

# 전기철도 견인전동기 온라인 진단기술

박현준 수석연구원 (한국철도기술연구원 차세대전동차연구단TFT)

## 1. 서론

현재 전기철도는 경부 1단계 및 2단계 고속철도 건설이후로 호남고속철도 등 지속적으로 건설되고 열차운행체계가 디젤열차에서 전기차로 변환됨에 따라 지하철 및 전기철도의 운행 중 돌발 사고를 예방하기위한 핵심 전기 장치의 운전 중 열화 진단 시스템 개발, 전철·전력계통 보호기술 확립, 전철·전력 설비 유지보수의 간소화 및 신뢰성 향상이 요구되고 있다 [1]. 현재 전기철도의 차량진단 기술은 정해진 기간에 따라 유지보수를 수행하고 있으며 정지 중 진단 방법을 사용해 왔으나 운행 중 절연파괴 및 절연열화와 같은 진단은 이루어지지 않고 있다. 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 고속주행 및 진동 등 열악한 운전환경을 갖고 있기 때문에 예상치 못한 고장을 발생시킬 수 있다 [2]. 견인전동기는 소선절연재료의 손상에 의해 소선단락이 발생함에 따라 최종적으로 절연파괴가 일어난다. 견인전동기 고정자 권선의 주절연재료로 캡톤테이프 (Kapton tape)를 사용하고 있으며, 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 응력 (Stress) 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더

불어 균열 (Crack)을 발생시키고 열분해는 에폭시의 분해에 의한 가스압력이 증가하여 접촉강도를 저하시켜 계면에서 박리를 발생시킨다. 외부환경에 의한 열화는 먼지, 오일 및 습분의 유입으로 인해 고정자 권선 표면에서 오손이 발생한다. 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 상태를 분석하기 위해서는 도체표면과 주절연재료 내부에서 공극, 반도체층 손상 및 소선단락 등과 같은 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선과 정상적인 권선을 제작하여 정상상태를 포함하는 5가지 종류의 권선을 견인전동기 고정자에 설치하고 절연 진단을 수행하여 절연열화 상태 분석이 필요하다. 또한, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 종합적으로 판정하고 운전 중인 견인전동기 고정자 권선의 결함요소별로 부분방전 패턴과 크기를 효과적으로 분석하여 사전에 결함 감지를 위한 최적 감시기법을 개발이 시급하다. 전동차 열화진단은 일본의 경우 지하철 시스템에 열화진단 시스템을 미국 시스템을 적용하여 활용하고 있으며 캐나다, 미국의 경우 회전기의 온라인 진단 알고리즘을 각 기기별로 분석하여 데이터를 축적하고 있다. 또한, 운전 중 부분방전 진단장치인 PDA (Partial discharge analyzer)를 이용 고압용량은 수행하고 있으나 견인전동기와 같은 진단장치는 현재 연구 진행 중에 있다.



## 2. 견인전동기 운전 중 부분방전 시험

운전 중 부분방전 시험은 정지 중 시험에 비해 대부분 고정자 권선이 선간전압에서 운전되지 않기 때문에 부분방전 활동이 현저하게 감소한다. 또한, 고정자 권선에서 발생된 부분방전은 전원 시스템으로부터 전기적인 간섭이 중첩된다.

견인전동기 고정자 권선에서 고압이 인가되는 첫 번째 권선은 상당히 큰 부분방전이 발생한다. 운전 중인 견인전동기 고정자 권선에서 부분방전 측정을 위해 바람직한 대역폭을 선택해야 한다. 만약에 부분방전 센서가 상 끝에 위치하면, 단지 그 권선에서 높은 부분방전 활동을 관측할 수 있다. 그러므로 부분방전이 저주파수 혹은 고주파수에서 감지되면, 고주파수에서 펄스 감쇠가 상대적으로 낮아진다. 왜냐하면 가장 활동적인 부분방전 발생영역은 방전 센서에 밀접한 곳이기 때문이다.

전기적인 간섭은 측정 대역폭에 영향을 줄 수 있는 요소이며, 전기적 노이즈는 운전 중인 견인전동기와 발전기에서 부분방전 신호보다 1,000배 (60 dB) 만큼 크다. 특히, 고정자 권선은 고압 수소 가스에 의해 냉각된다. 간섭은 고압 버스, 변압기 부싱, 슬립링으로부터 스파크, 전기집진기, 전원장치의 운전, 전력선 캐리어 통신, 라디오 스테이션 및 스위치 모드 컴퓨터 전원장치에서 무해한 코로나가 유발된다. 이런 노이즈는 1 MHz 이상의 주파수에서 특히 강하게 영향을 미친다. UWB (Ultra-wide band)가 100 MHz 이상인 부분방전 측정기는 스위치 기어와 견인전동기에서 운전 중 부분방전 감지를 위해 많이 사용된다. 따라서 전기적 잡음, 감쇠 및 대역폭 등이 측정 문제로 나타나기 때문에 고정자 권선에서 좋은 부분방전 데이터를 얻기가 어렵다. 이와 같은 문제로 인해 실제 견

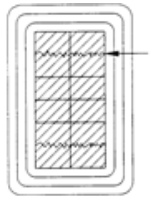
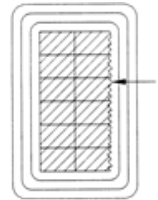
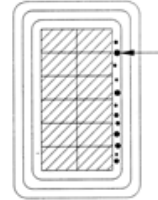
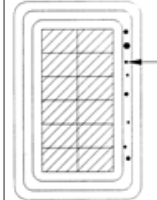
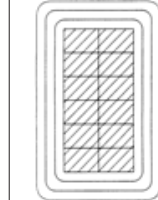
인전동기 상태를 반영하지 못할 경우에 측정의 오차를 발생시킬 수 있다.

### 2.1 견인전동기 열화 분석

주파수를 변동하여 속도를 조정하는 견인전동기의 절연파괴 메커니즘은 단독적인 열화뿐만 아니라 전기적, 열적, 기계적 및 화학적인 복합작용에 의한 열화로 인해 발생한다. 또한, 견인전동기 속도 조정이 IGBT (Insulated gate bipolar transistor) 컨버터를 주로 사용함에 따라 빠른 스위칭 속도로 인해 절연재료에 스트레스가 가중된다. 주파수를 변동하여 속도를 조정하는 견인전동기의 절연시스템은 이러한 스트레스를 가혹하게 받음에 따라 수명이 현저하게 감소한다. 인버터 (Inverter) 전원의 전압 변동은 견인전동기의 열적, 전기적 및 기계적 열화를 가속하여 절연성능을 감소시킨다. 그러므로 더 높은 온도에 대한 지속적인 내구력은 정상적인 전동기 보다 더 고려되어야 한다. 합법적인 운전범위에서 좀 더 정상적으로 기계적 및 전기적 특성을 공급하면, 짧은 시간의 과열부하에도 견딜 수 있다.

대용량 교류전동기에서 많은 절연재료의 고장은 높은 내부적 턴 전압 응력에 의해 야기되는 내부 턴 절연재료의 파괴로 기인하며, 그런 심한 응력은 고정자 권선에서 빠른 선행적 스위칭 서지의 적용 때문에 발생한다. 내부 턴 절연재료 등급은 일반적으로 이전의 운전 경험에 의존한다. 좀 더 합리적인 접근을 위해 인버터를 사용하는 전동기의 내부 턴 절연재료는 운전 중에 견딜 수 있는 응력에 관한 정보가 필요하다. 교류전동기는 내부 턴의 급격한 선행적 과전압에 견딜 수 있도록 설계하며, 서지 증가 시간과 형상, 코일 절연재료 치수, 코일 크기 및 형상에 의해 전압분포가 결정된다. 급격한 선행 서지로 인해 손실이 없는 코일에서 전압분포를 예측할 수 있는 일반적인 해석도 가능하다. 급격한 선행적 과도상태로 인해 매우 심

표 1. 견인전동기 고정자 권선의 결함 종류 [7,8].

권선 형태					
권선 결함	소선단락	도체표면에서 공극	주절연재료 내부에서 공극	반도전층이 제거된 권선	정상권선

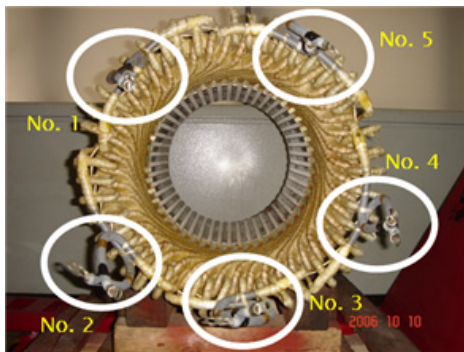


그림 1. 권선 결함에 따른 견인전동기 고정자 권선 사진 [7,8].

한 내부 턴 전압은 코일에서 발생한다. 게다가 고정자 권선에서 과도한 전압분포에 관한 코일과 서지 상수의 영향도 역시 연구되었다. 고정자 권선은 송전선과 같은 특성을 갖고 있으며, 급격한 선행적 파형은 송전선을 따라 전송되는 파형과 유사하게 권선 내부를 이동한다. 대용량 교류전동기의 단말권선에 대한 다 도체 송전선 모델의 분포 상수는 손실을 고려하여 평가하고 좀 더 상세하게 코일 환경을 나타낸다. 특히, 운전 중 발생할 수 있는 견인전동기의 열화 분석은 열적열화 (Thermal Aging), 기계적 열화 (Mechanical Aging), 전기적 열화 (Electrical Aging)를 중심으로 분석하였으며 요약하면, 전압변동은 열적, 기계적, 전기적 및 전동기 절연재료의 화학적 열화까지도 가속시켜 최종적으로 절연파괴를 야기하여 전압변동 감소는 운전 조건을 향상시키는 주요한 요소가 된다 [6].

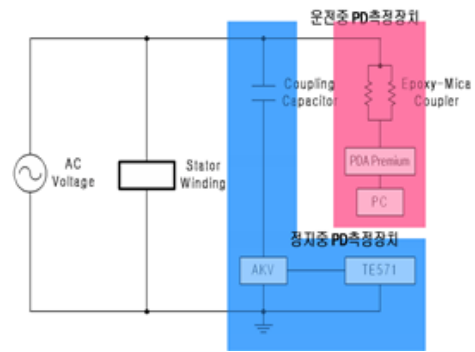


그림 2. 견인전동기 부분방전 시험 회로도 [7,8].

그림 2는 견인전동기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나타내었다. 견인전동기 고정자 권선에 웨빙브리지 (Tettex Instruments)를 연결하여 교류 전압을 인가하며, 커플링 커패시터 (Tettex Instruments, 4,000 pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛 (Coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기를 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400 kHz이다.

## 2.2 견인전동기 고정자 권선의 시험 및 분석

정상 운전 중에 견인전동기 고정자 권선에서 턴 사이의 절연재료는 상대적으로 낮은 전기적 스트레스를 받는다. 그러나 스위칭 운전과 같은 비정상적인 조건에서 턴 절연재료는 매우 높은 전기적 스트레스를 받을 수



있다. 만약에 턴 절연재료가 약하면 그런 조건에서 절연파괴가 발생할 수 있다. 견인전동기에서 많이 발생하는 주절연재료 파괴는 턴 절연재료 파괴로부터 시작되는 것으로 알려져 있다. 절연내력 시험은 주절연재료의 견전성 여부를 판정하는데 사용되고 서지는 견인전동기 고정자 권선에서 턴 절연재료의 단락상태를 시험한다. 한 개의 서지 발생기 혹은 반복적인 서지 발생기로부터 0.1~0.2  $\mu\text{s}$ 의 상승시간을 갖는 서지가 턴 절연재료를 시험하기 위해서 사용된다.

견인전동기의 갑작스런 고장은 고정자 권선에서 절연재료의 사전 파괴에 의해 발생한다. 주절연재료에 인가되는 전압은 견인전동기의 상 전압 만큼 높다. 정상적인 운전 동안에 상대적으로 얇은 턴 사이의 절연재료에 인가되는 전압은 낮으며 (전형적으로 10~100 V), 가파른 선행전압이 턴 절연재료를 파괴하여 결과적으로 주절연재료의 파괴를 유도한다. 서지 시험은 턴 절연에 순간적으로 전압을 인가하여 절연상태가 불량할 경우에 절연이 파괴된다. 그러므로 서지 시험은 진단시험이라기 보다는 턴 절연에 대한 내전압 시험이다.

서지시험에서 시험 코일 혹은 권선에 공급되는 서지 전압 파형은 턴 절연재료의 견전성 혹은 파괴를 감지하는 도구로서 사용된다. 턴 절연재료의 파괴는 견전한 턴 절연재료와 비교할 때 서지 VWF (Voltage waveform)의 변화에 의해 감지된다. 한 개의 코일에 대한 서지시험에서 턴 절연재료의 파괴를 감지하는 것은 쉽다. 왜냐하면 측정된 서지 VWF에서 큰 변화가 발생하기 때문이다. 그러나 견전한 권선에 대한 서지시험 동안에 턴절연재료의 파괴는 측정된 서지 VWF에서 작은 변화가 발생하기 때문에 감지하기가 어렵다.

턴 사이가 단락이 되지 않았다면 임피던스는 같고 두 파형도 동일하게 나타난다. 만약, 두 파형을 비교하여 차이가 있게 된다면 두

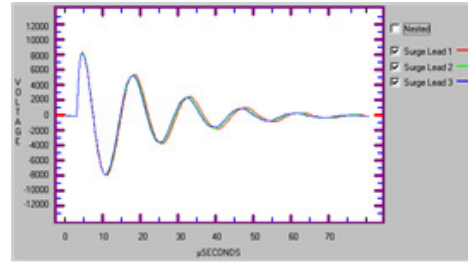


그림 3. 견전한 권선의 서지시험.

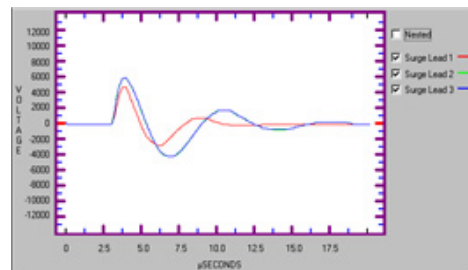


그림 4. 단락된 권선의 서지시험.

권선 중 하나는 단락이 되었음을 나타냄으로 두 파형의 크기와 특성을 비교함으로써 단락상태를 발견할 수 있다. 예를 들면 Y,  $\Delta$  권선인 경우  $L_1$ ,  $L_2$ 에서 발생하는 파형이 중첩되면 턴 사이에 단락이 없는 것으로 판단하고, 두 파형의 폭과 진동 주파수가 다르면 턴간 단락이 발생된 것으로 판단한다. 상용화된 서지 시험 장치에서는 중첩된 파형을 비교 분석함으로써 단락상태를 판별할 수 있다. 그림 3은 소선이 견전한 상태이며, 그림 4는 소선이 단락된 상태를 나타내고 있다.

### 3. 결론

본고에서는 열차 운행 중 돌발 사고를 예방하기 위한 신뢰성 있는 진단기법 개발과 철도 전기기기 및 전철분야 열화진단 시스템 개발을 위하여 부분방전을 이용한 온라인 열화진단 기술을 나타냈다. 견인전동기 운전 중 진단시스템과 프로그램을 이용한 열화상

태 진단은 1,000 pF의 민감한 센서에서 2.3 kV 이상의 전압에서 나타남을 알 수 있었으며 상업화를 위한 1,000 pF 이상의 센서의 민감도와 그에 따른 하드웨어로 부분방전의 패턴을 더욱 증가 시킬 필요가 있겠다. 서지 시험 결과 중첩된 파형을 비교 분석함으로써 견인전동기 고정자 권선 소선단락의 소선단락 상태를 명확하게 판별할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] 한봉석, "한국전기철도의 현황과 발전전략" 철도웹진, Vol. 56, 2005.
- [2] 김희동, "고압전동기 고정자 권선의 절연열화 분석", 한국전기전자재료학회 2006년 하계학술대회 논문집, 2006.
- [3] M. Katz and R. J. Theis, "New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments", IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997.
- [4] 김희동, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, 1999.
- [5] P. Walker and J. N. Champion, "Experience with Turn Insulation Failures in Large 13.2kV Synchronous Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, 반도체층이 제거된 권선, 1991.
- [6] 철도시스템 Smart기술 연구, (철도분야주요 장치 고장진단 감시기술연구), 한국철도기술연구원, 2005.
- [7] "견인 전동기 운전 중 부분방전 분석지원 및 알고리즘 개발", 한국전력공사 전력연구원 결과보고서, 2005.
- [8] 고병훈, "고압전동기 온라인 진단을 위한 고정자권선의 부분방전 특성", 과학기술연합대학원 대학교 미래첨단교통시스템공학과 고병훈 석사학위논문, 2008.
- [9] 추진제어장치 연구개발 결과보고서 (분야 : 전동차 AC 견인전동기 표준설계), 건설교통부, 1999.
- [10] V. Warren, G. C. Stone and M. Fenger, "Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2000.

- [11] 신석균, "철도시스템 RCM 적용을 위한 신뢰성 및 안전성 분석 활동에 관한연구", 한국철도학회논문집, 2006.
- [12] 전기시설물 점검주기 및 개량주기에 관한 연구용역, 한국철도공사, 2006.

### 저자약력



성명 : 박헌준

◆ 학력

- 1981년  
홍익대학교 공과대학  
전기공학과 공학사
- 1983년  
홍익대학교 대학원  
전기공학과 공학석사
- 2003년  
홍익대학교 대학원  
전기정보제어공학과 공학박사

◆ 경력

• 1997년 - 현재

한국철도기술연구원  
차세대전동차연구단TFT  
수석연구원

