

철도 부하의 이동성을 반영한 변전소 정태부하모델링 수립에 대한 연구

A Study on a Substation Static Load Model Including the Mobility of a Railway Load

창상훈* · 윤석민** · 김정훈†
(Sang-Hoon Chang · Seok-Min Youn · Jung-Hoon Kim)

Abstract - Nowadays, it is expected that mobility loads such as electric railways and electric vehicles will be penetrated gradually and affect on the power system stability by their load characteristics. Various researches have been carried out about electric vehicles for the recent decade though the load of electric railway could be forecasted because of the specified path and timetable, is a field with a long historic background. Some precise 5th polynomial equations are required to analyze the power system stability considering mobility load to be increased in the immediate future while the electric railway dispatching simulator uses load models with constant power and constant impedance for the system analysis. In this paper, seasonal urban railway load models are established as the form of 5th polynomial equations and substation load modeling methods are proposed merging railway station load models and general load models. Additionally, load management effects by the load modeling are confirmed through the case studies, in which seasonal load models are developed for Seoul Subway Line No. 2, Gyeongui Line and Airport Railroad and the substation load change is analyzed according to the railway load change.

Key Words : Electric Railway, Urban Rail, Rapid Load Variation, Power System Stability, Static Load Modeling, 5th Polynomial Equation, Mobility Load, Electric Vehicle

1. 서론

최근 세계적으로 녹색에너지에 대한 관심이 커지면서 스마트그리드의 도입 및 신재생에너지의 개발이 진행되고 있고, 스마트그리드 기술 중 축전지 기술 발달로 전기차의 충전기 부하, 핸드폰과 노트북 등의 충전기 부하를 비롯한 새로운 많은 이동 부하가 등장하고 있다. 여기에 점점 더 수요가 증가하는 철도 부하로 인해 부하의 이동현상이 커질 것이 예상되므로 미래의 계통안정화에 예기치 못한 문제가 발생할 것으로 예측된다. 전기차의 충전기 부하는 현재 전력사용량이 531GWh로 비중이 0.1%, 피크부하는 최대 436MW로 비중이 0.5%에 불과하지만 2020년에는 전기차가 180만대가 보급될 것으로 예상되어 전력사용량은 5,770GWh로 비중이 1.2%, 피크부하

는 최대4,743MW로 비중이 5%로 증가할 것으로 예측하고 있다.[1] 또한 철도 부하는 2013년 12월 현재 국유철도 전기화율 68.35%이고 전력사용량은 2185GWh로 비중이 0.4%이지만 2020년까지 85%로 보급을 목표로 하고 있다.[2]

따라서 2020년 피크부하는 95.316GW로 예측하고 있고 그중 이동 부하는 8.989GW로 비중이 9.43%로 추정되며 이 중 전기차의 충전기 부하를 제외한 철도 부하가 4.45%정도로 예상된다. 이로 인해 지금은 일반가정이나 회사, 공장 등에서 사용하는 기존의 고정 부하에 비해 이동 부하의 비중이 매우 작기 때문에 급전 및 계통 안정도에 별다른 문제점이 발생하지 않고 있지만 점차 이동 부하가 많아지게 되면 부하급변이 발생하여 전력계통 안정도를 위협하므로, 이를 해석하기 위하여 이동 부하의 전압 및 주파수특성에 대한 고려는 필수불가결한 시대적 요청이라 할 수 있다.[3]

이동 부하 중 전기차는 이동이 규정되어 있지 않기 때문에 어느 지역에서의 부하로 새로이 나타날지를 알기 힘든 불확실성이 큰 이동 부하이다.[4] 반면, 전기철도는 운행다이어그램에 따라 운전되고 철도노선의 구배, 곡선 등의 선로조건과 운전자의 운전 습관에 따라 정해진 이동경로와 시간에 따라 움직이고 있기 때문에 소비전력을 예측할 수 있다.[5] 철도 부하는 열차가 출발과 도착을 반복하기 때문에 그 자체로 부하변화가 크며 또한 열차가

* Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : shchang@krii.re.kr

** Dept. of Electricity Control System Engineering, Hongik University, Seoul, Korea
E-mail : ysm515@hongik.ac.kr

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Hongik University, Korea
E-mail : kimjh@hongik.ac.kr

Received : April 02, 2014; Accepted : January 22, 2015

변전소간을 짧은 시간에 이동하기 때문에 각 변전소에서 부하급 변특성이 강하게 나타난다. 따라서 이 부하의 증가는 계통 안정도에 악영향을 미칠 가능성이 높아지므로 계통 모션으로 축약하여 정밀한 안정도 해석하기 위해서 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링이 요구된다.[6],[7] 또한 현재 전기철도 급전시뮬레이터에서는 부하의 수리모델을 정전력 부하 또는 정임피던스 부하로 모의하고 있기 때문에 향후보다 정교한 부하모델이 계통해석 측면에서 필요하다.

현재 다양한 부하특성을 고려하여 전력계통해석이 가능한 부하모델링에 대한 연구는 10년 정도 간격으로 세 차례 수행 [8],[9],[10] 되어 미시적방법론으로 이동하지 않는 고정 부하에 대해서만 개발되었고 그 밖의 부하모델링에 대한 대부분의 연구 [11],[12],[13]도 이동 부하는 고려되지 않고 고정 부하인 일반 부하만을 대상으로 연구되어 있는 실정이다. 또한 이동 부하 중 전기차의 충전기 부하에 대한 연구는 이미 이루어졌으나 [3],[4],[14],[15] 철도 부하에 대한 연구는 열차를 하나의 시스템으로 고려하여 측정된 데이터로부터 부하모델의 계수를 구하는 거시적 방법으로 전기철도 차량 부하모델링만 연구되어있어 [16] 개별부하들을 각각 모델링하고 개별부하의 구성비를 토대로 축약해서 집단부하를 나타내는 미시적 방법에 의한 부하모델링이 요청된다.

따라서 본 논문에서는 철도 부하를 담당하는 변전소의 부하를 차량 부하기기의 부하까지 분류하고 기존의 연구에서 사용한 미시적 방법을 도입하여 가장 정교한 모델인 전압에 대한 5차 다항식과 주파수에 대한 1차식 [17]으로 수리 모델링(Mathematical modeling)하는 구조를 제안한다. 사례연구로 2호선, 경의선 및 공항철도 등이 있는 홍대입구역을 대상으로 정교한 정태부하모델링을 수행하였다. 또한 열차이동에 의해 나타나는 부하급변과 부하모델변화에 대한 사례연구도 하였다.

2. 철도 부하를 담당하는 변전소의 정태부하모델링

2.1 철도 부하를 담당하는 변전소의 정태부하모델링 수립구조

철도 부하를 담당하는 변전소에서는 철도역에 열차가 회생 제동하면서 도착하여 견인전동기가 발전기의 역할을 하고 열차가 역행 운전하면서 출발하면 견인전동기가 기동하게 되므로 그 순간 큰 전력을 사용하여 짧은 순간에 전력공급과 소비가 바뀌기 때문에 부하급변현상이 심하게 나타나게 된다. 또한 열차가 이동하면 열차 부하를 담당하는 변전소가 바뀌게 되어 열차 부하가 빠져나간 변전소는 부하가 줄어들게 되고 새롭게 열차 부하를 담당하게 된 변전소에는 부하가 증가하게 되어 일반적인 변전소와는 다르게 시간에 대한 부하의 변화가 급격하게 일어난다. 그 결과 그러한 사례로 **그림 1 (a)**와 같이 일반 부하가 있는 신월변전소의 경우 부하변동률이 2%내외이지만 **그림 1 (b)**와 같이 2개 노선(2호선, 6호선)이 있는 신당역 부하가 포함된 흥인변전소의 경우 부하변동률이 10초 사이에 20%까지 변하고 있는 것을 알 수 있다.[9]

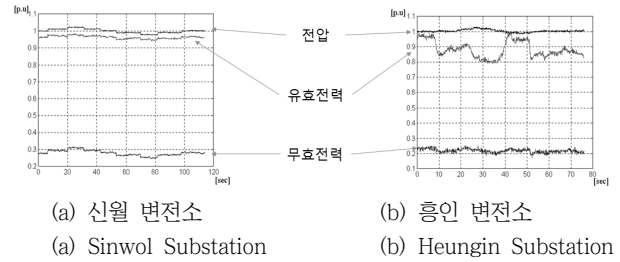


그림 1 변전소의 전압, 유효 전력, 무효 전력 그래프 [9]

Fig. 1 Voltage, Active Power, Reactive Power Graph of Substation [9]

신월변전소와 흥인변전소는 2차변전소이므로 계통 모션으로 축약하면 부하변동률이 현재는 크지 않으나 철도 부하, 전기차의 충전기 부하 등 이동 부하가 앞으로 커질 것으로 전망되는 미래에는 계통 모션에서도 부하급변현상이 크게 나타나 선로 및 발전기 탈락과 함께 과도 안정도에 악영향을 [18] 미칠 것으로 예상된다. 따라서 계통 안정도를 해석하기 위해서 정교한 5차 다항식으로 계통 모션의 정태부하모델링(이하 부하모델링)을 해야 하는데 계통 모션의 부하모델링은 P.U.법을 이용한 배전선축약을 통해 배전선로, 2차변전소, 가공선, 지중선 등을 모두 포함하기 때문에 이 중 하나인 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링이 필요하다. 그러나 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링은 기존의 일반 부하모델링 수립구조로는 구할 수 없기 때문에 새로운 변전소 부하모델링 수립구조를 제안한다. 새로운 변전소 부하모델링 수립구조는 아래 네 가지 사례의 철도 부하를 담당하는 변전소에 모두 적용할 수 있어야 한다.

사례 1. 하나의 변전소가 철도역 부하만 담당

사례 2. 2개 이상의 변전소가 철도역 부하를 담당하는 경우

사례 3. 하나의 변전소가 철도역 부하와 일반 부하를 담당

사례 4. 철도역 부하만을 담당하는 변전소와 철도역 부하와 일반 부하를 모두 담당하는 변전소가 철도역에 같이 포함(설치) 되어있는 경우

따라서 네 가지 사례를 모두 반영할 수 있도록 하나의 변전소가 철도역 부하와 일반 부하를 담당하는 경우로 일반화시켰다. 일반화한 변전소의 부하는 기존의 연구 [9]를 이용하기 위하여 일반 부하와 새롭게 철도역 부하로 구분하였고 철도역 부하는 역사에 있는 사무실과 상점 등에서 사용하는 부하와 열차가 사용하는 부하로 나눌 수 있다. 그러므로 역사 부하는 일반 부하 중 상업용 부하로 볼 수 있고 열차 부하는 제어방식과 한 편성열차의 차량수에 따라 열차를 구성하는 차량의 종류와 비율이 달라지기 때문에 종류별 차량 부하로 세분화할 수 있다. 차량 부하의 종류는 동력차인 M차량 부하와 운전실이 없는 무동력차인 T차량 부하 그리고 운전실이 있는 무동력차인 Tc차량 부하가 있는데 자체부하 변화여부를 기준으로 M차량과 T·Tc차량으로 분류하였다. M차량 부하에는 견인전동기, 냉·난방, 조명 부하 등이 있고 T·Tc차량 부하에는 냉·난방, 조명 부하 등으로 구성되어 있다. 차량의 부하기

기는 짧은 시간에 기동·정지하기 때문에 자체부하급변의 가장 큰 원인이 되는 견인전동기와 나머지 차량의 부하하기로 분별할 수 있고 이 부하기들은 일반 부하기와 같은 특성을 가지기 때문에 기존의 연구[9]에서 구해진 5차 다항식을 사용할 수 있다.

이렇게 변전소 부하를 차량 부하기의 부하까지 분류한 다음에 부하기의 5차 다항식과 부하구성비를 사용하여 합성하는 미시적 방법으로 변전소 부하모델링을 수립하였다. 변전소 부하모델링 수립과정은 다음과 같다. 일반 부하모델에서 가져온 견인전동기와 나머지 부하기의 5차 다항식을 이용하여 각 종류별(M, T, Tc) 차량 부하모델링을 한 다음 열차의 제어방식과 한 편성열차의 차량 수에 따라 달라지는 차량 구성비를 고려하여 열차 부하모델링을 수행하였다. 열차 부하모델링과 역사 부하모델링을 사용하여 부하구성비를 고려한 합으로 철도역 부하모델링을 완성한 다음 일반 부하모델링을 부하구성비에 따라 가중치를 주어 더하는 방법으로 변전소 부하모델링을 수립하였다. 이것을 도식화한 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링의 수립구조는 **그림 2**와 같다.

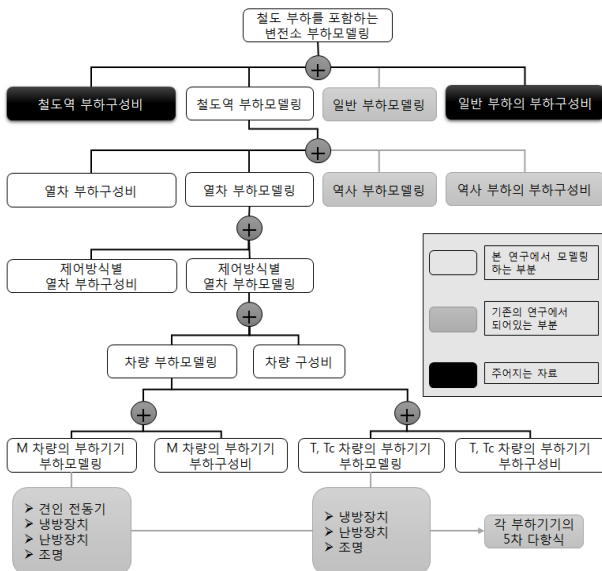


그림 2 철도역 부하가 포함된 변전소 부하모델링 수립구조
Fig. 2 Establishing Structure of Substation Load Modeling Including Railway Station Load

그림 2에서 흰색 부분은 철도 부하에 관한 부하모델링으로 본 논문에서 새롭게 제안하는 철도의 부하모델링이다. 회색 부분은 기존의 연구[9]에서 이미 연구된 부하모델링이고 검은색 부분의 자료는 주어진다고 가정한다.

2.2 변전소 부하모델링 수립을 위한 수리모델 및 부하구성비

2.2.1 부하기의 5차 다항식 모델

부하기의 수리모델은 전력계통 특성과 현상을 정확히 반영하기 위해 전압과 주파수를 고려하는 기기별 부하모델이 필요하

다. 수리모델 중 5차 다항식은 부하기를 하나의 대표부하로 합성하는 것이 유효하고, IEEE 모델, ZIP 모델 그리고 지수함수 모델로 변환이 용이한 특징을 갖고 있는 정교한 모델이다. 5차 다항식 부하모델은 부하의 전압이 V , 주파수는 F 라고 할 때, 유효 전력을 P , 무효 전력을 Q 라고 하면, 식(1), 식(2)와 같이 다항식으로 정리된다.[17]

$$P(V, F) = a_p + b_p \Delta V + c_p \Delta V^2 + d_p \Delta V^3 + e_p \Delta V^4 + f_p \Delta V^5 + g_p \Delta V \Delta F + h_p \Delta V^2 \Delta F + i_p \Delta F \quad (1)$$

$$Q(V, F) = a_q + b_q \Delta V + c_q \Delta V^2 + d_q \Delta V^3 + e_q \Delta V^4 + f_q \Delta V^5 + g_q \Delta V \Delta F + h_q \Delta V^2 \Delta F + i_q \Delta F \quad (2)$$

본 논문에서는 P 와 Q 의 5차 다항식을 이용한 부하모델 수립과 단일 부하로의 합성과정은 동일하므로 Q 에 관한 것은 생략하고 P 에 관한 수식만 수록한다.

2.2.2 부하구성비

부하구성비란 임의의 시간의 전체 부하 중 성분별 부하가 차지하는 백분율을 의미하며 계절, 일형(Day type), 시간대, 용도 등으로 세분화하여 나타낸다. 특정한 부하 또는 부하군이 한 시점에 대해 얼마의 백분율로 사용되고 있는지 알 수 있다. 기존의 연구의 부하구성비 추정방법[19]을 간략한 흐름도로 **그림 3**에 나타내었다.

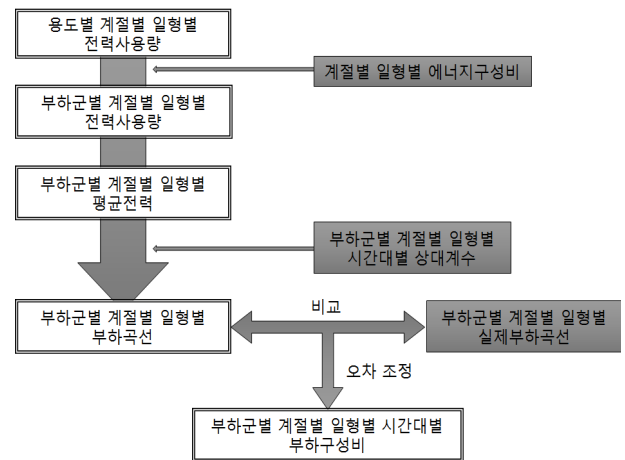


그림 3 부하구성비 추정을 위한 흐름도
Fig. 3 Flow Chart for Load Composition Estimation

2.3 철도 부하를 담당하는 변전소의 부하모델링 수립방법

2.3.1 열차 부하모델링

열차는 제어방식과 한 편성열차의 차량 수에 따라 차량의 종류 및 구성이 달라지기 때문에 제어방식에 따라 저항제어방식, 초퍼제어방식, 인버터제어방식(VVVF방식)으로 구분하였고 차량은

자체부하변화가 있는지를 기준으로 M차량과 T·Tc 차량으로 분류하였다. M차량의 부하기는 견인전동기와 냉·난방장치, 조명기기 등으로 구성되어있고 T·Tc 차량의 부하기는 냉·난방장치, 조명기기 등으로 구성되어있다. 차량의 부하기기 중 견인전동기는 기동·정지로 인한 자체부하변화와 담당 변전소가 바뀌는 경우 모두 부하급변이 발생하지만 나머지 차량의 부하기기들은 담당변전소가 바뀌는 경우에만 부하변화가 있기 때문에 견인전동기와 나머지 부하기기로 나누었고 각 부하기기는 일반 부하기기와 특성이 같기 때문에 기존의 연구[9]에서 이미 구해진 5차 다항식을 사용하였다.

차량의 부하기기 중 견인전동기는 일반 부하의 전동기와 달리 열차가 회생 제동하여 도착할 때 발전기역할을 하고 출발할 때 기동하여 역행 운전을 하면 부하크기가 급변하는 특징으로 인하여 부하모델과 부하구성비가 달라지기 때문에 그림 4와 같은 (시간-속도)에 대한 열차의 운행패턴을 사용하여 그림 5와 같이 견인전동기의 (시간-전력)에 대한 그래프로 변환하여 견인전동기 부하모델링을 수립하였다.

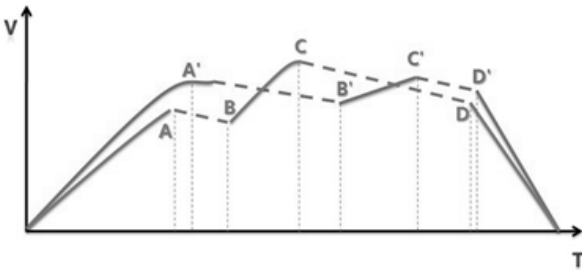


그림 4 역행-타행-역행-타행-제동의 운행패턴 [20]

Fig. 4 Driving Pattern of Powering - Coasting - Powering - Coasting - Braking [20]

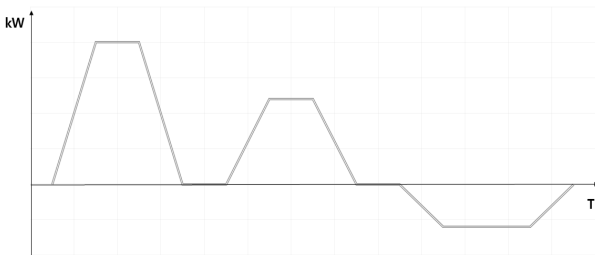


그림 5 견인전동기 부하

Fig. 5 Traction Motor Load

계절, 일형, 시간대에 따라서 사용하는 부하가 변하여 부하구성비가 달라지기 때문에 이를 고려하여 미시적 관점에서 견인전동기 부하모델링과 나머지 차량 부하기기의 부하모델링을 더해주는 방법으로 차량 부하모델링을 하여 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$P_{sdtijk}^v(V, F) = \sum_{N_i} P_{n_i}(V, F) \times CR_{sdtijkn_i} \quad (3)$$

한 편성열차 부하모델링은 제어방식과 한 편성열차의 차량 수에 따라서 열차를 구성하는 차량의 종류가 달라지는 것을 반영하여 식 (3)에서 구한 차량 부하모델링의 조합으로 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$P_{sdtij}^t(V, F) = \sum^K P_{sdtijk}^v(V, F) \times CR_{ijk} \quad (4)$$

열차 부하는 철도역을 지나가는 모든 노선별 제어방식별 한 편성열차 부하의 합으로 구성되기 때문에 같은 시간에 운행하는 제어방식별 한 편성열차의 부하모델링과 부하구성비를 사용하여 식 (5)와 같이 열차 부하모델링을 수식으로 수립하였다.

$$P_{sdt}^t(V, F) = \sum^{JK} P_{sdtij}^t(V, F) \times CR_{sdtij} \quad (5)$$

2.3.2 철도역 부하모델링

철도역 부하모델링은 부하의 이동여부를 기준으로 열차 부하모델링과 역사 부하모델링으로 분류하였다. 역사 부하는 역사의 전기설비를 측정하여 부하모델링을 하여야 하지만 현재 측정된 자료가 없기 때문에 이미 되어있는 일반 부하모델링 중 비슷한 패턴을 가지는 용도의 부하모델링을 사용하였다. 역사에는 사무실, 상점에서 사용하는 부하가 대부분이므로 일반 부하 중 상업용 부하와 유사하기 때문에 상업용 부하기기의 5차 다항식과 부하구성비를 활용하여 식 (6)과 같이 역사 부하모델링을 나타내었다.

$$P_{sdt}^{ts}(V, F) = \sum_{N_c} P_{n_c}(V, F) \times CR_{sdtnc}^{ts} \quad (6)$$

철도역 부하모델링은 열차 부하모델링에 대한 식 (5)와 역사 부하모델링을 나타낸 식 (6)을 이용하여 부하구성비를 고려한 합으로 식 (7)과 같이 수식으로 표현하였다.

$$P_{sdt}^m(V, F) = P_{sdt}^t(V, F) \times CR^t + P_{sdt}^{ts}(V, F) \times CR^{ts} \quad (7)$$

2.3.3 철도 부하를 포함하는 변전소 부하모델링

철도 부하를 포함하는 변전소 부하모델링은 철도역 부하모델링과 일반 부하모델링으로 구성된다. 일반 부하모델링은 일반 부하의 구성 상태와 크기가 사용용도에 따라서 다르기 때문에 상업용, 산업용, 주거용으로 분류하였고, 기존의 연구[9]에서 이미 구해진 각 용도별 부하모델링을 사용하여 계절, 일형, 시간대에 따라 사용하는 부하가 변함으로 인해 부하구성비가 달라지는 것을 반영하여 식 (8)과 같은 수식을 수립하였다.

$$P_{sdt}^o(V, F) = \left(\sum^L P_{sdtl}^c(V, F) \times CR_{sdtl}^c \right) \times CR_{sdt}^c + \left(\sum^M P_{sdtm}^i(V, F) \times CR_{sdtm}^i \right) \times CR_{sdt}^i + \left(\sum^N P_{sdtm}^r(V, F) \times CR_{sdtm}^r \right) \times CR_{sdt}^r \quad (8)$$

철도역 부하를 포함하는 변전소 부하모델링은 철도역 부하모델링을 의미하는 식 (7)과 일반 부하모델링에서 가져온 식 (8)을 이용하여 식 (9)와 같이 수립하였다.

$$P_{sdt}^r(V, F) = P_{sdt}^m(V, F) \times CR_{sdt}^m + P_{sdt}^g(V, F) \times CR_{sdt}^g \quad (9)$$

3. 사례연구

3.1 사례연구 방법

사례연구대상은 부하변화가 빈번히 나타나고 부하모델이 복잡해야 변화를 뚜렷이 볼 수 있기 때문에 3개 노선이 있는 홍대입구역 부하를 담당하는 변전소로 결정하였다. 사례연구대상인 홍대입구역은 3개 노선(2호선·경의선 및 공항철도)이 있고 노선 별 열차의 종류와 시간에 따라 지나가는 노선도 다르기 때문에 부하 크기 및 부하모델의 변화가 심하다. 실제로는 합정역변전소와 이대역변전소에서 합정역에서 을지로입구역까지 철도 부하만을 담당하며 병렬급전[21]하고 있으나 일반 부하는 언제든지 반영이 가능하고 철도 부하는 축소해도 그 현상이 달라지지 않기 때문에 편의상 홍대입구역 부하만 담당하고 있다고 가정된 변전소를 대상으로 사례연구를 하였다.

사례연구는 철도 부하를 담당하는 변전소 부하급변현상의 두 가지 원인인 변전소자체 부하변화와 열차이동에 의한 각 변전소 부하변화에 대하여 수행하였다. 변전소자체변화에 대해서는 부하 변화가 심한 시간대이기 때문에 변화를 뚜렷이 볼 수 있는 봄 근무일 15:20:00부터 15:21:00까지 20초 단위로 시간별 부하크기와 부하모델링을 하였고 변전소간 변화에 대해서는 홍대입구역과 신촌역사이에 2호선 열차의 이동만 일어나기 때문에 다른 노선 열차 부하의 영향 없는 시간대인 15:08:30에서 15:10:40를 대상으로 시간별 부하크기와 부하모델링을 구하였다. 본 사례연구에서는 다음 조건들을 고려하였다.

열차는 **그림 4**와 같이 역행·타행을 반복하여 운전하지만 실제 열차의 운전패턴을 정확히 알 수 없고 부하급변현상만 보면 되기 때문에 역행 운전과 타행 운전을 한 번씩만 한다고 가정하여 2호선 열차의 견인전동기 부하를 **그림 6**과 같이 단순화 하여 사용하였다.

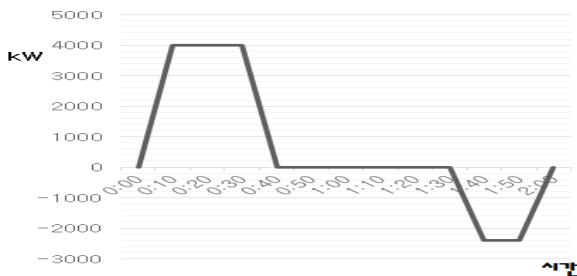


그림 6 단순화한 2호선 열차의 견인전동기 부하
Fig. 6 Simplified Traction Motor Load of Line 2

2호선과 경의선은 역 간 이동시간이 2분이고 공항철도는 4분이기 때문에 각각 절반인 1분과 2분 동안 운행 후 담당변전소가 달라지고 역에 정차하는 시간은 30초, 역행 운전하는 시간과 회생 제동하는 시간은 20초로 가정하였다. 역행 운전할 때 열차 부하는 2호선의 경우 4008.8kW, 경의선과 공항철도는 2405.3kW를 사용하고 회생 제동할 때에는 최소 3.4%에서 최대 27%까지 전원 측으로 되돌려지기 때문에[22] 평균 15%로 각각 600.27kW, 360.8kW의 전력을 공급한다고 가정하였다. 열차이동으로 인한 홍대입구역의 부하변화를 알아보기 위해 봄 근무일 15시 노선별 운행시간표를 고려하여 부하곡선을 10초 단위로 나타내었다.

2호선은 2005년부터 내구수명(25년)이 다한 구형열차(저항제어 방식, 조표제어방식) 대신 인버터제어방식의 신형열차로 점차 교체하고 있고 이미 경의선과 공항철도는 모두 신형열차이기 때문에 사례연구에서는 신형열차를 대상으로 하였고[21] 2호선 경우 10량(Tc 2개, T 3개, M 5개)과 경의선·공항철도 경우 6량(Tc 2개, T 1개, M 3개)을 대상으로 하였다. 여름과 겨울은 냉·난방장치를 사용하는데 이 부하기기의 부하크기는 견인전동기 부하크기에 비해 작고 사용패턴을 추정하기 어렵기 때문에 봄을 대상으로 하여 냉·난방 장치를 사용하지 않는다고 가정하였다. 홍대입구역 봄 근무일 15시 노선별 열차부하모델을 견인전동기, 냉·난방장치, 조명기기의 전부하시 부하모델[9]과 부하구성비를 반영하여 **표 1**과 같이 열차 부하모델링을 하였다.

표 1 2호선 및 경의선·공항철도의 열차 부하모델(봄, 전부하 운전시)

Table 1 Load Model of Coefficients of Line 2, Gyeongui Line, Airport Railway (Spring, Full Load Operation)

P(V,F)	ap	bp (V)	cp (V ²)	dp (V ³)	ep (V ⁴)	fp (V ⁵)	gp (V ²)	hp (V ² F)	ip (F)
2호선 [kW]	4008.818	3018.9381	3464.991	22043.49	248996.2	417454.9	-20806.1	-69029.4	6137.929
경의선 및 공항철도 [kW]	2405.33	1811.4094	2078.995	13226.13	149391.6	250472.6	-12483.6	-41417.7	3682.757

역사는 상업용 부하와 비슷한 특징을 가지기 때문에 기존의 연구[9]에서 이미 구해진 상업용 부하모델을 사용하였고 부하의 크기는 평균 부하와 상업용 부하계수[9]를 이용하여 구하였다. 홍대입구역사의 평균 부하(307.31kW)[20]와 상업용 부하계수를 이용하여 홍대입구역사 봄 근무일 15시의 부하(404kW)를 구하였다. 홍대입구역사의 봄 근무일 15시 상업용 부하모델[9]과 앞에서 구한 부하크기를 곱해 주어 수립한 역사부하모델을 **표 2**에 나타내었다.

표 2 역사 부하모델 (상업용 부하, 봄 15시)

Table 2 Load Model of the Railway Yard(Commercial Load, Spring 15:00)

P(V,F)	ap	bp (V)	cp (V ²)	dp (V ³)	ep (V ⁴)	fp (V ⁵)	gp (V ²)	hp (V ² F)	ip (F)
역사 부하 5차식 (P,U) [9]	1.0000	0.7253	-0.0234	-0.9374	2.9416	4.1302	1.0056	-1.9018	2.9073
역사 부하[kW]	404	283.02	-9.45	-378.71	1188.4	1668.6	406.26	-768.33	1174.55

3.2 사례연구 결과 및 분석

3.2.1 홍대입구역을 담당하는 변전소사제 부하변화

홍대입구역을 담당하는 변전소의 봄 근무일 15시의 부하곡선을 구하기 위해서 노선별 열차 부하곡선을 노선별 상·하행 운행 시간표[21]를 고려하여 **그림 7**과 같이 (시간-전력)에 대한 열차 부하곡선으로 나타내었다. 노선별 열차는 **그림 7**과 같이 역에 도착하여 제동할 때 최대 600.27kW의 회생 전력이 발생하고 역에서 출발할 때 최대 4001.8kW의 부하를 사용하여 한 개 노선 한 편성열차의 이동으로 인해 최대 4602.07kW까지 부하가 급변하는 것을 알 수 있다.

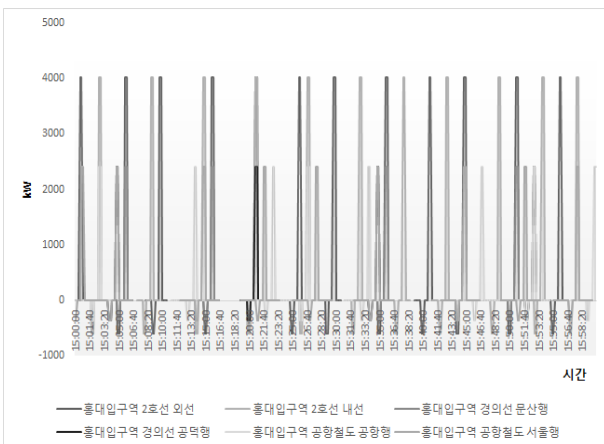


그림 7 홍대입구역 열차 부하곡선 (노선별 봄 근무일 15시)
Fig. 7 Train Load Curves of Hongik University Station (Spring, Workdays, 15:00)

홍대입구역의 노선별 봄 근무일 15시 열차 부하와 홍대입구역 사 부하의 합인 홍대입구역 부하는 **그림 8**과 같이 부하곡선으로 나타내었다. 홍대입구역 부하는 15:19:30에 최대 1.13MW의 전력이 전원으로 되돌아가고 15:20:40에 3개 노선의 열차가 동시에 출발하면서 최대 10.84MW까지 부하가 발생하기 때문에 1분10초 만에 11.97MW의 부하급변이 발생하였다. 홍대입구역의 평균 부하가 878kW이고[20] 홍대입구역사 부하가 404kW인 반면에 홍대입구역의 열차 부하크기는 최대 11.97MW까지 변하며 이는 평균 부하에 비해 최대 13.63배에 해당하는 것을 보여 주고 있다.

이러한 열차 부하의 이동으로 인한 부하급변 및 부하모델의 급변을 뚜렷하게 보기위해 15시 홍대입구역 부하 중 가장 큰 부하변화가 나타나는 시간대인 15:20:00부터 15:21:00까지 20초 단위로 부하모델 및 부하크기를 **표 1**의 노선별 열차 부하모델과 **표 2**의 역사 부하모델을 이용하여 **표 3**과 같이 홍대입구역 부하 모델을 수립하였다.

이 시간대의 홍대입구역 부하는 **표 3**에서 알 수 있듯이 열차 부하의 이동에 의해 부하모델 계수변화가 20초 사이에 최대 2894.45%까지 나타났고 부하크기는 최대 2402.21%까지 변화가 나타났다.

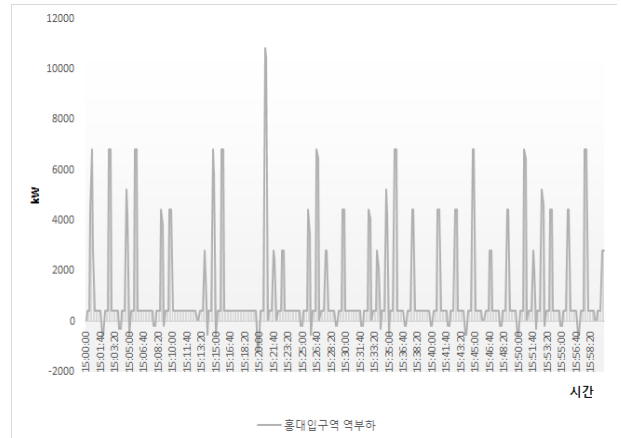


그림 8 홍대입구역 부하곡선 (봄 근무일 15시)
Fig. 8 Load Curves of Hongik University Station(Spring, Workdays, 15:00)

표 3 시간변화에 따른 홍대입구역의 부하모델(P.U) 및 부하 크기(kW)

Table 3 Load Models(P.U.) and Load Magnitudes(kW) of Hongik University Station according to Time Change

P(V,F)	ap	b ₁ (V)	c ₁ (V ²)	d ₁ (V ³)	e ₁ (V ⁴)	f ₁ (V ⁵)	g ₁ (V/F)	h ₁ (V ² /F)	(p(F))	부하(kW)
15:20:00	1	0.750	1.206	7.937	85.139	143.137	-7.557	-23.207	1.0017	-1127.4
15:20:20	1	0.750	-0.020	-0.816	2.594	3.349	0.937	-1.7516	2.711	433.004
15:20:40	1	0.752	0.830	5.255	59.848	100.310	-4.954	-16.633	1.501	10936.18
15:21:00	1	0.787	-4.436	-32.340	-294.544	-495.829	31.530	75.473	8.605	72.285

3.2.2 변전소간 열차이동에 의한 각 변전소 부하변화

2호선 열차가 홍대입구역에서 신촌역으로 이동함에 따라 **그림 9**와 같이 홍대입구역의 부하크기는 4412.79kW에서 403.99kW로 줄어들어 평균 부하인 878kW에 비해 4.56배의 부하변화가 나타났다. 신촌역의 부하크기는 134.66kW에서 4143.4kW로 증가하여 평균 부하인 292.7kW에 비해 13.69배의 부하변화가 발생하였다.

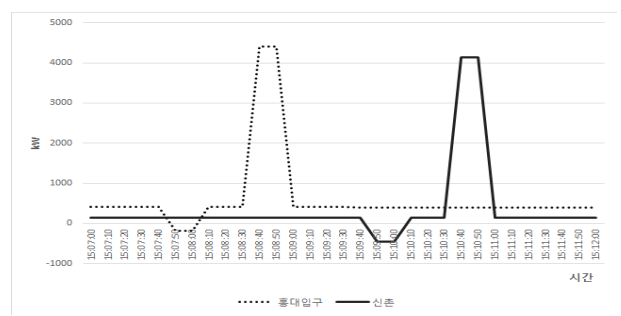


그림 9 2호선 이동에 의한 변전소부하곡선 (내선순환)
Fig. 9 Load Changes in Hongik University Station Line 2 (Inner Circle Line)

또한 열차 부하가 이동하게 되면 각 변전소간의 부하크기 뿐만 아니라 부하의 종류 및 구성비도 달라지기 때문에 부하모델이 달라진다. 이러한 변전소간의 부하모델변화를 표 4에 나타내었다. 표 4를 통해서 홍대입구역 부하를 포함하는 변전소의 부하모델 계수는 최대 122%까지 변화하였고 신촌역 부하를 포함하는 변전소는 최대 2342%까지 급변한 것을 알 수 있다.

표 4 2호선 이동에 따른 각 변전소의 부하모델(P.U.) 및 부하 크기(kW)

Table 4 Load Models(P.U.) and Load Magnitudes(kW) of each Substation according to Line 2 Movement

	P(V,F)	ap	bp (V)	cp (V ²)	dq (V ²)	eq (V ²)	fq (V ²)	gp (V ² F)	hq (V ² F)	iq (F)	부하(kW)
0.84	홍대입구역	1	0.75	0.78	4.91	56.69	94.97	-4.62	-15.81	1.65	4412.79
	신촌역	1	0.72	-0.02	-0.93	2.94	4.13	1.00	-1.90	2.90	134.66
1.04	홍대입구역	1	0.72	-0.02	-0.93	2.94	4.13	1.00	-1.90	2.90	403.99
	신촌역	1	0.75	0.83	5.28	60.18	100.88	-4.98	-16.72	1.57	4143.4

이러한 열차의 이동으로 인한 변전소의 부하변화가 증가할 것으로 예상되는 미래에는 계통 모선의 부하급변현상 또한 커지게 되어 과도 안정도에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 계통 안정도 해석이 필요하다. 계통 안정도를 해석하기 위해서는 정교한 부하 모델이 요청되지만 기존의 부하모델은 정전력 또는 정임피던스 부하모델을 사용하여 부하의 전압과 주파수에 대한 특성을 제대로 표현하지 못하였다. 따라서 제안하는 5차 다항식을 이용한 부하모델에서는 이러한 부하급변을 반영하여 표 3, 표 4와 같이 나타내었고 이 부하모델은 실제부하특성에 가깝게 되어 계통 안정도 해석을 정확히 할 수 있다.

3. 결론

2020년 이동 부하는 9.43%로 예상되고 그 중 전기차의 충전기 부하를 제외한 철도 부하는 4.45%정도로 예측할 수 있다. 철도 부하는 열차가 출발과 도착을 반복하기 때문에 그 자체로 부하변화가 크게 나타나며 또한 열차가 변전소간을 짧은 시간에 이동하기 때문에 각 변전소에서도 부하변화가 발생한다. 이러한 특성이 있는 철도 부하는 전기차의 충전기 부하와 함께 계통 모선 부하로 축약하면 미래에는 전력계통 안정도에 반영해야할 정도의 크기가 되기 때문에 현재 전기철도 급전시뮬레이터에 되어있는 정임피던스, 정전력 부하모델이 아닌 가장 정교한 모델인 전압에 대한 5차 다항식과 주파수에 대한 1차식의 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링이 필요하다. 하지만 기존의 일반 부하모델링 수립구조로는 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링을 할 수 없기 때문에 새로운 구조를 수립해야 한다. 따라서 본 논문에서는 변전소 부하를 차량 부하기기의 부하까지 분류하여 부하급변의 주요원인인 견인전동기의 부하모델링과 나머지 부하모델링을 부하구성비에 따라 가중치를 주어 합성하는 미시적 방법으로 새로운 철도부하를 담당하는 변전소 부하모델링 수립구조를 제안하였다. 이 수립구조를 만들기 위해서 견인전동기가 기동·정지할

때 시간에 따라 부하크기가 급격히 달라지는 특징을 고려하여 열차의 운행패턴을 견인전동기 부하곡선으로 변환하여 부하모델링을 수행하였다. 그리고 차량 부하기기를 견인전동기, 냉·난방장치, 조명기기 등으로 구성되어 있음을 조사·분석하여 이 부하기기의 특징과 제원이 일반 부하기기와 같기 때문에 일반 부하기기의 5차 다항식을 이용하여 부하구성비를 고려하여 더해주는 방법으로 차량 부하모델링을 수립하였다. 또한 열차의 제어방식과 한 편성열차의 차량 수에 따라 차량의 종류 및 비율이 다르기 때문에 이를 고려하여 차량 부하모델링을 구성비에 맞게 더해주어 열차 부하모델링을 완성하였고, 철도 부하가 있는 변전소 네 가지 사례를 모두 적용하기 위해서 하나의 변전소가 철도역과 일반 부하를 담당하는 경우로 일반화하여 부하모델링 하는 방법론을 제시하였다.

사례연구에서는 계통 안정도에 악영향을 미치는 부하급변현상을 보기위해 견인전동기 부하를 단순화하여 사용하였고, 열차의 이동으로 인한 변전소자체 부하변화와 변전소간 부하변화가 급변하는 시간대를 대상으로 시간별 부하모델링을 구하였다.

이렇게 수립한 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링은 계통 모선의 부하모델링으로 배전선 축약하여 IEEE 또는 ZIP 모델로 변환하면 안정도 해석 프로그램인 PSS/E에 부하로써 적용할 수 있게 되어 안정도 해석에 대한 정보를 제공할 수 있다.

본 논문에서는 철도 부하 중 도시철도에 대한 부하모델링을 수립하였지만 향후 좀 더 포괄적으로 도시철도 뿐만 아니라 일반 철도구간의 전기철도의 대용량 이동 부하까지 일반화 시킬 수 있는 방법에 대한 연구와 철도 부하와 일반 부하의 부하구성비에 대한 공신력이 있는 자료구축을 통해 스마트그리드 환경에 정확도가 높은 부하모델을 수립할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 철도 부하를 담당하는 변전소 부하모델링을 이용한 계통 안정도 해석에 대한 연구와 그 대책을 계통 측과 철도 측 중 어디에서 마련해야할 지에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

References

- [1] Korea Power Exchange, "Impacts of Power Supply and Implications according to the Widespread Use of Electric Vehicles", 2009. 11
- [2] <http://www.kreta.co.kr>, KRETA
- [3] Sung-Wook Hwang, Il-Keun Song, Jung-Hoon Kim, "A Study on Mobility Loads and the Deployment Patterns for the Development of Smart Place Load Model", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63. No. 2, pp. 217-223, 2014. 2
- [4] Hyun-Jung Park, Jung-Hoon Kim, Sung-Wook Hwang, "A Study on Load Models of Electric Vehicle for Power System Analysis", The Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2012, No. 7, pp. 92-93, 2012. 7
- [5] Kwang-Hae Oh, Han-Min Lee, Sang-Hoon Chang, "Development of Simulator for Managing and

- Planning the Catenary System Using Current Map”, Conference of the Korea Railroad Association, pp. 333-340, 2001. 5
- [6] Joo-Rak Kim, “Development of Integrated Simulator for Steady State Analysis and Mathematical Modeling Considering Load Variation in the Electric Railway Power System”, Ph.D. Thesis, Hongik University, 2010. 6. 30
- [7] Jung-Hoon Kim, “A Study on the Analysis of Time-variant Load Characteristics for Electric Railway and the Application of Micro Grid”, Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 109-115, 2013. 2
- [8] KEPCO, “A Study on the Development of Load Model for Power System Stability Analysis”, 1990. 10
- [9] KEPCO, “Development of Accurate Load Model for Detailed Power System Stability Analysis”, 2001. 3
- [10] Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, “Development of Residential Load Model for Power System Analysis on Smart Place”, 2012. 2
- [11] Pyeong-Shik Ji, “A Load Modeling to Utilize Power System Analysis Software”, The Transactions of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 13, No. 4, 1999. 11
- [12] Kyeung-Sang Lee, Rea-Joon Park, Oh-Sung Kwon, Kyeung-Bin Song, Kyu-Ho Kim, Jung-Wook Park, Jong-Man Jo, Sung-Mu. Lee, “Measurement-based Load Model Plan of Load Component Ratio”, Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2010, No. 11, 2010. 11
- [13] Rae-Jun Park, Oh-Sung Kwon, Kyeung-Bin Song, Kyu-Ho Kim, Jung-Wook Park, Jong-Man Jo, Sung-Moo Lee, “load model estimation method for residential load and normal load using measured data”, Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2011, No. 7, 2011. 7
- [14] Sung-Wook Hwang, Sang-Ok Kim, Han-Byul Lee, Seung-Ho Han, Jung-Hoon Kim, “A Basic Study on the Load Composition Rate Estimation Method Based on Diffusion Models Considering the Charging Load of Electric Vehicles”, The Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2013, No. 7, pp. 233-234, 2013. 7
- [15] Jung-Hoon Kim, Sung-Shik Youn, Ju-Hee Park, You-Seok Lee, Dong-Nyeong Lee, “A Study on Forecast of Residential Load and Effect of Moving Load on Future Load Composition”, The Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2013, No. 7, pp. 273-274, 2013. 7
- [16] Joo-Rak Kim, Moon-Seob Han, Keon-Bo Sim, Jung-Hoon Kim, “Development of Load modeling for Electric Locomotive According to Voltage and Frequency”, Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2003, No. 4, 2003. 4
- [17] Si-Woo Park, Ki-Dong Kim, “Development of Accurate Load Model for Detailed Power System Stability Analysis”, The Spring Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 201-205, 2001. 5
- [18] Jung-Hoon Kim, et. al., “Transmission & Substation Engineering”, Munundang, 2010. 3
- [19] Jung-Hoon Kim, Jae-Yoon Lim, Jin-O Kim, Singh C, “Application of expert system to load composition rate estimation algorithm”, IEEE Journals & Magazines, Vol. 14, No. 3, pp. 1137 - 1143, 1999. 8
- [20] Jung-Hyun Kim, Han-Chul Shin, Yung-Ho Choi, Soo-Hee Han, Lark-Kyo Kim, “Efficient Driving Pattern of the Railway Vehicles for Driving Energy”, The Transactions of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 61, No. 9, pp. 1368-1373, 2012. 9
- [21] <http://www.seoulmetro.co.kr>, Seoul Metro
- [22] Jun-Sang Lee, Jong-Hun Park, Suk-Chul Seo, Jin-Young Kim, Gi-Chun Kim, “Analysis of regenerative power substations, railway”, Conference of the Korean Society Railway, Vol. 2011, No. 10, pp. 3117-3123, 2011. 10

기 호 일 랑

- s 계절(1,2,...,N_s)
- d 일형(1,2,...,N_d)
- t 시간대(1,2,...,N_t)
- i 열차의 제어방식(1,2,...,N_i)
- j 열차의 편성량 수(1,2,...,N_j)
- k 열차차량(1,2,...,N_k)
- n_i 제어방식 열차 부하기기(1,2,...,N_{n_i})
- $P_{sdtijk}^v(V,F)$ 제어방식 j편성 k차량의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식
- $P_{n_i}(V,F)$ n_i 부하기기의 5차 다항식
- $CR_{sdtijkn_i}$ 제어방식 j편성 k차량의 s계절 d일형 t시간대 n_i 부하기기의 부하구성비
- $P_{sdtij}^l(V,F)$ 제어방식 j편성열차의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식
- CR_{ijk} 제어방식 j편성 열차의 k차량의 구성비
- $P_{sdt}^l(V,F)$ 열차부하의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식

CR_{sdtij} 열차부하 중 i제어방식 j편성 열차의 s계절 d일형 부하구성비
 n_c 상업용 부하기기(1,2,...,N_{n_c})
 $P_{sdt}^{ts}(V,F)$ 역사부하의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식
 $P_{n_c}(V,F)$ n_c부하기기의 5차 다항식
 $CR_{sdt n_c}^{ts}$ 역사부하 중 n_c부하기기의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 $P_{sdt}^m(V,F)$ 철도역 부하의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식
 CR^t 철도역 부하 중 열차 부하구성비
 CR^{ts} 철도역 부하 중 역사 부하구성비
 $P_{sdt}^g(V,F)$ 일반 부하의 s계절 d일형 t시간대의 5차 다항식
 CR_{sdtl}^c 상업용 부하 중 l종 상업용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 CR_{sdt}^c 일반 부하 중 상업용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 CR_{sdtm}^i 산업용 부하 중 m종 산업용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 CR_{sdt}^i 일반 부하 중 산업용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 $CR_{sdt n}^r$ 주거용 부하 중 n지역 주거용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 CR_{sdt}^r 일반 부하 중 주거용 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 $P_{sdt}^r(V,F)$ 변전소의 s계절 d일형 t시간대별
 CR_{sdt}^m 변전소 부하 중 철도역 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비
 CR_{sdt}^g 변전소 부하 중 일반 부하의 s계절 d일형 t시간대의 부하구성비



윤 석 민(Seok-Min Youn)

1988년 1월 17일생. 2014년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기·정보·제어공학과 석사과정.
 Tel : 02-338-1621
 Fax : 02-320-1193
 E-mail : ysm515@hongik.ac.kr



김 정 훈(Jung-Hoon Kim)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수. 현재 대한전기학회 부회장 및 용어위원회 위원장.
 Tel : 02-320-1621

Fax : 02-320-1193
 E-mail : kimjh@hongik.ac.kr

저 자 소 개



창 상 훈(Sang-Hoon Chang)

1961년 3월 28일생, 2002년 홍익대학교 전기·정보·제어공학과 졸업(공학박사), 1994년 ~ 현재 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부장, 현재 한국교통대학교 교통대학원 겸임교수
 Tel : 031-460-5419
 Fax : 031-460-5459
 E-mail : shchang@krri.re.kr