

전기철도 급전계통의 집전전압 안정도 해석

이장무 · 이한민 · 김길동 <한국철도기술연구원>

1 서 론

교류전기철도 2×25(kV) AT급전방식은 154(kV) 3상의 전력을 수전 받아 2×25(kV) 2상의 전력으로 변환하여 급전선로를 통하여 전기차량에 전력을 공급하며 각 상별로 최대 30(km)의 구간에 전력을 공급하는 시스템이다. 또한 전기철도 급전계통은 전차선, 레일, 급전선으로 이루어지는 급전선로, 급전선로의 매 10(km)마다 위치한 단권변압기와 급전선로에 위치한 전기차량들로 구성된다.

이러한 전기철도 AT급전계통에서 전기차량은 견인과 제동을 반복하는 대용량의 집중부하로 전기적 변화가 매우 심하다. 특히 경부고속철도에 도입되는 고속열차는 정격 15(MW)의 대용량 부하로 하나의 급전구간에 여러 편성의 열차가 투입되거나, 인근 전철변전소가 고장나서 연장급전할 경우 차량전압이 최소 운전가능 전압 이하가 되어 열차운행에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다.

에너지를 전송하는 시스템인 전력계통은 수송할 수 있는 전력에 한계가 있다. 이는 계통의 임피던스에 의한 전압저하에 기인하고 있다. 현상적으로 부하의 증가에 의해 전력수송한계를 초과하면 전압저하가 급속하게 진전되고 이로 인해 전압붕괴가 발생하게 된다. 이 현상은 전력계통으로서 전송능력의 저하에 의한 것이기 때문에 공급능력이 충분하고 사고가 발생하지

않은 상황에서도 발생할 수 있다. 전기철도 급전계통에서도 일반 전력계통에서 발생하는 전압불안정 현상이 발생할 수 있다. 즉 전철변전소의 공급능력이 충분하더라도 급전선로에 대용량의 부하가 있는 경우, 급전선로의 전송능력 한계에 의하여 전압저하가 발생하여 결국 전압붕괴가 발생하는 경우로 급전선로의 전송능력은 전철변전소 주변압기의 임피던스와 급전구간 내 차량의 운전조건(차량의 부하, 역률, 위치)에 따라 복잡하게 변화하기 때문에 한계상태는 확일적으로 정해지지 않는다. 따라서 교류전기철도 2×25(kV) AT급전시스템에서 급전선로의 전송능력을 예측하기 위하여 AT급전회로 해석모델인 다단자망 모델을 이용하여 급전선로의 길이, 전기차량의 부하, 위치, 역률에 따른 P-V곡선을 나타내며, 사례연구를 통하여 측정결과와 예측결과를 검토하고자 한다.

2 본 론

2.1 급전선로 전압안정도 예측

2.1.1 다단자 회로 모델

한국철도기술연구원에서는 급전선로의 자기임피던스, 상호임피던스와 어드미턴스를 고려하여 전철급전시스템의 정밀한 해석을 위해 6단자 정수를 정의하여 그림 1과 같이 AT급전회로의 모든 회로요소(전원임

기술해설

피턴스, 변전소측 단권변압기, 급전소측 단권변압기, 선로중간 단권변압기, 급전선로 및 차량)를 6단자 전 달행렬식으로 모델링하여 이로부터 급전선로의 부하 특성을 해석하는 기법을 개발하였다.

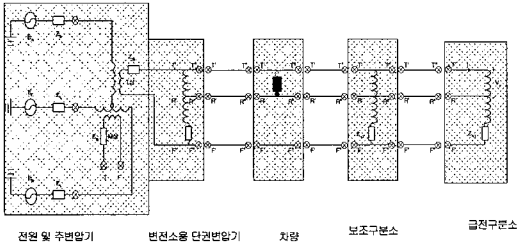


그림 1. 교류 급전시스템의 구성

2.1.2 전압안정도 예측

교류전기철도 2×25(kV) AT 급전시스템에서 급전선로의 전송능력을 예측하기 위하여 우리 연구원에서 개발한 AT급전회로 해석모델인 다단자망 모델을 이용하여 AT급전선로의 거리가 25(km)인 경우와 30(km)인 경우에 대하여 예측계산을 수행하였다.

AT급전시스템의 전압안정도 예측계산을 위한 급전계통 구성은 그림 2와 같다. 급전선로의 말단에 부하를 위치시킨 상태에서 부하의 크기와 역률을 변화시키면서 부하의 전압을 예측 계산하였다.

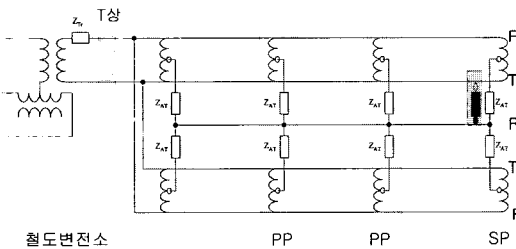


그림 2. 전압안정도 예측계산을 위한 급전계통

급전선로 길이가 25(km)인 급전시스템에 대하여 역률 변화에 따른 부하-말단전압 곡선을 그림 3에 도

시하였으며, 급전선로 길이가 30(km)인 급전시스템에 대하여 역률 변화에 따른 부하-말단전압 곡선을 그림 4에 도시하였다.

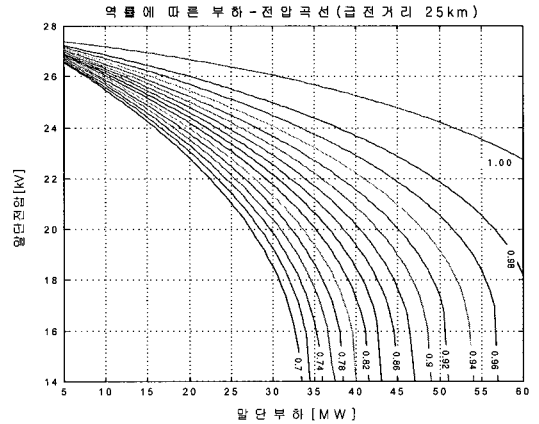


그림 3. 급전선로 P-V 곡선(급전거리 25(km))

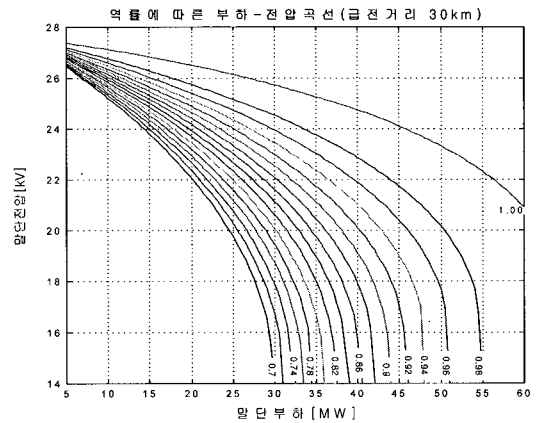


그림 4. 급전선로 P-V 곡선(급전거리 30(km))

급전거리에 따른 부하-말단전압을 예측한 결과, 급전선로의 길이가 길어짐에 따라 선로의 말단에 공급할 수 있는 부하가 감소며 동일한 부하조건에서 부하역률이 감소함에 따라 말단전압이 감소함을 알 수 있다. 또한 동일한 역률조건에서 부하가 증가될 때 전압이 거의 선형적으로 감소하다가 임계점 부근에서는 약간의 부하변동에도 전압이 기하급수적으로 감소하는 특성을 지니고 있다.

2.2 사례연구

2.2.1 급전계통 전력 전송능력 측정

전기철도 급전계통에서 급전선로의 전송능력을 알아보기 위하여 신청주 S/S~용정 SP의 급전계통에 대하여 그림 5와 같이 3대의 차량을 급전선로에 위치한 후 동시에 출발하며 부하를 증가시켰다.

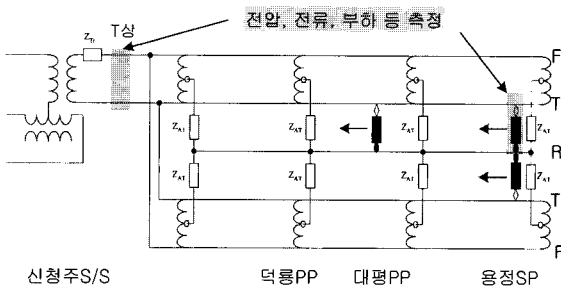


그림 5. 급전계통 전력전송능력 측정을 위한 차량위치

그림 6에 말단의 시험차량에서 측정한 차량의 전압 및 부하를 나타내었으며 그림 7과 그림 8에 변전소에서 측정한 전압, 전류, 부하 및 역률을 나타내었다. 측정결과 차량의 최저집전전압은 17.14[kV], 차량의 최대 부하전류는 878.08[A], 차량의 최대부하는 18.71[MVA]로 측정되었다.

그러나 그림에서 보는 바와 같이 차량의 집전전압이 최저전압 이하가 되어 팬터그래프와 주변압기 사이의 VCB가 차단되는 현상이 발생하였다. 이는 급전선로에 위치한 3편성의 차량이 필요한 전력을 공급받지 못하여 순간적으로 전압붕괴가 발생한 것으로 다음과 같이 해석할 수 있다.

3편성의 시험열차가 모두 동일한 조건으로 운전한다고 가정할 때, 차량의 VCB가 차단되는 순간에 측정된 시험차량의 소모부하는 약 16[MVA]로 급전선로에 위치한 시험열차 3편성 전체 부하량은 약 48[MVA]가 된다.

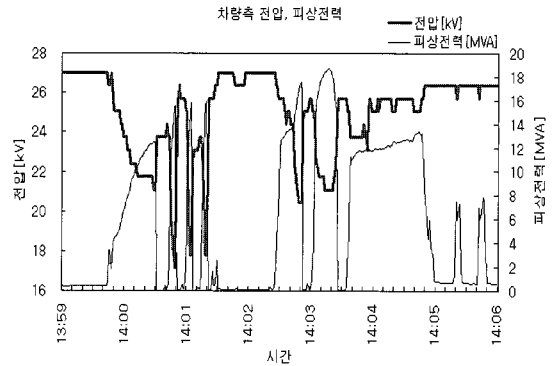


그림 6. 선로말단 차량측 전압 및 소모부하

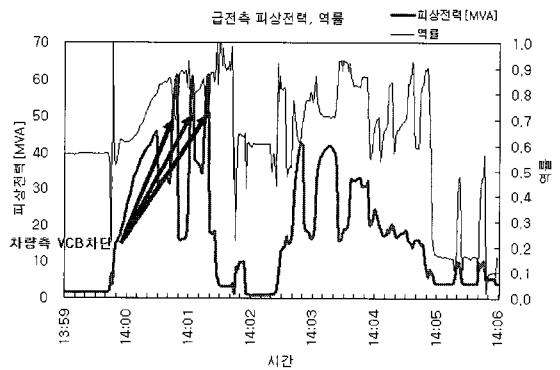


그림 7. 변전소 급전측 공급부하 및 역률

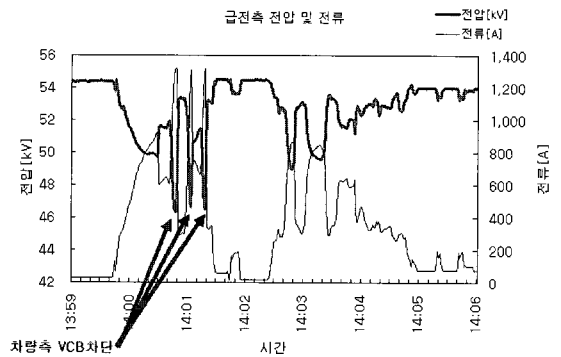


그림 8. 변전소 급전측 전압 및 전류

기술해설

이 순간, 변전소에서 시험선로에 공급하는 주변압기 2차측 전압은 46.5[kV]로 정격출력전압인 55[kV]에 비교하여 8.5[kV], 15.5[%]의 전압강하가 발생하는 상태로 선로에 전압이 공급되며, 순간최대전류 1,310[A] (55[kV] 기준) 의 대전류가 선로측으로 공급된다. 결과적으로 변전소에서 선로측으로 공급하는 부하는 61[MVA]로 대전력을 공급하는 것으로 측정되었다. 신청주변전소에 설치된 주변압기는 편상용량 45/60[MVA]로 1분최대 변압기 용량의 300[%]를 공급할 수 있으므로 변압기의 공급능력은 충분하다고 할 수 있다. 따라서 위의 시험동안 발생한 전압붕괴는 급전선로의 전송능력 제한으로 발생하였다고 볼 수 있다.

2.2.2 급전선로의 손실

변전소에서 공급하는 전류 1,310[A] (55[kV] 기준)가 급전선로를 거쳐 3편성의 차량으로 흐르는 동안에 발생하는 손실전력을 계산하면 다음과 같다.

□ 신청주 S/S~용정 SP 구간

전차선 임피던스 : $0.14 + j0.34 [\Omega/\text{km}]$

급전선 임피던스 : $0.15 + j0.48 [\Omega/\text{km}]$

□ 시험차량의 위치

1편성(변전소 기준 14[km])

2편성(변전소 기준 28[km])

$$\begin{aligned} P_{\text{선로손실}} &= I^2 R = I^2 \cdot (R_{\text{전차선}} + R_{\text{급전선}}) \\ &= 1,310^2 \cdot 0.29 \Omega/\text{km} \cdot 14 \text{km} \\ &\quad + \left\{ 1,310 \frac{2}{3} \right\}^2 \cdot 0.29 \Omega/\text{km} \cdot 14 \text{km} \\ &= 10.06 [\text{MW}] \end{aligned}$$

전차선로에서 발생하는 손실 유효전력은 10.06 [MW]로 계산되었다. 이때 변전소에서 선로측으로 공급하는 역률은 0.701이다. 따라서 선로에서 발생하는 손실은 12.28[MVA]로 계산된다.

$$\begin{aligned} |S_{\text{선로손실}}| &= |P_{\text{선로손실}} + jQ_{\text{선로손실}}| \\ &= |P_{\text{선로손실}} + jP_{\text{선로손실}} \text{PF}| \\ &= 10.06 \sqrt{1 + 0.7^2} = 12.28 [\text{MVA}] \end{aligned}$$

한편 시험열차에서 소모하는 부하의 합계와 변전소에서 공급하는 부하를 살펴보면 각각 약 48[MVA]와 61[MVA]로, 소모부하에 비하여 공급부하가 약 13[MVA]가 많음을 알 수 있다. 이 부하의 차이인 13[MVA]는 변전소에서 차량으로 전력을 전송하면서 선로상에서 발생하는 손실로 간주되며, 계산되는 선로손실과 유사함을 알 수 있다.

2.2.3 급전계통의 전송능력 예측

2.2.1절에서의 측정결과를 전압안정도 측면에서 검증하기 위하여 다음 그림 5과 같이 신청주 S/S와 용정 SP 사이에 차량이 위치하고 있다고 할 때 차량의 부하와 역률에 따라 차량의 최소집전전압, 변전소의 급전전압, 급전전류, 급전부하 및 변전소의 역률에 대하여 예측계산을 수행하였다.

이때 차량의 부하는 5~18[MW]까지 변화하는 경우를 고려하였으며 또한 차량의 역률도 0.8~1.0까지 변화하는 조건으로 하였다.

그림 9~12는 전압안정도 측면에서 차량의 부하와 역률에 따른 차량의 집전전압, 변전소 급전측의 공급전압, 공급전류, 공급부하 및 역률에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 그림이다.

차량의 역률이 0.8인 경우를 살펴보면, 차량의 부하가 13.5[MW]를 초과하면 전압붕괴 현상이 발생하며 이때 급전측의 공급전압은 47.23[kV], 공급전류는 1,363[A], 공급부하는 64.36[MVA]이며 급전측 역률은 0.72가 된다. 이러한 수치는 위의 2.2.1절의 시험결과와 유사함을 보이고 있다.

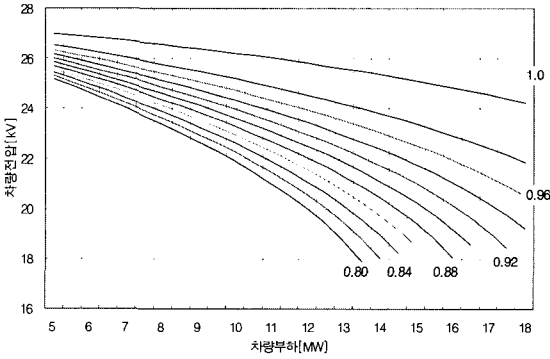


그림 9. 부하, 역률에 따른 차량의 전압곡선

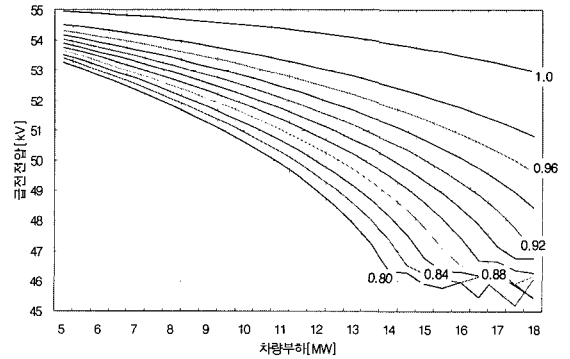


그림 10. 부하, 역률에 따른 변전소 공급전압

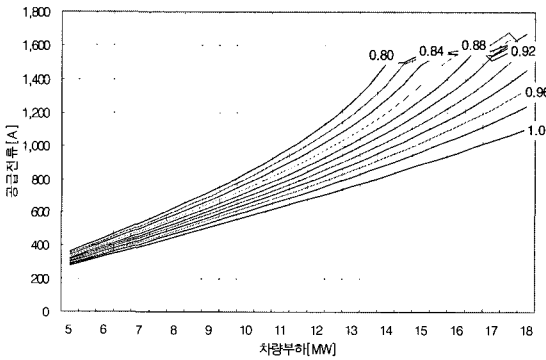


그림 11. 부하, 역률에 따른 변전소 공급전류

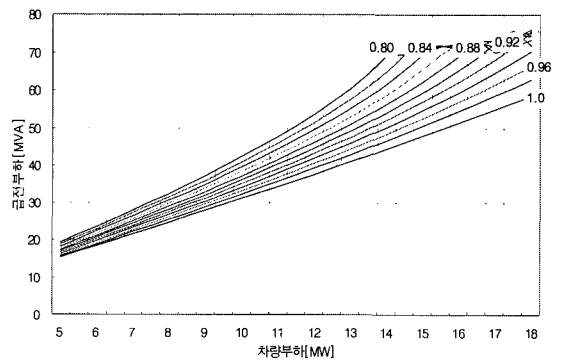


그림 12. 부하, 역률에 따른 변전소 공급부하

2.2.4 전압강하 개선효과 예측

2.2.1, 2.2.2절에서의 열차운행조건에서 차량은 운행에 필요한 전력을 공급받지 못하고 있다. 이는 급전선로의 공급능력이 차량이 필요한 부하를 공급할 수 없기 때문이며, 반대로 차량의 부하가 매우 크다고 볼 수 있다.

각 차량의 부하는 16[MVA](역률 0.8)로 차량운행에 필요한 에너지(유효전력) 외에 상당한 무효전력(각 편성당 9.6[MVA_r])을 공급받아야 한다. 따라서 급전선로의 말단에 무효전력보상설비를 설치하여 전압강하 개선효과를 예측하고자 한다. 즉 무효전력보상용 콘덴서의 용량을 변화시키면서 차량의 집전전압 변화를 예측하였으며 그 결과를 그림 13에 나타내었다.

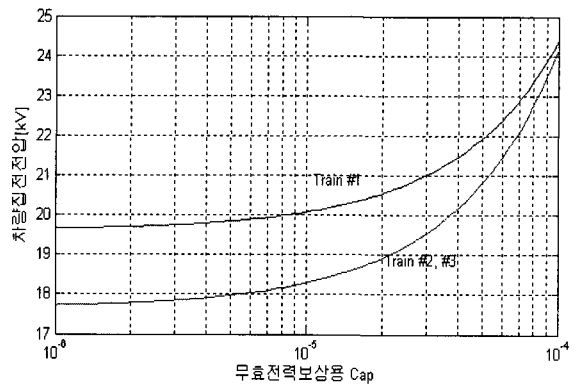


그림 13. 전압강하 개선효과

그림 13을 살펴보면 무효전력보상용 콘덴서의 용량이 21.3[μ F]이상이 되면 차량의 최저전압이 열차

최저집전전압인 19(kV)이상이 되어 정상적인 열차 운행이 가능하게 될 것이다.

3. 결 론

에너지를 전송하는 시스템인 전력계통은 수송할 수 있는 전력에 한계가 있다. 부하의 증가에 의해 전력수송한계를 초과하면 전압저하가 급속하게 진전되고 이로 인해 전압붕괴가 발생하게 된다. 전기철도 급전계통에서도 이와 같은 전압불안정 현상이 발생할 수 있음을 보였다. 즉 전철변전소의 공급능력이 충분하며 사고가 발생하지 않는 상황에서도 급전선로에 대용량의 부하가 있는 경우 급전선로의 전송능력 한계로 인한 전압저하가 발생하여 결국 전압붕괴가 발생하는 경우이다.

따라서 철도급전계통의 전압 안정도 향상을 위하여 설계단계에서 급전선로의 전송능력을 고려하여 철도 변전소 위치를 정하거나, 열차 운행시격을 조정할 때 전압안정성에 대한 검토를 통하여 필요시 전압강하보상설비를 설치하는 등 철도급전계통의 안정성을 향상시켜야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국철도기술연구원(2003), “경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화 대책연구”.
- [2] 오광해, 이장무(2000), “Harmonic analysis based on four-port representation for traction power supply”, ICEE 2000 Proceeding.
- [3] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈(2001), “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.443~445.

◇ 저 자 소 개 ◇



이장무(李章茂)

1969년 10월 4일생. 1991년 한양대학교 공과대학 전자통신공학과 졸업. 1994년 한양대학교 대학원 전자통신공학 졸업(석사). 2003년 고려대학교 대학원 전기공학과 수료(박사). 1997년~현재 한국철도기술연구원 차세대전동차연구팀.



이한민(李翰旼)

1973년 3월 27일생. 1997년 중앙대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 차세대전동차연구팀.



김길동(金吉童)

1967년 9월 20일생. 1986년 명지대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 차세대전동차연구팀장/ 책임연구원.