

전력계통 주파수 안정화를 위한 그리드포밍 인버터 예비력 최적화 알고리즘

송민석, 선지영, 김민호, 임정택, 함경선, 김태형*

한국전자기술연구원

mssong@keti.re.kr, sjy1105@keti.re.kr minhokim@keti.re.kr, jtlim@keti.re.kr,
ksham@keti.re.kr, thkim@keti.re.kr*

Optimal Reserve Allocation Algorithm for Grid-Forming Inverters in Support of Power System Frequency Stability

Minseok Song, Jiyoung Sun, Minho Kim, Jeongtaek Lim, Kyung Sun Ham, Taehyoung Kim*

Korea Electronics Technology Institute

요 약

재생에너지원이 기존의 동기발전기를 대체함에 따라, 현대 전력 계통에서의 주파수 안정성 확보는 중요한 과제로 대두되고 있다. 그리드포밍 인버터(Grid-forming inverter)는 동기발전기와 유사한 동적 거동을 모사할 수 있어, 인버터 기반 전력계통에서 주파수 안정성 확보를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 본 논문에서는 그리드포밍 인버터의 예비력을 최적으로 할당하여 전력계통의 주파수 안정성을 향상시키기 위한 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 계통의 관성, 발전기 탈락 사고에 대한 확률, 전력시장에서의 전력 판매 수익금, 계통 사고 시 발생하는 비용을 고려하여 계통 사고가 발생하는 즉시 가상관성을 공급해줄 수 있는 재생에너지 기반 예비력에 대한 최적값을 도출한다. 본 연구는 향후 저관성 계통에서 그리드포밍 인버터 간의 협조된 예비력 운용이 계통 강건성 향상에 크게 기여할 수 있음을 시사합니다.

I. 서 론

최근 재생에너지 보급 확대에 따라 태양광 및 풍력과 같은 인버터 기반 전원이 전력 계통에 대규모로 연계되고 있다. 이러한 변화는 친환경적이고 지속 가능한 전력공급이라는 긍정적인 효과를 제공하지만, 한편으로는 기존의 동기발전기들이 점차 줄어들면서 계통에서 제공되던 물리적 관성과 주파수 안정성 확보에 어려움을 야기하고 있다. 특히, 동기발전기의 탈락이나 급격한 부하 변화와 같은 사건 발생 시, 계통은 빠르게 주파수 불안정 상태로 진입할 수 있으며, 이는 계통 전반의 신뢰도 저하 및 대규모 정전까지 이르는 위험을 초래할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 최근에는 그리드포밍 인버터(Grid-forming inverter, GFI)에 대한 관심이 급증하고 있다. GFI는 인버터 기반 전원이지만, 동기발전기처럼 전압과 주파수를 자율적으로 형성하고 계통의 기준(reference)이 될 수 있는 능력을 보유하고 있다. 따라서 GFI는 물리적 관성이 부족한 저관성 계통에서 새로운 형태의 가상관성 및 주파수 안정화 기능을 제공할 수 있는 대안으로 평가된다.

그러나, GFI의 역동적인 계통 기여를 실현하기 위해서는 제한된 예비력 자원을 효율적으로 운영하고, 다양한 계통 조건과 경제적 요소를 반영한 최적화 전략이 필요하다. 기존 연구들은 주로 기술적 제어 측면에 집중되어 있으며 [1-2], 사고 확률, 경제성, 예비력 분배 등의 요소를 통합적으로 고려한 예비력 최적화 방안은 상대적으로 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 계통 관성, 발전기 고장 확률, 전력시장 수익, 사고 발생 비용 등을 종합적으로 고려하여, 재생에너지 기반 GFI의 예비력을 최적으로 할당할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 본 알고리즘은 계통 사고 발생 시 GFI가 즉각적으로 가상관성을 제공할 수 있도록 지원하며, 이를 통해 계통의 주파수 안정성과 경제적 효율성 향상을 동시에 달성하고자 한다.

II. 본 론

1. 예비력과 그리드포밍 인버터

전력 계통의 안정적 운영을 위해서는 정상시의 전력 수급뿐 아니라, 발전기 고장이나 부하 급증 등 예기치 못한 상황에서도 빠르게 대응할 수 있는 예비력(reserve) 확보가 필수적이다. 예비력은 응답 시간과 제어 방식에 따라 여러 단계로 구분된다.

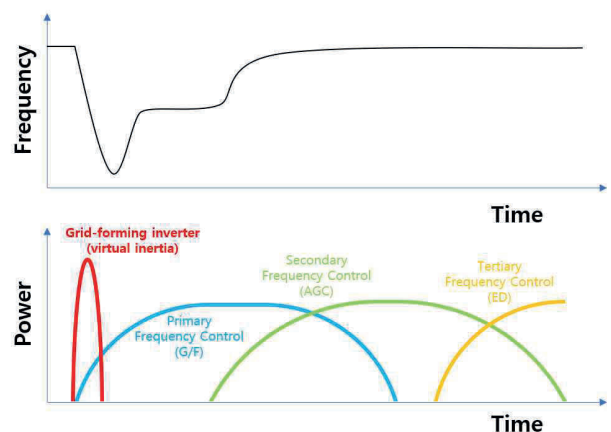


그림 1 전력 계통 사고시 예비력에 의한 전력 공급 및 그에 따른 주파수 변화

사고 발생 직후 10초 이내에 자동으로 반응하는 조속기운전(G/F)은 동기발전기의 속도 조정을 통해 빠르게 주파수하락 역제를 목적으로 한다. 그 뒤를 잇는 1차 예비력(Primary Reserve)은 10분 내에서 주파수를 회복하는 데 활용되며, 주로 자동발전제어(AGC)에 의해 수행된다. 이어서 2차 예비력(Secondary Reserve)은 30분 이내에 경제급전(ED) 제어를

통해 주파수를 정격 수준으로 복원하고, 계통 전체의 안정성을 다시 확보한다. 이러한 체계에서는 사고가 일어난 직후 초반 수초 이내의 급격한 주파수 하락은 동기 발전기의 물리적인 회전 관성으로 인해 방지가 되었으나, 재생에너지 보급이 확대되면서 인버터 기반 전원의 비중이 높아지고, 이에 따라 계통 전체의 물리적 관성이 감소하고 있다. 이로 인해 사고 발생 직후 초반의 주파수 변동 속도가 빨라져 계통 불안정성이 심화되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 주목받고 있는 기술이 바로 그리드포밍 인버터(Grid-forming Inverter, GFI)이다. GFI는 외부 주파수를 추종하는 대신, 스스로 전압과 주파수를 형성할 수 있으며, 제어 알고리즘을 통해 가상관성을 제공할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 이를 통해 GFI는 계통 사고 초기 단계에서 빠르게 반응하여 주파수 낙하를 억제하고, 안정성 확보에 기여할 수 있다.

	Primary Control	Secondary Control	Tertiary Control
수행 수단	조속기운전(G/F)	자동발전제어(AGC)	경제급전(ED)
제어 목적	주파수 하락 저지 주파수 안정화	주파수 복원 1차 예비력 회복	경제 급전 2차 예비력 회복
출력 요건	10초 이내 응답 5분 이상 유지	10분 이내 응답 30분 이상 유지	30분 이내 확보

그림 2 전력 계통 사고시 예비력 동작

2. 재생에너지 예비력 최적화 문제

전력 계통상의 전체적인 회전 관성모멘트를 J_{net} 이라고 한다면 ΔP_{net} 만큼의 전력이 발전기 사고로 인해 탈락 되었을 때 기존의 예비력들이 동작하기 전까지 하락하는 주파수는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \int_{\min_i t_i}^{\min_i t_i + \Delta t_r} \frac{\partial \omega}{\partial t} dt \\ &= \int_{\min_i t_i}^{\min_i t_i + \Delta t_r} \frac{1}{J_{net} \omega_r} (\Delta P_{net} - P_{res}) dt \\ &= \frac{1}{J_{net} \omega_r} \left[\int_{\min_i t_i}^{\min_i t_i + \Delta t_r} \left(\sum_{i=1}^n P_{r,i} h(t - t_i) \right) dt - P_{res} \Delta t_r \right]\end{aligned}$$

주파수 감소분이 이 구간에서 특정 한계 수치 $\Delta\omega_{max}$ 를 넘게 되면 계통에서 발생한 사고가 심각한 정전으로 이어지며 이때 β 만큼의 비용이 발생한다고 가정한다. 그러면 예비력 P_{res} 에 따라 변하는 주파수 하락분이 $\Delta\omega < \Delta\omega_{max}$ 를 만족할 확률을 $p_f(P_{res})$ 라고 정의하고, 전력 판매 수익이 에너지당 α 라고 한다면 아래와 같이 기대되는 손익 $f(P_{res})$ 를 정의 할 수 있다.

$$f(P_{res}) = -\beta(1 - p_f(P_{res})) + (\alpha(P_{net} - P_{res})(T - \Delta t_r) + \alpha P_{net} \Delta t_r) p_f(P_{res})$$

여기서 함수 $h(\cdot)$ 는 Heaviside step function 이며 $P_{r,i}$ 는 i 번째 발전기의 정격 출력을 나타낸다. 재생에너지 예비력인 P_{res} 가 클수록 계통의 정전으로 발전될 가능성이 적어지므로 함수 $p_f(P_{res})$ 의 대략적인 형태는 다음과 같다

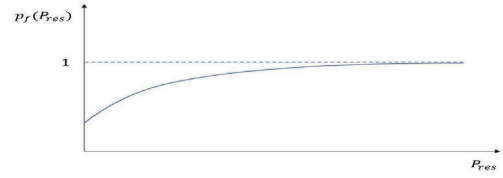


그림 3 함수 $p_f(P_{res})$ 의 형태

3. 재생에너지 예비력 최적화 방법

재생에너지 예비력 최적화 문제에 대한 식을 분석해보면 재생에너지 예비력 P_{res} 에 대한 손익 함수 $f(P_{res})$ 의 도함수는 아래와 같은 개형을 갖는 것을 확인할 수 있다.

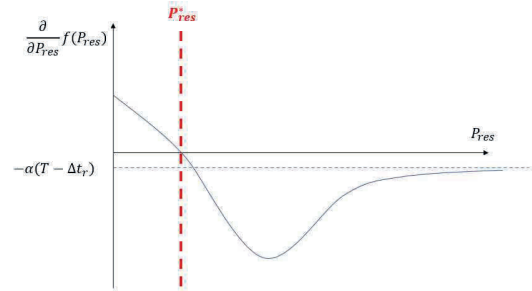


그림 4 재생에너지 예비력 산정에 따른 기대 손익 도함수

계통 사고의 확률적 모델링과 계통 접속 발전기의 정격 용량에 따라 구체적인 함수 모양은 다르겠지만 위와 같은 개형을 갖는 것을 알 수 있으며 이에 따라 손익이 극대화되는 유일한 최적의 예비력 P_{res}^* 가 존재함을 알 수 있다. 손익 함수는 유일한 극댓값이 존재하는 함수이므로 Bisection algorithm을 통해 최적의 예비력 P_{res}^* 을 구할 수 있다.

III. 결론

본 논문은 재생에너지 기반 그리드포밍 인버터를 활용하여 전력 계통의 주파수 안정성을 확보하기 위한 재생에너지 예비력 최적화 알고리즘을 제안하였다. 사고 확률, 발전 수익, 손실 비용을 포함한 목적함수를 구성하고, 도함수 분석을 통해 최적 예비력 산정을 위한 수치해법 기반 접근을 제시하였다. 본 연구는 저 관성 계통 환경에서 경제성과 안정성을 동시에 고려한 예비력 운용의 이론적 기반을 제공하며, 향후 실 계통 적용을 위한 후속 연구의 토대를 마련할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00231709, 분산에너지 계통접속 기반 그리드포밍 핵심기술 운영실증)

참 고 문 헌

- [1] OWAIS, Raja; IQBAL, Sheikh Javed. A master-slave-based power reserve control approach for solar PV participation in frequency control. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48.11: 15475-15494.
- [2] TIAN, Sheng, et al. A wind farm control strategy for frequency regulation reserve: Optimize wake loss and frequency support capability. *Renewable Energy*, 2024, 237: 121645.