

교류전기철도시스템에서 급전계통 구성에 따른 급전성능 비교검토

이 장 무 오 광 해 창 상 훈 한 문 섭
한국철도기술연구원

The comparison and investigation of power supply capability according to feeding schemes in AC electric railway system

Chang-Mu Lee, Kwang-Hae Oh, Sang-Hun Chang, Mun-Seub Han
Korea Railroad Research Institute

Abstract - The electrified railway has various power supply schemes. Although the identical trains are operated in same condition and the impedance of track are equal, the genealogy impedance of track is changed according to composition method of feeding scheme. So, the collection voltage of train and supplying power from railway substation are greatly unlike.

For simulation of collection voltage and power supply according to feeding scheme, using 6-port network analysis proposed previously, simulate collection voltage and supply power according to feeding scheme(Parallel Post feeding system, normal feeding system and tie feeding system) and compare and investigate each characteristics.

데, 급전계통구성형태에 따라 변전소를 중심으로 좌·우의 급전회로에 급전하는 방법별 급전방식과 상·하선별로 급전하는 상·하선별 급전방식이 있다.

현재 국내에서 운용중인 급전계통 구성방식은 방법별 급전방식으로 상·하선 분리방식(SSP급전방식), 상·하선 Tie 연결방식(Tie 급전방식)과 상·하선 병렬연결방식(PP 급전방식)이 있다.

SSP 급전방식은 상선과 하선을 전기적으로 분리하여 급전하고 비상시에 급전구분소에서 상선과 하선을 연결하는 방식이며, Tie 급전방식은 상선과 하선을 구분소에서 상시 Tie로 연결하여 운용하고 PP 급전방식은 상선과 하선을 각 보조구분소와 구분소에서 전기적으로 연결하고 선로장애 발생시 상·하선을 구분하여 전선선로만 운용하는 방식이다. 그림 1.에 급전방식별 급전계통도와 결선도를 나타내었다.

1. 서 론

교류전기철도시스템은 다양한 급전계통 구성방식(SSP 급전, Tie 급전, 병렬급전소급전(PP급전) 등)을 가지고 있다. 현재 건설중인 경부고속철도는 병렬급전소급전(PP급전)방식을, 철도청 산업선 구간과 현재 건설중인 충북선 구간은 정상급전방식을, 그리고 열차운행이 많은 수도권 전철구간의 경우 Tie급전방식을 채택하여 급전계통을 구성하고 있다.

전기차량이 전철급전구간을 운행할 때, 차량은 전차선로를 통하여 차량에 필요한 전력을 공급받는다. 동일한 차량이 동일한 조건으로 동일한 선로에서 운행하더라도 급전계통 구성방식에 따라 선로의 계통임피던스가 달라지게 되어 차량이 집전하는 전압이 달라지게 된다. 이에 따라 변전소에서 급전하는 전류량이 변화하여 선로에서의 전압강하가 크게 달라지고 변전소 급전전력도 변화해 된다.

따라서 본 연구에서는 이전에 제안한 전철급전계통 6단자 해석모델을 이용하여 각 급전계통 구성방식의 전기적 특성(회로의 단락임피던스, 차량의 집전전압, 변전소의 공급전력, 역률, 불평형율과 전압왜형율)을 비교하였다.

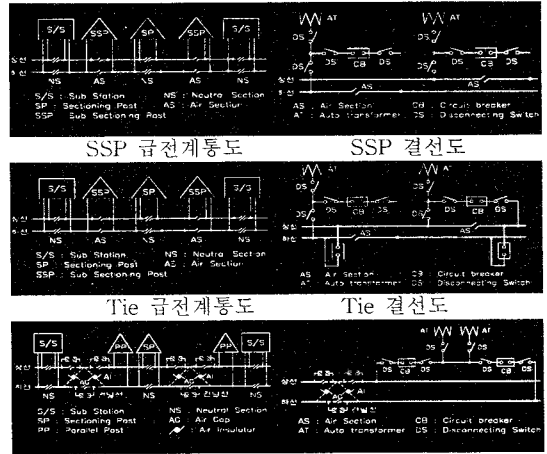
2.1장에서는 각 급전계통 구성방식의 개요를 간단히 설명하고, 2.2장에서는 6단자 해석모델을 이용한 급전계통 시뮬레이션 방안을 수립하며, 2.3장에서는 시뮬레이션 결과를 제시한다.

마지막으로 3장에서는 시뮬레이션 결과를 비교 검토한다.

2. 본 론

2.1 급전계통 구성방식

단상교류전기철도는 3상의 전력을 전철변전소에서 변압기에 의하여 25kV 2상 전원으로 변환하여 공급하는



PP 급전계통도 Tie 급전계통도 SSP 급전계통도
그림 1. 계통도 및 결선도

2.2 시뮬레이션 방안

기존에 제안한 6단자 해석모델을 복선선로에 적용하기 위하여 변전소내 단권변압기에 대한 모델링을 복선선로에 맞게 변경하고, 병렬선로에 대한 해석방안을 제안한다.

2.2.1 복선선로 변전소 단권변압기

기존에 제안한 6단자 해석모델은 식 (1)과 [4x4] 행렬식으로 급전계통의 회로요소를 모델링하였다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [M_{4 \times 4}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{식(1)}$$

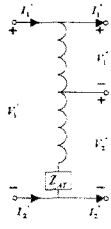


그림 2. 단선선로 변전소 단권변압기

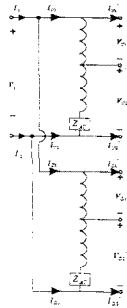


그림 3. 복선선로 변전소단권변압기

이는 단선 전차선로의 경우에 대하여는 바로 적용할 수가 있으나 복선전차선로에 적용하기 위해 필요한 회로 모델을 수정하여야 한다.

따라서 6단자 해석모델을 복선전차선로로 확장하기 위하여 변전소 단권변압기에 대한 회로모델을 그림 2와 같은 단선선로 모델에서 그림 3의 복선선로 모델로 수정하였고, 이에 대한 모델식은 식(2)와 같다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \\ V_1' \\ I_1' \\ V_1 \\ I_1 \\ V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 2 & 0 & \frac{Z_{af}}{4} & \frac{Z_{af}}{4} & 0 & 0 & \frac{Z_{af}}{4} & \frac{Z_{af}}{4} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & \frac{Z_{af}}{4} & \frac{Z_{af}}{4} & 2 & 0 & \frac{Z_{af}}{4} & \frac{Z_{af}}{4} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{C1}' \\ V_{C2}' \\ I_{C1}' \\ I_{C2}' \\ V_{D1}' \\ V_{D2}' \\ I_{D1}' \\ I_{D2}' \end{pmatrix} \quad \text{식(2)}$$

2.2.2 병렬선로 해석

아래 그림 4와 같은 병렬선로 회로해석을 위하여, 식 (3)과 같은 상선과 하선의 전송행렬을 어드미턴스 파라미터를 이용하여 병렬 접속하여 상선과 하선의 병렬접속 행렬 M을 구하고자 한다.

$$\begin{pmatrix} V_{C1}' \\ V_{C2}' \\ I_{C1}' \\ I_{C2}' \end{pmatrix} = [M_C] \begin{pmatrix} V_{C1}' \\ V_{C2}' \\ I_{C1}' \\ I_{C2}' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} V_{D1}' \\ V_{D2}' \\ I_{D1}' \\ I_{D2}' \end{pmatrix} = [M_D] \begin{pmatrix} V_{D1}' \\ V_{D2}' \\ I_{D1}' \\ I_{D2}' \end{pmatrix} \quad \text{식(3)}$$

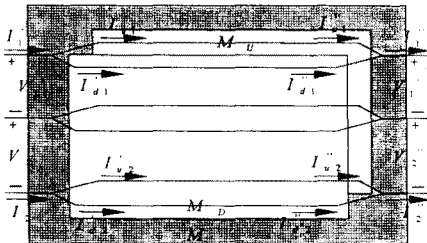


그림 4. 병렬선로의 합성

따라서 식 (3)을 어드미턴스 파라미터로 바꾸어 나타내면

$$\begin{pmatrix} I_{C1}' \\ I_{C2}' \\ I_{C1}' \\ I_{C2}' \end{pmatrix} = [Y_C] \begin{pmatrix} V_{C1}' \\ V_{C2}' \\ V_{C1}' \\ V_{C2}' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} I_{D1}' \\ I_{D2}' \\ I_{D1}' \\ I_{D2}' \end{pmatrix} = [Y_D] \begin{pmatrix} V_{D1}' \\ V_{D2}' \\ V_{D1}' \\ V_{D2}' \end{pmatrix} \quad \text{식(4)}$$

가 되며, 이를 병렬 접속하면

$$\begin{pmatrix} I_1' \\ I_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{pmatrix} = [Y_C + Y_D] \begin{pmatrix} V_1' \\ V_2' \\ V_1' \\ V_2' \end{pmatrix} = [Y] \begin{pmatrix} V_1' \\ V_2' \\ V_1' \\ V_2' \end{pmatrix}$$

이 되고 다시 전송행렬로 변환하면

$$\begin{pmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{pmatrix} = [M] \begin{pmatrix} V_1' \\ V_2' \\ I_1' \\ I_2' \end{pmatrix}$$

으로 상선과 하선의 병렬접속행렬 M을 구할수 있다.

2.3 시뮬레이션 결과

급전계통 구성방식에 따른 전기적 특성(단락임피던스, 전압강하, 급전전력 등)을 비교하기 위하여 사용된 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

시뮬레이션 조건

변전소 급전거리 : 60km(M상, T상 각 30km)

AT 간격 : 10km

선로임피던스

	자기임피던스(Ω/km)
전차선	0.1401+j0.2898
레 일	0.0554+j0.1033
급전선	0.1776+j0.4409
	정전용량(μF/km)
전차선-레 일	0.5252+j9.8289
전차선-급전선	0.5033+j5.2127
레 일-급전선	0.5004+j5.0983

위의 조건으로 정상급전과 연장급전의 경우에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다.

아래 그림 5와 그림 6은 단락위치에 따른 임피던스를 보여준다. 단락임피던스는 정상급전의 경우, SSP 방식과 비교하여 평균적으로 Tie방식은 75.2%, PP방식은 63.3%로 PP방식이 단락임피던스가 가장 작음을 알 수 있다. 또한 연장급전의 경우도 Tie방식은 89%, PP방식은 79.3%로 PP방식이 단락임피던스가 가장 작음을 알 수 있다.

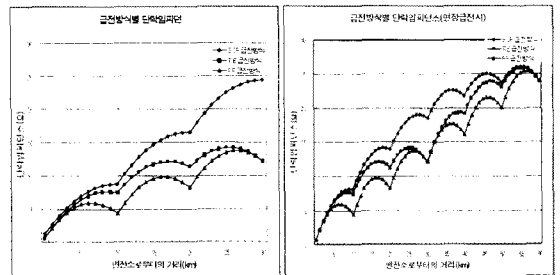


그림 5. 단락임피던스(정상급전) 그림 6. 단락임피던스(연장급전)

다음 그림 7과 그림 8은 차량이 일정한 부하전력을 소모하면서 변전소 급전구간을 운행하고 있을 때 급전방식에 따른 차량의 집전전압을 나타낸 것이다. 정상급전의 경우, 차량이 급전구분소에 위치할 경우에 Tie방식과 PP방식이 집전전압이 SSP방식보다 1.59kV정도 높은 것으로 나타났으며, PP방식의 집전전압이 Tie방식에 비

교하여 차량이 급전보조구분소 위치에 있을 경우 330V 정도 높은 것으로 나타났다.

또한 연장급전의 경우 차량이 급전구간의 중간인 급전구분소 위치에 있을 때 Tie와 PP방식이 SSP방식에 비교하여 770V정도 집전전압이 높은 것으로 나타났다.

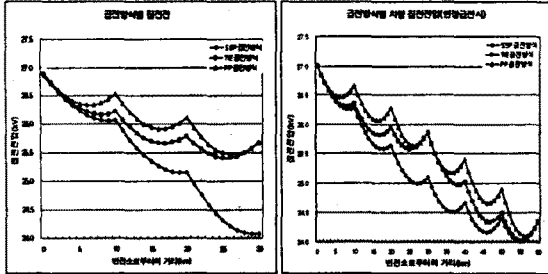


그림 7. 차량집전전압(정상급전) 그림 8 차량집전전압(정상급전)

그림 9와 그림 10은 차량의 위치에 따른 변전소의 급전전력을 나타낸 것이다. 차량이 변전소 위치에 있는 경우에 비하여 SSP방식은 최대 1.53MVA, Tie방식은 최대 0.79MVA, PP방식은 최대 0.75MVA의 급전전력이 증가한다. 또한 Tie와 PP방식에 비하여 SSP방식은 차량이 급전구분소의 위치에 있을 때 급전전력이 0.9MVA 더 증가함을 알 수 있다.

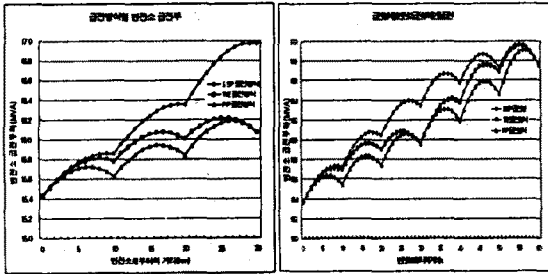


그림 9 변전소급전부하(정상급전) 그림 10 변전소급전부하(정상급전)

다음 표는 열차가 10분시격으로 운행하는 경우에 대하여 급전방식별로 급전시뮬레이션을 실시한 결과를 보인 것이다. 모든 측면에서 PP급전방식이 더 우수함을 알 수 있다.

표 1. 급전방식별 급전시뮬레이션 결과

		SSP급전방식	Tie급전방식	PP급전방식	
집전 전압 (kV)	M상	최소	23.07	24.37	24.34
		최대	27.42	27.47	27.49
	T상	최소	23.65	24.69	24.82
		최대	27.57	27.58	27.62
급전부하 15분최대(MVA)	M상	17.804	17.471	16.953	
	T상	17.157	16.902	16.411	
불평형율(%)		0.5133	0.5070	0.5067	
역률 (1시간평균)	M상	0.9656	0.9718	0.9741	
	T상	0.9679	0.9725	0.9745	
전압왜형율 (10분평균 최대)	A상	3.5529	3.8789	3.2150	
	B상	5.0956	5.1430	3.9966	
	C상	4.0120	3.8543	1.1180	

3. 결 론

본 논문에서는 급전계통구성방식에 따른 급전성능을 알아보기 위하여 기존에 제안한 전철급전계통 6단자 해석모델을 이용하여 급전시뮬레이션을 실시하였다.

모든 전기적 요소(단락임피던스, 집전전압, 공급전력, 불평형, 역률, 왜형을 등)를 비교할 때 PP급전방식이 가장 우수함을 알 수 있다.

그러나 신선 건설 또는 기존선 전철화를 할 경우 급전방식을 선정할 때는 전기적 특성 외에 초기투자비, 유지보수, 시스템 운용성 등을 함께 고려하여 최적의 급전방식을 선정하여야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국철도기술연구원, "고속전철 서울-대전구간 고조파, 전압불평형, 역률 예측계산 및 대책설계", 1999
- [2] 오광해 외, "경부고속철도 시험선구간의 고조파 예측 및 측정분석", 한국철도학회, 춘계학술대회논문집, pp100-107, 2000
- [3] 이장무 외, "고속철도의 급전계통 구성에 따른 고조파 확대율 비교검토", 대한전기학회, 하계학술대회논문집 B권, pp1402-1404, 2000
- [4] 오광해 외, "Harmonic Analysis Based on Four-port Representation for Traction Power Supply System", ICEE Proceedings, pp165-168, 2000