

고조파분석을 통한 전기철도의 차량 및 궤도회로의 전도성잡음 평가에 관한 연구

김민철*, 장동욱** 이장무**, 한문섭**, 허남영*, 신명철**

*성균관대학교 전력계통 및 컴퓨터응용연구실, **한국철도기술연구원

Study for an estimation of conducted noise between electric train and track circuit by analyzing harmonics

Kim min-cheol*, Jang Dong-Uk** Lee jang-moo**, Han moon-seob**, Heo nam-yeong*, Shin myung-cheol**

*Sungkyunkwan university PSCAL laboratory, **Korea Railroad Research Institute>

Abstract - 전기철도 분야에서 전자기파에 의한 환경영향 평가는 중요한 요소가 되고 있으며 급전시스템, 신호시스템, 차량시스템 등으로 나누어 각각에 대한 전자기파 환경 영향에 대한 평가에 관한 사항이 연구 중에 있다. 특히 신호시스템 중, AF(Audio Frequency)궤도회로는 철도차량과의 빈번한 통신을 통하여 철도차량 제어에 많은 역할을 담당하므로 잡음에 취약하고 오동작은 사고로 직결되므로 이러한 잡음에 대한 평가는 중요하다 할 수 있다. 본 논문에서는 전기철도차량과 신호시스템 중 AF궤도회로의 전자기적합성을 입증할 수 있는 고조파 분석을 통한 전도성잡음의 시험 및 평가에 대한 방안을 제시한다.

2.1 AF궤도회로

전기철도차량과 지상신호 장치가 사용 목적과 데이터의 내용에 따라 많으나, 그중에 궤도를 통한 AF(Audio Frequency) 신호를 활용하여 차량의 검지 또는 정보를 송수신하는 것을 AF궤도회로(Track Circuit)라고 한다. AF궤도회로의 중요한 기능은 궤도회로 내 차량검지기능(Train Detection Function)과 데이터전송기능(Data Transmission Function)으로 두 가지 기능이 하나만 또는 동시에 사용된다. AF궤도회로는 데이터전송기능이 추가될 때 궤도의 전도성잡음에 좀 더 취약하게 되어 평가의 기준이 강화된다.

현대의 AF궤도회로는 물리적인 무결연(Jointless)형태에 S-본드와 같은 임피던스본드를 사용한 전기절연 방식을 주로 사용한다.

1. 서 론

현대의 전기철도 시스템은 향상된 전기전자기술을 통한 각 시스템의 유기적인 결합 및 자동제어가 주를 이루게 되었으며, 이러한 기술동향은 최소의 인원으로 더 많은 수의 차량을 동시에 제어하며 차량은 무인운전을 통한 휴먼에러(Human error)를 줄이는 방향으로 계속 발전하고 있다. 그러나 발생하는 전자기파에 의한 환경영향은 더욱 높아지고 있으며 특히, 교통제어의 핵심요소가 되는 전기철도차량시스템과 지상신호시스템과의 인터페이스에서의 전자기적합성 평가는 그 어느 때보다 중요한 환경평가 요소로 대두되고 있다. 신호시스템 중 AF(Audio Frequency)궤도회로는 궤도회로 위를 주행하는 철도차량과의 빈번한 통신을 통하여 철도차량 제어에 많은 역할을 담당하고 있다. 그러나 변전소 및 철도차량으로부터 발생하여 궤도를 통해 전달되는 전도성잡음은 AF궤도회로의 동작에 악영향을 미칠 수 있으며 이는 곧 잘못된 차량교통 제어로 이어져 사고를 발생할 수 있는 가능성을 내포하고 있어, 해외의 선진철도에서는 전기철도의 전자기환경 영향 평가에 관한 많은 연구를 하고 있으며, 특히 전기철도차량 시스템과 지상신호 시스템 간의 전자기적합성에 주안점을 두고 있다. 그러나 현재까지 두 시스템간의 전자기적합성을 평가하는 명문화된 시험규정 및 판정규정이 없으며, 전기철도의 전자기적합성에 관한 국제 규격인 IEC-62236-3-1에서도 국가별 신호시스템이 다르므로 각 해당사가 협의하여 실시토록만 권고하여 각 시스템공급사가 자신에게 유리하도록 적용하고 있는 실정이다. 더욱이 국내에서는 전기철도시스템의 전자기적합성 입증에 관한 중요도가 낮게 평가되고 있어 해외 시스템을 도입할 때 명확한 평가가 부족한 상태에서 해외 시스템 공급사의 제시한 자의적인 평가를 따르는 경우가 있다. 특히 전기철도차량시스템과 지상신호시스템과의 전자기적합성은 안전에 관련된 것으로 시험을 통한 명확한 평가가 반드시 필요하다.

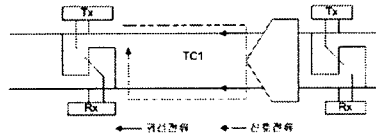


그림 1. 궤도회로에서의 신호전류 흐름

2.2 전도성 잡음

궤도를 통하여 발생하는 전도성잡음은 변전소에서 발생한 고조파와 차량의 VVVF제어로 인하여 발생한 고조파가 섞인 귀선전류가 궤도를 통하여 흘러 궤도회로에 영향을 줌으로 인하여 발생한다. 변전소의 고조파 잡음은 AF궤도회로의 주파수대에서는 비교적 적은 수준으로 발생하나 직류변전소의 경우 정류에 사용된 (펄스 수 x 기본주파수)배의 고조파가 주기적으로 나타나게 된다. 50Hz 교류를 사용하는 해외의 일반적인 직류변전소의 경우, 두 개의 6펄스 정류기를 사용한 12펄스 정류로 인하여 (12x50)n(n:1,2,3,...)차의 고조파가 함께 발생한다. 이는 예측 가능한 잡음으로 해외 시스템공급사의 AF궤도회로는 이들의 간섭을 피하도록 50Hz직류변전소에 맞추어 신호주파수가 설정되어 있다. 차량에서 발생하는 고조파의 경우 운전모드에 따라 발생하는 고조파의 수준이 지속적으로 변하므로 예측이 어렵고 따라서 전도성잡음의 주요인이라 할 수 있다.

2.3 시험을 위한 고려요소.

앞서 기술한 바와 같이 전도성잡음에서 AF궤도회로 주파수대의 고조파수준은 차량의 운행모드 및 시험을 실시하는 위치에 따라 변하게 된다. 그러므로 시험은 다음의 사항을 고려하여 계획을 수립한다.

1. 시험장소 및 환경조건
2. 잡음의 평가기준
3. AF궤도회로의 주파수 및 변조방식
4. 차량의 운전조건 및 측정위치

2. 본 론

2.3.1 시험장소 및 환경조건

시험 장소는 시험을 위하여 설정된 환경조건에 따라 선정된다. 환경조건은 차량의 부하, 운행조건, 위치에 따라 전도성잡음이 많이 발생할 수 있는 조건으로 설정된다. 차량의 부하는 승객이 만차(Full Load)인 중량상태를 유지하며 차량의 운행 중 사용하는 모든 전기부하를 가동한 상태이다. 측정대상이 되는 궤도의 전도성잡음에 신호가 더해지는 것을 방지하기 위하여 해당 궤도회로는 운용하지 않으며 실제 변전소 및 차량으로부터 발생하는 전도성잡음을 평가하기 위하여 차량이 궤도회로에 진입하지 않은 상태에서 궤도회로의 배경잡음(Background Noise)을 측정하여 이를 실측치와 비교/검토한다. 고조파를 포함한 귀선전류의 손실을 적게 하기위하여 측정위치를 고려하여 시험 대상이 되는 궤도회로는 변전소에 인접한 것을 선정하며, 이때 BT(Boost Transformer)를 사용하는 교류변전소는 BT의 흡상선에 의한 영향이 적은 곳을 선정한다.

2.3.2 잡음의 평가기준

2.1.절에 기술한 바와 같이 궤도회로의 기능에 따라 잡음의 평가기준이 다르게 적용되며, 그 기준은 AF궤도회로의 전자기적합성 시험을 통한 내성에 따라 선정된다. 본 문에서는 AF궤도회로가 차량검지 및 데이터전송기능을 동시에 가지고 있으며 전자기적합성 시험을 통하여 내성정도가 확인 된 궤도회로를 가정한다.

AF궤도회로의 지상신호장치는 차량의 궤도점유를 인식하고 또한 데이터를 차량의 픽업코일을 통하여 차상신호장치로 송신하기 위하여 변조된 전류신호를 픽업코일에서 신호로 인식할 수 있는 최소전류 I_m 이상으로 송신한다. 이때 고조파잡음이 신호주파수에서 I_m 크기 이상으로 발생하면 잡음이 신호로 인식되어 궤도회로가 차량의 궤도점유를 인식하지 못하거나 인식한 후 차상신호장치에 전송된 데이터에 오류가 발생한다. $I_{m,rms}$ 의 크기는 궤도회로의 길이 및 궤도환경에 따라 최대 $I_{m,rms}$ 에서 최소 $I_{m,rms}$ 까지 설정되며 차량은 전 구간을 운행하므로 가장 낮은 크기의 $I_{m,rms}$ 가 잡음의 평가기준이 된다.

궤도는 이상적인 경우 전기적으로 평형을 이루고 있으나 불평형이 발생할 경우 S-본드가 전기적인 평형을 이루게 하며 이때 S-본드를 통해 흐르면 차동 전류는 잡음으로서 작용을 하여 잡음의 평가기준인 $I_{m,rms}$ 의 크기를 상대적으로 낮추게 된다. 궤도의 불평형율은 궤도구간의 상태에 따라 다르며 측정을 통하여 실제 평형율에 따른 $I_{m,rms}$ 를 적용할 수 있으나 실제 측정이 어려운 경우, FTA(Fault Tree Analysis)등을 통해 발생빈도가 높은 경우의 불평형율을 선정하여 적용할 수 있다. 궤도의 전기적인 불평형율을 S를 고려한 최종 평가기준을 $I_{f,p,rms}$ 라 하고 신호주파수에서의 고조파 잡음을 $I_{f,p}$ 라 하면 전도성잡음은 다음의 (1)을 만족해야 한다.

$$I_{f,p} < I_{f,p,rms} \quad (1)$$

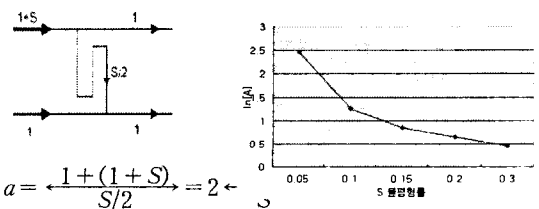


그림 4. SDTC AF궤도회로의 불평형율에 따른 $I_{f,p,rms}$

2.4.3 AF궤도회로의 주파수 및 변조방식

AF궤도회로는 제조사에 따라 사용주파수대역 및 변조방식이 다르다. 변전소 및 차량에서 발생한 전도성잡음은 해당 AF궤도회로의 사용주파수대역의 신호에 영향을 주므로 평가는 대상이 되는 AF궤도회로의 주파수대역에 한정된다. 신호주파수에서의 잡음 고조파의 최고값이 최소 신호판별 기준 이하이어야 하나 이는 안전에 대한 이득을 고려한 판별기준으로 고조파의 최고값이 기준을 넘더라도 AF궤도회로의 변복조방식에 따라 매우 짧은 기간동안 발생한 고조파면 해당 고조파는 잡음으로서 AF궤도회로에 영향을 주지 않을 수 있다. 그러므로 고조파잡음에 대한 평가는 2단계로 나뉘어 수행될 수 있으며 1단계는 신호주파수대역에서의 고조파잡음의 최고값과 평가기준치를 비교한 후, 기준치를 초과하는 주파수의 고조파잡음을 AF궤도회로의 변복조 방식과 안전을 위해 설정된 마진율의 재검토에 따라 최종 영향평가를 실시한다.

2.4.4 차량의 운전조건 및 측정위치

운전조건은 정차상태와 운행상태의 두 가지로 구분할 수 있다. 다시 정차상태는 차량이 궤도회로에 진입하여 정차 중 발생하는 전도성잡음을 평가하기 위한 상태이다. 차량은 역구내에 저속으로 진입하여 정차하므로 변전소가 있거나 인접한 역에서 실시하며 측정은 변전소의 귀선에서 신호주파수대역의 고조파를 측정한다. 예외적인 경우로, S-본드가 역 근처에 있어 차량이 저속으로 진입하거나 정차가 되어 S-본드가 차량의 휠 축 사이에 위치되는 경우이다. 궤도회로는 차량의 휠 축에 의하여 폐회로를 재구성하므로 휠 축의 임피던스가 충분히 낮고 균등하여야 하나 그렇지 못하여 임피던스가 높고 불균등하여 전압차가 발생할 경우 그림 5와 같이 와류전류가 수직축으로 흘러 궤도회로의 차량점유 검출이 늦게 되고 구간이 짧은 궤도회로는 안정된 정보교환 시간을 충분히 보충 받을 수 없게 된다. 또한 귀선전류가 균등하지 못해 궤도의 전기불균등이 심화될 수 있다. 이때는 차량이 S-본드 위를 저속으로 이동하거나 각 휠 축이 S-본드 사이에 위치하여 S-본드에 흐르는 신호주파수대역의 고조파를 측정한다.

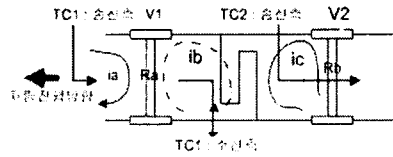


그림 5. 휠 축 전압 불균형에 의한 와류전류

운행상태는 차량이 역행 및 회생제동 운전을 모두 포함한 실제 운전조건에서 발생하는 전도성잡음을 평가하기 위한 상태이다. 운전은 역행상태와 회생제동상태로 구분한다. 역행상태는 그림 6과 같이 정차상태에서 측정지점인 귀선(Return Current Line)이 있는 변전소 방향으로 최고가속력으로 운전최고속도에 도달하여 최고운전속도로 변전소 귀선을 통과하며 출발 시점부터 제동을 시작하는 시점까지의 전도성잡음을 신호주파수대역에서 측정한다. 회생제동상태는 그림 7과 같이 변전소 방향 변전소 귀선에서 신호주파수 대역의 고조파를 측정하고, 제동상태는 변전소 방향으로 최고운전속도로 운행하여 변전소 귀선 진입 전에 최고 제동력으로 정차하며 제동이 시작되는 시점부터 정차까지의 전도성잡음을 신호주파수대역에서 측정한다.

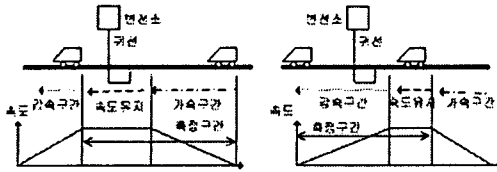


그림 6. 역행상태

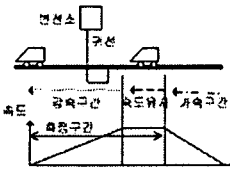


그림 7. 회생제동상태

2.5 시험의 적용.

아태내의 신규 전기철도차량에서 실제 적용되어 전도성 잡음이 평가되었다. 신규차량은 750V직류시스템에서 운행되며 직류시스템에는 SIEMENS사의 FTG S 46 및 91 7 AF케도회로가 설치되어 있다. 그 중 SIEMENS사의 FTG S 917타입의 AF케도회로는 세계적으로 많이 활용되는 AF케도회로이며 각 신호주파수대역의 중심주파수는 9.25kHz/10.5kHz/11.5kHz/12.5kHz/13.5kHz/14.5kHz/15.5kHz/16.5kHz이며 대역은 중심주파수 f_c 를 기준으로 $\pm 300\text{Hz}$ 이다. 각 FSK변복조 방식을 사용하므로 100Hz 간격으로 비트에 해당하는 신호주파수를 가지고 있으며 이를 TDM 방식으로 전송한다. 이 신호는 케도를 통해 최고 200bit/s의 속도로 전송되어 픽업코일을 통해 차량 신호장치로 전달된다. 케도의 전기불평형률에 의한 최소 케도전류는 100mA로 신호주파수대역에서 고조파전류는 100mA이하가 되어야 한다. 변전소가 역구내의 지하에 설치되어 있으며 변전소 귀선이 역구내에 있어 차량은 역을 기점으로 정차상태 및 운행상태로 실시되었으며, 운행최고속도는 80km/h이며 최고가속도 및 최고감속도가 적용되었다. 변전소의 정류는 50Hz의 교류를 6펄스 x 6펄스의 12펄스로 실시된다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 변전소의 정류에 의하여 (6x50)차 고조파가 4.2kHz(7차), 4.5kHz(8차), 4.8kHz(9차) 등에서 나타남을 볼 수 있다.

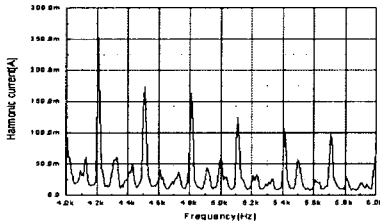


그림 8. 변전소 고조파

그림 9는 역행상태의 시험결과를 보여준다. 시험이 실시된 AF케도회로는 15.5kHz($\pm 300\text{Hz}$)를 사용하는 회로로 역행상태 시험의 최고운행속도를 맞추기 위하여 구간에 설정된 목표속도를 초과하기 위하여 AF케도회로를 작동한 상태에서 시험이 실시되었으며, 해당 AF케도회로는 역구내 진입을 위한 저속구간으로서 정차상태의 전도성 잡음 평가로 확인된다.

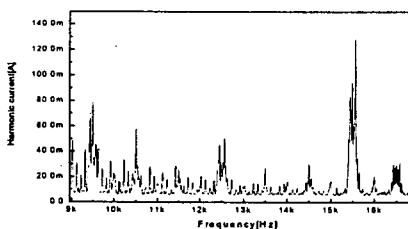


그림 9. 신호주파수대역의 고조파

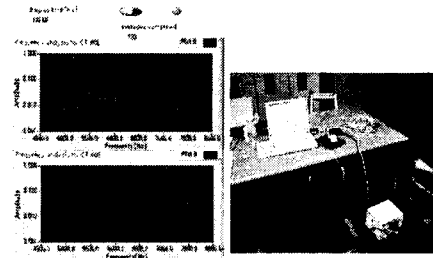


그림 10. Labview를 이용한 고조파 분석

그림 11은 1차 평가에서 문제가 제기되었던 신호주파수의 고조파를 시간영역에서 재평가한 것으로 신호의 변복조 및 판별기준에 의하여 0.2 sec를 초과하지 않아 2차 평가에서 잡음으로서 역할을 하지 않는 것으로 평가되었다.

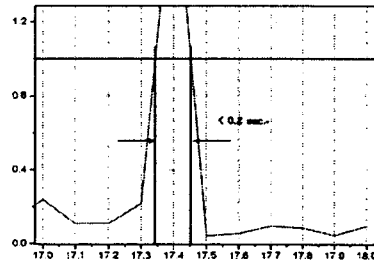


그림 11. 시간 축에서의 고조파 분석

3. 결 론

본 논문에는 전기철도차량과 AF케도회로의 전자기적 합성을 전도성잡음에 대한 평가를 통하여 입증하는 것으로 변전소 및 전기철도차량에서 발생하여 케도로 전도된 전도성잡음이 AF케도회로에 미치는 영향을 AF케도회로의 내성한계를 기본으로 시험환경 및 시험조건을 고려한 전도성잡음 측정 및 평가방법을 제시하고 실제 적용된 결과를 제시하였다. 제시한 측정시스템을 통하여 전기철도차량과 AF케도회로의 발생하는 전도성 노이즈를 정확히 측정할 수 있었으며, 신호시스템에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 전기철도에서의 EMC(전자기적합성)을 입증하기 위해서는 변전, 차량, 신호 시스템의 각 개별 시스템뿐만 아니라 시스템간의 인터페이스에 관련한 이러한 분석 및 측정방안에 대한 기술 축척이 이루어져 그 결과로 입증에 관하여 표준화되고 명문화가 이루어지면 전기철도의 안전성 향상에 많은 도움이 될 것이다.