집전전압 향상을 위한 가변탭 단권변압기 검토

Evaluation of the variable TAB Autotransformer for ascending collecting Voltage

이장무† 한문섭* 이한민**

Lee, Chang-Mu Han, Moon-Seub Lee, Han-Min

ABSTRACT

AC AT feeding method consists return circuits of electric train inserting in parallel between trolly line and feeding line and connecting neutral line to rail and FPW. Due to increasing electric load at feeding system, collecting voltage of train and end voltage are going down. So to increase voltage between trolly line and rail, the usefulness of new autotransformer are considered which variation of short impedance and change of line voltage is simulated with modified winding ratio of autotransformer from 1:1 to variable tab.

1. 서 론

교류 AT급전방식은 급전선과 전차선 사이에 단권변압기를 병렬로 삽입하고 중성점은 레일 및 비절연 보호선(FPW)에 접속되어 전기차의 귀선회로를 구성한다. 단권변압기는 동일철심에 감은 2개의 권선을 직렬로 접속하고 중심점에서 단자를 인출하여 1차와 2차가 작용하게 하여 전차선-궤도 및 궤도-급전선에 접속하고 있다. 이는 변전소의 공급전압을 1:1로 균등분할하여 전차선-레일, 레일-급전선간의 전압을 동일하게 유지하고 있는 것이다.

최근들어 열차의 운행이 증가함에 따라 급전선로에서도 열차부하가 증가하고 이에 따라 열차의 집전전압 및 말단전압이 낮아지고 있다. 특히 주말과 같은 열차운행이 증가된 경우 열차의 최저전압이 순간적으로 운행가능 최저전압이하가 되는 경우가 발생할 수도 있다. 이러한 현상은 열차의 안전운행에 지장을 초래할 수 있는 위험한 상황으로 열차의 집전전압이 항상 최저전압이상으로 반드시 유지되어야 한다. 열차의 집전전압을 향상시키는 방법으로 전철주변압기의 용량증대, 선로말단 전압보상설비 설치 등의 방법이 있으나 많은 비용을 수반한다.

따라서 별도의 추가적인 설비를 설치하지 않고 차량의 집전전압을 향상시킬 수 있는 방법으로 단권변압기의 권선비를 변화시켜 전차선-레일간 전압이 상승될 수 있는지를 검토하고자 한다. 즉, 단권변압기의 구성을 기존의 전차선-레일과 레일-급전선의 권선수가 동일한 1:1변압기에서 전차선-레일 쪽의 권선수를 증가시킨 가변탭 변압기로 변경하여 가선전압 및 급전회로의 변화를 예측하여 가변탭 단권변압기의 사용가능성을 확인하고자 한다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 차세대전동차연구단 선임연구원
E-mail : cmlee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5421 FAX : (031)460-5809
* 정회원 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 책임연구원
** 정회원 한국철도기술연구원, 차세대전동차연구단, 선임연구원

2. 본 문

2.1 단권변압기(Auto Transformer) 구성

(1) 단권변압기의 기본 원리

단권변압기는 보통의 변압기처럼 1차권선과 2차권선으로 구성되어 있지 않고, 아래 그림1과 같이 공통철심을 이용하여 코일을 감고 이것을 직렬 접속하여 1차와 2차의 단자를 인출해 낸 변압기이다. 단권변압기 1차측 및 2차측의 전압 전류 관계는 다음과 같다.

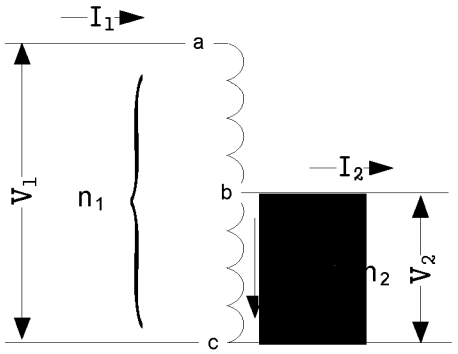


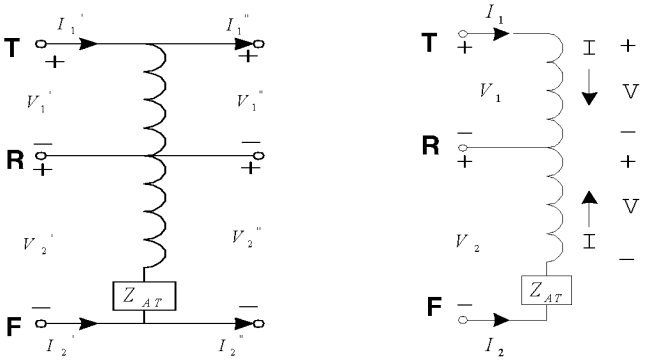
그림 1. 단권변압기 개념도

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{n_1}{n_2},\quad \frac{I_1}{I_2}=\frac{n_2}{n_1} \qquad (1)$$

(n_1 : 1차권수, n_2 : 2차권수)

(2) 가변탭 단권변압기의 모델링

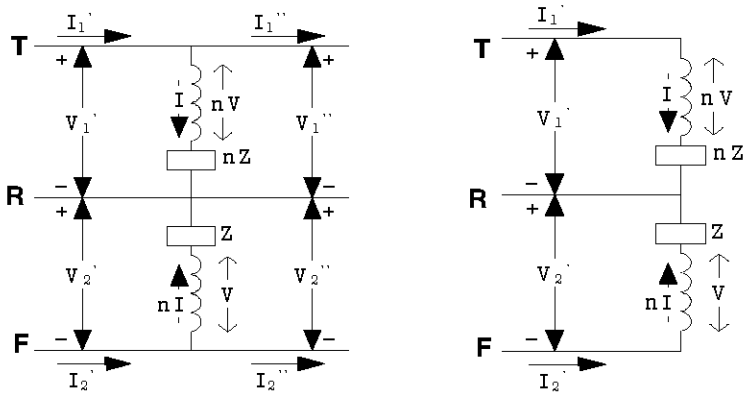
전기철도 교류급전계통에서 사용하는 단권변압기 급전방식은 한전으로부터 3상 154kV를 수전하여 전철용 주변압기를 통해 2상의 55kV로 변환하여 단권변압기를 거쳐 급전선(AF), 전차선(TF) 및 보호선(PW)에 접속하여 전기차량에 필요한 전력을 공급하는 방식이다. 이러한 AT급전계통을 해석하기 위하여 이전에 제안한 6단자 해석기법을 사용하였다. 이전의 AT모델은 그림2.와 같이 단권변압기의 임피던스가 R-F 사이에 존재하는 것으로 모델링하였다. 이는 단권변압기의 1차권수와 2차권수의 비가 2:1, 즉 T-R 간과 R-F 간의 권선수 비가 1:1로 해석상의 편의를 위해 이와같이 모델링 한 것이다.



(a) ATP의 AT 모델 (b) SP의 AT모델

그림 2. 임피던스 집중형 AT 모델링

가변탭 단권변압기는 그림1.의 개념도에서 2차권수(n2)가 1차권수(n1)의 50%에서 변경되는 것으로 개념을 잡았다. 즉 2차권수(n2) b-c간을 기준으로 하여 a-b간의 비를 부하상태에서 변화시켜 전체전압(a-c간의 전압)이 동일한 상태에서 a-b 간의 전압을 증가시키고, b-c 간의 전압을 감소시켜 차량이 필요로 하는 전압(a-b간 전압)을 상승시켜 차량의 전압강하를 저감시키는 구상을 하였다. 따라서 a-b간 및 b-c간의 권수가 달라지게 되므로 권선의 임피던스도 마찬가지로 달라지게 된다. 가변형 단권변압기를 모델링함에 있어, 권수의 변화와 이에 따른 임피던스의 변화를 권선별로 반영하였다. 그림3.에 가변탭 단권변압기의 모델을 나타내었으며, 6단자망 해석이론을 이용한 가변탭 단권변압기의 행렬식은 식(2) 및 식(3)과 같다.



(a) ATP의 AT (b) SP의 AT

그림 3. 가변탭 단권변압기 모델

$$M_{at}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\,0 \\ 0 & 1 & 0\,0 \\ \dfrac{1}{2(1+N)Z_{at}} & \dfrac{-1}{2(1+N)Z_{at}} & 1\,0 \\ \dfrac{1}{2(1+N)Z_{at}} & \dfrac{-1}{2(1+N)Z_{at}} & 0\,1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{sp}=\begin{bmatrix} 1 & 2NZ_{at} \\ 1 & -2NZ_{at} \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 가변탭에 따른 급전계통의 영향 검토

(1) 가변탭 단권변압기의 집전전압 상승 예측

가변탭 단권변압기를 설치함에 따라 집전전압의 개선효과를 예측하기 위하여 다음과 같은 선로를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 조건

계통임피던스 : 한전계통임피던스 %Z = 0.141+j1.505 [100MVA기준]
송전선로임피던스 %Z = 0.111 + j4.2 [100MVA 기준]
전철 주변압기 임피던스 : 45,000[kVA], %Z=10, X/R=23
급전선로 : 30[km] 단선선로, AT간 거리 10[km]
부하조건 : 20[MW]의 차량부하가 급전선로를 따라 이동
가변탭 단권변압기 설치위치 : 급전구분소(SP)
가변탭의 변화 : R-Frks의 권수를 기준으로하여 1.00/1.05/1.10/1.15/1.20

위의 시뮬레이션 조건에 따라 가변탭을 변화시켜가며 차량위치에 따른 차량 최저전압과 SP의 전압을 표1.과 같이 구하였다. 가변탭에 따른 차량최저전압은 그림4.와 같으며 N값이 1에서 증가함에 따라 가변탭 단권변압기가 설치된 SP 인근의 차량 최저전압은 증가하는 경향을 보이고 있으나, SP에서 거리가 먼 변전소 인근에서의 차량전압은 N값이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 5.는 가변탭에 따른 SP 전압을 나타낸 것으로 가변탭 N이 증가함에 따라 가변탭 단권변압기가 설치된 SP 단의 전압이 증가됨을 보이고 있다.

표 1. 가변탭의 변화에 따른 차량 최저전압 및 SP 전압

가변탭(N)	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
차량최저전압[kV]	19.57	19.88	20.10	20.27	20.37
차량의 위치[km]	28.3	28.1	27.9	27.7	27.5
SP의 최저전압	19.82	20.24	20.58	20.84	21.05

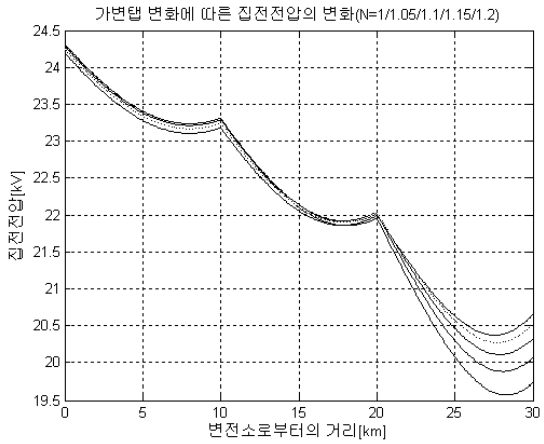


그림 4. 가변탭에 따른 집전전압

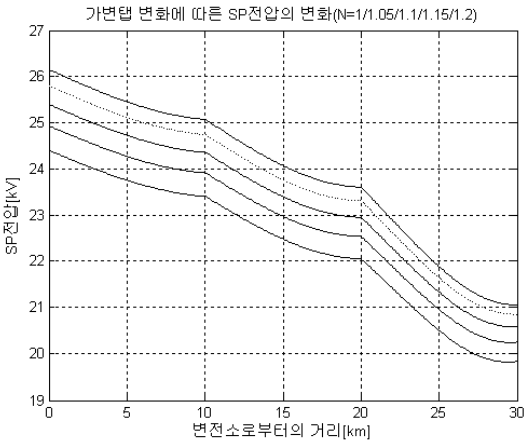


그림 5. 가변탭에 따른 SP전압

(2) 가변탭 단권변압기 적용에 따른 급전회로 검토

위의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 기존의 1:1 단권변압기를 사용 하였을때 차량의 최저전압이 19.57[kV]로 차량운행가능 최저전압 20[kV]이하가 되었다. 가변탭 단권변압기를 SP에 설치하여 탭을 조정할 때 N=1.10일때 차량의 최저전압이 20[kV]이상이 되었다. 따라서 가변탭 단권변압기의 탭이 1.10일때를 기준으로 하여 변전소에서부터 급전구분소까지 전차선, 레일, 급전선, ATP단 및 차량측의 전압/전류분포를 세부적으로 비교하여 급전회로에 미치는 영향을 보고자 한다.

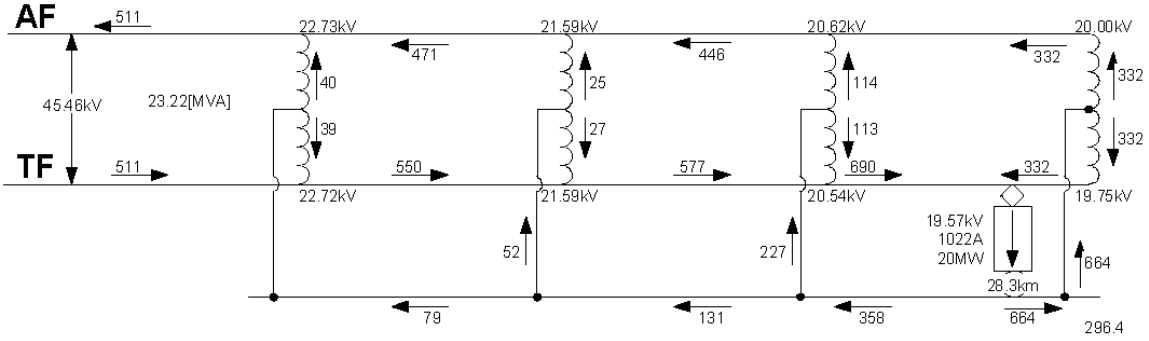


그림 6. 급전회로 전압/전류분포(기존 단권변압기)

기존의 1:1 단권변압기를 사용할 때 급전회로의 전압/전류 분포는 그림6.과 같다. 차량의 위치는 변전소로부터 28.3[km]지점에 있으며 집전전압은 19.57[kV], 차량에 흐르는 전류는 1,022[A]이다. 28.8[km]지점에 있는 차량에 20[MW]의 전력을 공급하기 위하여 변전소 급전측에서는 23.22[MVA] 즉, (22.17+j6.90)[MVA]를 공급하여야 하며, 이때 급전측의 전압은 45.46[kV], 공급전류는 511[A]이다.

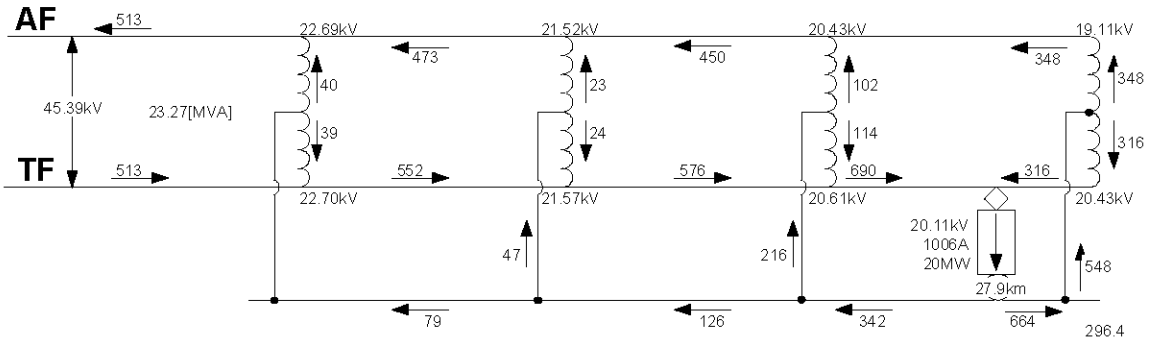


그림 7. 급전회로 전압/전류 분포(가변탭 단권변압기, N=1.1)

가변탭 단권변압기(N=1.10)를 SP에 설치하였을 때 동일한 조건에서 급전회로의 전압/전류 분포는 그림7.과 같다. 차량이 최저전압이 되는 위치는 변전소로부터 27.9[km]이며, 차량의 접전전압은 20.1[kV], 차량에 흐르는 전류는 1,006[A]로 예측되었다. 이때 변전소 급전측의 급전전압은 45.39[kV], 공급전류는 513[A], 공급부하는 23.27[MVA] 즉 (22.18+j7.02)[MVA]이다.

가변탭 단권변압기를 사용함으로써 차량의 전압은 19.57[kV]에서 20.10[kV]로 530[V]의 가선전압 상승효과를 얻었으며, 이를 위해 공급측에서 0.128[MVA]의 전력이 더 공급되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

AT급전방식의 교류전기철도시스템에서 차량의 안전운행을 위하여 차량의 접전전압이 집전가능 최소전압 이상이 되어야 함은 매우 중요하다. 차량의 집전전압을 향상시키는 방안 중의 하나로 기존의 단권변압기를 가변탭 단권변압기로 변경하여 차량 집전전압의 상승효과를 검토하였다. 이를 위해 급전구분소의 단권변압기를 가변탭 단권변압기로 바꾸어 시뮬레이션을 수행하였다. 차량의 최저전압이 운행가능 최저전압(20[kV]) 이하인 경우에 대하여 가변탭 단권변압기를 급전구분소에 설치함으로써 차량의 전압이 530[V] 상승하여 운행가능 최저전압인 20[kV]이상이 됨을 시뮬레이션을 통하여 보였다. 이는 가변탭 단권변압기를 사용함으로써 집전전압을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 금번 시뮬레이션에서는 급전구분소에 가변탭 단권변압기를 설치하는 조건으로 시뮬레이션을 수행하였으나, 급전보조구분소 및 변전소내 단권변압기를 가변탭 단권변압기로 적용할 경우 차량 집전전압의 향상은 더욱 클 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, “경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화 대책연구”. 2003
2. 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.443~445, 2001
3. 이장무, 이한민 외, “급전방식에 따른 급전선로의 전송용량 예측”, 대한전기학회하계학술대회논문집, 2007
4. 이장무, 이한민 외, “기존선-고속선 연결선 구간에서 최대부하용량 평가”, 대한전기학회 하계학술대회논문집, 2008.
4. Sewan Choi 외, “Autotransformer Configurations to Enhance Utility Power Quality of High Power AC/DC Rectifier Systems", IEEE, 1996.