

Power / Energy Track

# Optimal operation of energy storage systems considering forecasts and battery degradation

K Abdulla, J De Hoog, V Muenzel, F Suits, K Steer, A Wirth, S Halgamuge

IEEE Transactions on Smart Grid (2016)

# Contents

---

**01** Introduction

**02** Problem Statement

**03** ESS Operation Strategies

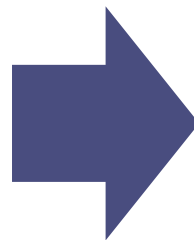
**04** Proposed Method

**05** Conclusion

# 01 Introduction

## Energy Storage System

ESS는 전력을 저장하고 필요할 때 공급하는 시스템이다.



- 재생에너지 연계
- 최대 전력 감소
- 전기요금 절감

# 01 Introduction

## ESS의 역할

ESS는 전력 공급과 수요의 균형을 맞추어 **전력망의 안정성**을 향상시킬 수 있다.

발전량이나 전력 수요에 갑작스러운 변동이 발생할 때 ESS는 빠르게 **충전**하거나 **방전**하여 전력 시스템을 안정화시킬 수 있다.



# 01 Introduction

---

## ESS 운영의 중요성

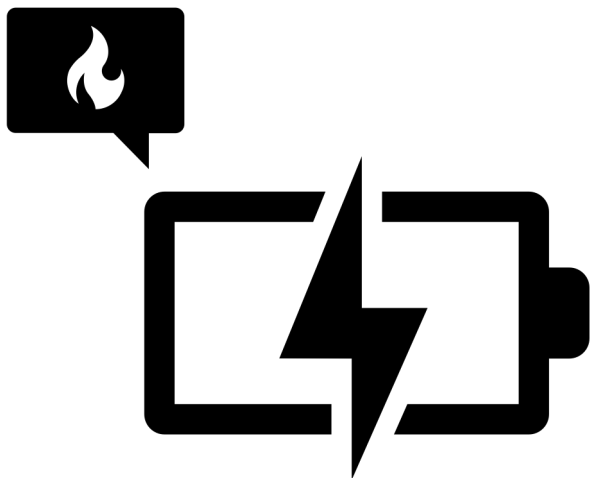
ESS는 단순히 설치하는 것만으로 끝나는 것이 아니라 어떻게 운영하느냐가 매우 중요하다.

배터리를 너무 자주 사용하면 배터리 수명이 빠르게 감소하고,  
반대로 너무 적게 사용하면 경제적인 이익을 충분히 얻을 수 없다.

따라서 적절한 운영 전략이 필요하다!

# 02 Problem Statement

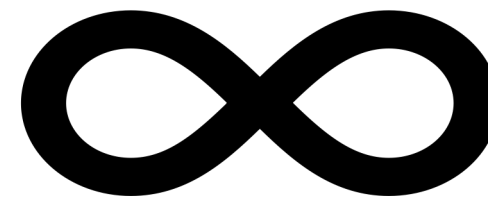
## 기존 연구의 문제점



배터리 열화 고려X



미래정보 정확성 가정



현실적이지 않은 시스템

# 03 ESS Operation Strategies

## BSP (Basic Set Point Strategy)

BSP는 가장 단순한 ESS 운영 방식이다.

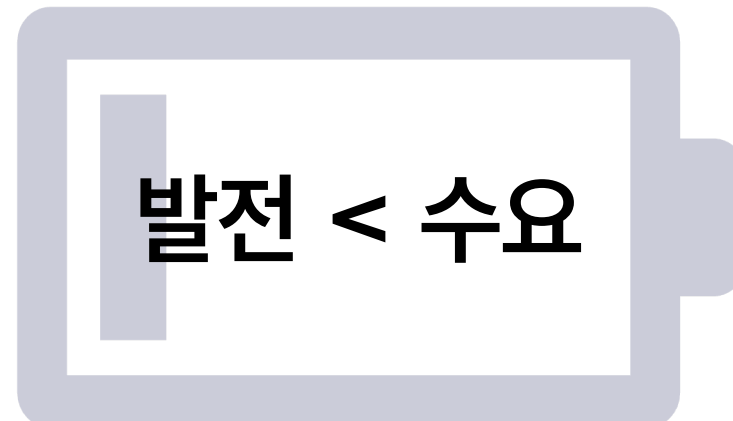
예를 들어 태양광 발전이 5kW이고 전력 수요가 3kW라면 남는 2kW를 배터리에 충전한다.

반대로 수요가 발전보다 많으면 배터리를 방전한다. 즉 **현재 상황만 보고 결정하는 방식이다.**

충전



방전



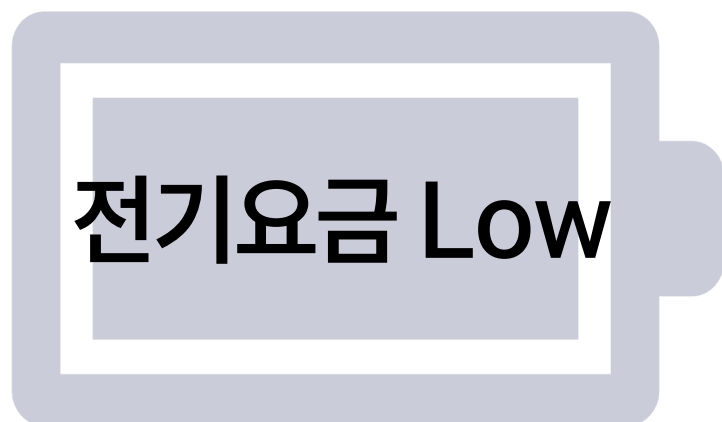
# 03 ESS Operation Strategies

## ASP (Advanced Set Point Strategy)

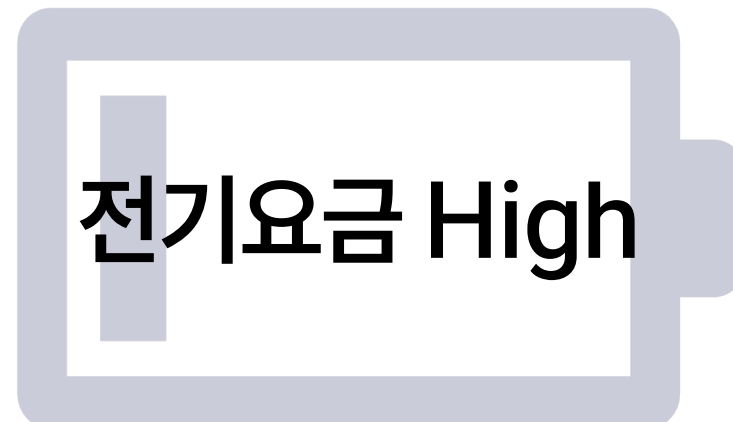
ASP는 전기요금이 낮은 시간에 배터리를 충전하고 전기요금이 높은 시간에 방전한다.

예를 들어 밤에는 전기요금이 낮고 낮에는 전기요금이 높은 경우 밤에 충전하고 낮에 방전하여 전기요금 차이를 이용해 이익을 얻는다.

충전



방전





# 03 ESS Operation Strategies

## SDP (Stochastic Dynamic Programming)

확률적 동적 계획법(SDP)은 미래의 **불확실한 전력 수요**와 **발전량**을 고려하여 ESS의 최적 운영을 결정한다.

시스템 상태를 배터리의 충전 상태  $q_t$ 로 정의하고, 의사결정 변수는 배터리 충방전량  $b_t$ 이다.

$$CTG_t(q_t) = \min_{b_t} \{E[STC_t(b_t)] + CTG_{t+1}(q_t - b_t)\}$$

이 식의 의미는 아주 직관적으로 보면 현재 시점에서 가능한 충방전 선택지들 중에서 **지금 당장 드는 기대 비용**과 **그 선택 이후 미래에 드는 비용**을 합쳤을 때 가장 작은 선택을 고른다는 뜻이다.

즉, “지금 충전하면 당장은 손해 같아 보여도, 몇 시간 뒤 큰 이득이 생긴다면 충전할 수 있다”는 식의 판단이 가능하다.

여기서 핵심은 SDP가 단순히 “현재 전력이 남으니까 충전한다” 같은 규칙 기반 방식이 아니라, **현재 행동이 미래에 어떤 영향을 주는지 까지 고려해서 결정**한다는 점이다.

# 03 ESS Operation Strategies

## 그러면 “미래의 불확실성을 실제로 어떻게 예측할까?”

이 논문은 예측 모델로 세 가지 경우를 비교한다.

첫 번째, **NP, Naive Periodic**이다. 이건 가장 단순한 방법으로,  
“오늘 오후 2시 수요는 어제 오후 2시 수요와 비슷할 것이다” 라고 보는 방식이다.

두 번째, **MLR, Multiple Linear Regression**이다.이건 최근 며칠간의 데이터를 이용해서 미래를 예측한다.  
논문에서는 예측값 벡터를  $F$ , 과거 데이터 벡터를  $X$ , 회귀계수를  $\beta$ 라고 두고

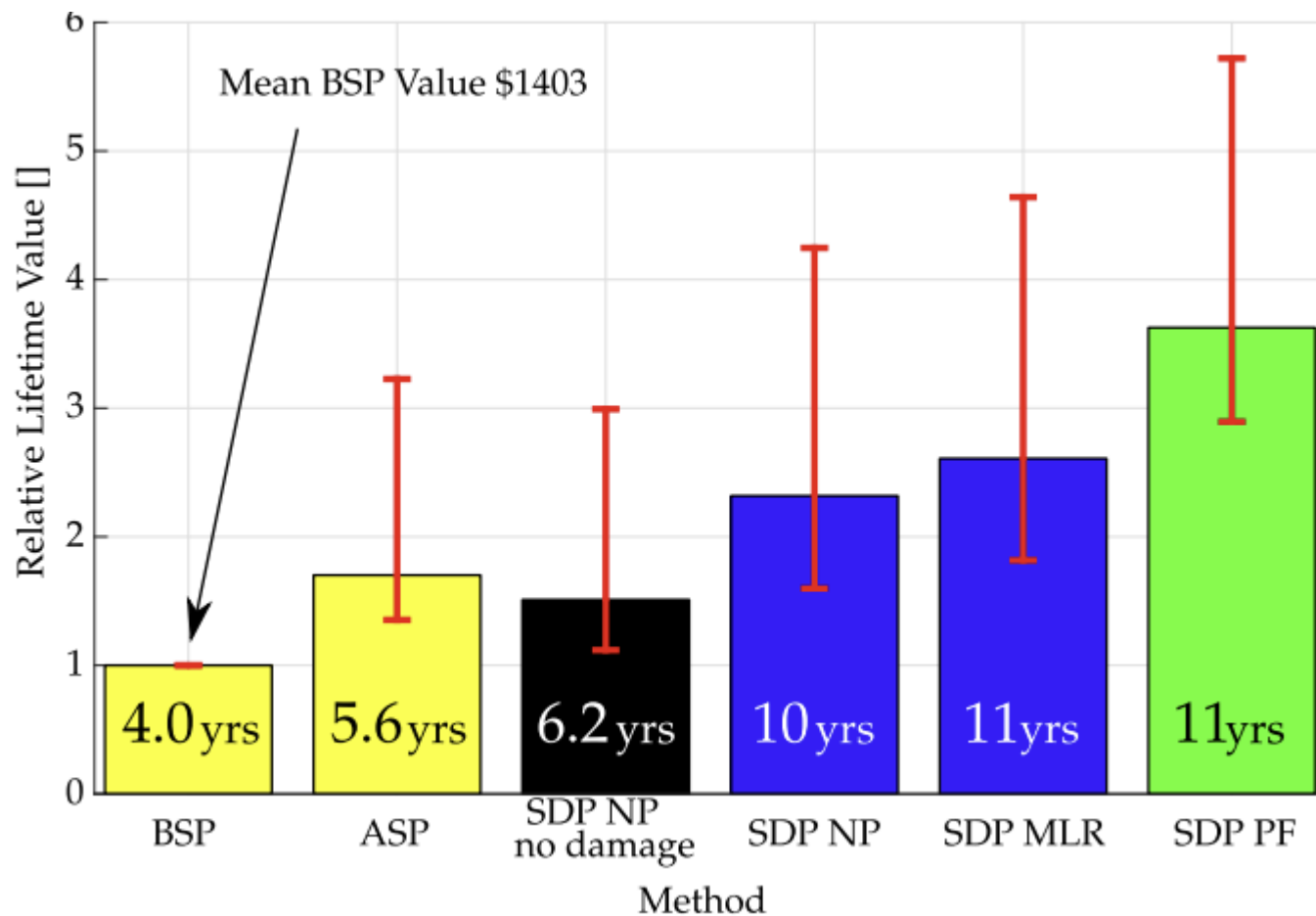
$$F = X\beta$$

로 모델링한다. 즉 과거 5일 정도의 수요나 발전 패턴을 보고 미래를 추정하는 방식이다..

세 번째, **PF, Perfect Forecast**인데,  
이건 실제 방법이라기보다 “이론적으로 예측이 완벽하다면 어느 정도까지 성능이 올라갈 수 있는가”를 보기 위한 상한선이다.

# 04 Proposed Method

## 운영방식 비교



이 그래프는 ESS 운영 전략에 따라 배터리의 경제적 가치가 어떻게 달라지는지를 보여준다.

BSP는 배터리 수명이 약 4년 정도로 가장 낮게 나타난다.

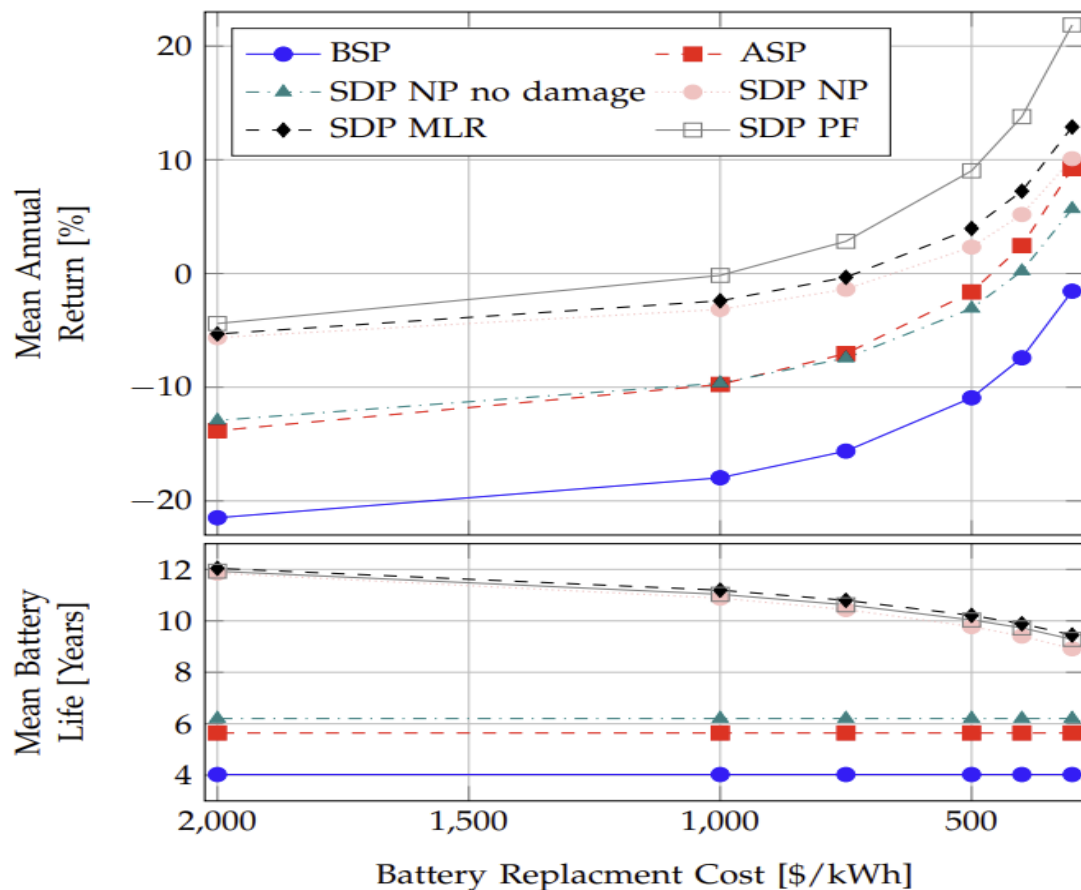
ASP는 약 5.6년으로 조금 개선된다.

SDP NP 전략에서는 약 10년  
SDP MLR에서는 약 11년까지 배터리 수명이 증가한다.

즉 SDP는 미래 상황과 배터리 열화를 고려하여 운영하기 때문에 배터리의 경제적 가치를 크게 향상시킨다.

# 04 Proposed Method

## 운영방식 비교



이 그래프는 배터리 교체 비용에 따라 ESS 수익률이 어떻게 변하는지 보여준다.

그래프를 보면 배터리 가격이 낮아질수록 ESS의 수익률이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그리고 중요한 점은 모든 비용 조건에서 **SDP 전략이 가장 높은 수익률**을 보인다는 것이다.

이는 SDP가 미래 상황을 고려하여 최적의 충방전 전략을 결정하기 때문이다.

# 04 Proposed Method

---

## 논문이 선택한 운영 방식

BSP(Basic Set Point Strategy)는 현재 상황만 고려하고

ASP(Advanced Set Point Strategy)는 전기요금만 고려한다.

하지만 SDP(Stochastic Dynamic Programming)는 미래 수요, 발전량, 배터리 열화까지 모두 고려하기 때문에 가장 효율적인 운영 전략을 도출할 수 있다.



# “SDP”

# 05 Conclusion

---

이 논문의 핵심은 미래 예측 정보와 배터리 열화를 동시에 고려하여 ESS 운영을 최적화했다는 점이다.

그리고 SDP 기반 운영 전략이 기존의 rule-based 방법보다 더 높은 경제적 성능을 보였다.

Power / Energy Track

# Thank you

송실대학교 전기공학부 학술 소모임 NOVA

발표자 : 박현호