ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 1, pp. 22~28, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.1.22

풍력발전의 전력공급 안정화를 위한 ESS 보조제어 기법과 경제적 용량 산정 연구

A Study of Economic ESS Utilization Based on Supplement Control Plan for Stable Wind Energy Extraction

정 승 민*
(Seungmin Jung)

Abstract - In case of developing a combined system by a number of distributed resources with storage device, a number of application suggests a huge capacity can derive operational flexibility both power supply issues or when unexpected situation imposed. However, it is important to determine a resonable energy capacity because the device have many controversial cost issues in current power system industry. An ESS application which focusing essentially required points can induce appropriate storage capacity that required in economic operation. In this paper, a curtailment supporting algorithm based on storage device is introduced, and applied in the capacity calculation method. The main algorithm pursues handling minor exceeding quantities which can cause mechanical load at blade; This paper tries to include it for configuring hybrid algorithm with pitch control. Several fluctuating conditions are utilized in simulation to reflect critical situation. The analyzing process focuses on the control feasibility with applied capacity and control method.

Key Words : ESS application, Curtailment, Microgrid, Capacity calculation, EMS

1. 서 론

신재생에너지원의 효율적인 발전출력을 위해 중앙 계통과 간접적으로 연계된 도서지역이나, 독립적으로 구성된 전력시스템에서의 설비구성이 증가하고 있다. 국내에서도 제주지역을 중심으로 풍력발전의 신규·확대 건설이 발전설비구성계획에 포함됨에 따라, 대상 계통의 수용가능성에 대한 검토 필요성이 주목받고 있다. 제주지역의 경우 내륙계통과 직류송전시스템을 이용하여 연계되어 있고, 별도의 주파수제어를 통해 전력제어가 가능한 부분이 있다. 또한, 전체 부하대비 풍력발전 용량이 상대적으로 크지만, 연계선 추가 제어와 중앙감시제어 시스템 구성 등의 방안을 중심으로 신재생에너지원의 수용성에 대한 문제를 개선할 방향을 모색하고 있다. 적정규모의 계통과 연계되지 못하는 분리형 계통의 경우, 중앙 발전원을 중심으로 계통의 안정성을 도모하며, 신재생에너지원의 활용을 다각적으로 고려하고 있으나, 변동성을 반영한 중앙제어가 쉽지 않은 것으로 평가된다. 신재생에너지원 비율이 높은 계통은 별도의 에너지저장시스템(ESS)을 활용하여 전력제어를 수행하는 사례가 많으며, 연계된 컨버터를 활용하여 전압제어 등 품질관리에 참여하도록 하는 연구가 진행되고 있다[1], [2]. 이러한 소규모계통에 연계되는 에너지저장장치는 적정 용량 산정과정이 필요하며, 특히 높은 가격대를 형성하는 에너지 용량에 대해 신재생에너지 변동성에 주목한 계산과정을 포함할 필요가 있다[3].

풍력발전기는 기존에 친환경적인 요소를 고려하여 발전단가가 화석 연료를 이용한 발전시스템에 비해 높게 측정되어 있으며, 이로 인한 이득을 취할 수 있는 구조를 도모해 왔다. 하지만 소규모 시스템에서 잉여 발전력이 발생하는 등 경제적인 관점에서 문제가 발생할 수 있으며, 이를 보완하기 위해 풍력발전시스템을 도입함으로서 얻을 수 있는 가치를 재평가해야 한다는 의견이 제시되고 있다[4]. 이러한 가치를 평가하는데 있어서, 전력제어능력은 큰 지표로 고려되며, 소규모시스템에서 전력제어능력을 극대화하기 위해, ESS를 적극적으로 활용하는 보조 방안의 필요성도 주목받고 있다[5]. 기존 풍력발전의 전력제어는 초과되는 전력량에 관하여 블레이드 각도 조절에 의한 전력 제한방안이 활용되고 있으나, 이때 제한하는 전력량은 낭비되는 에너지로 분류되며, 급격한 풍속 변동 시에 기계적인 제어특성에 의해 원활한 전력제어가 어려운 부분이 있다[6].

이러한 단점을 극복하기 위해 에너지저장장치를 활용할 경우, 전력제어 과정 시 낭비되는 에너지를 빠르게 흡수할 수 있고 운영자가 지시하는 전력지령에 도달하는 시간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 해당 과정에 주목하여 에너지저장장치 용량을 산정할 경우, 과도한 설비용량 선정을 피할 수 있고, 보다 경제적인 운용과정을 유도할 수 있다. 본 논문에서는 풍력발전기에서 고려하고 있는 전력제어 능력 향상에 주목하여 제어 알고리

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea.
E-mail : seungminj@hanbat.ac.kr
Received : August 22, 2017; Accepted : December 6, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

즘을 구성하고, 해당 제어기법을 중심으로 유효전력 제어를 위한 적정 용량산정과정을 제시하고자 한다. 풍력발전기의 성능 향상과 저장장치의 효율적인 용량 구성을 바탕으로 충·방전제어에 기반한 경제성 있는 풍력·ESS 융합 시스템의 소규모 계통연계를 진행하고자 한다.

2. 풍력·ESS 출력 제어 알고리즘

출력의 변동성이 높은 풍력발전기의 출력신뢰성을 높이기 위해, 발전사업자가 최대출력을 설정하여 그 지령 이상의 출력을 기계적인 제어 방안으로 제한하는 방안이 도입되고 있다[7]. 해당 방안을 통해서, 계통운영자(TSO)는 연계된 풍력발전기의 최대출력을 예측할 수 있으며, 보다 원활한 발전력관리를 수행할 수 있다. 하지만 빈번한 기계적인 제어는 풍력발전에 무리한 하중을 유발할 수 있으며, 설비의 수명을 위해 일정 범위 이내로 제한해야 할 필요가 있다[8]. 또한 기계적인 응답속도로 인해 제어과정에서 지령을 초과하거나 미달하는 전력량이 발생할 가능성이 높으며 낭비되거나 부족한 전력을 효과적으로 줄일 수 있는 방안이 보조되어야 할 것으로 보인다. 특히, 소규모 전력계통의 경우 미세한 전력차이가 전체 전력공급 신뢰성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 해당 전력량의 적극적인 관리기술이 요구된다.

그림 1은 본 논문에서 제안하고자 하는 풍력·ESS 제어방안의 기본적인 개념을 나타낸다. 기존에는 계통운영자의 지령에 응답할 수 있는 방안으로 피치 제어(Pitch control)를 단독적으로 활용하였다. 본 논문에서는 응답 속도 등 전력제어과정의 원활한 처리를 위해 ESS를 도입하고, 두 시스템의 출력 제어를 복합적으로 처리할 수 있는 알고리즘을 구성하고자 한다. 기본적으로 ESS는 출력지령 개별적으로 처리하지만, 두 시스템의 복합적인 구성 및 처리과정에 의해 출력의 mismatch가 발생할 수 있으며, 해당 문제를 완화하기 위해 별도의 예측과정을 포함하여 ESS 출력제어의 신뢰성을 높이고자 하였다.

2.1 풍력발전 유효전력 제한

유효전력제어 과정을 구현하기 위해 Full-converter 방식의 1.75 MW 영구자석형 풍력발전기와 배터리모델을 고려하였다. 풍력발전시스템은 별도의 전력변환장치를 이용하는 배터리 모델과 병렬적으로 연계되어 전력제어를 수행하게 된다. 언급한 바와 같이, 유효전력 제한은 풍력발전기의 기계적 제어와 ESS의 전기적 제어를 상호 보완적으로 수행하게 되는데, ESS의 저용량 고효율을 목표로 하고 있는 본 논문의 방향성에 맞추어 State of charge(SOC)의 보완적인 활용을 위해 출력 지령에 대한 1차적인 응답은 풍력발전기에서 수행하게 된다. 부족한 제어력을 ESS 충·방전으로 보완하는 과정을 포함시키기 위해, SOC 관리 알고리즘을 구성하고, 각 부분의 전력조류를 반영할 수 있는 제어 알고리즘을 구성해야 한다[9]. 그림 2는 본 논문에서 다루는 두 시스템의 모델링 회로도와 전력조류 흐름을 도시화한 것이다.

풍력발전기의 출력 계수는 풍속과 로터 블레이드의 상관관계에 의해 결정되고, 해당 계수를 바탕으로 모의된 발전량이 컨버터의 출력제어로 계통으로 전달되도록 구성된다. Rotor-side convertor(RSC, 발전기 측 컨버터)의 전기적 토크 제어를 통해 Maximum power point tracking(최대출력제어)을 추종하고, 정격 출력 이상의 풍속이나 유효전력 출력 시 피치제어를 수행하게 된다[10].

ESS의 앞단에서 전력을 충·방전하기 위한 컨버터는 Grid Side Converter(GSC, 계통 측 컨버터) 및 DC 부분으로 구분된다. GSC는 에너지 저장을 수행하는 DC 부분과 직접적으로 연계되며, 캐패시터 용량은 계산을 통하여 산출된다. GSC는 DC 전압 레벨의 크기와 무효전력을 입력으로 제어되며, d-q변환을 수행하면 d축 전압은 0이 되므로 무효전력은 식 (1)과 같이 정리된다.

$$Q = -\frac{3}{2} V_q i_d \tag{1}$$

그림 2의 P_B는 ESS의 충·방전에 따른 유효전력 출력 변동을 의미하며, 연계된 전력변환장치의 용량에 따라 그 크기가 제한된다. 기본적으로 ESS는 충·방전상태를 결정할 수 있도록 연계지점의 출력을 반영한 지령 관리가 필요하며, 전력제어 과정 중에 발생할 수 있는 여분의 전력을 빠르게 흡수할 수 있도록 자동제어가 구성되어야 한다. 두 시스템의 연계지점 출력을 P_{PCC}라고 하면, 유효전력 출력에 관한 수식은 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

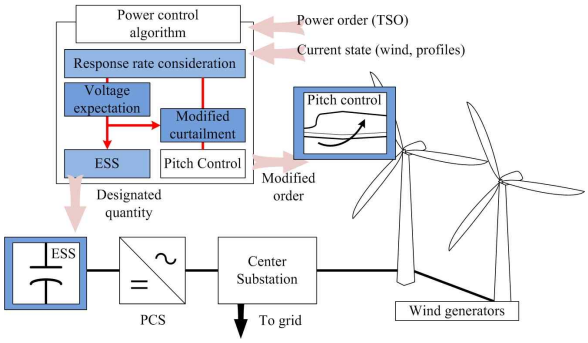

그림 1 풍력-ESS 통합 제어 개념도

Fig. 1 Proposed control concept of wind-ESS combined system

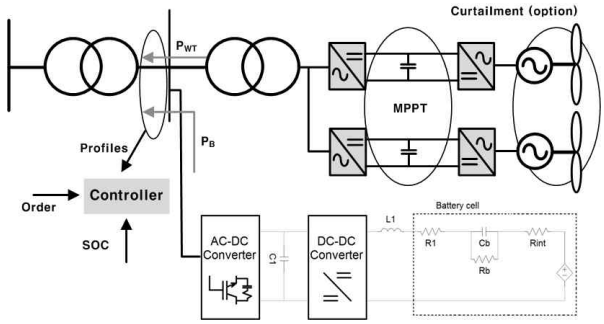

그림 2 통합 모델 및 전력 흐름 분석

Fig. 2 Electrical model and flow analysis

$$P_{PCC} = \sum P_{WF} + P_{ESS} \tag{2}$$

$$\sum P_{WF} = P_{WF1} + P_{WF2} + \cdots + P_{WFn} \tag{3}$$

풍력발전을 2기로 설정하고, 시간에 따른 함수로 나타내면, ESS 충·방전에 관한 수식을 출력 제약과 함께 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ESS}(t) = P_{PCC}(t) - \sum P_{WF}(t) \tag{4}$$

$$-S_{PCS} \le P_{ESS}(t) \le S_{PCS} \tag{5}$$

여기서, S_{PCS}는 연계된 전력변환장치의 순시용량을 나타낸다. ESS는 일반적으로 전체 전력수요에 대한 관리 차원에서 충·방전과정을 수행하게 된다. 하지만 본 논문에서 다루는 ESS 출력제어는 전체 전력수요관리의 결과로 도출된 출력 요구량을 최대·최소값으로 받아들여 진행하게 되며, 풍력발전의 기계적 제어로 도출된 출력을 측정하여 식 (6)을 이용해 보조하게 된다.

$$P_{ESS}(t+1) = \begin{cases} \sum P_{WF}(t) - P_{\max} & (Charging) \\ P_{\min} + \sum P_{WF}(t) & (Discharging) \end{cases} \tag{6}$$

연계된 ESS의 상태를 제어에 포함하기 위해 ESS의 SOC가 지속적으로 계산되어 제어과정에 포함되어야 한다. 또한, SOC의 제한치를 설정하여, 안정적인 수명관리를 포함한 용량산정을 진행해야 한다. 각 단계에서 ESS 출력에 따른 SOC 변화를 측정하기 위해 수식을 구성하면 식 (7)과 같다.

$$SOC(t+1) = \begin{cases} SOC(t) - \dfrac{E_{ESS}(t)}{\eta_{disc} E_{\max}} & (P_{ESS}(t) \ge 0) \\ SOC(t) + \dfrac{\eta_c E_{ESS}(t)}{E_{\max}} & (P_{ESS}(t) < 0) \end{cases} \tag{7}$$

여기서, E_{ESS}는 유효전력 출력에 의해 계산된 전기에너지를 의미하고, η_{disc}는 ESS의 방전효율을 의미하고, ηc는 충전효율을 의미한다. SOC는 제어 알고리즘에 하나의 신호로 들어가게 되며, 유효전력 제어가능량을 확인하는 지표로 작용한다. 풍력발전의 유효전력 제한 과정을 지속적으로 보조하기 위해서 일정량의 충전 가능량(최대 SOC 기준 음의 값)을 확보해야 하며, 이는 출력 제한이 필요한 상태를 제외하고 방전을 진행함으로서 진행할 수 있다.

2.2 ESS 출력제한 보조 알고리즘

출력전력에 대한 각 부분을 해석하기 위해, 시뮬레이션에 포함될 전력변환장치의 구조를 확인해야 한다. 일반적으로 전력산업 분야에서 사용되는 풍력발전기와 ESS 시스템의 AC/DC변환용 PCS는 유사한 구조를 갖는다. AC-DC 인버터와 DC-DC 컨버터를 통해 계통에 연계되는 ESS 모델은 PCS 통해 계통의 요구에 빠르게 응답할 수 있으며 여분의 전력량을 두 컨버터 동작으로 충전하게 된다[11]. 하나의 연계지점에 두 시스템을 구성하고 전력제어를 수행한다면, 보다 복잡한 제어전략이 요구된다. 본 논문에서는, 풍력발전량의 급증 시, ESS동작을 통해 출력의 안정성 및 전체 시스템의 효율성을 향상시키고자 한다. 풍력발전기의 피치제어는, 출력을 제한하는 경우에 발전기 측 컨버터가 토크를 제어하여 최대출력을 제한하는 방식을 채택하였다.

그림 3은 계통운영자의 지령을 따르기 위한 풍력발전과 ESS의 출력제어 플로 차트를 나타낸다. 계통운영자는 두 시스템에 대한 통합 유효전력 지령을 입력하며, 해당 지령은 풍력발전 출력 상태와 전력변환장치 용량, SOC를 고려하여 두 경우로 나누어서 동작한다. 계통운영자의 지령을 초과하여 출력 제한이 필요할 경우, SOC를 분석하여 우선적인 ESS 충전동작을 수행하게 되며, 필요할 경우 2차적 피치제어 동작 신호가 입력된다. ESS의 응답을 모니터링 하는 과정에서, 제한이 요구되는 출력량이 전력변환장치의 용량을 초과할 경우에 상대적으로 응답이 느린 기계적인 제어를 병행하여 수행하게 된다. 해당 과정을 통해 짧은 변동에 대한 효과적인 출력 제한을 수행할 수 있으며, 기계적인 하중 감소를 유도할 수 있다. 계통운영자의 지령에 미달하여 방전을 진행하는 경우는, ESS 운영 측면에서 활용되게 된다. 지속적인 ESS의 출력 제한 활용을 위해, SOC의 적정 수준 유지가 요구되며, 운영자는 충전된 에너지를 방전하기 위한 신호를 설정하여 해당 출력 신호 이하의 상태에서 ESS 방전을 진행할 수 있다. 출력 제한이 필요하지 않은 구간에서 풍력발전기는 기존 동작과 마찬가지로 MPPT제어를 수행하며, 이 플로차트는 계통운영자에 의한 지령신호에 따라 반복적으로 초기화 된다. 지령신호는 주기 입력 형식으로 반영이 가능하며, 일반적으로 수초 단위로 설정된다. 2.3절에서는 본 알고리즘에서 중요 시 되는 출력 제한의 경우에 주목하여 ESS 용량 산정과정을 진행한다. ESS 방전의 경우 SOC 관리 차원에서 이루어지며, 용량 산정의 주요 부분에는 영향을

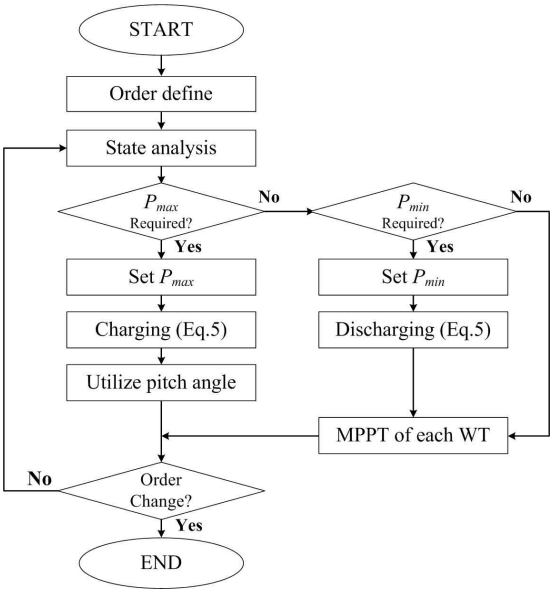

그림 3 풍력발전 ESS 보조 출력 제어 알고리즘
Fig. 3 Flow chart of proposed control algorithm

미치지 않는다.

2.3 ESS 용량산정

제한에 주목한 ESS 용량 산정은 대상이 되는 발전시스템의 출력 지령에 따른 기계적 변동을 고려해야 한다. 풍력발전기의 유효전력 출력을 기계적으로 제어할 경우, 제한치의 오차범위로 수렴하는 응답시간이 존재하게 된다. 여기서는, 입력되는 피치제어에 따라 발생하는 오버슈트(overshoot)와 감쇠비로 유효전력 보조 필요량을 계산하고자 한다. 일반적인 풍력발전기의 정격출력을 대상으로 발생하는 과도 응답특성은 그림 4와 같다.

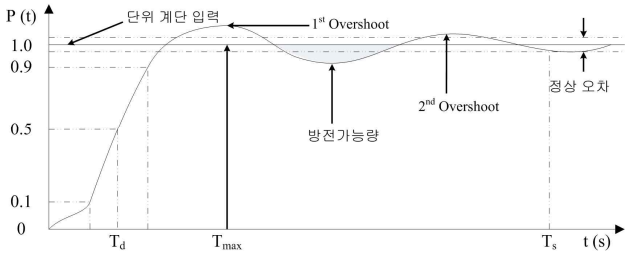

그림 4 풍력발전기의 출력 제한 시 기계적 응답 곡선

Fig. 4 Mechanical response curve when imposing curtailment signal on wind turbine

풍력발전기의 출력이 설정된 지령을 초과할 경우 제 1 오버슈트에서 발생하는 전력량에 주목하여 ESS 충전이 진행되게 된다. 따라서 해당 전력량을 ESS 용량산정에 반영해야 하는데, 풍력발전기의 경우, 지령에 의한 제한 과정에서 기계적인 변동으로 인해, 오버슈트 이후에 지령보다 낮은 전력 공급 구간이 발생하게 된다. 해당 구간은 충전된 전력을 방전할 수 있는 방전가능영역으로, 각 면적이 이후의 오버슈트 면적보다 크기 때문에, 제 1 오버슈트와 제 2 오버슈트의 비, 즉 감쇠비로 출력 보조에 필요한 용량을 산출할 수 있다. 전체 풍력발전기 용량과 컨버터 용량을 이용하여 에너지용량 산출을 진행하고자 하며, 출력 제한의 빈도를 반영하기 위해, 한 시간 평균 출력 제한 횟수를 측정하여 입력하고자 한다. 입력 가능한 변수를 정리하면 식 (8)과 같다.

$$C_{rate} = f\left(P, \delta, S, n+1\right) \tag{8}$$

여기서, 풍력발전기 용량의 경우, 연계된 풍력발전시스템의 총 용량을 고려해야 하며, 제한대상인 출력량에 직접적으로 영향을 준다. 감쇠비의 경우도, 연계된 발전시스템의 종합 감쇠비를 고려해야 하며, 이는 차단 보조과정에서 필요한 전력량을 산출하는데 기여한다. 컨버터 용량은 전체 구성 시스템(풍력발전기 및 ESS) 대비 ESS에 연계된 PCS 용량의 크기를 고려하여 실질적으로 필요한 순간용량을 반영하는데 활용된다. 이러한 요소들을 기반으로 한 시간 평균 제한시간을 설정함으로서 설치할 지역과 전력계통의 특성을 고려하여 에너지용량을 산정한다. 해당 과정을 수식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$C_{rate} = P_{WF}\delta \times \frac{S_{pcs}}{S_{rate}} \times \frac{n+1}{3600} \quad (kWh) \tag{9}$$

각 변수들은 시스템 값으로 주어지며, 별도의 가중치는 고려하지 않고 유효성을 평가하고자 한다. PCS 용량은 발전사업자가 임의로 설정할 수 있으며, 해당 값은 보조하고자 하는 풍력발전단지 용량에 주목하여 계산되어야 한다.

3. 사례 연구

3.1 모의계통 구성

본 논문에서는 풍력-ESS 발전시스템을 구성하기 위해 2기의 PMSG 모델과 1기의 ESS를 PSCAD로 모의하여 제시한 알고리즘을 시험해 보고자한다. 해당 시스템을 바탕으로 풍력발전의 지령 응답 상황에서 전력제어 능력을 향상시킬 수 있는지 여부와, 설정된 용량만으로 전력제한 과정을 지속적으로 참여할 수 있는지 여부를 판단하고자 한다. 기존 연구에서 나타난 소규모 단위 풍력터빈의 BESS활용에 대한 경제성문제를 고려했을 때, 계산된 소규모 용량으로 지속적인 보조를 수행할 수 있다면, ESS 필요용량 산정에 새로운 기준을 마련할 수 있다. 1.75 MW의 풍력발전 모델에 대한 정보는 표 1와 같다 [11]. 입력되는 풍속정보를 바탕으로 변속 기어, 피치각 정보를 이용해 기계적 토크를 발생하도록 구성하였다. ESS는 하나의 모듈을 2 level PCS에 연결하도록 구성하였으며, 유효전력 지령이 발생하면 필요한 전류를 공급하도록 스위칭 동작이 진행 된다. 풍력발전시스템과 ESS는 동일한 연계지점을 가지고 계통과 연계된다. 그림 5는 PSCAD로 구성한 시뮬레이션 구성도이다. 풍력발전 연계 및 분석에 일반적으로 사용되는 SCR 및 X/R ratio를 기본으로 한 등가모델을 구성하였으며, 풍력-ESS 발전시스템은 1km의 송전선을 통해 등가모델에

표 1 풍력발전기 구성 데이터

Table 1 System parameters for wind turbine

정격용량	1.75 MVA
로터 직경	66 m
정격 풍속	13 m/s
정격 전압	0.69 kV
극수	4
damping ratio	0.58
gear ratio	1:100

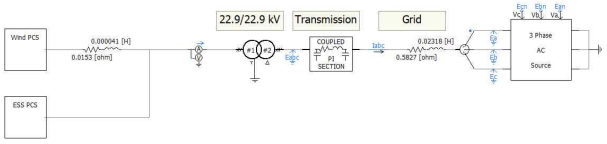

그림 5 PSCAD로 구성된 풍력발전-ESS 계통도

Fig. 5 Configuration of the test system in PSCAD

연결된다. 기본시스템 및 설정된 PCS 용량, 계산된 ESS 에너지 용량은 표 2와 같다.

풍력터빈의 무효전력 제어는 설정 값을 바탕으로 역률제어가 수행되며, 출력되는 유효전력량을 기준으로 순시제어가 진행된다. 유효전력의 최대·최소 설정 값은 예측된 정보를 바탕으로 계산된 TSO의 지령에 기반을 두어 지정된다. PCS 용량을 초과하는 출력량에 대해서는 구성된 풍력발전기의 피치제어를 통해 제어되도록 설정하였다.

표 2 발전시스템 용량 및 등가모델 정보
Table 2 Based system information for case study

풍력발전시스템		ESS 용량		시스템 정보	
전체 용량	PCS 용량	PCS 용량	에너지 용량	SCR	X/R ratio
3.5 MVA	1.75 MVA	400 kVA	0.58 kWh	15	15

표 3 사례 연구 지령 설정 값
Table 3 Numerical information for designed case studies

모의 시간	평균 제한 시간	초기 SOC	Case 1		Case 2	
			최대 지령	최소 지령	제한 출력량	최저 SOC
3.5 MVA	1.75 MVA	50 %	3 MW	1.3 MW	3 MW	(a) 50% (b) 40% (c) 30%

50μsec 응답 시간 시뮬레이션을 바탕으로 전체시스템 내부의 유효전력 제어를 수행하고자 한다. 상기된 ESS 제어방안과 제한값 보조기법 설정, SOC의 충·방전 제한치를 설정하여 실제 시스템의 운영에 근접하여 수행될 수 있도록 구성하였다. 구성된 예측시스템은 실측데이터를 기반으로 풍속 데이터를 입력받을 수 있도록 Table로 구성하여 PSCAD 내부에 도입하였다.

시뮬레이션은 초기 기동구간부터 포함하여 풍황이 심하게 변동하는 구간을 확인하고 풍력발전 출력이 최대 지령치, 최소 지령치를 시뮬레이션 시간 안에 입력받을 수 있도록 설정하였다. 실제시스템에서 TSO의 출력지령이 수초 간격으로 수행되는 것을 반영하여, 본 시뮬레이션에서는 2개의 지령을 입력하였다. 해당 지령은 예측된 값으로써, 풍력발전 제한과정 시의 기계적 하중을 줄이기 위해, ESS 충전이 수행되는 최대출력지령, 발전 수급 등 최저 출력 변동성을 줄이기 위해 ESS의 방전이 수행되는 최저출력 지령으로 구성된다. 대상 사례 연구에서 할당되는 지령에 관한 정보는 표 3과 같다.

사례연구는 최대·최저지령을 임의로 설정하고, 지속적인 출력 제한 보조가 가능한지 확인하기 위한 Case 1과 제한 출력량과 최저 SOC를 각각 설정하여, 가용범위 안에서 일정 출력을 모의해 보는 Case 2을 각각 진행하였다. 소규모 용량으로 최대출력 제한 보조를 모의해보고, 추가적인 제어 기법이 가능한지 확인하고자 한다.

3.2 시뮬레이션 분석

그림 6은 기존 시스템과 같이 풍력발전의 피치제어에 의존한 상태에서 최대 지령을 입력받았을 때의 풍력터빈에 입력되는 풍속과 출력을 나타낸 그래프이다. 기동 후 상당 구간에서 지령(3 MW) 이상의 출력을 나타내고 있고, 풍속이 감소하는 구간이 지난 후에도 최대 출력지령을 초과하는 것을 확인할 수 있다. ESS 보조기법을 추가적으로 연동하여, 해당 구간에서 ESS를 통해 전력 흡수를 진행하고, 피치제어에 요구되었던 기계적 하중을 완화하고자 한다.

본 논문의 목적인 출력 제한 보조를 위해 3 MW를 기준으로 설정하고 소량의 전력 제한이 요구되는 상황을 모의하여 ESS 보조를 수행하고자 상황을 모의하였다. 그림 7은 Case 1에 설정된 바와 같이, ESS를 구성하여 0.4 MVA PCS를 통해 TSO의 출력지령에 응답한 그래프이다. 가능한 PCS 용량 안에서 ESS의 충·방전이 수행되며, 적정 범위 안에서 출력 지령에 응답하는 것을 확인할 수 있다. 저장된 에너지를 출력이 급감한 상태에서 보조 출력에 참여하도록 유도함으로서, 다음 출력 제한 보조 시에 필요한 충전 가능량을 확보할 수 있다. Case 1에 설정된 최대·최소 지령 상태에서 기존에 발생했던 변동부분이 완화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8에 나타난 바와 같이, 해당 구간에서의 ESS 충·방전상태를 PCS 출력 전력량을 통해 확인해 보면, 기존에 지령 이상의 전력이 발생한 구간에서 ESS 충전을 통해 출력 제한을 보조하는

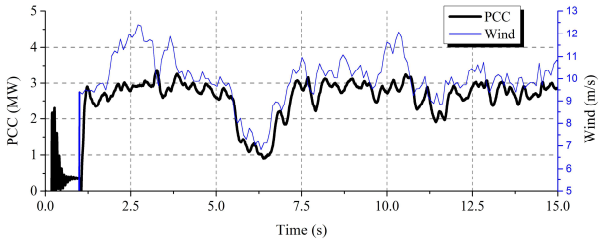

그림 6 피치제어 의존 시 입력 풍속과 풍력발전 출력
Fig. 6 Imposed wind speed and profile with basic pitch control

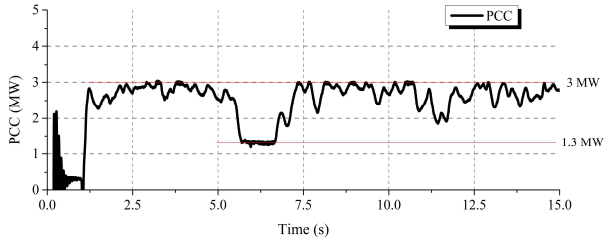

그림 7 ESS 보조 시 출력 지령 응답 그래프 (Case 1)
Fig. 7 Power profile with ESS support in Case 1

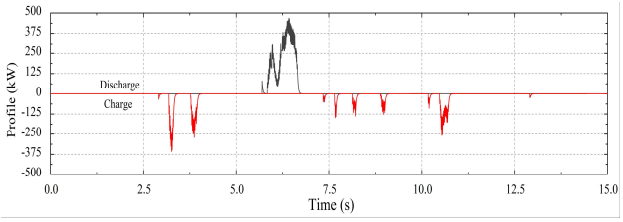

그림 8 Case 1에서 발생한 ESS 충·방전 출력량 그래프
Fig. 8 ESS profile curbe in Case 1

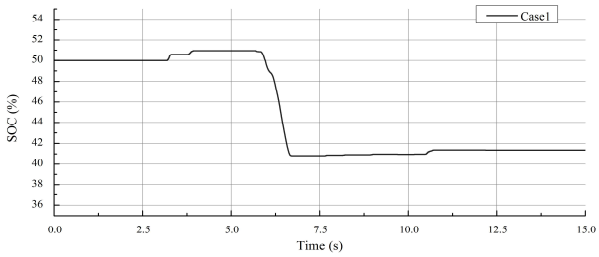

그림 9 Case 1에 대한 SOC 변화 그래프
Fig. 9 SOC fluctuation curve in Case 1

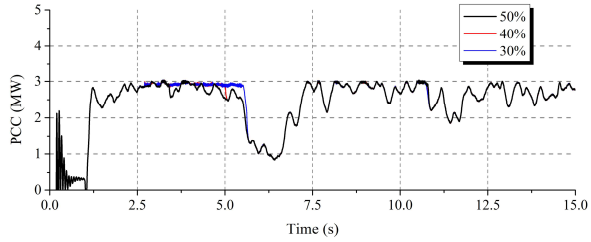

그림 10 ESS 보조 시 출력 지령 응답 그래프 (Case 2)
Fig. 10 Power profile with ESS support in Case 2

것을 확인할 수 있다. 설정된 1.3 MW 이하 구간에서는 저장된 에너지를 활용하여 지령을 준수하고, 다음 출력 보조를 대비하여 필요한 SOC를 확보할 수 있도록 진행됨을 확인할 수 있다.

해당 제어 과정에서 발생하는 SOC 변화를 나타내면 그림 9와 같다. 초기 SOC 설정량에서 제한 보조 제어가 진행되면 에너지가 누적된다. 별다른 방전 지령이 입력되지 않으면, 반복적인 충전으로 SOC가 누적되며, 운영자가 누적된 에너지를 필요시 활용할 수 있다. SOC 및 수급관리 측면에서 방전지령을 설정하면 그림에 나타난 바와 같이 에너지활용이 가능하다.

설정된 ESS 용량을 기반으로 지속적으로 출력제한을 보조할 수 있는지 확인하기 위해 추가 시뮬레이션 모의를 진행하였다. 제어과정에서 임의로 SOC 설정 값을 적용하고 해당 SOC 안에서 고정적으로 지령 값을 준수했을 시(일정 출력 모의) SOC 감소를 확인하고자 한다. 설정된 에너지용량의 경우, 기존 ESS 용량에 비해 상당히 작은 값으로서, 고정적인 출력을 지속적으로 내도록 보조하기에는 한계가 있을 것으로 예상되나, SOC의 순간적인 소비를 위해 고정적인 출력을 설정한다면, 계통 운영 측면에 긍정적인 영향을 줌과 동시에 추가적인 SOC 충전 가능량을 확보할 수 있는 보조적 제어 기법으로 고려될 수 있을 것으로 보인다.

그림 10은 추가 사례 연구로서 SOC 최저 유지량 설정 값을 50, 40, 30%로 고정하고 출력 보조를 모의한 그래프이다. 해당 SOC 이상의 에너지는 지령 값을 추종하기 위해 지속적으로 소비되도록 제어되며, 사례연구에서는 3 MW 이하 풍력발전 출력 시 ESS의 공급이 진행되게 된다. 초기 SOC는 50%이며, SOC 기준을 50%로 설정한 사례연구의 경우에는, 추가로 충전된 양만 일정 출력에 활용된다. SOC 기준을 40%로 설정한 사례연구에서는, SOC가 40%가 될 때까지 고정 출력을 추종하고, 저장된 에너지가 감소하여 SOC가 40%에 도달한 경우에 고정출력을 위한 ESS 보조를 포기하게 된다. 마찬가지로 30%를 설정할 경우, 지정된 에너지 용량에 도달할 경우 더 이상 방전을 진행하지 않는다. 해당 사례 연구는 고정된 SOC 설정량을 바탕으로 출력 보조를 수행할 수 있는지 여부를 확인하고, ESS 지속적인 출력 보조 시에 어느 정도의 에너지가 요구되는지 확인하고자 구성하였다.

그림 11에 나타난 바와 같이 세 경우 모두 지속적인 고정출력은 어려운 것으로 나타나며, 방전량이 클수록 SOC 감소 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 순간적인 출력 보조를 위해 저장된 에너지를 활용하고, 출력 제한 보조를 위해 충전 가능량을 확보하는 차원에서 에너지 관리를 수행해야 할 것으로 판단된다. 결국 출력 제한을 위해서는 소규모 ESS 용량으로도 충분한 효과를 나타낼 수 있는 것으로 나타나며, 해당 제한 기법을 통해 계통안정성에 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 평가된다.

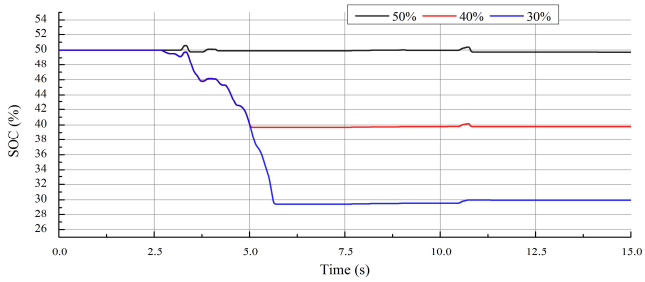

그림 11 Case 2에 대한 SOC 변화 그래프
Fig. 11 SOC fluctuation curve in Case 2

두 사례연구에 대해서 SOC 변화 곡선을 확인하면, 의도적으로 ESS 출력 지령을 설정하면 빠르게 SOC가 감소하지만, 최대 지령 입력 시 출력 제한을 위한 ESS 보조는 적정 범위 안에서 제어가 진행됨을 확인할 수 있다. ESS 보조제어의 목적으로 단순 출력 제한을 위해서 SOC를 제어하는 경우, 시뮬레이션 결과와 같이 안정적인 범위 안에서 SOC가 유지됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지 변동성에 주목하여, 소규모 ESS 용량을 기반으로 한 출력 제한 보조기법을 제시하고, 해당 시스템 및 알고리즘을 대상으로 용량산정을 진행, SOC 변동을 확인

하였다. 제안한 ESS 제어기법을 기반으로, 580 Wh의 저용량 ESS를 활용하여 계통운영자의 지령에 보다 수월하게 응답하고, 기존 출력 제한에 필요했던 기계적 제어의 부담을 완화할 수 있음을 확인하고자 하였다. 사례연구의 충전과정에서, 반복적인 출력 보조가 적정함을 도시하였으며, 해당 에너지를 방전에 활용하는 경우, 지속적인 보조는 어려우나 SOC 유지관리를 목적으로 한 계획적 출력 보조에 활용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구결과는 상대적으로 적은 설비용량을 가지는 소규모 계통이나, 신재생에너지 비중이 높은 시스템을 대상으로 활용될 수 있으며, 소규모 ESS 구성 시 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 ESS의 빠른 응답특성과 기계적 제어의 신속한 협조를 가정하여 수행된 분석으로, 정확한 적용 대상이 도출된다면 설비 특성을 고려하여 응용해야 할 것이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 한밭대학교 신임교수연구비의 지원을 받았음.

References

[1] Soo-Hwan Cho, “A Synthetical Study on Power Quality Measurement of Grid-Connected Wind Turbine Generating System based on the IEC International Standards,” Transactions on KIEE, 63(2), pp. 197-201, 2014. 2.

[2] Ungjin Oh, Yeonchan Lee, Jaeseok Choi, Yongbeum Yoon, Byunghoon Chang, Jun-Min Cha, “Development of Reliability Contribution Function of Power System including Wind Turbine Generators combined with Battery Energy Storage System,” Transactions on KIEE, 65(3), pp. 371-381, 2016. 3.

[3] Ungjin Oh, Yeonchan Lee, Jaeseok Choi, Jintaek Lim, “Capacity Credit and Reasonable ESS Evaluation of Power System Including WTG combined with Battery Energy Storage System,” Transactions on KIEE, 65(6), pp. 923-933, 2016. 6.

[4] Quanyuan, J., Haisheng, H., “Wavelet-Based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing out Wind Power Fluctuations,” IEEE Trans. Power Systems, 28(2), pp. 1363-1372, 2013, 5.

[5] S. Jung, Y.-T. Yoon, G. Jang, “Adaptive Curtailment Plan with Energy Storage for AC/DC Combined Distribution Systems,” sustainability, 8(8), 2016. 8.

[6] S. Jung, G. Jang, “A Loss Minimization Method on a reactive power supply process for Wind Farm,” IEEE Transactions on Power System, (Online available).

[7] S. Jung, G. Jang, “Development of Optimal Power Control Scheme for wave-offshore Hybrid Generation System,” Energies, Vol. 8, Issue 9, pp. 9009-9028, Aug. 2015.

[8] Y. Oh, K. Kim, H. Kim, I. Paek, “Control algorithm of a floating wind turbine for reduction of tower loads and power fluctuation,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16(9), pp. 2041-2048, 2015. 8.

[9] Jun Yeong Yun, Garam Yu, Kyung Soo Kook, Do Hwan Rho, Byung Hoon Chang, “SOC-based Control Strategy of Battery Energy Storage System for Power System Frequency Regulation,” Transactions on KIEE, 63(5), pp. 622-628, 2014. 5.

[10] Rodriquez-Amenedo, J. L., Arnalte, S., Burgos, J. C. “Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines,” IEEE Trans. Energy Conversions, 17(2), pp. 279-284, 2002. 6.

[11] Bunjongjit, K., Kumsuwan, Y., Sriuthaisiriwong, Y. “An implementation of three-level BTB NPC voltage source converter based-PMSG wind energy conversion system,” TENCON, pp. 1-5, 2014. 10.

[12] V66-1.75MW, http://www.homepages.ucl.ac.uk/~uceseug/Fluids2/Wind_Turbines/Blyth_Wind_Farm/Vestas_V66.pdf.

[13] California ISO, “Participation of Limited Energy Storage Resources in CAISO Electricity Markets”, discussion paper, 2009.

저 자 소 개

정 승 민 (Seungmin Jung)

1986년 10월 12일생. 2010년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 국립한밭대학교 전기공학과 조교수.