

# 도시철도 스마트그리드(Smart Grid) 구축



**정현기**  
서울메트로 전기팀장  
T.02.6110.5440  
hyunki@seoulmetro.co.kr



**장중덕**  
(주)우진산전 상무  
T.02.2103.8620  
jdjangda@hanmail.net

## 1. 서론

서울메트로는 금년 8.15자로 개통 40주년을 맞이하였다. 개통이후 크고 작은 유지관리와 개량사업 등을 통해 시스템의 많은 변화가 있었으며, 그 중에 전기분야에서 가장 큰 변화는 2012년부터 시작된 스마트그리드 구축이다. 그 첫번째로 전동차 회생전력 활용시스템을 전철변전소 2개소에 그리고 피크전력용 에너지저장시스템을 전철변전소 1개소에 구축하여 운영하고 있다. 그리고 4호선 전체에 스마트그리드 구축하는 사업을 2017년까지 완료하기 위해 현재 추진 중에 있으며, 또한 차량기지에는 신재생에너지 시스템, EMS, BESS 등을 설치하여 에너지를 자립화하는 차량기지 마이크로그리드(Micro Grid) 구축계획을 수립하고 있다.

이러한 노력은 정부의 스마트그리드 정책과 서울시의 원전하나 줄이기 시책에 부응하고, 나아가 “도시철도 최고의 기업, 일등 METRO”로서 도시철도 기술을 선도해야 하는 소명뿐 아니라, 경영수지 개선을 위해서 급격히 상승하는 전기요금을 저감해야하는 필요성에 따른 것이다.

도시철도에 적용되는 전기요금은 2011년 8월 이후 총 3차례에 걸쳐 1년간 20.3%가 인상되었고, 2012.11.1자로 산업용전력(갑)에서 산업용전력(을)로 종별 변경에 따라 23%가 인상된 후 2013.1.14.자로 다시 4.4%가 추가 인상되는 등 가파르게 오르고 있다. 서울메트로는 국내 최초이며 최대의 도시철도 운영기관으로서 연간 전기요금이 900억 원 규모로 운수수익의 10%를 넘어서고 있어 경영악화의 중요한 요인이 되고 있다. 또한 정부는 수차례 원가이하의

전기요금을 현실화한다는 발표가 있었을 뿐 아니라 지난 7.17. 산업통상자원부에서 발표한 “기후변화 대응 에너지 신사업창출방안”에 따르면 발전부문의 탄소배출권거래비용을 전기요금에 반영할 것으로 되어 있어 전기요금의 지속적인 상승은 불가피해 보인다. 이제 저렴한 전기요금의 시대는 끝났으며 도시철도에서도 전기요금 저감방안을 강구하는 것은 경영수지 개선의 차원이 아니라 생존의 문제가 될 날이 멀지않았다.

따라서 에너지효율화사업인 스마트그리드 구축사업은 국가적 측면에서 고유가가 지속되고 자원 민족주의가 강화됨에 따라 에너지 자립 및 에너지 저소비 사회로의 전환이 지속가능한 성장을 위해서는 필수적인 사업이듯이 도시철도분야에서도 스마트그리드 구축은 운영기관의 경영수지 개선과 경쟁력 강화를 위한 필수사업이라 할 수 있다.

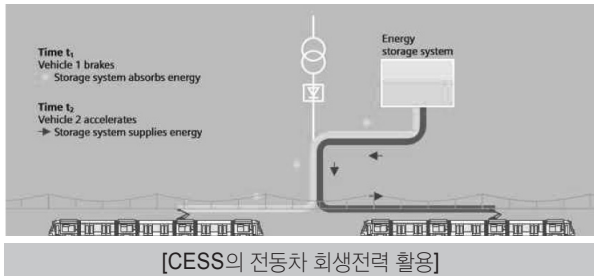
## 2. 도시철도의 스마트그리드 기술

### 2.1 도시철도의 ESS

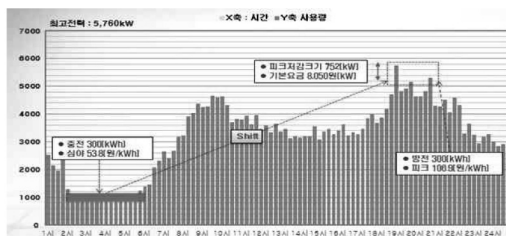
도시철도 역사에는 일반적으로 빌딩이나, 상가시설 등과 같이 공조, 조명, 냉난방, 엘리베이터, 에스컬레이터 등의 전력부하설비가 있으며, 차량기지도 공장과 같은 시설들이 있다. 따라서 서울메트로와 같은 도시철도 운영기관은 일반 전력수용가와 같이 지능형 소비자로서 에너지 저장시스템 ESS(Energy Storage System)와 에너지관리시스템 EMS(Energy Management System) 등 지능형 전력망 SG(Smart Grid)의 핵심 장치를 설치하여 전기에너지 절감

은 물론 피크전력 감축, 그리고 전력품질 개선 등을 통해 효율적이고 합리적인 에너지 이용을 추구하고 있다. 도시철도에 설치된 ESS는 일반적으로 다음 두 종류를 적용하고 있다.

첫째는 전동차 회생전력을 활용하기 위한 에너지저장시스템 CESS(Capacitor Energy Storage System)이다. 이는 전동차가 공기제동을 사용하지 않고 전기적으로 제동할 때 발생하는 회생에너지를 CESS에 충전했다가 출발할 때나 가속할 때 방전하여 사용하는 것이다. 이러한 CESS는 남은 전기에너지를 재활용하고 피크전력을 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 전차선로의 가선전압을 안정화 시키는데 효과가 있어 사고를 예방하고 전기기기의 수명을 연장시킬 것으로 기대된다.



둘째는 피크전력을 저감하기 위한 에너지저장시스템 BESS(Battery Energy Storage System)이다. 이는 전기요금 이 저렴한 심야시간대에 전기를 충전했다가 전기요금 이 고가인 피크시간대에 방전하여 피크전력을 저감함으로써 전기 기본요금을 저감하고 심야시간대와 피크시간대의 요금차이에 의한 차액을 절감하는 시스템으로 피크전력을 저감하는 패턴은 아래 그림과 같다.



[BESS의 Peak전력 저감 패턴]

## 2.2 도시철도 RSG 구축

도시철도 스마트그리드 RSG(Railway Smart Grid)은 노선 전체의 에너지관리를 총괄 제어하는 장치인 REMS(Railway Energy Management System)와 전동차의 에너지관리시스템 TEMS(Train Energy Management System), 역사의 에너지저장시스템 SEMS(Station Energy Management System), 그리고 차량기지의 에너지관리시스템 DEMS(Depot Energy Management System)로 구분할 수 있다.

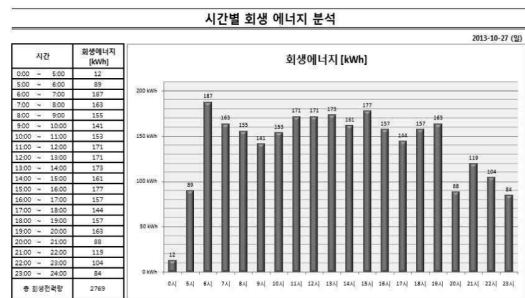
TEMS는 REMS와 연계하여 전동차에 설치된 조명, 냉방장치, 난방장치, 견인장치, 제동장치 등을 효율적으로 운영하여 과잉전력 소비를 없애고 쾌적한 승객환경을 추구하고 있으며, SEMS는 해당변전소의 AMI 그리고 REMS와 연계하여 역사 및 선로에 설치된 조명, 공조설비, 냉난방장치, 엘리베이터, 에스컬레이터 등의 부하설비를 효율적으로 감시·제어하여 피크전력과 과잉소비전력을 저감한다.

DEMS는 REMS와 별개로 동작되며, 신재생에너지(태양광, 태양열, 지열 등)과 부하설비(조명, 공조설비, 냉난방장치 등) 및 피크저감용 ESS를 총괄하여 감시·제어하여 피크전력과 에너지사용량을 절감할 뿐 아니라 에너지자립을 위한 마이크로그리드(Micro Grid)를 추구하고 있다.

## 3. 서울메트로 ESS 구축 사례

### 3.1 CESS 설치 및 분석

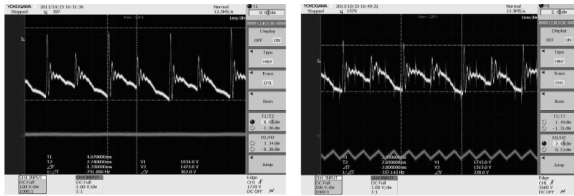
전동차 운행시 회생제동으로 인해 발생된 잉여 회생전력을 재활용하는 전동차 회생에너지저장시스템 CESS를 에너지관리공단에서 주관하는 2012년, 2013년도 지역에



[2호선 서초변전소의 시간대별 회생에너지 분석]

너지절약사업을 통해 2호선 서초변전소와 4호선 쌍문변전소에 각각 수퍼캐패시터를 이용한 CESS를 설치하여 현재 운영 중에 있다. 재활용되는 전기에너지량은 2호선 서초변전소의 경우 일평균 2,700kWh로 연간 985MWh, 1년에 약 1.2억원의 전기요금을 절약하고 있으며, 시간대별 회생에너지량을 분석하면 위에 그림과 같다.

CESS의 전차선 가선전압의 안정화 정도는 설치 전에는 전압의 변동범위가 1,380 ~ 1,840V이었으나, 설치 후에는 1,510 ~ 1,745V로 약 200V 정도로 안정되어 약13%의 전력품질이 개선되는 효과가 있음이 확인되었으며, 이에 전기장치의 수명연장과 이상고장방지이나 전동차 브레이크슈의 소모량 저감과 그에 따른 터널내의 공기질이 개선되는 등의 간접효과도 기대되고 있다.



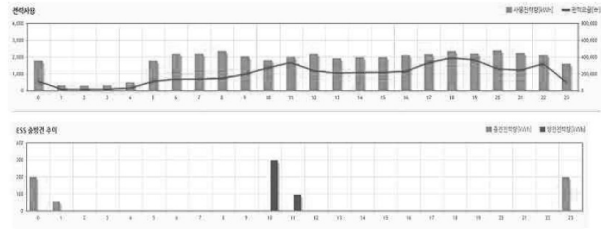
[CESS의 설치 전·후 가선전압 변동범위]

### 3.2 BESS의 설치 및 분석

피크전력저감용 BESS의 경우, 도시철도변전소로서는 국내·외 최초로 한국스마트그리드사업단에서 주관하는 2013년 스마트그리드보급사업을 통해 2호선 을지로3가변전소 DC모선에 회생에너지도 활용할 수 있는 복합형 BESS를 설치하여 현재 운영 중에 있다. BESS의 운영모드는 Schedule Mode, Peak-Cut Mode, Regenerative Energy Mode 등을 계절별, 요일별로 달리 운영하여 전기요금 저감을 확대하고 있다.

#### 3.2.1 Schedule Mode

Schedule Mode는 연간 전기요금의 기준이 되는 피크전력의 발생할 우려가 없는 달과 전동차운행전력이 적은 토요일, 일요일, 공휴일에 적용하는 모드로 전기요금이 가장 저렴(56.1원/kWh)할 때 충전하여 가장 비싼(191.1원) 요금 시간대에 사용함으로써 1kWh에 수송가는 135원의 전기요금을 절약하고 국가는 피크시간대에 공급하는 LNG발전

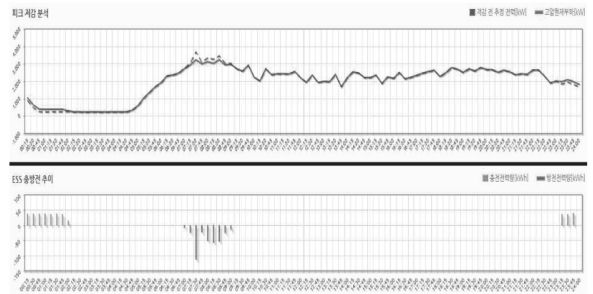


[ESS의 Schedule Mode 동작]

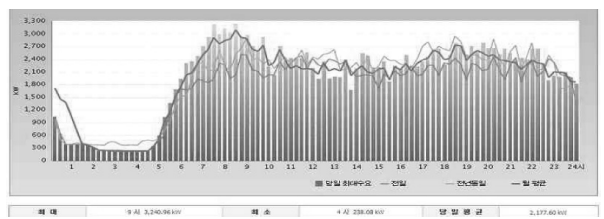
(210원/kWh)을 줄인 것으로 할 경우 약75원/kWh의 발전단가를 줄인 효과를 이룰 수 Mode이다

#### 3.2.2 Peak Cut Mode

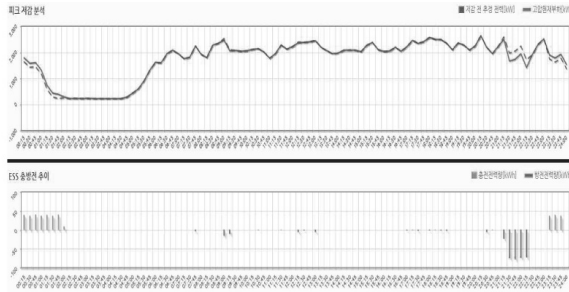
Peak-Cut Mode는 발전단가가 저렴한 시간에 충전하여 설정된 Peak전력 값에 도달하면 방전·사용하여 최대전력을 저감함으로써 기본요금을 저감하는 Mode이다. 아래의 그림은 최대전력을 3,180kW로 설정하고 운영한 결과를 한전의 전기요금 홈페이지인 i-Smart로 확인한 결과, 최대전력은 3,240kW로 ESS와 약 1.8%의 차이가 있으나, 측정오차 등을 고려할 때 정상적으로 Peak Cut이 이루어진 것으로 보여주고 있다.



[EMS에서 확인한 Peak-Cut Mode]



[한전 i-Smart에서 확인한 Peak Cut Mode]

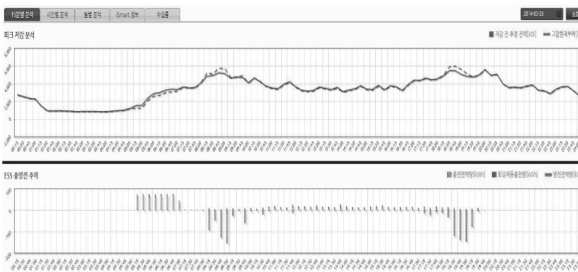


[부하가 최대전력 설정 값에 도달하지 않은 경우의 Peak Cut Mode 동작]

Peak Cut Mode에서 부하가 설정한 최대전력에 도달하지 않거나, Peak Cut하고 남은 충전량은 최대전력이 발생하지 않는 시간대인 22 ~ 23시(중 부하시간, 109원/kWh)에 방전하여 53원/kWh를 저감하도록 동작하고 있다.

### 3.2.3 Regenerative Energy Mode

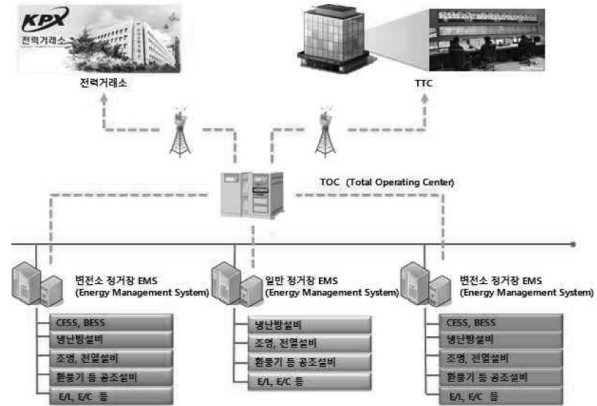
Regenerative Energy Mode는 세계 최초로 구현한 기능으로 전동차에서 발생하는 잉여 회생전력을 무료(0원)로 충전했다가 가장 비싼(191.1원) 요금시간대에 사용하거나 Peak전력 값에 도달할 때에 사용하여 최대전력을 저감하는 Mode로 DC급전 도시철도의 기술적인 상징성이 크다고 생각된다. 이러한 세 가지의 모드로 설계된 ESS는 부하 사용 Pattern의 변경이나, 정부의 요금체계가 변경되어도 운영모드의 조합으로 전기요금 저감을 최적화 할 수 있을 것으로 예상하고 있다.



[잉여 회생전력을 활용한 Peak Cut Mode 동작]

## 4. 도시철도 지능형 전력망(RSG) 구축

RSG(Railway Smart Grid) 구축사업은 전동차회생전력



[Railway Smart Grid 구성도]

용 CESS와 피크전력저감용 BESS의 구축경험을 바탕으로 서울지하철 4호선 26개 정거장에 EMS를 구축하고 장치 설치가 가능한 전철변전소 4개소에 ESS를 설치하여 세계 최초로 도시철도 한 노선 전체를 스마트그리드 구축하는 사업이다.

국내외에 사례가 없는 사업으로 많은 시행착오와 어려움이 있을 것으로 예상되나, 국내에서는 도시철도의 에너지 효율향상과 경영수지 개선을 위하여 반드시 추진해야 하는 당위성이 있고 스마트그리드 기술은 해외 경쟁국과 차별할 수 있는 최신 기술로 도시철도사업의 수출경쟁력을 향상시킬 것으로 기대하고 있다.

산업통상자원부 자료에 따르면 EMS의 설치효과는 전기 부문만 분리하여 분석한 결과, 연간 평균 7~10%의 전기 절감이 가능하여 ESS를 포함한 4호선 스마트그리드 구축사업의 예상 B/C는 1.5로 사업의 타당성은 충분히 확보된 것으로 예상하고 있다.

| RSG 경제성 분석(전체) |                 |                    |              |
|----------------|-----------------|--------------------|--------------|
| B/C ratio      | 1.533           |                    |              |
| <b>비용요소</b>    | <b>편익요소</b>     | <b>RSG 구축 효과</b>   |              |
| 총 투자비          | 기본연도 전기요금 절감액   | 731백만원             | Peak 절감량     |
| 투자비율           | 계통Peak 발전소회피면적  | 137.18천/kW-year    | Peak 절감 동시율  |
|                | 송전설비 회피면적       | 98.524천/kW-year    | 연간에너지절감량     |
|                | 송전연손실           | 3.37%              | 4,704.638kWh |
| <b>경제성분석치표</b> | <b>CO2 편익</b>   |                    |              |
| 유전유지비율         | CO2배출계수         | 0.4714ton-CO2e/MWh |              |
| 물인출            | CO2 배출회계비용      | 24,962원/ton-CO2e   |              |
| 전기요금상승률        | <b>연료비절감 편익</b> |                    |              |
|                | LNG연료단가         | 140.23원/kWh        |              |

[Railway Smart Grid의 B/C분석]

## 5. 결론

본 고에서는 국내 최초의 도시철도로 금년 개통 40주년을 맞이한 서울메트로에서 경영개선을 위한 노력으로 전동차 회생에너지 활용 ESS 설치와 전기요금 저감을 위한 피크저감용 ESS & EMS 설치 등 스마트그리드 구축사례와 4호선 전체를 대상으로 스마트그리드를 구축하는 RSG 사업 등의 추진계획을 살펴보았다. 이러한 사업 추진은 정부의 스마트그리드사업 보조금 지원에 힘입은 것이다. 정부의 스마트그리드사업 추진은 기후변화 대응, 에너지 효율향상, 신 성장동력 창출을 배경으로 하고 있다. 정부에서는 수용가 자체적 설치 또는 사업자가 사업이 될 수 있도록 환경조성에 노력하고 있다. 그러나 아직은 원가이하의 전기요금과 핵심부품인 Battery 고가 등으로 정부의 보조금 없이는 수용가 자체적인 B/C는 1이하로 설치 타당성이 없는 것이 현실이다. 따라서 도시철도 운영기관은 공공기관으로 사업추진 담당자가 자체적으로 사업성이 없는 사업을 추진하기에는 실질적으로 불가능하다.

그러므로 정부의 스마트그리드 정책목표를 달성하고 도시철도사업의 경쟁력 향상을 위해서는 당분간은 국가 편익만큼은 정부에서는 보조해 주어야만 한다고 생각한다. 국고 보조금은 없애고 자체적으로 사업할 수 있는 환경이 이루어지지 않는 상황이 지속되면 어렵게 가꾸어온 초기 시장 활성화의 추진 원동력마저 사라질 것이 우려된다. ☹

### ♣ 참고문헌

1. 정현기, 김세동, 김재철(2014), “도시철도 변전소 단위구간의 전력사용 실태 및 피크저어용 BESS 도입에 따른 경제성 분석”, 한국조명·전기설비학회논문지, 제28권 제6호, pp.85-90
2. 정현기, 서석찬, 김병현, 권남홍(2013), “도시철도 급전시스템용 BESS에 관한 연구”, 한국철도학회학술발표대회논문집, pp.836-842
3. 정호성, 박영, 김형철(2010), “스마트그리드와 지능형 철도전력망” 한국철도학회철도저널 제13권 제6호, pp.41-48