

도시철도차량 교직 사구간 MCB 투입 현상 분석

백광선*, 김명룡, 김진환
한국철도기술연구원

Study of MCB Operation of Urban train in AC/DC Dead-section

Baik kwangsun*, Kim Myungyoung, Kim Jinwhan
KRRI

Abstract - 도시철도차량의 AC/DC 절연구간 통과 방법에 대한 사례를 조사하고 과천선 전동차의 절연구간 구간 통과시 관련 장치의 동작시간을 분석하며 MCB(Main Curcuit Breaker)가 동작할 수 있도록 할 수 있는 다양한 원인에 대한 검토와 측정 결과를 통하여 정확한 원인을 분석한다.

1. 서 론

1970년대 이후 설치되고 있는 수도권 전동차는 단 시간에 대량 수송 기능으로 늘어나는 수송량에 적절히 대응하는 최적의 방법으로써 그 역할을 담당해 오고 있으며 점진적으로 그 기능과 역할이 확대되고 있는 실정이다. 수도권의 전기철도는 일반적으로 정시성, 안전성, 신속성이 보장되어야 하는 것이 기본적인 사명으로 여러 전동차가 한정된 인프라를 이용하는 까닭에 1회의 사고는 관련된 열차에 영향을 주고 그 파급되는 영향은 예측할 수 없을 정도로 크다. 따라서 시설물은 물론 전동차에 결함이 없어야 하고 운전자 개개인 모두 부주의에 의한 사고가 발생하지 않도록 주의해야 한다. 최근 발생된 대구 지하철 화재사고로 범 국가적으로 차량의 운행에 대한 안전이 부각되고 있는 상황에서 절연구간 내에서 MCB가 투입되는 현상의 발생은 수도권 전동차를 이용하고 있는 시민들을 불안하게 할 수 있으며, 시설물과 차량의 손상이 예상되는 등의 문제가 되고 있다. 안전에 영향을 주는 사고 원인은 여러 가지가 존재할 수 있으나 그중 교·직 절연구간은 두 가지 형태의 전원을 분리하는 부분이므로 철도차량이 절연구간을 통과하는데 있어 다른 절연구간을 통과하는 것에 비하여 기기의 동작에 많은 요인들이 관련되고 동작자체도 복잡해진다. 따라서 다른 구간에 비해서 발생이 가능한 MCB 투입현상에 대하여 검토하도록 한다. 특히 과천선의 남태령과 선바위간에 있는 지하 교·직 절연구간 내에서 전동차 주회로 차단기(MCB) 순차투입 장애는 사고발생시 역간 중간에 있는 관제로 대피 등에 문제가 발생할 수 있으므로 본 논문에서는 교·직 절연구간에서의 전동차 통과방식을 검토하고 과거 발생되었던 현상을 근거로 차단기 순차투입에 장애를 발생시키는 원인을 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 사례 검토

2.1.1 프랑스

절연구간은 공기절연 방식이며, 정차 역 직전에 위치하고 있다. 절연구간 통과를 위하여 운전자는 기계적으로 MCB를 차단시키며 운전중 팬터그래프를 하강시킨다. 절연구간 통과직후 가압구간에 위치한 정차 역에서 운전자는 교대되고 바뀐 운전자는 팬터그래프를 상승시킴에 따라 전동차는 전압을 공급받게 되고 전동차는 기동을 시작한다. 따라서 절연구간 통과 중 팬터그래프는 강하된 상태에 있게 되므로 집전장치간의 거리나 구조와는 상관없이 이상전압의 유입은 없으며 이에 따라 과천

선에서 발생할 수 있는 MCB 순차투입 불능 현상은 일어나지 않는다.

2.1.2 일본

MCB 절환 방식은 우리의 방식과 유사한 방식으로, MCB 투입은 자동으로 진행된다. 과천선의 경우와 차이가 발생하는 점으로는 팬터그래프가 부착된 차량을 연속하여 연결하는 경우는 직류급전방식의 경우에만 제한되어 있다는 것이다. 이 경우를 제외하고는 Single 팬터그래프를 채용하거나 Double 팬터그래프 채용시에는 차량간 팬터그래프의 이격거리를 1차량 간격 이상으로 유지하도록 차량을 배치함으로 집전장치간의 거리를 확보하고 있으므로 과천선을 통과하고 있는 서울지하철공사 전동차의 구조와는 집전을 위한 차량구성이 다르다.

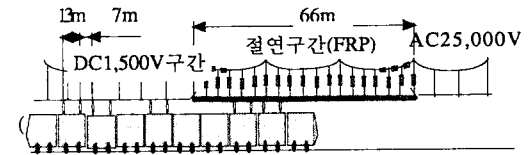
2.1.3 1호선(서울역-남영간)

운전방식은 과천선과 같으나 차이점으로는 차량의 집전 장치로 Single 팬터그래프를 채용하고 있고 팬터그래프의 간격이 3 차량 간격이 유지되어 하나의 팬터그래프가 가압구간에 진입했을 때에도 다른 팬터그래프는 멀리 떨어진 절연구간 전의 절연구간에 있게 된다는 점이다. 또한 절연구간의 중간에 접지구간(FRP - 접지 - FRP)을 두었고 강체가 아닌 카터너리스 가선을 채용하고 있으며 가압선과 절연체가 금구에 의해 직접 연결되어 있는 점과 절연구간이 지상에 있다는 점이 과천선과는 다르다

2.2 과천선 전동차 교·직 절연구간 검토

2.2.1 교·직 절연구간

국내에는 많은 절연구간이 있으며 교·직 절연구간으로는 1호선의 서울역-남영간과 지하청량리역-청량리역간 그리고 과천선의 남태령역-선바위역간에 있다. 여기에서 문제가 되고 있는 과천선 교·직 절연구간의 구성은 다음과 같다.

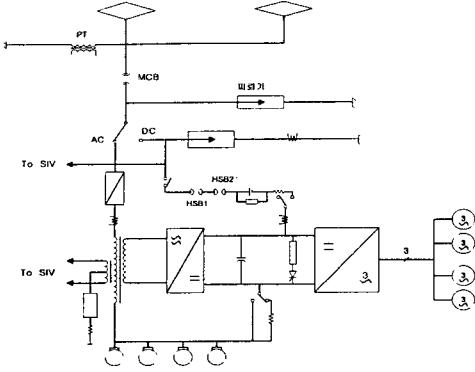


(그림 1) 과천선 전동차의 절연구간 통과 예

2.1.2 절연구간 운행

2.1.2.1. 운전자 조작 순서

- 열차가 절연구간 90M전에 설치된 ATS 지상자를 통과시 ATS 차상자가 무가압구간 진입 인지용 신호를 수신하여 부저로 경보.
- 기관사가 주간제어기와 AC/DC 절환 스위치(ADS)를 순차적으로 조작하여 MCB를 차단.
- 전동차는 타행상태로 절연구간에 진입, 통과
- 상기 조작 누락시는 모진으로 보호회로가 동작.
- 그때의 전동차 회로 구성은 다음과 같다.



(그림 2) 과천선 전동차 회로 구성도

이때 운전자 조작에 의한 회로의 동작순서는 다음과 같다.

2.1.2 절환 및 계전기 동작 순서

2.1.2.1. AC → DC 구간 절환 순서

- (1) 주간제어기를 OFF함으로써 전동차는 타행운전 상태로 전환 → CONVERTER 입력측 차단기 K1이 개방되고 주변환장치에서는 GATE 차단.
- (2) ADS의 조작(AC로 되어있던 스위치를 DC쪽으로 절환) → MCBR1, MCBR2 소자, MCB-T 여자 → MCB 개방(전면성 MCB 차단됨) → 교직절환기(ADCg)와 교직전환기(ADCm)이 DC로 전환(무가압 상태) → ACVR(교류전압 계전기)과 ACVRTR(교류전압 시한 계전기, 1.5초후)이 석방 → DCVR 동작(직류를 수신받은 전동차부터 DCVR, DCVRTR 여자) → MCBR1 여자, MCB-C 여자 및 MCB 투입
- (3) 절연구간을 지나 역행표를 통과한 후 주간제어기를 ON 하여 역행운전.

2.1.2.2 DC → AC 구간 절환 순서

- (1) 주간제어기를 OFF함으로써 전동차는 타행운전 상태로 전환 → 고속차단기인 HB1, HB2가 개방되고 주변환장치에서는 GATE 차단.
- (2) ADS의 조작(DC로 되어있던 스위치를 AC쪽으로 절환)에 의하여 ADCg 및 ADCm이 DC쪽으로 절환. → MCBR1, MCBR2 소자 → 보조기기용 계전기(AMAR) 소자, #51선 OFF → IVK(SIV 접촉기) 개방, IVKR(SIV 접촉기계전기)소자 → MCB-T 여자 → 전면성 MCB 차단 → 교직절환기(ADCg)와 교직전환기(ADCm)이 AC로 전환(무가압상태) → DCVR과 DCVRTR이 석방 → ACVR동작(교류를 수신받은 차부터 ACVR, ACVRTR 여자) → MCBR1 여자, MCB-C 여자 및 MCB 투입
- (3) 절연구간을 지나고 나서 역행표를 통과 후 주간제어기를 ON으로 하여 역행운전을 한다. 이와 같은 방법으로 절연구간 운전시 기관사의 미숙이나 실수 또는 다른 요인으로 모진이 발생하여 AC→DC 진입시 AC FUSE 단락으로 인하여 DC구간에서만 운전 가능하게 된다든지, DC → AC 진입시 피뢰기 파손, 모진 빈도가 높을 경우, 애자의 절연능력 약화 및 파손, 판트의 이상 마모 및 수명저하, 조가선 단선, 전차선의 이상 마모에 의한 관련 부분 열화 발생이 있을 수 있다.

이런 문제점들을 제거하기 위하여 모진에 대한 대책을 세워야 하는데 차량 기기의 동작속도와 주행거리를 고려한 절연구간 최소화거리 및 진입속도가 결정되어야 한다.

2.3 MCB 순차투입 불능 현상 원인 분석

2.3.1 이상 전압 유입 가능성 검토

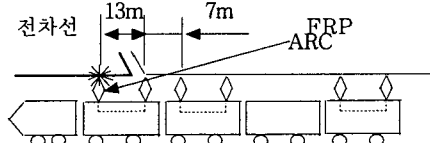
2.3.1.1. ARC

가. 절연구간 통과시

- (1) 원인 : 전동차가 절연구간 통과 후 전차선으로 진입시 두 SECTION의 수평 및 높이 차에 의하여 또는 진행시 이상 Rail 조건에 의하여 팬터그래프가 진동하고 ARC를 발생.

이때 ARC의 유입경로는 다음과 같이 검토할 수 있다.

- Case 1 : 1번차 2번 팬터그래프 → FRP → 2번차 1번 팬터그래프
- Case 2 : 1번차 2번 팬터그래프 → FRP → 행거 → 조가선 → 행거 → 2번차 1번 팬터그래프
- Case 3 : 1번차 2번 팬터그래프 → 공기 → 2번차 1번 팬터그래프



(그림 3) 절연구간 → 가압구간 진입시의 ARC 발생 예상 구성도

(2) 검토결과

- Case 1 : 빈번한 전동차의 운행으로 FRP는 오염이 된다. 이런 상태에서 2번 전동차의 1번 팬터그래프에는 오염된 FRP를 통하여 ARC 전압이 유입되고 이 유입ARC 전압의 크기가 관련 계전기를 동작시킬 만큼 충분한 시간 폭과 크기를 갖는다면 MCB가 투입 될 수 있다.
- Case 2 : 지하공간의 공기가 오염되어있는 것은 사실이나 오염물질이 이런 경로를 형성할 정도로 심각할 것으로는 판단되지 않는다. 만약 이런 일이 발생한다면 전류가 흐르는 애자는 영구적인 손상을 받게되고 대형 사고를 발생할 수 있을 뿐 아니라 절연구간내 특정위치에서 계속 발생해야 한다. 그러나 측정결과에 의하면 MCB 투입 위치가 계속 바뀌었고 일상 및 정기 보수 및 세척을 하고 있으므로 ARC의 경로는 될 수 없다.
- Case 3 : ARC는 공기 중으로 전이되는 성질을 갖지 않는다. 또한 ARC 발생 전압이 공기를 통하여 영향을 미치기 위해서는 7m가 넘는 거리에 영향을 주어야 하나 그렇게 되려면,

$7(m) \times 21(KV/cm) \times 100(cm/m) = 14,700KV$ 가 필요하게 되는데 주변의 공기가 오염이 되어도 이는 있을 수 없다. 현재 절연구간 구성으로 보았을 때 전차선과 FRP는 금구에 의하여 연결되어 있으며 전차선의 바닥과 FRP의 바닥이 수평을 이루고 있고 RAIL로부터 높이가 같도록 설치되어 있다. 따라서 전동차가 절연구간에서 가압구간으로 진입시 팬터그래프의 진동은 무시할 수 있는 것으로 판단되므로 진입시의 진동으로 ARC가 발생할 가능성은 없다고 판단된다.

나. 절연구간 진입시

- (1) 원인 : 전동차에 흐르던 전류가 전동차의 절연구간 진입시 전류의 계속 흐르려고 하는 특성에 의한 순시 전압이 전차선과 팬터그래프 사이에 유기.
- (2) 검토결과 : 전동차는 모진에 의해 절연구간에 진입하지 않는 경우, 이미 무부하 상태에 있게 된다. 따라서 전류가 흐르지 않음으로 ARC는 발생하지 않으며 절연구간내에서 MCB가 조기 투입 후 소거되는 일은 발생하지 않는다.

2.3.1.2. 잔류 전차장

- 가. 원인 : 전동차가 절연구간 통과 후 전차선으로 진입시 팬터그래프는 전압을 받아 전동차는 가압상태에 있게 된다. 빠른 속도로 진입시 전차선, 1번 팬터그래프 그리고 전동차에 의하여 구성된 폐회로에 전류가 흐르고 주변에는 자장이 형성되어 전동차에는 전압이 유기되고 MCB가 조기 투입.

나. 검토결과 : 전동차가 진행시 흐르는 전류에 의하여 발생된 자장은 자로를 형성하는 매질이 공기가 자기

저항이 크고, 잔류 전자기장이 극히 작은 성질을 갖는 관계로 후속 팬터그래프에 영향을 주지 않고 신속히 사라진다. 따라서 MCB의 투입은 발생할 수 없다.

2.3.1.3. 정전유도

가. 원인 : 첫 번째 열차의 첫 번째 팬터그래프가 가압구간에 진입 후 2번 팬터그래프는 등전위에 있게 되고, 오염된 FRP 상의 어느 지점에는 전하가 생기며 이때의 전압이 다음 전동차의 팬터그래프에 영향.

나. 검토결과 : FRP와 대지간의 충전용량이 작아 급속히 전압이 없어진다.

2.3.1.4. 정전하 유도

가. 원인 : 전동차의 팬터그래프가 FRP위를 통과할 때 두 물체간의 마찰에 의하여 FRP에는 정전하가 유도 되고 이때 발생된 정전하에 의하여 발생된 전압은 뒷 열차의 팬터그래프에 영향을 주게 되고 MCB 동작.

나. 검토결과 : 두 물체의 마찰에 의하여 발생된 정전하에 의한 유도 전압은 크지만 정전용량이 작아 지속 시간이 아주 짧다.

또 이것이 사실이라면 첫 번째 열차의 첫 번째 팬터그래프가 통과 후 두 번째 팬터그래프에 전압이 유지되야 하지만 그렇지 는 않고 있다.

2.3.1.5. 절연저항의 악화

가. 원인 : 전동차가 절연구간 통과시 팬터그래프의 구성물이 동과 흑연의 혼합물이므로 FRP에 많은 동과 흑연가루를 묻히게 된다. 또한 발생한 분진이 공기 중을 떠돌다가 행거, 조가선, 애자에 묻게된다. 이 분진들이 많이 절연물에 묻게 됨에 따라 절연저항은 악화되고 전압이 절연물의 어느 지점까지 인가.

나. 결과검토 : 전동차의 팬터그래프에 있는 습판체는 동과 탄소의 혼합물로 이것과 접촉하는 물질인 FRP가 어느 정도의 강성을 갖는 관계로 두물체의 마찰에 의하여 동과 탄소가루가 발생하여 FRP의 표면에 부착되고 이것은 FRP의 절연내력을 떨어뜨린다. 가압선과 절연체(IFRP) 사이에 AIR SECTION이 설치되어 있어 Single 팬터그래프 차량의 경우, 전압 유입이 차단되게 되지만, Double 팬터그래프 차량의 경우, 그림 3와 같은 열차 위치에서 1번 팬터그래프와 2번 팬터그래프가 직결되어 있으므로 가압구간의 전압이 2번 팬터그래프를 경유하여 절연저항이 떨어진 FRP 표면을 타고 후위차량의 팬터그래프에 유입될 수 있다. 이때 판토그래프가 많이 설치되는 경우, 후위 차량의 전두부에도 팬터그래프가 설치되어 있어 집전장치간 이격거리가 짧을 경우 전압이 유입될 확률이 더욱 높아진다.

2.3.1.6. Switching Surge 증폭의 영향

가. 원인 : 1호 전동차의 1번 팬터그래프가 가압구간에 진입할 때 MCB는 투입되고 Switching Surge 발생.

나. 결과검토 : 이 Surge는 크기는 크지만 지속시간이 200~300usec내에 들어옴으로 이 자체만으로는 후속 전동차에 영향을 주지는 않는다. 단 2개의 매질의 저항차이가 큰 경우 즉 FRP로 입력된 Surge가 절연저항이 감소된 FRP를 타고 2호 전동차로 진행을 하다가 절연이 완벽하게 된 부분을 만났을 때 미소량만 계속 진행을 하고 대부분은 약 2배의 크기가 되어 돌아온다. 이때 돌아온 Surge는 매질의 저항차이가 전술된 것과 같을 때 Surge의 크기가 증가된 채 반사되며 이런 현상이 계속될 때 파는 계속 크기가 증가한다. 그러나 주기는 아주 짧다. 따라서 Switching Surge에 의한 MCB 순차 투입 장애는 일어나지 않는 것으로 사료된다. 전동차가 전원을 받기 전 회로구성은 아래 그림과 같다. 애자 및 오염된 FRP를 C의 성분으로 생각하고 회로를 구성한다.

2.3.1.7. 계전기 동작 시간

가. 원인 : 계전기를 동작시키는 설정 전압의 크기와 시간이 적어 임계치를 넘는 작은 전압 또는 짧은 주기의 이상전압이 유입됐을 때 MCB가 투입.

나. 결과검토 : ACVR과 DCVR은 전압형 계전기이므로

일정크기의 전압(AC20KV, DC790V)이 입력되면 동작을 하고, 이상전압이 감지되는 시간 동안 계전기는 동작을 하게 되므로 MCB 관련 계전기들이 연속적으로 동작, MCB가 투입되게된다. 이때 MCB의 투입을 위한 전압의 지속시간은 200msec이다. 그런데 차량 제작업체에서 시험한 내용을 분석한 결과 전동차가 절연구간 통과시 약200msec 주기의 전압이 가압구간의 전압과 비슷한 크기로 유입됐을 때 계전기가 동작하는 것을 확인하였다. 따라서 계전기 동작 시간에 대한 제검토가 필요한 것으로 사료된다.

2.4 절연구간 측정 결과 분석

절연저항의 측정 결과가 상하행선 절연구간의 전구간에서 극도로 저하된 상태로 확인이 되었다. 철도용품 표준규격 철도 2230-3230 '절연사다리차'에 의하면 FRP의 절연상태는 30cm당 2000MΩ 이상이 측정되어야 하지만 실측값은 대부분 1MΩ 이하로 나타났다. 또한 급구부는 FRP를 연결시킨 FRP가 상호 분리되어 있으므로 α의 저항값이 측정되어야 하지만 부분적으로 1MΩ 이하값도 측정되므로 급구와 FRP 사이가 오염물이 삽입 있는 상태로 분석된다. 따라서 절연물의 상태는 절연이 확보되지 않는 상태로 분석된다. 또한 동일 측정부위의 오염 정도가 차이가 있는 것으로 보았을 때 전동차의 운행으로 부분적으로 오염된 부분의 상태가 변하는 것으로 사료된다. 그리고 이와 같은 절연저항의 감소를 야기하는 원인제공 요소의 비율을 확인하기 위하여 전동차의 운행 횟수를 계산하였다. 자료에 따르면 습판체가 매일 5000여회 통과하는 것으로 확인되었다. 따라서 편성당 팬터그래프수가 많은 전동차에 의한 오염이 더 심하다는 점을 알 수 있었다. 애자의 오염에 의한 이상전압의 유입을 확인하기 위해서 애자의 절연상태를 확인한 결과 길 이어자 및 지지대자 절연저항이 α가 측정되어 절연상태는 양호한 것으로 측정되어 애자에 의한 이상전압의 유입은 없는 것으로 확인되었다.

3. 결 론

3.1 서로 다른 급전구간을 1대의 전동차가 운행하기 위해서는 전동차의 회로 변환 및 급전구간의 분리가 필요하며 이를 위해서는 절연구간이 존재해야 한다.

3.2. 과전선 절연구간에는 팬터그래프의 습판체가 5,000여회 FRP 절연체를 일정 압력으로 누르면서 통과함에 따라 습판체의 동과 카본의 분진이 FRP에 부착되므로 절연체의 절연저항 약화는 피할 수 없다.

3.3. 가압구간과 FRP 절연체와는 AIR SECTION으로 절연되어 있으나, Double 팬터그래프 차량을 운행할 경우 팬터그래프를 통하여 FRP 절연체 및 후위차량의 팬터그래프에 이상전압이 유입될 수 있다.

3.4 과전선의 경우, 전동차 운행횟수가 많아서 FRP의 절연약화 속도가 매우 빠르기 때문에 FRP를 청소하는 방법은 효율적이지 못하다.

3.5. 판토간 충분한 이격거리가 확보되도록 차량을 편성하여야 한다. 또한 이상전압의 유입과 관련하여 MCB 관련 계전기들의 동작 시간 설정이 중요한데 현 차량은 FRP의 절연약화를 고려하지 않고 설정된 관계로 계전기 회로 수정 또는 시간 재 설정에 대한 검토가 필요하리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] (社)日本鐵道電 氣技術協會 電車線裝置 電氣概論 電車線路シリーズ區
- [2] 電氣車の科學 91년, 92년발행본
- [3] 철도청 철도용품 표준규격
- [4] 철도청 외국 지하전철 전기방식 조사 귀국보고 1990.2