

전철용 직류변전소의 최적용량설계에 관한 연구

김종구, 이상동, 백병산, 이현두, 이준엽
현대중공업(주) 기전연구소

A Study on Optimal Design of DC Substation Capacity for Mass Transit Syst

J.K. KIM, S.D. LEE, B.S. BAEK, H.D. LEE and J.Y. LEE
MECHATRONICS RESEARCH INSTITUTE, HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.

Abstract - This paper is on optimal design for DC substation capacity for Mass Transit System. Three factors are considered for the design i.e. substation arrangements, line configuration and substation power capacity. In this study, we discussed substation power capacity only. At first, DC-fed-traction system is introduced on an outline, a characteristics of train and fed network. Optimal design procedures is described, and modelling for DC-fed-traction system are presented. The circuit-solution method is presented by matrix formula. In order to simulate DC substation power capacity more closely to actual situations, we proposed the program.

1. 서 론

직류 전기철도의 전력공급원인 전력공급시스템의 최적 설계에 있어서 변전소의 배치, 전차선로의 구성 및 변전소의 용량 등이 중요한 요소이다. 변전소의 배치와 전차선로의 구성은 용량과 전압강하에 의해서 제약을 받지만, 인입의 용이성과 경제적 측면에서 좌우되는 경우가 많다. 그러나 변전소의 부하인 전동차는 기동정지가 빈번하고, 움직이면서, 그의 부하량도 승객이나 선로조건 기타 등에 따라 변동하는 다이나믹 부하이다. 또한 전력 변환 기술의 발달과 함께 차량내 견인시스템 및 보조전원장치 등도 기술의 진보로 최근에는 회생차량이 폭넓게 보급되어 최적의 용량설계를 위해서는 이들의 정량적인 파악이 요구된다. 변전소 용량 및 부하용량의 정확한 산정은 건설비 절감, 에너지 절약은 물론 시스템의 최적인 영에도 이용된다.

변전소 용량을 정확히 산정하기 위해서는 크게 두 가지의 정확한 분석이 요구된다. 먼저 차량이 요구하는 전기에너지의 산정이며, 이의 산정에는 노선조건, 차량조건, 운행조건 등을 포함한 다이나믹 운동방정식의 해를 구해야만 한다. 다른 한가지로는 차량과 변전소 및 전차선로 등을 포함한 급전회로의 정확한 해석이다. 과거에는 이들의 산정은 차량이 요구하는 전력과 전압강하를 이용하여 간단히 계산한 경우도 있었지만, 최근에는 컴퓨터를 이용하여 산정하고 있다. 변전소의 배치와 전차선로의 구성에 대해서는 다음 기회로 미루고, 최적의 변전소 용량을 설계하고자 급전시스템과 부하시스템을 보다 정량적으로 산정하기 위한 고려사항, 시스템 특성, 급전망 해석 및 모델링 그리고 시뮬레이션 프로그램에 대하여 기술한다.

2. 전철용 직류급전 시스템

2.1 시스템의 개요

전철용 변전설비는 일반변전설비와 같이 전압을 변형하여 전력을 공급한다는 측면에서는 같지만, 일반변전설비는 보통 전동, 일반동력에 전력공급을 주된 목적으로 하고 있으나, 전철용 변전설비는 차량에 전력공급을 주

된 목적으로 하고 있다. 공급방식도 차량에 공급하는 전기가 교류이면 교류 급전시스템, 직류이면 직류 급전시스템 이라고 명명하고 있다. 본 논문에서는 국내의 중량 전철시스템인 지하철 시스템 및 향후 건설이 예상되는 경전철 시스템에 널리 적용하고 있는 직류 급전시스템에 대하여 기술한다.

2.1.1 시스템의 구성 및 전력공급범위

그림 1은 직류변전소를 간략히 변압기와 정류기로는 표기하였으며, 시발역과 종착역을 포함한 전력공급범위를 블록도로 나타낸다.

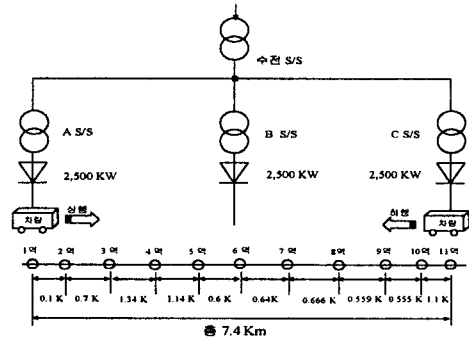


그림 1 전력공급시스템의 개략도

2.1.2 단위 직류 변전소 개요

단위 직류변전소에 대하여 그림 2는 구성도를 그림 3에는 단선도를 블록으로 나타내었다. 그의 구성을 살펴보면 교류 배전반, 정류기용 변압기, 정류기, 직류배전반, 제어용 전원장치, 전차선 그리고 이들을 감시제어하기 위한 SCADA 시스템으로 구성되어 있다.

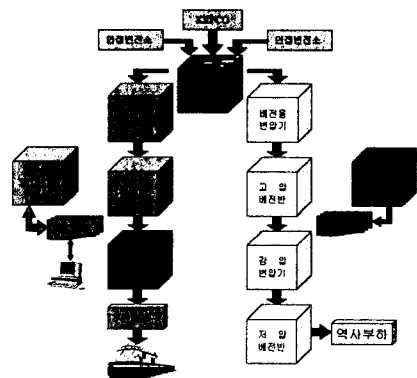


그림 2. 전력공급시스템 구성도

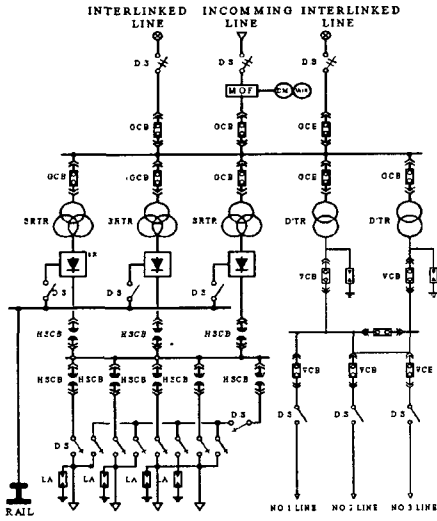


그림 3 전력공급시스템 단선도

2.2 직류 급전시스템의 특성

전철을 부하로 사용하고 있는 전력공급시스템은 선로 및 운행조건, 부하인 차량의 특성에 따라 부하의 요구량이 변동하며, 급전회로와 관련된 변전소 조건과 임피던스 조건 등에 따라 전체 전력공급시스템의 전류 및 전압이 또한 달라진다.

2.2.1 차량의 특성

차량은 초기에는 저항차였으나 최근에 초과제어차, 인버터제어차 등의 회생차가 본격적으로 투입되어 주류가 되고 있다. 차량내 부하를 살펴보면 크게 견인력을 제공하기 위한 견인전동기가 요구하는 견인력 부하와 차량내 보조동력용인 보조전력으로 구분된다. 보조동력은 일정 부하라고 생각해도 큰 무리가 없으나, 견인력은 소위 Run - Curve라고 하는 차량운동 특성에 따라 기인된다. 일반적으로 Run - Curve는 열차운동중의 속도, 시간, 주행거리, 전류, 전력량 등의 상관관계를 표시한 것을 말한다. 여기에서 차량이 요구하는 견인력은 차량의 중량, 승객의 중량, 차량의 성능 등 차량조건 외에 선로의 조건 즉, 구배, 곡률, 역위치 등에 따라 달라지며 또한 운행조건에 따라 달라진다.

2.2.2 급전회로망의 특성

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

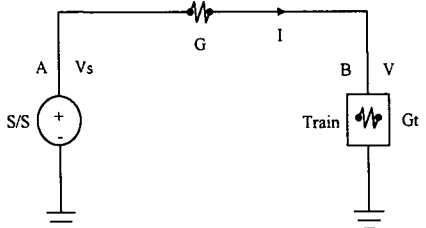


그림 4, 간략화한 직류급전회로망

그림 4에서 전력의 흐름을 살펴보면, 차량이 요구하는 전력 P_t 는 다음과 같이 계산할 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 전력을 P 는 다음과 같이

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

쓸 수 있으며, 여기서 회로의 전류 I 는 다음과 같다.

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

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

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

식 (4)에서 전력 P 는 전압 V 에 대하여 2차 방정식이며, 이 전력은 차량이 요구하는 전력 P_t 와 같은 점에서 구해져야 한다. 전원전압 V_s 도 변하게 되면 그것 또한 고려하여야 한다. 여기에서 간략히 차량 및 변전소를 1개만을 생각하였으나 이들이 추가하게 되면 복잡하게 된다. 그리고 회생차량의 도입으로 회생에너지까지 고려하면 더욱 복잡하게 된다. 이상에서 변전소를 전압원으로 해석하였으나 전류원으로 등가가 가능하다.

3. 직류 변전소 최적용량 설계법

직류변전소의 최적용량을 설계하기 위해서는 직류급전시스템의 특성에서 차량의 특성과 급전회로망의 특성을 살펴본 바와 같이 제반조건을 고려하여 용량을 설계하는 것이 요구된다.

3.1 기존의 직류변전소 용량 설계법

과거에는 이들의 산정은 차량이 요구하는 전력과 전압 강하를 이용하여 간단히 계산한 경우도 있었지만, 컴퓨터의 도입 이후에는 직류급전시스템을 컴퓨터의 계산능력에 맞도록 모델링하여 산정하고, 이를 적용하고 있다. 컴퓨터를 이용한 전력 시뮬레이션 기법으로는 크게 3가지 방식이 있으나, 일반적으로 이용하는 방법을 기술하면 다음과 같다. 먼저 차량이 요구하는 다이내믹 운동방정식의 해를 구하고, 다음으로 이것을 포함하여 급전망을 모델링 한 해를 구하여 용량을 산정하는 방법이 널리 이용되고 있으며 보다 최적의 용량을 산정하기 위한 연구가 진행되고 있다.

3.2 최적용량 산정을 위한 전력시뮬레이션

그림 5는 차량, 운행관리, 신호통신, 변전소 등 직류 전철 시스템 전체를 종합적으로 모의할 수 있는 다이내믹 시스템으로 구성되어 있다. 직류변전소의 최적용량을 산정하기 위해서는 이들의 정확한 모델링이 요구되며, 급전회로망의 정확한 모델링과 그의 해를 정확히 구하는 것이 필수적이다.

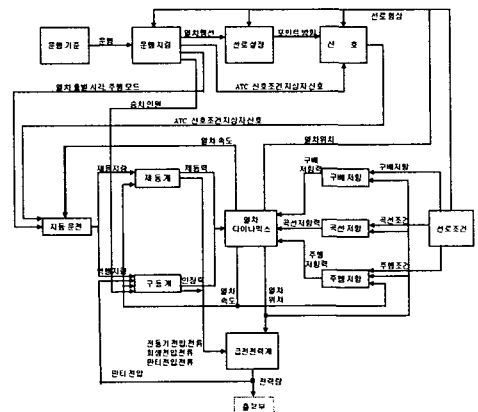


그림 5. 전철 시스템 종합 모델링

3.2.1 시뮬레이션에 필요한 데이터

그림 5에 나타낸 것처럼 시뮬레이션에서 필요한 입력 데이터는 상세한 선로조건, 차량조건, 운행조건, 변전소 조건 및 급전회로망 해석에 필요한 각종 자료 등이다.

3.2.2 급전회로망 해석

해석을 위한 급전회로망은 급전계통내에 포함되어 있는 변전소, 열차, 급전선을 Node와 Branch로 접속하여 표현할 수 있다. 여기에서 변전소는 전류원과 그의 등가 저항으로, 차량은 각각의 상태에 따른 전류원으로 표시하고, 선로는 콘덕턴스로 표현한 등가회로가 그림 6과 같다.

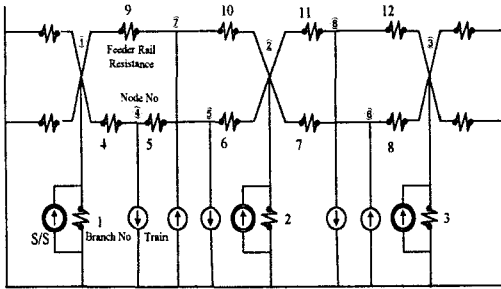


그림 6, 급전회로의 등가회로

이 회로에서 접속관계를 Matrix로 표현하면 Matrix [H]는 아래와 같으며, 열은 Branch, 행은 Node로 나타낸 것이다.

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0
2	0	1	0	0	0	1	-1	0	0	1	-1	0
3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
4	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1

이 접속 Matrix [H]를 이용하여 급전계통 전체의 Node 수를 N, Branch수를 B 라고 하면, N행B열의 접속행렬 $[H]_B^N$, B행B열의 콘덕턴스 행렬 $[Y]_B^B$, N행 1열의 Node전류행렬 $[I_n]_1^N$ 을 나타낼 수 있다.

이제 Branch전류행렬을 $[I_b]_1^B$ 로 하면

$$[H]_B^N [I_b]_1^B - [I_n]_1^N = 0 \quad (5)$$

$$[Y]_B^B [V_b]_1^B = [I_b]_1^B \quad (6)$$

이 성립한다. 또 Node전압행렬은 $[V_n]_1^N$ 접속행렬의 전치행렬을 $[H^T]_N^B$ 라고 하면, 접속행렬의 특성으로부터

$$[H^T]_N^B [V_n]_1^N = [V_b]_1^B \quad (7)$$

이 성립한다.

(5) ~ (7)식으로 $[I_b]_1^B$, $[V_b]_1^B$ 을 소거하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[H]_B^N [Y]_B^B [H^T]_N^B [V_n]_1^N - [I_n]_1^N = 0 \quad (8)$$

여기에서 $[H]_B^N [Y]_B^B [H^T]_N^B$ 를 $[U]_N^N$ 이라고 두면, 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$[U]_N^N [V_n]_1^N = [I_n]_1^N \quad (9)$$

(9), (7), (6)식을 이용하면 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[V_n]_1^N = [U^{-1}]_N^N [I_n]_1^N \quad (10)$$

$$[V_b]_1^B = [H^T]_N^B [V_n]_1^N \quad (11)$$

$$[I_b]_1^B = [Y]_B^B [V_b]_1^B \quad (12)$$

따라서, $[H]_B^N, [Y]_B^B, [I_n]_1^N$ 가 알고있는 행렬이므로 (10)~(12)식에 의하여 등가회로의 전압, 전류분포를 구하는 것이 가능하다.

3.2.3 전력시뮬레이션 프로그램

프로그램은 크게 입력부, 계산부 및 출력부로 구성되어 있으며 그림 7은 프로그램 흐름을 보여준다. 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.

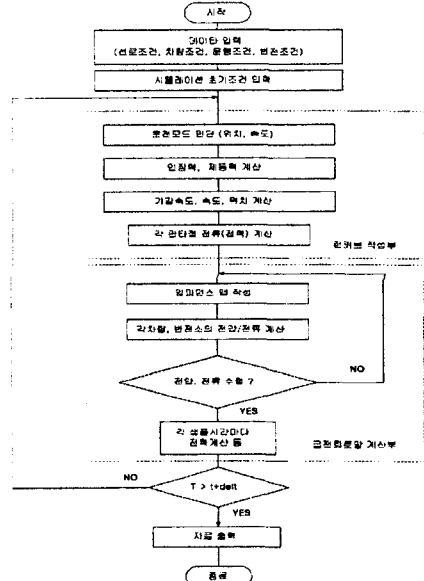


그림 7, 전력시뮬레이션 플로우 차트

4. 결 론

본 논문에서는 전철용 직류변전소의 최적용량을 설계하기 위하여 선행되어야 하는 시스템의 특성, 모델링 범위, 고려사항, 방법, 급전시스템 회로망 해석 및 그의 해를 구하기 위한 알고리즘 및 절차를 대하여 기술하였고, 그의 시뮬레이션 프로그램을 제시하였다.

본 연구를 계속 진행하면서 프로그램의 검증과 개선을 도모할 예정이며, 서론에서 기술하였듯이 변전소의 위치 선정 및 전차선의 구성에 대해서도 연구를 병행 할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y. Cai et al, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative DC-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 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, 1995
- [3] C.S. Chen et al, "Analysis of Dynamic Load Behavior for Electrified Mass Rapid Transit Systems", IEEE, 19