

그리드포밍 기반의 전력망을 고려한 재생에너지 경제성 분석 시스템 설계

노수지, 임정택, 함경선, 김태형

한국전자기술연구원

sjro@keti.re.kr, jtlim@keti.re.kr, ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr

A Design of Economic Analysis System for Renewable Energy with a Grid-Forming Based Power Network

Suji Ro, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim

Korea Electronics Technology Institute

요약

전력시장에서의 신재생 에너지 비중이 증가할 전망으로 보임에 따라 신재생 에너지 전력 시스템의 안정성 확보와 양질의 전력 공급에 대한 필요성도 함께 대두되고 있다. 그러나 신재생 에너지 비중이 증가했을 시 계통 관성의 부족으로 전력망에 갑작스러운 부하 변동이나 정전 등의 문제가 발생했을 시 주파수가 급격히 하락하여 계통 안정성 및 신뢰성이 저하될 수 있다는 문제를 가진다. 이를 해결하기 위해 예비력 확보를 기반으로 하는 그리드포밍 인버터가 필수적이다. 본 논문에서는 예비력 서비스를 고려하여 전력시장 참여자들의 이익을 최적화할 수 있는 정보를 제공하는 재생에너지 경제성 분석 시스템을 제안한다.

I. 서론

2050 탄소중립 전략이 선언되고 기후 변화에 대한 적극적 대응이 촉구됨에 따라 전력시장에서의 신재생 에너지의 비중도 증가할 전망이다. 이에 더불어 신재생 에너지 전력 시스템의 안정성 확보와 양질의 전력 공급에 대한 필요성도 함께 대두되고 있다.

그러나 전통적인 동기 발전기 기반 발전자원을 신재생 에너지 발전자원으로 대체 시 관성(Inertia) 저하로 인해 전력계통이 불안정해진다는 문제와 당면한다. 재생에너지 시스템에 사용되는 발전기는 동기 발전기와 달리 회전 관성이 없다. 화력, 수력 및 원자력 발전 등의 전통적 에너지 시스템은 대규모 터빈을 사용하여 전력을 생산하므로 회전 질량이 시스템에 관성을 부여하여 전력망의 주파수를 안정화하는 역할을 하는 동시에 전력망에 갑작스러운 부하 변동이나 사고가 발생했을 시에 주파수를 유지해 줌으로써 전력망의 안정성 및 신뢰성을 보장해준다. 반면 재생에너지 시스템은 이와 같은 동기 발전기를 사용하지 않는다. 즉 재생에너지 시스템은 계통 관성이 부족하거나 없는 것으로, 관성의 부재는 주파수 하락 속도를 증가시켜 에너지 공급의 안정성 및 예측 가능성이 저하될 수 있다.

그리드포밍 인버터(Grid-Forming Inverter)는 재생에너지 시스템에서 계통 관성 부재의 문제를 보완한다. 재생에너지 발전원은 대개 인버터(Inverter)를 통해 전력망에 연결되는데, 태양광 패널을 포함한 기타 재생에너지 장치들은 일반적으로 직류(DC, Direct Current) 전기를 생성하는 반면 전력을 공급받는 수요자원은 교류(AC, Alternating Current) 전기로 작동하므로 교류와 전압에 변화가 일어난다. 직류 전기를 교류로 변환하여 수요자원에서 사용할 수 있도록 하는 것이 인버터의 역할이다. 인버터의 제어방식은 대표적으로 그리드팔로잉(Grid-Following) 방식과 그리드포밍(Grid-Forming) 방식이 있다. 그리드팔로잉은 인버터가 스스로 전압원의 역할을 하지 않고 계통의 전압을 따라가며 에너지를 공급하는 방식으로, 계통에 동기 발전기 기반의 발전원이 충분하지 않을 시 외란에 민감하게 반응하여 계통 안정성이 저하된다. 반면 그리드포밍 인버터는 스스로 전압원의 역할을 함으로써 가상 관성을 계통에 제공해줄 수

있으므로 재생에너지의 비중이 높은 미래의 전력망에서 필수적인 기술이다[1].

그리드포밍 인버터가 가상 관성을 공급해주기 위해서는 예비력(Reserve Power)을 활용해야 한다. 예비력은 전력 수요 급증이나 전력망 장애 등의 예기치 못한 상황에 대비하여 확보해 두는 추가 전력 용량이다. 전력 수요와 공급의 균형이 맞지 않은 경우, 전력망의 주파수가 급변하거나 정전이 발생하는 등의 문제가 발생할 수 있으므로 이런 수요공급 불균형 상황에서 평소보다 더 높은 출력의 발전을 위해 예비력을 확보해 둘 필요가 있다. 이를 위해 전력거래소에서는 전력 수급 변동에 대비한 예비력 시장을 개설함으로써 전력 시스템의 안정성과 신뢰성을 유지하고 있다. 국내에서는 2024년부터 제주도 실시간 재생에너지 예비력 시장이 시범 운영 중이다.

현 국내 전력계통은 대개 국가적 전력 기관인 한국전력공사와 그 자회사인 한국전력거래소에서 전기의 생산, 전송, 분배, 거래 및 안정성 관리까지 담당하여 운영하는 형태이나, 신재생 에너지 비중이 증가함에 따라 전력 거래 시장에서의 재생에너지 발전 사업자 및 입찰 시장과 입찰제도가 도입될 전망이다. 그러나 현재 재생에너지의 그리드포밍 인버터는 상시적 예비력이 필요하지만, 발전손실 보상 등에 대한 제도적 장치가 마련되어있지 않아 발전 사업자 스스로의 기술 실현에 한계가 존재한다. 또한 제도적 보안을 위해서는 계통 운영자, 발전 사업자 및 배전망 사업자 간의 상호 운용성 등이 확인되어야 하나 기술 기준과 그 효과에 대한 근거가 부족한 상황이다.

본 논문에서는 전력계통의 안정성과 예비력을 고려한 재생에너지 경제성 평가 시스템에 대한 설계를 제안한다. 본 시스템에서는 예비력을 고려했을 때의 경제성 및 안정성 지표를 도출하기 위한 다양한 구성요소를 모델링하고, 계통 운영자, 발전 사업자 및 배전망 운영자가 시스템의 사용자로서 계통의 예비력에 따라 안정성 및 경제성을 판단할 수 있도록 한다.

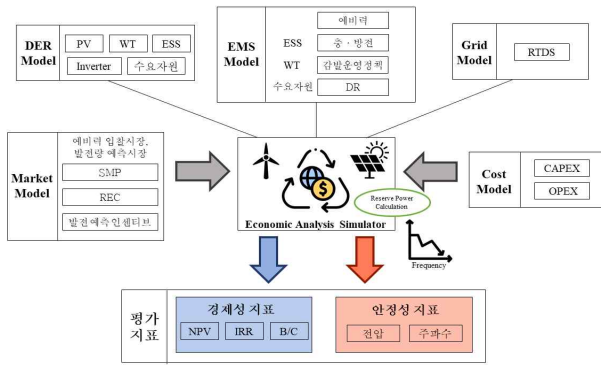
이 시스템은 전력을 생산하고 소비하는 태양광, 풍력, ESS(Energy Storage System), 수요자원 등을 포함하는 DER(Distributed Energy Resource) 모델, 자원의 수익과 지출을 결정하는 비용모델, 전력가격, 인센티브, 예비력 등의 시장 요소를 포함하는 시장 모델, 전력망 실시간 시뮬레이터인 RTDS(Real-Time

Digital Simulator)을 포함하는 그리드 모델과 DER 모델을 제어하고 시스템을 운영하는 EMS(Energy Management System) 모델로 구성되어 설계하였다.

시스템 운영자는 해당 모델들을 조합해보고 가상 전력계통의 변수들을 조작해봄으로써 계통의 안정성 및 경제성을 평가하고, 더 나아가 최적화된 운영방법과 수익 창출 방안을 도출할 수 있다.

II. 본론

경제성 분석 시뮬레이터 자원 설정



〈 재생에너지 경제성 분석 시스템 〉

경제성 및 예비력 분석 시스템은 정의된 형식에 따라 이하 서술하는 모델들의 컴포넌트들은 경제성 분석 시뮬레이터의 인터페이스에 입력으로 전달한다.

분산형 에너지 자원 모델인 DER 모델은 본 경제성 분석 시스템에서 에너지 생산, 제어, 및 소비 장치의 역할과 효과를 분석하고 시뮬레이션하는 기능을 수행한다. 시스템에서 사용자가 시뮬레이션을 구성할 수 있도록 태양광(PV, Photovoltaics) 패널, 풍력 터빈(WT, Wind Turbine), ESS, 인버터 및 수요자원을 설정하여 모델 인터페이스로 전달한다. 이후 시스템에서 정의한 단위시간(15분)을 기준으로 전달받은 리소스들에 대한 시뮬레이션을 수행하도록 한다.

EMS 모델은 재생에너지 전력 시스템의 에너지 흐름을 최적화하여 에너지 효율성을 높이기 위해 설계하였다. 예비력, ESS 전지의 충·방전, 풍력 터빈의 감발운영정책, 그리고 수요반응제도(DR, Demand Response)를 고려한 모델로 구성한다[2].

그리드 모델은 실시간 시뮬레이터인 RTDS를 포함한다. RTDS는 그리드포밍 인버터의 성능을 평가하여 계통과의 상호운용성을 검증하는 데 사용되는 대표적인 시스템이다. RTDS를 통해 계통에 접속된 개별적인 발전자원들이 물리적으로 어떻게 상호작용하는지를 시뮬레이션할 수 있으며 이는 경제성 지표를 도출하기 위한 정보로 사용된다.

비용 모델은 자본 지출(CAPEX, Capital Expenditure)과 운영 지출(OPEX, Operating Expenditure)을 포함하도록 구성하였다. 비용 모델에서는 양의 실수로 구성되어야 하는 CAPEX와 OPEX가 음수인지 확인하는 등의 유효성 검증 작업을 거쳐 리소스의 무결성을 확보한다.

시장 모델은 재생에너지 및 기상 특성 기반 발전자원과 계통을 고려하여 개발한다. 향후 개통될 예정인 예비력 입찰시장 및 발전량 입찰시장을 고려하며, 계통한계가격인 SMP(System Marginal Price), 신재생에너지 공급인증서인 REC(Renewable Energy Certificates) 및 발전 예측 인센티브를 변수로 설정할 수 있도록 한다. 전력 중개 사업자는 예측 오차율에 따라 인센티브를 지급받을 수 있으며, 오차율이 낮을수록 많은 정산금을 받을 수 있도록 정산 단가를 차등 적용한다.

경제성 분석 시뮬레이션 결과 조회

경제성 지표 및 안정성 지표에 따라 사용자에게 분석 결과를 UI로 가시화하

여 출력할 수 있도록 시스템을 설계한다. 우선 경제성 지표로는 NPV(Net Present Value), IRR(Internal Rate of Return), B/C Ratio(Benefit-Cost Ratio, 편익-비용 비율)를 사용한다. NPV는 순현재가치로, 사업의 가치를 나타내는 척도이다. NPV가 양(+)의 값이면 사업이 경제적 타당성을 갖는 것으로 판단한다. IRR은 내부수익률로, 사업기간 동안의 편익 흐름을 현재가치로 환산하여 비용 흐름의 현재가치와 같아지도록 할인하는 이자율이다. 내부수익률이 할인율보다 클 때 해당 사업은 경제적 타당성이 있는 것으로 간주한다. B/C Ratio는 편익-비용 비율로, 현재가치로 할인한 총 편익을 현재가치로 할인한 총 비용으로 나눈 비율의 결과가 가장 큰 값을 채택하는 방식을 취하는 평가 지표이다. 해당 비율이 1보다 크면 사업의 경제적 타당성이 있는 것으로 평가한다.

경제성 지표	수식
NPV	$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$
IRR	$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} = 0$
B/C Ratio	$BC\ Ratio = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$

다음으로, 재생에너지의 변동성을 고려한 전력계통의 안정성을 평가하기 위한 지표로 전압과 주파수를 활용한다. 다양한 부하 및 발전 조건에서 적절한 전압을 나타내는지, 그리고 전력계통이 해당 주파수 내에서 안정적으로 작동할 수 있는지 등을 평가할 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션을 수행한 경제성 및 예비력 분석 지표 항목별로 연산하여 데이터베이스에 저장한다.

III. 결론

본 논문에서는 그리드포밍 기반의 전력망에서 예비력 및 다양한 리소스 모델들을 고려하여 경제성 및 안정성 지표를 평가하는 재생에너지 경제성 분석 시스템을 제안하였다. 그리드포밍 기술을 고려한 경제성 분석 시스템이 없었던 현황에서, 예비력에 따라 안정성 및 경제성을 판단할 수 있도록 고안된 해당 시스템의 잠재적 사용자인 계통 운영자, 발전 사업자 및 배전망 사업자가 최적의 운영방법 및 수익 창출 방안을 도모할 수 있도록 한다. 향후에는 다양한 형태의 재생에너지 시장이 개통되어 본격적으로 운영된다면, 운영 데이터 기반의 고도화된 서비스를 제공할 수 있는 경제성 분석 시스템에 관한 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00231709, 분산에너지계통 접속 기반 그리드포밍 핵심기술 운영실증)

참고 문헌

[1] Dayan B.Rathanayake, "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," IEEE Access, 2021

[2] Saebi J, "Integrating Demand Response Market into Energy/Reserve Market: A Bilevel Approach," May. 2018, doi: 10.5370/JEET.2018.13.3.1069