

전기철도 3상유도전동기의 기동특성을 고려한 STATCOM에 의한 전압강하 보상에 관한연구

황승호 오민혁 이병하  
인천대학교 전기공학과

<A Study on Voltage Drop Compensation by STATCOM Considering Dynamic Characteristics of the 3-Phase Induction Motor in Electric Railway Systems>

Sung-Ho Hwang, Min-Hyuk Oh, Byung-Ha Lee  
Department of Electrical Engineering, University of Incheon

**Abstract** - The purpose of this paper is to compensate the voltage drop of the power system in the AC High-Speed Railway (HSR). Reactive power compensation is often the most effective way to improve system voltage drop. The suitable modeling of the electric railway system should be applied to the EMTP. the dynamic characteristics of 3-Phase Induction Motor in Electric Railway Systems is considered for precise modeling, it is shown through EMTP simulation that voltage drop can be compensated effectively by STATCOM.

**Key Words** : voltage drop compensation, AC High-Speed Railway, EMTP

1. 서 론

최근 전기철도 계통에서 필연적인 전압강하, 전압 불평형, 고조파 및 역률 등의 전력품질 문제해결을 위해 FACTS(Flexible AC Transmission System)를 활용한 전기 철도급전 시스템의 적용에 관한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 PID제어기법을 적용한 STATCOM을 설치함으로써 전기철도에서 발생하는 전압강하문제를 해소하는 연구를 수행한다. 실제 4호선에서 운행 중인 전동차의 3상 농형 유도 전동기를 모델링하여 전기적 출력을 일정하게 유지하려 한다는 특성을 반영함으로 실제 급전 구간과 거의 유사한 급전계통의 해석이 가능하도록 하고자 한다. 이를 뒷받침하기 위하여 ATP/EMTP를 사용하여 AT 급전시스템과 비선형 특성을 갖는 전기 철도부하를 모델링하여 동적 시뮬레이션을 실시한다.

2. 전기철도 교류 급전시스템 및 회로 모델링

교류방식은 일반적으로 한전 변전소로부터 수전하는 상용 주파수 3상 전기를 변환장치에 의해 단상 교류전기를 전차선로에 공급하여 운전하는 방식이다. 교류방식의 특징은 대용량, 중·장거리 수송에 유리하며 에너지 이용률이 높고 사고시 선택 차단이 용이하며 전식의 우려가 없으나 동신유도 장애 대책이 필요하다. 따라서 AT 급전방식은 변전소에서 급전선(Feeder)을 선로를 따라 가선히 이 급전선과 전차선 사이에 약 10[KM] 간격으로 AT를 병렬로 설치 접속하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식으로서 우리나라의 수도권 전철 및 중앙선 제천~영주, 영동선 영주~철암, 경부고속철도의 급전방식으로 채택되고 있으며 앞으로 계획되는 전철구간에도 이 방식이 채용될 예정이다.

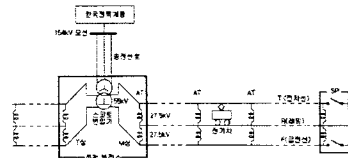


그림1. 단권변압기 급전방식

2.1 교류급전 시스템의 해석 및 회로모델링

교류 급전시스템을 해석하기 위해서는 그 구성요소를 정확하게 이해하고 이들 각각에 대한 회로모델을 세워야 한다. 현재 우리나라에서 표준으로 사용하는 AT급전시스템의 구성요소를 전원계통, 스코트 변압기, 전차선로, 차량부하로 나누어 설명 및 모델링을 하도록 한다.

(1) 3상 전력계통의 등가 임피던스  
일반적으로 3상 전원의 용량은 단락 용량으로 주어진다. 이 경우 전원의 단락 용량은 다음 식에 의해 3상 임피던스로 환산한다.

$$Z_0 = \frac{V^2}{P_S} \quad [ \Omega ] \quad (1)$$

여기서,  $Z_0$  : 3상 임피던스[Ω],  $V$  : 기준 전압(급전전압을 사용)[KV],  $P_S$  : 단락용량[MVA]

(2) 3상 유도전동기의 모델

유도전동기는 회전자가 간단한 농형(Squirrel Case)으로 3상이며 보통 4극이 기본이지만 전기기관차에서는 6극을 채용하며 대차의 하부에 부착하기 때문에 소형·경량화가 요구된다. 1대의 인버터로 여러 대의 유도 전동기를 제어할 경우 차륜직경에 차이가 발생하면 각 유도전동기는 다른 슬립으로 회전하여 전류와 토크에 불 평형이 발생하게 된다. 같은 차륜 직경이라면 정격 슬립이 작은 유도전동기에서는 전동기간 토크 불균형 양이 커지게 된다. 정격슬립이 큰 유도 전동기는 2차 저항(회전자 저항)이 크고 효율이 저하하는 경향이 있다.

결연용에 사용되는 유도전동기의 토크를 간략하게 나타낼 경우 다음과 같다.

$$T = k_1 \phi I_r = k_2 \left( \frac{V_m}{f_1} \right)^2 f_s \quad (2)$$

전동기 토크는 전동기 전압과 전원주파수 비율의 제곱과 슬립 주파수의 제곱에 비례한다. 즉  $V_m/f_1$ 과  $f_s$ 를 일정하게 유지하면 토크는 일정하게 됨을 알 수 있다.

(3) 차량운전모드

도시철도 차량의 대부분은 기동-타행-제동-정지의 단순한 패턴을 유지하며 운행된다. 전동차는 속도에 따라 역행 및 회생전류를 발생하며 그에 따른 인장력·제어력에 의해 가속도·감속도를 얻어 다음의 운전 상태와 속도를 결정한다. 따라서 차량은 각각의 운전모드 중 하나의 운행상태를 가지게 된다. 즉, 전동차는 속도에따라 다음 위

치가 결정되고 속도·위치가 결정되면, 운전곡선에 따라 운전모드가 구해진다.

전차는 역을 출발해, 속도를 상승시켜 일정속도에서 진행되며, 역에 가까워지면 브레이크를 걸어 다음역에 정차한다. 역행에서 타행, 타행에서 다시 역행으로 이행하도록 할 경우, 집전전압이 높으면 가속성능이 정상적으로 발휘되지만 집전전압이 낮아지면, 가속성능이 낮아져 운전속도가 저하되는 특징을 가지고 있다. 이때 운전모드의 판정을 지점을 지정해 변화시키면 운전시간이 대폭 변화한다. 반면에 속도를 기준으로 한 경우에는 운전시간의 차이가 훨씬 줄어드는 특징이 있어 본 연구에서는 속도조건에 따라 운전모드를 바꾸도록 한 것이다.

## 2.2 차량부하 모델링

차량의 소모전력 및 회생전력을 계산하기 위해서는 차량의 견인력과 제동력, 차량의 입출력 효율이 필요하며 이는 다음과 같이 구한다.

### (1) 차량의 견인력과 제동력

열차제원과 선로조건을 적용하여 차량 견인력(제동력)을 포함한 운전특성을 계산하기 위한 운전방정식은 다음 미분 방정식의 형태로 주어진다.

$$W(1+X) \frac{dV}{dT} = F - R, \quad F = W(1+X) \frac{dV}{dT} + R \quad (3)$$

여기서,  $W$  : 열차의 총 중량

$X$  : 회전부분에 관계되는 관성계수

$F$  : 차량의 견인력(제동력)

$R$  : 운행저항

### (2) 차량의 운행저항

열차가 타행운전하고 있다면 속도가 저하된다. 동력차에서 발생하는 인장력은 차량의 저항력을 이겨내기 위하여 소비되어지는 것이고, 이때의 저항력을 열차저항 이라고 하며 대표적으로 출발저항, 구배저항, 곡선저항, 터널저항 등으로 분류된다.

#### (a) 출발저항

출발저항은 속도가 향상함에 따라 직선적으로 감소하고 속도 3km/h 부터는 주행저항으로 바뀐다.

#### (b) 주행저항

주행저항이 발생하는 원인에는 축수채널과 축수간의 마찰에 의한 저항, 축수 담면과 레일면 간의 저항, 차량의 요동에 의한 저항, 공기저항 등이 있고 과천/분당선의 인버터제어 전동차의 주행저항의 실험치는 다음과 같이 알려져 있다.

지상구간 :

$$R = (1.65 + 0.024V)W_m + (0.78 + 0.0028V)W_l \quad [\text{Kg}] \quad (4)$$

$$[0.0028 + 0.0078(n-1)]V^2$$

지하구간 :

$$R_t = 1.867 + 0.0359V + 0.000745V^2 \quad [\text{Kg/ton}] \quad (5)$$

여기서,  $V$  : 열차속도 [Km/h],  $W_l$  : T차 총중량[ton],

$W_m$  : M차 총중량[ton],  $n$  : 편성당 차량수

#### (c) 구배저항

중력을 이겨내며 열차가 경사를 오를 경우, 주행저항 이외에 구배저항이 작용한다. 구배저항의 단위는 1 ton 당 값이 되기 때문에 구배저항은 다음식과 같이 계산된다.

$$R_g = \frac{Q}{W} = i \quad [\text{kg/ton}] \quad (6)$$

여기서,  $R_g$  : 구배저항[kg/ton],  $W$  : 열차 전 중량[kg],  $i$  : 구배[%]

#### (d) 곡선저항

곡선저항은 종래부터 실험결과에 의한 값을 사용하고 있다.

$$R_c = \frac{800}{R} \quad [\text{kg/ton}], \quad R : \text{곡선반경[m]}$$

### (3) 차량의 입출력 효율

차량의 입출력 효율은 크게 3가지, 차량 전력공급 효율과 견인 전동기 효율 및 치차동력 전달 효율로 구별되어진다.

#### (a) 차량 전력공급 효율

차량의 가선단에서부터 주변압기, 컨버터, 인버터를 거쳐 견인 전동기까지의 효율을 차량 전력공급 효율이라고 하며, 이때 인버터 효율은 컨버터 출력단(DC) 전력과 견인 전동기 입력단(3상측) 전력의 비로서 계산된다.

#### (b) 견인 전동기 효율

견인전동기에 대한 효율 및 특성 시험 역시 견인 전동기의 부하가 50, 75, 100, 125, 150%까지 변화더라도 그 효율은 큰 변화가 없으며 정격에서의 효율 92.0%를 기준으로 거의 일정하다.

#### (c) 치차특성 및 동력전달 효율

과천분당선의 치차비 99/14=7.07, 치차각 6°, 동력전달 효율은 96%와 같이 실험데이터로부터 차량전력 공급효율과 견인전동기효율 및 치차 동력전달 효율이 계산되고 전기차의 입출력 효율은 이들 효율들의 곱으로 정의된다. 따라서 차량의 입출력 효율은 전력공급효율  $\eta_{AC} = 86.5\%$  T/M의 효율  $\eta_{TM} = 92.0\%$ (at Normal rating) 치차 동력전달효율  $\eta_{CEAR} = 96\%$ 가 된다.

### (4) 차량의 부하전력 및 회생전력

#### (a) 역행 운전모드

차량이 견인력 F(km/h) 속도로 주행하면 기계적인 일률은 견인력과 속도의 곱으로 계산된다. 이때 차량에 입력해야하는 소비전력은 기계적 일률만큼 요구되고 차량의 효율을  $\eta_{CAR}$ 를 고려하면 차량의 소비전력은 아래식로 계산된다. 또한 무효전력은 차 차량의 실추 역률을 반영하여 또한 계산될 수 있다.  $P_E = 2.722 \times 10^{-3} FV/\eta$  [Kw]

$$Q = P \sqrt{-\cos^2 \phi} \quad [\text{Kvar}]$$

#### (b) 회생 운전모드

회생제동 모드에서도 역행모드에서와 마찬가지로 회생제동시의 제동력을 전기적인 에너지로 변환하여 회생전력을 산출할 수 있다. 즉, 차량의 회생제동력을  $B_{IV}$ (kgf), 속도를  $V$ (km/h), 전체의 전달 효율을  $\eta$ 로 하면 차량에서 발생하는 회생전력은 식으로 계산된다.

$$P_B = 2.722 \times 10^{-3} B_{IV} V \times \eta \quad [\text{Kw}] \quad (7)$$

## 3. STATCOM의 모델링

STATCOM은 출력전압의 크기와 위상을 신속히 제어할 수 있는 교류전압원으로 간주할 수 있으며, 전압원 인버터, 직류캐패시터, 결합용변압기, 그리고 펄스발생 및 제어회로로 구성되어있다.

변압기의 권선과 인버터의 손실이 있어 이 손실을 보상하기 위해 약간의 유효전력을 공급해야 하므로 인버터의 출력전압은 단자전압과 약간의 위상차를 갖는다.

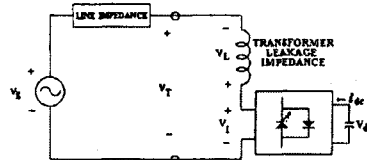


그림2. 송전계통과 STATCOM의 단상 개념도

그림 2는 무효전력보상기의 백터선도로 인버터전압  $V_i$ , 통전압  $V_t$ , 리액터 전압  $V_l$ , 그리고 선로의 전류  $I$ 를 위상각  $\alpha$ 에 대한 크기와 위상의 상호관계를 나타낸 것이다.

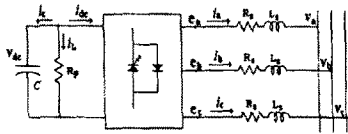


그림3. 송전계통과 STATCOM의 등가회로

그림 3은 STATCOM이 송전선로와 연결된상태를 3상 등가회로로 나타낸 것이다. 이 그림에서 직렬리액턴스  $L_s$ 는 실제의 전력용 변압기의 인덕턴스를 나타내고, 직렬저항  $R_s$ 는 인버터와 변압기의 전도손실을 나타낸다. 또한 캐패시터와 병렬로 연결된 저항  $R_p$ 는 인버터의 스위칭 손실을 나타낸 것이다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

EMTP를 사용하여 STATCOM과 AT교류급전시스템 그리고 기동특성을 고려한 차량부하를 modeling하여 기존의 연구에서 다루어 지지 않았던 부하특성을 고려하였다. 전기철도 운영방식에 따라 AT 급전시스템 한구간에 전차 한대가 있을 때를 고려하여 짧은 시간에 부하의 변화를 modeling하였다. 그림5는 AT급전시스템의 scott변압기를 모델링하여 전기철도의 전차선, 레일, 급전선의 입피턴스를 거리에 따라 구분하였다. 좌상부에 가변부하 모델링이 전차의 부하특성을 고려한 것이다. 그리고 EMTP의 또다른 관련 TOOL인 ATPCC를 이용하여 STATCOM을 전원에 추가하여 추하기 전의 모델과 비교 하였다.

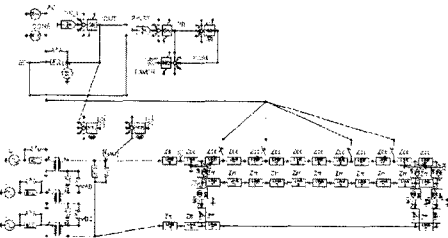


그림5. EMTP를 이용하여 모델링한 AT교류철도 시스템

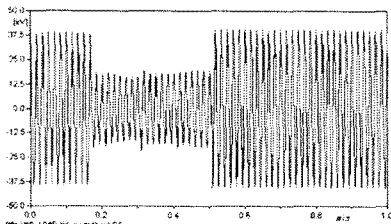


그림6 보상전 급전시스템의 전압파형변화

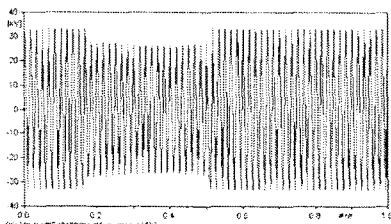


그림7 STATCOM보상시 급전시스템의 전압파형변화

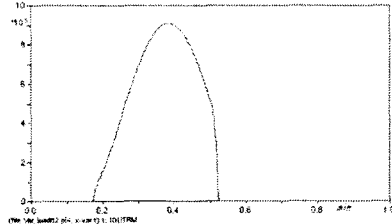


그림7. 전차의 부하특성 modeling

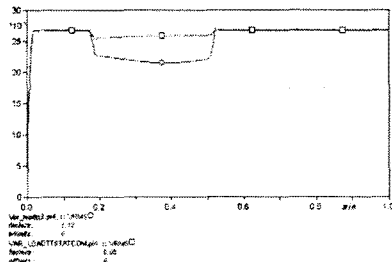


그림8. STATCOM 보상시 전압강하

(□ : STATCOM 보상시, ○ : 일반적인 상태의 전압강하)

#### 5. 결 론

현 전기철도 시스템에서 AT 급전시스템 한 구간을 고려하여 STATCOM을 설치하였을 때 부하의 변화에 따라 전압강하 보상이 이루어지며 출력에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 이 연구를 통해 실제 상황에서 적용할 수 있는 전동기의 변화하는 부하특성을 고려할 수 있었고 STATCOM을 전원측에 연결하였을 때 전체적인 전원의 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다. 향후 세부적으로 급전시스템에 미치는 영향을 확대하여 연구할 필요가 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", 1994 by McGraw Hill Inc.
- [2] Tsai-Iliang Chen and Yen-Feng Hsu, "Systematized short-circuit analysis of a 25kv electric traction network", Electric Power System Research, Vol. 47, No 2, pp.133-142, 15. October, 1998.
- [3] Hackwell, D. et. al, "The use of static shunt Compensation to upgrade existing electrified Railways". International Conference on Main Line Railway Electrification, pp 232-235, Sep. 1989.
- [4] Hase, S-I. et. al. "Compensation of voltage drop using static Var compensator at sectioning post in AC electric railway system". Power Conference 1997, Vol. pp. 955-960, Aug. 1997.
- [5] 최준호 외 6인공저 "전기철도 계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구" 조명·전기설비학회 논문지 제 17권 제6호, pp 95-104, 2003년 11월.
- [6] 정현수의 2인"STATCOM을 이용한 교류 전기철도 급전시스템의 전압강하보상" Journal of KIEE, Vol. 2002
- [7] 향상훈 "교류전기철도 급전시스템 기술의 이해" 철도전기설비 pp30-37 2002. 3
- [8] 김양수 "전기철도공학", 동일출판사, PP28-38, 55-68, 저자명, "논문제목", 논문지명, 권호, 페이지, 출판년도