정책 이슈페이퍼 18-11

전력저장장치 활용에 따른 운영예비력 제도 개선 방향 제언

조주현

목 차

〈요 약〉 / 1

Ⅰ. 연구의 배경 및 목적 / 4

Ⅱ. 국내 운영예비력제도 및 전력저장장치(ESS) 현황 / 5

Ⅲ. 해외의 운영예비력제도와 정산체계 및 전력저장장치 (ESS) 활용현황 / 12

Ⅳ. 국내 운영예비력제도 개선방안을 위한 제언 / 23

Ⅴ. 맺음말 / 25

〈참고자료〉 / 27

에너지경제연구원
Korea Energy Economics Institute

〈요 약〉

○ 실시간으로 변화하는 부하와 발전의 균형을 맞추기 위해 운영예비력을 활용함.

- 수 초 ~ 수 분 동안의 수급불균형은 주파수조정서비스(frequency regulation)로, 그 이상 불균형 지속 시는 대기·대체서비스로 대응함.
- 하지만 이로 인해 예비력으로 지정된 용량의 기회비용, 예비력으로 지정된 용량만큼 추가 발전기 투입으로 인한 한계가격 상승의 문제가 발생함.

○ 배터리 전력저장장치(Battery Energy Storage System, BESS)는 계통에서 주파수조정용으로 활용할 수 있는 규모와 출력을 갖춘 정도로까지 기술발전이 이루어지고 있음.

- 급전지시 시 수 초 이내에 응답할 수 있는 속응성과 급전지시에 정확히 따를 수 있는 정확성이 큰 장점으로 꼽히나, 타 전원대비 높은 설비단가가 도입의 큰 약점으로 꼽힘.
- 한국을 포함해 전 세계적으로 BESS를 주파수조정서비스 용으로 활용을 위한 실증과 시범사업이 진행 중임.

○ 본 연구에서는, 크게 세 가지 분야에 대한 논의가 이루어졌음.

- 해외 전력시장에서 운영예비력 운영 및 정산제도 분석
- 이를 바탕으로 한 현 국내의 운영예비력 제도 및 정산방식에 대한 개선방안
- 현재 감발운전을 통해 운영예비력 중 일부를 제공하는 석탄발전기의 용량을 리튬이온 ESS로 대체할 경우의 편익 분석

○ (논의점 1) 운영예비력 서비스에 자발적 입찰제도 미비

- 한국에서는 전일시장에서 운영계획 수립 시 발전기들과 계통의 특성을 고려해 예비력을 할당하고 이에 대해 각 서비스에 대한 정산단가를 적용하여 정산하여 기회비용과 운영비가 합리적 보상이 이루어지는지 명확하지 않음.
- 각 서비스의 기술 요건에 부합하는 자원들의 예비력 시장 진입을 허용해 경쟁을 통한 최적의 자원배분 및 가격결정과 이로 비롯되는 장가격에 의한 합리적 보상을 기대할 수 있음.

○ (논의점 2) 운영예비력 제도의 세분화 필요

- 현재 주파수조정서비스는 G/F과 AGC로 이루어져 있으나, 해외 선진국의 주파수조정용 서비스 체계와 비교해 볼 때 이에 대한 세분화가 필요함 한 것으로 보이며, 이는 배터리 전력저장장치의 진입을 도모할 수 있을 가능성이 있음.
- 대기·대체예비력의 경우 급전지시 후 20~30분 이내에 발전자원이 투입되는 것이 안정적 계통운영에 실질적으로 기여할 것으로 보인다는 실무 및 전문가들의 의견을 반영한 제도 개선이 필요한 것으로 보임.

○ (논의점 3) 예비력 보상제도에서 용량과 실적 분리보상 필요

- 예비력서비스는 기 정해진 정산단가를 적용하여 정산하여 기회비용과 운영비가 합리적 보상이 이루어지는지 명확하지 않음.
- 현재와 같이 그리고 자원의 응동성과 급전지시에 대한 정확성에 따른 차별적 보상을 유지하되, 해외 선진 계통운영 시장에서와 같이 발전자원에 대한 투자비용, 실제 자원에서 사용한 에너지를 분리하는 개선 방향을 고려해 볼 수 있음.

○ (논의점 4) 운영예비력 확보를 위한 석탄 감발운전 ESS 대체 시 효과

- 현재 석탄발전 용량 중 약 5% 정보를 감발운전 하여 운영예비력으로 활용 중임.
- 석탄의 감발운전 용량을 리튬-이온 ESS로 대체할 경우 연료비 변화와 배터리 ESS 투자비를 추산함.
- 연료비의 경우 2016년 단가 기준으로 석탄발전 증가와 이로 인한 LNG발전량 감소로 약 6,600억 원의 연료비 감소가 추산됨.

○ 감발운전중인 석탄발전을 리튬이온 배터리 ESS로 대체할 시 최소 2.2조원에서 최대 10조원의 투자비가 필요할 것으로 추산됨.

Ⅰ. 연구의 배경 및 목적

□ 전력계통운영 중 운영예비력 서비스 (operating reserve service) 는 안정적인 전력수급을 위해 필수적인 서비스임.

○ 실시간으로 변화하는 수요와 공급의 균형을 맞추기 위해 운영예비력 서비스는 필수적임.

- 계통의 균형은 주파수(Hz)로 측정되며, 계통운영자 (System Operator, SO)는 운영예비력을 활용하여 수급을 조절하여 계통에서 미리 정한 주파수 기준과 그 오차 범위 내에서 운영되도록 운영함.
    - 이에 따라 예비력으로 확정된 용량은 대기 상태에서 필요시 마다 실시간 혹은 주어진 반응시간 안에 필요시마다 필요한 전력을 공급하게 됨.
- 이에는 유효전력(active power) 혹은 전압 유지를 위한 무효전력(reactive power)을 공급하게 됨.
- SO는 주로 계통에 참여하는 발전기 용량의 일부분을 혹은 전체를 수급조절을 위한 예비력으로 확보하여 필요시 마다 활용함, 활용시간은 짧게는 수 초 길게는 수 시간까지로 이어질 수 있음.

□ 운영예비력 보상요소 고려사항

○ 예비력으로 활용되는 경우 그 용량이 예비력으로 활용되는 시간만큼 에너지서비스에 참여하지 못하므로 이로 인한 기회비용이 발생함.

○ 이외에도 예비력으로 활용되기 위해 uplift cost 등 예비력 자원으로써 기술적 요건을 충족하기 위한 비용에 대한 보상 또한 필요함.

□ 배터리 전력저장장치의 기술발달로 인한 전력계통에서 활용가능성 증가

○ 속응성과 정확도가 높으며, 정격출력까지 도달하기까지 시간과 비용이 거의 들지 않아 전세계적으로 운영예비력 서비스로 활용을 위한 실증 프로젝트가 진행 중이며 기술의 성숙도가 증가하고 있으나, 높은 배터리 단가가 활용의 걸림돌로 작용하고 있음.

□ 이에 따라 한국의 운영예비력 및 배터리 전력저장장치 활용현황과, 선진적 전력시장제도와 정산제도를 갖추고 있는 미국과 영국의 운영예비력 관련 규제와 보상제도 현황, 그리고 배터리 전력저장장치 활용현황을 비교하고자 함.

○ 이를 바탕으로 한국의 운영예비력 및 보상제도에 대한 개선방향과 배터리 전력저장장치의 활용적합성에 대해 제안하고자 함.

Ⅱ. 국내 운영예비력제도 및 전력저장장치(ESS) 활용 현황

□ 한국 전력거래시장에서의 운영예비력

○ 전력시장운영규칙에 따르면 예비력이란 “예측수요의 오차, 발전기 불시고장 등으로 인하여 전력수급의 균형을 유지하지 못할 경우를 대비하여 최대부하를 초과하여 보유하는 발전기의 출력여유분 및 전기저장장치의 주파수조정용량”으로 정의되어 있음.

- 즉 실시간으로 수급의 균형을 맞추기 위해 여유분의 발전용량을 확보하여 안정적 계통운영을 수행하는 데에 필요한 발전자원이라고 할 수 있음.

○ 균형을 이루지 못하는 상황은 초단기부터 수 분 이상으로도 지속될 수 있으므로, 그 규모와 지속시간에 따른 예비력 자원이 필요함.

○ 현재 운영예비력은 총 4,000MW 이상 규모를 확보하도록 되어있으며, 그 중 주파수 조정용으로 1,500MW 이상, 대기·대체예비력으로 나머지 2,500MW 이상을 확보하고 계통운영에 따라 각 서비스가 필요할 때 마다 사용 중임.

○ 각 서비스의 활용되는 계통상황, 계통투입까지 필요시간, 확보용량 규모는 <표 1>과같이 정리할 수 있음.

<표 1> 운영예비력 서비스 종류, 활용상황, 계통투입까지 지산, 확보용량 규모

(단위 : MW)

		활용되는 계통상황	계통투입까지 필요시간	확보 용량 규모	
				동·하계 수급대책 기간	그 기외의 기간
주파수조정예비력 (G/F, AGC)		수요변동	항시 응동	1,500	1,000
대기예비력	운전상태	수요예측 오차	10분 이내	1,500	1,000
	정지상태	단일 설비고장	20분 이내	1,000	1,500
대체예비력		다중 설비고장	2시간 이내		

자료: 전력시장운영규칙, 전력거래소

○ 주파수조정예비력은 다시 G/F와 AGC로 나누어져 있으며, 각각의 서비스의 용도와 특징은 <전력시장운영규칙>에 다음과 같이 정리되어 있음.

- G/F (주파수 주총 혹은 1차 주파수 응답)
  - 주파수 변동 초기에 응동하는 주파수 조정용량임.
  - 주파수 변동 시 10초 이내 발전력이 응동하여 30초 이상 출력유지가 가능한 자원이며, 발전기의 Governor Free 및 전기저장장치의 주파수 응답능력을 활용함.

- AGC (자동발전제어 혹은 2차 주파수 응답)
  - 1차 응답 후 정상주파수 유지범위로 회복시키기 위한 유효전력 제공 목적이며, 주파수 변동 후 30초 이내 응동, 30분 이상 출력유지 가능하여야 함.
  - 발전기의 AGC 보유예비력 및 출력증가, 전기저장장치의 EMS 원격제어로 주파수조정용량 및 출력조절에 의함.

○ 대기·대체예비력은 발전설비 불시정지 및 수요예측 오차, 발전소 및 송전설비 고장정지 등에 대비한 용도이며, 다시 운전상태와 정지상태로 구분하여 운영됨. 이에 대한 전력시장운영규칙에 따른 기준은 아래와 같음.

- 운전상태 : 계통에 연결되어 운전 중이어야 하며, 급전지시 10분 이내로 주파수조정 예비력을 초과한 만큼을 추가로 발전할 수 있는 상태이며, 급전지시 후 120분 이내(동·하계 전력수급대책기간은 20분 이내 이용가능)에 확보 및 이용이 가능하여야 함.
- 정지상태 : 계통에 연결되어 있지는 않으나 전력거래소의 급전지시 이후 120분 이내에 (동·하계 전력수급대책기간 20분 이내) 계통에 연결되어 발전할 수 있는 상태

○ 총 대기·대체예비력의 용량은 2,500MW이상 확보되어있고, 동·하계 수급대책기간 (피크시즌) 여부에 따라 운전상태와 정지상태인 예비력 확보량이 달라짐.

○ 수급대책기간에는 운전상태로 1,500MW 이상 정지상태로 1,000MW 이상을 유지하며, 그 이외의 기간에는 운전상태로 1,000MW, 정지상태로 1,500MW을 유지하며 불시의 상황에 대비하고 있음.

□ 운영예비력 정산체계

○ (정산체계) 운영예비력에 대한 보상에 있어서 주파수조정서비스와 대기·대체서비스가 상이한 요소를 고려하여 각 서비스에 대한 보상을 제공하고 있음.

○ 주파수조정의 경우 각 서비스별 정산단가를 기준으로 응답가능용량, 제어성과, 사용 시간에 의해 보상금액이 결정되며, 제어성과는 시스템에서 보내는 신호에 대한 발전기의 출력변화 속도와 정확도에 따라 결정됨.

- 결과적으로 발전기의 반응속도와 정확성에 따라 차별적 보상을 하게 되며, 동종의 서비스를 동시간에 제공할 경우 반응속도와 정확성이 높은 발전기일수록 상대적 보상금액이 그렇지 못한 발전기에 비에 높아짐.

○ 대기·대체서비스에 대한 정산의 경우 주파수조정서비스에 대한 정산과 달리 각 서비스별 정산단가와 응동가능한 예비력 크기(MWh)에 의해 결정됨.

□ 운영예비력 정산현황

○ (정산현황) 한국 전력시장에서 각 예비력 서비스에 대한 단가는 총 예비력 서비스를 직전 해의 실적을 고려하여 서비스 별 정산단가를 산정함. 즉 항목별 배정액을 전년도 서비스량(MW)으로 나누어 산정함.

○ 정산과정에서는 정지상태의 대체·대기예비력에 대해서만 예비력 정산이 이루어지고 있는데, 이는 운전상태 대기예비력의 경우에는 정산 시 제약감발보상(COFF, constraint off)으로 이루어지고 있다고 보기 때문임.

○ <표 2>에서와 같이 2012년부터 2016년까지 최근 5년간 보조서비스 정산결과를 보면 경우 원자력을 제외한 석탄, LNG, 유류, 수력 및 양수발전을 활용하고 있음. 이 중 석탄을 제외한 나머지 자원들은 출력조절 속도가 빠른 발전자원임.

○ 석탄의 경우는 기저발전임에도 감발운전을 통해 주파수조정서비스에 활용되고 있음.

○ 설비종류에 따른 연간 보상금액 규모는 LNG가 가장 많고, 석탄, 양수, 수력, 유류의 순서를 보이고 있음.

○ 총 정산금액 규모는 2012년 450억원에서 2013년 492억으로 증가하였으나, 이후 계속 감소하여 2016년에는 407억원 규모로 감소하는 추세임.

<표 2> 2012~2016년 발전원별 연간 보조서비스 정산금액

(단위 : 억원)

	2012	2013	2014	2015	2016
석탄	110	107	113	127	112
LNG	142	190	190	187	186
유류	23	39	17	15	21
양수	100	105	78	50	50
수력	75	51	66	40	37
기저발전기	340	385	351	292	295
첨두발전기	110	107	113	127	112
총 정산금액	450	492	464	419	407

자료: 전력거래소 2012-2016 전력시장통계

□ 전력저장장치 운영현황

○ 국내 양수발전의 경우 급전지시 후 출력까지 최소 2분, 평균 5분이 소요되어 주로 대기예비력으로 활용중임. 하지만 부지 제약, 주민수용성 등의 문제로 인해 쉽지 않은 상황임.

○ 배터리 기술의 발달로 고출력, 대용량의 배터리 전력저장장치(Battery Energy Storage System, BESS)로 계통에서 활용할 수 있는 수준으로까지 도달하였

음. BESS의 경우 부지의 제약을 받지 않아 설치 및 운영에 있어 양수발전에 비해 유리함.

○ 하지만 아직 비싼 단가와 잦은 충·방전 시 수명단축 및 화재의 위험 등이 해결돼야 할 문제로 지적되고 있음.

○ 세계적으로 BESS 계통활용에 대한 실증연구가 진행되고 있는 가운데, 국내에서는 한전에서 14년부터 서안성 변전소에 28MW, 신용인 변전소에 24MW에 규모의 BESS를 시작으로 주파수조정용(Frequency Regulation) ESS 시범사업을 지속하고 있음.

○ 2016년 까지 236MW가 14개 변전소에 이미 설치됐고, 2017년에 추가로 124MW를 4개 변전소에 구축할 계획임.

○ BESS 의 빠른 응답속도와 비교적 짧은 출력 지속시간(30분 미만)으로 인해서 주파수 유지 및 복구를 위한 시범사업에 활용되고 있음.

□ 현 운영예비력 체계의 취약점

○ (보상체계 1) 주파수조정서비스와 대기·대체예비력 공통적으로 정산단가를 산정하는 데에 있어 예비력으로 활용되는 용량에 대한 기회비용을 반영하지 못하고 1년에 주어진 예산은 전년 실적에 따라 배분하는 맹점이 존재함.

- 비록 주파수조정서비스에 대해서는 급전지시에 따른 발전기별 반응속도와 제어성과를 고려한 차등적 보상이 이루어지고 있으나, 그 기반에 되는 정산단가는 결국 보조서비스 예산에 의해 정해지고 있음.
- 현재는 시장에서 수요와 공급에 의해 운영예비력에 대한 가치가 정해지고, 그에 따라 산정된 단가에 기반해 보상받을 수 있는 매커니즘이 부재함.

○ (보상체계 2) 현재 정산제계로는 예비력으로 사용되는 발전용량(MW)과 실제

계통안정성 확보를 위해 사용되는 에너지를 분리하여 보상하지 못하는 문제가 존재함. 이는 총괄원가보상원칙에도 부합하지 않는 요소로 여겨질 수 있음.

○ (운영예비력 제도) 크게 주파수조정의 경우 G/F와 AGC로 구분은 되어있으나, 미국과 영국 등의 해외 선진 전력시장 제도와 비교해 구체적으로 급전지시 후 반응시간 및 출력지속시간에 대한 명확한 수치가 시장운영규칙에 제시되어 있지 않음.

- 대기 대체예비력의 경우 120분 이내 계통진입을 요구하나 실질적으로 20분 이내에 계통에 진입하지 못하면 계통 주파수 회복에 기여하지 못하는 것으로 평가됨.

○ (배터리 기술현황 및 한계점) 한전의 주파수조정용 ESS 설비가 2016년 두 대형 발전기의 연쇄 고장정지로 인해 주파수 저하가 발생함.

- 최초 고장 시 ESS가 바로 동작했으나, 약 8분 정도밖에 출력을 유지하지 못하였음. 이는 배터리의 안전한 운영을 위해 저장용량 중 일부만을 충전상태 (State Of Charge, SOC) 로 설정해 실제 충·방전에 사용할 수 있기 때문임.
- 실제 사고 시 SOC를 65%로 설정해 놓았기 때문에 배터리 저장용량 중 실제로는 65% 만을 실제 충·방전에 사용할 수 있었고, 결국 출력은 예상에 비해 짧은 시간만 지속되었음.
- 이와 같은 사고 위험성 때문에 BESS를 주파수조정용으로 할당된 기존 화력발전용량을 모두 대체하는 것은 아직 시기상조 인 것으로 보임.

Ⅲ. 해외의 운영예비력제도 및 전력저장장치(ESS) 활용 현황

□ 분석대상

○ 전력시장 제도와 운영이 발달되어 있는 미국과 영국에서는 정책제도와 시장운영을 통해 시장의 효율성을 보장하고자 함.

- 즉, 다양한 발전자원이 시장에 진입하여 수요와 공급의 최적 균형점을 찾을 수 있도록 유도하고 있음.
- 제도적으로는 행정명령 등을 통해 정책적 방향을 제시하고, 시장에서는 주어진 정책방향에 맞추어 운영 및 보상방안을 마련함.

○ 본 분석에서는 미국의 예비력제도에 관한 행정명령과 각 계통운영자들의 운영 및 보상제도, 영국에서 계통운영자인 National Grid의 운영 및 보상제도에 대해 알아보고자 함.

□ 미국 연방 에너지 규제위원회 행정명령

○ 미국 연방에너지규제위원회(Federal Energy Regulatory Committee, FERC)에서는 전력계통 운영 및 시장제도에 대한 행정명령(Orders)을 내리고 있으며, 각 계통운영자(ISO, Independent System Operator/RTO, Regional Transmission Operator)는 운영규칙과 정산규칙을 이에 부합하도록 마련 혹은 개선해야 함.

- FERC Order는 구체적인 숫자를 제시하지는 않으나 시장운영 방향과 원칙을 제공하여, 보다 다양한 자원이 차별 없이 시장에 참여, 경쟁을 통해 가장 효율적인 자원의 배분과 그에 상응하는 가치를 보상받을 수 있도록 관련 제도들을 지속적으로 신설 및 개정 하고 있음.

- 실제로, 1997년 FERC Order 888을 통해 계통에 자원의 무차별적 진입을 도모하는 행정명령을 내린 이후, FERC Order 890, 1000등을 통해 지속적으로 이를 도모하고 있음.

○ 따라서 예비력자원에 대해서는 행정명령이 직접 혹은 간접적인 영향을 미치고 있다고 볼 수 있음.

○ FERC Order 755, 주파수조정을 위한 예비력 자원의 보상에 대한 제도 (Frequency Regulation Compensation in the Organized Wholesale Power Markets)

- 예비력을 제공하는 자원의 용량(capacity)과 실제 제공된 서비스에 대한 실적(performance)에 대해서 보상이 이루어지도록 보상체계를 개선하도록 명령함. 이후 시장에서는 이러한 보상체계를 이행실적에 대한 보상(pay for performance)이라고 부르기 시작함.
- 또한 실적에 대해서 응동속도 등 서비스가 계통운영자의 출력조절 신호에 반응하는 정확도를 고려하여야 할 것을 명문화함.
- 하지만, 주파수조정 서비스를 제공하기 위한 특정한 조건이나 구체적인 수치를 규정하지는 않았음.

○ FERC Order 784, 제 3자 의 보조서비스 제공(Third Party Provision of Ancillary Service)

- 구조개편 된 시장의 계통운영 보다는 수직 통합된 지역에 관련성이 높은 행정명령임.
- 행정명령 이전에는 해당 시장에 참여하지 않는 자원의 보조서비스 제공이 금지되어 있었으며, 자가제공(self-supply) 보조서비스에 대해서는 고정된 용량요금으로 보상되었음.

- Order 784에서는 보조서비스가 고정가가 아닌 시장기반 가격(market based rates)에 계통운영자에게 판매되어야 한다고 규정함.
- 또한 계통운영자가 예비력서비스에 필요한 속도와 정확도에 대한 예비력 규정에 영하도록 하여, 자가제공자들이 자신의 서비스가 계통의 요구사항에 부합하는지를 대해 확인할 수 있도록 함. 이에 따라 예비력 서비스를 자가제공하는 경우, 시장의 예비력제도 규정에 부합하는 매우 빠르고 정확한 반응속도를 지닌 자원을 소유한 경우, 이전보다 더 적은 예비력서비스를 필요할 수 있음.
- 나아가 다양한 자원이 보조서비스를 제공하기 위해 시장에 참여할 수 있는 기회를 제공한 것으로 해석됨.
- 이는 2015년 Order 819로 이어져 시장기반 가격에 의해 보조서비스의 한 분야인 primary frequency response service의 거래가 각 전력거래시장 혹은 시장가격에 기반한 계통운영에서 허용하도록 하는 행정명령으로 이어짐.

□ 미국 전력 시장에서의 예비력 서비스 운영 및 정산제도

○ 상기의 FERC Order에 부합하는 예비력 운영 및 정산제도를 개발 및 개선하기 위해 각 시장은 노력을 기울이고 있음.

- 예비력 용량 확보는 시장참여자들의 자가 용량 활용(self-arrange), 시장 외 제3자 와의 계약, 혹은 필요용량을 계통운영자가 전일 및 실시간 입찰시장을 운영해 구매하는 방법을 활용하고 있음.
    - 시장에서 구매하는 경우를 반영하여 미국의 각 계통운영자는 시장에서 예비력서비스에 대한 보상체계를 pay-for-performance에 기반하여 개발 및 운영하고 있음.

- 각 계통운영자가 주파수조정서비스에 대한 보상체계 및 응동성과(mileage) 측정명, 성과 측정기준에 대한 명칭은 각기 다르며, 이를 <표 3>에서 비교하여 보여주고 있음.
  - 시장 간에 공통적으로 주파수조정에 참여한 용량과 실제 주파수조정에 사용된 응동량을 구별하여 정산이 이루어지고 있음.
  - 용량가격의 경우 CAISO, PJM, ISO-New England 에서는 참여용량에도 응동성능에 따른 가중치를 부여해 용량가격으로 정산하고 있으며, 나머지 시장에서는 참여한 용량 자체에 대해 정산하고 있음.
  - 주파수조정을 위해 발전기가 실제 응동된 실적을 보상하는 응동가격의 경우 각 시장에서 불리는 이름은 mileage, movement 등으로 다르나, 공통적으로 주어진 발전기의 최대출력에 비해 출력조절을 한 정도를 측정함. 즉, 응동을 위한 출력변화/최대출력(△MW/최대MW)로 계산됨.
  - 응동실적에 따른 performance index 혹은 performance score, accuracy percentage로 불리며 0에서 1사이의 값을 가짐. 이는 응동에 대한 보상가격에 반영되어 주파수조정을 위한 급전지시에 따르는 응동속도와 정확도에 따른 차별적 보상을 가능케 하는 요소임.
  - 특히 PJM의 경우는 특이한데, 기존 대용량 발전기(Regulation A로 정의됨)가 주파수조정에 응동하는 성능에 비교한 해당 참여용량의 응동성능을 가중치로 계산해, 이를 응동가격 정산에 반영함.

<표 3> 미국 전력계통에서 예비력에 대한 가격체계 구성 및 명칭, 응동실적측정 명칭, 응동성능에 따른 가중치에 대한 명칭 비교

계통운영자	가격		응동 실적 측정	응동 성능에 따른 가중치
	용량가격	응동 (mileage)가격		
PJM	capability price	performance price	mileage	performance score
NYISO	capacity price	movement price	movement	performance index
MISO	capacity price	milage price	mileage	performance accuracy
ISO-New England	capacity price	service price	movement	performance score
CAISO	capacity price	mileage price	mileage	accuracy percentage

자료: Survey of U.S. Ancillary Services Markets, Argonne National Lab. 2016

□ 영국 시장에서의 예비력 서비스 운영 및 정산제도

○ 영국의 계통운영은 National Grid에서 담당하며 영국 및 아일랜드의 전력계통운영을 담당하고 있음.

○ 영국은 기타 유럽대륙과도 계통연계가 되어 필요시 전력 수·출입을 통한 수급균형을 이루고 있음.

○ National Grid는 계통운영자의 역할을 하며, 미국과 달리 발전사업자와 판매사업자가 동시에 예비력서비스에 참여할 수 있는 점이 특징임.

- 이는 영국은 신재생 발전원, 특히 풍력발전의 비중이 크며, 이에 따른 단기 출력 변동성에 대비하기 위한 예비력서비스가 세분화가 되어있는 것으로 풀이됨.

○ 영국 시장에서의 예비력 서비스 운영제도는 다음과 같은 특징이 있음.

- 발전사업자 외에도 판매사업자가 예비력시장에 참여해 서비스를 제공할 수 있음.

- 주파수조정서비스 중 Mandatory Frequency Response의 경우 National Grid는 발전사업자에게 각 사의 참여용량을 바탕으로 주파수조정을 위한 용량을 지정하고 발전사업자들은 그 규모를 의무적으로 제공해야 함.
- 공급이 수요를 초과하여 여유 발전량이 발생할 경우 이를 담당하는 foot-room 서비스가 존재함. 이는 초과발전 시 발전량을 curtail 하는 것과 반대로 전력소비를 증가시켜 수급의 균형을 이루도록 증가한 부하에도 보상을 하는 서비스임.

○ Mandatory Frequency Response를 제외한 모든 서비스가 참여자들의 자발적인 입찰로 이루어짐.

- 주파수서비스 중 의무참여인 Mandatory FR의 경우 시장에 참여하는 용량과 기술적 특성에 따라 참여자가 제공하여야 하는 주파수조정용 용량이 정해짐.
- Mandatory FR 중의 하나인 High Response는 유효전력 (active power)를 지속적으로 감소시키는 목적임, 이와는 대조적으로 같은 서비스의 Primary Response와 Secondary Response의 경우에는 active power를 증가 혹은 감소하기 위해 사용됨.

○ Short Term Operating Reserve와 Foot-room을 제외하고는 모두 급전지시 이후 수 초, 혹은 2 분 이내에 반응하여야 함. 즉, 응동속도가 매우 빠른 자원의 활용에 있어서 세분화 된 서비스들을 활용하고 있으며, 대체예비력의 경우 그렇지 않은 모습을 보이고 있음.

○ 정산요소를 보면, 크게 대기한 시간 및 시간대에 따른 보상(Availability fee, Window initiation fee, Holding fee)와 대기 용량에 대한 정산(Utilisation fee), 실제 예비력서비스에 사용한 유효전력에 대한 정산 (Response Energy fee)으로 구성되어 있음.

○ 주파수 조정에 초 단위로 응답되어야 하는 서비스들(Mandatory FR, FRDM, FR)의 경우 에너지에 대해 보상을 하나, 오히려 응동속도가 느린 FR이나 STOR의 경우 에너지에 대한 정산이 이루어지지 않고 있음.

○ 시장참여자들의 자발적 입찰로 이루어지는 FRDM, FFR의 경우에 예비력으로 활용되는 시간대와 실제 에너지 제공량에 대한 정산이 이루어짐.

○ 이에 비해 한국의 대기·대체예비력에 해당하는 Fast Reserve와 Short Term Operating Reserve의 경우 대기용량에 해당하는 Utilisation fee으로 정산하는 것이 특징임.

<표 4> 영국 National Grid에서 운영예비력 서비스 종류, 최소용량, 응답시간, 출력지속 요구 시간 및 정산요소 비교

서비스종류	참여 최소 용량	급전지시 응답 요구 시간	출력 지속 요구 시간	정산요소
Short Term Operating Reserve (STOR)	3MW	240 분 이내	2 hrs to 6.5 hrs	Availability fee(£/hour) Utilisation fee (£/MW/h)
Fast Reserve (FR)	50MW	급전지시2분 이내 혹은 급전지시해제 이후 2분 이내	15분 출력지속능력을 증명해야 함	Availability fee (£/h) Utilisation fee (£/MW/h), Holding fee (£/h) (선택적)
Firm Frequency Reserve (FFR)	10MW	매 필요시 마다 혹은 10초이내	30분 이상	Availability fee (£/hour) Window initiation fee(£/window) Nomination fee(£/hour) Response energy fee(£/MWh)
Frequency Regulation by Demand Management (FRDM)	3MW	2초 이내	0.5시간~2.5시간	Availability fee (£/hour) Window initiation fee(£/window) Nomination fee(£/hour)

서비스종류	참여 최소 용량	급전지시 응답 요구 시간	출력 지속 요구 시간	정산요소
				Response energy fee(£/MWh)
Mandatory Frequency Response (Mandatory FR)		Primary response: 10초	30초	Holding fee (£/hour) Response Energy fee (£/MWh)
		Secondary reponse : 30초	30분	
		High : 10초	무기한	
Footroom	250kW (for loads)	30 min.	1~3시간	

자료: National Gird webpage, www2.nationalgrid.com/uk/services/balancing-services

□ 배터리 전력저장장치 활용 현황

○ 미 에너지부에서 운영하는 Global Energy Storage Database는 전 세계에서 계획, 운전 중, 혹은 운영을 마치고 폐지된 세계의 전력저장장치들에 관한 정보를 제공하고 있음.

○ 2017년 전 세계에서 총 403개 곳에서 전기화학 방식을 이용한 전력저장장치(electro-chemical storage), 즉 배터리를 활용 프로젝트가 운영 중(operating)임. 그 중 기술이 정확히 언급되지 않은 프로젝트를 제외한 총 391개의 배터리 전력저장장치의 현황에 대해 분석함.

○ 모두 계속적인 충·방전이 가능한 2차 전지를 사용하고 있으며, 주 재료에 따라 분류해 보면 납, 리튬, 니켈, 나트륨, Vedanium(flow battery 형식), 아연을 사용하는 경우로 구분할 수 있음.

○ <표 5>에서 나타나듯이, 대부분의 배터리 저장장치 기술이 빠른 응동속도에 적합한 주파주조정(frequency regulation)과 spinning reserve로 활용됨을 볼 수 있음.

○ frequency regulation은 주파수조정용, spinning reserve는 대기예비력, non-spinning reserve는 대체예비력, load following은 부하 추종에 해당함.

○ <표 5>에서 각 서비스 별로 비교할 때 좌측에 위치할수록 요구되는 응동속도가 더 빠르며, 지속시간의 경우 우측에 위치할수록 요구되는 출력지속시간이 김.

<표 5> 배터리 전력저장장치 기술별 각 예비력 서비스 활용현황

	frequency regulation	spinning reserve	non-spinning reserve	load following
납	14	4		2
리튬	89	32	6	21
니켈	1	2		
나트륨	18	6	3	4
flow battery	4	1		3
아연	1			
총 합계	127	45	9	30

자료: 미 DOE Global Energy Storage Database

○ 출력지속시간은 각 프로젝트에서 배터리들이 한 번 방전 시 출력을 유지하면서 최대 방전할 수 있는 시간을 측정한 수치임.

- 리튬의 경우 출력지속시간이 15분 미만인 경우도 존재하나, 대부분의 경우 기술의 성숙으로 인해 15분 이상의 출력지속시간을 보여주고 있음.
- 특히 나트륨, flow battery, 아연의 경우 모두 1시간 이상 출력을 지속할 수 있는 것으로 나타남.

<표 6> 배터리 전력저장장치 기술별 출력지속시간 분포

	15분 미만	15분~30분	30분~1시간	1시간 이상
납		3	4	22
리튬	2	44	46	195
니켈		2	1	
나트륨				33
flow battery				14
아연				6
총 합계	2	49	51	270

○ 정격출력(rated power) 은 각 프로젝트에서 배터리들의 방전 시 출력을 측정한 수치임.

- 특히 정격출력이 10,000Kw (10MW) 이상의 경우 직접 계통에 소형발전원으로 활용 가능한 성능으로 여겨짐.

- 리튬기반 배터리의 경우 출력이 소형과 대형으로 이분화 되어 있음, 이는 기술개발 수준과 관련되었다고 볼 수 있음. 즉, 기술개발 초기에는 소용량부터 시작하여 점점 그 규모를 확대하는 현상을 반영한다고 볼 수 있음.

<표 7> 배터리 전력저장장치 기술별 정격 출력 분포

(단위 : Kw)

	100Kw 이하	100Kw ~500Kw	500Kw ~1,000Kw	1,000Kw ~10,000Kw	10,000Kw 이상
납	17	3	2	10	1
리튬	92	43	19	99	47
니켈		1		1	1
나트륨	2	5		22	5
flow battery	4	2	2	5	1
아연	2	2	3		
총 합계	117	56	26	137	55

○ 상기의 전력 지속시간과 정격출력을 고려해 볼 때 아연을 제외한 배터리 전력저장장치의 기술은 운영예비력으로 활용할 수 있을 정도로 발전하고 있음을 볼 수 있으며, 동시에 주파수 조정용으로 대다수 사용됨을 볼 수 있음.

- 이는 배터리 전력저장장치의 특성인 빠른 응동성에 기인한 것으로 보임.

□ ESS의 석탄 감발운전용량 대체 시 편익분석

○ 현행 운영예비력 확보를 위해 감발운영중이 석탄발전 용량을 ESS로 대체할 경우의 편익을 분석함.

- 현재 석탄발전 용량 중 약 5% 정보를 감발운전 하여 운영예비력으로 활용 중임.
- 감발운전 해제로 인한 연료비 감소와 ESS 투자비 간의 비교를 통해 도출하는 접근을 선택함.

○ 연료비의 경우 2016년 단가 기준으로 석탄발전 증가와 이로 인한 LNG발전량 감소로 약 6,600억 원의 연료비 감소가 추산됨.

○ 감발운전중인 석탄발전을 리튬이온 배터리 ESS로 대체할 시 최소 2.2조원에서 최대 10조원의 투자비가 필요할 것으로 추산됨.

- 대체규모는 석탄발전 규모의 약 5%인 1,300MW, 배터리 투자 및 운영방법(60% SOC유지)은 한전 실증사업을 기준으로 함.

Ⅳ. 국내 운영예비력 제도 개선을 위한 제언

□ 다양한 자원의 예비력 시장 참여 유도를 위한 개선 방향 설정

○ 현재 한국에서는 전일 급전계획 수립 시 각 운영시간에 필요한 예비력 서비스를 확보함.

○ 하지만 이는 시장 매커니즘에 의해 발전사업자들이 스스로 시장에 용량과 가격을 제시하는 방식이 아니라, 의무적으로 예비력 자원으로 지정되면 우선 예비력을 위한 용량과 급전지시에 따른 에너지를 공급하고, 후에 정산 규칙에 의해 제공한 예비력에 대해 정산 받는 방식임.

○ 시장참여자들에게 예비력서비스 제공에 대한 자율성을 보장해 시장에서 각 서비스에 해당하는 자원이 차별 없이 진입하여 최적화된 자원 분배를 유도할 수 있는 예비력서비스의 뒷받침이 필요할 것으로 보임.

- 계통의 안정성을 위해 영국과 같이 주파수조정 중 일부 서비스에 대한 참여는 의무화 하고, 여력에 대해서는 용량입찰을 활용하는 방안을 고려해 볼 수 있음.
- 이를 통해 기저발전원의 G/F 및 AGC 참여로 인한 감발운전으로 인한 기회비용, 발전기 마모, 연로소비 및 온실가스 배출이 감소하는 효과가 기대됨.
- 이와 동시에 미국과 같이 배터리 저장장치 등 주파수조정 서비스에 적합한 기술들이 진입할 수 있는 기회가 증대를 기대할 수 있음.

□ 운영예비력 제도의 세분화

○ 미국과 영국의 사례와는 달리, 현재 주파수조정과와 대기·대체서비스 내부의 제도가 아직 세분화가 필요한 제도임을 알 수 있음.

○ 실제로 ERCOT의 경우 RRS(Responsive Reserve Service)가 담당하던 급전지시 5초 이내에 응답, 5분 이내에 정격출력 도달, 1시간까지 지속되는 서비스를 Fast Frequency Reserve와 Primary Frequency Reserve로 세분화하고, 지속시간을 축소하였고, Fast Frequency Reserve 출력 지속시간 규정을 10분으로 단축하여 응동성은 높으나 출력시간이 짧은 자원의 시장 진입을 유도함.

○ 운영계획 수립 시 각 서비스별 필요용량을 정하고 운영할 수는 있으나, 주파수조정의 특성상 수 초~20분 사이에 더 많은 세분화의 기회가 있을 것으로 보임.

- 특히 계통 주파수 저하 이후 양수발전이 급전지시를 받고 정격출력에 도달할 수 있는 5~10분 이내 시간동안 예비력을 제공할 수 있을 발전자원들이 진입할 수 있는 여지가 있을 것으로 보임.
- 이를 위해 확률론적 주파수조정예비력 소요량과 세부서비스 산정에 대한 공학적 연구가 선행되어야 함.

○ 대체예비력의 경우 120분 투입가능 자원의 경우는 많은 전문가들이 지적하듯이 계통 안정성 회복을 위한 투입시간으로는 너무 길며, 이를 미국과 같이 30분 혹은 이보다 더 짧은 시간에 계통에 투입할 수 있도록 개선이 필요한 것으로 보임.

□ 운영예비력 보상요소의 구분 및 기술에 따른 차별화

○ 미국과 영국 사례에서 보듯, 예비력서비스에 대해 용량과 사용된 에너지 사용을 구분하여 지급하고는 제도에 대한 고려가 필요할 것으로 보임.

○ 기존 비발전제약(COFF)이 계통제약으로 인해 운영계획에 포함되었던 용량이 실제로 사용되지 못한 데에 대한 보상을 목적으로 하는 대에 비해, 예

비력 공급에 대한 용량보상은 여기에 예비력 공급을 위해 대기상태로 운영하는 데에 대한 보상이 추가되어야 할 필요가 있음.

○ 현재 주파수조정서비스 보상제도에서 이미 속도와 정확도에 대해 계수를 통해 차별적으로 보상을 시행하고 있으며, 이를 용량과 에너지 보상 중 어디에 적용해야 하는 지는 미국의 여러 시장에서 각기 다른 모습을 보이는 점을 참고해야 할 필요가 있음.

○ PJM의 Regulation D 사례와 같이 속응성을 지닌 자원의 참여를 유도하기 위한 유인제도가 신규 발전자원에 대한 투자가 급속히 전력저장장치로 급속하게 편중되어, 기존 예비력으로 활용되던 화력발전이 급속히 퇴출되며, 이를 전력저장장치가 대체하는 순환이 발생해 예비력 정산금 증가와 계통 안정성 저하 우려 증가의 부작용을 야기했던 사례를 참고하여 한 자원의 진출이 과도하거나 잘못된 신호를 주지 않도록 정교한 접근이 필요할 것으로 보임.

Ⅴ. 맺음말

□ **전력은 매 순간 수요와 균형을 이루어야 하며, 저장이 어렵기 때문에 운영예비력를 활용한 계통안정성 확보가 필수적임.**

□ **향후 배터리 특히 짧은 순간에 빠른 응동속도와 정확도를 필요로 하는 주파수조정 서비스의 경우 배터리 전력저장장치가 기술적으로 이러한 요구사항에 가장 부합하는 것으로 알려짐.**

○ 가장 기술수준이 발전한 리튬배터리 저장장치의 경우에도 frequency regulation(주파수 조정)에 가장 많이 활용되고 있음.

○ 하지만 타 전원에 비해 경제성이 높지 않은 단점 이외에도 잦은 충·방전으로 인한 화재위험, 안전성을 위한 충전가능용량 제한 등 아직 개선해야 할 부분이 존재하는 기술임.

- IAE Technology Roadmap 보고서에서 배터리전력저장장치의 초기 투자비용을 $300/KW - $3,500/KW으로 예측하였음.

□ **현재 한국에서 계통안정성 확보를 위한 여러 예비력제도가 보상제도가 운영 중이나 의무참여이며, 그 정산기준이 명확치 않은 데에 기인하여 개선의 여지가 크다고 볼 수 있음.**

□ **미국과 영국의 사례를 참고해 볼 때, 예비력서비스의 의무적 할당이 아닌 발전자원의 자발적 참여 유도를 위한 제도마련이라는 방향 하에 주파주조정서비스의 세분화와 용량요금과 에너지요금을 구별하여 보상하는 보상체계의 개선이 필요한 것으로 보임.**

□ **나아가 향후 낮은 경제성과 기술적 제약이 극복된다면 배터리 저장장치의 진입이 운영예비력 서비스로의 진출이 증대될 것으로 예상되며, 이에 따라 기존에 예비력을 담당하던 발전자원의 기회 및 운영비용 감소가 전력저장장치의 빠르고 정확도 높은 출력조절에 따른 차별적 보상으로 이어지도록 하는 정산제도 마련에 대한 지속적 연구와 토론이 필요할 것으로 보임.**

< 참고자료 >

1. 참고문헌

강용혁, 『신재생에너지 잠재량 정의 및 연산』, 한국에너지기술연구원 주최 '신재생에너지 잠재량 산정 TFT회의' 워크숍 발표자료, 2013

IEA, 『The Power of Transformation-Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems』, IEA, 2014a.

IEA, 『Renewables Information』, IEA, 2014b

정책 이슈페이퍼 18-11

전력저장장치 활용에 따른 운영예비력 제도 개선 방향 제언

2018년 5월 31일 인쇄
2018년 5월 31일 발행
저 자 조 주 현
발행인 박 주 헌
발행처 **에너지경제연구원**
44543 울산광역시 종가로 405-11
전화: (052)714-2114(代) 팩시밀리: (052)714-2028
등 록 1992년 12월 7일 제7호
인 쇄 (사)한국척수장애인협회 인쇄사업소 (031)424-9347