

고분자복합소재차체를 적용한 바이모달트램의 전기적 절연 및 접지시스템에 관한 연구

이강원*, 목재균*, 길경석**, 박대원**
 한국철도기술연구원*, 한국해양대학교**

Study about Electrical Insulation and earthing system of Bimodal Tram with Polymer Composite Body

Kang-Won Lee*, Jai-Kyun Mok*, Gyung-Suk Kil**, Dae-Won Park**
 KRRI*, Korea Maritime University**

Abstract - Bimodal tram has a carbody made of polymer composite material which is good electrical insulator. As an series hybrid type, Alternating voltage generated from generator coupled with CNG engine are rectified and transformed to variable voltage ranges which are applied to electrical apparatus and ECUs equipped inside of the tram. The failures of electrical insulation between high voltage(400V ~ 800V) and low voltage(24V) or between different kind of voltages such as AC and DC may cause some electrical interferences to prevent from operating rightly and other safety problem. This paper have investigated about the degradation factors of the electrical insulation and the earthing method available to bimodal tram, which is effective for preventing the electromagnetic interference coming from the inside or outside of tram but need some detecting measurements of earth leakage through electrical systems.

그림 1은 바이모달 트램의 직렬형 하이브리드 추진시스템과 보조전원에 대한 간단한 구성도를 보여주고 있다. 바이모달트램의 직렬형 하이브리드 추진시스템은 CNG(compressed natural gas) 엔진에 연결된 발전기를 회전시켜 전력을 생산하고 발생된 전력은 직류계통에 연결된 배터리를 충전시키고 인버터를 통하여 전동기를 구동시켜 차량을 움직이고 차량의 제동이 이루어지는 경우 회생제동에너지가 전동기로부터 발생하여 인버터를 거쳐 배터리에 충전될 수 있도록 하는 시스템이다. 바이모달트램에서 사용되는 교류전압은 엔진에 직결되어 엔진의 회전수에 따라 주파수 및 전압의 크기가 조정되는 발전기 출력전압(592Vac, 600Hz/3000rpm)과 보조전원 공급장치로부터 60Hz의 고정주파수로 출력되는 전압(400Vac) 등 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 그리고 직류전압은 보조전원 공급장치로부터 공급되어 제어기기 등의 입력전압으로 사용되는 24V, 엔진기동을 위한 12V 배터리전원전압, 발전된 전압이 정류되어 배터리(650V, 80Ah)와 4개의 전동기를 구동제어하기 위한 인버터에 인가되는 전압(600V ~ 740V)등으로 구분할 수 있다. 표 1은 각 전압별 용도를 나타내고 있다.

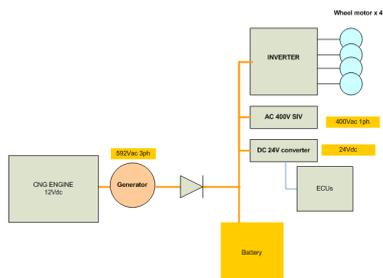
1. 서 론

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강도(specific strength)와 비강성(specific stiffness)을 갖고 진동감쇠특성 및 피로특성, 그리고 내열성과 내마모성 등이 우수하여 차세대 구조재료로서 각광을 받고 있다. 또한 등방성 재료와는 달리 적층 순서와 적층각의 변화에 따라 다양한 기계적 성능을 구현할 수 있으며 이러한 특성을 이용하여 특정 요구 조건에 적합한 특성을 갖는 구조물을 설계 할 수 있는 장점 때문에 구조물의 경량화를 추구하는 항공우주산업 및 방위산업계에서 많이 적용되고 있다. 현재 개발 중인 바이모달트램에 사용된 복합재료는 고강도 섬유를 보강제로 하고 고분자를 모재로 하는 섬유강화복합재료로서 금속을 사용한 기존 차량차체에 비해 경량이고 성형이 자유로워 차체형상을 자유롭게 선택하여 만들 수 있다. 이러한 복합재료를 사용한 바이모달 트램은 전기적 절연성능은 좋으나 전자기적 간섭 또는 내성 그리고 기존 차량에 비해 높은 전압을 사용하는 전력시스템의 접지에 대한 심도있는 고려가 필요하다. 본 논문에서는 바이모달 트램의 전기적 절연 및 열화요인에 대해 고찰하고 고분자복합소재차체를 적용한 바이모달트램에서의 접지에 대하여 살펴볼 것이다.

2. 본 론

2.1 바이모달트램의 전기적 구성

직렬 하이브리드 구동형 바이모달 트램은 400V ~ 500V의 교류 전압과 12V ~ 740V의 직류전압이 하나의 차량에 구축되어 용도에 맞도록 사용할 수 있게 전기적으로 구성되어 있다.



<그림 1> 직렬 하이브리드형 바이모달트램

<표 1> 전압종류 및 크기별 용도

전압종류	전압크기(V)	용도
교류전압	592	발전전압
	400	공기압축기/유압펌프/냉각팬 구동
직류전압	12	CNG 엔진 기동
	24	각종 ECU 및 차량내외부 등구류/출입문등 작동
	650	배터리 정격전압
	600 ~ 750	전동기구동을 위한 인버터 입력전압

2.2 바이모달 트램의 전기적 절연

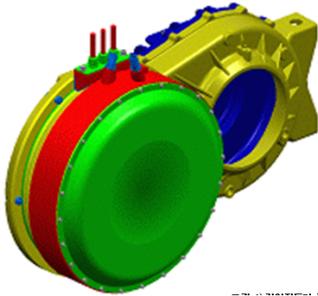
바이모달트램은 고분자복합소재차체를 사용하므로 차체는 차체 내부 강재 지지프레임이외에는 완벽한 전기절연체이다. 그러나 발전기, 전동기, 650V 배터리 및 관련된 케이블배선은 강재로 만들어진 구동프레임에 설치되어야 하므로 이 부분에 대한 각 기기들의 절연성능확보가 차량성능의 안정성을 확보하기 위해 매우 중요한 문제가 될 수 있다. 바이모달트램에서의 전기적 절연은 전기적 열화요인 뿐만이 아닌 환경·기계적인 열화요인들에 의한 복합적 열화환경에 놓여 있으므로 절연에 문제가 발생하는 경우 원인파악이 쉽지 않게 되어 동일한 문제가 반복적으로 발생할 수 있게 된다. 표 2는 바이모달트램에서 전기적 절연에 영향을 미칠 수 있는 대표적 열화요인을 보여주고 있다.

<표 2> 바이모달트램의 전기적 절연열화 요인

열화의 종류	열화요인
전기적 열화	전압
환경적 열화	온도, 배기가스
기계적 열화	진동

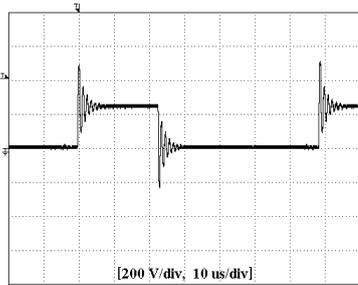
바이모달트램에서 표 2에서 보여준 열화요인을 근본적으로 제거하는 것은 거의 불가능하므로 이를 경감시키거나 절연상 문제가 발생하는 경우 더 큰 사고로 이어지지 않도록 사전에 절연문제

를 확인할 수 있는 방안을 마련하는 것이 중요할 것이다. 본 논문에서는 전동기와 관련된 절연문제를 살펴보고 이에 대한 대책을 우선적으로 살펴보고자 한다. 바이모달트랩에서 사용되는 전동기는 삼상 능형 유도전동기로서 감속기어와 같은 박스내에 설치되어 구동된다. 그림 2는 바이모달트랩용으로 개발된 전동기-기어박스의 외형을 나타낸다.



<그림 2> 바이모달트랩용 전동기-기어박스 외형

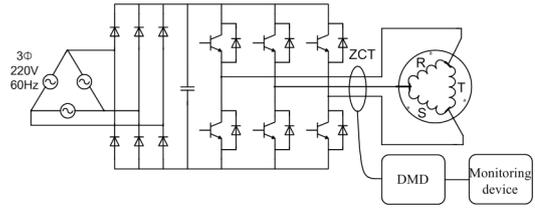
전동기는 인버터로부터 공급된 PWM 스위칭 전압에 의해 구동되므로 스위칭 펄스시 발생하는 과도임펄스전압(수 kV)에 지속적으로 노출되고 이러한 과도임펄스전압은 전동기 고정자의 전기적 절연열화요인으로서 작용하게 된다. 그림 3은 이러한 과도임펄스전압을 관찰하기 위하여 시험실에 구축된 일반 저압전동기(220V, 3P, 5hp)측에서 측정된 인버터 스위칭전압파형을 보여준다. 그림 3에서 보는 바와 같이 기존 인버터 스위칭전압에 과도임펄스전압이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.



<그림 3> 전동기측 인버터 스위칭전압파형

이와 같은 과도임펄스전압은 인버터와 전동기사이 케이블의 길이가 길어짐에 따라 크기가 증가하는 경향을 보여주며, 이 점이 전동기의 절연열화를 보다 악화시키는 요인이 될 수 있으므로 케이블의 길이는 가능한 짧게 연결되도록 설계되어질 필요가 있으며, 이에 대한 구체적 설계값은 향후 바이모달트랩용 전동기를 대상으로 실험한 결과로서 주어질 것이다. 전동기에 가해진 과도임펄스전압에 노출된 고정자권선간 및 고정자권선과 코어사이에는 큰 전계가 형성되어 전동기제작과정 또는 취급상 발생한 결함에 의한 절연파괴 또는 그 전구현상인 부분방전을 발생시키게 된다. 부분방전전류 또는 절연결함에 의한 누설전류는 국부적인 온도상승을 유발하며 고정자권선의 절연층을 파괴하여 실질적 전기적 단락을 일으키며 전동기의 정상적인 동작을 방해하고 이에 따른 전력손실과 차량운행의 정지를 초래하게 되므로 이러한 사고를 사전에 방지하기 위하여 위험수준의 방전 또는 누설전류를 모니터링하고 경고신호를 발생시킬 수 있는 장치가 필요하다. 본 논문에서는 차량주행 또는 정지 상태에서 연속적으로 방전전류 또는 누설전류를 측정할 수 있는 방법으로서 CT를 이용하는 방법을 제안한다. 그림 4는 CT를 이용한 측정방법에 대한 구성예를 보여준다. CT를 이용한 방법을 사용하기 위해서는 신호의 크기가 작고 임펄스적으로 발생하는 부분방전 및 누설전류를 효과적이고 경제적으로 측정하기 위한 적정 검출주파수대역의 신호와 노이즈의 영향으로부터 검출대상신호를 효과적으로 분리할 수 있는 신호처리기술의 개발이 선행되어야 할 것이다. 지금까지는 전기적 열화요인만을 살펴보았으나 도로를 주행하는 차량의 특성상 기계적인 진동은 당연히 발생하므로 이러한 기계적 열화요인이 전동기의 전기적 절연에 미치는 영향도 검토할 가치가 있을 것으로 보인다. 논문에서 검토된 전동기이외에 차량에는 발전기와 상용주파수로 구동되는 유도전동기 및 전력케이블류에 대한 전기적 절연능성에 대한 검토가 아울러 요구될 것으로 보이며, 이에 대한 연구는 차량의 복합적 열화요인을 고려하여 다

양하게 추진되어질 필요가 있다.



<그림 4> CT를 이용한 방전 및 누설전류 측정

2.3 바이모달트랩의 접지

현재까지 차량내 접지에 대해 적절히 연구되어져 발표된 사례는 매우 드물어 본 논문에서 서술되는 바이모달트랩에 대한 접지부분은 좀더 실험적으로 검증되고 논의가 되어야 할 것으로 판단되나 기존 고정된 시설물들에 적용된 상황들을 바탕으로 기술하고자 한다. 바이모달트랩에 적용이 가능한 전기적 접지는 일반적으로 전력용 접지, 기능성접지, 피뢰용 접지등으로 나누어 볼 수 있다. 도전성 강판을 채용한 차체로 적용한 일반 자동차 및 철도차량과는 달리 절연물인 고분자복합소재차체를 적용한 바이모달트랩의 특성상 차체접지는 불가능하고 별도의 접지계통을 구성하여야 한다. 사실상 바이모달트랩내 구성되는 접지계통은 각 장치들에 대해 차량외부 또는 내부에서 발생하는 전위상승을 최소로 억제하기 위한 등전위를 이루고 EMC(electromagnetic compatibility)를 위해 요구되는 기준에 부응하기 위한 접지로서 차량내 전기장치류 및 각종 ECU들의 외함에 각각 분당되어 서로 연결되는 구조를 이루고 있으며, 접지의 종류 중 기능성 접지로 분류할 수 있다. 바이모달트랩에서 구성할 수 있는 접지의 형태는 성형구조와 환형구조 및 메시형구조가 가능하며, 그중 바이모달트랩에 적합한 구조는 환형구조라 판단되며, 이 구조는 각 장치까지의 접지선길이를 최소화할 수 있고 외부 또는 내부에서 발생하는 유도전압 및 전류를 반사에 의한 중첩효과가 없이 소멸하게 하여 유도장해의 영향을 가능한 줄일 수 있는 방법이다. 접지계통은 추진전력시스템과 철저히 절연되어야 하며 절연이 손상되어 추진전력계통이 접지에 단락되는 경우 저전압을 사용하는 각종 ECU 또는 기기들의 손상과 운전자 또는 승객들의 안전 및 불쾌감의 발생을 방지하기 위하여 가능한 빠른 시간안에 전원(엔진, 발전기 및 배터리)을 차단시킬 수 있도록 추진전력시스템과 접지사이의 단락검출장치(earth leak detector)가 설치되어야 한다. 단락검출장치는 일반적으로 직류계통과 접지사이에는 PT를 사용하고 교류계통과 접지사이에는, CT와 decoupling 커패시터를 사용하여 구성할 수 있다. 다음으로 기능성접지이외에 차량에 필요한 것은 뇌격에 따른 보호 또는 방출을 위한 효과적 접지시스템의 구성이다. 현재까지는 비행기분야에서 진행된 뇌격연구이외에 고분자복합소재차체를 가진 차량에서의 뇌격에 따른 영향을 평가한 연구는 찾아보기 힘든 형편이다. 그러나 바이모달트랩에 있어 뇌격에 따른 영향의 평가 및 이에 대한 대책방안 마련을 위한 연구는 차량에 탑재된 CNG 탱크의 안전성 및 차체 뇌격에 따른 차체 및 기기손상의 최소화를 위해 반드시 필요하다고 본다. 뇌임펄스 전압이 가해진 경우, 고분자복합소재 반대쪽 표면에는 높은 전위가 발생하게 된다. 그러므로 고분자복합소재 차체가 비록 절연물이나 차체에 낙뢰가 가해지는 경우, 매우 위험한 상황이 발생할 수 있다.

3. 결 론

고분자 복합소재를 차체에 적용한 바이모달트랩은 크기와 종류가 다른 전압이 전원으로서 함께 사용되므로 이에 대한 적절한 보호조치가 차량의 안전과 신뢰성을 확보하기 위해 요구되며, 전기적 절연과 접지는 이러한 요구를 만족시키기 위하여 설계에 반영하여야 할 필수고려항목이다. 전기적 절연의 경우는 고압기기를 사용하는 철도차량등에서 많은 연구가 진행되어 왔고 접지의 경우도 빌딩등의 시설물등에 많이 적용되어 연구되어 왔으나 고분자 복합소재차체를 적용한 바이모달트랩과 같은 대상에 대해서는 복합전원계통에 대한 전기적 절연 및 접지관련 연구는 매우 드물어 소재의 경량화 및 친환경적 대중교통수단이 요구되는 현실에서 향후 이 분야들에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 보여 진다.