

직류전기철도에서의 확률적 부하전력 계산

Probabilistic calculation of Power loads in DC electric railway systems

정인성*, 송중호**, 최규형†

In-sung Jung*, Joong-Ho Song**, Kyu-Hyoung Choi†

Abstract Feeding system of electric railway has different characteristics from other feeding systems. Load values of electric railway train are changed frequently because train operates that it repeated Acceleration and breaking, and the other reason is the train moved on and on. Therefore, Power consumption values of trains operated in one substation are different from each other. Because each trains has different position, performance and interval between the train.

In this paper, analyzed supply power of substation according to the location of the train using PDF (Probability Density Function).

Keywords : DC electric Railway System, Substation supply power, TPS, PDF

초 록 전기철도의 급전계통은 일반적인 급전계통과는 다른 특성이 있다. 전기철도의 부하는 차량의 특성상 기동, 정지가 빈번하게 반복되고 그 위치가 계속 이동하기 때문에 부하의 크기 변동이 극심하다. 따라서, 한 변전소 구간 내에서 운행되는 각 열차의 소비전력량도 그 열차의 Position과 Performance, 각 열차간의 운행시격 등에 따라 서로 다르다.

본 논문에서는, 직류 전기철도에서의 열차 위치 확률 분포 (Probability Density Function)를 토대로 열차의 위치에 따른 변전소의 공급전력을 확률적으로 분석하였다.

주요어 : 직류전기철도, 부하전력, TPS, PDF

1. 서론

전기철도에서 직류급전방식이란 일반전력계통으로부터 수전된 특고압의 교류전기를 변전소에서 적절한 전압으로 강압(1,200V 등)하고, 다시 정류장치를 통해 직류(1,500V 등)로 변환하여 전차선로에 직류전력을 공급하여 운전하는 방식이다. 현재 우리나라에서는 1,500V 전압을 사용하고 있으며 전철 변전소 간격은 전압강하 등을 고려하여 약 4km~10km 간격으로 병렬 급전하여 운영하고 있다. [1]

전철급전계통은 변전소로부터 급전거리, 전압강하, 사고시의 구분, 보수 등을 고려하여

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과
(khchoi@seoul tech. ac. kr)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과

** 서울과학기술대학교 정보통신대학 전기정보공학과

전차선로를 적당한 구간으로 나누어 급전, 정전이 가능하도록 한 전기적인 계통구성을 말한다. 이러한 전철급전계통은 일반 전력계통과 다른 특성이 있다. 전철부하는 역행-타행-제동-정차가 계속적으로 반복되고, 한 곳에 머물러있지 않고 계속 그 위치가 변하는 이동부하이기 때문에 부하의 크기 변동이 극심하다. 따라서, 한 변전소 구간 내에서 운행되는 각 열차의 소비전력량도 열차마다 서로 다르다. 따라서, 보다 안전하고 확실한 열차운행을 위해서 전차선 전압이 차량을 이상 없이 운행 가능하도록 항상 일정 범위를 유지하도록 하여야 하고 전류용량도 차량부하에 충분히 견딜 수 있도록 하여야 한다. [2]

본 논문에서는 직류전기철도에서의 위와 같은 열차 운행시의 특성을 분석하기 위하여 열차의 위치를 확률적으로 나타내었고, 계산된 확률밀도함수를 이용하여 열차의 위치에 따른 변전소의 공급전력을 분석하였다.

2. 열차 위치 확률분포

2.1 확률분포의 정의

어떠한 우연적 실험을 하는데 있어 나타날 수 있는 모든 결과의 집합을 표본공간(Sample Space)라 하며, 이러한 우연적 실험결과에 수치를 대응시켜 표본공간의 데이터를 실수공간 데이터로 정의 해주는 함수를 확률변수(Random Variable)라 한다. 표본공간상에서 확률실험을 반복해보면, 어떤 결과는 다른 것보다 더 자주 일어나는 경우를 볼 수 있다. 이러한 확률실험 횟수를 각각 개별적인 결과의 부분으로 분할한 것을 확률분포라 한다.

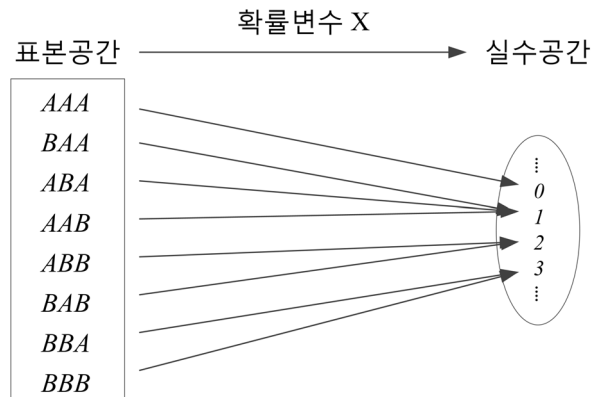


Fig. 1 확률변수의 정의

2.2 Probability Distribution Function

확률분포는 확률변수가 연속형, 이산형에 따라 확률밀도함수(PDF)와 확률질량함수(PMF)로 나눌 수 있다. 이 논문에서는 연속형 확률변수의 확률밀도함수(PDF)를 적용하며, 이에 대한 조건은 식 (1)과 같다.

$$p(x) \geq 0, \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (1)$$

$$p(a \leq X \leq b) = \int_a^b p(x) dx \quad (\text{단, } -\infty \leq a \leq b \leq \infty)$$

식 (1)을 이용하여 속도에 따른 열차의 위치를 확률밀도함수를 적용하면 Fig. 2와 같이 표현 할 수 있다.[3]

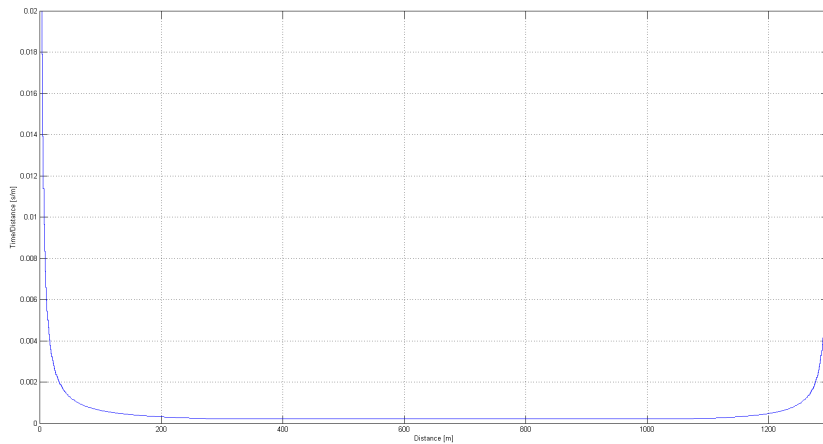


Fig. 2 단위 길이당 열차 위치 확률 분포도

Fig. 2는 역과 역 사이의 간격이 1,300[m] 일 때, 1[m] 당 열차의 점유시간을 확률적으로 나타낸 것으로, x축은 열차의 이동거리를, y축은 Time/Distance(=1/speed) 값을 Normalizing 한 값으로, 길이 (1[m]) 당 열차의 점유 확률을 나타낸다.

3. 시뮬레이션

3.1 열차운행시뮬레이션(TPS : Train Performance simulation)

열차운행시뮬레이션(TPS)이란 한 열차가 일정구간을 주행하는 데에 따른 열차의 상태, 위치, 속도, 소비전력 등에 대한 사항을 나타낸다. 차량의 사양 및 노선과 관계된 데이터를 입력하여 차량의 가속도, 에너지 소모량 등을 계산하고 선정된 선로에서 차량이 요구하는 성능을 만족하는지 또는 노선형태가 차량의 운행에 적합한지를 판단해 준다.

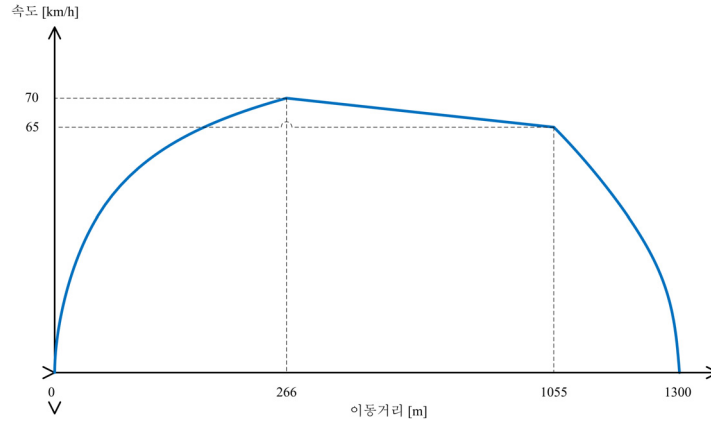


Fig. 3 열차운행시뮬레이션(TPS) 곡선

논문에서 필요한 열차의 Specifications를 얻어내기 위해 Fig. 3과 같은 시뮬레이션을 동작시켜 보았다. Fig. 3은 하나의 역 구간을 열차가 주행하였을 때, 역과 역 사이의 거리를 1,300[m]로 적용하고, 전동차의 최대속도를 70 [km/h]로 두었을 때, 열차운행 시뮬레이션 곡선을 나타낸다. 위 결과를 토대로 Table 1과 같은 열차의 Specifications를 얻을 수 있다.

Table 1 Train Specifications

Materials		Properties
Distance [m]		1,300
Velocity (Max) km/h]		70
Consumption Power (Max) [kW]		5,414
Acceleration Section	Duration [s]	30
	Distance [m]	26.4
Coast Section	Duration [s]	400
	Distance [m]	200
Break Section	Duration [s]	575.8
	Distance [m]	32.2

3.2 급전계통구간 Modeling

열차의 위치에 따른 변전소 공급전력을 계산하기 위해 급전계통구간을 Fig. 4와 같이 급전계통구간을 Modeling 하였다.

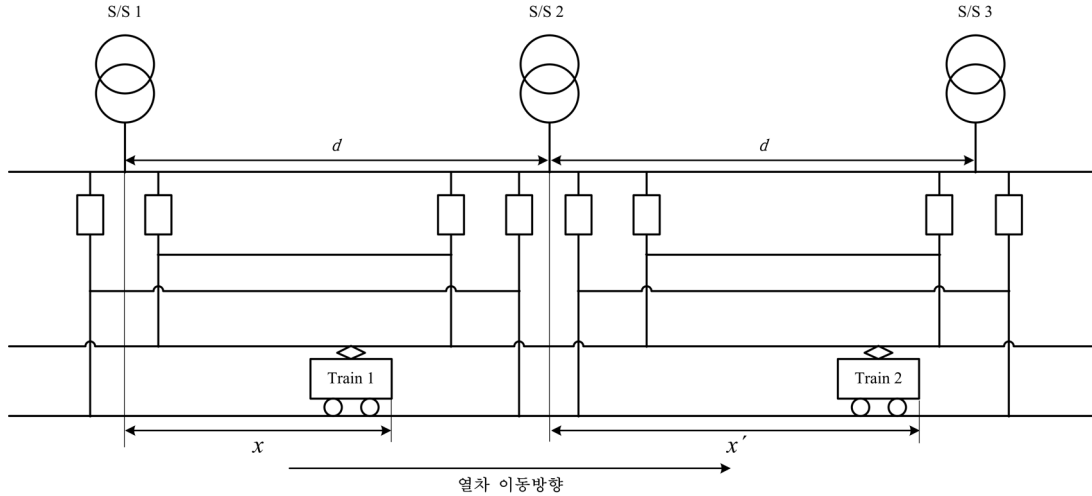


Fig. 4 직류급전계통구간 Modeling

변전소 구간은 총 두 구간을 고려하였으며, 한 변전소 구간 내에서의 역(Station)의 수는 4개로, 역간 이동 소요시간은 95[s]를 적용하였다.

Fig. 4에서 열차가 임의의 한 지점에 위치해 있을 때, TPS를 통해 해당 지점에서의 열차의 운행상태와 열차속도, 열차의 소비전력 등의 값을 알 수 있다. 여기에 열차의 운행시격만 적용한다면, 변전소 두 구간 내에서 운행되고 있는 열차의 총 대수와 열차 각각의 위치를 알 수 있으며, 마찬가지로 TPS를 적용하여 열차의 현재 운행상태와 속도 및 소비전력을 구할 수 있다.

본 논문에서는 랜덤변수를 이용하여 열차의 위치를 선정하였으며, 각 열차의 운행시격을 180[s]를 적용하였을 때, 나머지 선행열차 및 후행열차의 위치를 시뮬레이션을 통해 계산하였다. 이 때, 각 변전소에서 공급되는 전력은 식 (2)와 같다.

$$P_{s_1} = P_t \times \frac{d-x}{d}, \quad P_{s_2} = P_t \times \frac{x}{d} \quad (2)$$

위와 같은 시뮬레이션을 5,000회 반복 수행하여, 각 변전소에서 공급되는 전력값과 그 해당 상황에서의 PDF 값을 그래프로 그리면 Fig. 5와 같이 나타난다.

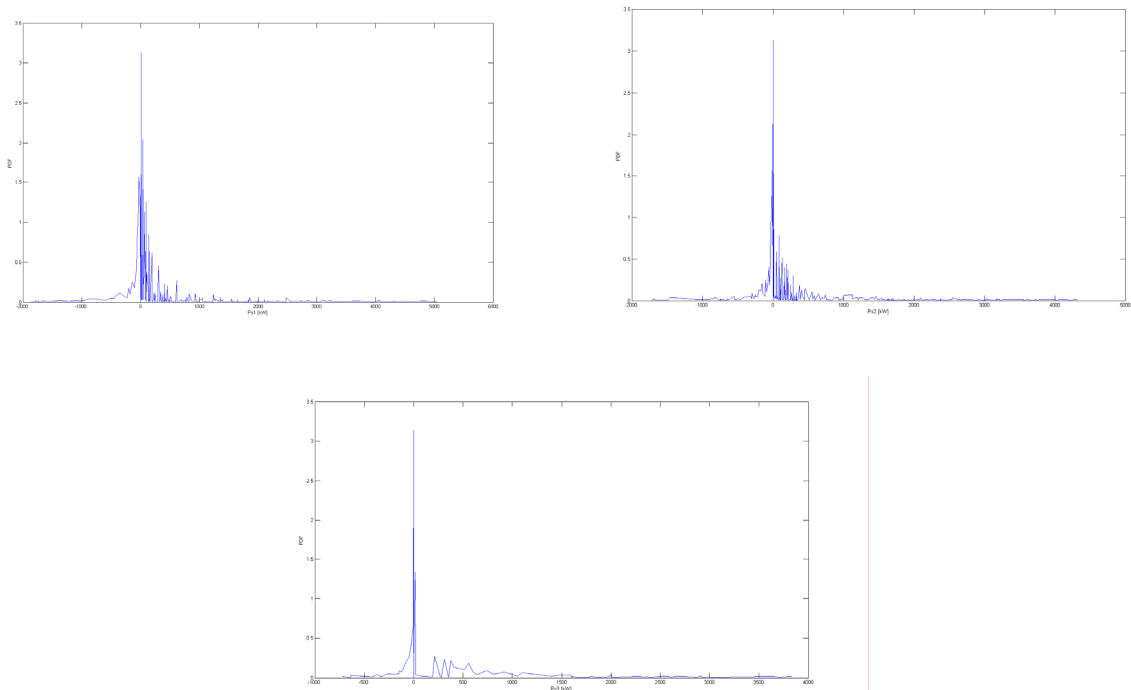


Fig. 5 각 변전소 별 공급전력 예측 그래프 (운행시각 = 180[s] 일 경우)

3. 결론

본 논문에서는 변전소 구간 내에서 열차의 위치에 따른 각 변전소에서의 공급전력과 해당 공급전력이 발생할 수 있는 상황을 확률적으로 접근하여 분석해 보았다. 열차의 위치가 Random하기 때문에 시뮬레이션을 반복할 때 마다 결과가 약간씩 상이하지만 큰 변화는 나타나지 않았다. 도출된 그래프에서 가장 빈번하게 발생한 소비전력이 0에 가까운 상황은 TPS 곡선에서도 나타나듯이, 열차가 일정 속도에 다다르면 열차가 타행을 하며 전력을 소비하지 않기 때문이다. 또한, 소비전력이 (-) 값을 가지는 이유는 열차 제동시 발생하는 회생전력 때문이다.

이 논문을 통해 열차 운행시 각 변전소에서 공급되는 전력을 분석해보았다. 향후 이 데이터를 토대로 각 열차에 공급되는 전류, 전차선 전압과 회생전력 등도 확률적으로 분석할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

- [1] 김백 (2005) *전철전력공학*, 技多利, 서울시 성동구, pp. 2-13.
- [2] 김양수 (2009) *전기철도공학*, 한국전기철도기술협력회, 서울시 용산구, pp. 34-45.
- [3] T.K. Ho, Y.L. Chi, J. Wang, K.K. Leung, et al. (2005) Probabilistic load flow in AC electrified railways, *IET Electric Power Applications*, 152(4), pp. 1003-1013.
- [4] T.K. Ho, Y.L. Chi, J. Wang, K.K. Leung (2004) Load flow in electrified railway, *IEEE PEMD 2004*, Edinburgh, UK, pp. 498-503.