

모델예측제어 프레임워크를 이용한 ESS 최적 충방전스케줄 생성기법

심진용, 임종목, 정석인, 김재현, 홍승표, 신재호
아이티맨

ESS Optimal Charge-Discharge Schedule Generation Method Using Model Predictive Control Framework

Jin-Yong Sim, Jong-Mok Lim, Sug-In Jung, Jae-Hyun Kim, Seung-Pyo Hong, Jae-Ho Shin
ITMAN

ABSTRACT

ESS(Energy Storage System)의 도입을 통해 첨두부하의 경감(Peak Shaving)과 일종의 차이거래(Arbitrage) 효과를 실현할 수 있다. 본 논문에서는 경제적 이득의 극대화를 지향하는 ESS 최적 충방전스케줄 생성기법을 제안한다. 제안 기법은 모델예측제어(MPC: Model Predictive Control) 프레임워크를 기반으로 하였고 매트랩 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

현재 정부의 강한 육성책에 힘입어 ESS(Energy Storage System)의 도입이 활발하게 진행되고 있다. ESS는 전력 생산과 사용의 시간적 불일치 문제를 해결할 수 있는 하는 효과적인 방안으로서 배터리 가격이 하락함에 따라 그 보급이 더욱 확대될 것으로 예상된다. ESS를 운용하면서 충방전스케줄을 최적화하면 경제적 이득을 극대화할 수 있다.

최근 들어 수학적계획법을 이용한 ESS의 최적 운영기법에 대한 연구^[1]가 진행되었지만 접근방식과 문제해결 범위가 다소 일면적이었다. 본 연구를 통해서 ESS 운영 최적화 문제를 제어공학의 모델예측제어(MPC: Model Predictive Control) 프레임워크라는 보다 체계적인 틀 속에서 다루어 보고자 한다.

2. 모델예측제어 프레임워크를 이용한 ESS 최적 충방전스케줄 생성기법

2.1 ESS 최적 충방전스케줄 생성문제

낮 시간대의 전력사용 집중도를 낮추기 위하여 전력 공급측에서는 시간대별 차등요금제를 적용하는 서비스를 제공하고 있다. 이에 대한 대응으로 전력 사용 측에서는 ESS(Energy Storage System)를 도입하여 사용량이 적은 시간대에 충전하였다가 사용량이 집중되는 시간대에 방전하는 방식으로 첨두부하의 경감(Peak Shaving)을 도모하고 있다. 또한 ESS는 요금이싼 시간대에 충전한 후 비싼 시간대에 방전함으로써 일종의 차이거래(Arbitrage) 효과도 가질 수 있다. 따라서 ESS 최적 충방전스케줄 생성문제를 비용이득의 최대화를 목적식의 일부로 가지고 계통인입전력이 정해 놓은 피크 값을 넘지 않는 것을 제약조건의 일부로 가지도록 정식화 하겠다.

2.2 모델예측제어 프레임워크

모델예측제어는 대상공정의 수학적 모델을 이용하여 공정의 출력이 원하는 경로를 따를 수 있도록 입력을 조종하는 방식의 다양한 제어기법을 가리킨다.

2.2.1 증강 상태공간모델

상태공간모델 (1)을 확장한 증강 상태공간모델(Augmented State-Space Model) (2)가 모델예측제어 시스템의 설계에 사용된다.^[2]

$$\begin{aligned} x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k) + B_d w(k) \\ y(k) &= C_m x_m(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_m & o_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ &\quad + \begin{bmatrix} B_d \\ C_m B_d \end{bmatrix} (w(k) - w(k-1)) \\ y(k) &= [o_m \ I_{q \times q}] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

(3)과 같이 변수를 새롭게 정의하고 정리하면 prediction horizon N_p 와 control horizon N_c 에 대하여 (4)와 같은 간결한 표현을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k) &\equiv [\Delta x_m(k)^T \ y(k)^T]^T, \\ Y &\equiv [y(k_i + 1|k_i) \ y(k_i + 2|k_i) \ \dots \ y(k_i + N_p|k_i)]^T, \\ \Delta U &\equiv [\Delta u(k_i) \ \Delta u(k_i + 1) \ \dots \ \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y &= Fx(k_i) + \Phi \Delta U, \\ F &= \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2 B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B & CA^{N_p-2} B & \dots & CA^{N_p-N_c} B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2.2 제약 최적화

$$\begin{aligned} J &\equiv (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U, \\ R_s^T &= [11 \dots 1] r(k_i), \bar{R} = r_w I_{N_p \times N_p} (r_w \geq 0) \end{aligned} \quad (5)$$

비용함수를 (5)와 같이 정의하면 최적화문제는 2차계획법 문제가 되고 (6)과 같이 정리된다.^[2]

$$\begin{aligned}
J &= (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) \\
&\quad + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U, \\
\frac{\partial J}{\partial \Delta U} &= -2\Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U = 0, \\
\Delta U &= (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (R_s - Fx(k_i))
\end{aligned} \tag{6}$$

입력신호, 입력신호의 변화와 출력신호의 범위를 기본적인 제약조건으로 사용할 수 있다.^[2]

$$\begin{aligned}
U^{\min} &\leq C_1 u(k_i - 1) + C_2 \Delta U \leq U^{\max}, \\
\Delta U^{\min} &\leq \Delta U \leq \Delta U^{\max}, \\
Y^{\min} &\leq Fx(k_i) + \Phi \Delta U \leq Y^{\max}, \\
U &\equiv \begin{bmatrix} u(k_i) \\ u(k_i + 1) \\ \vdots \\ u(k_i + N_c - 1) \end{bmatrix}, C_1 \equiv \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}, C_2 \equiv \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & \dots & I & I \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{7}$$

2.3 ESS 최적 충방전스케줄 모델링

$k = 1, \dots, 96$: 1일을 96등분한 15분 간격 시간대의 인덱스
BAT : 시간대별 배터리 충방전량
A_BAT : 누적 배터리 충방전량
GRID : 시간대별 계통인입 전력량
A_GRID : 누적 계통인입 전력요금
LOAD : 시간대별 예측부하 전력량
A_LOAD : 누적 예측부하 전력요금
PV : 시간대별 예측태양광 발전량
A_PV : 누적 예측태양광 발전금액
SAVE : 누적 절약 금액
PRICE : 시간대별 kWh당 전력요금
CONV = max(*PRICE*(k)) : 배터리잔량 환산 kWh당 전력요금

$$\begin{aligned}
A_BAT(k+1) &= A_BAT(k) + BAT(k), \\
A_GRID(k+1) &= A_GRID(k) + GRID(k) \times PRICE(k), \\
A_LOAD(k+1) &= A_LOAD(k) + LOAD(k) \times PRICE(k)
\end{aligned} \tag{8}$$

$$SAVE(k) = A_BAT(k) \times CONV - A_GRID(k) + A_LOAD(k) \tag{9}$$

$$BAT(k) - GRID(k) + LOAD(k) = 0 \tag{10}$$

$$SET_POINT = DAY \times RR \times \sum_{k=1}^{96} LOAD(k) \times PRICE(k) \tag{11}$$

(8)의 관계식으로 입력변수와 상태변수를 구성하였고 (9)를 출력변수 구성에 사용하였으며 (10)을 제약조건에 추가하였다. Set Point는 (11)과 같이 정하였다.

2.4 시뮬레이션 실험 및 결과

시뮬레이션 실험은 2.3의 모델링 내용을 매트랩 스크립트로 작성하여 수행하였다.

2.4.1 실험 조건

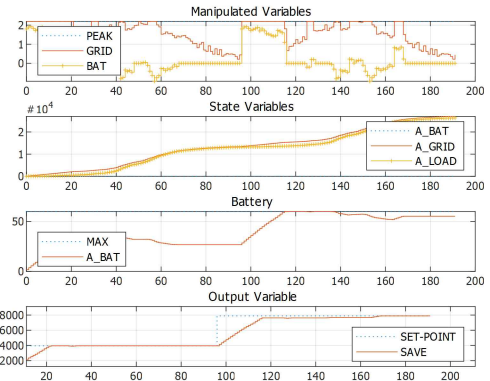
실험은 2일 길이, 15분 간격의 ESS 충방전스케줄을 생성하면서 배터리 용량, Set Point, N_p 와 N_c 의 변화에 따른 절약금액(Save)의 변화를 관찰하는 것으로 진행하였고 변수 범위는 아래와 같다.

$$0.1 \leq RR \leq 0.3, 6kWh \leq Cap \leq 60kWh, 1 \leq N_p, N_c \leq 4$$



[그림 1] 실험 입력

2.4.2 첨두부하 경감(Peak Shaving)



[그림 2] 실험 결과(Cap:60kWh, RR:0.3, $N_p, N_c:4$)

배터리용량이 6kWh 이상인 경우에 부하사용량 그래프에서 부하예측 값이 제한 설정 값(2.199kW)을 넘는 구간에서 피크가 사라지는 것을 확인하였다.

2.4.2 차익거래(Arbitrage) 효과

배터리용량(kWh)	최고 RR	절약금액(원)	요금이득(%)
10	0.1	2505	10
20	0.2	3441	13
30	0.2	4885	19
40	0.3	5963	23
50	0.3	7097	27
60	0.3	7889	30

[표 1] 배터리용량별 요금이득

예측부하의 2일간 누적전력요금은 26300원이고 요금이득은 누적전력요금에 대한 절약금액의 백분율로 하였다. 요금이득이 배터리용량의 크기에 따라서 10~30%의 분포를 나타냈다.

3.결 론

본 논문에서는 ESS의 최적 충방전스케줄 생성문제의 해를 모델예측제어 프레임워크를 이용하여 구하는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 실험을 통하여 최적 충방전스케줄 생성의 목적인 첨두부하 경감과 차익거래 효과가 다양한 구성 값에 대하여 모두 잘 작동함을 확인하였다. 또한 모델예측 제어 프레임워크를 이용하면 입출력 변수 값 및 입력 값 변화량을 제한하는 것이 가능하기 때문에 ESS의 보다 안정적인 운영에도 기여할 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20182410105210)

참 고 문 헌

- [1] 이병훈, 손진희, 박한영, 안효성, 임종목, 심진용, 박진수, 안재영, 유진호, 박일호, "태양광과 하이브리드 ESS를 결합한 시스템에서 전력에너지 최적 운영기법", 대한전기학회 학술대회 논문집, Vol.2016 No.7, 2016
- [2] Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB: Springer-Verlag London Limited. pp. 28-219, 2009.