

경량전철 전력공급시스템의 용량 산정에 관한 연구

A Study on Capacity Calculation of Power Supply System for Light Rail Transit

백병산* 서광덕** 김종구**
Baek, Byung-San Seo, Kwang-Duk Kim, Jong-Koo

ABSTRACT

This paper describes the capacity calculation of power supply system for Light Rail Transit. Three factors are considered for the design i.e. substation arrangements, line configuration and substation power capacity. In this study, we considered all of them for capacity calculation of power supply system for LRT. At first, DC-fed-traction system is introduced on an outline, a characteristics of train and fed network, and design method of substation arrangements. Optimal design procedures are described, and program for capacity calculation of the system is presented. In addition, the computer simulated results are compared with the conventional simple calculation method.

1. 서론

전력 측면에서 경량전철 시스템을 살펴보면 부하인 경전철, 전력을 공급하기 위한 전력선 및 변전소로 구성되어 있다. 변전소는 차량에 따라 교류 또는 직류변전소를 생각 할 수 있다. 본 논문에서는 국내에 널리 보급되어진 직류변전소로 국한하여 생각하고자 한다. 전력공급시스템의 용량을 산정하기 위해서는 일반 변전소 설계와 마찬가지로 부하용량, 변전소 위치, 선로의 조건을 정확히 분석하는 것이 필요하다. 경전철 시스템인 경우, 부하인 차량이 항상 움직인다는 것이 특이하다. 따라서 차량의 부하특성이 변전소의 용량을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 즉, 차량은 기동정지가 빈번하고, 움직이면서, 그의 부하량도 승객이나 선로조건 기타 등에 따라 변동하는 다이나믹 부하이다. 최근에는 회생차량이 폭넓게 보급되어 최적의 용량설계를 위해서는 이들의 정량적인 파악이 요구된다.

본 논문에서는 경량전철 전력공급시스템의 최적용량 산정을 위한 단위 노선을 갖는 경전철 시스템을 소개하고 용량산정을 위한 차량의 특성, 변전소의 최적배치 방법, 급전망 해석방법, 이를 바탕으로 변전소의 용량 산정과정을 기술하였다. 현재 널리 적용되고 있는 간이 수계산 방법을 소개하고, 본 논문에서 제시된 전력시뮬레이션으로 산정한 용량을 비교·검토하였다.

2. 시스템 개요

2.1 시스템의 구성

경량전철 시스템은 전력공급시스템(변전설비), 부하인 차량 및 이를 연결하는 전차선으로 구성되며, 전철용 변전설비는 일반변전설비와 같이 전압을 변성하여 전력을 공급한다는 측면에서는 같지만, 일반 변전설비는 보통 전동, 일반동력에 전력공급을 주된 목적으로 하고 있으나, 전철용 변

* 현대중공업 기전연구소 선임 연구원
** 현대중공업 기전연구소 책임 연구원

전설비는 차량의 전력공급을 주된 목적으로 하고 있다. 여기에서는 간략히 차량에 공급하는 급전 전력만을 한정하고, 국내에서 널리 적용하고 있는 직류 시스템에 대하여 기술한다.

2.1.1 전력공급범위

그림 1은 직류변전소를 간략히 변압기와 정류기로는 표기하였으며, 차량이 회차하는 시발역부터 차량기지를 포함한 전력공급범위를 블록도로 나타낸다. 총 급전거리는 7.363Km 이다.

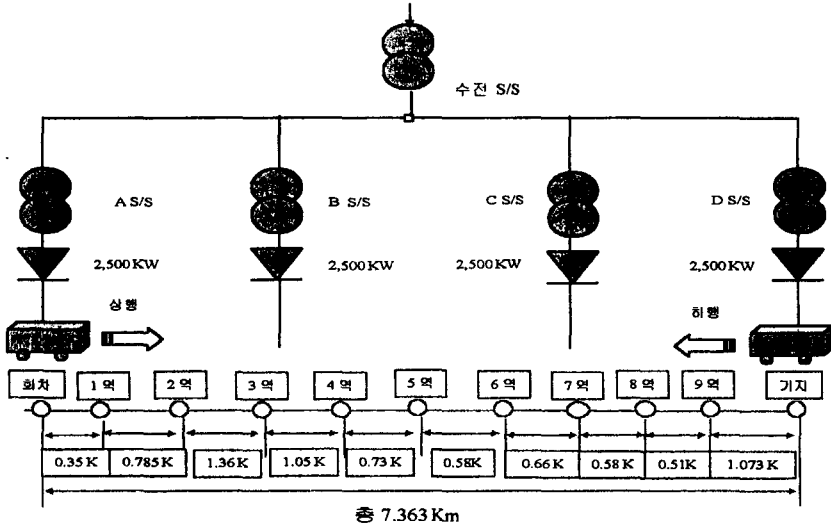


그림 1, 전력공급시스템의 개략도

2.1.2 차량의 사양

본 시스템에 적용한 차량의 사양을 일반사양과 성능사양을 구분하여 나타내면 도표 1 및 2와 같다.

도표 1, 차량의 일반사양

항목	내용	
기후조건	주위온도	-25℃ ~ 40℃
	기타	먼지, 강설, 강우, 염분
선로조건	길이	6.255 km
	폭	1,435 mm
	허용축하중	10.8 ton
	최대 선로구배	45 %
가선전압	최소 곡률반경	50m(본선), 30m(측선)
	정상 동작전압	DC 750V
열차편성	전압 변동범위	DC 500 ~ DC 900V
	2량 편성	MC1 - MC2
차량중량 (공차)	MC1	42.0 ton
	MC2	42.0 ton
최대승객하중	성능기준	20.0 ton /량
	강도기준	30.0 ton /량
열차중량 (만차)	2량 편성	124.0 ton
	동적질량 계수	1.0

도표 2, 차량의 성능사양

항목	내용	
입력 전압	역행	750 V
	제동	825 V
평균 바퀴직경	680 mm	
역 정차시간	20 초 / 역	
열차 속도	최대 동작속도	80 km/h
	최대 영업속도	70 km/h
	표정 속도	35 km/h 이상
가속도	3.96 km/h/s(33km/h 이상)	
감속도	제동시	4.86 km/h/s
	비상 제동시	7.49 km/h/s
가속도 변화율	0.8 m/sec ³ 이하	
차량길이	25,600 mm (2량기준)	
기어비	8.48	

2.2 직류 급전시스템의 특성 해석

전철을 부하로 사용하고 있는 전력공급시스템은 선로 및 운행조건, 부하인 차량의 특성에 따라 부하의 요구량이 변동하며, 급전회로와 관련된 변전소 조건과 임피던스 조건 등에 따라 전체 전력 공급시스템의 전류 및 전압이 또한 달라진다. 본 논문에 적용된 차량의 전력부하특성과 급전회로

망의 특성 및 해석기법을 기술한다.

2.2.1 차량의 전력부하 특성

차량의 부하는 크게 차량의 운전을 위한 추진동력과 서비스장치의 전원으로 구별된다. 차량의 추진동력은 가속시에는 그림 2와 같이 소요되어지며, 감속시에는 그림 3과 같이 회생되어진다. 그림 2와 그림 3은 차량성능조건을 가속시에는 30Km/h까지 3.96Km/h/s, 감속시에는 45Km/h(공기 제동 포함시 4.86Km/h/s)를 가지도록 설계 한 것이다.

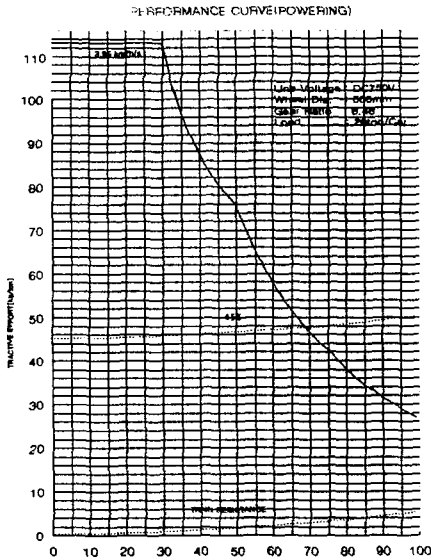


그림 2, 만차시 역행성능곡선

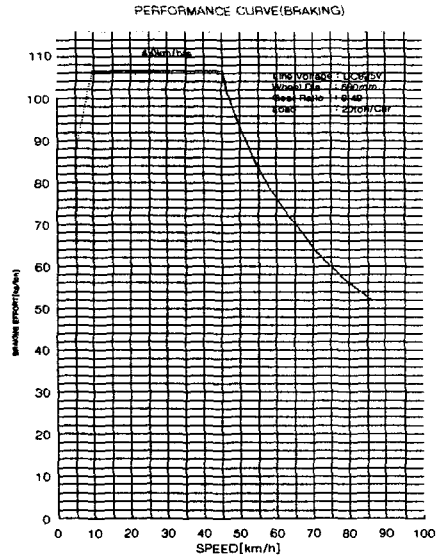


그림 3, 만차시 제동성능곡선

2.2.2 급전회로망의 특성 해석

그림 4와 같이 직류급전회로를 다음과 같이 간략히 생각할 수 있다. 즉, 급전회로는 직류변전소를 정류기로 하여 직류 전원으로 하고 부하를 차량으로 하여 부하와 전원사이를 전차선으로 연결한 전기회로망으로 표현할 수 있다.

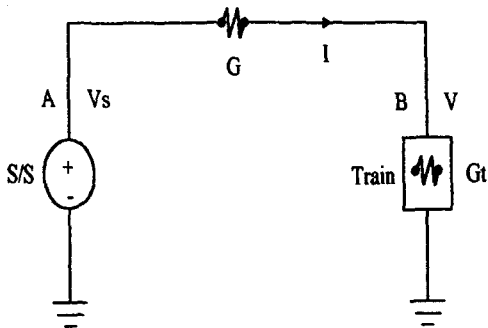


그림 4, 간략화한 직류급전회로망

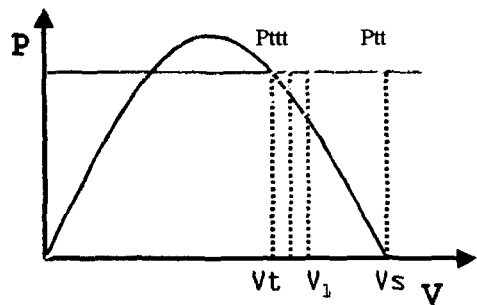


그림 5, 급전망 해석 기법

그림 4에서 전력의 흐름을 살펴보면, 차량이 요구하는 전력 P_t 는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$P_t = G_t \cdot V^2 \quad (1)$$

여기서 V 는 B점의 전압이며, G_t 는 차량의 콘덕턴스이다. 회로를 통하여 B점에 전달되는 전력, P 는 다음과 같이

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

쓸 수 있으며, 여기서 회로의 전류 I 는 다음과 같다.

$$I = G(VS - V) \quad (3)$$

여기서 G는 전차선의 콘덕턴스이다. 식 (2), (3)을 이용하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$P = GVS - GV^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 전력 P는 전압 V에 대하여 2차 방정식이며, 이 전력은 차량이 요구하는 전력 P_t 와 같은 점에서 구해져야 한다. 다이나믹한 전력 분포를 구하기 위해서는 급전계통내에 포함되어 있는 모든 변전소, 다수 열차, 급전선을 Node와 Branch로 접속하여 표현하여, 이를 Ohm's law 및 Kirchhoff's law 제1법칙, 제2법칙을 이용한 방정식을 만들어 매트릭스화 한다. 이 매트릭스를 Current vector iterative method를 적용하여 다수의 차량이 이동하면서 소비하는 전압 및 전류의 분포를 구한다. 즉, 그림 5에 도시한 바와 같이, 식 (2), 전력 P_{tt} 와 식 (4), 전력 P_{ttt} 가 일치하는 점을 반복수렴을 통하여 그의 해를 구한다.

3. 변전소 최적 위치 선정

직류변전소의 최적 위치를 선정하기 위해서는 크게 두가지를 고려해야 하는데 첫 번째로 변전소의 용량과 전차선로의 전압강하이다. 다음으로 고려해야 할 것으로 전력선 인입의 적적성 및 경제성 측면을 고려해야 한다.

3.1 변전소 위치 선정 조건

먼저, 노선 중간에 있는 변전소들의 설치 간격은 양쪽 변전소간을 운행하는 열차가 이 구간의 전차선로에서 생기는 전압강하로 인하여 운행에 지장을 받지 않도록 정하여야 한다. 둘째로, 노선의 양쪽 마지막 변전소와 말단역과의 간격은 이 구간을 운행하는 열차와 말단역에서 출발하는 열차가 전압강하로 인하여 운행에 지장을 받지 않도록 하여야 한다. 셋째, 변전소 설치 위치는 용지 확보가 쉽고 주위에 위험을 주거나 받지 않아야 하고 침수, 붕괴의 위험이 없는 곳을 선정하여야 하며 특히 경전철은 도시미관을 해치지 않는 장소이어야 한다. 다음으로 고려할 사항으로는 변전소의 설치 간격을 가능한 한 일정하게 맞추어 변전설비 용량을 각 변전소마다 동일하게 하고 최소화하는 것이 바람직하다.

3.2 변전소 간격의 설계

3.2.1 변전소 간격의 설계기준

설계기준은 궁극적으로 차량이 구동 가능한 최소허용전압에서 기인된다. 즉, 선로의 전압강하를 고려해야 한다. 이를 산정하기 위한 요소로서는 열차의 표정속도, 운전시격, 열차간 운행 간격, 전차선로의 전기저항 및 한 개의 열차에 대한 최대설계전류를 들을 수 있다.

3.2.2 말단 정거장과 변전소 간의 간격 계산

노선 말단 정거장에서 인근 변전소간 구간에서는 모든 전력 공급이 인근 변전소 1개소에서 이루어진다. 그러므로 열차간의 운행 간격(d)과 최대 전류(i_0)를 고려하여 노선 말단 정거장에서의 전압 강하치(V_R)를 계산하면 다음 식과 같은 결과를 얻을 수 있다. 단, 변전소 내부의 전압강하는 무시한다. 그리고 이를 이용하여 말단 정거장과 변전소간의 간격을 계산한다. 아래 식에서 i_m 은 노선의 말단차량의 최대부하이며, n은 정거장 수이다

$$\begin{aligned} V_R &= (ni_0 + i_m)Rd + ((n-1)i_0 + i_m)Rd + \dots + i_mRd \\ &= \frac{n(n+1)}{2} i_0Rd + (n+1)i_mRd \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$i_m = 2 i_0, \quad n = \frac{L}{d} - 1 \text{ 로 하여 거리 } L \text{ 을 계산하면 다음과 같다.}$$

$$L = \sqrt{0.25d^2 + 2d \frac{V_r}{RI}} - 0.5d \text{ (km)} \quad (6)$$

3.2.3 중간 변전소 간의 간격 계산

노선 중간 변전소들간의 최대설치간격을 구하는 과정은 노선의 중간지점의 최대전류(i_0)를 변전소에서 공급한다고 가정하여 전압 강하치를 적용하고 변전소 간격 L을 계산한다. 그 계산식은 다음과 같다. 단, 변전소 내부의 전압강하는 무시한다.

$$V_R = n i_0 R d + (n-1) i_0 R d + \dots + i_0 R d$$

$$= i_0 R d \frac{n(n+1)}{2} \quad (7)$$

여기서,

$n = \frac{L}{2d}$ 로 하여 변전소 간격 L을 계산하면 다음식과 같다.

$$L = \sqrt{d^2 + 8d \frac{V_r}{RI}} - d \quad (km) \quad (8)$$

3.3 변전소의 최적 위치 배치

3.3.1 노선조건 검토

노선의 설계는 차량의 회차 및 유지보수를 위한 차량기지를 고려하게 되는데 이를 포함한 중간역을 거리별로 검토하여야 하며 보통 차량기지에는 변전소를 설치하는 것이 일반적이다.

3.3.2 변전소의 배치

변전소의 배치는 차량이 요구하는 최대전류를 기준으로 산정한 말단 정거장과 변전소 간의 간격 및 중간 변전소 간의 간격을 가지고 이루어지나 이는 정상급전시에는 문제가 없다. 그러나, 정상급전이 불가능 할 경우 연장급전이 요구되는데 이로 말미암아 노선에 설치해야하는 변전소의 수가 증가하게 된다. 따라서 인접변전소가 정전시 연장급전거리를 검토하여 변전소의 최적 위치를 선정해야 한다. 실제로는 전력회사(한전)에서 수전이 용이한 지점 및 변전소로서의 설치위치에 적합한 장소를 검토하여 선정된다. 그리하여 이렇게 선정된 변전소위치에 대하여 재검토하는 경우가 많다.

본 노선에서는 식 (6), (8)을 적용한 결과, 말단 정거장과 변전소 간의 간격 및 중간 변전소 간의 간격은 각각 3.278 Km, 6.54 Km으로 산정되었다. 따라서 변전소의 배치는 그림 1에서 2번역, 4번역, 7번역, 차량기지로 정하는 것이 바람직하다.

4. 직류 변전소 최적용량 설계법

직류변전소의 최적용량을 설계하기 위해서는 직류급전시스템의 특성에서 차량의 특성과 급전회로망의 특성을 살펴본 바와 같이 제반조건을 고려하여 용량을 설계하는 것이 요구된다. 용량산정 방법에는 수계산에 의한 방법과 컴퓨터 모의시험으로 산정하는 방법이 있다.

4.1 수계산에 의한 용량산정

4.1.1 산정 방법

간단히 수계산에 의하여 계산하는 방법으로 개략적인 용량을 산정하는데 실제로 많이 이용하며 그 결과값 또한 크게 벗어나지는 않는다. 이 방법은 차량이 요구하는 전력과 전압강하를 이용하여 계산하는데 여기에서 무엇보다도 데이터는 차량이 소비하는 전력을 정확히 구해져야 한다. 과거에는 이 전력을 산술에 의하여 구했는데 최근에는 소위 차량성능 모의시험에 의하여 구하여 이용하고 있다. 이를 바탕으로 전력소비율을 산정하여 1열차에 대한 최대순시 부하를 계산한다. 이 순시 부하를 이용하여 정류기 및 변압기 용량을 산정한다. 그림 6은 그의 산정 흐름도를 보여준다.

도표 3, 모의운전 조건

항목	내용
운전시격	120초
정차시간	20초
회차시간	30초
차량보조동력	80kw
변전소 내부저항	0.015Ω
정류기정격/무부하전압	750/795V
전차선저항	0.02Ω/Km

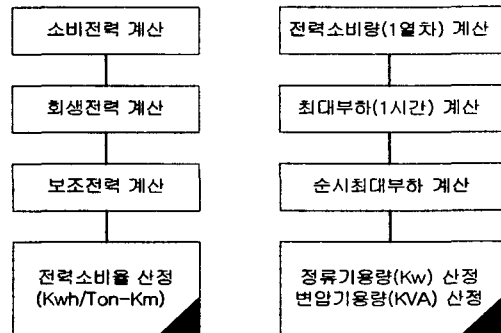


그림 6, 전력소비율/용량 산정 흐름도

4.1.2 수계산에 의한 산정결과

산정에 필요한 모든 데이터는 본 논문에서 기술한 노선, 차량 및 전기 데이터를 가지고 산정하였으며, 전력소비율의 산정은 차량성능 모의시험을 통하여 얻은 값을 적용하였다. 여기에서 변전소의 위치는 3.3항에서 선정된 값으로 적용하였으며, 그림 6의 절차에 따라 계산한 변전소의 용량은 도표 4와 같다. 도표에서 차량기지에 대한 정류기의 용량은 차량기지내의 소요전력용량과 연장급전시의 급전용량을 고려하여 설계되어야 하는데 본 논문에서는 차량기지내의 전력용량에 대하여 정확한 검토가 이루어지지 않아서 본선의 변전소와 동일하게 적용하였으며, 보통 차량기지내의 소요전력은 작다.

도표 4, 수계산에 의한 변전소용량 산정결과

변전소 위치	정상급전거리(Km)/용량(Kw)	연장급전거리(Km)/용량(Kw)	정류기 용량(Kw)
2번역	1.99/3171	2.97/4741	2500 × 2
4번역	2.19/3490	4.18/6661	3000 × 2
7번역	2.06/3290	2.77/4422	2500 × 2
차량기지	차량기지내 소비전력 + 급전전력		2500 × 2

4.2 최적용량 산정을 위한 컴퓨터 모의시험

4.2.1 전력시뮬레이션 방법

그림 7은 직류전기철도의 종합 모델링을 보인다. 직류변전소의 최적용량을 산정하기 위해서는 이들 각각의 정확한 모델링이 요구된다. 그림 8은 본 논문에서 제시한 차량 및 급전망 해석기법을 적용하고 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 한 흐름도를 보여준다. 먼저, 데이터 입력 및 초기조건을 작성하는 입력부, 차량운전곡선을 작성하는 부분과 그 데이터를 이용하여 임피던스 맵을 구성하고, 이것을 각 시간 t의 해로서 각 차량, 변전소의 전압 및 전류를 계산한다. 이들의 값이 수렴 허용치 내에 들어오면 누계를 함으로써 각 차량 및 변전소의 전력량·전압 등 필요로 하는 모든 자료를 구하게 된다.

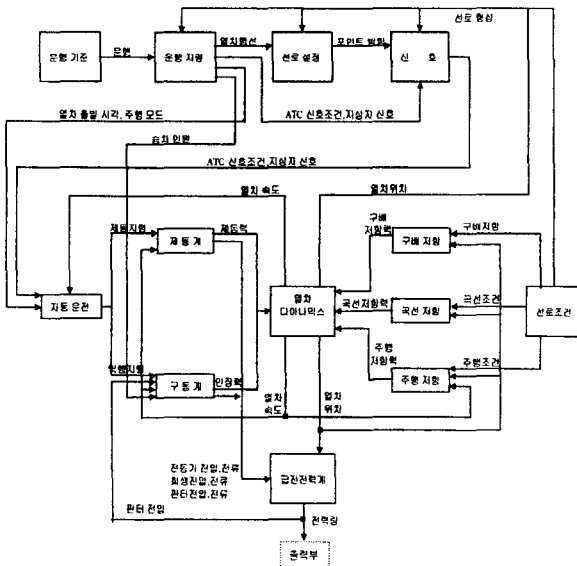


그림 7. 전철 시스템 종합 모델링

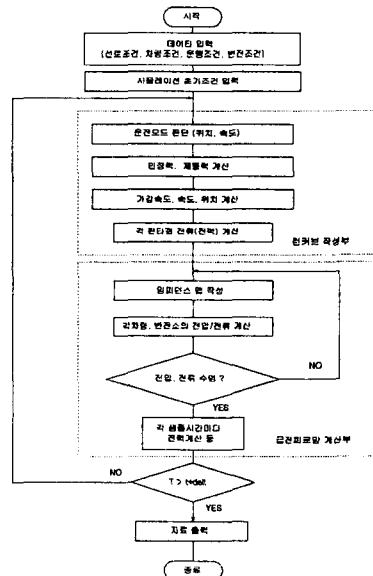


그림 8. 전력시뮬레이션 플로우 차트

4.2.2 컴퓨터 모의시험에 의한 산정결과

산정에 필요한 모든 데이터는 본 논문에서 기술한 노선, 차량 및 전기 데이터를 적용하였으며, 변전소의 위치는 수계산과 동일하도록 3.3항에서 배치된 위치를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였

다. 먼저, 차량의 성능모의시험을 살펴보면 그림 9 및 10은 각각 차량의 운행속도곡선과 노선의 구배곡선을 나타낸다. 그림 11 및 12은 차량 모의시험에서 얻은 상행 운행시 전류곡선과 하행 운행시 전류곡선을 보여준다. 그리고 도표 5 및 6는 Schedule 운전에 따른 역간의 상행 및 하행 출력 값이다.

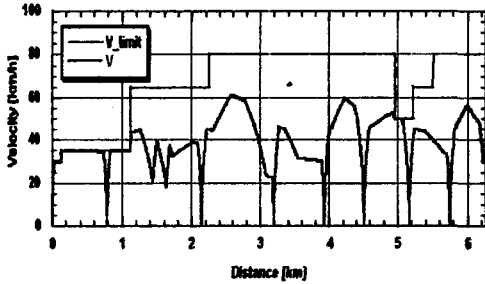


그림 9, 운행속도 곡선

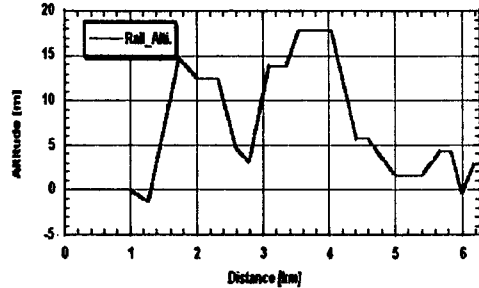


그림 10, 노선구배곡선

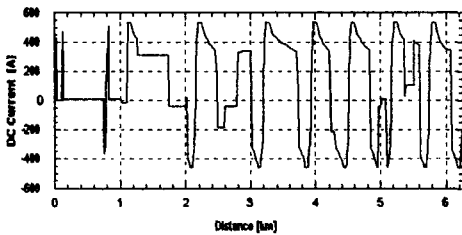


그림 11, 운행시 전류곡선(1→9번역, 거리기준)

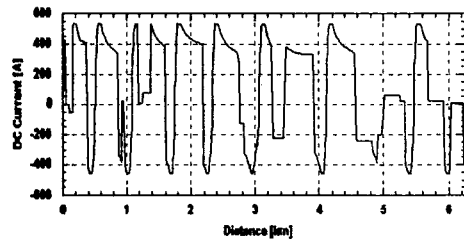


그림 12, 운행시 전류곡선(9→1번역, 거리기준)

도표 5, Schedule 운전에 따른 역간 데이터 (상행 : 1번역→9번역)

Station No.		Distance [km]	Time [min]		RMS Current [A]		Energy Consumption [kWh]	
From	To		Run	Stop	MM	FL	Powering	Braking
1	2	0.78	1.34	0.33	82.6	131.5	3.9	-1.5
2	3	1.36	1.49	0.33	114	257.1	5.6	-9.2
3	4	1.05	1.23	0.33	144.7	326.4	10.7	-6.3
4	5	0.73	0.84	0.33	154.8	330.4	9	-3.3
5	6	0.58	0.92	0.33	136.3	303.9	4.4	-7.7
6	7	0.66	0.93	0.33	129.5	272.9	5.7	-4.4
7	8	0.58	0.79	0.33	149.3	312.3	6.1	-3.1
8	9	0.51	0.76		154	327.7	5.9	-4
Total		6.20	8.28	2.31	114	244.7	51.3	-39.4
			10.59					

도표 6. Schedule 운전에 따른 역간 데이터 (하행 : 9번역→1번역)

Station No.		Distance [km]	Time [min]		RMS Current [A]		Energy Consumption [kWh]	
From	To		Run	Stop	MM	FL	Powering	Braking
9	8	0.51	1.76	0.33	125.2	264.7	13	-3.1
8	7	0.58	0.77	0.33	149.5	315.3	5.6	-4
7	6	0.66	0.98	0.33	128.2	264.5	7.1	-3
6	5	0.58	0.94	0.33	160.6	346	10.7	-3.1
5	4	0.73	0.85	0.33	144.3	314.7	5.4	-5.9
4	3	1.05	1.22	0.33	140.5	315.2	10.2	-6
3	2	1.36	1.51	0.33	144.6	324	17.1	-4.4
2	1	0.78	1.12	0.33	112.6	233	5.8	-4
Total		6.25	9.16	11.47	120.9	261.1	74.9	-33.4
			41.5					

도표 7. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 변전소용량 산정결과

변전소 위치	정상급전거리(Km)/용량(Kw)	연장급전거리(Km)/용량(Kw)	정류기 용량(Kw)
2번역	1.99/2126	2.97/3826	2000 × 2
4번역	2.19/2645	4.18/5217	2500 × 2
7번역	2.06/2371	2.77/3972	2000 × 2
차량기지	차량기지내 소비전력 + 급전전력		2000 × 2

정상급전시의 최소전압은 715V로 그의 위치는 5.813Km 였으며, 최대전압은 795V로 그의 위치는 6.022Km로 나타났다. 연장급전시의 최소전압은 627V, 최대전압은 761로 나타났다. 수계산시와 마찬가지로 차량기지에 대해서는 본선의 변전소 용량과 동일하게 적용하였으며, 차량기지를 포함한 시뮬레이션은 다음 기회에 기술하고자 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 경량전철 전력공급시스템의 최적용량 산정을 위한 경전철 시스템을 소개하고 용량산정을 위한 차량을 특성, 변전소의 위치, 급전방 해석방법, 이를 바탕으로 변전소의 용량산정과정을 기술하였다. 현재 널리 적용되고 있는 간이 수계산 방법으로 용량을 산정하였으며, 본 논문에서 제시한 전력시뮬레이션으로 산정한 용량과 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 산정 결과가 수계산에 의한 용량보다 작게 나타났으나, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 변전소의 용량 및 전압분포를 확인 할 수 있었다.

향후, 본 논문에서 가정하고 정확한 값을 적용하지 않았던 부분에 대해서는 연구를 진행하면서 개선 및 보완 할 예정이며, 차량기지의 정확한 전력소모량 산정 및 열차운행방법에 대해서도 보다 깊은 연구를 할 계획이다.

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] 김중구 외 "전철용 직류변전소의 최적용량설계에 관한 연구" 대한전기학회, 하계학술대회 논문집 B권, p1405~1407, 2000