

경전철 시험선용 전력공급시스템 설계

The design of the traction power supply for the test line of Light Rail Vehicle

김국진* 백병산* 전용주* 정상기** 김남규***

Kim, Kuk-Jin Back, Byeong-San Jeon, Young-Ju Joung, Sang-Ki Kim, Nam-Kyou

ABSTRACT

In the electric railway systems, it is very important that we should design the system configuration, location and power capacity of substation. This paper presents the results of system configuration and system design of the DC traction power supply for the test line of Light Rail Vehicle.

The voltage fluctuation of train and the power capacity of substation are calculated by computer simulation using the nodal equation, K.C.L/K.V.L, Ohm's law and superposition theory.

1. 서 론

신교통 경량전철의 수요급증이 예상됨에 따라, 안전하고 효율적인 운영을 위해 직류 전력공급시스템의 최적설계가 요구되고 있다. 그러나 전기철도는 급전계통의 측면에서 보면 지속적으로 이동하는 부하이교, 선로조건이나 승객 등 주변요소들의 변동이 심하므로 급전계통의 전기적 특성뿐만 아니라 열차 운행조건, 열차특성 및 선로특성 등의 종합적인 해석이 필요하다.

본 논문에서는 전력공급시스템의 설계를 위한 이론적 배경을 소개하고, 건교부 표준화 과제로 추진중인 '경량전철 기술개발' 시험선을 사례로 직류 전력공급시스템의 설계결과를 검토코자한다. 열차의 사양, 운행방식, 노선조건 및 기본적인 변전설비 데이터 등을 입력으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고, 이 결과 전차선의 동적 전압을 토대로 변전소의 최적위치를 선정하고, 각 변전설비의 용량을 산정한다.

2. 본 론

2.1 전력공급시스템의 구성

전기철도 전력공급시스템은 변전설비, 전차선, 열차 및 귀환 레일로 구성된다. 그리고 변전설비는 일반적으로 AC 특고압반, 정류기용 변압기, 정류기반, DC 고속도차단기반 및 SCADA 시스템 등으로 구성되며, 열차에 필요한 전력과 차량기지 및 역사 설비용 전력으로 나눌 수 있다.

* 현대중공업(주) 기전연구소, 정회원

** 한국철도기술연구원, 정회원

*** 배산엔지니어링(주), 정회원

2.2 전력공급시스템의 해석알고리즘

직류 급전회로는 단위노선에 다수열차와 다수 변전소가 운영될 때 그림 2-1과 같은 전기적인 등가회로로 변환을 통하여 해석이 가능하다.[1]

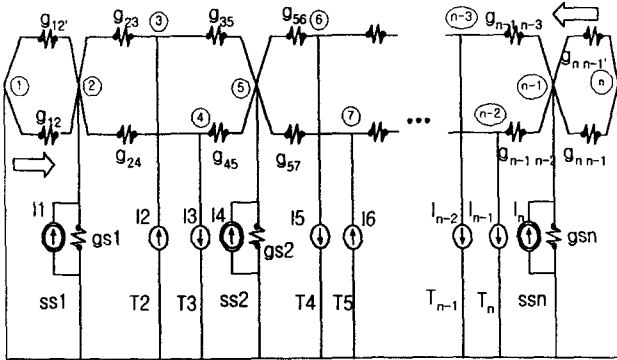


그림 2-1, 급전계통의 전기적 등가회로.

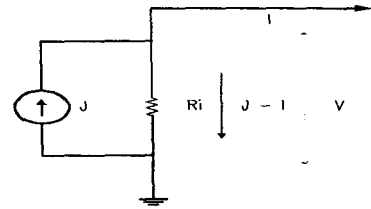


그림 2-2, 전류원 변전소 등가회로.

그림2-1에서 열차 node의 전력은 열차성능 시뮬레이션(TPS) 결과를 이용하여 산정이 가능하나, 변전소 node의 경우는 그림2-2와 같이 정전류원이므로 그 특성을 적절히 모의하는 것이 중요하게 되며 그 관계식은 식(1)과 같다.

$$V = V_{\infty} - R_i \times I \quad [V] \quad \dots \text{식(1)}$$

여기서, V : 변전소 출력 전압

V_{∞} ($V_{\infty} = J \times R_i$) : 변전소 출력 무부하 전압

R_i : 변전소 내부저항

I : 변전소 출력전류

J : 전류원 소스이다.

그림 2-1의 계통에 nodal equation을 적용하여 이를 식(2)와 같이 표현한다.

$$[G][V] = [I] \quad \dots \text{식(2)}$$

또한 그림2-1에서 열차 (T_n)로 표현된 노드의 전류값(I_n)은 TPS에 의해 식(3)과 같이 얻어진다.

$$I_n = P_n / V_n \quad [A] \quad \dots \text{식(3)}$$

식(2)의 어드미턴스 행렬 $[G]$ 는 각 노드의 접속상태에 의해 결정되며, 연결되지 않은 노드의 G 값은 0이 된다. $[V]$ 행렬은 매순간 변전소 또는 열차위치에서의 전압값으로 매순간 반복방식을 이용하여 도출해야 할 미지값이며, $[I]$ 행렬은 해당노드로 주입되는 전류의 값이다.

그림 2-3은 급전해석을 위한 전체 프로그램 구조이며, 그림 2-4는 본 논문에서 제시한 급전망 해석 알고리즘의 순서도이다.

식(2), 식(3)을 기본으로 전압의 값을 설정 오차를 내로 수렴할 때까지 반복 수행하여 시스템 해석의 기본값인 매시간에서의 각 노드(변전소, 열차)의 전압과 전류를 계산하게 된다.

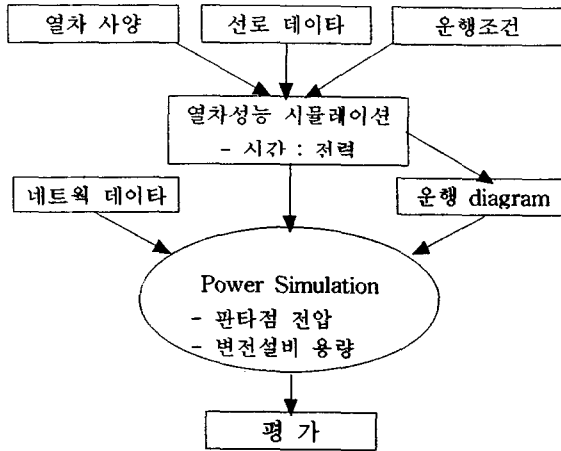


그림 2-3, 전력공급시스템 시뮬레이션 구조.

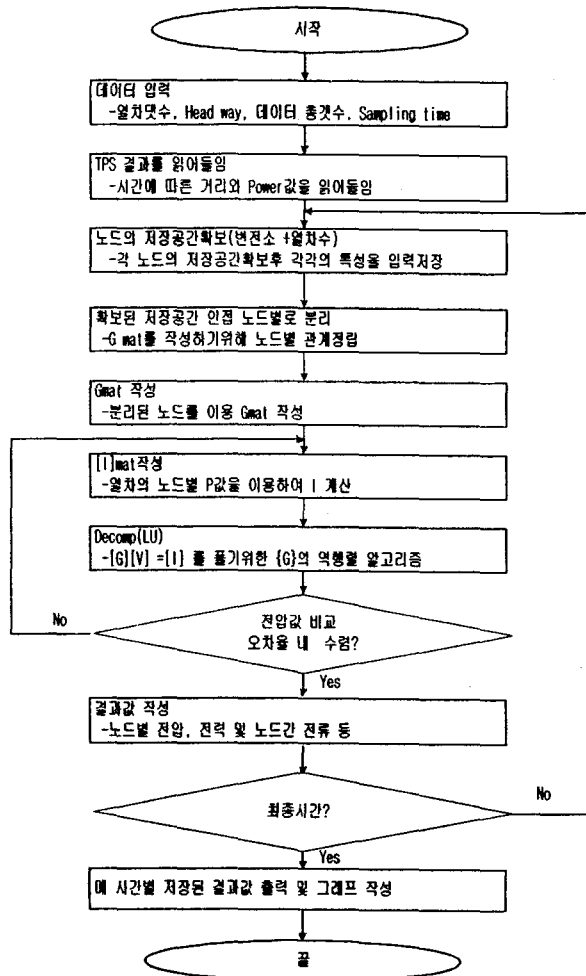


그림 2-4, 급전해석 알고리즘 순서도.

2.3 경량전철 전력공급시스템 설계

상기 급전해석 알고리즘을 적용하여 개발한 프로그램(HD-PSR)을 이용하여 현재 건교부 표준화 과제로 수행중인 '경량전철 기술개발'의 시험선용 전력공급시스템을 설계코자 한다.

2.3.1 시스템 개요

표 2-1 ~ 표 2-3은 사례연구를 위한 시험선의 시스템 개요를 나타내고 있다.

표 2-1, 노선 길이 및 역사.

역사	거리 (km)	위치 (km)
No. 1	0.000	0.000
No. 2	0.742	0.742
No. 3	0.300	1.042

표 2-2, 열차사양.

항목	사양	단위	비고
차종	고무차륜 경전철		
열차편성	2	Cars	Mc1 - Mc2
공차중량	11	Ton/Car	
승객하중	7	Ton/Car	
운행 최대속도	60	km/h	
출발시 주행저항	10	kgf/ton	
최대 가속도	3.5	km/h/s	
최대 감속도(상용)	3.5	km/h/s	
차륜직경	0.91	m	계산치
Gear 비	6.833		
Gear 효율	95	%	
전동기 효율	92	%	
VVVF Inverter 효율	98	%	
전동기 역율	88	%	
전동기 수	2	EA/편성	

표 2-3, 운행조건 및 네트워크 데이터.

항목	사양	단위	비고
운전 최소시각	2.5	분	150초
변전소 위치	1.042	km	
변전소 내부 임피던스	22.5	mΩ	
Power Rail 임피던스	17.1	mΩ/km	Aluminium compound
Running Rail 임피던스	12.55	mΩ/km	50kg
Feeder Cable	40.65	mΩ/km	
Return Feeder Cable	27.1	mΩ/km	

2.3.2 열차성능시물레이션(TPS) 결과

전력공급시스템 설계를 위해 우선 1편성의 열차에 대해 상, 하행선 열차성능 시물레이션을 수행하여 시간별 속도 및 전류값을 계산한다.

그림 2-5, 2-6은 역행 및 제동시 전압, 전류 특성을 나타내고 있으며, 그림 2-7, 2-8은 표정속도 25km/h 운행시 상, 하행선 열차속도 및 가선편류를 보여주고 있다. 그리고 표 2-4는 상, 하행선 TPS 결과(역간 데이터)를 보여주고 있다.

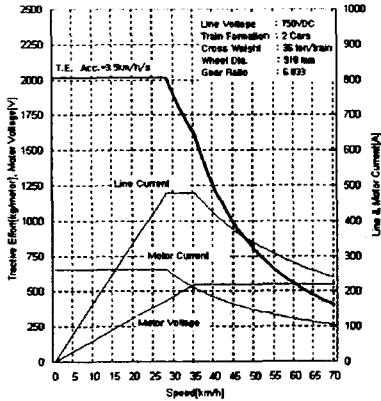


그림 2-5, 역행시 전압, 전류 특성.

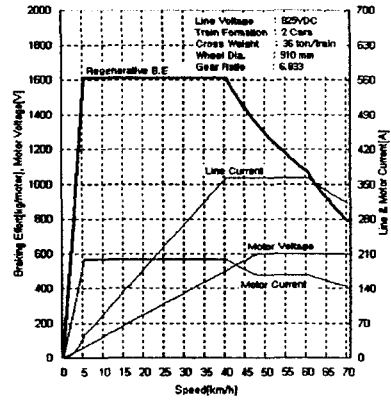


그림 2-6, 제동시 전압, 전류 특성.

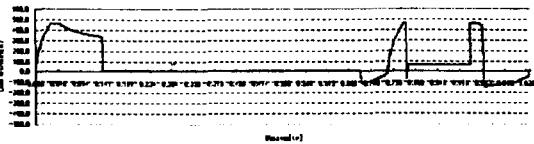
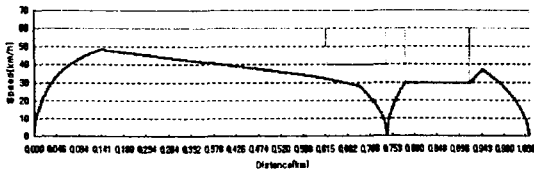


그림 2-7, 상행선 열차속도 및 가선편류.

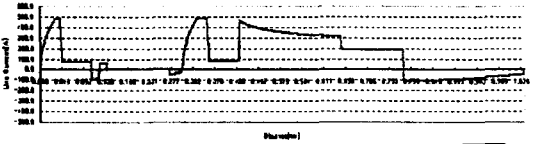
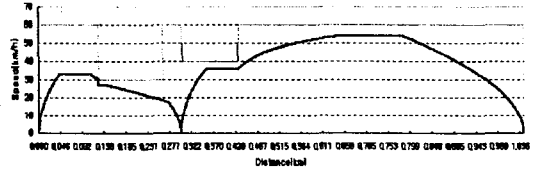


그림 2-8, 하행선 열차속도 및 가선편류.

표 2-4, 상/하행선 TPS 결과 - 역간 데이터.

역명		거리[km]	소요시간[sec]		실효전류[A]		소비전력량[kWh]	
From	To		Run	Stop	Motor	Line	Powering	Braking
상행선								
No. 1	No. 2	0.742	83.1		112.4	403.5	2.4	-0.7
No. 2	No. 3	0.300	47.1	20	129.2	355.1	1.7	-0.8
Total		1.042	130.2	20	107.3	309.2	4.1	-1.5
하행선								
No. 3	No. 2	0.300	52.4		116.5	345.3	1.7	-0.5
No. 2	No. 1	0.742	77.7		123.1	475.4	3.2	-1.4
Total		1.042	130.1	20	109.4	333.42	4.9	-1.9

2.3.3 전력시뮬레이션 결과

전력공급시스템의 설계를 위해 계통의 제반조건을 입력하여 그림 2-4의 순서도에 따라 전력시뮬레이션을 수행하며, 시험선 전력공급시스템의 구성은 그림 2-9와 같이 고려한다.

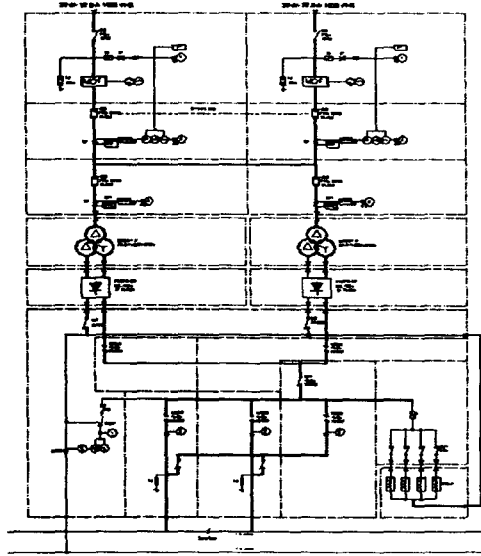


그림 2-9, 시험선 전력공급시스템 단선도.

그림 2-10은 정상급전시 지상 정류장치의 전류, 전압, 전력 특성을 나타내고 있으며 그림 2-11은 이 때 상, 하행선별 열차의 판타점 전압을 전체 공급구간에 대하여 도시하였다.

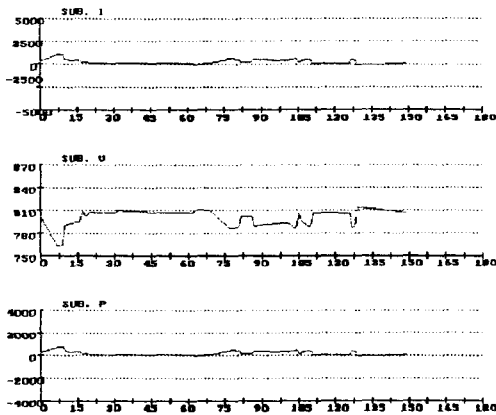


그림 2-10, 정상급전시 지상 정류장치의 출력(전류, 전압 및 전력) 특성.

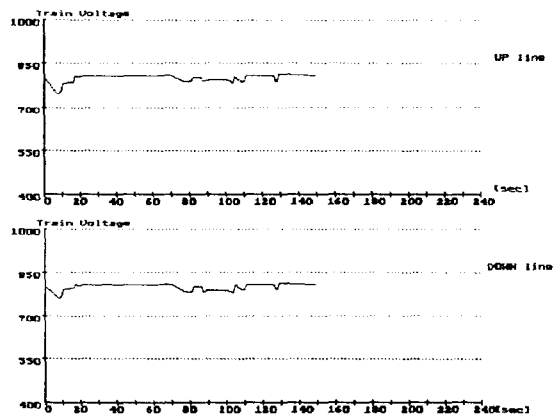


그림 2-11, 열차의 집전점 전압분포.

다수의 급전설비일 경우에는 급전거리가 최대인 1개 변전소의 고장시 열차 판타점 전압의 분포를 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 시험선의 경우 단일 변전소인 관계로 변전소 고장에 대한 해석은 필요치 않다.

이상의 시뮬레이션에 의해 시험선용 전력공급시스템의 설계 결과는 표 2-5와 같다.

표 2-5, 전력공급시스템 설계 결과.

항 목		설 계 결 과	비 고
정류기	1 BANK	1,000 kW	계산결과 : 235 kW 여유치 고려
정격용량	합 계	2,000 kW	
판타점 최소 전압		685 V	IEC 규정 : 최소 500 V
정류기용	1 BANK	1,200 kVA	
변압기 용량	합 계	2,400 kVA	
제동저항기		400 kW	
차단기(HSCB) 정격		2,000 A	

3. 결 론

본 논문에서는 경량전철 시험선용 전력공급시스템의 최적의 용량을 설계하고자 시스템의 특성을 파악, 이를 반영한 네트워크를 구성하고 제시한 해석기법에 따라 전력의 흐름을 분석 및 최종적인 용량설계 결과를 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 변전소 용량 산정을 위한 전력소비원인 차량의 특성, 차량 운동에너지의 변수인 선로의 조건, 운행조건 등을 고려하여 차량 1편성에 대한 소비전력을 TPS 시뮬레이션에 의하여 구하였다.

둘째, 전체 전력시스템을 해석하기 위한 기법을 제시하였으며, 변전소 전압 및 전류, 열차 판타점의 전압을 계산하여 전체 시스템의 전력분포를 얻었다.

셋째, 제시한 용량 산정기법으로 경량전철 시험선의 전력공급시스템의 설계에서 양호한 해석결과를 도출 할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. Cai et al, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 5, Sept., 1995.
- [2] 日本電氣學會, "回生車輛に 對應した 直流變電所容量 設計法", 電氣學會技術報告 (Ⅱ) 第360号, 1991.
- [3] C.S. Cheni et al, "Analysis of Dynamic Load Behavior for Electrified Mass Rapid Transit Systems", IEEE, 1999.
- [4] 今朝雄 "全力設備の用量計算法" 日本鐵道電氣技術協會 1999년 11월.
- [5] 김종구 의 "전기철도 직류급전시스템의 용량설계에 관한 연구", 현대기술 VOL 21 NO1, p81~88, 2001.
- [6] 백병산 의 "경전철 급전시스템의 최적설계에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 P1251~1253, 2001.