

신재생에너지원 기반 분산전원의 수용성을 높이기 위한 배전급 ESS 협조 운영 방안

이희진*, 최동희**

A Study on Coordinated Strategy for Distributed ESS for High Variable Renewable Energy Penetration

Hee-Jin Lee*, DongHee CHOI**

이 논문은 2019-2021학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음 (2019.09.01.-2021.08.31.)

요 약

신재생에너지원 기반 분산전원은 신재생에너지원의 특성에 따라 출력변동이 심한 특징을 가지고 있으며, 전력계통에 큰 부담이 될 수 있다. 최근 들어 배전계통에도 다양한 분산전원이 연계되면서 배전계통 내 전압, 고장전류, 역조류 등의 다양한 문제가 발생할 가능성이 높아지고 있다. 앞서 언급된 문제가 해결된다고 할지라도, 배전계통 내의 신재생에너지원 기반의 분산전원의 수용성을 높이기 위해서는 분산전원의 출력변동성을 완화시켜야 한다. 본 논문에서는 신재생에너지 기반 분산전원의 수용성을 높이기 위한 배전급 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS) 협조 운영방안을 제안한다. 이를 위하여 독립도서 마이크로그리드 계통을 모델링 후 다양한 분산전원 연계 시나리오를 통하여 분산전원 탈락과 부하탈락에 대한 연계 가능한 분산전원 수용률을 정의한다. 이를 바탕으로 배전급 ESS의 드롭제어 기반 협조제어를 통하여 분산전원의 수용성을 증대시킬 수 있는 방안을 제안하고, 디젤발전기 용량대비 ESS의 투입용량에 따른 분산전원 수용성 증대 효과를 확인하였다.

Abstract

With the introduction of variable renewable energy (VRE) based distributed generation (DG), numerous studies has been carried out for increasing the penetration of VRE in a power system. Due to its intrinsic nature of VRE, the DGs have own characteristics such as intermittency and uncertainty. Recently, the high penetration of VRE based DGs in a distribution system, many problems arise like voltage, short-circuit current, and reverse power flow problems. Even though aforementioned problems are resolved properly, the intermittency of DG must be managed effectively for high penetration of DG in a distribution system. This paper proposed a coordinated strategy for ESS to increase penetration of VRE. At first, the stand-alone microgrid of islanded area is modeled and several penetration scenarios are presented by considering their intermittencies to define the penetration level of DG. And then, the coordinated strategy is proposed to increase the penetration level of DG in the system.

Keywords

distributed generation, power system, frequency stability, penetration level, energy storage system, droop control

* 금오공과대학교 전자공학부
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1306-8771>
** 청주대학교 융합전자공학부(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5911-8335>

• Received: Jul. 05, 2021, Revised: Jul. 22, 2021, Accepted: Jul. 25, 2021
• Corresponding Author: DongHee CHOI
Devison of Converged Electronic Engineering, Cheongju University,
Cheongwon-gu, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea.
Tel.: +82-43-229-8458, Email: hecchoi@cju.ac.kr

1. 서 론

기후 변화에 세계적인 노력의 일환으로 우리나라에서도 다양한 노력이 지속되고 있다. 저탄소녹색성장기본법 및 그린뉴딜정책등을 통하여 다양한 신재생에너지원 기반 발전원들을 계통에 도입하기 위한 노력을 하고 있다. 재생에너지 3020은 2030년까지 재생에너지 기반 발전원의 발전량을 전체 발전량의 20% 이상을 목표로 하는 정부의 정책으로써, 재생에너지 기반의 발전원 중 약 70% 이상을 태양광 발전과 풍력 발전으로 하는 것을 목표로 하고 있다. 태양광 발전과 풍력발전은 대표적인 변동성 재생에너지(VRE, Variable Renewable Energy)로써 태양광과 바람의 특성상 변동성이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 VRE 기반의 발전원들이 전력계통에 높은 비율로 연계가 된다면, 기존 동기발전기들의 발전원들을 대체하여 계통 전체의 관성이 낮아지며, VRE에 따른 변동성이 커지는 어려움이 발생할 수 있다.

기존의 신재생에너지원 기반 분산전원은 일반적으로 대규모 팜(Farm) 형태로 별도의 변전설비를 통하여 전력계통의 송전망에 연결이 되었다. 대규모 신재생에너지 기반 분산전원 연계에 따른 출력의 변동성 및 계통의 안정성을 확보하기 위한 연구는 활발히 진행되어 왔다[1]-[3]. 하지만 재생에너지 3020 달성을 위해서는, 기존의 대규모 팜 형태의 분산전원 뿐만아니라, 규모가 조금 더 작은 다수의 신재생에너지원 기반 분산전원이 배전계통에 적극적으로 연계될 필요가 있다. 이 때, 분산전원의 배전계통 연계를 위한 그 동안의 연구는 배전계통의 고장전류, 역조류, 전압 관점에 관한 연구가 우선시 되어 왔다[4][5]. 이를 극복하기 위하여 배전계통내의 무효전력을 조절하는 등의 다양한 방법들을 통하여, 배전계통 내의 분산전원의 수용률을 높이는 방안들이 제시되어 왔다[6]-[10].

이러한 문제들이 적절하게 해결된다고 할지라도, 분산전원의 수용성 관점에서 보면 계통내의 변화시, 전압과 주파수가 안정적인 운영범위 내로 유지되는 것이 중요하다. 기존의 배전계통 연구에서는 계통과 연계되는 지점을 일반적으로 강한 전압이 유지되는 무한 모션으로 가정하였지만, 계통의 신재

생에너지원 기반 분산전원이 많아지게 되면, 계통의 관성이 감소하여 더 이상 동일한 관점으로 해석을 할 수 없을 가능성도 존재한다. 이러한 배전계통뿐만 아니라, 독립된 도서 계통의 경우에서도 적절한 분산전원 수용 한계를 평가하는 방안에 대한 분석이 필요하다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장은 배전시스템 내의 분산전원의 수용성을 분석하기 위한 시스템으로써, 독립 마이크로그리드의 모델링 및 협조 운영을 위한 ESS 모델링 및 드롭제어 방안을 제안한다. 3장은 제안한 실계통에서의 분산전원 탈락과 부하 탈락 시의 준정상상태 주파수 관점에서의 분산전원 수용성에 대한 분석을 진행하였다. 이를 바탕으로 4장에서는 ESS 드롭제어 기반의 협조 방안을 제시하고 이를 바탕으로 분산전원 수용성 분석을 진행하였고, 5장에서 배전급 ESS 협조 제어를 통한 분산전원 수용성 향상에 대한 분석을 결론으로 제안하였다. 모든 시뮬레이션은 DiGSILENT사의 PowerFactory[®]로 진행하였다.

II. 대상 배전 계통 모델링

2.1 독립도서 마이크로그리드 계통

본 연구에 적용한 독립도서 마이크로그리드 배전계통은 그림 1에서 확인할 수 있듯이, 디젤발전기 300kW 3대와 500kW 4대로 총 2,900kW의 설비용량이 있다. 7대의 디젤발전기는 3대의 주변압기를 통해 2개의 배전선로로 전력을 공급하며, 각각의 배전선로는 선로 중간에 2개의 타이라인(Tie-line)으로 이어져 있다. 해당 계통에 태양광 500kW, 풍력 1,500kW, 에너지 저장장치(ESS) 9,000kWh, 그리고 전력변환장치(PCS, Power Conversion System) 2,500kW를 추가될 예정이 되어 있으며, 최대 전력기준 1875kW의 부하소비를 가정 하였다.

2.2 ESS 모델링

에너지 저장장치 시스템(ESS, Energy Storage System)는 계통 연계형 ESS로써 그림 2와 같이 모델링을 하였다.

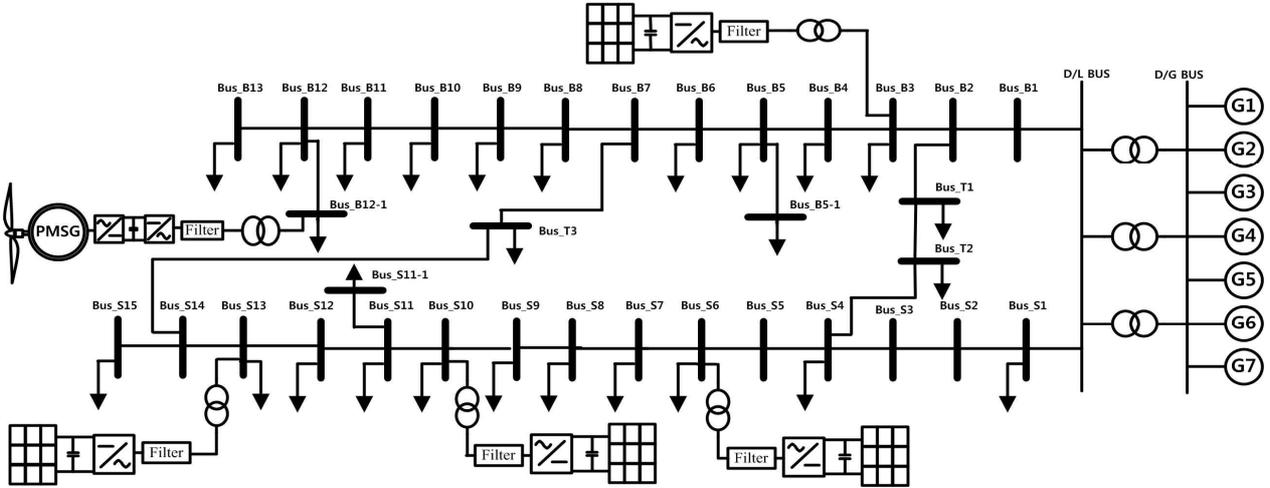


그림 1. 독립 마이크로그리드 배전계통 구성도
 Fig. 1. Single-line diagram of distribution system for stand-alone microgrid

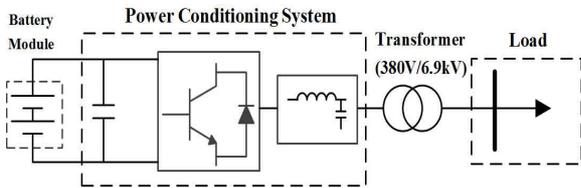


그림 2. ESS 모델링
 Fig. 2. ESS modeling

배터리 및 변환장치(PCS) 변압기 그리고 부하로 구성되어있다. ESS를 제어하는 가장 일반적인 방식은, ESS의 유·무효전력 출력을 제어하는 방식이다. 이 때, 유·무효전력은 d-q축 변환을 하여 기준전류를 이용하여 제어하는 것이 일반적이며 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P = V_d I_d \quad (1)$$

$$Q = -V_q I_q \quad (2)$$

$$V_{d-ref} = R i_{d-ref} + L \frac{d i_{d-ref}}{dt} - \omega L i_{q-ref} + V_d \quad (3)$$

$$V_{q-ref} = R i_{q-ref} + L \frac{d i_{q-ref}}{dt} + \omega L i_{d-ref} + V_q \quad (4)$$

여기에서 P 는 유효전력, Q 는 무효전력을 나타낸다. $V_d, V_q, V_{d-ref}, V_{q-ref}$ 는 각각 d축 전압, q축 전압, d축 전압 기준신호, q축 전압 기준신호를 나타낸다. 또한, $I_d, I_q, i_{d-ref}, i_{q-ref}$ 는 각각 d축

전류, q축 전류, d축 전류 기준신호, q축 전류 기준신호를 나타낸다. ω 는 주파수, R 와 L 는 계통연계 지점과 인버터 사이의 저항과 인덕턴스를 나타낸다.

그림 3은 위의 식을 블록도로 표현한 제어기이다. 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해서 PI 제어기를 사용하여 피드백을 할 수 있게 하였다. 유효전력 및 무효전력 기준치에 따라 d축 및 q축 기준전류를 만드는 왼쪽 부분과 d축 및 q축 전류제어를 하는 오른쪽 부분으로 나누어 구성된다.

계통에 연계된 ESS는 부하의 변동에 대응하기 위하여 드롭(Droop) 운전 모드로도 운전이 가능하며, 이 운전 모드는 부하량 변동에 따라 미리 설정된 드롭 계수에 의해 전압 및 주파수를 제어하는 운전 형태이다. 이에 대한 유효전력-주파수, 무효전력-전압 관계식은 다음과 같다.

$$f_i - f_{ref} = -m_P (P_i - P_{ref}) \quad (5)$$

$$V_i - V_{ref} = -n_Q (Q_i - Q_{ref}) \quad (6)$$

위 식에서 i 는 각 인버터를 나타내며 f_{ref}, V_{ref} 는 주파수 기준신호와 전압 기준신호를 나타낸다. P_i, Q_i 는 측정된 유효전력과 무효전력을 P_{ref}, Q_{ref} 는 각각 유효전력 기준신호와 무효전력 기준신호를 나타낸다. 또한, m_P, n_Q 는 각각 유효전력에 대한 드롭 계수, 무효전력에 대한 드롭 계수를 나타낸다.

그림 4는 드롭제어를 블록도로 표현한 것으로써,

미리 설정된 드롭 계수에 따라 유효전력 및 무효전력을 제어하는 왼쪽 부분과 기존의 유·무효전력 제어 모드에서 사용된 제어기인 오른쪽 부분으로 나누어 볼 수 있다.

III. 배전계통 수용한계 분석

배전계통의 분산전원의 수용한계는 정상상태 시의 다양한 조건 (전압, 고장전류 등)으로 분석될 수 있으며, 정상상태에서 시스템이 안정된다면, 상정상상태의 시스템 안정 또한 검토가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 배전 계통의 수용한계를 과도 상태에서 검토를 하는 것으로 한정하여, 분산전원 탈락 및 부하 변동 상황을 가정하여 분석하였다.

3.1 분산전원 탈락

분산전원 탈락의 경우 독립도서 마이크로그리드의 최대부하를 고려하였을 때, 가능한 디젤발전기의 조합은 4가지이며 표 1과 같이 정리된다.

표 1. 최대부하를 고려한 디젤 발전 조합

Table 1. Diesel generators combination by considering peak load

300 kW	1	1	1	2
500 kW	-	1	2	3
Total generated power by diesel generators [kW]	300	800	1300	2100

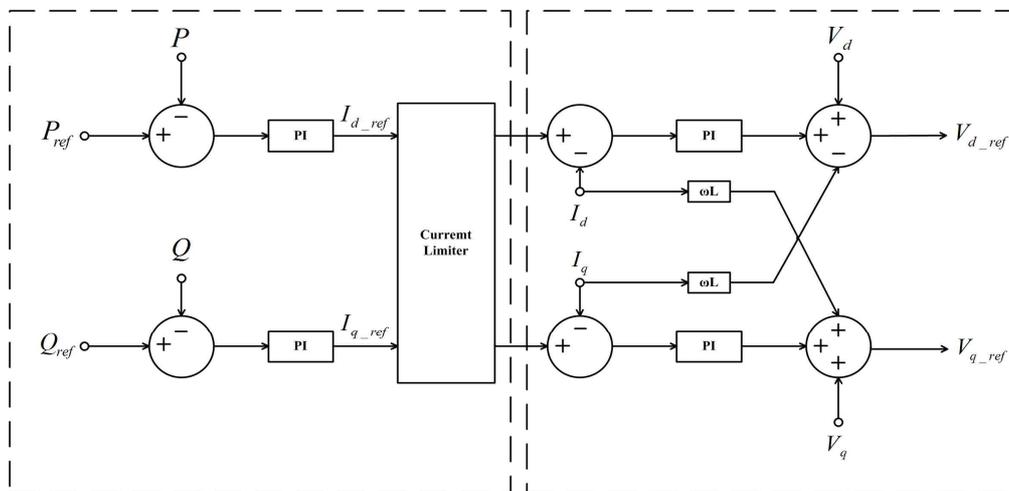


그림 3. ESS 유·무효전력 제어기

Fig. 3. P-Q controller for ESS

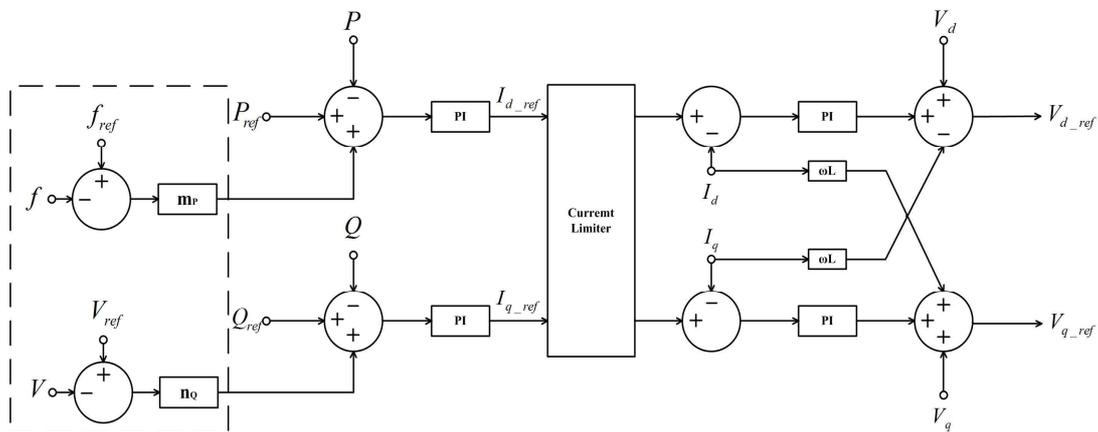


그림 4. ESS 드롭 제어기

Fig. 4. Droop controller for ESS

이에 대응되는 부하 및 분산전원 용량은 표 2와 같이 6가지로 정의할 수 있다.

표 2. 분산전원 탈락 용량

Table 2. DG trip capacity by considering DG penetration

Load level	Capacity of DG		
	10% of diesel generation	30% of diesel generation	60% of diesel generation
20% of diesel generation	10% Trip	-	-
50% of diesel generation	10% Trip	30% Trip	-
80% of diesel generation	10% Trip	30% Trip	60% Trip

표 1과 2에서 정리한 케이스를 조합하면, 분산전원 수용에 따른 24가지의 분산전원 탈락 조합이 있다. 해당 케이스에 대하여 전압 및 고장전류 문제는 없으며, 표 2에 정리되어 있는 연계된 분산전원 전체 탈락을 1초에 가정하여 모든 상태에 대하여 과도 상태의 주파수를 보면 그림 5와 같다.

그림 5에서 확인할 수 있듯이, 디젤발전기의 조합이나 부하의 비율과 무관하게 분산전원이 10% 탈락한 경우 준정상상태의 주파수가 59.7Hz, 30% 탈락한 경우는 59.1Hz, 60% 탈락한 경우는 58.2Hz ~ 58.3Hz 정도까지 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 분산전원의 실제 연계 용량과는 상관없이 디젤발전기의 용량 대비 분산전원의 연계 용량에 따라 주파수 응답이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

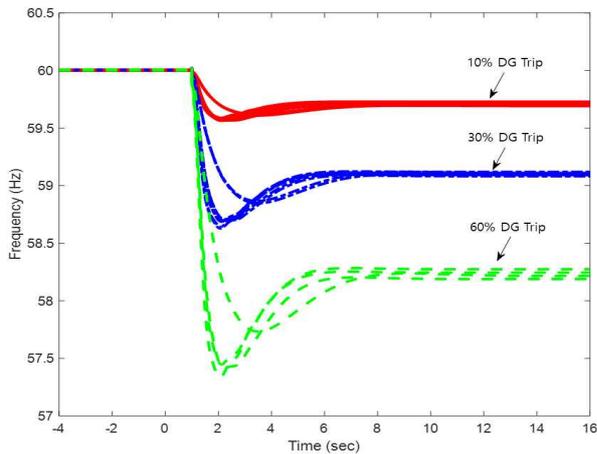


그림 5. 분산전원 수용률에 따른 분산전원 탈락에 대한 주파수 응답

Fig. 5. Frequency responses for DG trip by considering DG penetration

분산전원이 적게 탈락한 경우는 주파수가 적게 감소하며, 더 많이 탈락한 경우는 주파수가 이에 비례하여 감소한다. 따라서 계통의 준 정상상태의 주파수 기준을 59Hz로 가정할 경우 가능한 분산전원의 최대 연계 비율은 약 30%로 결정되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 부하 탈락

부하 탈락의 경우 가능한 디젤발전기 조합은 표 1과 동일하고, 이에 대응되는 부하 및 분산전원 조합을 표 3과 같이 6가지로 가정하였을 때, 총 24가지의 부하 탈락 조합이 있다.

표 3. 분산전원 수용률을 고려한 부하 탈락 용량

Table 3. Load trip capacity by considering DG penetration

Load level	Capacity of DG		
	10% of diesel generation	30% of diesel generation	60% of diesel generation
20% of diesel generation	10% Trip	-	-
50% of diesel generation	40% Trip	20% Trip	-
80% of diesel generation	70% Trip	50% Trip	20% Trip

1초에 연계되어있는 부하를 시스템이 붕괴 되지 않는 조건에서 최대한 큰 부하를 탈락을 가정하였을 때, 과도 상태 주파수는 그림 6과 같다.

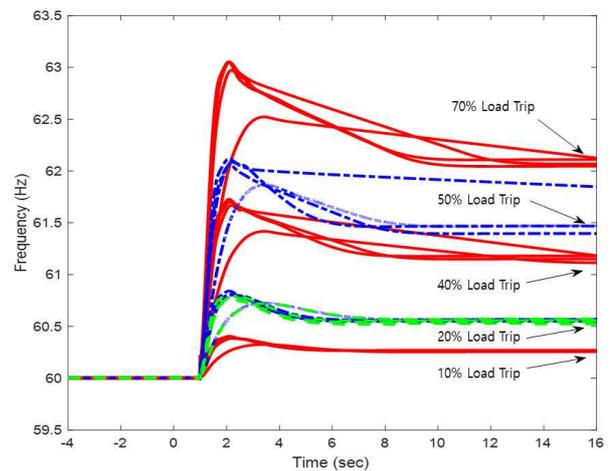


그림 6. 분산전원 수용률에 따른 부하 탈락에 대한 주파수 응답

Fig. 6. Frequency responses for load trip by considering DG penetration

부하의 탈락 비율이 증가할수록 주파수가 더 많이 증가하는 경향은 24개 케이스 전체에 대해 동일하게 일어난다. 부하탈락 비율에 비례하여 준 정상상태 주파수의 증가량이 정해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에서 확인할 수 있듯이, 가장 큰 폭으로 준정상상태 주파수가 증가된 경우는 부하가 80%, 분산전원이 10% 연계된 경우이다. 이 경우는 부하가 70% 탈락한 후 준정상상태 주파수가 62Hz ~ 62.2Hz로 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 같은 80% 부하수준에서 분산전원의 연계 비율이 60%로 높아진다면 부하가 20% 탈락하는 것을 가정할 수 있으며, 그 이상 탈락하는 경우는 계통의 유효전력 밸런스가 맞지 않아 계통이 붕괴하기 때문이다. 이 때 주파수는 60.5Hz ~ 60.6Hz 사이에서 안정화되는 것을 확인할 수 있다. 모든 경우에서 탈락되는 부하의 실제 부하의 크기 보다는 탈락되는 부하의 비율에 비례하여 주파수가 증가하는 확인할 수 있다.

IV. 배전급 ESS 협조방안

4.1 디젤발전기와 ESS 드롭제어 협조 방안

ESS가 드롭 제어를 하고 있을 때, 분산전원 탈락, 부하 탈락, 그리고 디젤발전기 탈락, 총 세 가지 경우에 대해서 계통 해석을 진행하였다. 분산전원이 탈락하는 경우와 부하가 탈락하는 경우 모두, 각 발전기간의 드롭 관계식에 의해서 주파수 수렴점이 정해지는 것을 확인하였다. 이 때, 유효전력 변화량인 ΔP 가 p.u. 단위이므로 설치되는 ESS의 용량에 따라 주파수 응답이 달랐다. 디젤발전기만으로 이루어진 계통에서는 다음과 같이 간단한 식으로 주파수 변동폭이 구해졌다.

$$\Delta f_{p.u.} = -\left(\frac{1}{R_{DROOP}}\right) \times \Delta P_{p.u.} \quad (7)$$

$$\Delta f_{Hz} = \Delta f_{p.u.} \times 60 \text{ Hz} \quad (8)$$

여기에서 디젤발전기의 드롭 계수를 20으로 가정하면 식 (7), (8)은 아래와 같이 변형시킬 수 있다.

$$\Delta f_{Hz} = -\frac{\Delta P_{p.u.}}{R_{DROOP.Diesel}} = -3[\text{Hz}] \times \Delta P_{p.u.} \quad (9)$$

따라서, 준정상상태 주파수 1 [Hz]와 디젤발전기의 드롭계수를 0.05로 가정할 경우, 분산전원 수용률이 디젤발전기 용량 대비 약 33.3% 정도 가능한 것을 알 수 있다. 배전계통의 분산전원의 수용률을 높이기 위하여 ESS 설치를 가정하고, 그 제어를 0.01의 드롭계수를 가지는 드롭 제어를 한다고 가정하였을 때, 배전 계통 내의 준정상상태의 주파수 변화량은 아래 식으로 정의될 수 있다. 이 때, 배전계통에 연계되는 ESS의 용량을 디젤발전기 용량의 100%로 가정하면 준정상상태의 주파수는 식 (10)의 오른쪽 항과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta f_{Hz} = -\frac{\Delta P_{p.u.}}{\sum R_{DROOP}} \times -0.5[\text{Hz}] \times \Delta P_{p.u.} \quad (10)$$

마찬가지로, 연계되는 ESS의 용량을 디젤발전기 용량의 50%로 가정하였을 때 준정상상태의 주파수는 아래 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta f_{Hz} \simeq -0.857[\text{Hz}] \times \Delta P_{p.u.} \quad (11)$$

따라서, 계통에 연계하는 ESS의 용량이 클수록 주파수 변동폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 준정상상태의 주파수 변화량을 기준으로 한다면 식 (10), (11)에 의하여, ESS가 디젤발전기 용량의 50% 크기로 연계된 경우 분산전원은 디젤발전기 용량 대비 약 116.55% 정도 수용이 가능하다. ESS가 디젤발전기 용량의 100% 크기로 연계된 경우, 분산전원은 디젤발전기 용량 대비 약 199.8% 정도 수용이 가능하다.

하지만, 분산전원 수용률을 분석하기 위해 드롭 계수와 ESS의 최대용량을 고려하면, 드롭만을 고려한 주파수 기준 분석보다 더 작은 분산전원 수용한 계치가 나오게 된다. 연계된 ESS의 용량의 이 디젤발전기의 용량 대비 50%이고 100의 드롭 계수를 가진다고 가정 하였을 때, 계통 내의 유효전력이 디젤발전기의 용량 대비 70% 변화할 때 연계된 ESS는 최대 출력에 도달하게 된다. 즉, 이보다 더 큰 유효전력이 변하는 경우, ESS는 그 출력 최대치를

넘게 되어 제어할 수 없게 된다. 또한 ESS의 용량이 디젤발전기의 용량 대비 100%인 시나리오에서는, 유효전력이 디젤발전기의 용량 대비 120% 변할 때, ESS가 최대치까지 출력을 올리게 된다. 이러한 관계는 아래 식과 같이 연계된 ESS와 디젤발전기의 드롭 관계식을 활용하여 얻을 수 있다.

$$-\frac{\Delta P_{SG,p.u.}}{R_{DROOP,Diesel}} = -\frac{\Delta P_{ESS,p.u.}}{R_{DROOP,ESS}} \quad (11)$$

ESS의 유효전력이 1 p.u. 변하는 것을 가정할 경우($\Delta P_{ESS,p.u.} = 1$) 동일한 주파수 변화에 대하여, 디젤발전기의 유효전력은 드롭계수에 비례하여 분배되기 때문에 0.2 p.u. 변하게 된다($\Delta P_{Diesel,p.u.} = 0.2$). 따라서, ESS의 용량과 드롭계수를 고려하였을 경우, 분산전원 수용한계는 디젤발전기 용량 대비 ESS의 용량에 20%를 더한 용량이 가능하다.

4.2 디젤발전기와 ESS 드롭제어 협조를 통한 분산전원 수용률 분석 (분산전원 탈락)

디젤발전기와 연계된 ESS의 드롭제어 협조를 통한 분산전원 수용률을 4.1에서 확인하였다. 제안한 방안을 가지고 III에서 확인한 24개의 케이스 중 디젤발전기 용량 1300kW를 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. ESS의 연계위치는 그림 1의 D/L 모선에 연계를 가정하였다. 드롭 계수는 디젤발전기의 경우 0.05(5%)이며, ESS의 드롭 계수는 0.01(1%)이다. 이 때 해당 디젤발전기 용량 발전 시 분산전원 탈락에 대한 준정상상태 주파수 변화량에 대한 결과는 표 4와 같다.

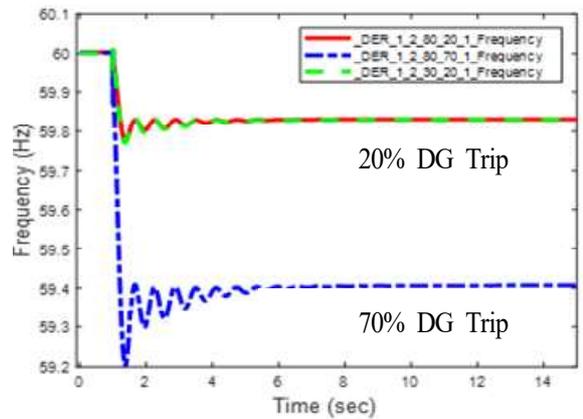
유효전력 변화량은 p.u. 단위이므로 ESS의 용량이 커질수록 ESS의 실제 유효전력 변화량 또한 커지게 된다. 따라서 ESS의 용량이 클수록 디젤발전기의 유효전력 변화량이 작아지게 된다. 이 때, 디젤발전기의 드롭 계수는 일정하므로 주파수 변화량이 작아지게 된다. 결과적으로 ESS의 용량이 클수록 주파수 변화량이 작아지는 것을 알 수 있다.

표 4에서 확인할 수 있듯이, 계통을 디젤발전기만으로 운영 시, 분산전원이 70% 탈락되는 경우는 주파수 변화량이 2.1Hz로 최종 주파수가 57.9Hz로 수

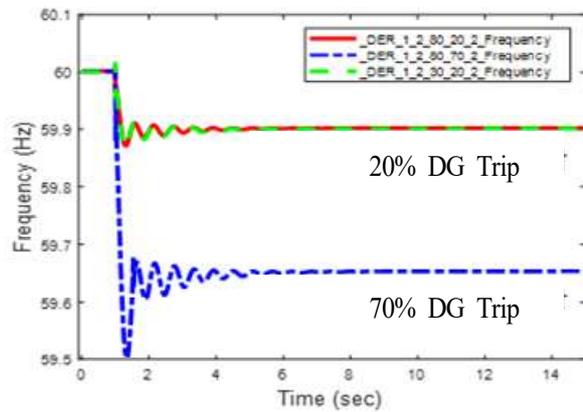
렴하는 것을 알 수 있다. 반면, ESS를 연계한 경우, 그 용량이 50%인 경우와 100%인 경우 모두 최종 주파수가 59Hz 보다 위에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다(각각, 59.4Hz, 59.65Hz). 따라서 ESS가 연계됨에 따라 분산전원의 수용한계가 더 커질 수 있음을 알 수 있다.

표 4 ESS 용량 대비 분산전원 탈락시 주파수 변화량
Table 4 Frequency changes by considering ESS capacity when DGs are tripped

ESS installation capacity compared to diesel generation	DG trip ratio compared to diesel generation	Change of quasi-steady state frequency (Δf_{Hz})
0%	20%	-0.6Hz
	70%	-2.1Hz
50%	20%	-0.17Hz
	70%	-0.6Hz
100%	20%	-0.1Hz
	70%	-0.35Hz



(a) ESS: 50%



(b) ESS: 100%

그림 7. 분산전원 탈락 시 주파수

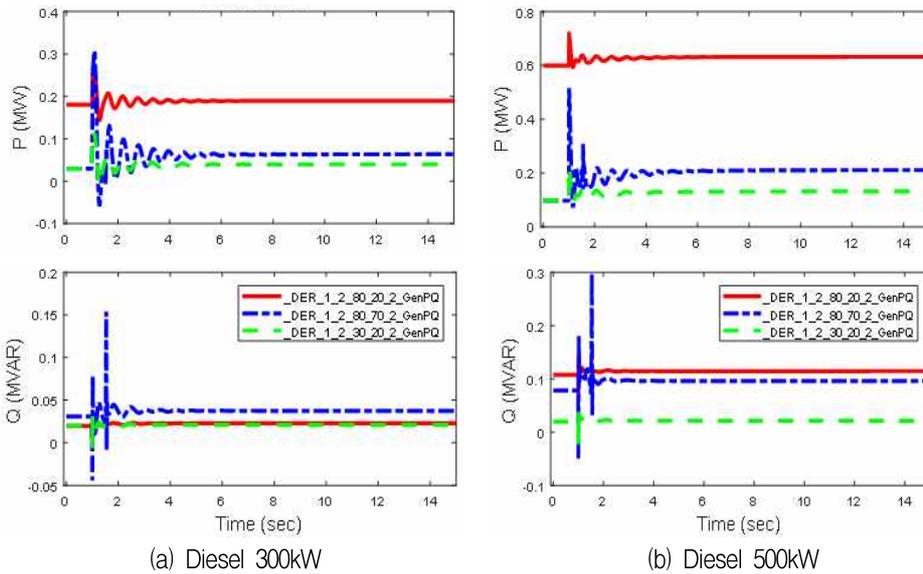
Fig. 7. Frequency responses for DG trip when ESS is installed

표 4에 요약된 결과에 대한 ESS 연계 시 주파수 응답 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)의 결과는 ESS가 디젤발전기 용량 대비 50%인 경우에 대한 그래프이다.

결과를 보면 분산전원이 20% 탈락한 경우는 59.83Hz로, 분산전원이 70%로 탈락한 경우는 주파수가 이보다 더 많이 떨어져서 약 59.4Hz에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 오른쪽 결과는 ESS가 디젤발전기 용량 대비 100% 연계되어 있는 경우이며, 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이 경

우에도 ESS 용량이 50%인 결과와 비교하면, 주파수 감소폭이 더 줄어든 것을 확인할 수 있다. 즉, 디젤발전기 용량 대비 20%의 분산전원이 탈락한 경우는 주파수가 59.9Hz까지 떨어졌으며, 70% 탈락한 경우는 59.65Hz까지 떨어진 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 표 4에서 제안한 분산전원 탈락 시의 ESS의 100% 연계를 가정하였을 경우, 디젤발전기의 유효전력 및 무효전력 출력을 나타낸다.

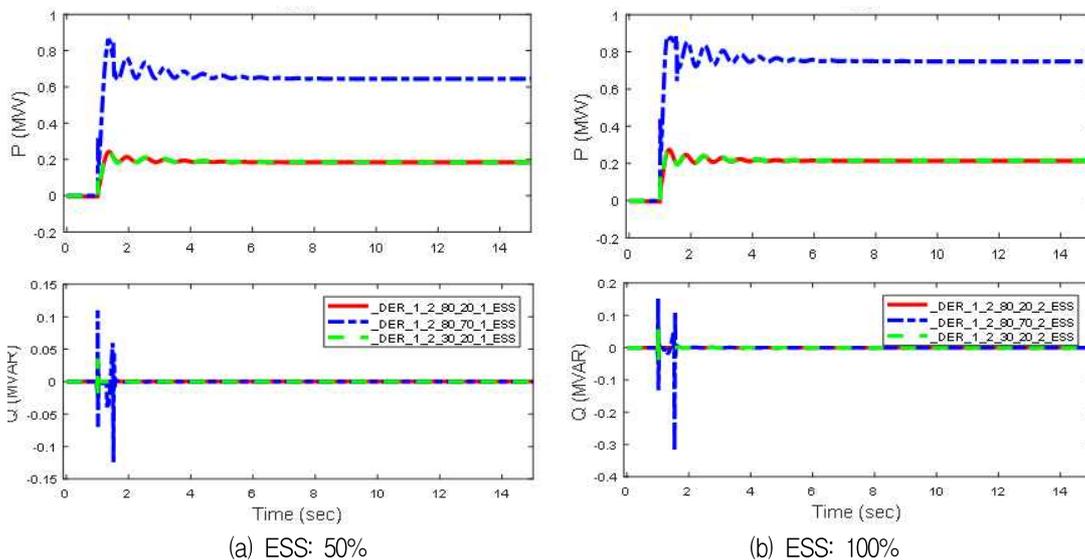


(a) Diesel 300kW

(b) Diesel 500kW

그림 8. 디젤발전기 출력 (ESS 100% 연계)

Fig. 8. Real and reactive power responses of diesel generator when the capacity of ESS is 100% of diesel



(a) ESS: 50%

(b) ESS: 100%

그림 9. ESS 출력

Fig. 9. Real and reactive power responses of ESS when DGs are tripped

연계된 ESS의 초기 발전량을 0kW로 가정하였기 때문에 초기 디젤발전기 출력은 부하량에서 분산발전량의 차이를 나타낸다. 분산전원이 탈락한 후에는 연계된 ESS와 디젤발전기의 출력량은 앞서 정의된 드롭 계수에 따라 출력을 내주는 것을 확인할 수 있다.

분산전원 탈락시 ESS의 출력 변화는 그림 9와 같다. 왼쪽의 경우, ESS가 디젤발전기의 용량 대비 50% 연계되어있는 경우이며, 오른쪽의 경우, ESS가 디젤발전기의 용량 대비 100% 연계되어있는 경우이다. 모든 경우 ESS의 초기 출력치는 0kW 이다.

ESS의 출력량은 분산전원 탈락 용량에서 디젤발전기의 유효전력 변화량의 차이만큼 내주게 된다. 따라서 ESS가 디젤발전기 대비 50% 연계되어 있는 경우, 디젤발전기 대비 20%의 분산전원이 탈락하는 경우에는 안정적으로 운전이 가능하지만 70%의 분산전원이 탈락하는 경우에는 ESS가 최대용량까지 유효전력이 증가한다. 반면, ESS가 디젤발전기 대비 100% 연계되어 있는 경우, ESS는 최대용량까지 유효전력이 증가하지 않으며, 분산전원의 수용성이 증가한 것을 확인할 수 있다.

4.3 디젤발전기와 ESS 드롭제어 협조를 통한 분산전원 수용률 분석 (부하 탈락)

분산전원 탈락의 경우와 마찬가지로 부하 탈락의 경우도 디젤발전기가 1300kW의 용량이 연계된 상황에서 ESS의 연계 용량의 차이를 두어 분산전원의 수용성을 확인하였다. 부하 탈락 비율은 표 5에 나온 것과 같이 디젤발전기 용량 대비 10%, 60% (연계된 모든 부하의 탈락)에 대하여 분석을 하였고, 이 때 부하 탈락에 대한 준정상상태 주파수 변화량에 대한 결과는 표 5와 같다.

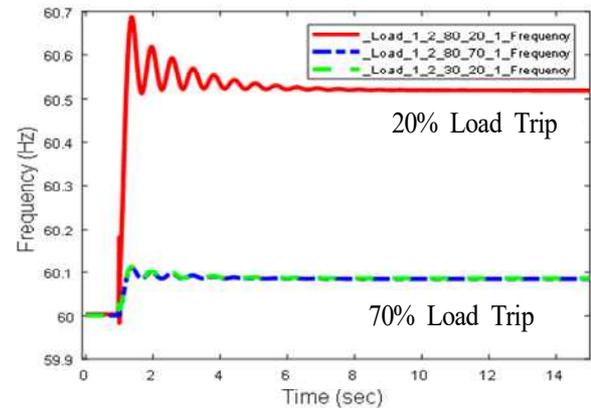
표 5를 보면 계통을 디젤발전기로만 운영 시, 부하가 60% 탈락되는 경우는 주파수 변화량이 1.8Hz로 최종 주파수가 61.8Hz로 수렴하는 것을 알 수 있다. 반면, ESS를 부착한 경우, 그 용량이 50%인 경우와 100%인 경우 모두 최종 주파수가 61Hz 보다 아래에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다 (각각, 60.51Hz, 60.3Hz). 따라서 부하 탈락의 경우에도

ESS가 설치됨에 따라 분산전원의 수용 가능 비율이 증가함을 확인할 수 있다.

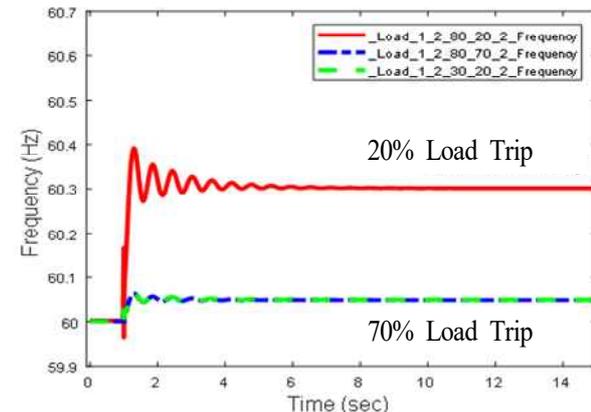
표 5 ESS 용량 대비 부하 탈락시 주파수 변화량
Table 5 Frequency changes by considering ESS capacity when loads are tripped

ESS Installation capacity compared to diesel generation	DG trip ratio compared to diesel generation	Change of quasi-steady state frequency (Δf_{Hz})
0%	10%	+0.3Hz
	60%	+1.8Hz
50%	10%	+0.09Hz
	60%	+0.51Hz
100%	10%	+0.05Hz
	60%	+0.3Hz

부하 탈락 시, ESS 연계에 대한 주파수 응답 결과를 보면 그림 10과 같다.



(a) ESS: 50%



(b) ESS: 100%

그림 10. 부하 탈락 시 주파수

Fig. 10. Frequency responses for load trip when ESS is installed

70% DG Trip 그림 10(a)는 ESS가 디젤발전기 용량 대비 50%인 경우에 대한 그래프이다. 결과를 보면 부하가 10% 탈락한 경우는 기존 부하량이나 분산전원 연계량과 관계없이 둘 다 비슷한 수준인 60.09Hz로 주파수가 올라간 것을 확인할 수 있다. 그러나 부하가 60%로 더 많이 탈락한 경우는 주파수가 증가량이 더 많아져 60.51Hz에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 그림 10(b) 그래프에서 ESS가 디젤발전기 용량 대비 100% 연계되어 있는 경우 50% 연계와 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나

ESS 용량이 50%인 결과와 비교하면, 주파수 증가 폭이 더 줄어든 것을 확인할 수 있다. 즉, 디젤발전기 용량 대비 부하 탈락량이 증가할 경우 주파수 상승량이 증가하며, 연계된 ESS의 용량이 클수록 주파수 증가량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 표 5에서 제안한 부하 탈락 시의 ESS의 100% 연계를 가정하였을 경우, 디젤발전기의 유효전력 및 무효전력 출력을 나타낸다. 연계된 ESS의 초기 발전량을 0 kW로 가정하였기 때문에 초기 디젤발전기 출력은 부하량에서 분산 발전량의 차이를 나타낸다.

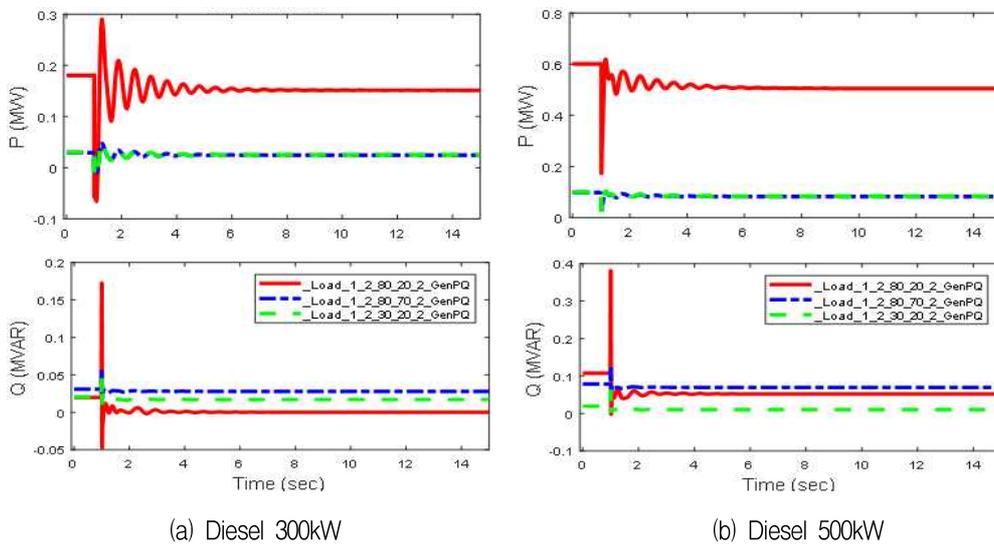


그림 11. 디젤발전기 출력 (ESS 100% 연계)

Fig. 11. Real and reactive power responses of diesel generator when the capacity of ESS is 50% of diesel

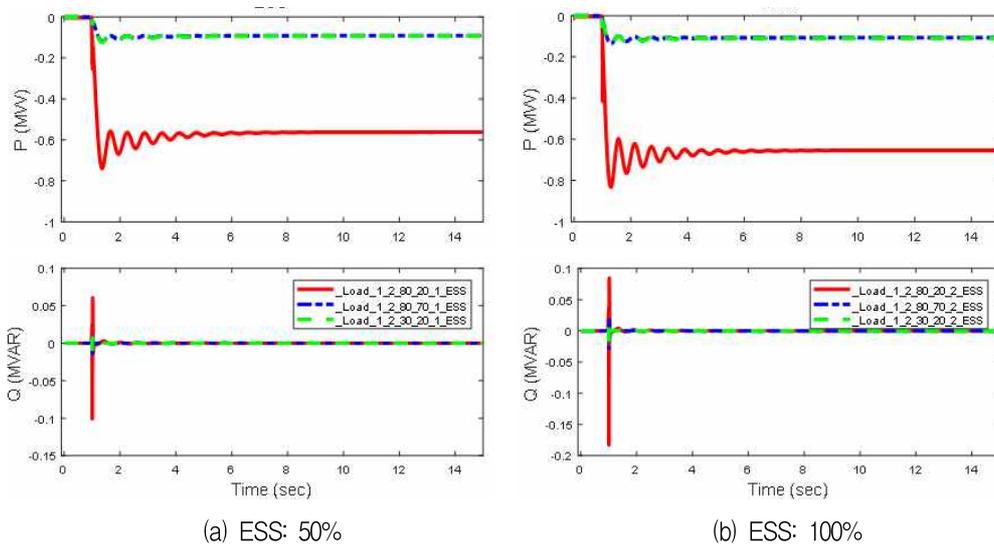


그림 12. ESS 출력

Fig. 12. Real and Reactive Power Responses of ESS

그림 11에서 1초에 부하탈락이 일어날 때, 탈락하는 부하의 크기에 따라 디젤 발전기의 출력량 변화가 다른 것을 확인할 수 있으며, 부하가 60% 탈락하는 경우는 부하가 10% 탈락하는 경우보다 더 많이 유효전력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, ESS의 용량이 클수록, 디젤발전기의 유효전력 감소폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 ESS의 용량이 클수록 주파수에 따른 ESS의 유효전력 변화량이 크기 때문에 상대적으로 디젤발전기의 유효전력 변화량이 줄어들기 때문이다. 부하 탈락 후 연계된 ESS와 디젤 발전기의 출력량은 앞서 정의된 드롭 계수에 따라 출력을 내주는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 부하 탈락 시 ESS의 출력 변화를 나타낸다. ESS가 디젤발전기 대비 50% 연계되어 있는 경우가, ESS가 디젤발전기 대비 100% 연계되어 있는 경우보다 유효전력의 충전량이 더 작은 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 부하 탈락 시 ESS의 출력이 감소한 만큼 충전을 통하여 주파수가 안정적으로 유지할 수 있기 때문에 ESS의 용량이 분산전원의 수용성을 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 신재생에너지 기반 분산전원의 수용성을 높이기 위한 배전급 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS) 협조 운영방안을 제안하였다. 독립도서 마이크로그리드 계통 및 ESS 모델링을 통하여 다양한 분산전원 연계 시나리오를 통하여 해당 시스템의 분산전원 탈락 및 부하 탈락 시의 준정상상태 주파수 관정의 분산전원 수용률 한계를 분석하였다. 아울러 시스템 내의 디젤발전기와 ESS의 드롭제어간의 협조를 통하여 분산전원의 수용성을 증대되는 방안을 제시하고, 디젤발전기 용량대비 연계된 ESS용량을 투입량을 다르게 하여 분산전원 수용률 증대가 분산전원 탈락과 부하 탈락에 대하여 검증을 진행하였다.

본 논문은 배전 계통내의 ESS의 협조 운영을 통하여 계통내의 분산전원의 수용성을 높이는 방안에 대해서 제안하였다는 점에 의의를 찾을 수 있다. 그

리나 계통 운영상의 다양한 분산전원의 출력의 변동성 및 계통 구성의 경제성 등을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Z. Zhuo, E. Du, N. Zhang, C. Kang, Q. Xia, and Z. Wang, "Incorporating Massive Scenarios in Transmission Expansion Planning With High Renewable Energy Penetration", in *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 2, pp. 1061-1074, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2938618>.
- [2] S. You et al., "Impact of High PV Penetration on the Inter-Area Oscillations in the U.S. Eastern Interconnection", in *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 4361-4369, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2682260>.
- [3] J. Suh, D. Yoon, Y. Cho, and G. Jang, "Flexible Frequency Operation Strategy of Power System With High Renewable Penetration", in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 192-199, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2590939>.
- [4] H. Hooshyar and M. E. Baran, "Fault Analysis on Distribution Feeders With High Penetration of PV Systems", in *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 2890-2896, Aug. 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2227842>.
- [5] T. Aziz and N. Ketjoy, "PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations", in *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 16784-16792, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2747086>.
- [6] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. Van Cutsem, "Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units", in *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 926-936, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2410171>.
- [7] Jeremy D. Watson, et. al., "Impact of Solar

Photovoltaic on the Low-Voltage Distribution Network in New Zealand", in IET Journals, Vol. 10, No. 1, pp. 1-9, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1076>

- [8] T. Aziz and N. Ketjoy, "Enhancing PV Penetration in LV Networks Using Reactive Power Control and On Load Tap Changer With Existing Transformers", in IEEE Access, Vol. 6, pp. 2683-2691, Dec. 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2784840>.
- [9] A. Zhou, R. Yan, and T. K. Saha, "Capacity and Control Strategy Design of Isolated Micro-Grid With High Renewable Penetration", in IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 11, No. 3, pp. 1173-1184, Jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2019.2920274>.
- [10] S. Alyami, Y. Wang, C. Wang, J. Zhao, and B. Zhao, "Adaptive Real Power Capping Method for Fair Overvoltage Regulation of Distribution Networks With High Penetration of PV Systems", in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 6, pp. 2729-2738, Nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2330345>.

최 동 희 (DongHee CHOI)



스마트그리드

2012년 2월 : 연세대학교
전기전자공학부(공학사)
2017년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2019년 3월 ~ 현재 : 청주대학교
융합전자공학부(조교수)
관심분야 : 전력시스템,

저자소개

이 희 진 (Hee-Jin Lee)



스마트그리드

2008년 2월 : 연세대학교
전기전자공학부(공학사)
2013년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2015년 2월 ~ 현재 : 금오공과
대학교 전자공학부(교수)
관심분야 : 전력시스템, 전력전자,