

## 해외기술

해외  
기술最適鐵道 시스템 計劃을  
실현하는 電力시뮬레이션

## 1. 머리말

전기철도의 省에너지화를 목적으로 하여 직류전기철도에 Chopper 제어차량이나 VVVF Inverter제어차량 등 電力回生 브레이크를 설치한 차량이 도입되고 있다. 또한 변전소에도 送出電壓을 제어할 수 있는 "사이리스터"整流器나, 교류측에 전력회생을 하기 위한 인버터 등의 장치가 설치되는 경우가 증가하고 있다. 이와 같은 전력회생차량이나 變換裝置에 의한 회생전력을 유효하게 활용하기 위하여서는 饋電 System 설계시에 그 전력특성을 상세하게 해석하고 검토할 필요가 있다. 이를 위해, 열차주행시의 전압, 전류, 전력을 예측하기 위한 시뮬레이션이 실시되고 있다.

여기서는, 直流電氣鐵道에 가장 적합한 饋電 System 설계를 위하여 동사에서 개발한 시뮬레이션 手法과 그 적용예를 소개한다.

## 2. 動的 시뮬레이션의 장점

직류전기철도의 운전전력을 구하는 시뮬레이션 手法은 크

게 두가지로 나눌 수 있다. 여기서는 그 두가지를 靜的 Simulation 手法과 動的 Simulation 手法이라 부르기로 한다.

靜的 Simulation 手法이란 정격전압에서 열차의 주전동기특성(속도-인장력 곡선, 속도-전류곡선)으로부터 얻어지는 열차전류를 바탕으로 饋電回路를 계산하는 수법이며, 이 수법은 收斂計算이 필요치 않기 때문에 계산시간이 짧다는 장점이 있으나, 열차 주행시간은 饋電電壓의 변동에 불구하고 일정하기 때문에, 出力결과로 얻어지는 饋電전압은 실제의 주전동기특성을 반영하지 못하고 있다. 또한 이 수법에서는 정격전압에서의 열차전류를 쓰기 때문에, 변전소에 설치되는 인버터 등의 장치에 의한 饋電特性을 고려할 수가 없다.

動的 Simulation이란, 과거의 饋電전압에 따른 주전동기 제어특성으로부터 얻어지는 열차전류와 변전소 전류원을 기초로 최초의 饋電회로를 계산하고, 그 결과 얻어진 饋電전압(Pantagraph점 전압)에 따른 새로운 열차전류와 변전소의 饋電전압 특성에 따른 전류원으로 설정 변경하여, 모든 열차와 변전소가 그 제어특성을 만족할 때까지 收斂計算을 하는 방법이다. 이수법은, 수렴계산을 하기 때문에 계산시간이 길

다는 단점이 있으나, 열차의 주행시간은 궤전전압에 대응하여 변동하고, 변전소에 설치되는 인버터 등의 장치를 포함한 궤전시스템 전체의 특성을 고려한 出力결과를 얻을 수가 있다.

### 3. 필요한 入力項目

직류전기철도를 動的 Simulation하기 위해 필요한 입력 데이터 항목을 아래에 적는다.

#### (1) 饋電條件設定 Data

변전소위치, 他線區와의 연계점의 지정, 변전소종별, 정류기용량, 정격전압, 전압변동률, Inverter용량, Inverter제어전압, 정전압 제어특성, 상하 Tie-post위치, 궤전선정수(단위길이당 Rail 및 궤전선저항의 합성치) 등

#### (2) 운전조건설정 Data(설정 驛間마다)

停電驛 설정, 정차시간, 승차인원, 기준운전속도(Notch-on/Notch-off속도), 그리고 이외에 長區間운전의 경우는 力行區間의 지정 또는 地点速度제어치

#### (3) 차량조건설정 Data

차종설정, 전동차의 중량 및 차량수, 非전동차의 중량 및 차량수, 정원, 평균체중, 보기전류, 주전동기 대수, 주전동기특성(속도-전류특성, 속도-인장력 특성), 전압특성(力行時의 정격전압, 회생시의 정격전압, Limiter 전압), 회생정지속도, 限流值, 應荷重특성 등

#### (4) 線路條件設定 Data (設定區間마다)

선로구배, 곡선반경, 제한속도. 또한, Simulatin을 실시하는데 필요한 다음의 Simulation조건과, 열차의 초기위치를 지정하는 열차배치 Data가 있다. 열차배치는 아래와 같이 한다. 주행곡선 Simulation에서는 첫끝 또는 맨끝 위치에 단일열차를 배치한다. 운전전력 Simulation에서는 주행곡선Simulation의 실시로 얻어진, 운전간격에 대응한 위치

에 복수열차를 배치한다.

- (a) Simulation 조건 : Simulation시간, 운전간격, 수렴허용오차, Simulation종별(주행곡선, 운전전력, 운전전력과 레일전압)
- (b) 열차배치 Data : 차종, 주행선로(상행, 하행, 각역정차, 급행), 운전 Mode(力行, 惰行, 제동, 정차), 위치, 속도, 정차경과시간, 주행구간

### 4. 出力項目과 그 用途

이 Simulation수법으로부터 얻어지는 출력항목을 적고, 궤전 System설계에서 이것들이 어떻게 쓰여지는가를 설명한다.

#### (1) 饋電電壓

궤전설비 適正化의 검토를 위해 사용된다.

예를 들면 주어진 변환기 용량, 변전소위치, 궤전선 사이즈 등에서 차량이 정상적으로 주행할 수 있는 궤전전압이 확보되는가의 여부를 평가한다.

#### (2) 線路走行時間

운전시간표가 확보되는지를 평가한다.

#### (3) 運轉電力量, 回生電力量

에너지收支를 명확히 하고, 설비용량과 동력비를 산정한다.

#### (4) 레일電壓

電蝕의 예측, 승객의 감전방지, 그리고 地磁氣 擾亂의 예측에 쓰인다.

#### (5) 饋電用 變換器電流

전원계통에 대한 고조파장해의 검토(고조파유출전류, 그리고 전압, 변형률의 산출근거로 한다), 그리고 전력계통에 미치는 潮流의 품질을 확보할 수 있는 교류측 수전계통설비(변압기 용량, 케이블 사이즈 등)의 용량검토에 쓴다.

**해외기술**

**(6) 饋電線電流**

직류측계전선전류에 의한 沿線電話의 잡음장애를 검토하는데 쓴다.

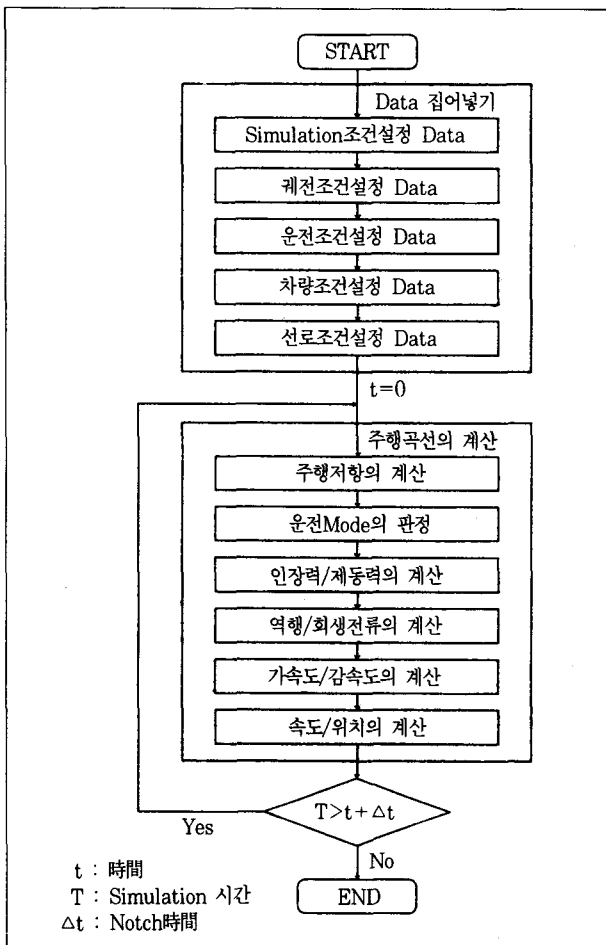
**5. 計算原理**

직류전기차량에 의한 饋電 System의 운전전력을 구하기 위하여, 饋電계통에 포함되는 변전소는 電流源과 等價내부 저항으로 표현하고, 또한 饋電계통내에 있는 열차는, 그 운전상태에 응한 전류원으로서 각열차의 위치에 배치한 등가

회로를 사용한다. 이로 인해, 이 Simulation프로그램의 주요부분은, 열차의 운전상태를 모의한 열차위치와 그 속도·전류 등을 산출하는 부분(주행곡선 Simulation)과, 饋電계통의 등가회로를 작성하여 전압·전류 분포를 구하는 부분(운전 Simulation)으로 이루어진다.

**5.1 주행곡선 Simulation**

운전전력 Simulation을 하기 전에, 1열차의 1선로구간에 대한 주행을 모의하여 운전간격마다의 열차의 초기상태 (위치, 속도, 운전 Mode, 역정차경과시간)을 결정한다. 주행곡선 Simulation에 플로차트를 그림 1에 표시한다. 각종 설정Data를 읽은 후, 계산시간마다 열차의 속도와 위치가 계산된다. 계산과정에 따라 다음에 그 원리를 적는다.



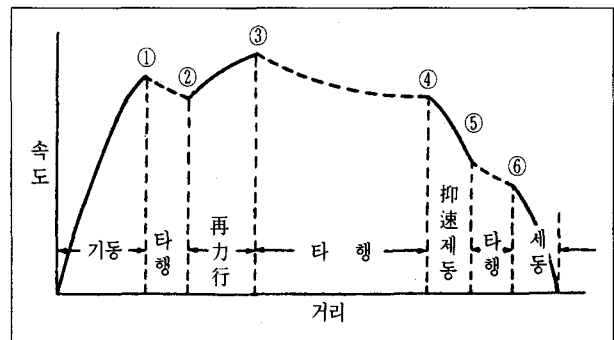
〈그림 1〉 주행곡선 Simulation

**(1) 走行抵抗의 計算**

열차의 주행저항 R는 열차고유의 것으로, 통상 그 속도 V의 관수(2차식)로 주어진다. 이 식에 의하여, 현시점부터 Δt전의 속도 V(t-Δt)를 써서 현재의 열차저항 R(t)를 구한다.

**(2) 運轉 Mode의 判定**

열차의 引張力이나 制動力, 전류 등 산출근거는 열차의 운전 Mode에 따라 변한다. 그래서, 이들 값을 산출하기 위해서는, 먼저, 그 시점에서의 열차운전Mode를 판정할 필요



〈그림 2〉 運轉曲線

가 있다. 역간에서의 열차운전 Pattern은 일반적으로 그림2와 같이 표시된다. 즉, 역을 발차한 후,力行과惰行 Mode를 번갈아 반복하며, 다음 역에 가까워지면 제동과 타행 Mode를 번갈아 반복하며, 마지막에 정지한다. 이와 같은 운전 Pattern에서의 열차의 운전Mode의 판정은 다음과 같이 한다.

먼저 기준운전곡선이 주어진 경우에는 ①부터 ⑥시점에서의 열차의 속도·위치와 이들 데이터를 비교하여 운전Mode를 판정한다. 예를 들면 기동Mode부터 타행Mode로의移行은 열차속도  $V(t)$ 가 기준운전곡선의 지점 ①의 속도에 달하면 실시한다. 이때의 속도를 Notch-off속도라고 부른다.

②와 ④의 지점에서는 운전Mode는 위치로 판정한다. ②의 지점에서는, 타행Mode로부터 역행Mode로 이행된다. 이때의 속도를 Notch-on속도라 부른다. ③과 ⑤지점에서는, 그시점에서의 속도 또는 위치가 주어진 데이터에 도달한 때에 운전Mode를 변경한다. 또한 정지제동의 개시(지점⑥)는, 그 시점에서의 열차의 속도, 위치, 제동력으로부터 제정된 위치(다음역)에서 정지할 수 있는지의 여부를 판정하는데 따라 결정한다.

新線계획시점에서는 기준운전곡선은 정해져 있지 않지만, 表定속도는 지정되어 있다.

이 경우에는, 표정속도로부터 각역간의 주행시간의 기준을 알기 때문에, 표정속도를 만족시킬 수 있는 Notch-off속도, Notch-on속도는 시행착오에 의해 결정한다. 즉, 기준운전곡선이 정해져 있지 않은 경우에는, 이에 상당하는 운전곡선을 설정하는 작업이 필요하게 된다.

(3) 列車의 電流, 引張力 및 制動力의 計算

전류, 인장력 및 제동력에 관하여서는, 車種에 따르는 주전동기의 속도-전류특성, 속도인장력특성, 속도-제동력 특성을 기초로 열차의 운전방정식으로부터 구해지는 속도에 대응한 값을 구한다. 경우에 따라서는, 속도-인장력 특성 대신 전류-인장력특성이 주어질 경우도 있다.

(4) 列車의 速度, 位置의 計算

열차를 質点으로 보고, 이것에 가해지는 外力과 가속도와 의 관계로부터 운동방정식을 세워, 이것을 풀음으로써 속도

를 얻게 된다. 다시 속도를 적분하여 열차위치를 얻는다. 1 列車의 운동방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{W(1+\gamma)}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = F - B - R + G - C \dots\dots\dots(1)$$

W : 열차의 총중량 [kgf]  
 γ : 회전부분에 의한 보정계수  
 g : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]  
 v : 열차의 가속도 [m/S]  
 F : 열차의 인장력 [kgf]  
 B : 열차의 제동력 [kgf]  
 R : 열차의 주행저항 [kgf]  
 G : 구배저항 [kgf]  
 C : 곡선저항 [kgf]

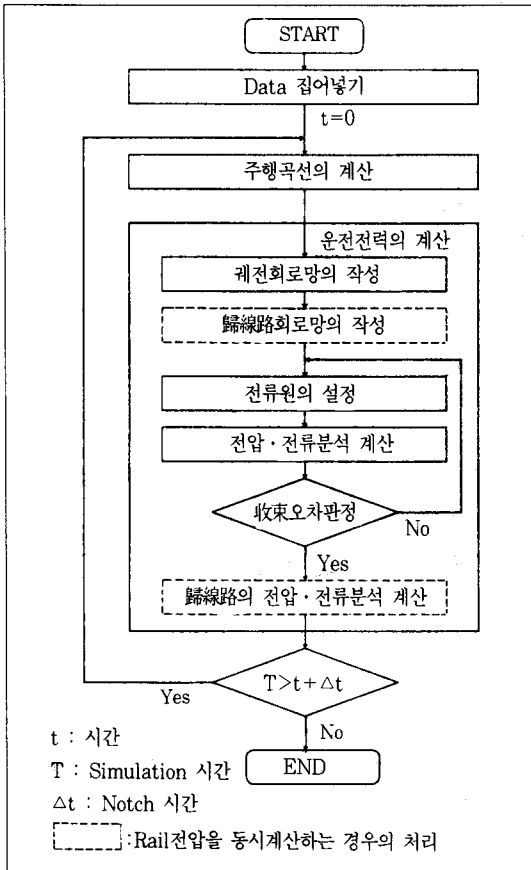
5.2 운전전력 Simulation

상술한 주행곡선 Simulation으로부터 얻은 주행방식과 열차배치로부터 재차 열차주행을 모의하고, 그 주행에 대응한 열차위치와 열차전류를 이용하여 궤전회로계산을 한다. 운전전력 Simulation의 플로차트는 그림 3과 같다. 먼저, 각종설정 Data를 집어넣는다. 또한 각 열차의 운전Mode, 위치속도 등의 초기값으로서 주행곡선 Simulation의 계산 결과(열차설정 Data)를 집어넣는다. 다음에, 계산시간마다 열차의 속도와 위치가 계산된다. 앞절에서 설명한 靜的인 주행곡선 Simulation에서는, 궤전회로에 의한 전압변동을 고려하지 않고, 정격전압에서의 전동기 특성으로부터 열차의 전류를 구하고 있으나, 실제에 있어서 열차전류는 Pantan 전압에 따라서 변화하기 때문에, 이 운전전력 Simulation 프로그램에서는 그림에서 보는 바와 같이 열차의 운전상태를 구하는 부분(주행곡선계산)과, 궤전계통의 등가회로를 작성하여 전압·전류 분포를 구하는 부분(운전전력 계산)을 동일한 反復系에 포함하여 연산한다. 이렇게 함으로써, Simulation시간내의 어느 시간에도, 열차의 운전상태와 궤전계통의 전압·전류분포와의 整合을 이룰 수 있게 된다.

(1) 走行曲線計算

앞절에서 설명한 주행곡선 Simulation과 거의 같은 방법

해외기술



〈그림 3〉 운전전력 Simulation

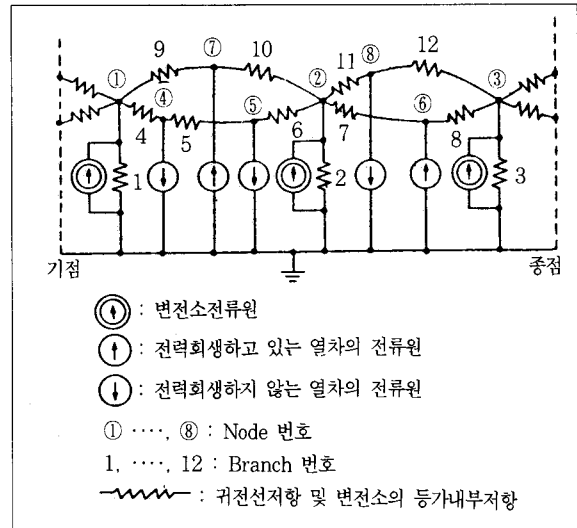
이다. 다만, 여기서는 복수의 열차의 주행을 모의한다. 또한 각 열차의 Pantap점전압을 고려하여, 이에 대응한 열차전류가 계산된다.

(2) 饋電回路網의 作成

궤전계통의 전압·전류분포는 Node법에 의하여 구해진다. 이를 위한 등가회로를 작성하기 위하여, 궤전계통에 포함된 변전소, 상하Tie-Post, 열차, 궤전선로를 Node와 Branch로 접속하고, 그 접속관계를 표현하는 접속행렬을 작성한다. 변전소를 전류源과 그 등가내부저항으로, 열차는 각각의 운전상태에 대응한 전류원으로 표시한 궤전회로의 등가회로예는 그림 4와 같다. 이 회로에 대응한 접속행렬은 다음식과 같이 표시된다.

Node 번호 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 ..... Branch 번호

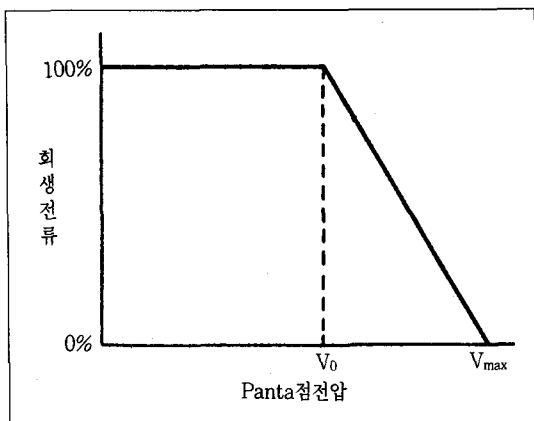
$$[H] = \begin{matrix} 1 & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ 2 & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \\ 3 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ 4 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ 5 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ 6 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ 7 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ 8 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \dots\dots(2)$$



〈그림 4〉 등가회로의 작성예

(3) 電流源의 設定

Pantap점전압과 회생전류의 줄어드는 율과의 관계를 그림 5에 나타낸다. 어느 시점에서 회생차량의 Pantap점전압의 하나라도 그림의  $V_0$ 보다 높은 경우에는 Pantap점전압과 열차전류가 整合하지 않기 때문에, 電流源의 변경에 따르는 수렴계산이 필요하게 된다. 마찬가지로 변전소의 송출전압의 어느 하나라도 무부하단자전압보다 높을 경우에는 변전소 전류원의 변경에 따르는 수렴계산이 필요하게 된다. 이때, 상기의 현상이 일어난 변전소에 대해서는 그 송출전압을 등가내부저항으로 나눈 값을 새로운 電流源으로 하고, 인버터 동작시에는 인버터 동작전압을 등가내부저항으로 나눈 값에서 인버터의 동작특성에 따르는 유입전류를 공제한 값을 새로운 전류원으로 새로운 전압·전류분포를 구한다. 송출전압이 무부하단자전압보다 높은 변전소에 대하여서는 그 제어



〈그림 5〉 회생전류의 줄어드는 특성

특성을 충족할 때까지, Panta점전압이  $V_0$ 보다 높은 회생차량에 대하여 그 줄어드는 특성을 충족할 때까지 수렴계산을 계속한다.

(4) 電壓·電流分析의 計算

어느 시점에서의 궤전계통전체의 Node數를  $n$ , Branch數를  $b$ 로 한다. 이때 전향에 표시한  $n$ 행  $b$ 열의 接續行列을  $H_{nb}$ ,  $b$ 행  $b$ 열의 Conductance 行列을  $Y_{bb}$ , Node전류 Vector를  $I_n$ 으로 한다. 이것들은 既知의 行列이다.

이제, Branch 전압 Branch전류 Vector를 각각  $V_b$ ,  $I_b$ 로 하고, Node 전압 Vector를  $V_n$ 이라고 하면, 다음의 3식이 성립된다.

$$H_{nb} \cdot I_b = I_n \dots\dots\dots (3)$$

$$Y_{bb} \cdot V_b = I_b \dots\dots\dots (4)$$

$$H_{nb}^T \cdot V_n = V_b \dots\dots\dots (5)$$

다만, T는 轉置를 표시한다.

(3)~(5)식으로부터 다음의 3식을 구할 수 있다.

$$V_n = [H_{nb} \cdot Y_{bb} \cdot H_{nb}^T]^{-1} \cdot I_n \dots\dots\dots (6)$$

$$V_b = H_{nb}^T \cdot V_n \dots\dots\dots (7)$$

$$I_b = Y_{bb} \cdot V_b \dots\dots\dots (8)$$

(6)~(8)식을 계산하면, 등가회로의 전압·전류를 구할 수 있다.

(5) 레일電壓의 計算

運轉電力의 계산과 동시에 Rail전압을 계산할 수 있다. 이 경우에는, 우선 레일상의 소정의 위치에 변전소와 차량에 대응하는 Node를 설정한다. 다음에, 이 Node와 電位 零의 無限遠大地와의 사이에, 운전전력의 계산으로부터 얻어진 변전소·열차전류와 반대부호의 전원을 설정하고, 그 전류원과 병렬로 그 Node가 접속되는 Branch에 상응하는 대지누설저항의 半分을 접속한 등가회로를 작성한다. 이 등가회로로부터 계산된 각 Node 전압을 Rail 전압으로 한다.

6. 饋電設備容量의 檢討

일반적으로 運轉電力 Simulation에 의하여, 궤전설비용량(변전소의 정류기용량과 궤전선의 Sige)을 검토하는 경우의 입력조건으로서, 차량조건 및 선로조건은 固定置로 취급하나, 운전조건은 장래의 수송력 증가를 예상한 다음의 예측치를 이용한다.

- (1) 예측되는 최대승차인원
- (2) 예측되는 최대운전간격
- (3) 예측되는 최대표정속도

이러한 조건하에서, 정상운전을 확보하기 위한, 궤전설비용량으로서, 다음의 3항목을 만족시킬수 있어야 한다.

(a) 정상적인 饋電(변전소의 탈락 없음)의 조건에서 운전전력 Simulation을 실시하여, 그 결과로부터 중간변전소 가운데서 최대부하의 변전소를 선정한다. 또한, 이 경우 각 변전소의 궤전전력량에 큰 차이가 없으면, 변전소배치는 타당한 것으로 판단된다.

(b) 중간변전소 중에서 최대부하의 변전소가 탈락한 조건에서 운전전력 Simulation을 실시하고, 그 결과로부터 인접변전소의 궤전전력량을 기초로 변전소의 설비용량을 결정한다. 이 경우, 탈락한 변전소부근에 있는 열차의 최저 Panta点전압이, 허용범위내인지를 검토할 필요가 있다. 그러나 Simulation 경험에 의하면, 중간변전소의 탈락조건에 경우에, 열차의 최저 Panta점전압이 허용범위를 벗어나는 일은 발생하지 않는다. 만일 그러한 상태가 검출되는 경

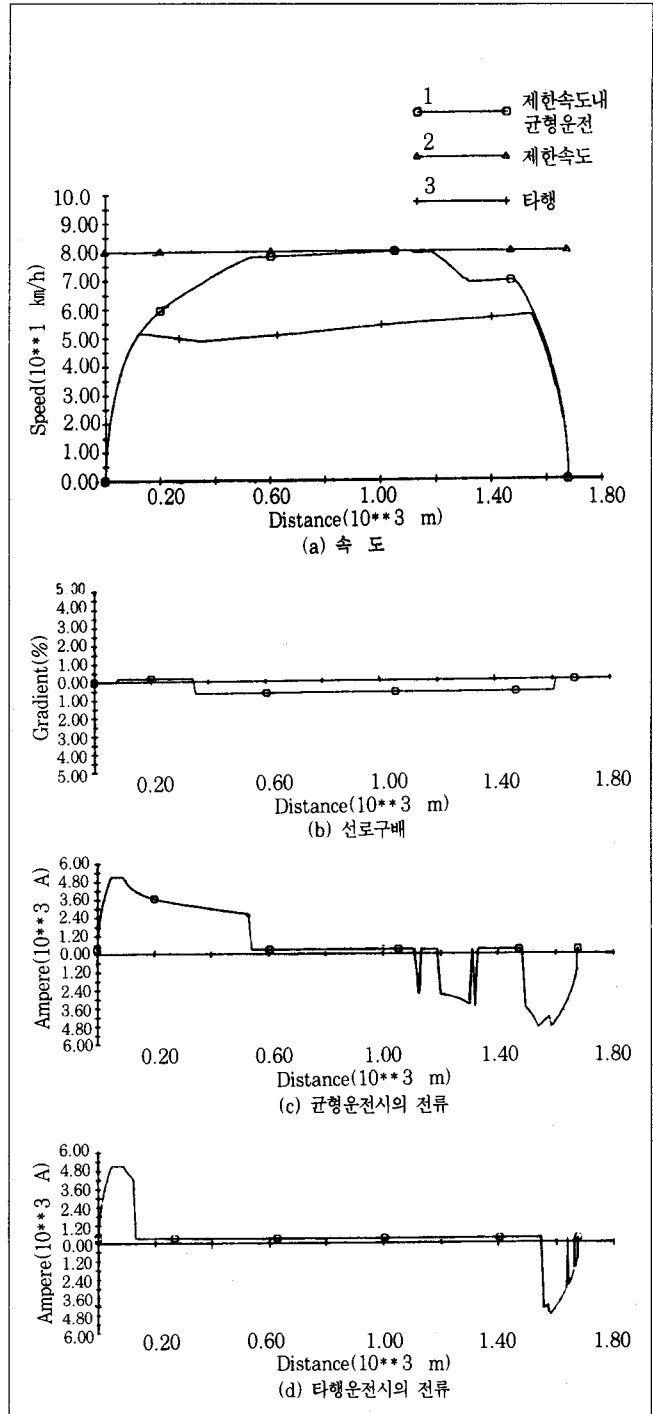
해외기술

우에는, 변전소용량 또는 변전소위치가 타당하지 못하므로, 이러한 조건을 수정하여, 타당한 변전소용량 또는 변전소위치를 결정한다.

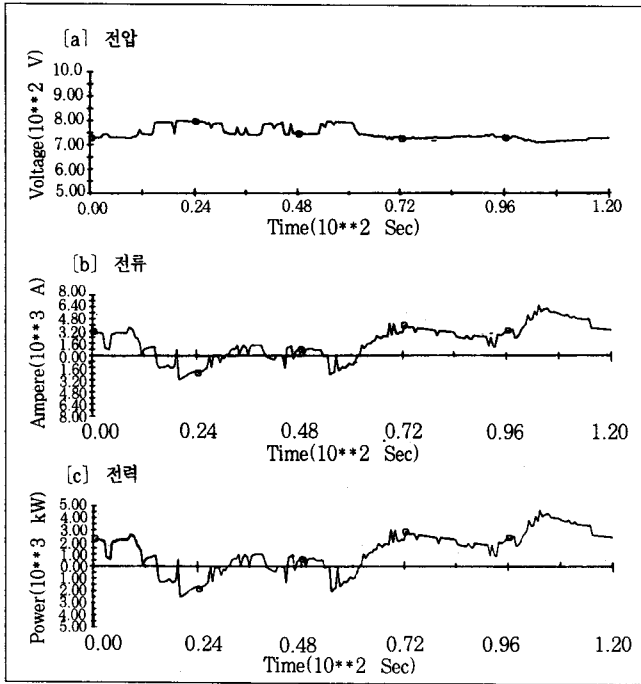
(C) 다음에 線區의 말단에 위치하는 변전소 중에서, 한끝의 탈락조건에서 운전전력 Simulation을 실시하여, 그 결과로부터 인접변전소의 궤전전력량을 기초로 변전소의 설비용량을 결정한다. 이 경우, 탈락한 변전소 부근에 존재하는 열차의 최저 Pantan전압이, 허용범위내인가를 검토할 필요가 있다. 이 조건에서는 열차에 대한 饋電이 한쪽으로만 이루어지기 때문에, 열차의 최저 Pantan전압이 허용범위를 벗어날 경우가 많이 일어날 수 있다. 이 경우에는, 線區의 중요도에 의해서도 발생하지만, 허용범위 이하의 Pantan전압의 계속시간, 열차의 지연시간 등을 고려하여, 말단에 상하 Tie-post의 설치, 궤전선보강 등의 대책을 강구할 필요가 있다.

상기의 Simulation 설정조건에서도 알 수 있듯이, 계산결과에 큰 영향을 미치는 항목은 차량조건(차량중량, 주전동기특성, 주행저항), 선로조건(선로구배, 곡선반경, 제한속도), 운전조건(역위치, 표정속도, 운전간격 승차인원)이다. 또한, 궤전설비조건(변전소위치, 변전소용량, 변전소특성, 상하 Tie-post, 궤전선정수)은 열차운행을 정상적으로 하기위한, 適否를 평가하기 위한 검토조건이다. 다만, 운전조건은, 고객(발주자)의 장래계획을 감안한 예측치로 되는 경우가 많기 때문에, 보다 실상에 가까운 운전조건을 제출받아, 그 Simulation의 실행결과도 비교검토자료로서, 발주자측에 제출하는 것이 바람직하다.

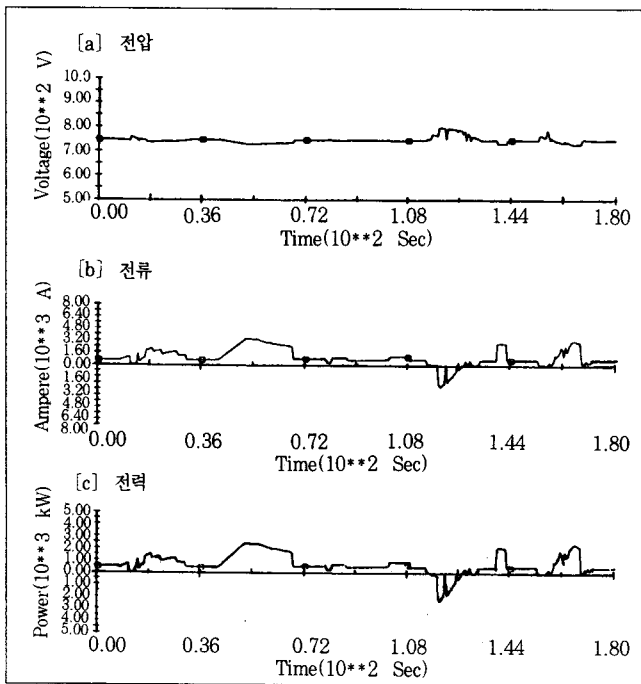
또한 운전전력의 일부하곡선은, 각 시간대마다의 운전조건(운전간격, 승차인원)에서 정상궤전시의 조건에서 운전전력 Simulation을 실행하여, 각 변전소마다의 궤전전력량을 집계함으로써 구할 수 있다.



<그림 6> 시행곡선 Simulation 결과



<그림 7> 운전전력 Simulation 결과(1)



<그림 8> 운전전력 Simulation 결과(2)

## 7. Simulation결과의 出力例

Simulation의 출력예를 그림 6~그림 8에 표시한다. 그림 6은 주행곡선 Simulation출력의 일부로서, 제한속도내 均衡運轉 (속도유지)의 경우와 惰行運轉의 경우의 주행곡선이다. 횡축에 거리를 나타내고, 종축에 그림(a)에서는 속도를, (b)에서는 선로구배를, (c)에서는 균형을 전할 경우의 열차전류를, (d)에서는 타행운전할 경우의 열차전류를 나타내고 있다. 여기서 力行電流를 正, 回生電流를 負로 하고 있다. 보통의 경우, 이밖에 주행시간 등을 출력시키고 있다.

그림 7과 그림 8은 運轉電力 Simulation의 출력의 일부이며, 그림 7은 운전간격이 2분으로서 제한속도내 균형운전의 경우를, 그림 8은 운전간격이 3분으로서 타행운전의 경우를 나타낸다. 횡축에 시간(0~180초)을 표시하고, 종축에 (a)에서는 변전소 송출전압을, (b)에서는 전류를, (c)에서는 전력을 표시하고 있다. 이 예에서, 변전소는 Inverter附 정류기용이며, 정격계전전압은 750V이다. 전류와 전력은, 流出을 정부호로서 표시하고 있다.

## 8. 맺음말

Simulation 技術은, 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어의 발전과 함께 착실하게 진보되고 있으며, 새로운 범용의 Simulation 언어와 數值演算 Package 등이 발표되고 있다. 또한, 전기철도의 차량 및 지상설비도 효율이나 성능의 개선이 지속적으로 이루어지고 있으므로, 앞으로도 Simulation의 적용분야는 확대되어 갈 것으로 생각된다. 이러한 상황과 더불어 동사의 Simulation기술을 항상 개량해 나갈 것이며, 더욱 광범위한 활용을 도모해 나가자 한다.

明電舎 發行 明電時報 轉載