

철도차량 운행 및 선로조건에 따른 교류 급전시스템의 안정성 연구

김재문*, 김양수*, 이종성**
한국철도대학*, 부천대학**

A study on stability of feeder system considering driving of railway vehicle and rail conditions

Jae-Moon Kim*, Yang-Su Kim*, Jong-Sung Lee**
Korean National Railroad College University*, Bucheon University**

Abstract - It is important to consider power stability in case of design and construction of a substation at railroad because a train is operated by electricity and tains are driven simultaneous at the same section. This paper described stability of feeder system considering driving conditions and railroad conditions of train which is driven. Simulation tool, TOM(Train Operations Model) software is used to ensure stability of feeder system. As results of simulation, feeder voltage source is in limits on driving operation dia of trains.

1. 서 론

열차 운행 시 변전소에서 공급하는 부하를 산출하기 위해 기존에는 한 대의 열차에 대한 평균 전력에 변전소 공급거리와 열차 운행밀도를 곱하는 근사적인 방법을 사용해왔으나 프랑스, 영국 등 선진 철도국에서는 이미 오래 전부터 급전시뮬레이션 소프트웨어를 개발하여 실무에 적용하고 있는 상태이다. 현재 국내에서도 국가출연기관인 한국철도기술연구원에서 자체 개발한 급전시뮬레이션 프로그램이 있으나, 사용에 따른 저변확대 미흡 및 관련업체 사용에 제한적 요소가 존재하고 있다.

시뮬레이션에 따른 결과물은 급전 설비의 용량 결정뿐만 아니라 기존 시스템에서 열차의 운행 계획을 변경할 때에 그에 따른 전체 전력 소비량의 변화를 예측하고 급전계통 측면에서 공급이 가능한지를 검토하는 데에도 사용된다. 특히 급전 계통의 설계에 있어서 열차의 주행 성능과 관련하여 상세히 검토해야 할 사항은 급전계통의 전압강하이다. 열차가 주행하는 데에 충분한 성능을 보장하기 위하여 전차선의 전압이 적정하게 유지되어야 하지만 여러 대의 열차가 운행하는 상황에서는 전압의 변동이 심하게 나타나기 때문에 시뮬레이션을 통하여 변전소의 위치 및 용량, 급전선로의 용량 등의 설계 시에 이를 반영하여야 한다. 또한 열차 운행 계획의 변경 시에도 급전계통 측면에서 전력 수요가 용량 범위 내에 있는지와 전압 유지가 가능한지 검토해야 한다[1-2].

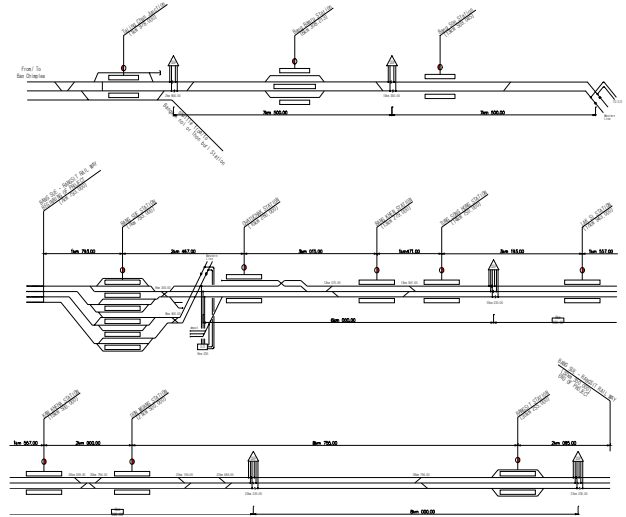
본 논문에서는 동남아지역에 있는 국가 중 Red-Line North ~ West간 전철변전소의 급전계통에 나타나는 현상을 정확히 파악하기 위해 급전계통 자체의 전기적 특성 이외에도 열차의 주행 특성 및 전력 소비 패턴, 열차 운행 계획에 따른 열차의 공간적 분포, 선로의 구배 및 곡선반경 등 종합적인 시스템에 대한 해석을 하여 급전 계통을 분석하였으며, 이에 따른 급전시스템의 안정성을 검토하였다.

2. 본 론

전기철도 급전계통에 대한 시뮬레이션을 위해, 우선 검토 대상 선로에 투입될 열차의 종류 및 그 운행 패턴을 설정한다. 그리고 각각에 대한 열차주행 시뮬레이션을 수행하면 운행 구간 내에서 시각별 위치, 속도, 전력소비량 등이 계산된다. 이렇게 계산된 열차 운전곡선을 열차운행 계획에 따라 배열하면 매 순간마다 모든 열차의 위치 및 소비전력이 결정되므로 이를 추출하여 각 변전소마다 공급 구간 내에 있는 열차의 소비전력을 합산하여 변전소 부하를 계산할 수 있고 각 열차 위치에서의 전압이 계산된다.

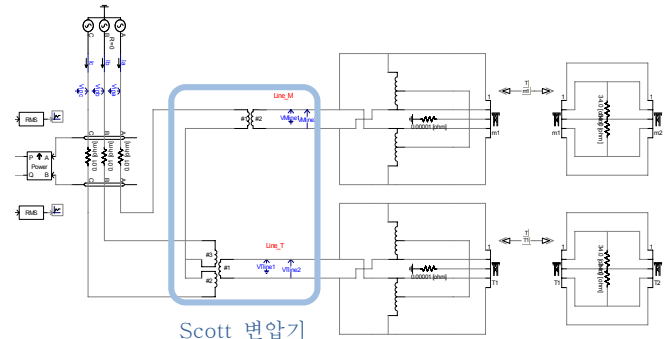
2.1 급전계통의 주요 요소

전원측 및 급전계통 입력자료는 “동남아 Red-Line (North~West) 건설 기본계획보고서(안)”데이터로 시뮬레이션을 수행하였으며, <그림 1>은 급전계통도를 보여준다. 전철변전소 T상(North Line)은 정상 급전시 BangSue~Rangsit 25.557km를 공급하고, M상(West Line)은 Taling Chan~BangSue 17.800km에 건인 전력을 공급한다. 이때 변전소에서 단전이나 변압기 고장 시에는 병렬로 운행되므로 영향을 받지 않는다.



<그림 1> 급전계통도

한편 전원계통에는 전압강하 등을 고려하여 단상 변압기 또는 Scott 결선 변압기를 적용하는데 국내에서는 단상 변압기를 거의 사용하지 않고 있으며 일반적으로 스코트 결선 변압기를 사용하고 있다. 이 변압기는 <그림 2>와 같이 3상에서 단상을 얻기 위하여 단상변압기 2대를 T 결선하여 3상 전원에서 상각각 90°인 단상 2회선을 공급하도록 만든 변압기이다. Scott 결선 변압기는 T상이 M상 권선의 중앙점에 결선되어 있으므로 T상의 전류가 M상 중앙점에서 M상 좌우 양쪽 권선에 각각 균등히 흐르게 되어 M상 철심에는 서로 암페어 턴수가 같고 방향이 반대인 자속이 발생하여 자속이 서로 상쇄되므로 M상 변압기 임피던스는 T상 변압기 전류 흐름에 영향을 미치지 않게 된다. 따라서 T상 변압기 임피던스와 M상 변압기 임피던스가 같게 되면 T상과 M상의 변압기의 전압강하도 같게 된다.



<그림 2> 스코트 변압기를 적용한 전원계통

<표 1>은 급전시스템을 운행하는 열차데이터를 보여준다. 열차운행 여건에 따라 1편성당 4량, 6량, 10량으로 나눌 수 있으며, <표 2>는 승차인원 및 차종별 중량을 나타낸다. 승차인원 및 차종별 중량에 따라 철도차량에 대한 부하전류 크기가 변하게 된다. 또한 편성별 열차데이터를 통해 가·감속도뿐만 아니라 견인력, 제동력 등에 영향을 준다.

<표 1> 열차데이터

구 분	단 위	EMU	EMU	EMU
1편성당 차량수	[량]	4	6	10
1편성당 견인전동기 수량	[대]	8	16	24
최고운행속도	[km/h]	160	160	160
보조동력	[kW]	350	350	350
가속도	[km/h/s]	3.2	3.2	3.2
감속도	[km/h/s]	4.5	4.5	4.5
견인효율	[%]	92	92	92
제동효율	[%]	92	92	92

<표 2> 승차인원 및 차종별 중량(단위:톤)

Load operating condition	Weight of each car			train weight (4-car train)	train weight (6-car train)
	Mc car	T car	M car		
W0, no load	38	37.5	37.5	151	226
W1, all seats occupied	40.0	39.9	39.9	159.9	239.7
W2, fully loaded	47.4	48.1	47.9	190.7	286.7
W3, crowded	51.0	52.1	52.0	206.2	310.3
W4, extremely crowded	54.7	56.2	56.0	221.6	333.8

2.2 열차운행 시뮬레이션(TPS)

Red-Line의 상행선과 하행선을 주행하는 상황을 열차데이터, 선로데이터를 사용하여 시뮬레이션을 하였으며, 열차주행 시뮬레이션 결과는 <표 3>과 <표 4>에 나타낸다. West Line을 기준으로 6량 1편성인 경우 구간별 거리와 시간, 이에 따른 속도 역행시 필요한 용량을 보여주고 있으며 회생에너지가 발생함을 볼 수 있다.

<표 3> 하행선 EMU 6량 표준 열차(West Line)

구 간	거리 [km]	Time [min]	속도 [kw/h]	역행 [kwh]	역행 [kw/km/car]	회생에너지 [kwh]
TalingChan ~ BangBamru	4.33	4.22	61.50	69.57	2.68	
BangBamru ~ BangSon	7.20	5.47	78.98	103.63	2.40	
BangSon ~ BangSue	5.29	3.72	85.43	73.97	2.33	
TOTAL	16.82	13.41	75.26	247.17	2.45	-146.6

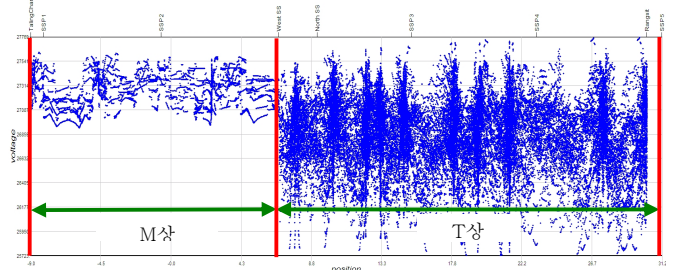
<표 4> 상행선 EMU 6량 표준 열차(West Line)

구 간	거리 [km]	Time [min]	속도 [kw/h]	역행 [kwh]	역행 [kw/km/car]	회생에너지 [kwh]
BangSue ~ BangSon	5.29	4.47	71.00	77.91	2.45	
BangSon ~ BangBamru	7.20	5.17	83.53	97.18	2.25	
BangBamru ~ TalingChan	4.33	3.76	69.13	63.89	2.46	
TOTAL	16.82	13.40	75.31	238.97	2.37	-155.7

한편 급전계통 시뮬레이션에 따른 단독급전인 경우 <표 5>, <그림 3>과 같이 전철변전소 주변압기 고장시 전력공급은 다른 1대의 변압기가 M상, T상의 견인 전력을 공급한다. Taling Chan ~ BangSue 사이의 전력공급은 전철변전소에서 Taling Chan까지 견인 전력을 공급한다. 시뮬레이션 결과 전철변전소에서 침두시 M상에서 RMS 최대 8.761[MW] (차량기지 급전전원 포함)로 나타났다. 그리고 열차집전전압은 최소 26.904[kV]로 나타나 열차운행이 이상이 없는 것으로 나타났다. T상의 경우 침두시 RMS 최대 14.851[MW]로 나타났다. 이때 열차집전전압은 최소 24.474[kV]로 나타나 열차운행이 이상이 없는 것으로 나타났다.

<표 5> 상별 예상부하(West Line 6량, North Line 4/6량 운행)

변전소	구 간	상	공급거리 [km]	RMS최대 [MW]	순시최대 [MW]	비 고
SS	West Line	M	17.800	8.761	14.301	차량기지 5[MVA]
SS	North Line	T	25.557	8.915	34.508	
	TOTAL	M+T	43.357	17.676	48.809	

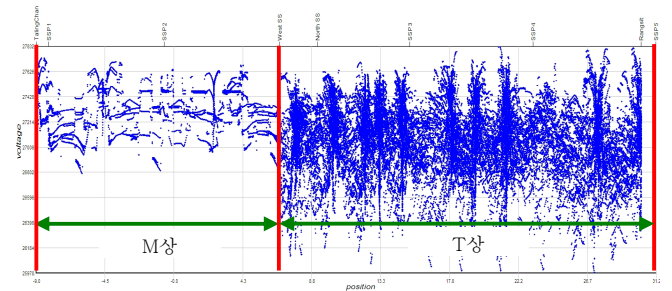


<그림 3> 변전소 집전전압(West Line 6량, North Line 4/6량 운행)

또한 정상급전인 경우 전철변전소 고장을 대비하여 평상시에는 Scott 결선 변압기 2대가 각각 단독운전으로 각 상에 견인전력을 공급한다. <표 6>, <그림 4>에서 시뮬레이션 결과를 보면 1호 변압기 M상은 침두시 RMS 최대 4.959[MW] (차량기지 급전전원 포함), 열차집전전압은 최소 26.781[kV]로 나타났고 T상은 침두시 RMS 최대 4.602[MW], 열차집전전압은 최소 25.978[kV]로 나타났다. 또 2호 변압기 M상은 침두시 RMS 최대 4.959[MW] (차량기지 급전전원 포함), 열차집전전압은 최소 26.781[kV]로 나타났고 T상은 침두시 RMS 최대 5.609[MW], 열차집전전압은 최소 25.978[kV]로 나타났다.

<표 6> 상별 예상부하(West Line 6량, North Line 4/6량 운행)

변전소	구 간	상	공급거리 [km]	RMS최대 [MW]	순시최대 [MW]	비 고
SS	West Line 1	M	17.800	4.959	10.821	Tr.1, 차량기지 2.5[MVA]
SS	North Line 1	T	25.557	4.602	15.799	
	TOTAL	M+T	43.357	9.561	26.62	
SS	West Line 2	M	17.800	4.959	10.601	Tr.2, 차량기지 2.5[MVA]
SS	North Line 2/3	T	25.557	5.609	20.950	
	TOTAL	M+T	43.357	10.568	31.551	



<그림 4> 변전소 집전전압(West Line 6량, North Line 4/6량 운행)

3. 결 론

전기철도 급전시뮬레이션 프로그램을 활용하여 열차운행 다이어 계획에 따른 운행조건 및 선로조건 등을 고려하여 급전시스템 안정성을 검토하였다. 시뮬레이션 결과 열차 집전전압 최소 및 최대 전압이 열차운행에 이상이 없는 것으로 확인되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김재문 외, "열차운행조건을 고려한 고속전철 급전 시스템 전원 안정성 연구", 2011년 대한전기학회 전기설비부문회 춘계학술대회 논문집, 2011.4
- [2] 김양수 외, "Red-Line 전철전원 급전 시스템 보고서", 2011.4