

재생에너지원 보급에 따른 전력계통 안정도 분석

곽은섭* · 문채주**

Analysis of Power System Stability by Deployment of Renewable Energy Resources

Eun-Sup Kwak* · Chae-Joo Moon**

요약

제한적인 탄소배출의 필요성과 연계되는 전력수요 증가는 재생에너지산업에서 폭발적인 상승을 가져오고 있다. 전력계통에서 전기공급은 항상 전기수요와 균형을 맞추어야 할 필요가 있고, 안전하고 믿을만한 안정적인 운영을 유지하기 위하여 계통손실이 발생한다. 높은 비율의 재생에너지 보급을 갖는 전력계통에서 과도 안정도, 미소신호 안정도 및 주파수 안정도와 같은 넓은 범위의 3가지의 난제가 있다. 과도안정도는 선로계전기 동작이나 발전기 탈락과 같은 장애에 대한 계통응답을 해석하는 것이다. 미소신호 안정도는 계통관성 저하에 따른 전압불안정, 주파수 급변, 전력진동 등이 발생가능한 계통에서 조그만 증분같은 작은 동요가 일어날 때 전력계통 동기를 유지하기 위한 계통의 기능이다. 주파수 안정도는 발전과 부하 사이에 심한 불균형이 발생하는 중대 계통혼란에서도 정상 주파수를 유지하기 위한 전력계통의 기능으로 간주한다. 본 논문에서 재생에너지 보급계획에 따른 계통모의를 수행하여 3종류 안정도를 검토하며, 또한 재생에너지원이 계통안정도에 미치는 영향을 분석한다.

ABSTRACT

Growing demand for electricity, when combined with the need to limit carbon emissions, drives a huge increase in renewable energy industry. In the electric power system, electricity supply always needs to be balanced with electricity demand and network losses to maintain safe, dependable, and stable system operation. There are three broad challenges when it comes to a power system with a high penetration of renewable energy: transient stability, small signal stability, and frequency stability. Transient stability analyze the system response to disturbances such as the loss of generation, line-switching operations, faults, and sudden load changes in the first several seconds following the disturbance. Small signal stability refers to the system's ability to maintain synchronization between generators and steady voltages when it is subjected to small perturbations such as incremental changes in system load. Frequency stability refers to the ability of a power system to maintain steady frequency following a severe system upset resulting in significant imbalance between generation and load. In this paper, we discuss these stability using system simulation by renewable energy deployment plan, and also analyses the influence of the renewable energy sources to the grid stability.

키워드

Renewable Energy, Transient Stability, Small Signal Stability, Frequency Stability, Power System Inertia

재생 에너지, 과도 안정도, 미소 신호 안정도, 주파수 안정도, 전력 계통 관성

* 국립목포대학교 대학원(kop1299@daum.net)

** 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소

• 접수일 : 2021. 05. 14

• 수정완료일 : 2021. 06. 30

• 게재확정일 : 2021. 08. 17

• Received : May. 14, 2021, Revised : Jun. 30, 2021, Accepted : Aug. 17, 2021

• Corresponding Author : Chae-Joo Moon

Smart Grid Institute, Mokpo National University,

Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

I. 서 론

우리나라는 에너지정책을 통하여 2030년까지 신재생 에너지 발전량 비중을 20% 보급을 목표로 추진하고 있으며, 9차 전력수급계획에서는 2034년까지 신재생에너지 발전량 비중을 40%까지 보급하는 것으로 발표하였다. 간헐성 특성을 갖는 재생에너지의 급속한 보급정책으로 전력계통의 안정성 문제가 제기되고 있으며, 이러한 재생에너지의 가변성은 전력계통의 운영에서 많은 어려움을 유발하고 있다. 풍력과 태양광의 점유율 상승에 대한 계통 운영자 입장은 송전계통계약 또는 운전모드를 제약하여 실제 재생에너지를 이용 가능한 양보다 더 적게 수용하는 방안을 찾을 수밖에 없는 어려움에 처하고 있다[1-2].

우리나라는 독립적이고 거대한 단일 전력계통이면서도 과거 급속한 성장속도, 전원과 수요밀집 지역의 이격거리, 집중화, 대규모 대용량 송전시스템을 채용한 송전 효율 향상, 이에 따른 세계 최고 수준의 전기품질 등을 갖는 반면에 특정지역 대규모 발전원 밀집, 특정지역 전력수요 밀집, 발전력 증가 및 대용량 송전망 다중연계, 대용량 단위 발전기 채용 등으로 고장전류 증가, 발전기 또는 송전선로 고장시 과도 불안정 등으로 상정 가능한 고장시 파급 등으로 대규모 정전의 위험성을 가지고 있는 특이한 전력계통 구조를 가지고 있다. 이에 따라 발전기 차단시스템 운전, 저주파수에 따른 민감한 부하차단, 63kA 수준의 대용량 차단기 채용, 엄격한 전력계통 신뢰도 기준적용 등의 대책을 적용하고 있다. 우리나라에서도 해외와 마찬가지로 태양광, 풍력, 연료전지를 중심으로 한 신재생에너지 확산정책이 정부 장기 계획하에 이루어지고 있다. 이러한 신재생에너지원의 확산에 따라 대규모 풍력단지나 태양광단지가 연계될 경우 전력계통 안정도의 핵심인 과도안정도, 미소신호안정도, 주파수 안정도에 대한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다[3-5].

우리나라 도서지역의 재생에너지 보급은 독립계통을 구성하고 있기 때문에 전력계통 운영측면에서 에너지저장장치를 중심으로 최적 운영방안을 찾아서 적용하고 있다. 도서지역은 현실적으로 계통운영 뿐만 아니라 경제적인 독립계통을 구성하는 것도 중요하기 때문에 지리정보 시스템을 이용한 태양광과 풍력설비 설치를 위한 최적 위치 선정이 더욱 중요할 수 있다. 기존 독립계통의 운영에서 발생하는 것은 효율적인 운전방식을 찾아낸 것이고 이러한 문제점을 해결하기 위하여 운영방법 제조과정 성

능개선을 위한 추가설비를 구축하여 적용되고 있다. 에너지저장장치를 사용하는 독립계통인 경우 재생에너지 구축에 따른 출력제한은 없기 때문에 계통연계형 보다 어려움은 크게 발생하지 않고 있다[6-8].

제주지역의 경우 재생에너지 설비 점유율이 40%에 이르고 있고 2020년의 경우 77회에 걸쳐 출력제한이 발생하였다. 이는 주로 경부하 및 재생에너지 이용율이 높아지는 시간에 풍력발전의 출력제한을 시키는 사례가 늘어나고 있다. 특히 태양광발전의 점유율 증가에 따른 공급과잉이 계통에 영향을 미쳐 출력제한이 낮시간에 발생하고 있음에도 풍력 발전량만을 제한시켜 풍력발전 운영자의 어려움을 가중시키고 있다. 태양광, 풍력발전은 변동성 전원일 뿐만 아니라 발전기 회전자 및 터빈에 의해 공급되는 전자기적인 관성에너지도 존재하지 않아 고유한 특이성을 갖는 전력계통 특성 외에 수급균형 어려움, 총발전량의 급격한 변동 및 저하에 따른 주파수 급변, 대용량 단위기 발전기 탈락시 계통 관성력 저하에 따른 주파수 계전기 동작 및 대정전 유발 가능성, 계통불안정 등 새로운 계통 이슈가 지속적으로 발생할 가능성이 있고 특히 국가간 연계선로가 없는 우리나라에서는 신재생에너지 확대 시나리오별로 매우 정밀한 예측과 대책이 요구된다 [2],[9-12].

본 연구에서는 우리나라의 전력계통 특성을 먼저 분석하고 변동성 신재생에너지인 태양광, 풍력발전 확산 단계별 계통영향을 분석한다. 인버터를 통해서 전력계통에 연계되는 태양광, 풍력, 연료전지의 확대에 따른 주파수 급변동과 관련한 계통 모의와 대책 설비 설치시 효과에 대해 논의하고자 한다.

II. 우리나라 전력계통 특성분석

2.1 발전설비 용량

우리나라는 과거 경제 성장과 더불어 급격한 전력설비 확대를 추진해 왔고 전력수요의 40% 이상이 수도권 지역에 집중되어 있는 반면 대규모 발전설비는 비수도권의 해안가에 위치하여 이 발전된 전력을 수도권으로 수송하는 송전계통은 소수의 초고압 대용량 송전선에 의지하고 있다. 그림 1과 같이 우리나라와 계통규모가 비슷하거나 발전설비 용량이 약 100GW를 초과하는 주요국과 비교하면 423% 성장을 기록한 우리나라의 확대속도를 손쉽게 알

수 있다. 최근에는 발전기 단위기 규모가 화력발전은 1GW급, 원자력발전은 1.4GW급을 건설하고 있어서 이에 따른 발전소 인출 송전선로의 부담이 가중되고 있다. 우리나라의 발전설비는 특정지역에 집중화되고 단위기는 대용량화되고 있으며, 주요 발전단지는 송전혼잡으로 송전제약이 발생하고 있다. 송전선로가 대용량화되어 고장시 전압이 불안정 상태로 진행되고, 주파수도 단위 발전기 정지시 변동폭이 확대된다. 발전설비 집중과 송전선로 혼잡으로 과도안정도 또한 불안이 우려된다. 63kA 차단기 적용과 100여개의 계통분리로 고장전류나 과부하 등이 발생할 수 있다. 고장과급을 방지하기 위해 발전기 차단시스템, 일부 발전기 출력제한, 전압보상 및 송전효율 향상을 위한 대규모의 STATCOM(:Statics Synchronous Compensator), TCSC(:Thyristor Controlled Series Capacitor) 등의 FACTS(:Flexible AC Transmission System) 설비를 확대하고 있다.

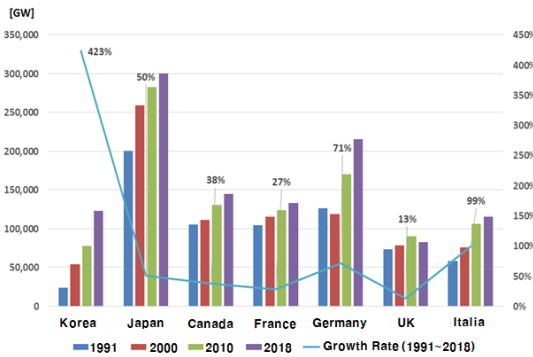


그림 1. 발전설비 용량비교
Fig. 1 Capacity comparison of power plants

2.2 송전혼잡

우리나라 전력계통의 특성을 파악하기 위해서는 ① 단위 용량 1GW를 초과하는 발전기 ② 20GW를 초과하는 몇 개 지역 대단위 발전단지 ③ 발전단지에서 발전력을 인출하는 2~3개의 초고압 송전선로 ④ 비수권에서 수도권으로 발전력을 수송하는 6개의 초고압 송전선로 등으로 구분한다.

송전선로 고장시 발전기 과도 불안정, 수도권 전압 불안정 등이 발생할 경우 대단위 발전단지의 상시 발전 출력제한, 수도권으로 수송되는 발전력을 낮추기 위해 비수도권 기저 발전기 출력제한, 수도권 부하차단 시스템 운

영 등 급격한 전력설비 확장을 이행하기 위한 운영수단이 요구된다. 산업설비 수요에 대응한 대규모, 대용량 설비 건설이라는 매우 중앙집중적인 전략이 제약발전 비용 발생의 최소화과 전기품질의 세계 최고 수준 등 매우 효율적으로 보이고 있지만 상정 고장시 큰 과급고장을 유발할 수 있는 역설적인 일부 비효율성을 수반하고 있다.

단일 독립계통, 고밀도 전력설비, 송전망 다중연계, 지중선 등의 증가로 차단기의 차단용량을 초과하는 지역이 많아 전류 제한리액터 다수 채용, 전국 100개소 이상에서 송전선로 개방이나 변전소 BUS 분리 등의 운영대책을 시행하고 있으며, 이는 작은 고장에도 큰 정전이 발생하거나 또한 과급고장의 우려가 있다. 일부 비효율과 계통 불안정 요소가 있기는 하지만 규정된 전압, 주파수 유지율 99% 이상으로 완벽에 가까운 전기품질을 유지하면서도 대규모의 계통고장을 발생하지 않은 비교적 안정적인 전력시스템을 현재까지 운영하고 있다. 현재 정부의 신재생에너지 확대정책에 따라 태양광, 풍력, 연료전지 등이 향후 매우 빠른 속도로 전력계통에 연계될 것으로 보인다. 이는 압축된 독립계통의 계통불안정 요소를 가진 우리나라의 전력계통에서 주파수 유지문제와 계통관성 측면에서 안정도 유지문제는 매우 중요한 요소가 될 것으로 예상된다. 이에 대한 신재생에너지 확산단계별 계통영향 분석, 대책수립과 그 효과 분석은 향후 신재생에너지 확산정책을 이행하기 위한 핵심적인 과제이다.

III. 신재생에너지의 전력계통 영향분석

3.1 신재생에너지 확대 정책

온실가스 감축에 필수적인 우리나라의 신재생에너지 확대 정책은 표 1과 같이 크게 4가지로 나타낼 수 있다. 신재생에너지 발전 확대에 따라 전력계통에 주는 영향은 해외에서도 관심이 높으며, 국제에너지기구인 IEA의 분류에 따르면 변동성 신재생에너지 발전 확산 정도를 6단계로 나누어 단계별로 전력계통 이슈와 대책을 제시하고 있다. 신재생에너지 발전량 비중은 검토 목적에 따라 분류를 다르게 할 필요가 있다. 예를 들면 신재생에너지 발전의 간헐성, 변동성으로 수급균형이나 이에 따른 1분 이상의 장주기 주파수 유지문제가 주요 검토 목적이라면 신재생에너지 발전설비 중에서 변동성 전원 즉, VRE(:Variable Renewable Energy)인 태양광과 풍력 발

전량의 비중이 중요하다. 신재생에너지 발전설비 확대 시 그 영향이 훨씬 클 것으로 예상되는 태양광과 풍력 그리고 연료전지발전도 포함되는 IBR(Inverter Based Resources)은 계통관성 저하로 인해 과도 안정도(Transient Stability), 미소신호 안정도(Small Signal Stability), 주파수 안정도(Frequency Stability) 등의 검토가 중요하다.

표 1. 정부의 신재생에너지 정책
Table 1. Government plan of renewable energy

Government Plan (Year)	Target Year	Generation Rate	Generation Capacity
3020 RE Plan(2017)	30년	20%	63.8GW
9th Electricity Supply and Demand Plan(2020)	34년	26.3%	77.8GW
3th Korean National Energy Master Plan(2020)	40년	30~35%	103~129 GW
2050 LEADS(2020)	50년	Carbon-neutral	

정부의 제 3 차 에너지기본계획에서는 연료전지 보급목표를 40년까지 8 GW로 설정하고 있다. 따라서 태양광과 풍력발전 뿐만 아니라 연료전지까지 포함하여 향후 계통관성 측면에서 전력계통 영향을 분석하면 다른 결과가 얻어질 것으로 예상된다. 특히 IEA에서 분류한 변동성 신재생에너지 발전설비 확대시 단계별 영향과 조치사항은 우리나라가 독립적인 전력계통이라는 것과 연료전지 확대라는 측면에서 분류된 적용단계나 전력계통 영향과 그 조치내용이 다를 수 밖에 없으며, 고유의 전력계통 특성과 계통해석 방법론을 통하여 별도의 분류체계가 필요할 수 있다.

해외 신재생에너지 선도국가에서는 안정적인 계통운영을 위해 비동기 신재생에너지 발전이 전력계통에 실시간으로 운전 가능한 용량 설정에 제한을 두고 있다. 이를 SNSP(System NonSynchronous Penetration)로 표시하며, 실시간 전력계통운영 상황에서 운전가능한 IBR의 한계용량으로 정의할 수 있다. SNSP는 고정 값이 아니라 계통상황이나 수용확대 대책에 따라 실시간으로 변동하고 향후 이 값을 높이는 다양한 대책이 필요하다. 그래야만 도전적인 신재생에너지 확대정책을 전력계통에서 수

용하고 실현 가능하기 때문이다.

3.2 신재생에너지 보급계획 분석

정부정책에 따라 신재생에너지 보급에 대한 구체적인 설비용량을 표 2와 같이 추정할 수 있다. 여기서 단위는 GW이며 ①은 신재생에너지와 전통발전설비용량의 합계인 총발전설비용량, ②는 전통발전설비용량, ③은 신재생에너지 발전설비용량, ④는 IBR 발전설비용량을 말한다.

표 2. 설비용량의 추정
Table 2. Estimation of plant capacity

Division	2019	2022	2025	2028	2031	2034
①	125	143	166	167	176	193
②	109	114	120	114	114	115
③	16	29	46	53	62	78
④	12.5	25.9	42.2	49.7	57.7	73.7

발전설비용량 비중을 비교할 때 분모에 전체 발전설비용량, 분자에 신재생에너지 발전설비용량을 대입하며, 여기서 분모에 있는 전체 발전설비용량에 신재생에너지 발전설비용량도 포함하여 계산하는 것이 일반적인 통계처리 방법이지만 계통관성을 고려하면 회전자와 터빈의 질량을 가진 전통적인 발전기 대비하여 실시간 계통에서 IBR의 발전량이 주된 관심사이므로 구분한 것이다.

설비용량을 기준으로 발전량을 표 3과 같이 추정할 수 있다. 여기서 단위는 GWh이며, ⑤는 신재생에너지와 전통설비 발전량의 합계인 총발전량, ⑥은 전통설비 발전량, ⑦은 신재생에너지 발전량, ⑧은 IBR 발전량을 말한다. 계통안정도에는 IBR이 차지하는 비중이 중요하며, 분모 값에 전체 발전설비용량을 선택하지 아니면 IBR을 제외한 전통발전설비용량만 취할지는 검토 목적에 따라 달라질 수 있으나 그림 2와 같이 ④/① 대비 ④/②로 표시되는 IBR 설비와 발전량의 편차가 점점 더 확대됨을 알 수 있다. 시작점인 2019년에는 편차없이 거의 같게 나타나지만 2034년에는 1.7배의 차이가 발생한다.

표 3. 발전량의 추정

Table 3. Estimation of power generation capacity

Div.	2019	2022	2025	2028	2031	2034
⑤	561,894	564,578	574,405	579,608	589,046	600,027
⑥	526,019	506,991	486,521	470,062	460,634	442,220
⑦	35,875	57,587	87,884	109,546	128,412	157,807
⑧	16,726	38,384	68,441	89,860	108,191	136,656

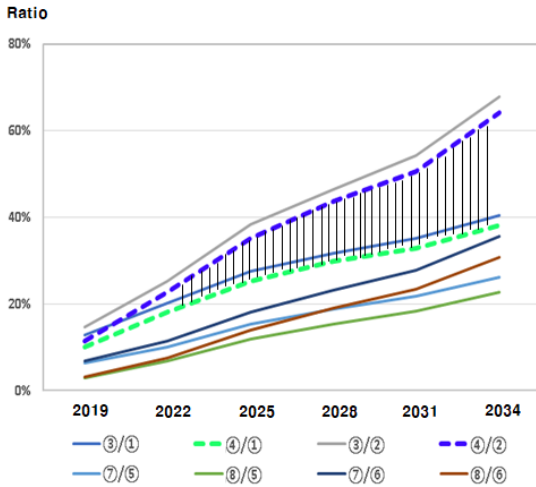


그림 2. 설비용량과 발전량의 비중

Fig. 2 The Ratio of plant capacity and power generation capacity

전력계통 안정운영에 가장 큰 영향을 주는 것은 단순히 신재생에너지 비중이 확대가 아니라 계통관성의 비중이며 그림 2에서 ⑧/⑤, ⑧/⑥, ④/②이 여기에 해당되고 특히 ④/②를 가장 주목할 필요가 있다.

3.3 신재생에너지 변동성

태양광, 풍력발전을 위주로 하는 신재생에너지 발전은 출력이 변동하거나 간헐적으로 발전하는 기본 특성이 있다. 국가나 지역마다 발전출력 변동성을 조사하여 계통 주파수 영향을 검토하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 우리나라의 변동성 신재생에너지인 태양광과 풍력발전량은 그림 3과 같이 그 비중이 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

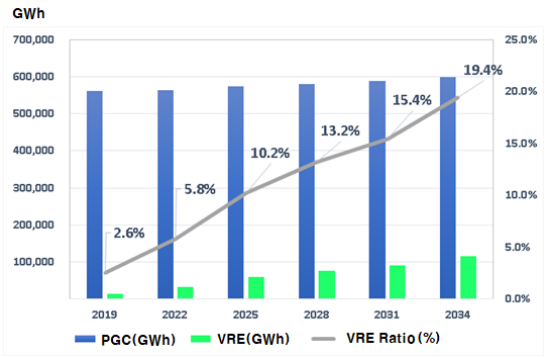


그림 3. 변동성 신재생에너지 발전량과 비중

Fig. 3 Power generation capacity and ratio of variable renewable energy

3.4 전력계통 관성 영향

태양광, 풍력, 연료전지는 인버터를 통해서 전력계통에 연계되며 이는 관성에너지를 소실됨을 의미하고 계통 고장시 주파수 급변동, 단락용량 및 전압유지 문제 등 지금까지 전통적 발전기 위주의 전력계통에서는 경험해보지 못한 새로운 위험이 따를 것으로 예상된다. 실시간 전력계통에서 질량(발전기 터빈 + 회전자)을 가진 전통적인 발전기 운전대수가 감소하면 계통관성 감소에 따라 특히 주파수 변화가 커지는데 이를 ROCOF(·Rate Of Change Of Frequency)로 표시하고 관계식은 다음식 (1)과 같다.

$$ROCOF = \frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2H_{sys}} (Hz/s) \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수[Hz], t 는 시간[sec], H 는 관성정수 [MWs/MVA], H_{sys} 는 계통관성[MWs/MVA], ΔP 는 부하 또는 발전손실[MW]로 나타낸다.

전통적인 발전기 운전대수가 감소하면 IBR이 증가하여 관성 모멘트가 감소하고 이는 관성정수 H 가 감소하여 결국에는 ROCOF가 증가함을 나타낸다. 우리나라는 표 2에서 IBR이 2019년 12.5에서 2034년 73.7GW로 큰 폭으로 증가함을 알 수 있으며, 이는 계통 관성 측면에서 매우 큰 영향을 줄 것이다.

IV. 전력계통 안정도 평가

계통 관성 감소에 따른 계통영향은 주로 과도안정도, 미소신호안정도, 주파수안정도 관점에서 평가가 필요하므로 이에 검토하고자 한다. 검토결과로 제시하는 신재생 발전용량 비율은 현재 전력계통에서 추가적인 대책이 없다는 가정하에 실시간으로 운전 가능한 신재생발전 운전용량 비율(SNSP)임을 밝혀둔다.

4.1 과도안정도

과도안정도 관점에서 수용 한계량 평가시에는 계통고장시 발전기는 과도상태에서 안정한 상태로 복귀 가능한 최대 고장허용 지속시간(CCT : Critical Clearing Time)을 평가하여 그 한계용량을 결정한다. 한전의 CCT 기준은 170kV과 362kV에서 5사이클이고 800kV에서 4사이클이다. 여기서 CCT는 계통 고장 발생시 고장을 제거해야만 하는 최대 허용 시간으로 정의 할 수 있다. 만약 계통해석 결과 고장 제거 요구 시간이 CCT 보다 더 짧다면 더 이상의 IBR은 수용이 불가능한 것이고 다른 대책 수립이 요구된다. IBR 증가로 계통 관성이 감소한다면 고장 제거 요구 시간은 매우 짧아질 것이다. 한전의 CCT 기준은 계통보호 측면에서 최소 시간 개념이고 신재생에너지 확산에 따른 과도안정도 측면에서 CCT 정의는 아직 명확하게 정립되지 않았다. 다만 해외 사례와 기존 CCT를 종합하여 6 사이클(0.1s)을 한계치로 정하고 신재생에너지 발전용량 비중별로 최소 또는 최대부하 수준에서 모의하였다. 이 결과 경량부하 사례에서 신재생에너지 발전용량 비율이 약 35% 수준에서 CCT가 0.1s 이하로 하락하고 최대부하 사례에서는 약 40% 수준에서 0.1s 이하로 감소한다.

실제 수용한계 평가시에 많은 사례중에서 몇 개가 불안정한 상태가 되어도 바로 수용한계로 잡을 수는 없으며, CCT를 만족하지 못하는 적정 비율을 정하여 평가하는 것이 바람직하다. 국가마다 전력계통 상황에 따라 매우 다양하게 접근할 필요가 있으며, 우리나라의 독립계통 특성을 고려한다면 만족하지 못하는 비율을 해외에서는 40% 수준이지만 우리나라는 30% 수준에서 결정하는 것이 보수적인 것으로 판단된다. CCT를 만족하지 못하는 적정비율을 30% 수준에서 결정한다면 수용한계는 40~55% 수준으로 결정할 수 있다. 여기서 수용한계는 실시간 전력계통에서 태양광, 풍력, 연료전지 위주의 신재생

에너지 발전기가 운전 가능한 용량을 의미함을 주의할 필요가 있다. 그림 2에서 2022년 IBR 발전량 비중이 22.7%인데 실시간 전력계통운영 상황에서는 IBR 운전용량 비중이 40%를 초과하는 시간이 빈번할 것으로 예상된다. 실제로 우리나라에서는 2019~2020년에 경량부하 사례에서 대용량 단위기 발전기의 탈락대비 과도불안정 및 높은 ROCOF 우려로 발전기 출력을 낮추어 발전제약하는 계통상황이 수회 발생하였다. 한계설정값을 기반으로 실시간 계통상황을 반영한 연간 한계 초과 시간 예측 및 이에 대한 대책은 앞으로 중요한 과제가 될 것으로 보인다.

4.2 미소신호안정도

미소신호안정도란 부하나 발전기에서 작은 외란이 발생하였을 경우, 전력계통이 동기 상태를 유지하는 능력을 의미한다. 이는 충분히 작은 외란을 고려하므로 비선형적인 전력계통 방정식을 선형화하여 해석한다. 미소신호안정도의 불안정은 작은 외란 후 부족한 댐핑 토크로 인해 진폭이 커지는 진동이 발생하는 것을 의미한다. 특히, 전기-기계적 모드는 낮은 주파수의 진동을 발생시키며, 부족한 댐핑으로 인해 전력계통에 심각한 위협으로 작용될 수 있다. 미소신호안정도 해석은 주로 전력계통의 고유치 분석을 통해 이루어지며, 전력계통의 고유치는 전력계통 모델의 선형화 과정을 통해 산출할 수 있다. 미소신호안정도 관점에서 안정성을 확보하기 위해서는 실제 전력계통에서 나타나는 고유치들이 충분한 크기의 감쇄율을 가져야 한다. 전력계통 특성 방정식은 식(2), 그 해는 식(3), (4) 등으로 표현할 수 있다.

$$S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (2)$$

여기서, ζ 는 감쇄율, ω_n 는 비감쇄 자연주파수

$$\text{고유치 } \lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} = \sigma \pm j\omega \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \times 100 \quad (4)$$

국외 전력기관의 감쇄율 기준은 3~5%로 운영하고 있으며, 신재생에너지 확산 초기 단계인 우리나라에서는 명

시적인 기준은 없는 상태이나 독립계통 등의 고유 특성을 고려하여 3% 이상으로 설정한다. 경량부하 사례와 최대 부하 사례에서 신재생에너지 운전용량 비중을 0에서 5% 단위로 증가시켜 가면서 감쇄율 값이 3% 이내의 댐핑모드 개수를 모의한다. 신재생에너지 발전용량 비중에 따라 감쇄율 3% 미만인 경우 경량부하 사례에서 신재생에너지 발전설비가 50% 이상일 경우, 최대부하 사례에서 55% 이상일 경우 급격하게 증가함을 알 수 있다. 미소신호 안정도 검토에서 과도안정도와 동일하게 많은 사례중에서 몇 개가 기준 이하로 나와도 바로 수용한계로 결정할 수는 없다. 기준 비율을 만족하지 않아도 되는 적정 비율값을 선정하여 평가하는 것이 합리적이다. 급격히 증가하는 비중을 고려하면 수용한계는 50~55% 수준에서 정해질 것으로 보인다. 이는 4.1절에서 검토한 과도안정도 결과 보다는 수용한계 비중이 조금 증가하는 경향이 있으며, 과도안정도가 더 민감하게 반응하고 있는 것을 알 수 있다. 다만 미소신호안정도 문제는 인접 발전기간 진동, 지역내 진동, 지역간 진동 등 한번 발생하면 전국적인 계통 불안정 문제가 될 수 있고 완화방법이 즉시 수행될 수 없는 문제가 있어 신중하게 다룰 필요가 있다.

4.3 주파수안정도

신뢰도 기준에서 선정한 주파수 유지는 정상적인 계통에서 적정 주파수 유지와 계통고장시 발전기 탈락에 따른 저주파수로 인한 부하차단(UFLS: Under Frequency Load Shedding)의 문제로 신재생에너지 발전기 특히 IBR의 확대시 주파수 유지에 큰 영향을 미치게 된다. 이는 계통 관성 감소에 따른 최저 주파수와 주파수 변화율 ROCOF와 직접적인 관계가 있다. 우리나라의 주파수 유지기준은 ① 발전기 1기 고장시 계통주파수 59.7Hz 이상 유지 ② 발전기 2기 고장시 계통주파수 59.2Hz 이상 유지로 정하고 있다.

이러한 유지기준에도 불구하고 실제 계통관성 감소 상황에서 더욱 중요한 것은 표 4와 같은 UFLS 기준이다.

표 4. UFLS 동작시간 및 차단부하
Table 4. Action Time and Shedding Load

Stage	F[Hz]	Action Time	Shedding Load
1	59.0	0.1s	6%
2	58.8		
3	58.6		
4	58.4		
5	58.2		
6	58.0		
Backup	59.0	12s	4%
Total			40%

우리나라에서 최대 발전기 단위 용량은 1.4GW로 발전기 탈락시 최저주파수 도달은 경량부하 사례에서만 분석이 필요하고 최대부하 사례에서는 매우 가혹한 신재생에너지 발전량 시나리오가 필요하지만 주파수 안정도에 대한 영향은 더 적다. 경량부하 사례에서 신재생에너지 발전설비용량 45% 수준에서 가장 큰 단위기 발전기 탈락시 저주파수 계전기 부하차단 장치에 의해 1단계에 근접한다. 현재와 같은 1.7GW 수준의 주파수 예비력과 10초 이내 출력 응답으로는 주파수 회복이 어렵다는 의미이고 향후 주파수 예비력 상향이 필요할 것으로 보인다. 하지만 이 문제는 많은 비용이 따르는 문제이고 무엇보다도 신재생에너지 발전설비 확대에 따라 계통에서 실시간으로 운전되는 주파수 예비력을 확보할 발전기가 부족해지는 문제와도 직결되기 때문에 경제성 문제이기 전에 주파수 유지여부의 본질적인 문제이다.

V. 결론

신재생에너지 보급확대에 따라 신재생에너지 변동성 영향과 계통관성 저하에 따른 과도안정도 영향, 미소신호 안정도 영향, 주파수안정도 영향에 대해 분석하였다. 결과에 따르면 2019년 신재생에너지 비중 6.4%, IBR 비중 3.0%는 IEA 분류에 따라 적용단계를 1~2 단계 사이로 보이지만 그 계통영향은 3~4 단계에서 나타나는 특성이 발생하는 것으로 확인하였다. 변동성에 대한 영향은 상대적으로 장주기적인 영향이고 대책도 ESS, 예비력 확대, 국가간 연계선로 건설 등 다양한 대책이 있다. 향후 신재

생에너지 확대에 따른 계통영향 분석과 대책 수립시에는 순간적으로 발생하여 심각한 계통영향을 초래하는 계통관성 저하에 따른 계통불안정 문제에 대한 해결방안에 중점을 둘 필요가 있다. 신재생에너지의 변동성에 대한 영향은 계통관성 감소에 따른 통상 1초 이내에 그 영향이 나타나는 과도안정도, 미소신호안정도(단, 전력진동 등의 문제에 있어서는 그 영향이 수 분, 수 시간 지속될 수도 있다), 주파수안정도 영향에 비하면 그 영향이 매우 장주기인 1분 이상이고 전력계통 안정도 문제라기 보다는 주파수 유지율과 같은 전력 품질 문제에 조금 더 근접한다. 또한 신재생에너지 발전 수용 가능 용량은 대책수립 여부, 계통여건 등에 따라 매우 달라지거나 상향될 수 있기 때문에 국가 고유의 계통특성을 반영하여 실시간으로 그 한계용량을 수치화하는 모델이 필요하다. 이미 신재생에너지 보급 선도국가에서는 시행하고 있지만 대용량 독립계통인 우리나라에서는 그 모델이 훨씬 복잡할 것으로 예상되고 신재생에너지 확산이 빠른 속도로 증가하고 있어서 더욱 정교한 모델이 필요하다.

우리나라는 유럽과는 달리 입접국가와 연계된 HVAC와 VSC HVDC가 하나도 없는 단독 계통이다. 만약 다른 나라와 연계된 계통이 있다면 그 수량에 따라 신재생에너지 확산단계에 따른 계통영향이 완화되는 방향으로 크게 개선될 수 있다. 신재생에너지 확산단계에 따른 계통영향을 완화한다는 것은 ROCOF와 최저주파수(Nadir f)를 개선한다는 의미이고 ROCOF를 작게(완화)하기 위해서는 일정수준 이상의 계통관성 확보가 필요하며 최저 주파수를 일정부분 유지하기 위해서는 예비력 확보가 필요하다. 우리나라는 IEA 신재생에너지 확산단계 분류상 1~2 단계에 해당하지만 3~4 단계에 해당하는 계통영향이 이미 발생하였고 이에 따라 2021년부터 Governor Free 운전 확대, 운영예비력 상향, 2022년부터 Battery ESS 1.4GW 분산설치와 동기조상기 설치를 계획하고 있다.

향후 우리나라는 탄소중립이라는 원대한 계획까지도 가지고 있으며 이를 실현하기 위해서는 매우 정밀한 기술적 분석하여 전력계통이 안정적으로 계획되고 운영될 때만 가능하므로 향후 다양한 시나리오를 바탕으로 많은 연구가 필요하다.

References

- [1] H. Myung, H. Kim, N. Kang, Y. Kim, and S. Kim, "Analysis of the Load Contribution of Wind Power and Photovoltaic Power to Power System in Jeju," *J. of the Korean Energy Society*, vol. 38, no. 1, 2018, pp. 13-24.
- [2] H. Myung and S. Kim, "The Study on the Method of Distribution of Output according to Power Limit of Renewable Energy," *J. of the IKEE*, vol. 23, no. 1, 2019, pp. 173-180.
- [3] P. He, F. Wen, G. Ledwich, and Y. Xue, "Small signal Stability Analysis of Power Systems with High Penetration of wind Power," *J. of Modern Power System and Clean Energy*, vol. 1, no. 3, 2013, pp. 241-248.
- [4] Z. Conka, M. Kolcun, and G. Morva "Impact of Renewable Energy Sources on Power System Stability," *Power and electrical engineering*, vol. 32, 2014, pp. 25-28.
- [5] N. Khadka, B. Adhikary, S. Sharma, R. Paudel, A. Bista, and A. Shrestha "Transient Stability in Renewable Energy Penetrated Power System: A Review," *RESSD Int. Conf. on Role of Energy for Sustainable Social Development in "New Normal" Era*, Kathmandu, Nepal, 2020, pp. 1-6.
- [6] C. Moon, Y. Chang, M. Jeong, Y. Kim, and S. Lee, "A Study on Design of Optimal Location for Renewable Energy Facility Using GIS," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 357-368.
- [7] J. Joo, J. Lee, K. Park and J. Oh, "Battery Level Calculation and Failure Prediction Algorithm for ESS Optimization and Stable Operation," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 1, 2020, pp. 71-78.
- [8] J. Choi, C. Moon, and Y. Chang, "A Study on System Retrofit of Complex Energy System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 61-68.
- [9] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef "Inertia Response and Frequency Control Techniques for renewable energy Sources: A Review," *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 69, 2017, pp. 144-155.
- [10] L. Li, H. Li, M. Teng, H. Feng, and A. Chju "Renewable Energy System on Frequency

Stability Control Strategy Using Virtual Synchronous Generator," *Symmetry*, vol. 12, 2020, pp. 1-22.

- [11] K. Das, F. Guo, E. Nuno, and N. Cutululis, "Frequency Stability of Power System with Large Share of Wind Power Under Storm Conditions," *J. of Modern Power System and Clean Energy*, vol. 8, no. 2, 2020, pp. 219-228.
- [12] J. Baek, I. Jeong, J. Ha, C. Maeng, O. Kwon, B. Lee, and S. Kim, "Estimation of Critical Inertia of Korean Electric Power System Based on Transient and Small-Signal Stabilities," *J. of the Korean Institute Electrical Engineers*, vol. 68, no. 9, 2019, pp. 1,100-1108.

저자 소개



곽은섭(Eun-Sup Kwak)

1996년 경북대학교 공학사
 1997년~ 현재 한국전력공사
 2018년 사우스캐롤라이나 대학
 국제경영학 석사
 2020년~ 국립 목포대학교 대학
 원 전기공학과 박사과정

※ 한국전력공사 계통계획처, 송변전운영처, 대구
 경북본부 근무

관심분야 : HVDC 전력변환시스템, ESS 시스템,
 전력계통 안정도, 신재생 수용 안정도 분석



문채주(Chae-Joo Moon)

1981년, 1983년 및 1994년 전남대
 학교 공학사, 공학석사, 공학박사
 1997년~현재 목포대학교 공과대
 학 전기 및 제어공학과 교수
 2017년~현재 에너지밸리산학융
 합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼
 니스트, 전력전자학회 부회장, 이투스, 한국전기
 신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원
 장 역임

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전
 력시스템

