

DC정류기를 갖는 도시철도의 최대수요전력 산출 근사모델

Approximate Model for Peak Demand Power Computation in Metro Railway with DC Rectifiers

김한수* · 권오규

Han-Su Kim · Oh-Kyu Kwon

Abstract This paper presents an approximate model for computing the peak demand power in a metro railway system. The peak demand of substations can be calculated using the current vector iteration method. But the existing method requires many repeated calculations to determine the peak demand power, which makes it difficult to apply to the real-time peak power control problem. In this paper, we assume that none of the conditions vary except source impedance and make an approximate model for rapid calculation based on changes in the impedance of the power substation. The proposed model result is approximately the same as the existing model, which is demonstrated through simulation

Keywords : Peak demand, Approximate model, Metro railway, Rectifier source

초 록 이 논문에서는 도시철도의 최대수요전력 산출을 위한 근사모델을 제시한다. 전류 벡터 반복법을 활용하여 변전소의 최대수요전력을 계산할 경우에 기존의 방법으로는 수 많은 반복 조류계산이 필요하기 때문에 계산시간 제약으로 인해 실시간 적용이 어렵다는 문제가 있다. 본 논문에서는 모든 조건이 동일한 상태에서 전원 임피던스의 변화에 따른 변전소 최대수요 전력을 빠르게 산출하는 근사모델을 제시한다. 제시된 근사 모델에 의한 산출결과가 기존 모델과 거의 유사한 정확성을 보임을 시뮬레이션을 통해 예시한다.

주요어 : 최대수요전력, 근사모델, 도시철도, 정류기 전원

1. 서 론

2011년 9월 국내 대정전 사태 이후 최대수요전력에 대한 관심과 중요성이 어느 때보다 높아졌다. 정부와 한전은 후속대책으로 전력수요를 억제하기 위해 최대수요전력에 대한 요금을 인상하고 시간대별 요금제를 도입하여 수용가에게 보다 적극적인 최대수요관리를 요구하고 있으며, 이로 인해 도시철도 운영에 있어서 전기요금에 차지하는 비중이 더욱더 높아지고 있다. 따라서 이러한 최대전력을 효율적으로 관리하고 체계적으로 운용하기 위한 연구가 필요하다.

국내 도시철도 계통에서는 전동차의 대부분이 회생제동을 하고 있는데, 최대수요전력 관리의 효과적 방안의 하나로서 이러한 회생제동을 활용한 전력 사용 극대화에 대한 연구들이 국내외에서 활발히 이루어지고 있다. 이 연구들은 운영적 부분에서의 최적화를 통해 회생전력 사용을 극대화 하는 방법[1-3]과 열차 또는 변전소에 저장장치를 설치하여 회생전력의 사용을 극대화하는 방법 등의 두 가지 방향으로 진행되고 있다[4,5]. 이 두 가지 방법 가운데 전자의 경우, 별도의 비용은 크게 들지 않아 경제성이 좋다는 장점이 있지

만 열차의 운전시간과 운행패턴을 일률적으로 조정해야 하는데, 현실적으로 역 정차시간의 불확정성 때문에 시스템 설계 적용이 어렵다는 문제점이 있다. 후자의 경우에는 확실한 최대전력 감소 효과를 볼 수 있다는 장점은 있지만 이 방법에서는 별도의 설치장소와 고가의 장비가 설치되어야 하며 이에 대한 유지보수비용도 고려해야 하기 때문에 경제성에 문제가 발생한다. 따라서 최대수요전력을 고려한 전력사용 극대화를 이루려면 회생제동에만 한정하지 말고 계통전체의 운용 최적화를 통해서 해결해야 한다. 그런데 이와 같은 계통운용최적화를 위해서는 최대전력을 가능한 빨리 산출해내는 기법을 필요로 한다.

이 논문에서는 최대전력을 산출할 때에 반복적인 조류계산으로 인해 연산시간이 오래 걸리는 기존의 산출법을 개선하여 최대전력 계산을 보다 쉽고 빠르게 수행할 수 있는 근사모델을 제시하고자 한다. 이 근사모델은 가상부하를 도입하여 전력 회로망을 등가 근사화하는 모델로서, 기존방식과 비교하여 최대전력 계산 정확도는 유사하면서 계산량이 획기적으로 단축되는 모델이다. 이 기법의 유용성을 확인하기 위해 인천교통공사 1호선을 대상으로 하여 기존모델과 제시

*Corresponding author.

Tel.: +82-32-451-2515, E-mail : hs7827@hanmail.net

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.5.372>

된 근사모델간의 유사성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 최대전력 산출 근사모델

2.1 도시철도 전력회로망 모델

도시철도의 전력공급계통은 전력공급자로부터 전력을 공급 받아 수전변전소의 정류기용 변압기에서 1차 변성을 거친 후 정류기에서 DC 1500[V]로 변환하여 전동차에 공급하는 방식으로 구성되며, 이를 간략히 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 전동차의 운전은 소비전력과 운행속도의 변화에 따라 역행(Accelerating), 타행(Coasting) 및 제동(Braking)의 세 단계로 구분된다.

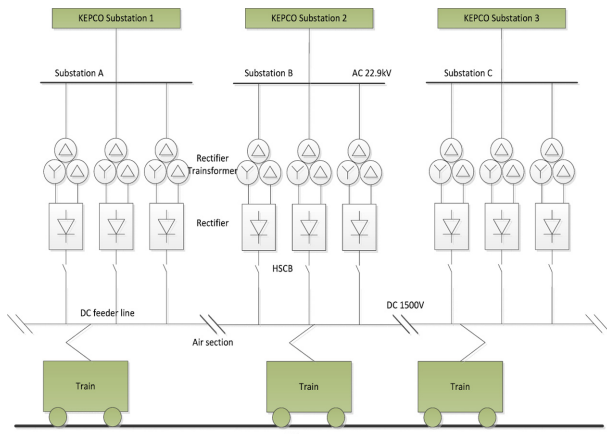


Fig. 1 Typical DC railway system

Fig. 1과 같은 도시철도 전력계통에서 모든 DC선로는 전기적으로 서로 연결되어 있으며 변전소 전원의 전압이나 정류기 가동대수에 따라 공급하는 전력량이 바뀐다. 이와 같은 DC 도시철도에서 전력조류(Power flow)를 계산하기 위한 기존 연구 결과를 보면 전력회로망 모델을 구성할 때 전동차를 이상전류원으로 모델링 하는 전류벡터 반복법(current vector iteration)과 저항부하로 모델링 하는 전도행렬 반복법(conductance matrix iteration)이 주로 사용되는데, 이 중에서도 전자가 후자에 비해 계산 수행 속도가 빠르고 계산오차도 적음이 밝혀졌으며 이후 많은 연구에서 전류벡터 반복법을 사용하고 있다[6]. 이 논문에서도 전류벡터 반복법을 사용하여 회생전력을 포함한 DC 전력계통에 대한 조류계산을 수행할 것이다.

2.2 최대수요전력 계산

최대전력은 이론상으로는 순간전력의 최대값을 의미하지만, 실제로는 전력공급회사로부터 전력을 받는 수전변전소에서 15분 동안의 평균 사용전력을 기준으로 하여 일정 기간 동안 가장 큰 값을 최대전력으로 정의하여 사용한다. 이 정의에 따라 최대전력의 계산은 Fig. 3과 같은 과정을 통해 구할 수 있다.

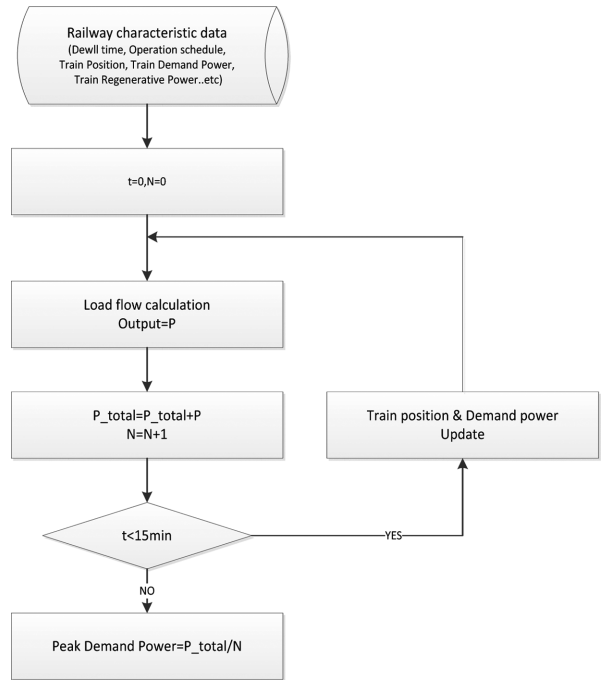


Fig. 2 Peak demand power calculation flowchart

이 과정에서는 도시철도의 특성 데이터를 입력으로 하여 각 시점마다 열차의 위치와 요구전력을 새로 계산하여 조류계산을 수행한다. 이러한 조류계산의 결과로 각각의 변전소에서의 소비전력이 출력으로 나오게 되며 이러한 과정을 최대전력의 산정기준이 되는 15분동안 계속하게 된다. 만약에 변전소의 특성데이터(예를 들면, 전원 임피던스)가 변화하는 경우 이에 대한 최대전력의 변화를 구하기 위해서는 변화된 입력을 넣고 Fig. 2와 같은 연산을 다시 반복해야 되는데 이는 매우 많은 연산량과 연산시간을 요구하기 때문에 실시간 운용에 활용하기에는 어려워진다. 따라서 이를 개선하기 위한 방안이 필요하다.

2.3 최대수요전력 산출 근사모델

최대수요전력 산출을 신속하게 처리하기 위한 근사모델은 Fig. 3과 같은 과정을 통해 얻을 수 있다. 불규칙한 변전소 전원 임피던스를 입력으로 일단 Fig. 2에서의 방법을 통해 변전소의 최대전력을 구한다. 이렇게 구한 변전소 최대전력을 바탕으로 변전소와 변전소 사이에 이상전류원 가상부하(virtual load)를 설정하는 등가 전력회로망을 구성하는 것이 이 논문에서 제시하는 근사모델의 핵심 과정이다. 이러한 근사모델을 만드는 방법을 1개의 가상부하가 있는 경우와 다수 개가 있는 경우로 나누어 정리하기로 한다.

2.3.1 단수 가상부하(single virtual load)

변전소 사이에 1개의 전동차가 배치되어 있다고 가정하고, 전류벡터 반복법에 따라 이 전동차를 이상전류원(Ideal current source) 가상부하로 나타내면 이 경우에 해당하는 전력회로망은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

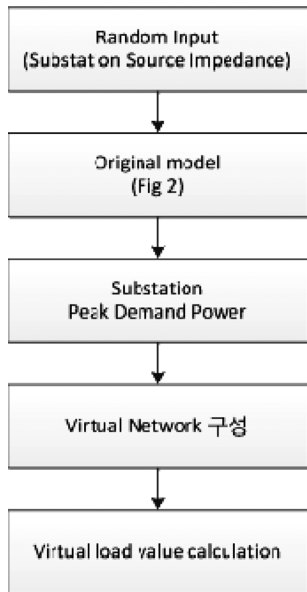


Fig. 3 Approximate model flowchart

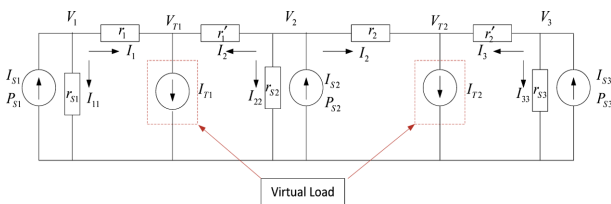


Fig. 4 Virtual power network

이 그림에서 변전소측의 전원은 노턴 등가회로(Norton equivalent circuit)로 표현한 것이고, 3개 변전소 사이에 한 개씩 전동차가 배치되어 모두 두 대의 전동차가 운전되고 있는 상황을 회로로 나타낸 것이다. 이 회로에서 변전소 공급 전력은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Si} = V_{Si}(V_{Si} - V_i)g_{Si} \quad (1)$$

$$V_{Si} = I_{Si}/g_{Si}, \quad g_{Si} = 1/r_{Si}, \quad i = 1, 2, 3$$

식(1)로부터 변전소 마디전압(V_i)은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_i = V_{Si} - \frac{P_{Si}}{V_{Si}g_{Si}} \quad (2)$$

변전소와 변전소 사이의 선로 임피던스($rline_i$)는 선로 길이에 따라 결정되므로 항상 고정되어 있으며, 변전소부터 가상부하까지의 거리에 따른 저항(r_i)과 반대편 변전소로부터 가상부하까지의 거리에 따른 저항($rline_i$)의 합은 선로 임피던스(r_i')로 나타낼 수 있다. 가상부하의 마디전압은 아래와 같이 나타낼 수 있으며,

$$V_{Ti} = V_i - I_i r_i = V_{i+1} - I_{i+1} r_i' \quad (3)$$

$$= V_{i+1} - I_{i+1} (rline_i - r_i)$$

변전소로부터 가상부하로 흘러 들어가는 전류(I_i)은 아래와 같다.

$$I_i = I_{Si} - I_{ii} = I_{Si} - V_i g_{Si}, \quad i = 1 \text{ or } N$$

여기서 다음과 같이 가정하면,

$$I_i = (I_{Si} - I_{ii})/2 = (I_{Si} - V_i g_{Si})/2, \quad i = 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

식(3)과 식(4)로부터 변전소에서 가상부하까지의 선로저항(r_i)와 가상부하의 전류(I_{Ti})는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i = \frac{V_i - V_{i+1} + I_{i+1} \times rline_i}{I_i + I_{i+1}}, \quad I_{Ti} = I_i + I_{i+1} \quad (5)$$

위와 같이 계산해낸 가상부하와 가상부하까지의 저항을 사용하여 전력 회로망을 재구성하면 단수가상부하에 대응하는 근사모델이 완성된다.

2.3.2 다수 가상부하(Multiple Virtual Load)

변전소 사이에 m 개의 가상부하가 있고 부하는 모두 등거리 있다고 가정하면 Fig. 5에서 보듯 변전소에서 부하까지의 선로 저항과 가상부하와 가상부하 사이의 선로저항은 모두 같은 값으로 표현할 수 있으며 아래와 같은 수식이 성립한다.

$$r_i = rline_i / (m+1)$$

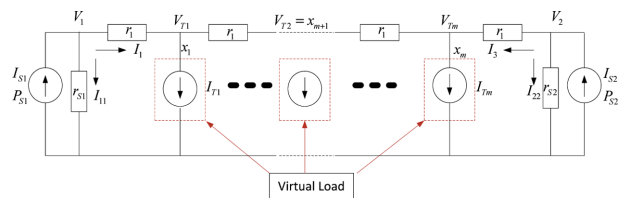


Fig. 5 Multiple virtual load power network

첫 번째와 마지막 가상부하 마디전압(V_{T1} , V_{Tm})은 식(1)로부터 얻어진 전압(V_i)와 선로저항(r_i)으로부터 구할 수 있다. 가상부하의 전류를 미지수($x_1 \dots x_m$)로 설정하고 나머지 가상부하 마디전압을 미지수($x_{m+1} \dots x_{2m-2}$)로 두면 총 $2m-2$ 개의 미지수가 있는 선형 연립방정식으로 나타낼 수 있다. 그런데 마디방정식의 개수는 m 개로서 미지수보다 연립방정식의 수가 적으므로 수 많은 해를 가지게 된다. 따라서 유일한 해를 만들기 위해서는 가상부하에 대한 선형조합으로 $m-2$ 개의 등식을 생성해야 하는데 이를 위해 아래와 같은 선형조합 등식을 가정한다.

$$x_1 + \dots + x_{m-1} = (m-1)x_m$$

$$2x_1 + \dots + 2x_{m-2} = (m-2)x_{m-1} + (m-2)x_m \quad (6)$$

$$\vdots$$

$$(m-2)x_1 + (m-2)x_2 = 2x_3 + \dots + 2x_m$$

이 등식은 단수 가상부하를 만들 때와 마찬가지로 중간에 위치한 변전소에서 공급하는 전력은 양쪽에 똑같이 공급한다는 가정에 근거한 것이다.

식(6)과 가상부하의 마디방정식을 가지고 연립방정식을 구성하면 식(7)과 같은 선형연립 방정식이 나온다.

$$Ax = B \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} c & d \\ d & f \end{bmatrix}, x = [x_1 x_2 x_3 \dots x_{2n-2}]$$

$$B = [b_1 b_2 b_3 \dots b_{2n-2}]^T$$

행렬 A와 B의 인자는 식(8), (9)과 같다.

식(7)로부터 미지수 x 에 대한 해를 구할 수 있으며 새로운 근사 모델을 구성할 수 있다. 변전소의 개수가 N 개이면 식(7)과 같은 선형연립방정식이 $N-1$ 개 생성되며, 이로부터 가상부하에 대한 전류값이 구해지면 새로운 전력회로망을 구성할 수 있고, 이렇게 구성된 전력회로망에 대한 조류계산은 전류벡터 반복법을 활용하여 처리하게 된다. 근사모델은 Fig. 2에의 과정과 거의 유사하지만 최대전력을 구할 때 단 한번의 조류계산만 수행하므로 이전 방법보다 많은 연산 시간을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그리고 여기서 사용하는 근사모델은 변전소의 파라미터를 기준으로 나타내는 모델이기 때문에 단선이나 복선계통에 관계없이 적용할 수 있다.

$$c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} -1/r_i & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 2/r_i & -1/r_i & 0 & \dots & 0 \\ -1/r_i & 2/r_i & -1/r_i & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1/r_i & 2/r_i & -1/r_i \\ 0 & \dots & 0 & -1/r_i & 2/r_i \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -1/r_i \end{bmatrix}$$

$$e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & -(1-n) \\ 2 & 2 & 2 & \dots & 2 & -(2-n) & -(2-n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n-3 & n-3 & n-3 & \dots & -3 & -3 & -3 \\ n-2 & n-2 & -2 & \dots & -2 & -2 & -2 \end{bmatrix}$$

$$f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, b_1 = \begin{bmatrix} I_{Si} - V_{Ti}/r_i \\ V_{Ti}/r_i \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ V_{Tm}/r_i \\ I_{Si+1} - V_{Tm}/r_i \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 적용실험 및 평가

이 논문에서는 인천교통공사 1호선 노선을 모델로 하여 적용실험을 수행한다. 인천교통공사 1호선은 총 길이 29.4km로 10개 변전소 29개 역사를 가지고 있는데, 혼잡 시간대에 4분 30초 간격으로 운행하고 있으며 비혼잡 시간대에는 8분 30초 간격으로 열차를 운행하여 평일 기준 312편성의 열차가 운행되고 있다.

역 정차시간은 30초를 기준으로 운영되고 있으며 1편성당 8량의 객차를 운용하고 있다. 평상시에는 자동

열차운전(Automatic Train Operation)에 의해 계획된 제어 방식으로 운행되고 있으며 Fig. 6은 이 논문에서 활용된 열차의 요구전력과 속도를 나타낸다[7].

DC 급전시스템에 대한 시뮬레이션 방법에는 전동차 주행에 미치는 모든 하부시스템을 매스탬마다 고려하는 통합시뮬레이션 방법과 차량의 시간에 따른 요구전력 및 위치를 미리 계산하여 테이블화 하여 놓고 조류해석 시에 이 테이블을 불러와 계산하는 2단계 시뮬레이션이 있다[8].

Fig. 7은 2단계 전력시뮬레이션에 대한 개념에 대해 설명

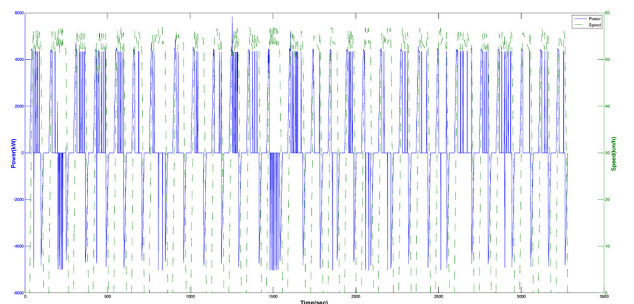


Fig. 6 Power and speed profile of a train running

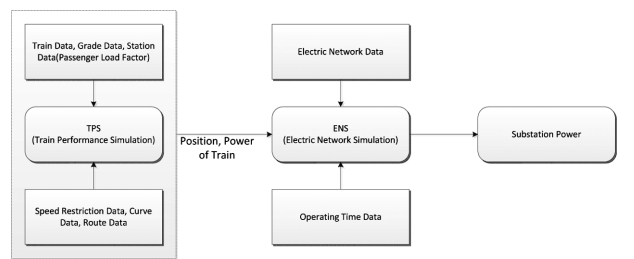


Fig. 7 Two stage simulation of the traction power supply system

Table 1 Source impedance for rectifier operation number

Rectifier operation number	1	2	3
Source impedance[Ω]	0.05327	0.03077	0.02323

하고 있다. TPS(Train Performance Simulation)의 결과로 나온 전동차의 위치와 요구전력만 가지고 ENS만 수행하는 것이 2단계 전력시물레이션의 핵심이다. 본 논문의 목적은 최대전력의 근사모델을 만들고 근사모델의 유효성을 판별하기 위함이다. 참고문헌[7]의 TPS 결과를 활용하여 전동차의 위치에 따른 요구전력을 알고 있다는 가정하에서 ENS(Electric Network Simulation)만 수행하는 2단계 시물레이션 방법을 채택하여 실험하였다.

Fig. 6의 데이터를 입력으로 하여 열차 시격 240[sec], 역정차시간(dwell time)은 30[sec], 열차 운행회수 상·하선 각각 30대이고 모든 열차는 동일한 운전패턴, 시차로 운행된다는 가정 하에 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션의 입력에 해당하는 변전소의 전원 임피던스는 정류기의 가동 대수에 따라 Table 1로 가정한다.

변전소의 개수가 10개이므로 10개의 입력과 10개의 출력을 가지는 다입·출력(MIMO) 시스템이 된다. 모든 선로가 병렬로 연결돼 있기 때문에 변전소 한곳의 정류기 가동수가 변화하면 전체 변전소의 출력(최대전력) 또한 바뀌는 연성(coupling) 특성이 있다. 정류기 가동수를 k라고 할 때, Fig. 8~11은 5-th 변전소의 정류기 가동수를 1~3까지 변화시키고 나머지 변전소의 k는 2로 고정했을 때 변전소의 전력변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 모든 변전소의 소비전력을 합한 값으로 제5 변전소의 정류기 가동수를 변화시켜도 전체 소비전력의 변화는 거의 없음을 보여준다. Fig. 9는 정류기 가동수에 따른 5-th 변전소의 15분 최대전력의 변화를 나타낸다. 정류기 가동수가 많을 때 최대전력도 커지며, 반대로 정류기 가동수가 적을 때는 해당 변전소의 최대전력은 줄어든다.

Fig. 10은 제5 변전소의 정류기 가동수가 커지면 이웃한 제6의 변전소의 최대전력은 줄어들음을 보이고 있다. 부하를 서로 공유하고 있는 DC 선로에서는 한쪽에서 공급능력이 커

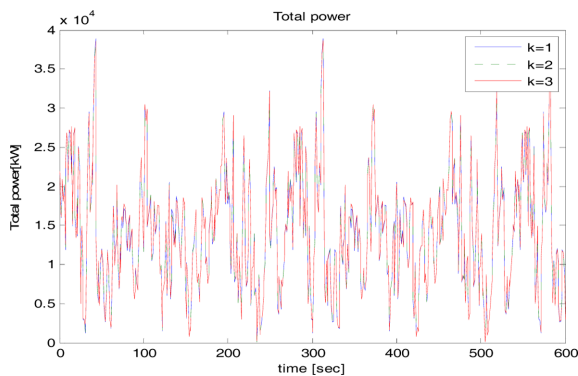


Fig. 8 Total traction power for varying source impedance

지면 이웃한 변전소의 공급은 줄어든다. 하지만 Fig. 11에서 보듯이 제5 변전소에서 가장 멀리 떨어진 제1 변전소의 최대전력은 거의 변화가 없다. 결과적으로 한쪽 변전소에서 전원 임피던스가 변화하면 해당 변전소와 이웃한 변전소에서의 최대전력은 크게 변하고 거리가 커질수록 그 영향은 작아짐을 볼 수 있다.

입·출력 관계를 근사모델이 얼마나 정확히 표현하는지 보기 위해 300회 동안 입력을 변화시켜 출력을 관찰하였다.

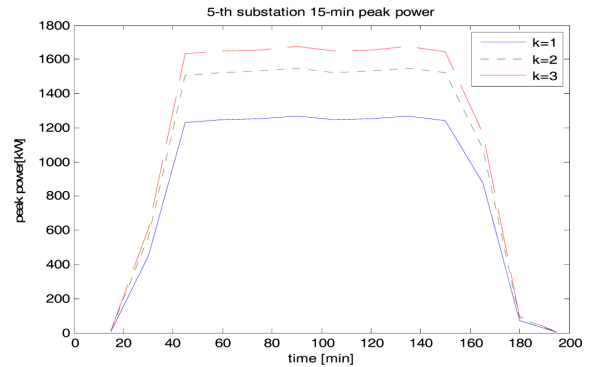


Fig. 9 5th substation 15min peak power for varying source impedance

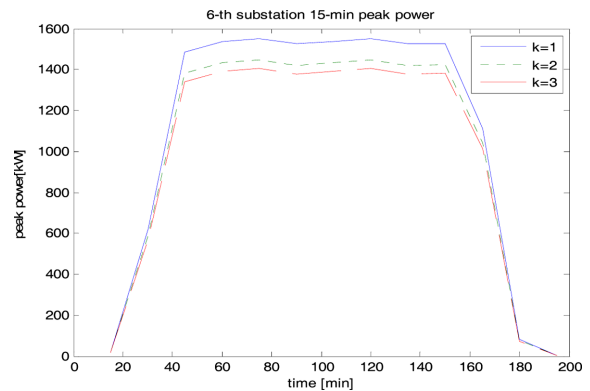


Fig. 10 6th substation 15min peak power for varying source impedance

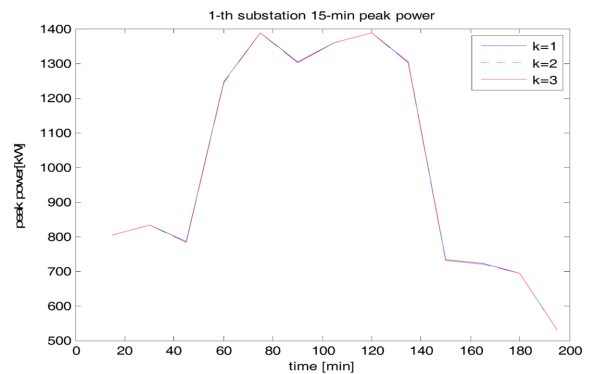


Fig. 11 1th substation 15min peak power for varying source impedance

Table 2 Correlation coefficient between origin and approximate model

Substation	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6	Sub7	Sub8	Sub9	Sub10
Corr_coeff	0.9990	0.9993	0.9996	0.9996	0.9999	0.9998	0.9996	0.9997	0.9993	0.9992

Table 3 Results of varying dwell time

Substation	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6	Sub7	Sub8	Sub9	Sub10
Corr_coeff	0.9994	0.9996	0.9995	0.9995	0.9998	0.9997	0.9998	0.9998	0.9998	0.9988

Table 4 Results of varying demand power

Substation	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6	Sub7	Sub8	Sub9	Sub10
Corr_coeff	0.9989	0.9992	0.9996	0.9996	0.9998	0.9998	0.9998	0.9999	0.9993	0.9992

Table 5 Results of varying voltage at substation

Substation	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6	Sub7	Sub8	Sub9	Sub10
Corr_coeff	0.9752	0.9800	0.9702	0.9783	0.9817	0.9884	0.9762	0.9751	0.9713	0.9734

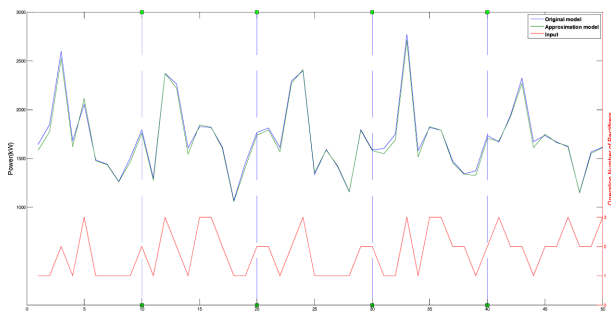


Fig. 12 Comparison of model result

Fig. 12는 불확정한 입력(정류기 가동수)을 주었을 때 기존의 모델과 근사모델의 최대전력의 결과를 비교한 것이다. 변전소의 개수가 10개이므로 입력이 10개가 들어가며 출력(변전소 최대전력) 또한 10개가 된다. 입,출력 변화의 구분선을 파란색 점선으로 10개씩 구분하여 표시하였다.

Fig. 12의 결과를 보면 근사 모델이 입력의 변화에 따라 최대전력의 변화 추이를 잘 따라감을 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 변전소별 상호상관계수를 구해보면 Table 2과 같으며, 모든 변전소에서 상관계수가 0.99 이상을 보이면서 근사모델 결과가 기존모델과 거의 같음을 알 수 있다.

모델 유효성에 대한 다각적 검토를 위해 Table 3에서는 30 초로 고정되어 있던 역정차시간(dwell time) 시간을 각 역에서의 이례상황을 고려하여 $\pm 5[\text{sec}]$ 의 편차가 있다고 가정하여 다시 모의 실험한 결과를 나타낸다.

Table 4에서는 승객변화, 열차 편의시설 가동 유무 등에 따른 열차 요구전력의 변화를 고려하여 고정되어 있던 열차의 요구전력에 대하여 각각의 열차에 $\pm 5\%$ 의 변화를 주어 다시 모의 실험한 결과를 나타낸다.

Table 5에서는 변전소의 수전전압이 바뀌는 것을 고려하여 각각의 변전소의 수전전압에 대해 $\pm 3\%$ 의 변화가 있다고 가정하여 모의 실험한 결과를 보인다. Tabel 3,4에서는 상

Table 6 Comparison of calculation time

	Origin model	Approximate model
Calculation time	7.1042[sec]	0.14579[sec]

Table 7 Root Mean Square Error due to virtual load number

Number	1	3	5	10	20
RMSE	21.7433	18.9452	18.8839	18.8065	18.7128

관계수가 거의 변화가 없었으나 수전전압이 바뀔 경우는 약간 작아지나 모든 변전소에서 0.97이상을 보이므로 근사모델로 사용하기에는 적절하다고 판단된다.

Table 6에 최대전력을 연산하는 시간을 보이고 있는데, 실험 결과 기존 모델보다 새로운 근사 모델이 최대전력을 계산하는데 약 50배 정도 계산시간을 단축함을 볼 수 있다. 최대전력을 최적화 시키는 문제를 풀기 위해서는 목적함수의 반복적 연산이 필수적이다. 만약 GA(Genetic algorithm) 또는 PSO(Particle swarm optimization)와 같은 휴리스틱 방법을 통해 50회 정도의 반복계산이 필요하다면 대략 350[sec]의 계산 시간을 절약할 수 있다.

Table 7은 가상부하의 개수에 따른 평균제곱오차를 보인다. 가상부하의 개수가 커질수록 평균제곱오차는 작아진다. 하지만 가상부하의 개수가 올라가면 최대전력을 연산하는 시간도 늘어나므로 적절한 가상부하 개수를 선정하는 것이 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 정류기를 갖는 도시철도에서 최대전력을 빠르게 계산할 수 있는 근사 모델을 제시하였다. 근사 모델은 기존모델의 결과를 바탕으로 가상의 네트워크를 구성하는 절차로 이루어지며, 이 모델을 사용하면 최대전력을 상당히 정

확하면서도 아주 간단히 계산할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 근사모델과 기존모델에 의한 최대전력 계산값은 매우 유사함을 보이며, 근사모델을 활용하여 최대전력을 계산할 경우 대략 50배 정도의 시간단축을 확인할 수 있었다. 따라서 이 근사모델은 최대전력을 최소화 하는 전원 운전조건을 구하는 최적화 해법을 구하거나 실시간 제어를 목적으로 하는 분야에서 활용될 수 있으며, 이를 활용하여 추후 연구 과제로 최대전력을 최소화 하는 최적운전조건에 대한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] T. Albrecht (2004) *Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control*, *Computers in Railways IX*, WIT Press, Germany, pp. 885-894
- [2] K.M. Kim, S.-M. Oh (2009) A Model and Approaches for Smoothing Peaks of Traction Energy in Timetabling, *Journal of the Korean Society for Railway*, No. 6, pp. 1018-1023.
- [3] J.F. Chen, R.L. Lin, Y.C. Liu (2005) Optimization of an mrt train schedule: Reducing maximum traction power by using genetic algorithms. *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 20(3), pp. 1366-1372.
- [4] H.M. Lee, G.D. Kim, C.M. Lee (2008) Development of ESS for Regenerative Energy of Electric Vehicle, *WCRR*, pp. 476-478.
- [5] M. Steiner, M. Klohr, S. Pagiela (2007) Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. In *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference IEEE*, pp. 1-10.
- [6] Y. Cai, M.R. Irving, S.H. Case (1995) Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(5), pp. 445-452.
- [7] Construction Division of Incheon Subway (2006) Power simulation about Implementation design on Songdo International City, Incheon City Rail Line 1 extension project.
- [8] S.K. Jung (2003) Simulation Development of the DC Traction Power Supply including Regenerative Trains, *PhD Thesis*, Myongji University.

접수일(2013년 5월 9일), 수정일(2013년 6월 21일),
게재확정일(2013년 8월 5일)

Han-Su Kim : hs7827@hanmail.net

Graduate Student at the Department of Electrical Engineering, INHA University, 100 Inharo, Nam-gu Incheon 402-751, Korea

Oh-Kyu Kwon: okkwon@inha.ac.kr

Professor at the Department of Electrical Engineering, INHA University, 100 Inharo, Nam-gu Incheon 402-751, Korea