

경전철 급전시스템의 최적설계에 관한 연구

전용주\* 조성준 백병산 김국진 김종구  
 현대중공업(주) 기전연구소

A Study on the Optimal Design for DC traction system of Light Rail Transit

Yong-Joo JEON,\* Sung-Joon CHOI Byung-San BAEK Kuk-Jin KIM Jong-Koo KIM  
 Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries CO., LTD.

**Abstract** - This paper presents on capacity design of DC-fed-traction system. The system is introduced including a characteristics of train, feeding network configuration, and design method of substation arrangements. Optimal design procedures is described, and program for capacity computation of the system is presented using the nodal equation, K.C.L, K.V.L, Ohm's law and superposition theory. For the proof of the proposed algorithm, we accomplished the simulation of DC traction system for HA-Nam LRT. By considering whole component in DC traction system the conclusion will be much precise.

1. 서 론

신교통 수단인 전기철도의 급증에 따라, 급전시스템의 최적설계가 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 급전시스템의 종합적인 해석을 위한 이론적 배경을 소개하고 실노선(하남시 경전철)적용의 사례로 그 타당성을 검토하여왔다. 열차의 사양, 운행방식, 노선조건 및 변전설비의 데이터 등을 입력으로 하는 전력시뮬레이션을 통해 각 변전설비의 용량을 산정하고 또한 전차선의 동적 전압을 토대로 변전소의 최적위치를 검토하였다. 신속한 결과값의 분석을 위하여 매시간 변전소의 상태와 전차선의 전압을 그래프, 보고서로 출력하였다.

2. 본 론

2.1 급전 시스템의 구성

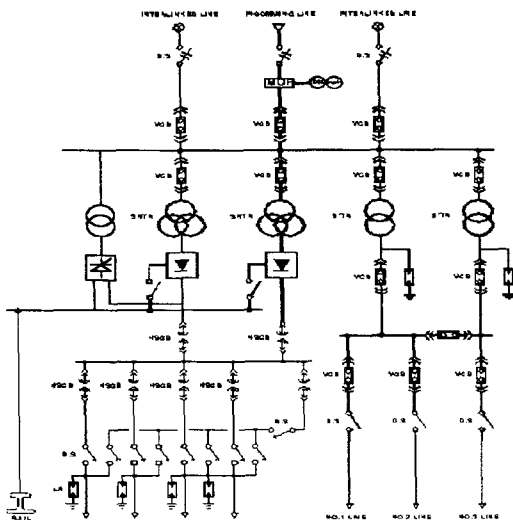


그림 2-1, 전력공급시스템 단선도

전기철도 시스템은 전력공급시스템(변전설비), 부하인 차량 및 이를 연결하는 전차선과 귀환 레일로 구성된다. 전철용 변전설비는 그림 2-1과 같이 AC 특고압 배전반, 정류용 변압기, 정류기, DC 고속도 차단기반, 제어 전원설비(충전기, 축전지), SCADA 시스템으로 구성되며, 차량 전력공급용 급전전력과 차량기지 및 역사 설비용 부하 전력으로 나눌 수 있다.

2.2 급전시스템의 해석알고리즘

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

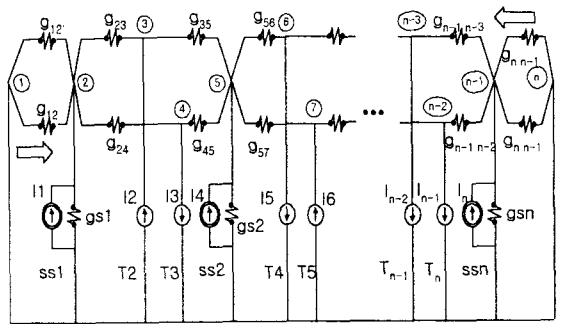


그림 2-2, 급전계통의 전기적 등가회로

그림 2-2에서 열차 node의 전력은 열차성능시뮬레이션(TPS) 결과값을 이용하여 산정이 가능하나 변전소 node의 경우는 정전류원 이므로 그 특성을 적절히 모의하는 것이 중요하게 되며 그 관계식은 식(1)과 같다.

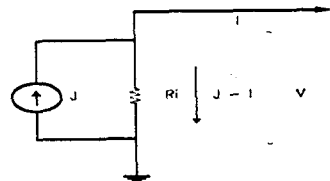


그림 2-3, 전류원으로 표현한 변전소 등가회로

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

여기서  $V_{so}$  ( $V_{so} = J \times R_i$ )는 변전소 출력 무부하 전압,  $R_i$ 는 변전소 내부저항,  $V$ 는 변전소 출력 전압,  $I$ 는 변전소 출력전류,  $J$ 는 전류원 소스이다.

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

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

또한 그림2-2에서 열차 ( $T_n$ )로 표현된 노드의 전류값 ( $I_n$ )은 TPS 및 열차운행 diagram에 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 G값은 0이 된다. [V] 행렬은 매순간 변전소 또는 열차위치에서의 전압값으로 매순간 반복방식을 이용하여 도출해야 할 미지값이며, [I] 행렬은 해당노드로 주입되는 전류의 값이다.

식(2), 식(3)을 기본으로 하여 전압의 값을 반복 도출하여 설정 오차를 내 수렴시 반복을 종료함으로써 시스템 해석의 기본값인 매시간에서의 각 노드(변전소, 열차)의 전압과 전류를 계산하게 된다.

그림 2-4는 본 본문에서 제시한 차량 및 급전망 해석 기법을 적용하여 시뮬레이션을 수행하는 순서도이다.

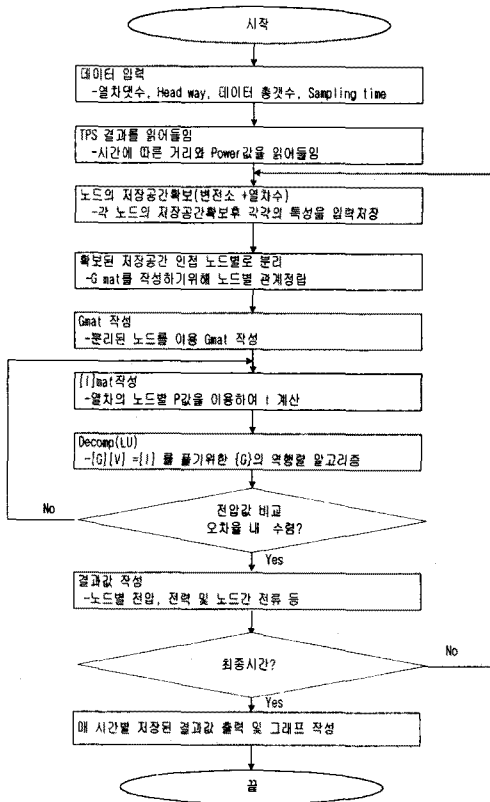


그림 2-4, 시뮬레이션 순서도

먼저 데이터 입력, 초기조건을 작성, TPS의 결과값을 받아들이는 입력부, 매 시간 열차의 위치와 변전소의 위치를 이용하여 각 노드의 연결상태를 결정하고 이를 이용하여 각 차량, 변전소의 전압 및 전류를 계산하는 알고리즘 계산부, 이들의 값이 수렴 허용치 내에 들어오는지 확인하는 오차 확인부, 그리고 해당결과를 파이프와 그래프로 출력하는 출력부로 구성되어 있다.

### 2.3 사례연구

급전시스템 해석 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 공급변전소 4개로 구성된 총 선로길이가 6.33km의 하남경전철 노선을 해석을 하였다. 가선전압은 DC 750(V) 최소시격 2분 표정속도 29(km)로 적용하였다. [5]

#### 2.3.1 TPS 시뮬레이션 및 그 결과

전체전력을 시뮬레이션 하기 전에 먼저 1편성의 열차에 대해 상, 하행선 운행시 TPS를 통해 거리 및 시간별 전류값을 계산한다. 그리고 계산되어진 전류값은 열차

운행 diagram에 따라 전체 열차에 대한 전류값을 계산하게 된다. 그림 2-5 ~ 그림 2-8은 TPS의 결과를 보여주고 있으며, 그림 2-9는 전 편성 운행시 열차 운행 diagram을 보여주고 있다.

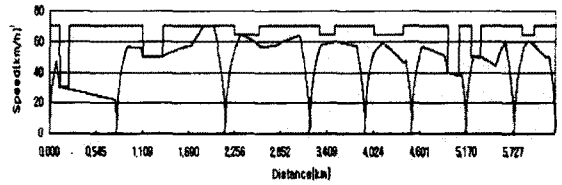


그림 2-5, 상행선 속도제한 및 열차 속도

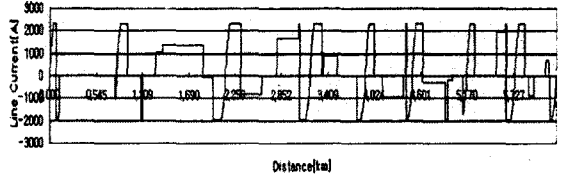


그림 2-6, 상행선 가선전류

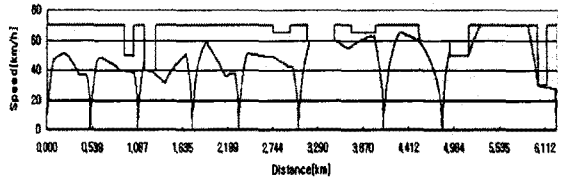


그림 2-7, 하행선 속도제한 및 열차 속도

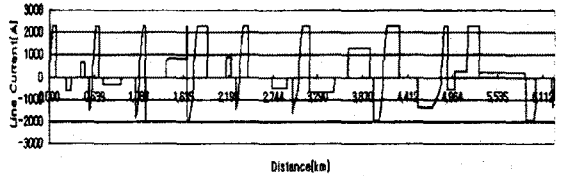


그림 2-8, 하행선 가선전류

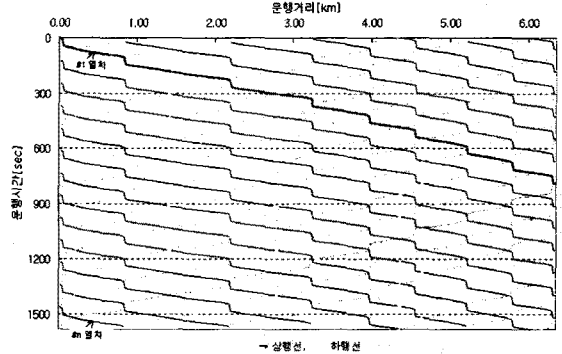


그림 2-9, 열차 diagram(headway 2분)

#### 2.3.2 전력 시뮬레이션 및 그 결과

급전시스템의 해석을 위해 계통의 제반조건을 입력하여 그림 2-4의 순서도에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2-10에는 정상급전시 변전소의 전류, 전압, 전력 특성을 나타냈으며 그림 2-11에는 이때의 상, 하행선별 열차전압을 전체 공급구간에 대하여 도시하였다. 그림 2-12에는 급전거리가 최대인 1개 변전소의 고장시 상, 하행선별 열차전압을 도시하였다. 그 결과 그림 2-12의 결과가 그림 2-11에 비해 전압 변동이 심하지만 모든 결과값이 UIC 규정치(최소 500V) 내에서 변동함을 확인 할 수 있었다.

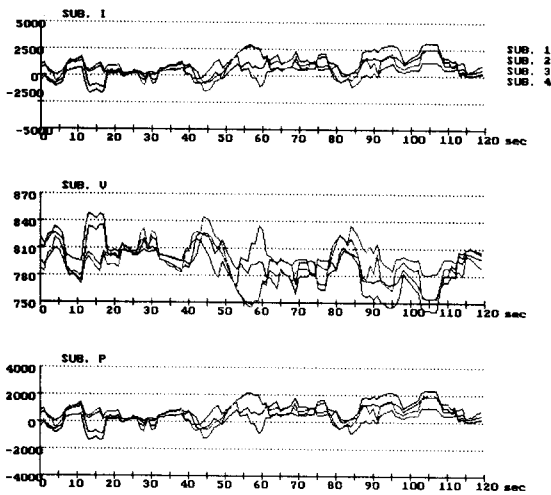


그림 2-10. 변전소 상태

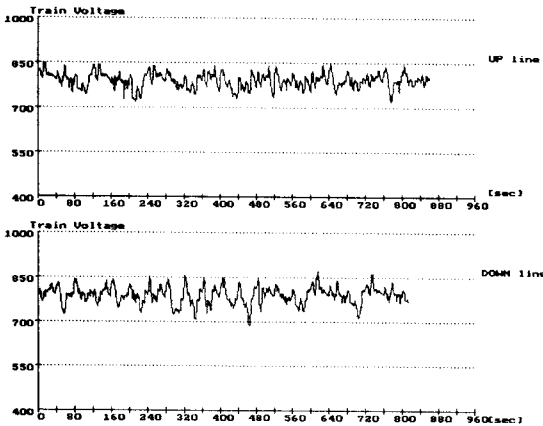


그림 2-11. 계통 열차전압분포(정상급전)

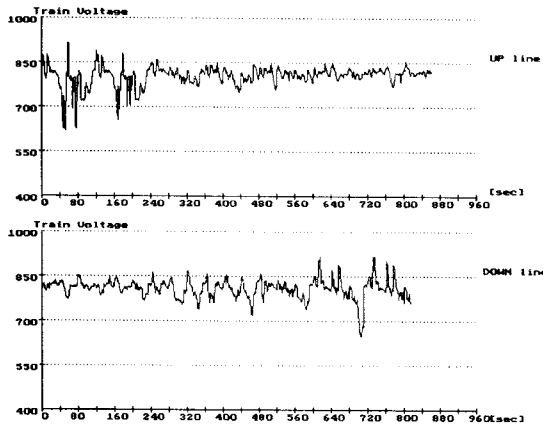


그림 2-12. 계통 열차전압분포(연장급전:S/S1 고장)

표 2-1. 시뮬레이션에 의한 변전소 전력 및 열차최소전압

구분	변전소별 유효전력(kW)				순시최대 전력(kW)	열차최소 전압(V)
	S/S1	S/S2	S/S3	S/S4		
정상급전	791	1014	931	689	2258	688
	고장	1714	1091	673	4032	613
	1360	고장	1347	739	3073	656
연장급전	848	1402	고장	1257	3548	667
	795	1177	1523	고장	4257	675

표 2-1은 정상급전시 및 1개 변전소 고장시 각 변전소별 소요전력 실효치 및 열차 최소전압을 보여주고 있으며 표 2-2는 표 2-1의 결과에 의해 각 변전소의 정류기 및 정류기용 변압기의 설계용량을 나타내고 있다. 표 2-3은 인버터, 인버터용 변압기 용량설계 값으로 적절한 회생량 산정을 위해 연도별 러시, 비러시 시간을 고려 120,210,300sec Head way를 반영하여 도출한 값이다.

표 2-2. 변전소별 정류기의 최적설계

구분	변전소별 정류기 용량(kW)				변압기용량 (kVA)
	S/S1	S/S2	S/S3	S/S4	
1뱅크	1500	1500	1500	1500	2000
단위변전소	3000	3000	3000	3000	2000×2

표 2-3. 인버터/인버터용 변압기 용량설계

변전소명	전력구분	최대값(kW)	정격대비율(%)	용량설계
S/S1	실효치	314	157	인버터:200kW, S중정격 (100%연속,500%30초) 변압기: 400kVA
	평균치	104	52	
	최대치	1412	706	
S/S2	실효치	246	123	인버터:200kW, S중정격 (100%연속,500%30초) 변압기: 400kVA
	평균치	115	57	
	최대치	1263	635	
S/S3	실효치	255	127	인버터:200kW, S중정격 (100%연속,500%30초) 변압기: 400kVA
	평균치	99	49	
	최대치	1252	626	
S/S4	실효치	173	86	인버터:200kW, S중정격 (100%연속,500%30초) 변압기: 400kVA
	평균치	64	32	
	최대치	900	450	

### 3. 결 론

본 논문에서는 직류 경전철 급전계통 시스템의 최적의 용량을 설계하고자 시스템의 특성을 파악, 이를 반영한 네트워크를 구성하고 제시한 해석기법에 따라 전력의 흐름을 분석 및 최종적인 변전소의 용량 설계를 도출하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

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

둘째, 전체 시스템을 해석하기 위한 기법을 제시하였으며, 이를 실제 시스템인 다수 열차, 다수 변전소로 확장 노드방정식을 이용하여 Matrix를 구성하였다. 각 변전소 전압 및 전류, 각각의 열차전압을 계산하여 전체 시스템의 전력분포를 얻었다.

셋째, 제시한 용량 산정기법을 검증하고자 현재 건설 추진중인 하남선 데이터를 이용하였으며 양호한 결과를 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. Chen 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] 김중구 의 "전기철도 직류급전시스템의 용량설계에 관한 연구" 현대기술 VOL 21 NO1, p81~88, 2001
- [6] 설용수 외 "전력시스템 공학" 청문각, 1996.