

도시철도 변전소 단위구간의 전력사용 실태 및 피크제어용 BESS 도입에 따른 경제성 분석

(A Study on Comparative Analysis of Power Consumption Characteristics and the
revulsion of investment on the application of a BESS in Subway Substation)

정현기* · 김세동 · 김재철**

(Hyun-Ki Jung · Se-Dong Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract

This paper shows a reasonable demand power, that was made by the systematic and statistical way considering actual conditions, such as investigated transformer capacity and peak power for the last 6 years of subway substation customer as to AMR. In this dissertation, it is necessary to analyze the key features and general trend from the investigated data. It made an analysis of the feature parameters, such as average, standard deviation, median, maximum, minimum and thus it was carried by the linear and nonlinear regression analysis. And we studied on the application of a BESS. Analysis showed that the revulsion of capital is about 3 years and 4 months.

Key Words : Power Consumption, Contract Power Conversion Factor, BESS, Subway Substation

1. 서 론

도시철도 변전소는 국토교통부의 『도시철도시설 안전기준에 관한 규칙』 및 『도시철도시설 표준』에 따라 전력공급사업자로부터 직접 수전을 원칙으로 하며, 수

전용량은 부하설비의 종류와 용량, 운전특성 등을 고려하여 결정하고, 또한 수송수요를 감안하여 설비용량을 산정하여야 한다. 그리고 이를 바탕으로 전력공급사업자와 전기사용에 관한 계약전력을 도시철도 변전소 단위별로 결정하게 된다[1-2].

도시철도는 전동열차와 같은 대용량의 이동형 전력 부하를 비롯하여 신호·통신·역무자동화·승강장 안전문 등 열차운행관련 전력부하와 정거장내의 조명 및 동력설비 등으로 구성되어 있어 합리적인 예상 설비용량 산정 및 계약전력 결정은 매우 중요하다. 예상되는 최대사용전력보다 설비용량을 크게 하거나 계약전력을 높이면 변압기에서 발생하는 손실뿐만 아니라 전력공급사업자의 송배전선로 구축비용 증가 및 전력 손실 발생은 물론, 크게는 국가 발전설비용량 증설 등

* 주저자 : 서울메트로 전기팀장
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
* Main author : Head of Electricity team, Seoul Metro
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-7961
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 11일
1차심사 : 2014년 3월 19일
심사완료 : 2014년 4월 22일

을 고려하여야만 하므로 국가적으로나 도시철도 운영 측면에서 볼 때 매우 불합리하다. 그러므로 실제 도시철도에서 사용하고 있는 소비전력 패턴과 최대수요(Peak)전력을 토대로 도시철도의 특성, 부하의 용도 등을 고려하여 계약전력을 합리적으로 결정할 필요가 있다[3,5].

따라서 본 연구에서는 서울지하철 2호선의 변전소 1개소를 모델 변전소로 선정하고, 자동원격검침시스템(AMR, Automatic Meter Reading)[4] 자료를 통해 모델 변전소의 계약전력과 최근 6년 동안의 최대수요전력 및 전력사용량 등을 조사 검토하였다. 또한 이를 토대로 도시철도 변전소에 피크제어용 에너지저장시스템(BESS, Battery Energy Storage System)을 도입할 경우에 대한 경제성을 분석하고자 한다.

2. 변압기최대이용률 및 부하곡선 고찰

2.1 변압기최대이용률

변압기최대이용률은 도시철도 변전소에 설치 보유하고 있는 변압기 시설용량에 대한 최대수요전력과의 비를 말한다. 변압기최대이용률이 낮다는 것은 최대 부하가 변압기 용량에 크게 못 미치는 것으로 변전설비 이용 면에서 매우 비효율적이며, 설치한 전력용 변압기의 과다 용량이 지적된다.

본 연구에서는 전동열차를 운행하고 있는 상황에서 총 부하 설비용량의 추정에 대한 신뢰도가 매우 낮아 수용률·부동률에 대한 실태를 정확하게 분석할 수는 없으나, 변압기최대이용률은 도시철도의 전력소비특성에 대한 정보를 정확하게 취득할 수 있고, 변압기최대이용률의 파라미터는 적정한 전력용변압기 용량 산정에 매우 중요하며, 계약전력 환산율의 특성 이해에도 매우 중요한 변수가 된다[4].

2.2 부하곡선

부하의 시간적 변동 상황을 나타내는 곡선을 부하곡

선이라 한다. 부하곡선은 부하의 종류에 따라 모양이 다르며, 부하의 특성을 나타내는 기본적인 요소이다. 부하곡선은 기준으로 잡는 기간에 따라 1일간의 부하전력 변화를 나타내는 일부하곡선, 1개월간의 부하전력 변화를 나타내는 월부하곡선 등이 있다. 본 연구에서는 최대수요전력이 발생한 1일의 부하곡선을 분석하였으며, 이 부하곡선을 토대로 피크전력 담당부하를 분석할 수가 있고, 또한 BESS의 용량을 결정하는데 중요한 자료로 활용한다[3].

3. 조사 수용가의 전기설비 현황

서울지하철 도심구간의 전력공급을 담당하고 있는 모델 변전소와 인근변전소의 계통도를 간단히 나타내면 그림 1과 같다. 도시철도의 전력공급계통은 『도시철도건설규칙』에 따라 해당 도시철도를 관할하는 도시철도 변전소로부터 공급받는 것을 원칙으로 한다. 따라서 전동열차에 전력을 공급하는 전차선로는 DC 1,500V 가공선식으로 하고, 정거장에 공급하는 고압 배전선로는 AC 3상 6.6kV 또는 22.9kV로 하며, 정거장내 조명 및 동력시설은 AC 단상 220V 또는 3상 380V로 한다[5-6].

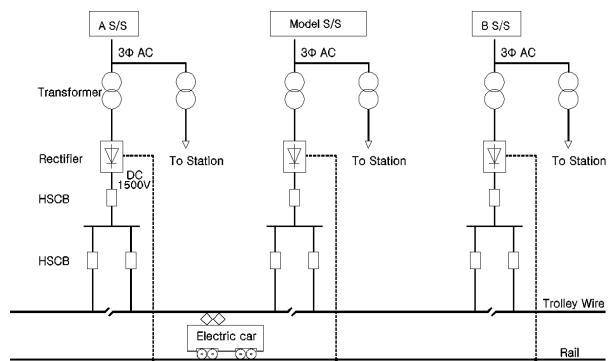


그림 1. 모델 변전소의 전원 공급계통도
Fig. 1. Diagram of power supply system for model substation

도시철도 전기설비는 고장 시 고장의 범위를 한정하고 고장전류를 차단할 수 있어야 하며, 단전이 필요한 작업을 하는 경우 단전의 범위를 한정할 수 있

도록 계통별 및 구간별로 분리할 수 있어야 한다. 그리고 전차선로의 본선 구간에는 상행선·하행선별 및 방면별 분리 급전방식으로 전력을 공급하여야 한다.

또한 전동열차 운행에 직접 영향을 미치는 전기설비에 고장이 발생한 경우에는 정상 부분으로 과급되지 아니하도록 고장 부분을 전기적으로 자동 분리할 수 있도록 하여야 하며, 예비설비를 사용하여 정상적으로 운용할 수 있어야 한다. 도시철도에서 변전소의 위치를 선정할 때에는 급전구간의 부하 중심에 가능한 가깝고, 수전선로의 길이가 최소화될 수 있도록 전력공급사업자 변전소와 가까워야 한다. 변전소의 간격은 전동열차의 운행을 위한 전차선 전압의 최저한도 값을 유지할 수 있도록 선정하여야 한다.

도시철도 변전소의 용량은 부하설비의 크기, 운전 특성 및 전압강하와 수송 수요 등을 고려하여 결정하여야 하고, 도시철도 변전소의 정류기는 정류기 자체의 고장 시 또는 인접 변전소의 고장 시 전기를 연장하여 공급해야 하는 상황을 고려하여 상시 운영하는 2대와 예비로 운영하는 1대로 구성하여야 하지만, 변전시설에 미치는 부하의 정도를 고려하여 정류설비의 계통 구성 및 정류기의 수량을 조정할 수 있다고 『도시철도시설 안전기준에 관한 규칙』에서 정하고 있다[1,6].

따라서 도시철도 변전소는 3km~3.5km 간격으로 배치되어 있으며, 전동열차 및 정거장에 전력을 공급하는 설비로 원활한 이용과 신속, 정확한 제어 및 전구간의 변전소, 각 정거장의 전기실을 전력관제에서 감시제어 데이터 수집시스템(SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition)을 통해 원격지에서 제어 및 감시할 수 있도록 되어 있다. 도시철도의 전력공급체계는 보통 3~4개 정거장당 1개소의 도시철도 변전소와 1정거장당 1개소의 전기실로 구성되어 있다. 또한 각 도시철도 변전소와 변전소 사이에는 AC 22.9kV를 서로 전력계통을 연락하는 연락 송전선로를, 각 정거장 전기실과 전기실 사이에는 연락 고압배전선로를 설치하여 상호교환 급전이 가능하도록 전력계통을 구성하고 있다[1-2,6].

4. 조사 수용가의 회귀분석을 통한 전력사용 특성 분석

4.1 최대수요전력의 추이 분석

표 1은 모델 변전소에서 6년 동안에 발생한 월별 최대수요전력의 발생현황을 나타낸 것이며, 그림 2는 모델 변전소 단위구간의 6년간 최대수요전력의 변화추이에 대한 산점도와 회귀 모형을 나타낸 것이다.

표 1. 도시철도 변전소 최대수요전력의 적용실태
Table 1. The present states of peak power in subway substation

Year	Peak power (kW)	Occurrence month
2013	9,034	August
2012	8,968	August
2011	8,562	September
2010	8,570	August
2009	10,535	September
2008	8,884	June

1년 중 최대수요전력이 하절기에 발생하는 것으로 나타났다. 과거 6년 중 2009년도에 가장 높게 발생한 것으로 나타났으며, 2008년도에는 6월에 발생하였고, 통례적으로는 8월과 9월에 많이 발생한 것으로 조사되었다.

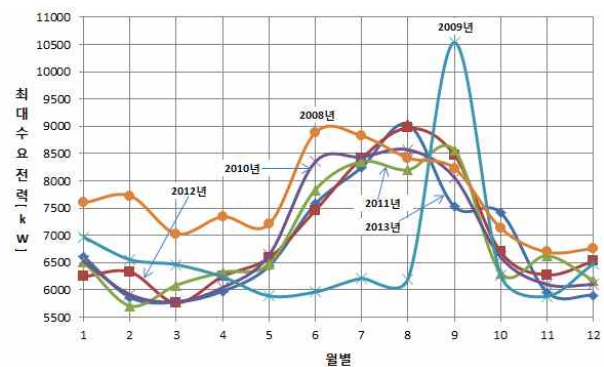


그림 2. 최대수요전력의 산점도와 회귀모형
Fig. 2. Scatter plot of peak power and linear regression model

이와 같이 하절기에 전력수요가 가장 높게 발생하는 요인으로는 퇴근시간대에 가장 도시철도의 수송간격이 짧아서 부하가 가장 많이 걸리게 될 뿐만 아니라 냉방부하가 원인인 것으로 지적되고 있다[7].

하절기에 전동열차 승객으로부터 민원이 냉방에 따른 불편사항인 것으로 서울지하철 1~4호선을 운영하는 서울메트로의 『2013년 1234콜센터 운영결과』에 의하면 전동열차 운전분야 전체 고객민원의 88.6%가 냉방민원으로 나타났다. 이는 때 이른 무더위와 수송승객 증가 등의 영향으로 이에 따른 민원해결을 위해 냉방기 가동이 많아지므로 도시철도에서 하절기 전력수요가 폭증되는 것으로 판단된다[8].

4.2 변압기최대이용률의 실태 분석

표 2는 조사 수용가의 변압기최대이용률의 발생현황을 나타낸 것이며, 그림 3은 조사 수용가의 변압기 최대이용률에 대한 산점도와 회귀모형을 나타낸 것이다. 6년간 변압기최대이용률의 실태를 살펴보면 40% 미만을 유지하고 있는 것으로 분석되며, 고객이 보유하고 있는 전력용 변압기의 용량에 여유율이 높은 것으로 추정된다.

조사 수용가의 변압기뱅크 구성은 도시철도 전동차 전력공급용으로 4대, 정거장의 역사건물 부하 공급용 2대로 구성되어 있으며, 최대수요전력의 감소를 위한 최적의 전기설비 관리가 이루어지고 있는 것으로 파악된다.

표 2. 변압기최대이용률의 실태
Table 2. The present states of a maximum utilization factor of transformer

Year	Peak power (kW)	Installed capacity (kVA)	Rate (%)
2013	9,034	28,080	32.2
2012	8,968	28,080	32.0
2011	8,562	28,080	30.5
2010	8,570	28,080	30.6
2009	10,535	28,080	37.6
2008	8,884	28,080	31.7



그림 3. 변압기최대이용률의 산점도와 회귀모형
Fig. 3. Scatter plot of a maximum utilization factor of transformer and linear regression model

4.3 최대수요전력 발생일의 일부하곡선 분석

그림 4는 최대수요전력이 발생한 2013년 8월 9일의 하루 동안 시간대별 최대수요전력 변화를 나타낸 것이다. 일부하곡선을 살펴보면 오전 출근시간대에 최대수요가 걸리고 있었고, 특히 저녁 퇴근시간대에 연간 최대수요가 발생한 것으로 나타났다.

계절별 최대수요전력의 발생 크기에는 차이가 있지만, 주중에는 하루에 출근과 퇴근시간대에 최대수요가 발생하는 경향을 보이고 있다. 퇴근시간대의 도시철도 운행간격이 가장 좁게 운행될 뿐만 아니라 도시철도 내의 냉방부하가 매우 크게 걸리는 것으로 분석된다. 따라서 이와 같은 피크시간대의 적용할 수 있는 BESS의 도입은 매우 유용할 것으로 판단된다.

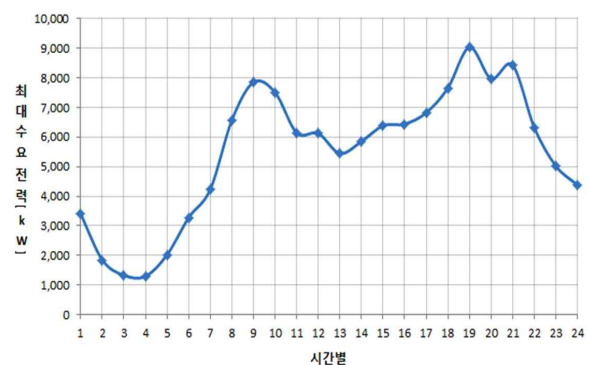


그림 4. 2013년도 최대수요전력 발생일의 일부하곡선
Fig. 4. Day load curve of peak day in 2013

5. 피크제어용 BESS 도입을 위한 경제성 분석

도시철도 변전소 단위구간의 부하 특성상 BESS를 도입할 경우 피크전력 저감 효과가 클 것으로 예측되어, 변전소 내 설치 공간, 부하특성 등을 고려하여 그림 5에서와 같이 도시철도 변전소의 DC 1,500V 급전 계통의 직류고속도차단기(HSCB, High speed circuit breaker) 2차 측에 인터록하여 설치한다.

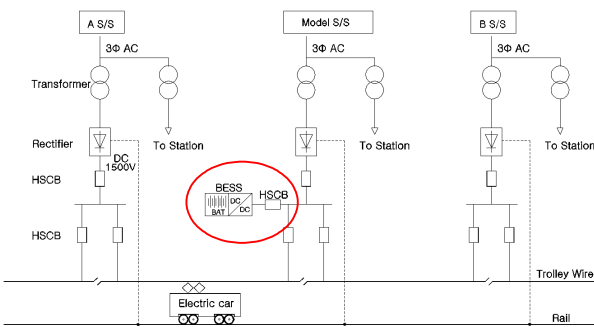


그림 5. 모델 변전소의 BESS 설치도
Fig. 5. Diagram of BESS for model substation

그림 6은 모델 변전소에 BESS 도입을 위하여 한국 전력공사의 i-smart 데이터[10]를 통해 2013년도 피크 전력을 조사하여 일일 피크전력의 패턴을 분석한 결과, 피크제어를 통한 목표 전력과 충방전 전력량을 그래프를 나타낸 것으로 약 500kWh를 심야에 충전하고 피크전력시 방전하여 655kW를 저감할 수 있도록 계획한 것이다.

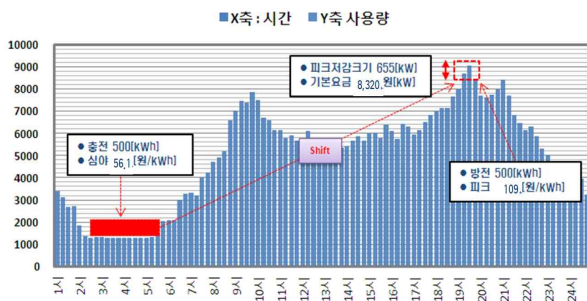


그림 6. BESS 도입을 위한 피크전력 패턴분석 그래프
Fig. 6. Graph to analyze the pattern of peak power for introduction of BESS

따라서 모델 변전소의 피크전력을 제어하기 위한 목표 전력과 BESS의 설계 사양은 표 3과 같으며, 전력 변환장치(PCS, Power Conditioning System) 및 배터리의 용량은 장치 효율 등을 고려하여 산정한다[9].

표 3. 피크제어를 위한 목표 전력과 BESS의 설계 사양

Table 3. Design specifications of BESS and the target power for peak control

Item	Parameter	Value
BESS Capacity	PCS	1,000kW
	Battery(Eff.)	694kWh
	Battery Capacity(Install)	740kWh
Power	Max. Peak power①	9,034kW(Based on 2013)
	Peak cut point(Real)②	8,379kW
	Peak cut point(Eff.)	8,145kW
	Cut power	655kW
	Capacity	500kWh

표 4. 투자회수 분석

Table 4. Analysis of the revulsion of investment

Item	Parameter	Value
Basic rate	Peak power Table 3. ①-②	655kW
	Basic rate unit cost③	8,320won/kWh
	Annual savings ③×(①-②)×12months	65,395,000won
Electric charges Total	Summer (3 months) savings	2,512,000won
	Medium term (5 months) savings	4,069,000won
	Winter (4 months) savings	6,216,000won
	Annual savings	12,797,000won
	Power-based funding	2,893,000won
	VAT	7,819,000won
	Savings of electricity charges	88,904,000won
Investment cost	Actual investment amount consider government funding of 75	350,250,000won
	Payback period	3.94year

상기의 조건을 고려하여 모델 변전소의 2014년도 전기요금[10] 적용기준인 『산업용전력(을) 고압A 선택2』를 준용하여 BESS 투자비와 전기요금 절감금액을 분석한 결과는 표 4와 같다.

국고지원 비율이 현재의 『스마트그리드 보급사업』 기준 75%로 지원되었을 경우, 최대 회수기간은 3.94년으로 분석되었으며, 또한 매년 5%의 전기요금 인상분을 고려할 경우에는 예상 회수기간이 약 3.6년으로 단축될 것으로 분석되었다.

6. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 서울지하철 2호선의 모델 변전소를 대상으로 전력사용 특성을 고려하여 회귀분석을 통해 특징파라미터를 분석하고, 그 경향을 확인하였으며, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실태조사 결과, 하절기에 최대수요전력이 발생하고 있었고, 도시철도 변전소의 변압기최대이용률이 30%~38% 분포되어 있었다. 전체적으로 전력용변압기의 여유가 높은 것으로 분석된다.
- 2) 최대수요전력 발생일의 일부하곡선을 분석한 결과, 출근과 퇴근시간대에 최대수요가 발생하는 경향을 보이고 있다. 퇴근시간대의 도시철도 운행간격이 가장 좁게 운행될 뿐만 아니라 도시철도 내의 냉방부하가 매우 크게 걸리는 것으로 분석된다.
- 3) 따라서 이와 같은 피크시간대의 적용할 수 있는 에너지저장장치의 도입 적용은 매우 유용할 것으로 판단되어 피크제어를 위한 목표 전력과 BESS 설계 사양을 결정하고, BESS 설치 투자비와 전기요금 절감금액을 분석한 결과, 최대 회수기간은 3.94년으로 분석되었으며, 전기요금 인상(매년 5%정도)을 고려할 경우, 예상 회수기간이 약 3.6년으로 단축될 것으로 분석되었다.

향후에는 도시철도 변전소에서 피크제어용 BESS 도입에 따른 관리비·감각상각비 등의 비용과 전동차 회생전력을 이용한 충전 효과 등의 편익을 고려한 심층적 분석 및 운전 특성 등에 대한 연구도 필히 진행되어야 한다.

References

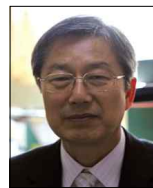
- [1] MOLIT, "Rules concerning urban rail safety standards", 2013.
- [2] MOLIT, "Urban Rail Standards", 2013.
- [3] Se-Dong Kim, Yong-Peel Wang, "A Study on Characteristics for a Contract Power Conversion Factor and Analysis of a Maximum Utilization Factor of Transformer in General Customers", KIIEE, Vol.22, No.5, pp.80-85, 2008.
- [4] "The actual data of power utilization for subway substation customer"(AMR datas).
- [5] Hyun-Ki Jung, Se-Dong Kim, Hui-Seok Chai, Jae-Chul Kim, "Recommended Practice for a Reasonable Power Density in Subway-Stations", KIIEE, Vol.28, No.2, 2014.
- [6] MOLIT, "Rules of the urban rail construction", 2013.
- [7] Seoul Metro, "Train timetables", 2014.
- [8] Seoul Metro, "In 2013, A Center for operational results", 2013.
- [9] MOTIE, "Supply Policy of ESS", 2013.11.28.
- [10] KEPCO, "http://pccs.kepco.co.kr" & http://cyber.kepco.co.kr

◇ 저자소개 ◇



정현기(鄭賢基)

1958년 2월 8일생. 2006년 서울시립대학교 산업대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2009년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1983년~현재 서울메트로 전기팀장. 2006년~현재 국토교통부 철도 기술전문위원.



김세동(金世東)

1956년 3월 3일생. 1981년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 2000년 서울시립대학교 대학원 전자전기공학부 졸업(박사). 현재 두원공과대학교 전기과 교수. 본 학회 부회장.



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대학교 전기공학과 교수. 본 학회 회장.