

ESS를 포함한 Unit Commitment 수행을 통한 System Marginal Price 감소효과 분석

박준형*, 장영식, 권구민, 김선교, 윤용태*
서울대학교*

Analysing System Marginal Price Reduction through Performing the Unit Commitment including ESS

Joon-Hyung Park, Young-Sik Jang, Gumin Kwon, Sun-Kyo Kim, Yong-Tae Yoon
Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 전력 소비자 입장에서 전력가격에 큰 비중을 차지하는 System Marginal Cost(SMP)를 줄이는 방법으로 ESS를 포함하여 Unit Commitment(UC)를 수행하는 방법과 그에 따른 효과를 분석하였다. 먼저 본 논문에서는 일반적인 UC를 Lagrangian Relaxation(LR) 기법으로 얻은 최적의 결과 값을 토대로 ESS를 추가하였다. 기존의 LR알고리즘으로부터 얻은 결과 값에 ESS를 추가하는 방법으로는 Dynamic Programming 방법의 한 종류인 Label Correcting Methods[]를 사용하였다. 기존의 UC 알고리즘 결과 값을 토대로 ESS를 추가하여 SMP 감소효과 분석을 위해 실 계통에서 사용되는 종류별 발전기 10대와 임의적으로 설정한 24시간의 부하 값을 토대로 MATLAB을 이용해서 구현하였고, 결과 값을 통해 실질적인 SMP 감소효과 유효를 확인할 수 있었다.

1. 서 론

현재 증가하는 전력 수요를 충족하기 위해 발전기만을 늘리는 것은 한계가 있다. 따라서 최근에는 ESS(Energy Storage System)라는 저장장치를 이용하여 보다 효율적으로 전력수급을 해결하려는 노력을 하고 있다. 아직 ESS가 기술적으로 많은 전력량 부담하지는 못하지만, 미래의 환경적인 요소나 에너지의 효율적인 사용을 고려하면 매우 중요한 요소이다.

그러나 기존의 연구에서는 ESS자원을 활용함에 있어서 Heat curve와 같은 비용사정하는 부분이 어려워 Unit Commitment(UC) 알고리즘은 이러한 ESS를 반영하지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 이러한 ESS의 특징과, SMP를 낮추는 목적으로 ESS를 UC에 적용하는 방법에 대해 고려해 보았다.

그리고 ESS를 추가적으로 UC에 적용하면서 실질적으로 SMP가 감소하는 효과를 MATLAB을 이용하여 simulation을 통해 분석하였다.

본 논문은 기존의 UC 알고리즘인 LR[1,2]을 먼저 논의한 뒤 ESS를 추가하기 위한 수학적 모델링을 논의하였다. 그리고 수학적으로 모델링된 ESS를 적용하기 위한 방법으로 Dynamic Programming의 한 종류인 Label Correcting Methods[4] 방법에 대해 소개하였으며, 마지막으로 MATLAB으로 구현한 시뮬레이션 결과 값을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 Lagrangian Relaxation 알고리즘

시간대별로 변동하는 부하에 최소의 비용으로 전력을 공급하기 위해 발전기들의 On/Off 상태를 결정하는 것이 UC문제이다. ESS가 없을 경우의 고려하지 않았을 경우 LR 알고리즘을 이용하여 최적의 발전기들의 조합과 발전량을 구할 수 있다. 다음은 LR 알고리즘에서의 목적함수 및 제약조건을 표현하였다.

2.1.1 목적함수 및 제약조건

본 논문에서의 ESS를 제외한 기본적인 LR 알고리즘의 목적함수는 다음의 식 1과 같으며, 제약조건은 종속 제약조건인 수급균형 제약조건과 독립 제약조건인 발전기의 최소 기동 및 정지 시간과 출력제약조건을 적용하였다.

$$F(P_i^t U_i^t) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + STC_{i,t}] U_i^t \quad \text{식 1}$$

$$P_{load}^t - \sum_{i=1}^N P_i^t U_i^t = 0 \quad \text{for } t=1 \dots T \quad \text{식 2}$$

$$U_i^t \geq I(1 - x_i^{t-1}) \leq t_{up} - 1 \quad \text{for } i=1 \dots N \quad \text{and } t=1 \dots T \quad \text{식 3.1}$$

$$U_i^t \leq 1 - I(-t_{down} + 1 + x_i^{t-1} \leq -1)$$

$$U_i^t P_i^{\min} \leq P_i^t \leq U_i^t P_i^{\max} \quad \text{for } i=1 \dots N \quad \text{and } t=1 \dots T \quad \text{식 3.2}$$

T : UC 수행 시간

N : 발전기 대수

P_i^t : t시간에 i발전기의 발전량

U_i^t : t시간에 i발전기의 On/Off를 나타내는 indicator variable

$STC_{i,t}$: t시간에 i발전기의 Startup Cost

P_i^{load} : t시간의 부하 량

P_i^{\max} : i 발전기의 최대 출력량

P_i^{\min} : i 발전기의 최소 출력량

x_i^t : i 발전기의 On/Off의 연속적인 상태

$$I(a) = \begin{cases} 0, & \text{if } a \text{ is false} \\ 1, & \text{if } a \text{ is true} \end{cases}$$

다음의 목적함수와 제약조건은 dual problem과 primal problem의 duality gap을 이용한 LR방법으로 해를 구할 수 있다.[3,4] 그리고 이러한 LR 방법의 해를 구한 후 ESS를 추가적으로 고려하여 SMP를 감소시키는 알고리즘에 논의해 보겠다.

2.2 Energy Storage System

ESS는 전력과 에너지를 필요한 때와 장소에 공급하기 위해 전력계통에 전기를 저장해 두는 기술을 말한다. 이러한 기술을 전체로 야간 및 새벽시간대에 운용하는데 비용이 적은 발전기들을 운용하여 충전을 한 후 낮 시간대의 peak부하를 대체함으로써 효율적인 전력계통 운용을 할 수 있다. 앞서 논의한 LR 방법으로 각 시간대별로 각 발전기의 발전량을 구하게 되면, 각 시간대별로 한계발전기들이 결정이 된다.

그러나 이러한 한계발전기들은 자신의 최대용량만큼을 출력을 하지 않고, 일부분만을 출력하게 됨으로써 최대출력용량까지 출력을 더 추가적으로 낼 수 있는 경우와 반대로 충전된 ESS를 이용하여 한계발전기의 발전량을 대체함으로써 한계발전기를 기동정지계획에서 제외시킬 수 있다. 다시 말하면, 최대 출력까지 출력을 낼 경우에는 그 만큼의 발전량만큼 ESS에 저장되는 것을 말하며, ESS를 이용하여 한계발전기의 발전량을 대체할 경우는 ESS의 방전을 의미하게 된다. 이러한 한계발전기와 ESS의 특성을 이용하여 본 논문에서의 ESS 충 방전 알고리즘의 목적함수와 제약조건 및 알고리즘에 대해 설명하고자 한다.

2.2.1 목적함수 및 제약조건

다음의 식 4는 ESS 알고리즘의 목적함수이며, 식 5는 배터리의 용량 제약조건을 나타내었다. 배터리의 충전량과 방전량 P_k 는 앞서 LR 알고리즘으로 각 시간대별 한계발전기의 충전 가능량 및 방전 가능량을 나타내며 u_k 에 따라 식 4와 같이 total cost가 결정이 된다.

$$C = \min_{u_k} \sum_{k=1}^{24} F(P_k) \cdot u_k \quad \text{식 4}$$

$$B_{\max} * 0.2 \leq x_k \leq B_{\max} * 0.9 \quad \text{식 5}$$

k : DP에서의 stage (simulation 시간을 의미함 k = 1, ..., 24)

C : ESS total operation cost

$F(P_k) = aP_k^2 + bP_k + c$ (Heat curve)

$$u_k = \begin{cases} 1, & \text{charging} \\ 0, & \text{no action} \\ -1, & \text{discharging} \end{cases}$$

x_k : ESS의 충전 상태

B_{\max} : ESS의 최대 용량

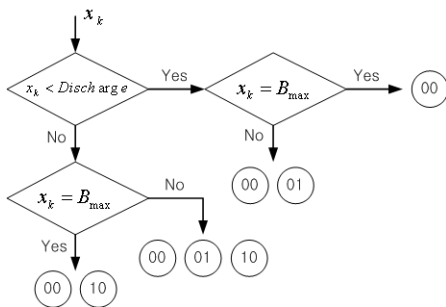
그리고 ESS의 충전 상태를 나타내는 x_k 는 이 후 DP 알고리즘에서 state variable에 해당되며, stage를 지날 때 마다 state variable x_k 는 다음과 같은 식 6과 같다.

$$x_{k+1} = x_k + P_k u_k \quad \text{식 6}$$

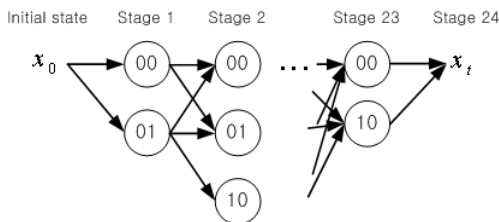
2.2.2 Label Correcting Method

SMP를 감소시키기 위한 ESS의 충전 알고리즘의 해를 구하기 위해서는 앞서 정의된 ESS 관련된 식을 이용하여 DP의 한 종류인 Label Correcting Method을 이용한다. 하지만 Label Correcting Methods에서는 transition cost가 양수인 경우 많은 이점이 있다. 하지만, 본 논문에서의 ESS 충전 알고리즘의 transition cost는 식 6에서의 $P_k u_k$ 이다. u_k 의 경우 ESS의 방전 시 transition cost가 음수가 되므로 UPPER bound가 사실상 의미가 없게 되어 거의 모든 경우의 수를 고려해 보아야 한다.

다음의 그림 1은 state variable인 배터리의 용량 x_k 에 따라 가능한 u_k 를 결정하는 블록선도를 나타낸다. 이러한 방법으로 결정된 u_k 를 적용하여 Label Correcting Method으로 SMP를 감소시키는 ESS의 충전 알고리즘의 해를 구하면 된다.



<그림 1> x_k 에 의한 ESS 가능한 state 결정



<그림 2> ESS state에 따른 DP 알고리즘

3. 사례 연구

SMP를 감소시키기 위한 ESS의 충전 알고리즘을 시뮬레이션 하기 위해 본 논문에서는 MATLAB을 사용하였다. 최대 ESS의 용량은 300MW로 가정을 하였다. 발전기 10대의 특성자료와 임의적인 수요 data를 LR 알고리즘[2]에 적용하면 각 시간대별 발전량이 나오게 된다. 여기서 시간대별 발전량 결과 값을 표현하기에는 공간상에 제약이 있어서 다음의 표 1의 각 시간대별 한계발전기의 정보와 전체 운용비용만을 나타내었다.

<표 1> ESS가 포함되지 않은 시간대 별 한계발전기 및 운용비용

시간(h)	한계발전기	발전용량	시간(h)	한계발전기	발전용량
1	Gen 7	332(MW)	13	Gen 4	130(MW)
2	Gen 6	357(MW)	14	Gen 4	190(MW)
3	Gen 6	472(MW)	15	Gen 4	210(MW)
4	Gen 8	745(MW)	16	Gen 2	413(MW)
5	Gen 7	260(MW)	17	Gen 2	165(MW)
6	Gen 7	362(MW)	18	Gen 1	150(MW)
7	Gen 5	260(MW)	19	Gen 5	356(MW)
8	Gen 5	260(MW)	20	Gen 2	165(MW)
9	Gen 5	473(MW)	21	Gen 5	412(MW)
10	Gen 2	165(MW)	22	Gen 7	451(MW)

11	Gen 2	518(MW)	23	Gen 7	378(MW)
12	Gen 2	506(MW)	24	Gen 6	484(MW)
운용 비용			2,893,950 원		

위의 표 1에서 각 시간대별 한계발전기와 한계발전기의 출력 량을 확인할 수 있다. 이 한계발전기와 한계발전기의 남은용량을 기준으로 DP 알고리즘을 적용한 ESS의 충전 결과는 다음의 표 2에 나타나있다.

이러한 표 1과 2의 결과 값을 비교해 보았을 경우 표 2에서 일부 시간대의 한계발전기가 변화했음을 확인할 수 있으며, 남은 용량은 한계발전기의 출력 용량에서 실제 출력량을 뺀 값이다. 표 2에따라 전체적인 운용비용 또한 감소됨을 확인할 수 있다.

<표 2> ESS가 포함된 시간대 별 한계발전기 및 운용비용

시간(h)	한계발전기	남은용량	시간(h)	한계발전기	남은용량
1	Gen 7	0(MW)	13	Gen 4	0(MW)
2	Gen 6	52(MW)	14	Gen 3	0(MW)
3	Gen 7	0(MW)	15	Gen 4	26(MW)
4	Gen 8	0(MW)	16	Gen 2	0(MW)
5	Gen 8	0(MW)	17	Gen 3	0(MW)
6	Gen 7	140(MW)	18	Gen 1	0(MW)
7	Gen 6	0(MW)	19	Gen 5	40(MW)
8	Gen 5	15(MW)	20	Gen 3	0(MW)
9	Gen 5	190(MW)	21	Gen 5	0(MW)
10	Gen 3	0(MW)	22	Gen 6	0(MW)
11	Gen 2	0(MW)	23	Gen 7	43(MW)
12	Gen 2	0(MW)	24	Gen 7	0(MW)
운용 비용			2,134,190 원		

3. 결 론

본 논문에서는 전력가격에 큰 비중을 차지하는 System Marginal Cost(SMP)를 줄이는 방법으로 ESS를 포함하여 Unit Commitment(UC)를 수행하는 방법과 그에 따른 효과를 분석하였다. 먼저 기존의 LR 알고리즘으로 ESS가 제외된 경우의 UC 수행 방법에 대해 살펴보고, 이후 기존의 LR알고리즘으로부터 얻은 결과 값에 ESS를 추가하는 방법으로 Dynamic Programming 방법의 한 종류인 Label Correcting Methods에 대해서 논의하였다. SMP를 낮추기 위한 ESS의 충전 알고리즘의 해를 구하기 위해 적용할 ESS를 수식화 하였으며, DP 알고리즘 또한 정의하였다.

다음과 같이 정리된 내용을 토대로 실 계통에서 사용되는 종류별 발전기 10대와 임의적으로 설정한 24시간의 부하 값을 토대로 MATLAB을 이용해서 simulation을 하였으며, simulation 결과 값과 같이 ESS를 추가함으로써 기존의 UC 알고리즘으로부터 얻은 SMP의 값이 감소된 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서부발전 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며, 관련 기관 관계자 여러분에게 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. K. Pang and H. C. Chen, "Optimal Short-Term Thermal Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, no. 4, pp. 1336-1346, July/August. 1976.
- [2] Marshall L. Fisher, "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems," Management Science, vol. 50, no. 12, pp.1861-1871, December. 2004.
- [3] John A. Muckstadt, and Sherri A. Koenig, "An Application of Lagrangian Relaxation to Scheduling in Power-Generation Systems," Operation Research, vol. 25, no. 3, pp. 387-403, May/Jun. 1977.
- [4] Dimitri P. Bertsekas, "Dynamic Programming and Optimal Control, Volume 1"