

집전 전압 향상을 위한 교류급전시스템의 단권변압기 구성 검토

Investigation of Autotransformer Configuration to Enhance Collecting Voltage in Train

김주락[†] · 김정훈*

Joorak Kim · Jung-Hoon Kim

Abstract AC traction power supply system has adopted autotransformer (AT) feeding method. This system has an advantage as long feeding distance. However, the countermeasure for voltage drop should be considered, because load capacity grows larger and headway grows shorter in recent electric railway system. This paper proposes the improved system configuration to enhance voltage drop in ac railway system without additional power electronic device. That is to increase turn ratio between contact wire and rail of AT. By modifying turn ratio of AT at SSP or SP, collecting voltage on train will be enhanced.

Keywords : ac traction power supply system, autotransformer, voltage drop, train voltage

요 지 국내 교류 급전시스템은 단권변압기를 이용한 방식을 채택하고 있다. 이 시스템은 흡상 변압기를 이용한 방식보다 급전 거리가 긴 장점이 있으나 최근 대용량 차량의 도입과 시격이 짧아짐에 따라 전압 강하에 대한 대응이 시급한 실정이다. 본 논문에서는 교류 급전시스템의 전압강하 해소를 위하여 SVC와 같은 추가 설비의 도입 없이 보조 급전구분소 또는 급전구분소의 단권변압기를 이용한 시스템을 제안한다. 열차가 집전받는 전차선과 레일간의 전압을 높이기 위하여 열차가 위치한 인근의 단권변압기의 권선비를 현재 1:1에서 N:1로 바꾸는 것이다. 이렇게 하면 부하에서 공급받는 전압이 높아져 열차의 효율 향상 및 부하전류의 감소 등의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

주 요 어 : 교류 급전시스템, 단권변압기(AT), 집전전압, 전압강하

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

산업 발전에 따른 수도권 지역의 인구 밀집 현상과 물류량의 증가는 도로교통의 혼잡을 초래하였고, 산업경제의 발전과 더불어 도시간의 빠르고 정확한 운송수단의 필요성에 의해 대량수송체로서 철도가 빠르게 확산되고 있다. 이러한 철도 수요의 증가는 전기철도의 도입으로 이어졌으며, 현재 국내 철도의 전철화는(2008년 기준) 53.5%로서 대부분의 구간이 전철화 되었다.

전기철도의 전기 공급 방식은 직류급전방식과 교류급전

방식이 있으며 세계적으로는 교류급전방식이 약 61%를 차지하고 있다. 국내 전기철도도 도시간 간선철도의 경우 교류급전방식을 채택하고 있다. 또, 교류급전방식은 AT(단권변압기) 및 BT(흡상변압기) 급전방식이 사용되며 대부분의 구간에서 AT를 이용하여 27.5kV×2의 전압으로 급전시스템을 운영한다.

한편, 급전시스템의 전기 부하인 열차의 경우 대규모의 이동집중부하로서, KTX의 경우 단일 열차의 용량이 약 15MVA다. 이러한 용량의 열차가 급전시스템 한 구간에서 3~4대가 진입하여 동시 견인 할 경우 상당한 전력이 공급되어야 한다. 또, 친환경 녹색 교통수단으로 인식되고 있는 철도의 인프라 확장과 함께 수송수요의 증가에 따라 점차 열차간 시격이 짧아지고 있다. 이로 인하여 급전시스템의 부하는 점차 증가하고 이에 따라 전압강하도 점차 증가하고 있다. 전압 강하가 발생하면 열차의 견인 전동기의 입력

[†] 책임저자, 교신저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : jrkim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5411 FAX : (031)460-5459

* 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부 교수

전압도 낮아져 견인 효율이 저하되어 급전시스템의 공급 전력도 증가하게 된다.

전압 강하에 대한 해법은 최근 전력전자 기술을 응용한 FACTS 설비의 도입이 주를 이루고 있으나 급전시스템은 부하의 변동이 매우 빨라 설비 적용이 쉽지만은 않다[1,2]. 이에 따라 본 논문에서는 AT의 권선비 조절을 통한 전압 강하 해법을 찾고자 한다. 현재 교류급전시스템에서 AT는 전차선, 레일 급전선에 연결되어 있으며, 전차선-레일간 및 레일-급전선간의 권선비가 동일하게 설정되어 있다. 열차는 전차선으로부터 전력을 공급받아 견인을 하므로 전차선-레일간의 권선비를 현재보다 더 높이면 열차의 집전 전압도 높아질 것이다. 즉, AT의 전차선-급전선 간의 공급 전압은 현재와 같이 유지하면서 전차선-레일간의 변압비를 급전선-레일간 보다 높여 열차의 집전 전압을 높이는 동시에 전력소비 효율을 향상시키고 전차선에 흐르는 전류를 감소시켜 열 손실도 경감하고자 한다.

2. 기존 교류 급전시스템 운영 방식

2.1 기존 급전시스템

국내 교류 전기철도에서는 통상 AT를 이용한 단상 27.5kV×2 급전방식을 채택하고 있다. 시스템은 열차에 단상의 대용량 전력을 공급하기 위해서 Fig. 1과 같이 구성된다. 전력회사로부터 전철변전소까지 3상 전력을 수전받고 스코트변압기를 통해 3상 전력을 단상으로 변환한다. 이후 단상 전력을 전차선로를 통하여 열차에 공급한다. AT는 전차선로에 10km 정도의 간격으로 설치되며 상하행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치된다.

이와 같은 급전시스템에서 AT는 1차와 2차의 권선비가

2:1로 공급측의 전압이 전차선 전압의 2배로 되어 있다. 이때문에 급전 선로의 전류는 부하전류의 1/2이 되고 전압 강하율은 전차선 전압의 1/4이 된다. 동시에 레일에 흐르는 전류를 부하 양측에 설치되어 있는 AT의 중성점을 통하여 전차선과 급전선에 흡수함으로써 양쪽 AT까지 레일에 흐르는 전류 범위가 제한되어 대지 누설 전류가 대폭 감소해 유도 장애를 없애는 등 전차선로에서는 중요한 역할을 담당하고 있다.

그러나 철도의 고속화 및 수요 증가에 따라 대용량의 차량이 도입되고 시격이 짧아지면서 AT 급전시스템도 전압 강하 대책에 대한 요구가 증대되고 있다. 최근 전압강하 보상 대책으로는 전력전자 설비를 이용한 설비를 급전시스템에 설치하여 무효전력을 보상하는 방안이 유력하나 본 논문에서는 AT의 구성 변화를 통하여 전압강하를 보상하는 시스템을 제안하고자 한다.

2.2 기존 급전시스템의 AT

교류 급전시스템에서 AT는 앞서 설명한 바와 같이 전압 강하와 유도장애에 대한 강점으로 교류 급전시스템에 채용되어 현재 국내 교류 전기철도 대부분에서 운영되고 있다. Fig. 2는 교류 급전시스템 전차선로에 연결되는 AT의 등가 회로를 보인 것이다. Fig. 2는 보조급전구분소(SSP) 혹은 병렬구분소(PP)에서 사용하는 모델이다. S/S와 구분소(SP)에서의 결선은 55kV 급전측과 선로 말단의 특성으로 좌우의 연결점이 없어지게 된다.

그림에서 보듯이 AT의 중성점은 레일(R)에 연결되고 나머지 단자 둘은 각각 전차선(TF)과 급전선(AF)에 연결된다. 현재 시스템에서 AT의 중성점은 전차선-레일 및 레일-급전선간의 권선비를 동일하게 운영하고 있다. 즉, 그림에서 V_1 과 V_2 의 정격전압은 27.5kV로 동일하다[3].

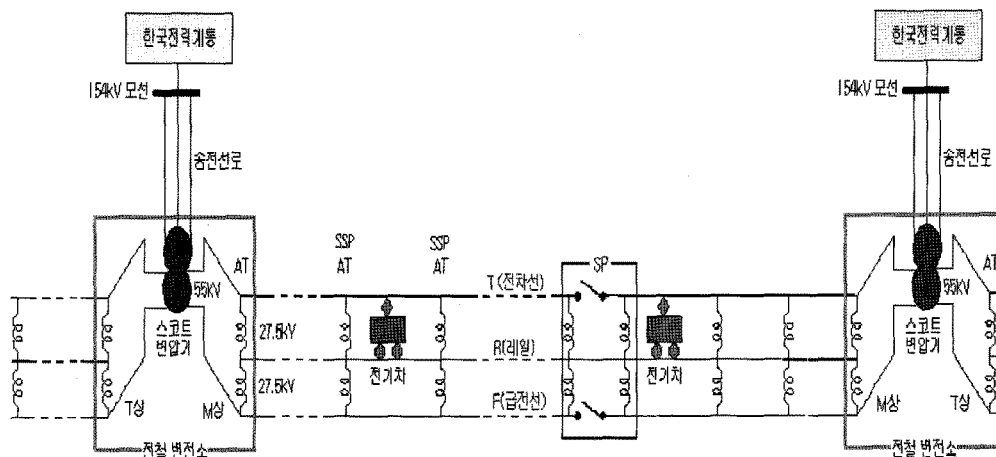


Fig. 1. Configuration of AC traction power supply system

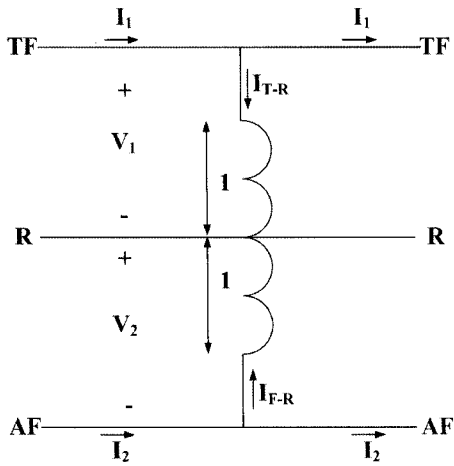


Fig. 2. Conventional autotransformer at SSP

열차는 전차선과 레일 사이에서 단상 27.5kV 전력을 공급받아 운행한다. 급전 구간에 열차가 진입하게 되면 열차가 소비하는 부하 전류가 흐르게 되고 소비하는 전력에 따라 전압강하가 발생하게 된다. 부하 전류의 크기는 전압 강하가 발생하면 더욱 증가하며 증가하는 전류에 따라 전차선로에서는 손실이 발생하게 된다.

3. 제안하는 교류 급전시스템

본 논문에서는 교류급전 시스템의 집전 효율을 높이고자 새로운 교류 급전시스템의 구성을 제안하고자 한다. 제안하는 교류 급전시스템의 핵심은 기존의 단권변압기의 전차선-레일, 레일-급전선 간의 권선비를 가변으로 하여 부하집중도에 따라 변압비를 조정하는데 있다.

3.1 급전시스템 구성

본 논문에서는 교류 급전시스템의 전압 강하 해결을 위한 방안으로 무효전력 보상 설비의 도입 대신 현 급전시스템의 구성 변경을 제안한다. 새로운 시스템은 보조급전구분 혹은 급전구분소의 AT 중성점 탭 변환을 도입하는 것이다. 즉, Fig. 1의 급전시스템의 설비중 스코트 변압기와 전차선로 등은 변경없이 사용하고 보조급전구분소와 급전구분소의 AT를 탭변환이 가능한 것으로 대체하는 것이다.

Fig. 3은 제안하는 AT의 권선비 조정을 나타낸다. Fig. 좌측의 AT는 현재 운영중인 것으로 TF-R, R-AF간의 전압 비율이 1:1로서 공칭전압은 동일하게 27.5kV이다. 그러나 우측의 제안하는 단권변압기는 TF-R, R-AF간의 전압 비율이 1:1이 아닌 $N_1 : N_2$ 로서 AT 중성점의 권선내 위치를 가변시킬 수 있는 구조를 가지게 된다. 이렇게 되면 전차선과 레일간의 전압을 기존 전압보다 높게 설정할 수 있어 열

차의 집전전압을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

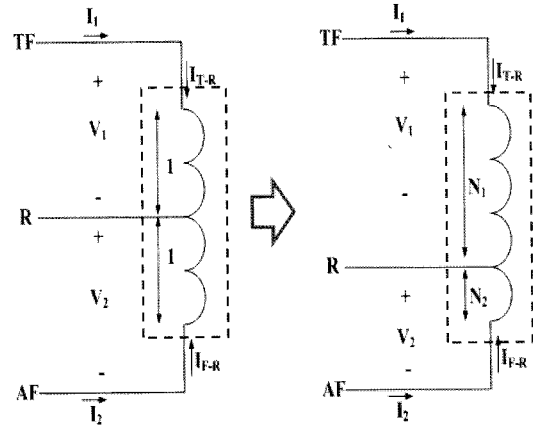
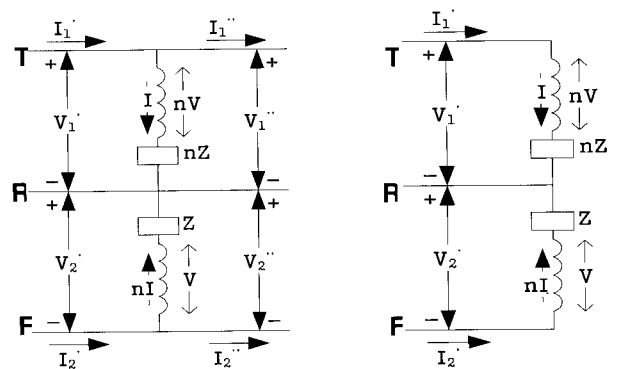


Fig. 3. Proposed autotransformer at SP

3.2 탭변환이 가능한 AT

본 연구에서 제안하는 변압비 조정은 실제로 열차가 전력을 공급받게 되는 TF-R간의 전압을 R-AF간의 전압보다 높게 하기 위하여 변압비를 $N_1 = N_2$ 에서 $N_1 > N_2$ 로 운영하는 것이다. AT의 변압비를 이와 같이 유지하면, 무부하시 Fig. 4의 V_1 이 V_2 보다 변압비만큼 상승하게 된다. 즉, AT의 변압비 조정은 R-AF 사이의 턴수(N_2)를 TF-R 사이의 턴수(N_1) 보다 작게 중성점(R)을 변화시켜 전체전압 (TF-AF 양단 전압)이 동일한 상태에서 TF-R 간의 전압을 증가시키고, R-AF간의 전압을 감소시켜 열차가 집전 받는 전압(TF-R간 전압)을 높여주는 것이다. 이때 TF-R 및 R-AF간의 권선비가 달라지므로 그에 따른 임피던스도 마찬가지로 달라진다.



(a) Autotransformer at SSP (b) Autotransformer at SP
Fig. 4. Equivalent circuit for proposed autotransformer

이렇게 달라지는 구성에 대응하는 단권변압기 양단의 전압 및 전류의 관계는 Fig. 4의 보조급전구분소 및 급전구분소에 설치되는 AT의 등가 회로에서 계산할 수 있다. 이때,

AT의 권선 임피던스는 Z_{at} 로 표시한다. 식 (1)~(4)는 보조 급전구분소 AT의 관계식을 보인 것이다.

$$V_1' = V_1'' \quad (1)$$

$$V_2' = V_2'' \quad (2)$$

$$I_1' = \frac{1}{2(1+n)} V_1'' - \frac{1}{2(1+n)} V_2'' + I_1'' \quad (3)$$

$$I_2' = \frac{1}{2(1+n)} V_1'' - \frac{1}{2(1+n)} V_2'' + I_2'' \quad (4)$$

- 단, V_1' : SSP 입력단의 전차선-레일간 전압 [V]
- V_1'' : SSP 출력단의 전차선-레일간 전압 [V]
- V_2' : SSP 입력단의 레일-급전선간 전압 [V]
- V_2'' : SSP 출력단의 레일-급전선간 전압 [V]
- I_1' : SSP 입력단의 전차선 전류 [A]
- I_1'' : SSP 출력단의 전차선 전류 [A]
- I_2' : SSP 입력단의 급전선 전류 [A]
- I_2'' : SSP 출력단의 급전선 전류 [A]
- n : 전차선-레일간 권선비(레일-급전선간 권선비는 1)

또, 급전구분소 AT에서의 전압, 전류의 관계식은 다음과 같다. 단, 식 (5)~(8)의 기호는 식 (1)~(4)와 동일하다.

$$V_1' = V + 2n Z_{at} I \quad (5)$$

$$V_2' = V - 2n Z_{at} I \quad (6)$$

$$I_1' = I \quad (7)$$

$$I_2' = I \quad (8)$$

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 AT의 권선비 조절을 통한 열차의 집전 성능 향상의 적정성을 검토하기 위하여 다음과 같이 집전 전압 향상, 단락 모의 등의 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션은 경부고속철도의 전철변전소 중 한 곳을 선택하여 시행하였다. 대상 변전소의 급전거리는 편상 기준 30km로 설정하였다. Table 1은 시뮬레이션 대상 전철변전소의 각종 임피던스를 보여준다. 이때 주변압기의 용량은 45/60MVA로 고려하였다.

AT의 권선비 변화에 따른 전압강하, 단락 전류 및 단락 임피던스를 계산하기 위해 Fig. 5와 같은 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 그림은 간단히 표현하기 위하여 SSP와 SP로 구성된 계통으로 나타내었으나 실제 시뮬레이션은 SSP 2개소로 배치하였다.

Table 1. Impedance data of the selected substation

항 목		%임피던스	Ω 임피던스	
			154kV기준	55kV기준
한전모선		0.079+ j0.955	0.187+j2.265	0.0239+j0.289
송전선로		0.357+ j1.982	0.847+j4.701	0.108+j0.600
주 변압기	M상	9.58%		j6.440
	T상	9.48%		j6.373

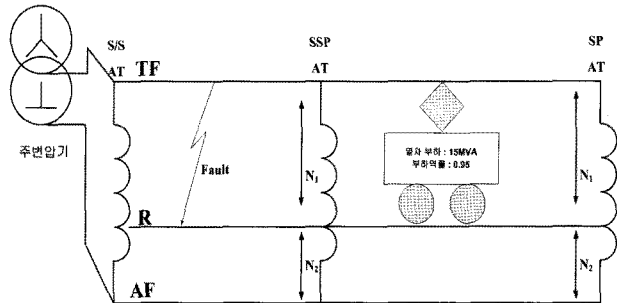


Fig. 5. Diagram for simulation

각 시뮬레이션은 모두 AT의 권선비를 1:1(27.5kV:27.5 kV), 1.2:1(30kV:25kV) 및 1.5:1(33kV:22kV) 3가지로 설정하여 각 결과를 비교하였다. 시뮬레이션은 PSCAD/ EMTDC를 이용하였다.

4.2 열차 집전 전압 보상

AT의 권선비 조절로 집전 전압의 향상을 검토하기 위한 시뮬레이션은 Fig. 5와 같이 급전구분소 3km 앞에 15MVA (역률 0.95)의 열차 부하를 가정하고 열차 인근 AT의 권선비 조절로 집전 전압의 변화를 계산하여 Table 2와 같은 결과를 얻었다.

Table 2에서 보여주듯이 AT의 TF-R 사이의 권선비 1:1일 때 24.327kV였던 집전 전압이 1.2:1로 높였을 때 26.327kV로 상승하였으며, 1.5:1일 때 26.689kV로 높아졌다. 이때 공칭전압 27.5kV 대비 전압 상승률은 5.9%와 7.4%로 계산되었다. Fig. 6은 AT 권선비에 따른 집전 전압을 비교한 것이다.

Table 2. Train voltage comparison related to turn ratio

항 목	순시값 [kV]	실효값 [kV]	상승률 [%]
권선비			
1 : 1	35.189	24.843	-
1.2 : 1	37.286	26.327	5.973
1.5 : 1	37.791	26.689	7.430

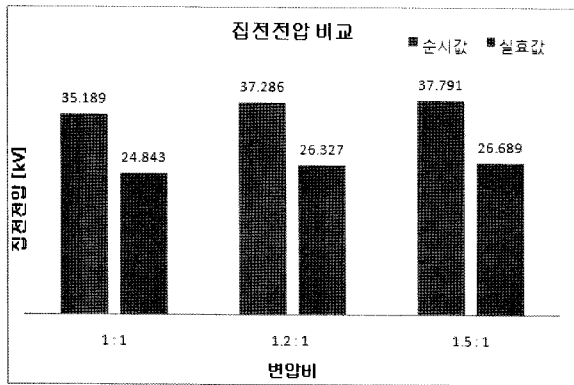


Fig. 6. Comparison of train voltages related to turn ratio

4.3 고장 전류 검토

집전 전압 향상을 위하여 AT의 권선비 조정 후 급전시스템에 고장이 발생하였을 때 끼치는 영향을 검토하기 위하여 단락을 모의하여 단락 전류를 검토하였다. 단락 전류 시뮬레이션은 급전 구분소의 단권변압기 권선비에 따라 수행하였으며, 각 경우별로 단락위치를 전철변전소부터 급전구분소까지 1km 단위로 단락을 상정하였다.

Fig. 7은 단락 위치에 따라 전철변전소에서 공급한 전류를 보여준다. 계산 결과 권선비의 변화에도 단락시 공급전류는 차이가 거의 없었다. 그 이유는 열차의 인근 급전구분소의 AT만 권선비를 변화시켰기 때문이다. 즉, 전철변전소에서 30km 떨어진 급전구분소의 AT 권선비 변경은 단락 사고시 전철변전소에서 바라보았을 때 큰 변화가 아닌 것이다. 따라서 과전류에 대한 각종 설비의 설정도 변화 없이 사용해도 문제가 없을 것으로 판단된다.

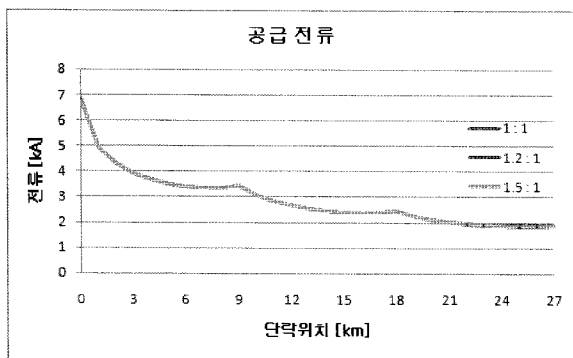


Fig. 7. Fault current at 55kV side

한편, 단락 사고시 단락 지점에서 흐르는 전류를 계산한 결과는 Fig. 8과 같다. 단락 사고시 공급 전류 계산 결과와 마찬가지로 단락 전류도 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 다만, 단락 전류는 단락 위치에서 계산한 것이기 때문에 선로 말단 급전구분소 인근에서 단락시 권선비 변화에 따른 전압의 변화로 최대 200A 정도의 차이를 보였다.

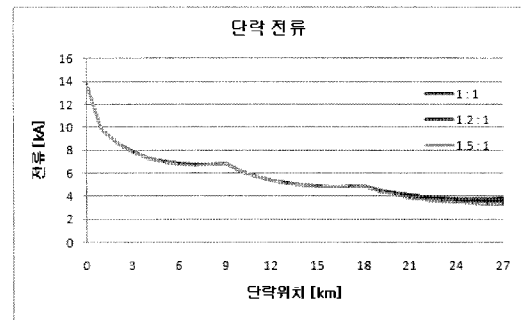


Fig. 8. Fault current at short point

4.3 단락 임피던스 검토

단락 전류 시뮬레이션과 더불어 동일한 단락 사고시에 전철변전소에서 바라본 임피던스도 검토하였다. 단락 임피던스는 급전시스템의 계전기 정정에 매우 중요한 자료이므로 시스템에 변화가 있을 때에는 반드시 검토하여야 한다. 검토한 대상은 55kV 공급측에서 바라본 단락 임피던스, 44계전기에서 바라본 임피던스 및 27.5kV측에서 바라본 단락 임피던스 등이다. 단락 사고 상정은 단락 전류 시뮬레이션과 마찬가지로 전철변전소부터 급전구분소까지 1km 단위로 하였다. Fig. 9~11은 단락 임피던스 결과를 도시한 것으로서, 각각 55kV측, 44계전기측 및 27.5kV측에서 바라본 결과들이다. 3가지 결과 모두 동일한 형태의 결과를 보였으며, 4그래프에서 보여주듯이 AT 권선비를 조정한 급전구분소 인근의 사고 때 약 0.3Ω 이내에서 차이를 보였다.

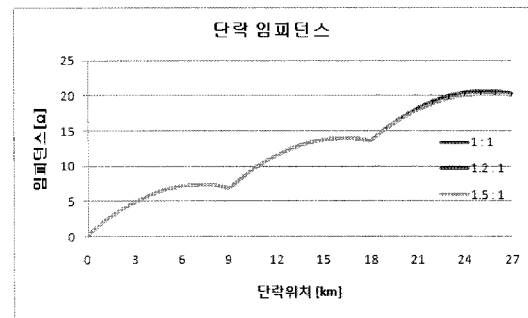


Fig. 9. Fault Impedance at 55kV side

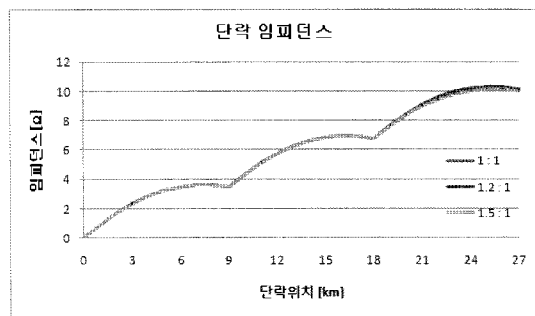


Fig. 10. Fault Impedance at 44 relay

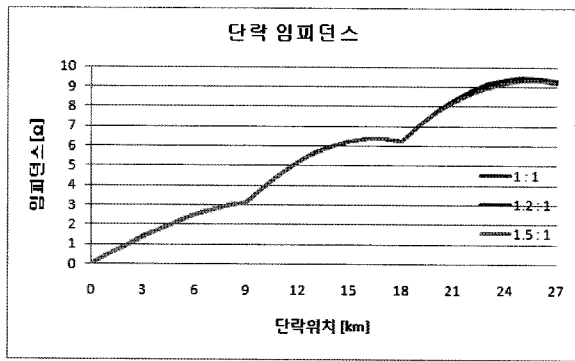


Fig. 11. Fault Impedance at 27.5kV side

4. 결론

본 논문에서는 교류 급전시스템의 집전 전압을 향상시키는 방안을 제시하였다. 기존 시스템에서 추가 설비의 도입 없이 변전소, 보조급전구분소 및 급전구분소에 시설되어 있는 AT의 변압비를 조정하여 실제 열차에서 집전 받는 전압을 높이는 방안을 제안하였다.

제안한 방안의 효과 및 적정성을 검토하기 위해서 PSCAD/EMTDC로 구성된 급전시스템에서 전압강하 시뮬레이션 및 단락 사고 시뮬레이션을 수행하였다. 전압강하 시뮬레이션은 급전구분소 AT의 권선비 변화에 따른 열차 집전전압을 각 변압비에 따라 계산하여 상호 비교하였다. 비교 결과 AT의 TF-R 사이의 권선비를 상향 조정 하였을 때 기존 시스템과 대비하여 약 5% 이상의 집전 전압이 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 또, 급전시스템 말단의 AT 변압비 변화에 따른 시스템 성능 검토를 위하여 매 1km마다의 단락 사고를 상정하여 단락 임피던스 및 단락 전류의 변화를 비교 검토 하였다. 그 결과 시스템의 안정성에는 크게

무리 없는 것으로 판단되었다.

향후 가변탭 기능을 가진 AT의 개발과 부하상태에서의 탭변환 제어기법의 도입이 이루어지면 전압강하에 유연하게 대처 할 수 있는 교류 급전시스템의 구성이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 오광해 외 (2000), “경부고속철도 서울-대전구간 고조파 전압불평형 역률 예측계산 및 대책설계,” 한국철도기술연구원.
2. 이장무 외 (2002), “경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화 대책연구,” 한국철도기술연구원.
3. 창상훈 (2001), “전기철도 급전시스템의 다단차망 모델링, 정태 해석과 전력품질 평가,” 박사학위논문, 홍익대학교.
4. 김주락, 심건보, 김정훈 (2005), “MTL 모델을 이용한 전차선로 모델링,” 대한전기학회 하계학술대회논문집.
5. S. Choi et al. (1996), “Autotransformer configurations to enhance utility power quality of high power AC/DC rectifier systems,” IEEE Particle Accelerator Conference Proceeding.
6. 전용주, 이유경, 조광우, 이성욱 (2006), “전기철도의 부하패턴 분석을 통한 피크 에너지 절감방안 연구,” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
7. Manitoba HVDC Research Center Inc. (2005), “EMTDC user's guide.”
8. 김정철 (2004), “전기철도의 급전시스템과 보호,” 기다리.
9. C. K. Alexander (2001), “Fundamentals of electric circuits,” McGraw-Hill.
10. 창상훈, 김주락, 홍재승, 오광해, 김정훈 (2000), “전기철도 교류 급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구,” 한국철도학회 논문집, Vol. 3, No. 4, pp. 219-228.

접수일(2009년 11월 23일), 수정일(2010년 1월 12일),
 게재확정일(2010년 2월 5일)