로 하며 오류 확률은 비슷하다. 이 때문에 2진 FSK가 2진 ASK에 비해 최대 전력면에서 3dB

이득을 갖는다. 또한 복조는 동기 검파와 비동기 검파가 사용되며, 변조 지수(β)에 따라 전송 대역폭이 결정된다. 2진 FSK는 디지털 신호(2진 데이터)를 n 개의 비트 그룹으로 묶어서 $N = n/2$ 의 반송파 주파수로 변조하는 방식으로, 4개의 반송파($N=4$) 주파수를 사용할 경우 한 개의 반송파 주파수로 2개의 비트를 동시에 변조할 수 있다. N 이 증가하면 전송 대역폭이 증가하고 스펙트럼 효율이 떨어지기 때문에 2진 FSK가 많이 사용되며 AF 궤도회로장치에도 2진 FSK가 사용된다[95].

3. BPSK(Binary Phase Shift Keying)

PSK 방식은 반송파의 위상을 각각 다르게 하여 디지털 데이터를 전송하는 방식으로 PSK는 2진, 4진, 8진 PSK 등이 있으며, 일정한 진폭을 유지하므로 전송로에 의한 레벨 변동 및 심벌 에러에 강하고 변복조 회로가 단순하다는 특징을 갖는다. 이 중 2진 PSK를 2진 위상편이 변조방식(BPSK ; Binary Phase Shift Keying)이라 한다[69].

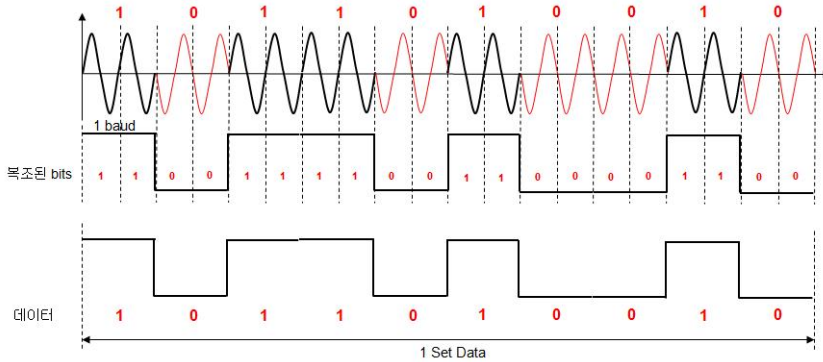
BPSK는 디지털 신호 0, 1에 따라 2종류의 위상을 갖는 변조 방식으로 FSK보다 속도가 빠르다. BPSK 변조 파형은 [그림 40]과 같다.



[그림 40] BPSK 변조

BPSK에 대한 복조는 동기 검파(Synchronous Detection)를 이용한다. 동기 검파는 변조된 수신파로부터 위상이 변화하지 않는 기준 반송파를 만들어 이것을 기준으로 하여

변조파의 위상을 검출하는 방법이다. 동기 검파는 지연 검파보다 기준 반송파의 재생이 필요하므로 구현 회로의 복잡도가 증가하지만 기준 반송파에 수신되는 잡음 성분을 포함하지 않으므로 오류율 특성이 매우 좋다. BPSK의 복조 파형 및 데이터는 [그림 41]과 같다[69].



[그림 41] BPSK 복조 및 데이터 처리

제2절 AF 궤도회로의 고조파 영향에 대한 설계 요구조건

1. 기존 고조파 측정자료 분석

가. TI21의 고조파 영향 모의시험

본 시험은 철도 차량 운행 시 AF 궤도회로에 영향을 주는 고조파 전류의 기준 값을 마련하기 위한 시험으로 시험 구성도는 [그림 42]와 같다[96]. 관련 모의시험 구성도는 현장에 설치된 구성품을 기반으로 고조파의 영향을 실험실에서 분석할 수 있도록 주어져지며, 관련변수 및 파라미터는 철도공사에서 현재 사용중인 TI21 AF 궤도회로를 기반으로 하였다. 시험 구성품에 대한 설명은 [표 21]과 같다.



[그림 42] 모의시험 구성

[표 21] 모의시험 구성품

항 목		설 명
무절연 AF케도회로	서버랙	모듈장착 및 외부인터페이스 단자 제공
	전원모듈	송수신모듈에 전원 공급
	송신모듈	케도회로 주파수 생성 및 송신
	수신모듈	케도회로 주파수 수신 및 열차점유/비점유판단
	케도계전기	케도회로 비점유시 여자/점유시 낙하
	동조유닛	모듈과 선로변과의 임피던스 매칭해당 케도회로 주파수로 동조
계측장비	TTM	케도회로 전용 멀티테스터 (해당 주파수만 선택하여 측정가능)
	전류계	고조파 노이즈 신호 측정
	Audio Amplifier	고조파 주파수 증폭
	Function Generator	고조파 주파수 생성

무절연 AF 궤도회로장치 면역성을 확인하기 위한 시험 방법은 [표 22]와 같고 단락 감도 설정은 궤도회로 길이가 가장 길거나 궤도의 누설저항이 가장 높은 궤도를 감안하여 최고 높은 단락감도 13 탭으로 설정하여 시험하였다. 그리고 고조파 인가 지점은 레일 측과 궤도회로장치의 수신입력단자와 연결되는 수신 동조유닛의 T1, T2 단자로 선정하였다.

[표 22] AF 궤도회로장치 면역성 시험방법

항 목	시험 방법
1. 궤도회로 단락감도 설정 (수신모듈 입력 신호 전류 설정)	1) 수신모듈의 수신 감도를 13 탭으로 설정 2) 궤도 단락기로 수신레일 양단 단락(약1Ω) 3) 수신모듈의 1R/P 단자에서 TTM으로 측정시 수신입력 신호전류가 약 15mA가 되도록 송신 모듈의 출력레벨 조정
2. 고조파 주파수 인가 및 고조파 세기 측정	1) 궤도계전기가 낙하 될 때까지 Function Generator의 출력을 증가. 2) 궤도계전기 낙하 시점에서 송신출력 차단 후 TTM 으로 수신전류(고조파 세기) 측정 (측정지점: 수신모듈 1R/P 단자)

[표 23] 모의시험 측정 결과

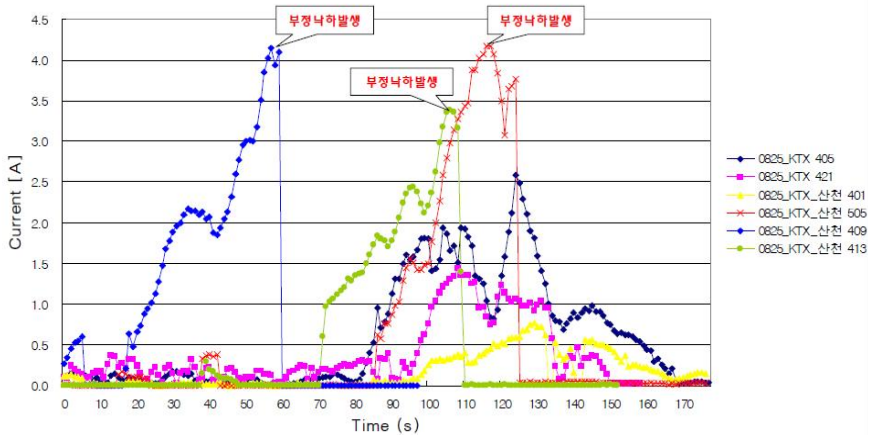
제조사		제조사A	제조사B	제조사C
Type	주파수(Hz)	유입전류(mA)	유입전류(mA)	유입전류(mA)
A-Type	1,682	270	220	250
	1,699	600	410	510
	1,716	400	240	390
B-Type	2,279	250	212	340
	2,296	830	420	510
	2,313	450	224	320
C-Type	1,979	270	315	220
	1,996	400	551	410
	2,013	280	308	340
D-Type	2,576	210	242	380
	2,593	240	491	440
	2,610	250	253	280

모의시험 측정 결과, 고조파 노이즈가 타입별 사용되는 반송파 주파수에 근접할수록 수신모듈의 면역성이 낮아지는 것으로 측정되었다. 또한 수신모듈은 감도가 13 탭에서 신호로서 인식하는 레벨이 15mA(1R/p 단자)이며, 이때 수신 동조유닛 T1, T2 단자에서 측정되는 해당 주파수의 전류는 약 220mA ~ 400mA인 것으로 확인되었다.

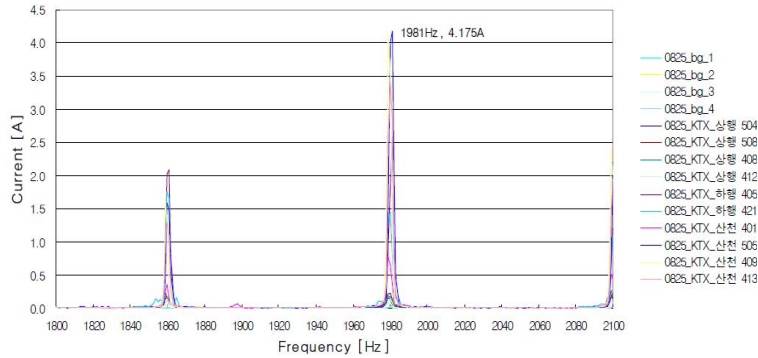
따라서 수신 동조유닛에 유입되는 외부 노이즈 전류가 사용되는 반송파 주파수(공칭 주파수의 $\pm 17\text{Hz}$)의 노이즈 세기가 약 200mA 이상(수신 모듈이 신호로서 인식하는 레벨)일 경우 제조사 모두 궤도회로(T121)의 동작에 영향을 주는 것으로 [표 23]과 같이 나타났다.

나. T121의 고조파 영향 측정

[그림 43], [그림 44]는 실제 KTX-산천에서 발생하는 고조파를 측정한 결과이다. [표 24]와 같이 측정 결과에서 임피던스 본드로 흐르는 고조파 전류(1,980Hz : 33차 고조파)가 약 2.7A 이상인 경우 궤도회로 장애(부정 낙하)가 발생함을 확인할 수 있다.



[그림 43] 임피던스 본드 고조파 측정 - 시간 그래프



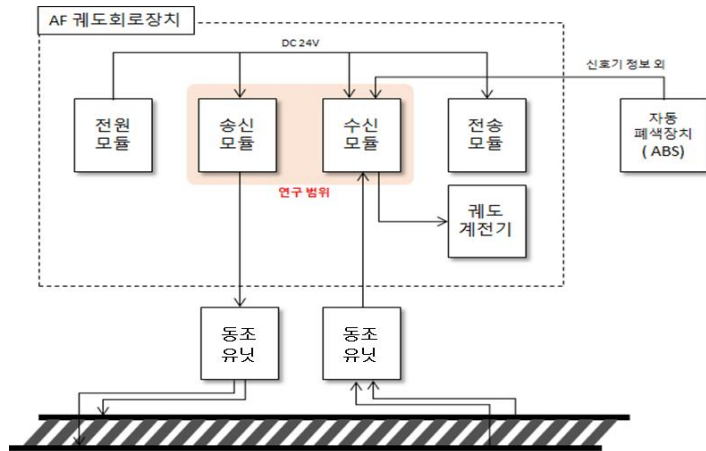
[그림 44] 임피던스 본드 고조파 측정 - 주파수 그래프

[표 24] 부정 낙하 현황

열차 번호	전 류
505호	2.70A
413호	3.57A
505호	4.17A
409호	4.14A

2. 설계 요구조건

AF 궤도회로장치는 전원모듈, 송신모듈, 수신모듈, 전송모듈, 궤도 계전기로 이루어져 있으며, 장치 외부의 자동폐색장치(ABS : Auto Block System) 및 선로와 직접적으로 연결되는 동조 유닛(송신/수신)과 인터페이스 된다. 본 연구에서는 AF 궤도회로장치의 고조파 영향을 최소화할 수 있는 변복조 방식과 각종 필터 등을 선정하여 설계, 제작 및 시험을 수행하였다. 본 논문에서의 고조파 영향을 최소화할 수 있는 AF 궤도회로의 설계 요구사항은 [표 25]와 같다.



[그림 45] 연구 및 시험계통도

[표 25] 설계 요구사항

No.	설계 요구사항
1	송/수신 모듈은 고조파(수신 동조유닛에서 반송파 주파수에 근접한 고조파 주파수의 세기가 300mA 이상)로 부터의 영향을 차단시키기 위한 필터 회로 또는 보호회로가 있어야 한다.
2	송/수신 모듈은 고조파로부터의 영향을 최소화하기 위한 변복조 기술로 설계되어야 한다.
3	수신모듈은 고조파에 영향이 있을 시에도 안정적으로 동작이 이루어져야 한다.
4	수신 모듈은 고조파에 의한 영향으로부터 오동작 및 비안전측 동작을 방지해야 한다.

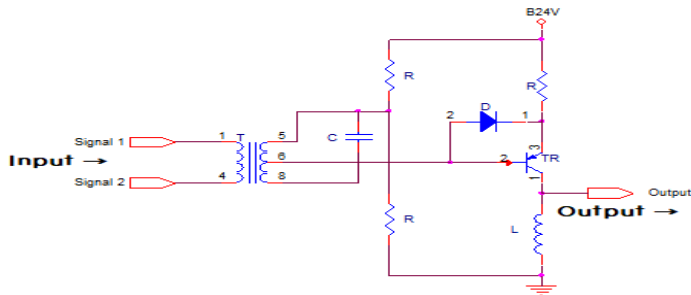
제3절 설계 방안

1. 기존 설계방식 분석

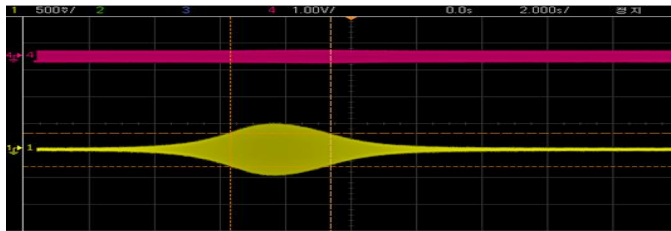
가. 수신모듈 필터부

기존 FSK 수신모듈에 적용된 필터는 BPF필터로 2개의 아날로그 필터로 이루어져 있어 송신모듈에서 수신된 신호 대역만 통과시키고, 그 이외의 주파수를 감쇄시켜 외부 노이즈 및 고조파 신호를 차단하는 기능을 갖는다. 필터링의 주요 특성인 선택도(Q)는 약 120이다. [그림 46]는 수신모듈 필터부의 회로도를 나타내고, [그림 47]에서 개략적인 선택도를 확인할 수 있다.

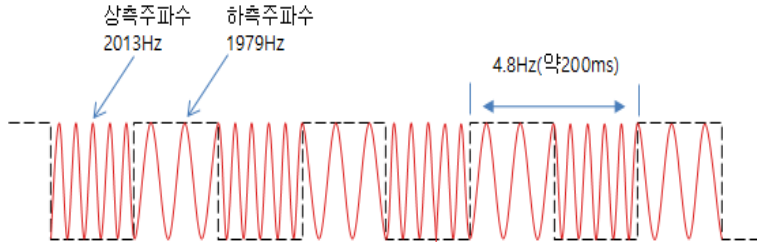
- ① 기존 설비의 FSK 신호는 [그림 48], [그림 49]와 같으며, 형태별 공칭주파수 $\pm 17\text{Hz}$ 의 반송파 주파수가 4.8Hz 로 교번하면서 출력된다.
- ② [그림 50], [그림 51]과 같이 사용되고 있는 반송파 주파수에 근접한 높은 세기의 고조파 노이즈가 인입이 될 경우, 필터부에서 차단할 수 있는 한계가 있다. 그로 인해 검파가 불가능함을 확인하였다.



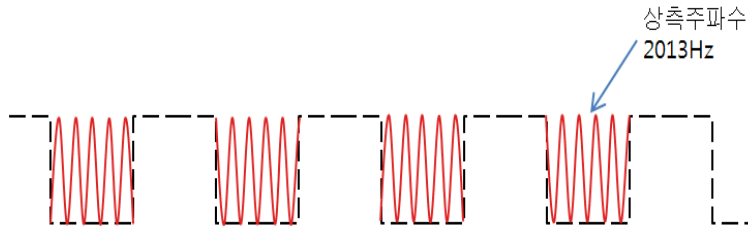
[그림 46] 수신모듈 필터부



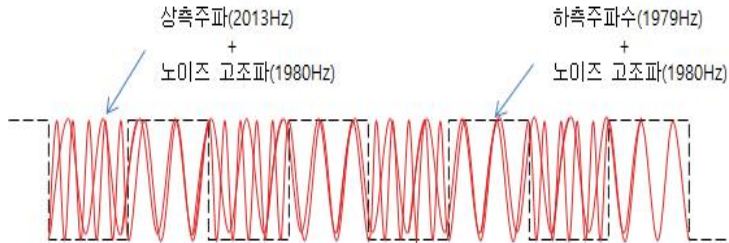
[그림 47] 수신모듈 Sweep 입력 신호에 대한 BPF 출력 파형



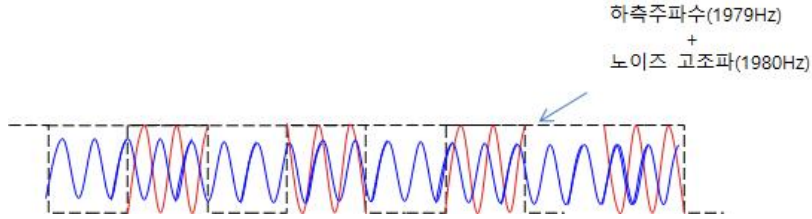
[그림 48] 필터부 입력 파형



[그림 49] 필터부 출력 파형



[그림 50] 고조파 노이즈가 인입된 필터부 입력 파형

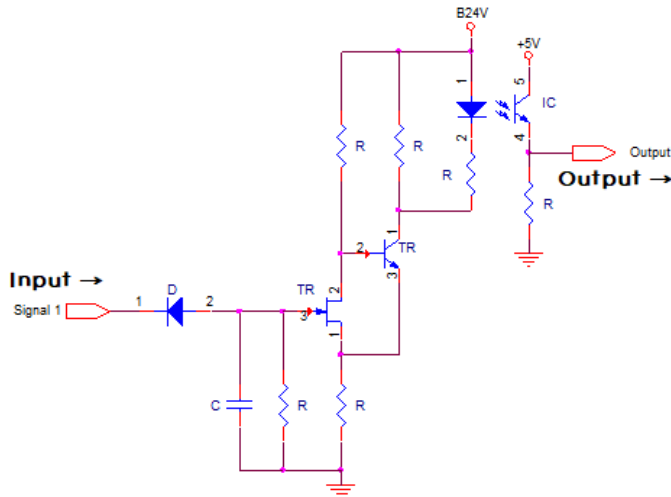


[그림 51] 고주파 노이즈가 제거되지 못한 필터부 출력 파형

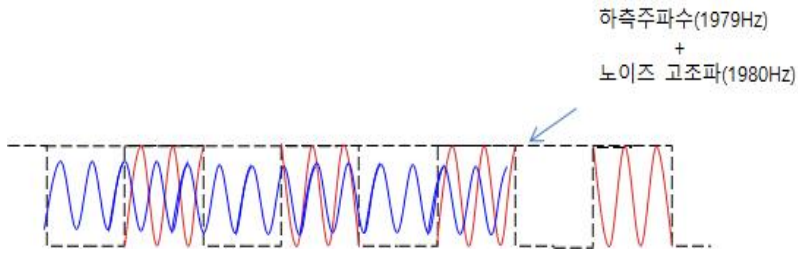
나. FSK 변/복조 방식

기존 FSK 수신모듈에 적용된 검파회로는 해당 대역으로 필터링된 신호 중 반송파 주파수 신호를 제거하여 데이터를 검파하는 포락선(Envelope) 검파 방법을 사용한다. 즉, 필터링된 신호의 세기가 일정 레벨이상이 될 경우 데이터의 High로 판독한다.

기존 FSK 수신모듈에 적용된 검파회로는 필터링된 신호의 레벨을 사용하여 데이터를 검파하는 방법을 사용한다. 즉, 송신으로부터 입력된 신호 외에 고주파 노이즈가 혼합된 일정 레벨이상이 될 경우 [그림 53], [그림 54]와 같이 검파를 할 수 없음을 확인하였다.



[그림 52] 수신모듈 복조(검파)부



[그림 53] 고조파 노이즈가 제거되지 못한 필터부 출력 파형



[그림 54] 비정상적으로 검파된 하측 주파수 코드

2. 고조파 영향 저감을 위한 최적화 설계

가. FSK 변조 방식과 고조파에 대한 고찰

[표 26]과 같이 기존 AF케도회로장치에서는 C type에서 사용되는 반송파 주파수 중 에 1,980Hz와 1Hz 차이의 주파수 1,979Hz를 사용하기 때문에 장애(부정 낙하)가 발생하는 것이다. [표 27]에서는 BPSK를 사용하게 될 경우 사용되는 반송주파수와 최소한 13Hz의 차이를 보이기 때문에 고조파에 대한 오류율이 대폭 감소할 것으로 예상된다. 또한 기존 FSK의 신호 검파시 레벨검지를 사용하기 때문에 실제 신호보다 높은 고조파의 인입시 검파가 불가능해지게 된다. 따라서 레벨 검지 방식이 아닌 위상검지 방식을 사용하여 고조파에 대한 면역성을 향상시킬 것으로 예상된다.

[표 26] T121 FSK 반송파 주파수와 인접 고조파 주파수

FSK 반송파 주파수	인접 고조파 주파수 [※]	반송파와 고조파 간 주파수 차이	비 고
1,682Hz (A)	1,680Hz	2Hz	제28차 고조파
1,716Hz (A)	1,740Hz	24Hz	제29차 고조파
2,279Hz (B)	2,280Hz	1Hz	제38차 고조파
2,313Hz (B)	2,340Hz	33Hz	제39차 고조파
1,979Hz (C)	1,980Hz	1Hz	제33차 고조파
2,013Hz (C)	2,040Hz	33Hz	제34차 고조파
2,576Hz (D)	2,580Hz	4Hz	제43차 고조파
2,610Hz (D)	2,640Hz	30Hz	제44차 고조파

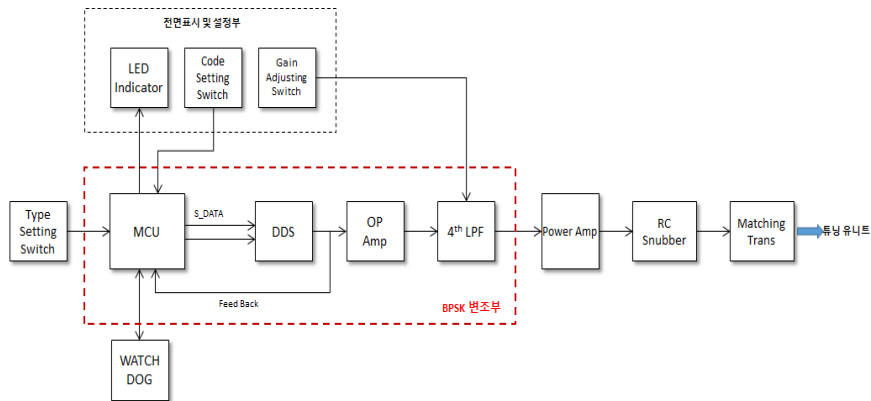
[표 27] BPSK 반송파 주파수와 인접 고조파 주파수

BPSK 반송파 주파수	인접 고조파 주파수 [※]	반송파와 고조파 간 주파수 차이	비 고
1,699Hz (A)	1,680Hz	19Hz	[※] 인접 고조파 주파수 : 반송파 주파수와 가장 근접한 고조파 주파수
	1,740Hz	41Hz	
2,296Hz (B)	2,280Hz	16Hz	
	2,340Hz	44Hz	
1,996Hz (C)	1,980Hz	16Hz	
	2,040Hz	44Hz	
2,593Hz (D)	2,580Hz	13Hz	
	2,640Hz	47Hz	

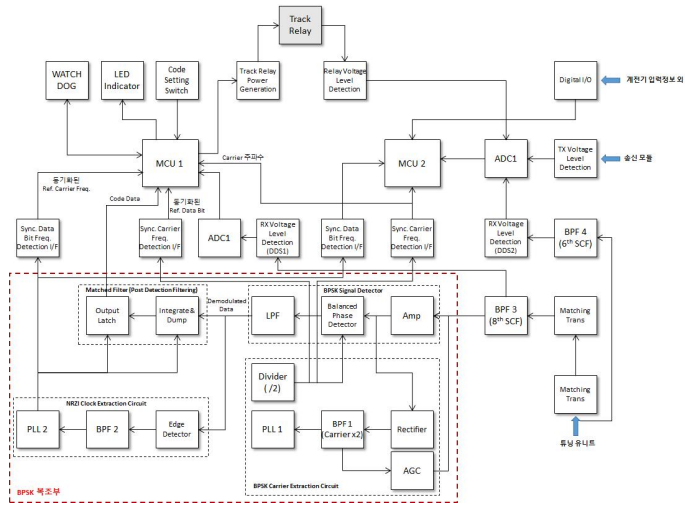
나. 시스템 설계

AF 송신모듈은 데이터 손실률을 적게 하기 위해 Data Bit 주파수는 기존 주파수의 정수배(整數倍)가 되는 주파수를 선정하여 Zero Crossing Based BPSK 변조 방식을 사용하였다. Carrier 주파수는 기존 AF 궤도회로장치와의 호환성을 위해 기존의 공칭주파수인 각 타입별 주파수(1,699Hz, 2,296Hz, 1,996Hz, 2,593Hz)를 사용한다. 송신모듈 블록 다이어그램은 [그림 55]와 같다.

AF 수신모듈은 송신모듈에 따라 BPSK 복조 방식을 사용하였으며, 고조파의 영향을 줄이기 위한 각종 필터를 적용하였다. 수신모듈 블록 다이어그램은 [그림 56]과 같다.



[그림 55] 송신모듈 블록 다이어그램

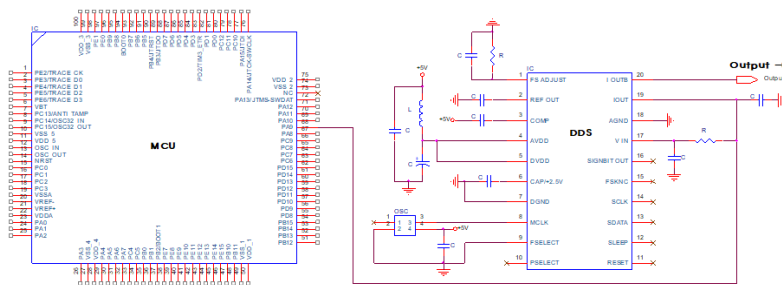


[그림 56] 수신모듈 블록 다이어그램

다. BPSK 변조 방식

(1) 변조회로 설계(송신)

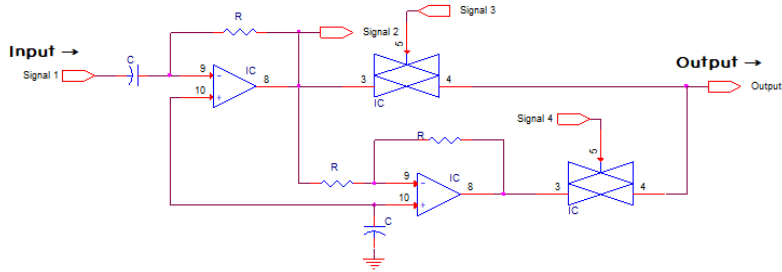
디지털 데이터 저장장치(DDS ; Digital Date Storage)는 디지털 합성기로 주파수를 생성하기 위해 사용된다. 주파수는 MCU(Micro Controller Unit)의 시리얼 데이터로 설정되며, 정확한 Zero-crossing 구현을 위해 DDS 출력을 Feedback 받아 동기를 맞추도록 설계하였다.



[그림 57] BPSK Generator

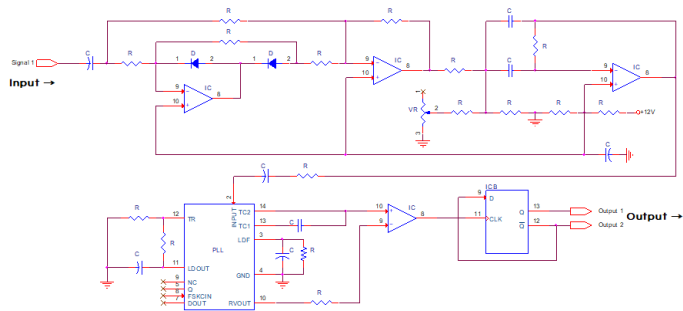
(2) 복조 회로 설계(수신)

위상검지(Phase Detector)는 반송파 추출회로(Carrier Extraction Circuit)와 함께 수신된 변조신호의 위상을 검지하기 위한 회로로 반송파 추출 회로에서 추출된 동기신호로 수신된 신호의 위상을 검지한다.



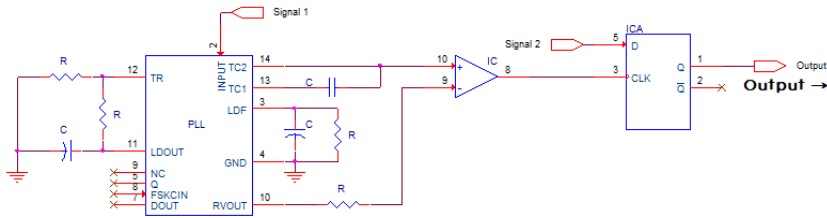
[그림 58] BPSK Phase Detector

반송파 추출 회로는 입력되는 수신 신호로부터 동기 캐리어 주파수를 생성한다. 외부 노이즈(고조파 등)에 의해 입력신호가 왜곡될 경우, 수신된 신호와 동일한 동기신호를 생성하지 못해 위상을 검지할 수 없게 된다.



[그림 59] BPSK Carrier Extraction Circuit

비제로 복귀반전(NRZI ; Non-Return to Zero Inverted) 동기추출회로(Clock Extraction Circuit)는 복조된 신호를 정의된 Data rate와 동기를 맞추기 위한 회로이다.

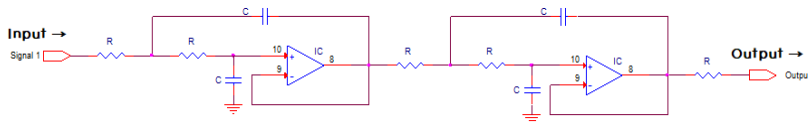


[그림 60] NRZI Clock Extraction Circuit

라. 필터 방식

(1) 4th Low Pass Filter

DDS는 디지털 합성기에서 발생할 수 있는 고주파 및 노이즈를 제거하기 위해 [그림 61]과 같은 4차 저역통과필터(Low Pass Filter)를 구현하였다.

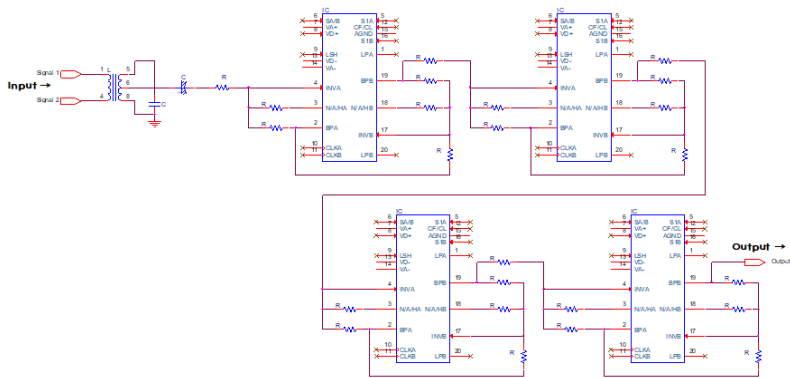


[그림 61] 4th Low Pass Filter(송신 모듈)

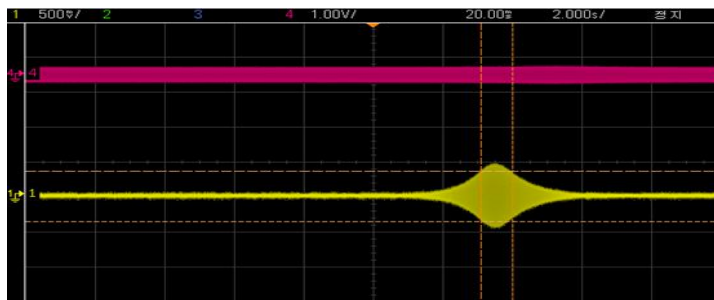
(2) BPF

대역통과필터(Band Pass Filter)는 사용되는 반송파 주파수만 통과시키고, 그 외의 다른 주파수(고조파 주파수 등)를 차단하기 위한 필터이다. 또한 고조파 노이즈의 감

왜율을 높이기 위해 High Q(Q=약 140)가 구현이 가능하도록 LC 필터와 높은 차수의 SCF(Switched Capacitor Filter)를 수신모듈에 적용하였다.



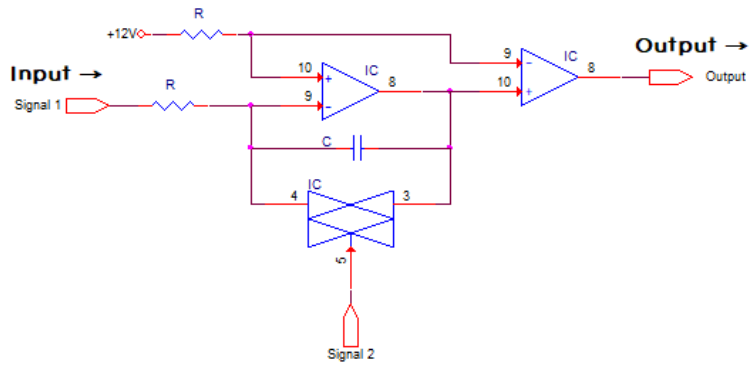
[그림 62] BPF(Band Pass Filter)(수신 모듈)



[그림 63] 수신모듈 Sweep 입력 신호에 대한 BPF 출력 파형

(3) Matched Filter

정합필터(Matched Filter)는 검파된 신호에서의 노이즈를 제거하기 위한 필터이며, 신호대 잡음비(SNR ; Signal to Noise Ratio)를 최대화시킨다.



[그림 64] Matched Filter(수신 모듈)

마. 데이터 코드 방식

데이터 코드는 기존 FSK 방식에서 사용한 단일 코드 대신에 안전성을 향상시키기 위해 다수개의 데이터 코드를 사용하였으며, 궤도회로의 동작 특성을 감안하여 40bps를 선정하였다.

[표 28] BPSK 타입별 데이터 코드 사양

항 목		사 양
Total Symbol		10 symbols
Data Rate	A Type	40.45bps
	B Type	40.28bps
	C Type	39.92bps
	D Type	39.89bps

제4절 시뮬레이션 및 결과고찰

1. BPSK 방식 송/수신 모듈 변/복조 시험

가. 송신모듈 시험

(1) 시험 목적

위 과정을 통해 설계된 송신 모듈의 기능 및 성능에 대해 확인하기 위한 시험이다.

[그림 65], [그림 66]은 변조데이터에서 Non-zero-crossing과 zero-crossing 변조의 경우 수신모듈에서 데이터 비트 에러의 발생 유무를 측정한 결과를 나타내고 있다.



[그림 65] Non-zero-crossing 변조 시 비트에러 측정 결과



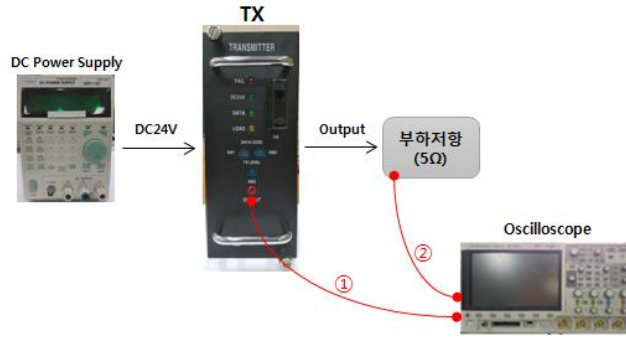
[그림 66] zero-crossing 변조 시 측정 결과

[그림 65], [그림 66]에서의 ①은 송신되는 코드 데이터이며, ③은 코드 데이터로 변조된 송신 출력 신호이고, ④는 LPF로 필터링된 송신 출력 신호이다. 그리고 ②는 수신모듈에서 복조된 코드 데이터이다.

또한 [그림 65], [그림 66]은 특정 코드 데이터의 편이구간을 측정하는 것으로, [그림 65]에서는 Zero-crossing이 적용되지 않았을 경우에 복조된 코드 데이터(②)에서 송신되는 코드 데이터로 복조되지 않고, 데이터 편이 구간이 누락되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 [그림 66]에서는 정확한 Zero-crossing이 반영된 변조 신호로 인해 데이터 편이 구간이 누락없이 복조가 되는 것을 확인하였다.

(2) 시험 구성

변조 시험은 선택된 반송파 주파수와 데이터 비트 주파수로 변조된 출력 신호를 Oscilloscope로 확인하는 것이며, 시험 구성은 [그림 67]과 같다.



[그림 67] 송신모듈 시험 구성

(3) 시험 결과

송신모듈의 출력은 선택한 데이터 코드로 변조 출력되고 또한 Zero-Crossing이 이루어지는지 확인 되었다. [그림 68]은 Zero-Crossing된 변조 출력 신호가 수신모듈에서 복조가 정상적으로 이루어졌는지에 대한 측정 결과이다.



[그림 68] 송신모듈 신호 출력

[그림 68]에서 ①은 Zero-Crossing의 유무를 확인하기 위한 송신모듈 내부의 변조신호 출력에 대한 측정파형이고, 변조 주기는 10ms의 데이터 전송속도를 적용하였다. ②는 송신모듈의 LPF(Low Pass Filter)의 동작을 확인하기 위한 측정파형이다.

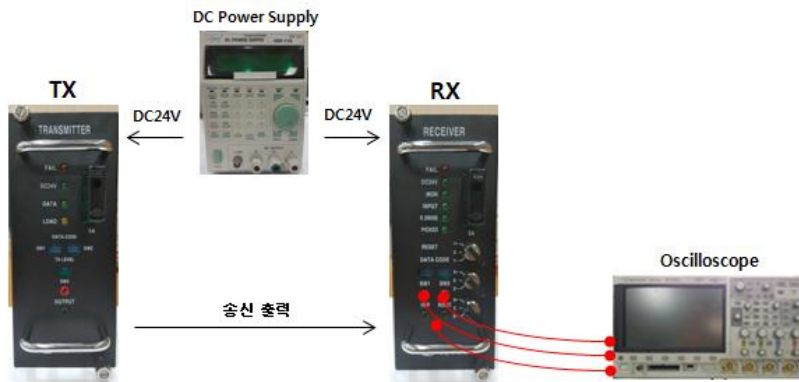
나. 수신모듈 시험

(1) 시험 목적

위 과정을 통해 설계된 수신 모듈의 기능 및 성능에 대해 확인하기 위한 시험이다.

(2) 시험 구성

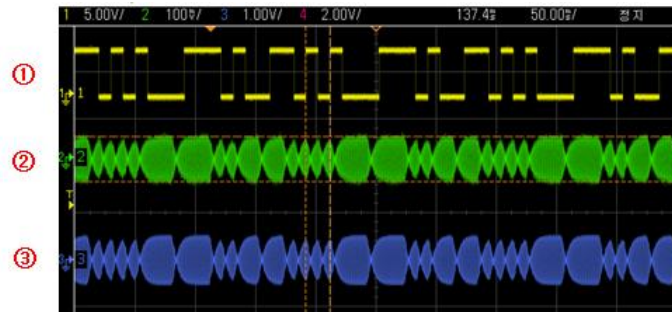
복조 시험은 송신모듈로부터 입력된 변조신호의 필터링 및 복조가 정상적으로 이루어지는지 Oscilloscope로 확인하기 위한 시험이다. 시험 구성은 [그림 69]와 같다.



[그림 69] 수신모듈 시험 구성

(3) 시험 결과

[그림 70]과 같이 수신모듈이 송신에서 전송한 변조 신호를 필터링 및 검파가 이루어지는지를 확인하였다.



[그림 70] 수신모듈 필터 입/출력 및 복조 데이터

[그림 70]에서 ③은 송신모듈에서 변조 출력된 신호에 대한 수신 입력 신호이며, 송신모듈에서 전송된 신호 사양은 다음과 같다.

- 코드 데이터: 0100 0111 0101 0011
- 반송파 주파수: 1699Hz
- 데이터 전송 속도: 100bps

③은 1차 필터를 통과한 신호 파형이고 ②는 2차 필터를 통과한 파형이다. ①은 최종적으로 송신모듈에서 전송된 신호가 복조된 코드 데이터이며, 복조된 코드 데이터가 송신모듈로부터 전송된 코드 데이터와 동일한 것으로 시험되었다.

2. 고조파 영향 비교 시험

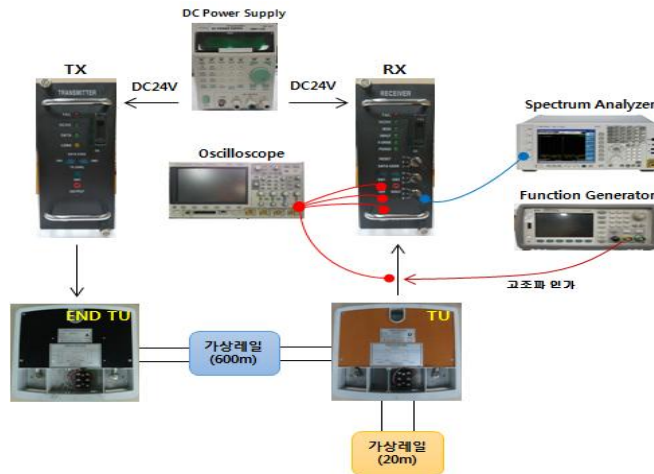
가. 시험 목적

본 시험은 기존의 FSK 방식의 송수신 모듈과 BPSK 방식을 적용한 송수신 모듈로 캐리어 주파수에 인접한 고조파를 수신모듈 입력단에 인가했을 때 수신 모듈의 동작 특성을 확인하기 위한 시험이다. 수신 모듈 입력단에 주파수발생기(FG ; Function

Generator)로 인접 고조파를 인가한 후 Oscilloscope로 각 파형을 확인하고, 그 결과를 분석하여 코드 방식 BPSK 송수신 모듈의 고조파에 대한 내성 향상을 분석하였다.

나. 시험 구성

본 시험은 [그림 71]과 같이 송신모듈, 수신모듈, 튜닝유닛(송신), 튜닝유닛(수신), 가상레일로 구성되고, AF 웨도회로장치 전체 시스템으로 이루어지며, 기존 FSK 방식의 송/수신 모듈로 시험을 수행한 후, 코드방식 BPSK 송/수신 모듈로 시험을 병행하여 그 결과를 비교하였다.



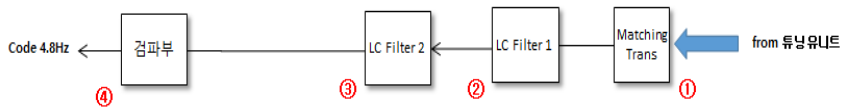
[그림 71] 코드 방식 BPSK 송수신 모듈 고조파 인가 시험

(1) 시험조건 및 계측기 설정

시험에 사용하는 송수신 모듈의 주파수 타입은 A Type이고 각각 ‘출력 ON’ 과 ‘출력 OFF’ 로 동작 상태를 구분한다. 또한 고조파 인가에 사용하는 주파수발생기는 ‘ON’ 과 ‘OFF’ 로 동작 상태를 구분한다. 이 때 인가하는 고조파의 파형 형태는 무변조 사인파이고, 전압 레벨은 1Vpp, 주파수는 가변하여 인가하였다.

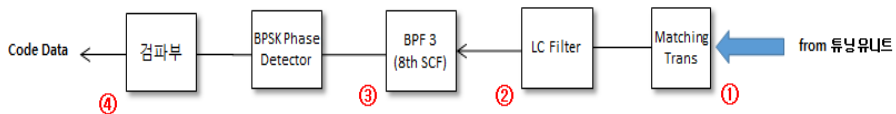
(2) 측정 포인트

기존 FSK 방식 송/수신 모듈의 고조파 영향에 대해 분석하기 위하여 [그림 72]와 같이 4개의 지점에서 파형을 측정하였다.



[그림 72] FSK 방식 송수신 모듈 고조파 인가 시험 측정 포인트

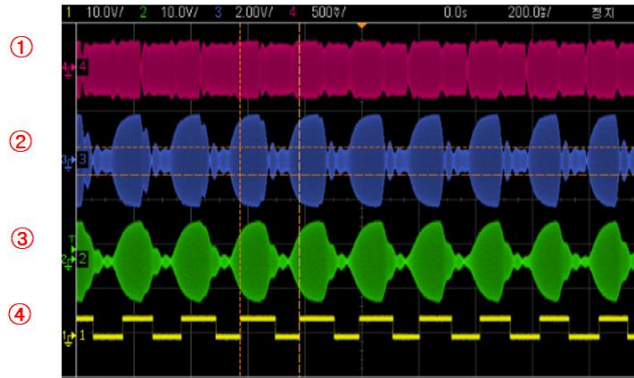
코드 방식 BPSK 송/수신 모듈의 고조파 영향에 대해 분석하기 위하여 [그림 73]과 같이 4개의 지점에서 파형을 측정하였다.



[그림 73] 코드방식 BPSK 송수신 모듈 고조파 인가 시험 측정 포인트

다. 시험 결과

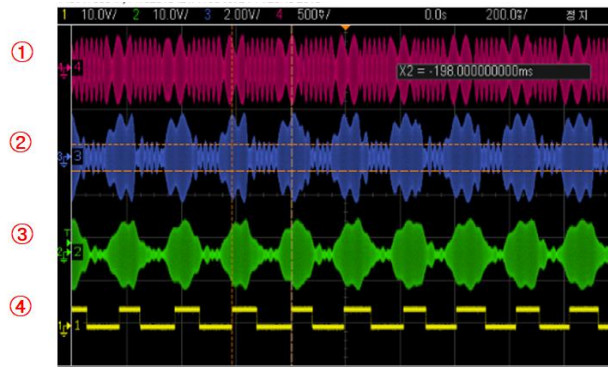
(1) FSK 방식 고조파 인가 시험



[그림 74] 송신: ON / FG: OFF

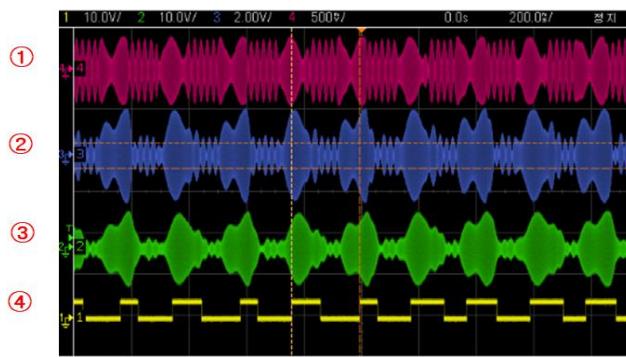
[그림 74]는 고조파 노이즈를 인가하지 않고 FSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON 상태에서 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 72]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. ②, ③의 필터 출력에서는 코드 High에 해당되는 반송주파수(1,682Hz)만을 통과시키며, 필터링된 신호는 검파되어 4.8Hz의 단일 코드(④)를 생성한다. 이 생성된 코드는 MPU(Micro-Processor Unit)로 입력되어 규정된 코드일 경우, 특정 궤도에 열차가 없음(비점유)을 나타내기 위한 궤도계전기 여자 신호를 생성하게 된다. 사용된 변조 신호의 사양은 아래와 같다.

- 변조 코드: 01(10)
- 반송파 주파수: 1,682Hz(High), 1,716Hz(low)
- 변도 속도: 약 208ms(4.8Hz)



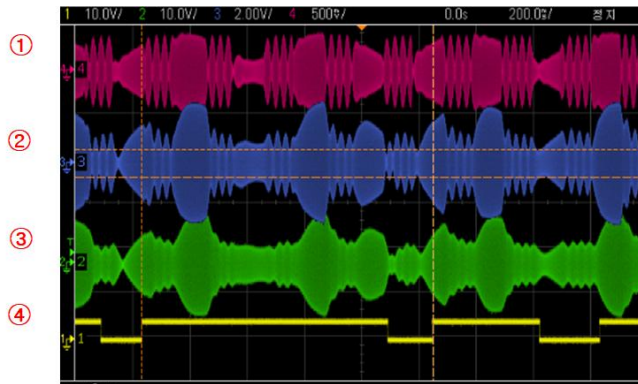
[그림 75] 송신: ON / FG: ON (1620Hz 고조파 인가)

[그림 75]는 FSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON 상태에서 1,620Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 72]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 [그림 74]의 결과와는 다르게 수신된 입력 신호의 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②,③의 필터 출력에서도 확인이 되었으나 아직까지는 정상적인 범위내의 4.8Hz 단일 코드(④)가 생성되기 때문에 사용되는 반송파의 주파수(1,682Hz)에서 62Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,620Hz)에도 정상적으로 수신모듈의 복조가 이루어지는 것이 확인되었다.



[그림 76] 송신 : ON / FG : ON (1640Hz 고조파 인가)

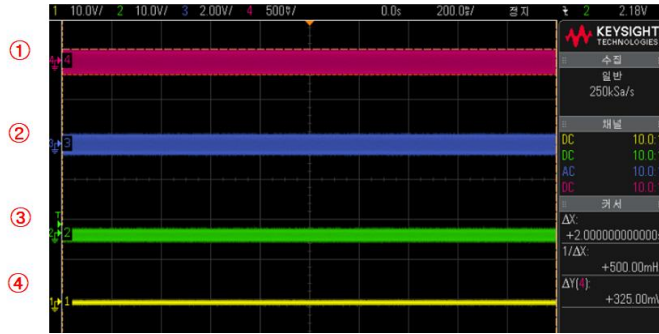
[그림 76]은 FSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,640Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 72]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 측정결과에서 알 수 있듯이 [그림 75]의 결과와 비교했을 때, 수신된 입력신호에 더 많은 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②,③의 필터 출력에서도 확인이 되었으며, 특히 1차 필터 출력(②)의 Low에 해당하는 반송주파수의 레벨이 증가되어 4.8Hz 단일 코드(④)의 듀티비 변화로 주파수가 변화되는 것을 확인하였다. 이러한 주파수 변화는 수신모듈의 데이터 처리에 따라 복조 실패 또는 복조 성공으로 처리될 수 있다. 따라서 사용되는 반송파의 주파수(1,682Hz)에서 42Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,640Hz)에는 수신모듈의 복조 성능에 영향을 끼치며, MPU에서의 처리 방식에 따라 수신모듈의 복조 결과가 다른 결과를 가지게 된다.



[그림 77] 송신 : ON / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)

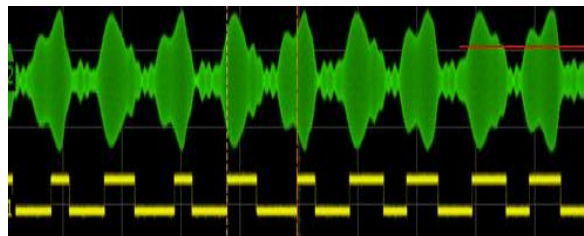
[그림 77]은 FSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,660Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 72]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 수신된 입력신호의 형태를 확인할 수 없을 정도의 많은 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②,③의 필터 출력에서도 확인이 되었으며, 1차 필터 출력(②)의 Low에 해당하는 반송주파수의 레벨이 증가되어 4.8Hz 단일 코드(④)의 듀티비 변화로 주파수가 크게 변화하는 결과가 발생하였다 .

이러한 주파수 변화는 수신모듈에서 복조 실패로 처리된다. 따라서 사용되는 반송파의 주파수(1,682Hz)에서 22Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,660Hz)에는 수신모듈에서 복조가 불가능하게 되는 것을 확인하였다.



[그림 78] 송신 : OFF / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)

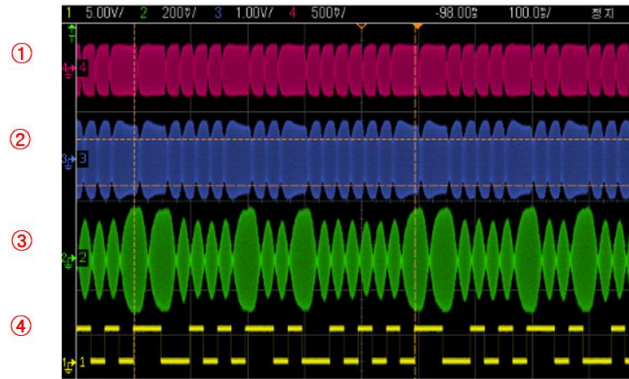
상기 측정은 1,620Hz 고조파 인가 시(고조파 입력레벨: 약 325mV) 복조된 코드의 충격계수(Duty Ratio)가 틀어지기 시작하며, 1,640Hz이상을 인가하게 되면 코드의 주파수가 변하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 사용 반송파 주파수에서 42Hz(1,682 ~ 1,640) 차이 이내의 고조파 인입 시 수신모듈의 복조코드(주파수)에 영향을 주게 된다. 따라서 [그림 79]와 같이 FSK의 경우 Filter부를 통과한 파형의 레벨로 검파하기 때문에 높은 고조파 인입 시 충격계수 및 코드 주파수에 쉽게 영향을 주게 된다.



검지 레벨이상의 신호 Duration이 높아 질 경우 검파된 주파수의 변화 발생

[그림 79] 송신모듈 필터부 및 검파회로 출력

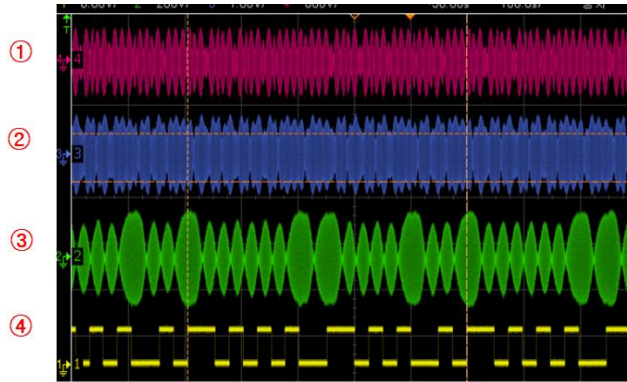
(2) BPSK 방식 고조파 인가 시험



[그림 80] 송신 : ON / FG : OFF

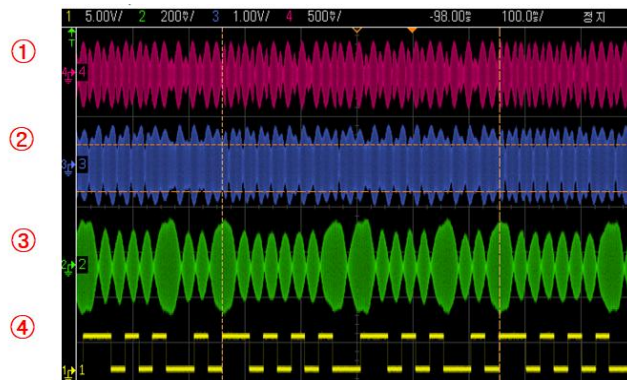
[그림 80]은 고조파 노이즈를 인가하지 않고, BPSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON 시킨 상태에서 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 73]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. ②, ③의 필터 출력에서는 해당되는 반송주파수(1,699Hz)만을 통과시키며, 필터링된 신호는 검파되어 코드(④)를 생성한다. 이 생성된 코드는 MPU(Micro-Processor Unit)로 입력되어 규정된 코드일 경우, 특정 궤도에 열차가 없음(비점유)을 나타내는 궤도계전기 여자 신호를 생성하게 된다. 사용된 변조 신호의 사양은 아래와 같다.

- 코드 데이터: 1101 1010 1100 1010 1101 (1101 0101 0011 0101 0010)
- 반송파 주파수: 1,699Hz
- 데이터 전송 속도: 40bps



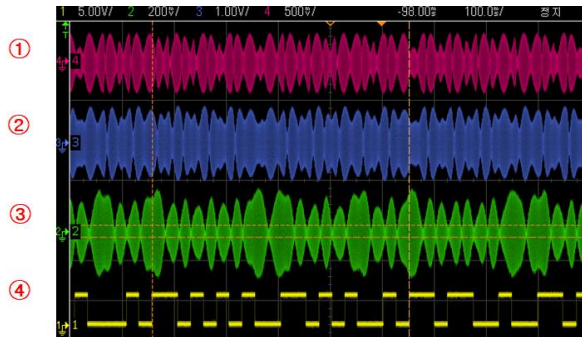
[그림 81] 송신 : ON / FG : ON (1620Hz 고조파 인가)

[그림 81]은 BPSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,620Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨후 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 73]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. [그림 80]의 결과와는 다르게 수신된 입력신호의 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②의 필터 출력에서도 확인이 되었으나 ③의 필터 출력에서는 왜곡이 나타나지 않기 때문에 아직까지는 정상적인 코드데이터(④)가 생성된다. 이러한 결과들을 통해 사용되는 반송파의 주파수(1,699Hz)에서 79Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,620Hz)에도 정상적으로 수신모듈의 복조가 이루어지는 것이 확인되었다.



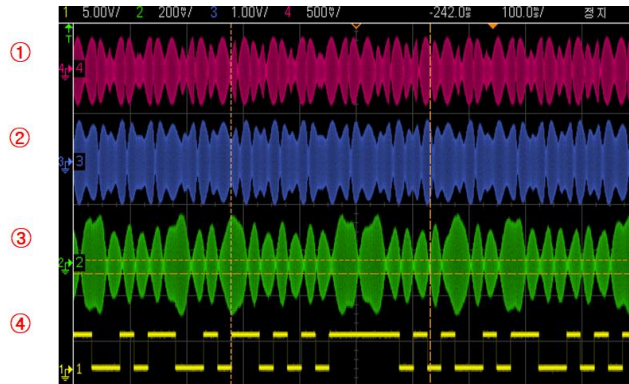
[그림 82] 송신 : ON / FG : ON (1640Hz 고조파 인가)

[그림 82]는 BPSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,640Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 73]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 [그림 81]의 결과와 비교했을 때, 수신된 입력신호에 더 많은 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②의 필터 출력에서도 확인이 되었으나 ③의 필터 출력에서는 안정적인 신호를 확보할 수 있었다. 이러한 결과들을 통해 사용되는 반송파의 주파수(1,699Hz)에서 59Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,640Hz)에도 정상적으로 수신모듈의 복조(④)가 이루어지는 것이 확인되었다.



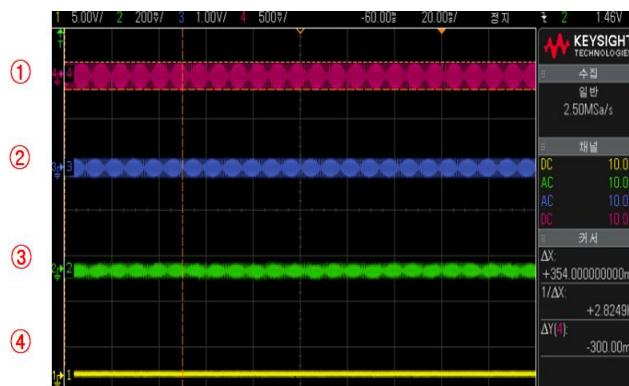
[그림 83] 송신 : ON / FG : ON (1660Hz 고조파 인가)

[그림 83]은 BPSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,660Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 73]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 [그림 82]의 결과와 비교했을 때, 수신된 입력신호에 더 많은 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②의 필터 출력에서도 확인이 되었으나 ③의 필터 출력에서는 아직까지 안정적인 신호를 확보할 수 있었다. 이러한 결과들을 통해 사용되는 반송파의 주파수(1,699Hz)에서 39Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인입시(1,660Hz)에도 정상적으로 수신모듈의 복조(④)가 이루어지는 것이 확인되었다.



[그림 84] 송신 : ON / FG : ON (1670Hz 고조파 인가)

[그림 84]는 BPSK 방식 송신모듈과 수신모듈을 ON시킨 상태에서 1,670Hz의 고조파 노이즈를 인가시킨 상태에서의 수신모듈로 입력된 신호를 [그림 73]의 측정 포인트에서 측정된 결과이다. 수신된 입력신호의 형태를 확인할 수 없을 정도의 많은 왜곡이 발생되었고, 이러한 신호의 왜곡은 ②,③의 필터 출력에서도 확인이 되었으며, 특히 2차 필터 출력(③)에서 입력신호의 위상변이 구간의 레벨 증가로 인해 위상변이 구간 검지 실패가 발생하였다. 이러한 위상검지 실패는 수신모듈에서 복조 실패 처리된다. 따라서 사용되는 반송파의 주파수(1,699Hz)에서 29Hz 떨어진 고조파 노이즈 주파수 인 입시(1,670Hz)에는 수신모듈에서 복조 실패(④)가 발생되는 것이 확인되었다.

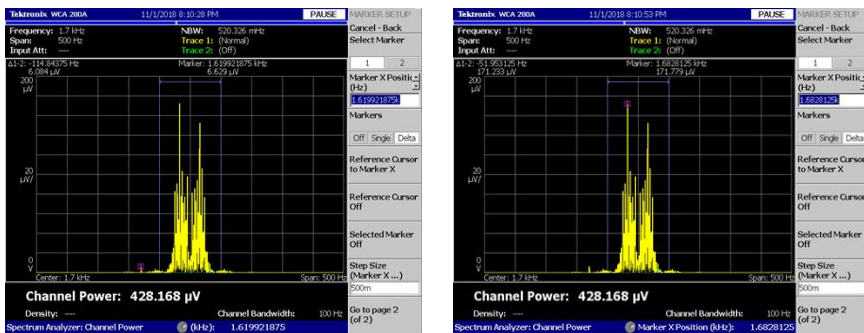


[그림 85] 송신 : OFF / FG : ON (1670Hz 고조파 인가)

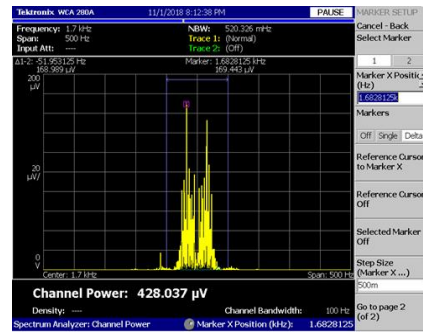
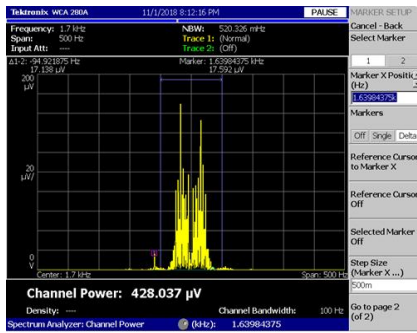
따라서 상기 측정은 분석을 통해 1,670Hz 고조파 인가 시(고조파 입력레벨 약: 300mV) 복조된 코드에 데이터 에러가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 사용 반송파 주파수에서 29Hz(1,699 ~ 1,670)차이 이내의 고조파 인입 시 수신모듈의 복조코드(위상검지)에 영향을 주게 된다. [그림 86], [그림 87], [그림 88], [그림 89], [그림 90]은 [그림 73의 ③번] 지점에 수신모듈로 입력되어 필터링된 신호를 주파수 도메인에서 신호 특성을 확인하기 위해 스펙트럼 분석기로 고속푸리에변환(FFT : Fast Fourier Transform)을 적용하여 측정한 결과이다. 참고로 BPSK 신호의 주파수 도메인 신호 파형은 Side bands로 측정하였다.



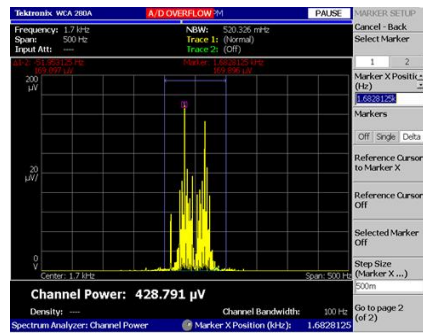
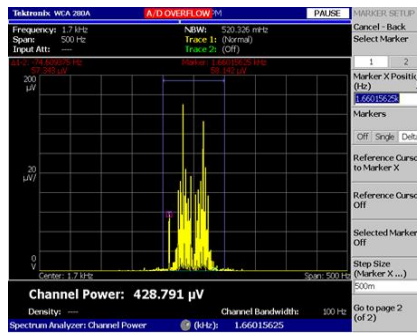
[그림 86] 송신 : ON / FG : OFF



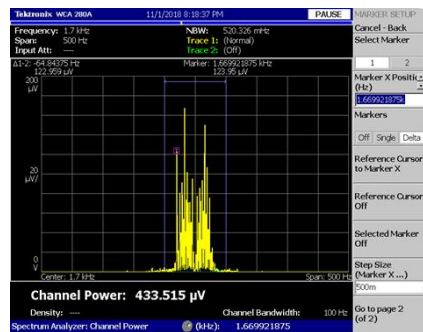
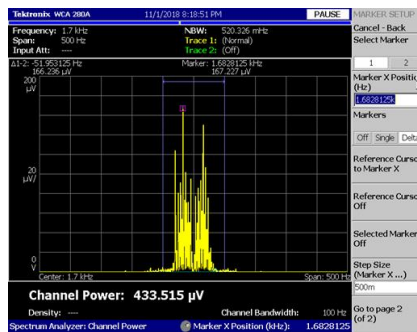
[그림 87] 송신 : ON / FG : ON (1,620Hz 고조파 인가)



[그림 88] 송신 : ON / FG : ON (1,640Hz 고조파 인가)



[그림 89] 송신 : ON / FG : ON (1,660Hz 고조파 인가)



[그림 90] 송신 : ON / FG : ON (1,670Hz 고조파 인가)

[표 29] BPSK 고조파 입력 시 필터 출력 FFT 분석

고조파 입력 주파수 (@ F.G. 1Vpp)	필터 출력		비 고
	FFT 측정 주파수	FFT 측정 레벨	
고조파 off	1,682Hz	186.8uV	Lower Side Band
	1,715Hz	167.3uV	Upper Side Band
1,620Hz	1,620Hz	6.6uV	고조파 주파수
	1,682Hz	171.8uV	Lower Side Band
1,640Hz	1,640Hz	17.6uV	고조파 주파수
	1,682Hz	169.4uV	Lower Side Band
1,660Hz	1,660Hz	58.1uV	고조파 주파수
	1,682Hz	169.9uV	Lower Side Band
1,670Hz	1,670Hz	123.9uV	고조파 주파수
	1,682Hz	167.2uV	Lower Side Band

[표 29]와 같이 주파수 도메인 상에서의 측정에 대한 결과를 분석했을 때, 고조파 노이즈 주파수는 사용되는 반송파 주파수에 인접한 고조파가 인가될수록 필터링을 통해 출력되는 고조파 레벨이 증가되는 것을 볼 수 있으며, 해당 반송파의 주파수 레벨은 낮아지는 것을 확인할 수가 있다.

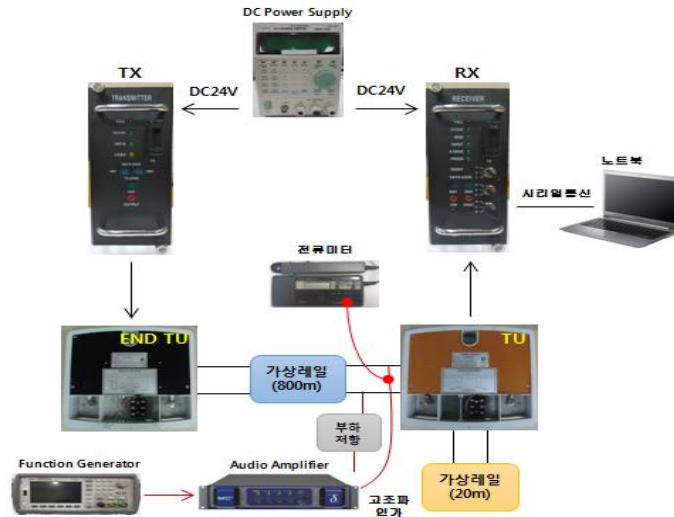
3. 고조파 영향 시험

가. 시험 목적

본 시험은 열차로부터의 발생하는 고조파에 대한 영향 레벨 한계치(300mA) 인가 시 BPSK 방식의 궤도회로장치에 미치는 영향 정도가 기존 시스템보다 개선이 되었는지 확인하기 위한 시험이다.

나. 시험 구성

시험 구성은 실제 AF케도회로에 필요한 모든 구성품과 모의 케도로 구성된다.



[그림 91] 고조파 영향 시험 구성

(1) 시험조건 및 계측기 설정

고조파 인가에 사용하는 주파수 발생기(Function Generator)는 'ON' 과 'OFF' 로 동작 상태를 구분한다. 이 때 인가하는 고조파의 파형 형태는 무변조 사인파이고, 전압 레벨은 전류 측정 포인트의 세기에 따라 조정되며, 주파수는 가변하여 인가하였다. 사용된 변조 신호 사양은 아래와 같다.

- 코드 데이터: 1110011010
- 반송파 주파수: 1,699Hz
- 데이터 전송 속도: 40bps

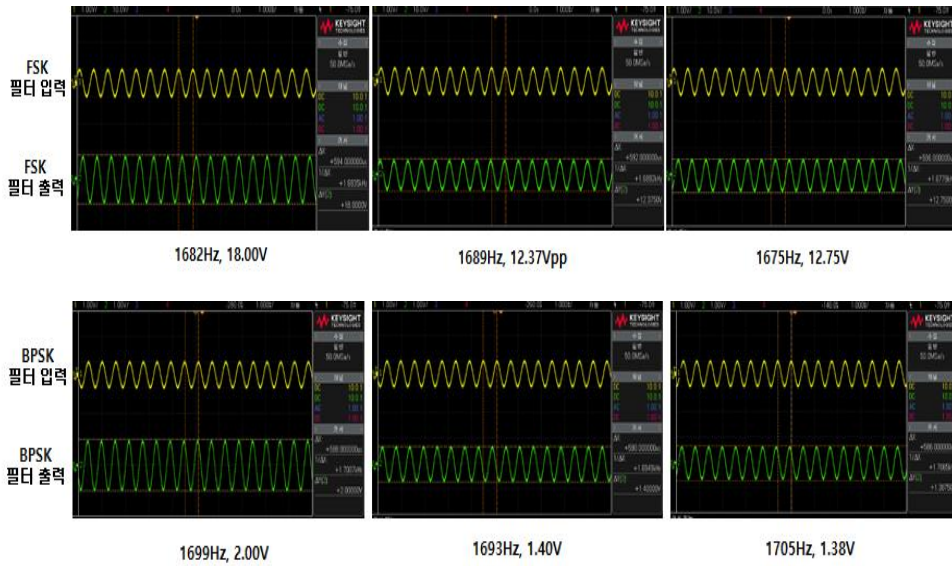
[표 31] BPSK 고조파 레벨에 따른 수신 데이터 오류율

고조파 레벨 (전류메터)	수신 데이터 오류율 (노트북)	궤도계전기 상태	비 고
250mA	0%	여자	기존 FSK 방식의 경우 부정낙하 발생
300mA	0%	여자	
350mA	32%	여자	(데이터 처리 알고리즘 으로 인한 여자 유지)
400mA	91%	부정낙하	

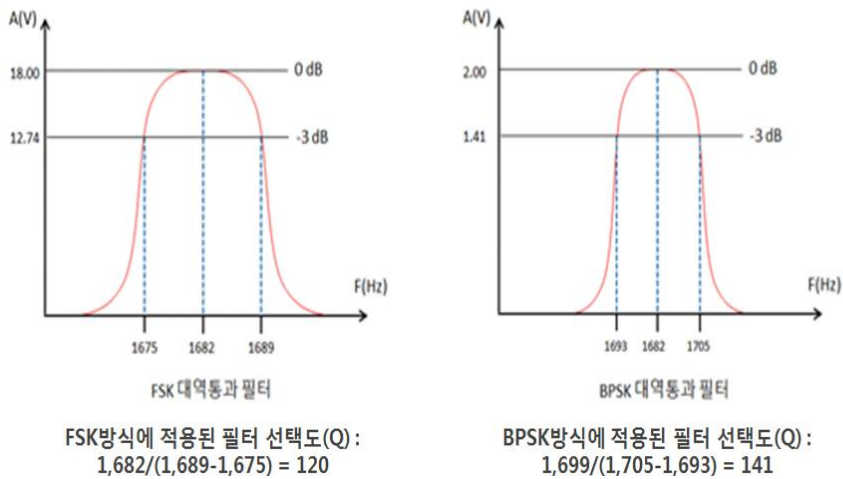
[표 30]과 같이 나타난 수신데이터를 요약하면 [표 31]과 같다. [표 31]을 살펴보면 약 300mA를 초과되는 고조파 레벨이 입력될 경우, 수신 모듈의 데이터 취득에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이러한 고조파에 대한 면역성의 향상은 변조방식 변경과 더불어 필터부의 선택도(Q)를 향상시켜 인입되는 고조파의 세기를 저감시킨 것으로 [그림 92], [그림 93]과 같으며, 고조파 레벨 350mA에서와 같이 데이터의 간헐적인 오류에 대한 부정 낙하를 방지하기 위하여 [그림 94], [그림 95], [그림 96]과 같이 데이터 처리 알고리즘을 개선하여 구현하였다.

가. 선택도(Q) 개선

선택도가 높다는 것은 입력 신호의 주파수 변화에 따라 출력 신호 레벨의 변화폭이 크다는 것을 의미한다. 높은 선택도의 대역 통과 필터는 인접한 고조파 주파수의 출력 레벨을 저하시키게 된다. 다시 말하면, 공칭주파수 외의 주파수 차단 효과가 증가된다는 것을 의미한다. [그림 92]는 FSK 및 BPSK의 입력대비 출력에 대한 측정 결과이며, [그림 93]은 이 결과들을 주파수 영역에서 도식화한 그림이다.



[그림 92] FSK와 BPSK에 적용된 대역통과 필터의 주파수별 입/출력 특성



[그림 93] FSK와 BPSK에 적용된 대역통과 필터 선택도(Q) 비교

나. 데이터 처리 알고리즘 개선

데이터 처리 알고리즘 개선에 있어서는 안전성을 고려하여 아래와 같이 궤도 점유/비점유 판단 알고리즘을 적용하였으며, 데이터 복구에 대한 알고리즘은 안전성과 정량적으로 직접 연관되는 부분이기 때문에 본 논문에서는 적용 방법에 대한 것만 언급하였다.

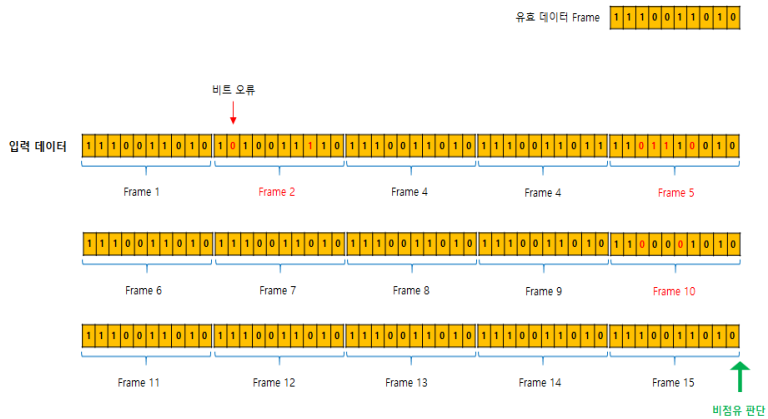
(1) 궤도 점유/비점유 처리 알고리즘

점유처리에 있어서는 안전성과 더불어 외란에 의한 면역성을 고려하여 설계해야 하는데, 각종 노이즈나 고조파 인입시 이로 인해 궤도회로가 점유처리(부정낙하)가 되지 않아야 한다. 이를 구현하기 유효한 신호 레벨의 입력과 데이터 입력이 유지된 상태(비점유 상태)에서 [그림 94]와 같이 간헐적인 데이터 Frame의 오류(데이터 bit의 오류)가 발생할 경우, 이를 외란으로 판단하여 점유 처리하지 않고 비점유를 유지한다. 그러나 연속적으로 다수개의 데이터 Frame에서 오류가 발생할 경우에는 점유로 판단을 한다. 이러한 오류 데이터 Frame의 개수는 열차 운영측면과 안전측면을 고려하여 수용 가능한 오류 Frame의 개수를 증가시켜 고조파에 대한 면역성을 더 증대시킬 수 있다. [그림 94]는 4개의 연속된 오류 데이터 Frame(Frame11~14) 입력 시 궤도 상태를 점유상태로 판단한 예이다.



[그림 94] 고조파 영향 저감을 위한 데이터 처리

점유처리와는 다르게 비점유 처리는 안전 기능이기에 때문에 입력신호에 대한 유효성이 입증되어야만 비점유 판단처리를 하게 된다. [그림 95]의 입력데이터 처리와 같이 데이터가 연속적으로 5개의 유효한 데이터 Frame(Frame 11~15)을 수신할 경우에만 비점유 처리를 하여 궤도회로의 안전성을 확보하였다.

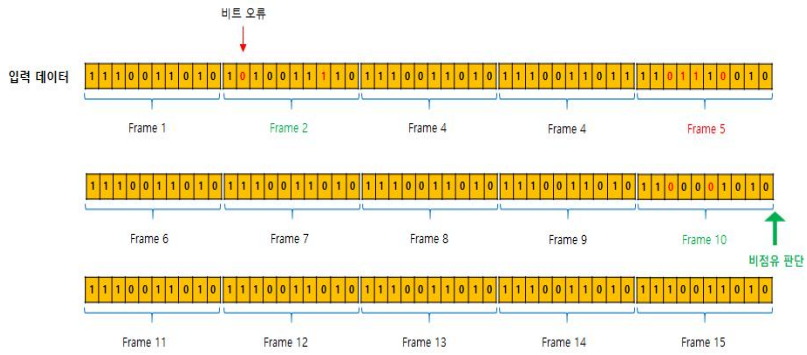


[그림 95] 안전성 확보를 위한 데이터 처리

(2) 데이터 복구 알고리즘

데이터 복구는 데이터 Frame 내에서의 bit 오류가 발생할 경우, 이를 복구하여 유효한 데이터 Frame으로 판단한다. 이는 오류 Frame의 횟수를 줄여 고조파 면역성을 높이는 효과를 가져 온다. 그러나 복구되는 bit 수만큼 동일 반송주파수를 가진 동일 코드 데이터의 부정 유입에 대한 안전성은 그만큼 낮아진다. [그림 96]은 2 bits 이내의 bit 오류를 복구하여 오류 데이터 Frame(Frame 2, 10)을 유효한 Frame으로 판단하여 처리한 예이다.

유효 데이터 Frame 1 1 1 0 0 1 1 0 1 0



[그림 96] 데이터 복구 처리

제5장 결 론

본 논문에서는 우리나라에서 적용하고 있는 신호제어설비에서 열차제어시스템의 종류 및 원리와 함께 최근 열차제어시스템의 기술동향에 대하여 조사하였고, 열차안전운행의 핵심설비인 궤도회로장치의 종류 및 Interface 방식, 장단점에 대하여 살펴보았다. 또한, 일반선 및 고속선에서 사용중인 궤도회로 중 FSK방식의 AF 궤도회로에서 KTX 등 전기철도 차량별로 운행 시 유입되는 고조파 성분 분석 및 특성 시험을 통해 AF 궤도회로의 수신모듈에 고조파 노이즈가 AF 궤도회로에 어떠한 영향을 주며, 궤도가 부정 낙하되는 원인이 무엇인지 파악할 수 있었다. 즉, 기존 FSK방식의 AF 궤도회로는 송신으로부터 입력된 신호 외에 고조파 노이즈가 유입되어 일정 레벨 이상 세기의 주파수가 필터부에 들어올 경우 필터부에서 차단하는 데 한계가 있고, 이로 인해 검파가 불가능하고 특히, C type에서는 사용되는 반송파 주파수 1,979Hz가 인접 고조파 주파수인 1,980Hz(제33고조파)와 불과 1Hz 차이밖에 없어 궤도 낙하와 같은 장애가 발생하는 것임을 확인 할 수 있었다.

그 결과 KTX와 같은 전기차 운행시 AF 궤도회로의 송수신 모듈이 고조파로 부터의 영향을 차단시키기 위한 필터회로 또는 보호회로를 연구하고, 고조파로부터의 영향을 최소화 가능한 변복조기술을 마련하며, 고조파 유입에도 안정적인 동작과 오동작 및 비안전측 동작이 가능한 수신모듈의 모델을 다음과 같이 제시하였다.

첫 번째, 기존 AF 궤도회로의 FSK방식이 아닌 BPSK방식을 적용하고, 송신모듈은 데이터 손실의 최소화를 위해 Zero-Crossing Based BPSK 변조방식을 사용하며, 공칭주파수와 호환성을 위해 반송파 주파수를 1,699Hz, 2,296Hz, 1,996Hz, 2,593Hz를 사용하고, 수신모듈은 송신모듈에 따라 BPSK 복조방식 및 고조파의 영향을 줄이기 위한 보호필터를 적용한다. 또한 송신모듈(변조회로)은 디지털합성기에서 생성된 출력주파수를 Feedback 받아 동기화 되도록 설계하고, 수신모듈(복조회로)은 위상검지를 위해 반송파 추출회로에서 발생한 동기회로로 수신된 신호의 위상을 검지하도록 설계하였다.

두 번째, 고조파 영향 비교 시험을 위해 FSK 방식과 BPSK 방식의 송수신모듈의 반송파 주파수와 인접한 고조파를 수신단에 인가하였을 때 수신모듈의 동작특성을 시험하여 궤도회로에 사용되는 반송파 주파수에 인접한 고조파 노이즈 주파수가 인가될수록 필터링을 통해 출력되는 고조파 레벨이 증가되고, 해당 반송파 주파수의 레벨은 낮아지는 결과를 확인할 수 있도록 하였다.

세 번째, AF 궤도회로에서 BPSK방식은 전기차로부터 발생하는 고조파에 대한 영향 레벨 한계치(300mA)가 인가되었을 때 정상동작 여부를 확인하는 시험을 통해 FSK방식과 달리 정상 동작한 것으로 분석되었다

이와 같이 본 논문에서는 지금까지 기존 FSK 방식의 송수신모듈과 BPSK 방식의 송수신모듈의 고조파 영향도(影響度)를 상세하게 분석하였다.

특히 고조파에 영향을 직접적으로 받는 수신모듈에 고조파 영향도 시험 및 분석을 실시하였고, 분석된 결과를 통해 AF 궤도회로에 BPSK를 적용시켰을 경우, 고조파에 대한 면역성이 향상된 것을 확인할 수 있었다. BPSK의 면역성 향상에 기여한 주요 설계 방식 및 시험결과는 다음과 같다.

첫째, Q가 높은 필터의 설계를 통해 고조파에 대한 차단 효과를 약 20%정도 향상시켰다.

둘째, 변조 방식을 주파수편이 변조방식(FSK)에서 위상편이 변조방식(PSK)으로의 변경을 통해 신호 복조시 데이터 오류율을 낮출 수 있었으며, 고조파 영향 저감을 위한 알고리즘을 개선하여 간헐적 오류에 대한 부정확한 방지를 확인하였다.

결론적으로 본 논문을 통해 검증된 BPSK방식의 면역성은 기존 FSK 방식 대비 약 20% 향상되었으며, 이 결과 또한 데이터 처리 알고리즘을 개선한다면 좀 더 높일 수도 있을 것으로 판단된다. 특히 본 논문의 연구결과는 향후 국내열차 안전운행 및 신호제어 설비의 품질 향상과 안전성 확보는 물론 열차제어시스템의 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

【참고문헌】

- [1] 박재영 외 2인, 철도신호공학, 통일출판사, 2001, pp. 103-115, 134-137.
- [2] H. Yoshimura and S. Yoshikoshi, Railway Signal, JASI, 1983, pp.1-37.
- [3] O.S. Nock, Track Circuit in Railway Signalling, A&C Black London, IRSE, 1980, pp.182-225.
- [4] 김영태, 철도신호제어시스템, 테크미디어, 2006.
- [5] 한국철도기술연구원, 신호제어시스템 기술개발, 1998.
- [6] Maurice Leach (ed), Railway control systems, A & C Black, London, 1991
- [7] 철도경영연수원, 고속철도신호기술(I), 2002, pp. 25 ~ 76, 115-154.
- [8] 철도설계편람(신호제어편), 2011, 5장 궤도회로장치.
- [9] R.j. Hill, Train position detection and track-train data transmission using audio frequency track circuits, Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australin -IE Aust. and IREE Aust. 1985, pp. 267-276
- [10] R.A. Wood, Train Detection by Track Circuit: The Effect of the Wheel/rail Interface, IRSE International Conference ASPECT99, 1999
- [11] O.S. Nock, "Track Circuit" in Railway Signalling, London: IRSE, 2002, pp.182-225
- [12] 최재식 외 4인, KTX 산천운행시 발생하는 전자파노이즈에 대한 AF궤도회로(TI-21) 신뢰성 확보방안 기술연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2013.5, pp. 1279-1288
- [13] S. Brillante and al, Modelling for electromagnetic interference assessment in electric railway traction systems", IEE International Conference on Electric Railways in a United Europe, 1995, pp!48-152
- [14] 최재식, 궤도회로단락불능 해소방안에 관한 연구, 한국철도공사 연구보고서, 2013.
- [15] 윤지근, 경부고속철도 AF궤도회로 부정낙하 개선방안에 관한 연구, 우송대학교 석사논문, 2012.
- [16] 최재식 외 4인, KTX 산천과 TI21 무절연 AF 궤도회로간 귀선전류고조파 이동경로 분석연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2014.5, pp. 1582-1590
- [17] 최재식 외 3인, KTX산천 귀선전류고조파가 일반선 TI-21형 AF궤도회로에 미치는

- 영향분석, 한국철도학회 논문집 19(1), 2016.02, pp. 38-45
- [18] 유경제어주식회사, ATC-AF 궤도회로, 1997
- [19] 백종현 외 4인, ITX 차량 운행에 의한 AF 무절연 궤도회로의 귀선전류 영향 분석, 전기학회논문지 62(4), 2013.4, pp. 584-590
- [20] 최재식, 경부고속선 UM71C궤도회로장치 회로특성 분석연구, 한국철도공사 연구보고서, 2014.
- [21] 김용규 외 2인, 기존선 전철화에 따른 궤도회로 특성 연구. 대한전기학회 학술대회 논문집, 2004.7, pp. 1397-1399.
- [22] 한국철도공사, 전기업무자료, 2017.
- [23] 박기범 외 2인, 고속선 궤도회로 유지보수효율 향상을 위한 차상검측시스템에 관한 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2006.5, pp. 6-12.
- [24] 한국철도시설공단, KOREA TGV Track circuit UM71 60HZ characterization, 2003.
- [25] CSEE Transport, UM71 Handbook, 2002, pp.95-101.
- [26] CSEE Transport, Functional Description ATC, 2000, K631- 31-E1141-AY+T-002
- [27] 한국철도시설공단, 호남고속철도 궤도회로 UM-SEI의 성능, 2014.
- [28] 김용규 외 5인, KRTCS 기술 분석을 통한 일반 및 고속철도용 무궤도회로 열차제어시스템 구축 방안, 한국철도학회 논문집, 21(6), 2018.7, pp. 552-561.
- [29] 板倉榮治, 軌道回路, 社) 信号保安協會, 1971, pp. 304-316.
- [30] R.J. Hill, Electric railway traction Part 5: Train detection, communications and supervision, Power Engineering Journal, 1996, pp. 87-95
- [31] R.J. HILL, Optimal Construction of Synchronizable Coding for Railway Track Circuit data-transmission, IEEE transactions on vehicular technology 39(4), pp. 390-399
- [32] Y. Cao and al, Track Circuit Fault Diagnosis Method based on Least SquaresSupport Vector, Earth and Environmental Science 108, 2018, Article ID 052106
- [33] B. TIM, Railway track circuit fault diagnosis using recurrent neural networks, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 28(3), pp. 523-533.
- [34] Y.K. KIM and al, Analysis of Track Circuit Failure using Comparison Theoretical Value with Measurement of Tuning Unit, ICEIC : International

- Conference on Electronics, Informations and Communications, 2010.6.
- [35] J. Chen and al, Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems, *Control Engineering Practice*, 16(5), 2008, pp. 585-596.
- [36] L. Oukhellou and al, Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster-Shafer classifier fusion, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(1), 2010, pp. 117-128.
- [37] J. Chen and al, Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems, *Control Engineering Practice*, 16(5), 2008, pp. 585-596.
- [38] 박기범 외 4인, 고속선 궤도회로(UM71-C)의 내부모델링에 관한 연구, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2006.7, pp. 1130-1131.
- [39] 안광렬 외 5인, 고속선과 기존선 인터페이스 구간의 동조유닛 BA 분석, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2009.11, pp. 203-208.
- [40] 박동훈 외 2인, S-BOND를 이용한 궤도회로 특성 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015.5, pp. 1573-1578
- [41] W. Dong, Fault Diagnosis for Compensating Capacitors of Jointless Track Circuit Based on Dynamic Time Warping, *Mathematical Problems in Engineering* Vol 2014, 2014, Article ID 324743.
- [42] N. Nedelchev, Dead-earthing influence on track-circuit shunt sensitivity, *IEE proceedings-electric power applications*, 145(2), 1998, pp. 147-152
- [43] 박대근 외 3인, 궤도구조 및 재료가 궤도회로에 미치는 영향 분석, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2008.6, pp. 1711-1715.
- [44] 강장규 외 3인, 한국철도 AF궤도회로의 진단장치에 대한 연구, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2010.11, pp. 207-209.
- [45] I. Katsuichi, Track Circuit, *Journal of Railway & Electrical Engineering*, 10(8), 1999, pp. 77-80.
- [46] 한국철도표준규격, KRS SG 0038-09(R)무절연가청주파수(AF)궤도회로
- [47] A. Mariscottia and al, Modeling of Audio frequency Track Circuits for validation, Tuning, and Conducted Interference Prediction, In Proc. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.11, 2010, pp.52-60.

- [48] L. Zhao and al, The simulation analysis of influence on jointless track circuit signal transmission from compensation capacitor based on transmission-line theory, in Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE ' 09), 2009, pp. 1113-1118.
- [49] 한국철도시설공단, UM71C-TVM430 track circuit, Railway Industry Information Center, 2009, pp. 1-31
- [50] ADtranz, AF 궤도회로 TI21-4 기술지침서, 1998
- [51] 류시출 외 2인, 고속철도 무절연궤도회로의 경계부 특성 해석에 관한 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015.5, pp. 537-546.
- [52] 이희진 외 1인, 고전압임펄스궤도회로(HVITC)와 AF 궤도회로간의 간섭에 대한 연구, 한국철도학회 논문집, 18(3), 2015.06, pp. 232-240
- [53] 이태훈 외 3인, 고전압 임펄스궤도회로의 동작특성 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2008.11, pp. 1279-1284
- [54] 한국철도표준규격, KRS SG 0031-09R 고전압 임펄스궤도회로장치
- [55] 박기범 외 3인, PSCAD/EMTDC를 이용한 임펄스 궤도회로의 계통분석 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2009.5, pp. 433-441
- [56] H. Wenjuan and al, Research of High-voltage Impulse Track Circuit Receiver Based on Software-Algorithms, TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol.12, No.1, 2014, pp. 496-505.
- [57] 최재식 외 3인, 고속철도 무절연AF궤도회로 전기특성 분석연구, 대한기계학회 춘추학술대회, 2015.11, pp. 3378-3380.
- [58] 조봉관 외 4인, 무절연 가청주파수(AF) 궤도회로장치에 관한 고찰, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2011.5, pp. 1709-1715.
- [59] 최재식, 무절연 AF궤도회로 경계부의 전기적 특성분석에 대한 연구, 서울시립대학교 석사논문, 2002.
- [60] 박동훈 외 2인, AF 무절연 궤도회로 경계구간 축소에 관한 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015, pp. 1201-1207.
- [61] 김용규 외 2인, 궤도회로의 유지보수 효율화를 위한 동조 유닛 특성 분석, 한국산학기술학회 논문지, 10(12), 2009.12, pp. 3594-3599
- [62] H. Zhao and al, Research on the onboard auto-test system for track circuit

- compensating capacitors, in Proceedings of the 10th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems, COMPRAIL (CR ' 06), 2006, pp. 965-971.
- [63] L. Zhao and al, The compensation capacitors fault detection method of jointless track circuit based on DBWT and WR, in Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS ' 09), 2009, pp. 875-879.
- [64] Z. Linhai and al, Using the wavelet analysis based noise canceling technique to detect the integrity of the compensating capacitors of UM71 track circuit,” in Proceedings of the IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications(MAPE ' 05), 2005, pp. 1268-1274.
- [65] 최재식 외 4인, UM71C AF 궤도회로경계구간 케이블길이 변화에 따른 임피던스 특성 영향분석연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2015.5, pp. 1586-1593.
- [66] 최재식, 경부고속선 궤도회로 현장케이블 위치선정연구, 한국철도공사 연구보고서, 2015.
- [67] 최재식 외 5인, 케이블 길이 연장에 따른 고속철도 무절연궤도회로 경계구간 전기특성 향상에 관한 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집 , 2015.10, pp. 832-839.
- [68] 신우이엔지, UM71C AF궤도회로 전기특성 시뮬레이션 및 현장계측 연구용역, 2015.
- [69] N. Nedelchev,1999, Jointless track circuit length, IEE proceedings-electric power applications 권: 146(1), pp. 69-74.
- [70] 김민석 외 3인, AF궤도회로에서 코팅재에 의한 자계의 세기 및 단락전류 변화에 대한 연구, 전기학회논문지 60(3), 2011, pp. 552-559.
- [71] 김민석 외 2인, AF궤도회로에서 에너지 밀도가 정보신호 검출시간에 미치는 영향, 전기학회논문지 60(6), 2011, pp. 1146-1151.
- [72] 조성준 외 4인, 고속열차용 주전력변환장치 궤도회로 간섭 고조파 저감 제어, 전력전자학술대회논문집, 2014.7, pp. 227-228
- [73] 김민철 외 5인, 고조파분석을 통한 전기철도의 차량 및 궤도회로의 전도성잡음 평가에 관한 연구, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2005.7, pp. 2360-2362

- [74] 장동욱 외 1인, 도시철도차량 운행에 따른 궤도회로 고조파 전류 측정 및 분석, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2013.7, pp. 1892-1893
- [75] 백종현, 전기철도시스템에서 궤도회로 측면의 귀선전류 고조파 분석, 전기학회논문지, 61(5), 2012.5, pp. 698-704
- [76] 김용규 외 1인, 경부선 전철화 구간에서의 공동접지에 의한 귀선전류 분석, 한국산학기술학회 논문지, 11(12), 2010.12, pp. 4968-4974
- [77] 백종현, 고속열차 운행에 따른 호남고속철도 궤도회로 귀선전류 영향 분석, 한국통신학회논문지, 42(5), 2017.5, pp. 1110-1116
- [78] 백종현 외 4인, 전기철도 구간에서의 철도차량 운행에 따른 귀선전류 분석, 한국산학기술학회 논문지, 12(9), 2011.09, pp. 4112-4118
- [79] 백종현, 전기철도차량의 귀선전류에 따른 수서고속철도 궤도회로 영향 분석, 한국통신학회논문지, 43(4), 2018.4, 768-774
- [80] H. BAEK and al, Analysis of Return Current for Rolling Stock Operation on Electrical Railroads, 제어로봇시스템학회 국제학술대회 논문집, 2012.10, pp. 1211-1216.
- [81] 박재영, 열차내 연산시스템용 AF궤도회로 신뢰성향상 방안 연구, 한국산학기술학회 논문지, 13(10), 2012.10, pp. 4762-4767
- [82] 강장규 외 1인, 가청주파수 궤도회로의 진단 및 시험 장비 개선에 대한 연구, 조명·전기설비학회논문지 24(12), 2010.12, pp. 147-155.
- [83] A. Mariscotti, Measurement of the Internal Impedance of Traction Rails at Audio Frequency, in Proc. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.53, 2004, pp.792-797.
- [84] 곽우현 외 2인, 고속선 궤도회로 검측설비 개량을 위한 방안 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2006.11, pp. 22-27
- [85] 윤인모 외 3인, 궤도회로의 단자망 모델링 및 목적용 저항 특성 해석, 한국철도학회 논문집, 13(6), 2010.12, pp. 565-569
- [86] 혼다 고이치 외, 열차 검지 방법 개선을위한 시험 궤도회로의 개발, 제13회 철도기술 협회 심포지엄, 2006, pp. 367-368
- [87] 박경원 외 4인, 궤도 구간에 따른 궤도회로 모델링 및 단락 전류 특성 분석, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2012.7, pp. 1508-1509
- [88] 高重哲夫: 「軌道回路短絡不良の要因とその対策」、鉄道と電気技, 9(11)、pp.30-

- pp.35, 1998.
- [89] R.J. Hill and al, A model for railway track circuit operation using electric power transmission software, Proceedings 27th University Power Engineering Conference, 1992, vol. 1, pp. 123-126.
- [90] 김민규 외 4인, 동일한 주파수를 사용하는 AF궤도회로 사이의 이격거리에 대한 연구, 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2009.11, pp. 521-530
- [91] 이명철 외 3인, 검수고에서 소프트웨어 결함허용기법을 고려한 가상궤도회로의 적용에 대한 연구, 한국철도학회 논문집, 15(2), 2012.4, pp. 122-128
- [92] M.C. Falvon and al, A Simulation Model of Audio-Frequency Track Circuits, in Proc. International Conference on Ship Propulsion And Railway Traction Systems, 2005, pp.1-6.
- [93] 김명진, 아날로그 및 디지털 통신이론, 생능출판사, 2007.
- [94] Chen Jianqiu, Zhang Yong, and ShangGuan Wei, Research on the Algorithm of Identifying Track Circuit Occupation in Simulation Platform of High-speed Train Control System
- [95] 남현도 외 4인, KTX궤도회로 시뮬레이션 알고리즘 개발, 정보 및 제어 논문집, 2011.10, pp. 223-224
- [96] Z. Yong-xian and al, Modeling and simulation of ZPW-2000A jointless track circuit, Journal of East China Jiaotong University, 2009, no. 3, pp. 64-68.

감사(感謝)의 글

1996년 아주대학교 석사과정을 마치면서 곧 바로 박사과정을 시작할까? 잠시 고민을 했었지만 경제논리를 대입시켜 볼 때 나에게 투자하는 것보다는 먼 장래를 위해서 커가는 아이들에게 투자하는 것이 옳겠다는 결론을 내리고 포기했다.

하지만 이렇다간 영원히 책과 멀어지지는 않을까? 라는 생각에 자격증을 취득하기로 마음먹었다. 그 결과 기술사, 한자 1급 등에 합격하였으며, 직장에서선 2급, 1급으로 승진하여 나름 충실히 살아왔다고 자부한다. 그 와중에 박채옥처장(당시 광주전기사업소장)의 박사과정 권유를 흔쾌히 수락하고, 2016년 조선대학교 박사과정에 도전을 하게 되었으며, 오늘 이렇게 박사과정을 무사히 마칠 수 있도록 많은 도움을 주었다.

이 논문이 있기까지 부족한 저를 아낌없이 사랑과 가르침으로 이끌어 주신 모든 분들께 이 글로써 감사의 뜻을 전하고자 합니다. 특히 대학원에 입학부터 졸업까지 부족한 제자를 위해 세심한 마음과 배려로 이끌어 주시고, 인생선배로서의 가르침과 논문이 완성될 때까지 눈물겹도록 도와주시고 이끌어 주신 조금배 지도교수님께 깊은 감사의 인사를 드립니다.

항상 웃음을 잃지 않고 온화하시며, 인자함 그 자체가 빛나는 김남훈 주임교수님과 본 논문의 실험과 분석을 함께하면서 끝까지 지원을 아끼지 않았던 최연옥 교수님에게도 무한한 감사를 드립니다.

2004년 4월 고속철도 개통과 함께 인연을 맺어 현재까지 늘 저의 든든한 우군이면서 신호분야 신기술을 전파하고자 불철주야 이론적 고찰을 증명하기 위해 연구하고 있으며, 바쁜 가운데도 불구하고 본 논문의 편집부터 맺음까지 꼼꼼히 챙겨주신 철도기술연구원 김용규 박사님께 감사의 말씀을 전합니다.

AF 궤도회로의 고조파 측정 및 특성분석 등 핵심적인 부분을 물심양면으로 지원해 주신 유경제어(주) 기노경, 안광열 대표이사님, 그리고 모든 부분을 실무적으로 참여해 주신 김성태 부장님과 논문을 위해 토론과 집필을 저와 함께 했던 광주본부 강종수 팀장에게 심심한 감사를 표합니다.

또한 본 논문의 자료 수집에 도움을 주신 송실대학교 강신우 박사님과 코레일의 안태수 처장, 윤임수 부장, 박삼종 부장, 김경호, 박주훈, 최재식, 강홍구 차장, 이외에도 신호제어처 직원 및 광주본부 정구용 본부장님을 비롯한 처장님들, 전기분야 직원들에게도 감사하다는 말씀을 드립니다.

내 고향 단양에서는 연로하심에도 불구하고 아직도 중장년이 된 자식들 걱정밖에 모르시고, 자식들이 잘되면 그걸 동네사람들에게 자랑하시는 걸 유일한 낙으로 계시는 손용분 여사님. 큰아들이 박사가 되었으니 얼마나 또 좋아하실까? 남광진의 아내로 원준, 정현 남매의 엄마로 억척스럽게 살아가는 유일한 여동생 안영미와 새로운 집을 마련하여 새동지를 틀고 희영, 준영, 성훈의 엄마, 아빠로 단양에서 어머니의 지척에서 돌봐드리고, 이젠 어엿한 그 지역 유지가 되어 있는 안중화와 제수씨에게도 고마움을 전합니다.

저에겐 넘치는 딸을 낳아 주시고, 사위 사랑은 장모라고 항상 큰사위 안서방을 챙겨 주시는 이연례 여사님, 서울 큰형님 임형중, 처남댁, 이랑, 소연, 호재에게, 그리고 이젠 고인이 되었지만 저에겐 군생활부터 여동생과 연을 맺게 해준 것까지 정말로 잊지 못할 작은형님 임형구, 처남댁, 원재, 선우, 지난번 좋지 않은 건강으로 수술까지 받고 이제는 회복단계에 있는 임형장과 얼마 전 공무원의 꽃이라는 사무관으로 승진한 동서 이찬교, 나의 유일한 처제 임금님, 창재, 현재에게도 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

아빠로서 제대로 시간도 못 내주고, 따뜻한 말, 따뜻한 사랑을 다 주지 못해 미안한 나의 딸들아! 나의 큰 희망, 나의 기둥 안선영, 나의 아들이 되어준 정한국 고맙다. 하희까지 선물을 줘서 너무 행복하단다. 과묵하고 자라오면서 한번도 말썽을 피우지 않고 부모 말에 항상 거역하지 않고 따르며, 예쁘게 자라준 지영아! 요즘은 경제활동 하느라 고생이 많지? 무엇하나 부족함이 없이 엄마, 아빠, 언니들에게 사랑을 독차지했던 우리 막내 효영이가 이젠 어엿한 대학생이 되어서 열심히 공부하는 모습을 보니 대견스럽다. 앞으로 잘할 수 있지? 믿는다. 사랑한다.

마지막으로 부족한 남편을 위해 뒷바라지 하면서 불평불만 없이 묵묵히 응원해주고, 오늘이 있기까지 넉넉하지 않은 살림에도 정신적, 물질적으로 적극 지원해준 나의 사랑하는 아내 임영미님께 진심으로 감사한 마음을 전합니다.

끝으로 졸업까지 무한한 사랑을 주신 모든 분들께 다시 한 번 감사의 말씀을 드립니다. 여러분들의 훌륭한 조언과 사랑을 늘 가슴속 깊이 새기고 간직하며 열심히 살아가겠습니다. 감사합니다.

2018년 12월 안 중 백 배상