

# OLTC를 활용한 도시철도 최대전력 감축에 관한 연구

김한수\*

The study on Reduction of Demand Power in Urban Railway using OLTC

Han-Soo Kim\*

요 약

본 논문에서는 도시철도의 변전소의 최대수요전력을 줄이기 위한 새로운 방법으로 OLTC(On Load Tap Changer)를 갖는 변압기의 사용을 제안한다. 국내의 대부분의 도시철도는 전동차에 필요한 전력을 다이오드 방식으로 정류하며 DC 1500[V]로 공급한다. 변전소가 병렬로 연결되어 있기 때문에 수전전압이 상승하면 정류기 전압도 상승하게 되고 변전소의 최대전력도 증가하게 된다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 방법이 최대수요전력의 증가를 상당히 제한할 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

This paper proposes a new method reducing the maximum demand power of substations at urban railway by using transformer with OLTC(On Load Tap Changer). Most of the domestic urban railway is rectified by a diode scheme, and supplies the electric vehicles in dc 1500[v]. Because the substations are connected in parallel, if an input voltage of a substation is increased, then the voltage of rectifiers is also increased, and which leads to an increase in the maximum demand of the substation. Simulation results show that increment of maximum demand power can significantly be limited using the method proposed in this paper.

키워드

Railway, Maximum Demand, Oltc, Rectifier  
철도, 최대 수요 전력, 부하시 탭변환 장치, 정류기

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

1974년 서울지하철 1호선 개통 이후, 산업 발전과 대도시 인구 밀집화로 인해 국내 도시철도는 점차 확대되어 주요 대도시에서 핵심적인 대중교통 수단으로 중추적 역할을 하고 있다. 전기철도에서 쓰이는 전압은 여러 가지이지만 국내 도시철도는 대부분 직류급

전방식을 채택하고 있으며 사용전압은 DC 1500[V]가 주를 이루고 있다. 전력공급 선로에서 발생하는 전압 강하 방지를 위해 2~3[km] 마다 변전소를 설치하고 있다[1]. 직류급전방식은 전동차에 필요한 에너지를 변전소에서 병렬로 전력을 공급한다. 따라서 전력계통 사고로 인해 한쪽 변전소에서 공급이 불가능 할 경우에도 다른 쪽에서 즉시 전력을 공급할 수 있기 때문에 안정적으로 계통운영을 할 수 있는 이점이 있다.

\* 교신저자 : 인천교통공사  
• 접수일 : 2016. 09. 19  
• 수정완료일 : 2016. 10. 13  
• 게재확정일 : 2016. 10. 24

• Received : Sep. 19, 2016, Revised : Oct. 13, 2016, Accepted : Oct. 24, 2016  
• Corresponding Author : Han-Soo Kim  
Incheon Transit Corporation  
Email : hs7827@hanmail.net

하지만 대부분의 지하철에 채택하고 있는 다이오드 정류 방식은 회생전력을 재사용할 수 없다는 단점이 있고, 수전전압이 오르면 해당 변전소의 공급전력도 같이 상승하여 최대수요전력의 값이 증가하는 문제가 있다. 최대수요전력은 도시철도 전기료의 17%~23% 정도를 차지하며, 여름 또는 동절기에 갱신한 값은 최장 1년 동안 전력요금의 기본료가 되기 때문에 관리 대단히 중용한다. 기존 연구는 ESS(:Energy Storage System) 장치를 활용하여 전력요금이 저렴한 심야시간대에 저장하였다가 침두시간대에 사용하는 방안과 전동차에서 발생하는 회생전력 사용을 극대화 하는 방법이 소개되었다[2-4]. 이외에도 변전소에 설치된 예비 정류기를 제어하여 최대전력을 제어하는 방법과 열차의 운행 최적화를 통해 소비전력을 절감하는 방법 등이 연구되었다[5-7]. ESS장치의 경우 별도의 설치공간이 필요하고, 예비 정류기 활용방법이나 열차 운행 최적화 방법은 전압변동에 의한 최대전력 변동에 능동적으로 대처하기 어려운 한계가 있다. 전압변동의 해법으로 전력전자 기술을 응용한 FACTS 설비의 적용을 고려해 볼 수 있지만 고가 설비로 그 사용이 제한적이다[8]. 본 연구에서는 설치공간도 최소화할 수 있고 단순한 제어로 최대효과를 얻을 수 있는 OLTC를 갖는 변압기활용 제안한다. 탭제어를 통해 수전전압 변동에 의한 최대수요전력 상승 문제를 해결할 수 있음을 제안하고 그 결과를 시뮬레이션을 통해 도시한다.

## II. 본론

### 2.1 기존 도시철도 급전시스템

지하철 운행에 필요한 전력은 한국전력의 변전소로부터 받는데 계통의 안정화를 위해 지하철의 변전소들은 각기 다른 수전 포인트에서 전력을 공급받는다. 그림 1은 도시철도 급전시스템에 대한 간략도이다. 한국전력 변전소로부터 교류 22.9 kV를 수전 받으면 정류기용 변압기에서 1차 변성을 거친다. 변압기는 리플을 줄이고 고주파를 줄이기 위해  $\Delta/\Delta$ 와  $\Delta/Y$ 로 결합된 3권선용을 사용하며, 60도의 위상차 갖는 6상을 출력력을 만들어 다이오드의 입력으로 사용된다. 다이오드는 변압기에 출력된 AC 1,200[V] 전압을 DC

1,500[V] 형태로 2차 변성하며 12펄스 형태로 출력하여 전동차에 공급한다. 그림 1에서 보듯이 지하철의 변전소에는 서로 전동차에 병렬급전을 하고 있다.

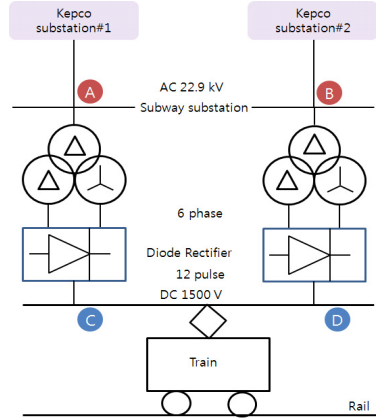


그림 1. 도시철도 급전시스템  
Fig. 1 Power supply system of urban railway

수전점 A 또는 B 지점에서 전압이 변동하게 되면 정류기 출력인 C, D 지점의 전압도 같이 변동하게 된다. 따라서 전압이 상대적으로 높은 곳에서 더 많은 전력을 공급하게 되며 A와 B지점의 전압차와 공급전력과의 관계는 전압차에 제곱에 비례한다. 수전점에서 적은 전압 상승도 전차선에 공급하는 전력은 상황에 따라 크게 공급이 늘어나는 결과를 초래하기도 한다. 따라서 이러한 수전전압 변동에 의한 공급 불균형에 따른 최대수요전력 증가를 제한하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

### 2.2 OLTC 구조 및 특징

본 논문에서는 도시철도의 수전전압의 변동에 따른 최대전력 변동의 영향을 최소화 시키고 최대전력을 감소시키기 위해 부하가 걸린 상태에서도 탭변환이 가능한 OLTC를 가진 변압기를 변전소에 설치하는 것을 제안한다. 일반적으로 OLTC를 가진 전력용 변압기는 송·배전단의 전압 안정화를 위해 많이 활용되고 있다[9]. 공급점의 전압을 감시하다가 기준 전압보다 낮아지거나 또는 높아지면 변압기 탭을 자동으로 조절하여 전압을 자동 조절하는데 이러한 장치를 AVR(:Automatic Voltage Regulator)이라 한다.

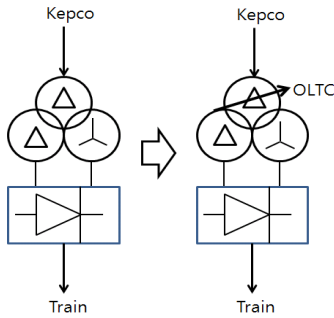


그림 2. 제안하는 변압기 구조  
Fig. 2 Proposed structure of transformer

그림 2는 지하철 변전전소에 제안하는 OLTC를 가지는 변압기의 기본 구조를 나타낸다. 일반적으로 1차 쪽의 전류가 작기 때문에 OLTC를 1차측에 설치하여 운영하는 경우가 많으며 지하철의 경우  $\Delta/\Delta$ 와  $\Delta/Y$ 로 이중 결합되어 있기 때문에 OLTC를 설치한다면 1차측에 설치하는 것이 유리하다. 탭당 전압변동 범위는 수전전압의 변동폭을 참고로 설계해야 한다. 인천 지하철 1호선의 2015년도 수전전압을 SCADA 시스템으로부터 분석한 결과 전압범위는  $22.9 \pm 0.6$  [kV]인 것으로 조사되었다. 그림 3은 1차측에 설치된 OLTC의 구조를 나타낸다. 탭변화에 따른 입·출력 전압의 관계는 수식 (1)과 같다.

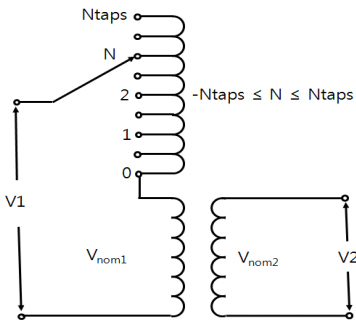


그림 3. 변압기 1차측 설치된 OLTC  
Fig. 3 installed OLTC at primary of transformer

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{(1 + N \cdot \Delta U)} \times \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}} \quad (1)$$

단, N : 탭위치

$\Delta U$  : 1탭 변화에 따른 전압변동 pu

### 2.3 도시철도 급전시스템 모델링

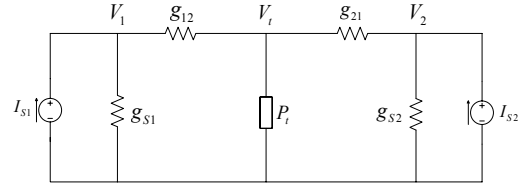


그림 4. DC 급전시스템의 노턴 등가회로  
Fig. 4 Norton equivalent circuit for DC feeder system

DC 급전시스템은 일반적으로 그림 4와 같이 전원을 노턴 등가회로로 모의하고 열차의 경우는 요구전력  $P_t$ 를 가진 회로로 등가모델링 할 수 있다. 변전소의 수가 늘어나고, 열차의 수도 확대되면, 노드들이 늘어나기 때문에 방정식도 개수도 늘지만  $[G][V] = [I]$ 라는 대수식으로 일반화 할 수 있다.

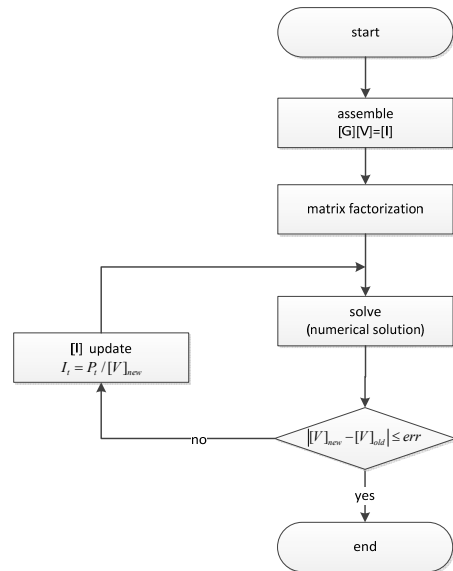


그림 5. 전류벡터 반복법 흐름도[10]  
Fig. 5 Flow chart of iterative current vector

$$I_t = P_t / V_t \quad (2)$$

조류계산을 위해서 사용되는 [I] 매트릭스에서 열차에 흐르는 전류는 식(2)와 같은 식으로 표현할 수 있다. 매트릭스의 해를 풀기 위해 식을 다시 정리하면 비선형식식이기 때문에 반복법에 의해서 계산을 해야 한다. 일반적으로 반복법에는 열차의 요구전력을 컨덕턴스와의 관계로 놓고 풀어내는 컨덕턴스 반복법과 식(2)와 같이 전류의 관계로 놓고 계산하는 전류벡터 반복법이 있는데, 후자가 해로 근접하는 속도가 훨씬 빠르기 때문에 일반적으로 많이 쓰인다[10]. 그림 5는 전류벡터 반복법의 계산 알고리즘을 나타낸다.

### III. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 OLTC를 가진 급전시스템의 최대전력 감소 능력과 적정성을 검토하기 위해 인천지하철 1호선의 전압 실측 데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 실측된 수전전압의 변동에 따라 최대전력을 변동폭을 시뮬레이션 하고 제안하는 급전시스템을 적용하였을 경우를 상호 비교하여 제안된 시스템의 효과를 밝힌다.

#### 3.1 시뮬레이션 조건

표 1. 실험 파라미터  
Table 1. Test parameter

	Parameter	Num.	Unit
S u b w a y	Route length	30	[km]
	Number of substation	10	EA
	Number of train	18	EA
	Load of a train	500	[kW]
	Line resistance	0.0123	[Ω/km]
	Rail resistance	0.0186	[Ω/km]
	Source impedance	0.0308	[Ω]
O L T C	Tap number	17	$-8 \leq N \leq 8$
	$\Delta U$ (Voltage step)	0.005	P.U

시뮬레이션은 인천지하철 1호선의 선로조건을 선택하여 시행하였다. 대상 변전소간의 거리와 레일 및 전차선 저항 그리고 전원임피던스 등 주요 파라미터는

인천지하철 1호선 송도연장선 실시설계보고서를 참고하였다. 표 1은 주요 실험 파라미터를 나타낸다.

정류기는 2대가 투입되어 있는 조건으로 실험하였으며, 열차조건은 변전소의 중간에 500[kW]를 소비하는 열차가 상·하선에 각각 1대씩 존재한다고 가정하고 실험하였다. oltc를 가진 전원은 전력사용량만을 위한 조류계산만이 필요하므로 간략화한 페이저 모델(phasor model)로서 전류원(current source)으로 등가 모델링하였다. 전력조류계산은 Matlab을 활용하였으며, 전류벡터 반복법을 적용하여 결과를 도출하였다. 실험에 사용된 수전전압은 SCADA로부터 취득된 인천지하철 1호선 10개 변전소의 3개월(2016년 7월 1일 ~ 2016년 9월 30일) 실측데이터를 적용하였다.

#### 3.2 전압 안정화 실험(Voltage regulation test)

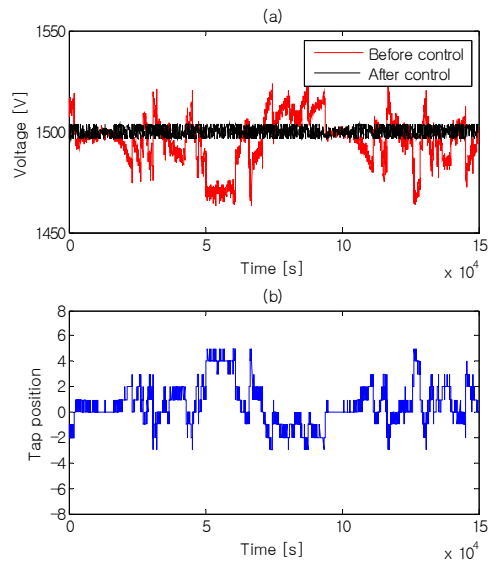


그림 6. 무부하시 출력 전압  
Fig. 6 Output voltage in No Load

일반적인 AVR의 경우 출력전압을 일정범위 내에서 조정하는 역할을 한다. 하지만 본 연구에서는 수전전압에 따른 전력공급 불균형에 대한 제어를 해야 하므로 다이오드의 출력을 기준전압으로 하는 것이 아니라 수전전압을 기준으로 탭을 조절한다. 그림 6은 OLTC를 활용하여 변압기의 탭을 제어한 결과를 도시하였다. 그림 6에 (a)는 무부하시 정류기의 출력전

압을 나타내고 (b)는 OLTC 제어 입력을 나타낸다. 입력전압이 높으면 탭위치는 (-) 방향으로 향하고, 입력전압이 낮으면 (+) 방향으로 제어하여 정류기 출력전압을 일정하게 유지시킴을 볼 수 있다. 그림 7은 변전소에 부하가 있다는 설정에서 시뮬레이션을 한 것으로 열차에 공급하는 전력 때문에 전압강하가 나타났을 뿐 수전전압이 흔들려도 정류기 출력전압은 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

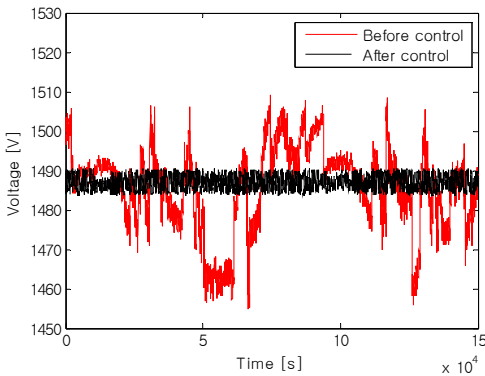


그림 7. 부하시 출력전압  
Fig. 7 Output voltage in the Load

### 3.3 최대전력 제어 실험

제어범위는 부하조건과 수전전압 등의 조건에 따라 변동하기 때문에 일반화하기 어렵다. 본 연구에서는 OLTC의 탭범위에 따라 제어 가능한 전력범위를 살펴보기 위해 제어 대상 변전소를 1개씩 고정하고 나머지 변전소의, 탭위치는 0으로 가정하고 나머지 부하 조건은 기존조건과 같이 실험을 반복하였다. 수전전압은 모든 변전소가 동일하다고 가정하였다. 표 3은 탭범위(-8 ≤ N ≤ 8)에서 제어 가능한 전력 제어범위를 나타낸다. 출력전압을 최하로 할 경우 해당변전소에서의 전력소비를 0로까지 할 수 있음을 볼 수 있다. 해당변전소의 전압이 주변보다 낮기 때문에 회로적으로 다이오드는 오픈된 상태이므로 출력전류가 0이 된다. 출력전압을 최대로 할 경우 정격전압일 때보다 2배정도 많은 전력을 공급할 수 있음을 보인다.

표 2. 제어 가능 전력범위  
Table 2. Controllable power range

Tap Substation	N		
	-8	0	8
Gigi	0	1	2.12
Imhak	0	1	2.17
Jackjeon	0.04	1	2.03
Bupyung M.	0.06	1	2.02
Bupyung T.	0.05	1	2.02
Yeseul	0.10	1	1.97
Shinyeonsu	0	1	2.13
Dongchun	0	1	2.16
Techno park	0.02	1	2.06
Central park	0.08	1	1.99

그림 8은 전변전소에 변압기 탭제어를 통한 전압안정화를 적용할 경우 줄어드는 최대수요전력을 나타낸다. 수전 전압의 변동으로 늘어난 최대전력을 변압기 탭제어를 통해 25%정도 감소함을 보인다.

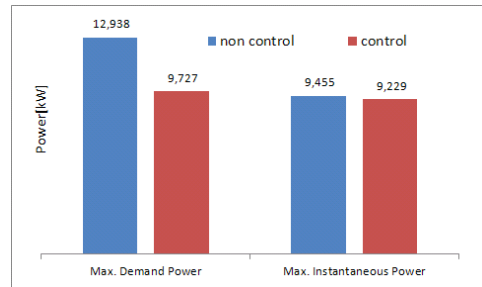


그림 8. 최대수요전력 및 최대순시전력 비교  
Fig. 8 Comparison of demand power and maximum instantaneous power

표 3의 결과는 전압이 불균형할 경우 상대적으로 높은 변전소에서 멀리까지 전력을 전달해야 하므로 선로 손실이 늘어남을 추정할 수 있다.

표 3. Comparison of loss  
Table 3. 손실 비교

	Loss[kW]
Non control	228
Control	220

#### IV. 결 론

본 논문에서는 도시철도 DC급전시스템에서 수전전압의 변동으로 생기는 최대수요전력을 제어하기 위한 새로운 방안을 제시하였다. 제안된 방법은 변전소의 변압기에 OLTC를 설치하여 운영하는 것으로 수전전압의 변동에 반응하여 전압을 안정화 시키는 것이다.

제안된 방법의 실험을 위해 OLTC는 페이저 모델로서 전류원으로 등가 모델링 한 후 Matlab을 통해서 시뮬레이션을 수행하였다. 실험을 통해 전압안정화를 통해 최대수요전력을 25% 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 간단한 탭제어를 통해서 전력제어를 할 수 있는 범위가 넓게 나타남을 확인 하였다. 수전전압을 이웃한 변전소에 비해 상대적으로 낮추면 극단적으로는 소비전력을 “0”으로 만들 수도 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 부하량을 고정한 상태에서 수전전압에 반응하는 제어를 통해 최대수요전력의 제어를 하였지만 실제 모델에서는 부하의 변동도 고려한 추가 연구가 필요하다. 부하의 변동에 따라 OLTC를 제어한다면 운영상에 발생하는 이벤트성 최대전력증가 상황에서 유연하게 대처할 수 있으리라 판단되어진다.

#### References

- [1] J. Choi and H. Yun, "A Comparative Analysis on the Operating System of Urban Railway & Conventional · High speed Railway," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 8, 2015, pp. 953-958.
- [2] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles" *Conf. of the Power Electronics and Applications on IEEE*, Aalborg, Denmark, Sept., 2007.
- [3] Y. Ko, "A Study on the Superconductivity Energy Storage Basic Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 6, 2015, pp. 691-698.
- [4] Y. Ko, "A Study on the Application Cases Analysis of ESS(Energy Storage System) to Electric Power System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11,

no. 1, 2016, pp. 53-58.

- [5] H. Kim and O. Kwon, "Peak Power Optimization for Metro Railway using by Source Impedance Control," *Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 6, 2014, pp. 841-849.
- [6] C. Hn, "A Study on Effects of Energy Saving by Applying Energy Storage System," *J. of the Korean Society for Railway*, vol. 12, no. 4, 2009, pp. 582-589.
- [7] K. Kim and S. Oh, "A model and approaches for smoothing peaks of traction energy in time tabling," *J. of the Korean Society for Railway*, vol. 12, no. 6, 2009, pp. 1018-1023.
- [8] S. Ge and T. Chung, "Optimal active power flow incorporating power flow control needs in flexible AC transmission systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 14, no 2, 1999, pp. 738-744.
- [9] K. Muttaqi, A. Le, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, "A coordinated voltage control approach for coordination of OLTC, voltage regulator, and DG to regulate voltage in a distribution feeder," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 51, no. 2, 2015, pp. 1239-1248.
- [10] Y. Cai, M. Irving, and S. Case, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking," *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 5, 1995, pp. 445-452.

#### 저자 소개



#### 김한수(Han-Soo Kim)

2000년 강원대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2002년 강원대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2015년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2005년 ~ 현재 인천교통공사 근무

※ 관심분야 : 철도 전력망, 스마트 그리드