

이슈페이퍼

KEEI ISSUE PAPER

정책 이슈페이퍼 21-10

가변속양수발전 확충시 전력시장 파급효과 분석

조주현



KOREA ENERGY ECONOMICS INSTITUTE



에너지경제연구원
Korea Energy Economics Institute

정책 이슈페이퍼 21-10

가변속양수발전 확충시 전력시장 파급효과 분석

조주현

1. 연구 배경 및 필요성

□ 연구의 필요성

- 재생발전원 비중 증가로 인한 발전량 급변 예상
 - 태양광, 풍력발전량 증가로 낮시간 대 순수요 급감 및 급증
 - 점심시간 부하 변동 등 실제 순수요의 급격한 증가, 감소 발생
 - 이에 대응하기 위한 유연성 설비 확충 논의 필요
- 양수발전의 필요성에 대한 관심 증대 및 가변속양수발전 설비 도입 계획
 - 양수발전은 전력수요의 변동성에 대응할 수 있는 설비임.
 - 양수발전설비가 정지상태로부터 5분 안에 가동 가능한 반면, 가스발전은 정지상태에서 20~60분 소요
 - 8차 전력수급계획에 가변속양수발전 도입을 계획하였고, 후보지도 결정됨 ('19.6)
- 가변속양수발전은 기존 양수에 비해 다음과 같은 특징이 있음
 - 발전 시 출력조절이 용이하며, 그 폭도 넓음.
 - 양수 시에도 소비전력을 순간적으로 조절하여 예비력을 제공할 수 있음.

□ 연구 목적

- 가변속양수발전의 특성 소개
 - 본 양수발전과 비교하여 가변속양수발전의 원리와 기술적 특징 소개
 - 해외의 가변속양수발전 활용사례 분석
- 가변속양수발전 활용시 전력시장 파급효과 분석

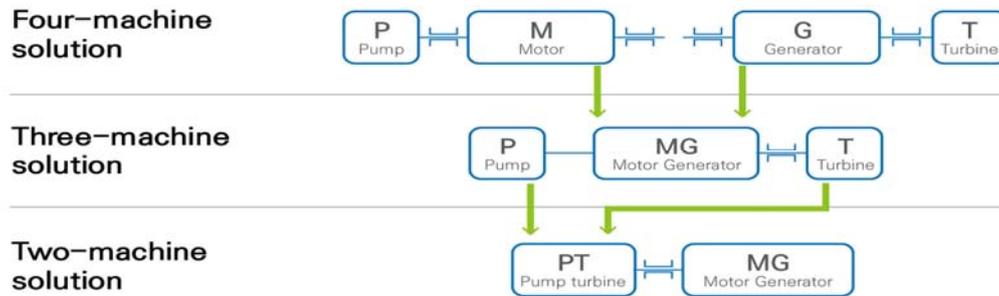
- 전력수요가 낮고 재생발전량이 급증하는 추석시기에 가변속양수발전설비 확충에 따른 효과 분석
- 가변속양수발전의 운영예비력 활용 시 효과 분석
- 가변속양수발전 도입에 대비한 정산제도 개선방안 제시
 - 국내 양수발전의 운영 및 수익성 현황, 정산제도 분석
 - 해외 양수 활용 현황 및 보상제도 분석
 - 가변속양수발전 활용에 대비한 양수발전 보상제도 개선방안 제시

2. 연구내용 및 주요 분석 결과

□ 양수발전과 가변속양수발전의 비교 분석

- 양수발전의 설비 구성
 - (기본 구성) 발전설비: 터빈-발전기, 양수설비: 모터-펌프
- 기술개발에 따른 설비 구성 변화와 가변속양수발전 개발
 - (Four-machine solution) 펌프-모터, 발전기-터빈이 분리되어 각각 양수와 발전에 사용되며, 많은 공간이 필요함.
 - (Three-machine solution) 모터-발전기의 일체화로 접속장비 및 공간을 효율적으로 활용 가능
 - (Two-machine solution) 펌프-터빈도 일체화, 모터/펌프만의 속도 조절로 상부저수지에서 하부저수지로 물을 낙차시켜 전력을 생산하는 발전운전과 역으로 하부 저수지의 물을 상부 저수지로 끌어올리는 펌핑운전 사이의 전환이 용이해짐. 이로 인해 가변속양수발전기 개발 기반 마련

〈그림 3〉 양수발전 설비 구성 개념도



자료: VOIGHT사 제공자료

○ 가변속양수발전의 설명 및 특징

- 영어로 adjustable speed pumped hydro 혹은 variable speed pumped hydro로 번역되며, 이름에서와 같이 빠른 출력조절이 가장 큰 특징임
- frequency converter를 통해 모터-발전기의 속도를 조절하며, 이로 인해 기존의 양수발전에 비해 발전 및 펌핑시 빠른 출력 변동 가능
- 기존의 양수발전은 발전기 출력 변동 폭이 작으며, 펌핑 시 소비전력은 고정됨

○ 가변속양수발전의 세부 기술

- 발전기-모터 구동방식에 따라 DFIM(Double Feeder Induction Motor)와 CFM(Converter Fed Synchronous Motor)로 구분할 수 있음

〈표 1〉 가변속양수발전의 세부 기술과 항목별 특징비교

세부기술	출력변동폭	경제성	경제적 운영규모
DFIM	제한적	full converter 불필요로 인한 상대적 경제적 우위	100MW 이상의 설비에 활용
CFM	기준출력의 0~100%	full converter 필요로 인한 비용 증가	100MW 미만의 규모에서 경제성 확보 가능

자료: VOIGHT사 제공자료

○ 해외의 가변속양수발전의 활용현황

- 전 세계 총 18개 발전소(8.5GW)에서 운영 중: 일본 11곳, 유럽 7곳 발전소에 위치함
- 일본에서 80년대 파일럿 테스트를 거쳐 90년대 초 세계 최초로 오나가와 양수발전소에 가변속양수발전기 운영을 시작함
- 신규건설은 스위스, 프랑스, 중국에서 진행 중 (각 600MW 규모)

□ 가변속양수발전 활용시 전력시장 파급효과 분석

○ 2030년 전력 저수요와 재생발전원 발전량 증가가 동시에 일어나는 추석 시기의 과도발전량과 이에 대한 가변속양수발전의 역할 분석

- 2030년은 8차 전력수급계획에서 계획된 가변속양수 3기(총 2GW)의 도입이 완료되는 해임.
- 추석기간은 전력 수요자 낮고, 재생발전원, 특히 태양광 발전량이 많아 향후에는 전력공급의 수요를 넘어서는 과공급(over supply)의 우려가 제기되는 시기임
- 2030년 추석당일의 육지의 시간대별 전력 순수요를 도출하고, 가변속양수발전의 계통 안정에 대한 기여도 측정 (<그림 2> 참고)
- 또한 운영예비력과 기타 설비들의 특성을 고려하여 최소발전용량을 산정하고, 이를 바탕으로 시나리오를 구성함 (<표 2> 참고)

〈그림 2〉 2030년 추석 순수요 추정 및 분석방법



자료: 저자작성

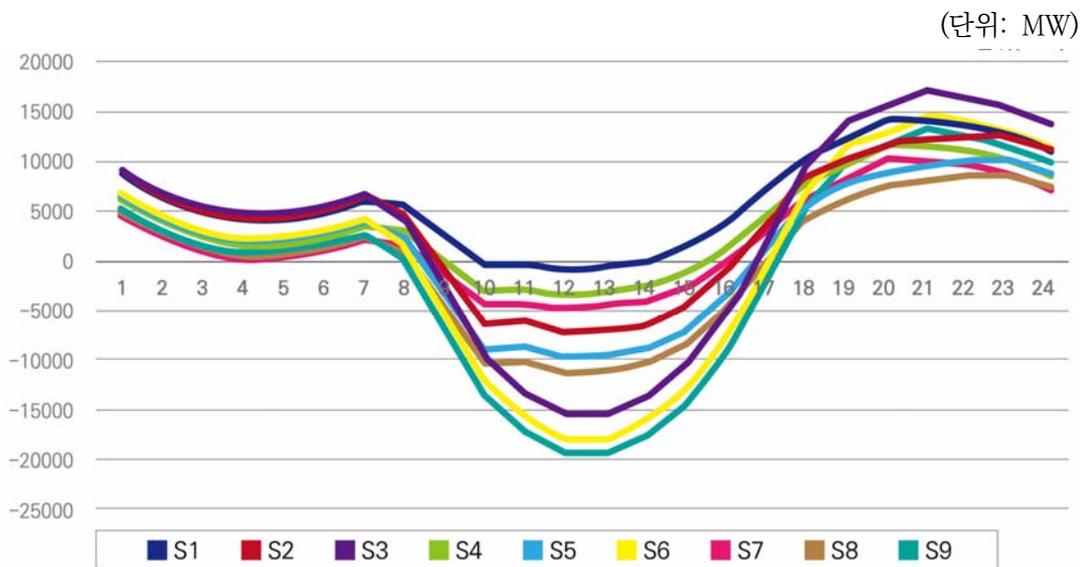
〈표 2〉 각 예비력 별 석탄과 LNG비율 및 재생E 시간대별 이용률

운영예비력 구성 (MW)			최소운영 용량(GW)	재생E 이용률	시나리오명
1차(G/F)	석탄	500	원자력: 17.1 석탄: 12 LNG: 17.6	'16년 9월 시간대별 실적	S1
	LNG	500			
AGC (FR+2차)	석탄	700	원자력: 17.1 석탄: 18.2 LNG: 14.5	'19년 9월 시간대별 실적	S2
	LNG	1,400			
1차(G/F)	석탄	1,000	원자력: 17.1 석탄: 21.2 LNG: 12.8	'16년 9월 시간대별 실적	S4
	LNG	0			
AGC (FR+2차)	석탄	700	원자력: 17.1 석탄: 21.2 LNG: 12.8	'19년 9월 시간대별 실적	S5
	LNG	1,400			
1차(G/F)	석탄	1,000	원자력: 17.1 석탄: 21.2 LNG: 12.8	'16년 9월 시간대별 실적	S7
	LNG	0			
AGC (FR+2차)	석탄	1,000	원자력: 17.1 석탄: 21.2 LNG: 12.8	'19년 9월 시간대별 실적	S8
	LNG	1,100			
				8차 9월 시간대별 전체	S3
				8차 9월 시간대별 전체	S6
				8차 9월 시간대별 전체	S9

자료: 저자작성

- 추석기간 과공급량은 가정에 따라 다르지만, 과공급이 발생할 가능성이 높을 것으로 예상되며, 태양광 발전이 가동되는 낮시간에 발생하는 것으로 분석됨.
- 낮 시간에 태양광발전량이 증가함에 따라 역으로 순수요가 점점 낮아졌다 회복하는 duck curve형태를 보일 것으로 예상됨. (<그림 3>참조)

〈그림 3〉 2030년 시나리오 별 시간대별 순수요



자료: 저자작성

- 수요를 넘어서는 과발전량을 기존에 운영 중인 양수발전설비와 2030년 계획된 가변속양수발전 설비를 양수모드로 운영하여 전력을 소비할 경우, 가변속양수까지 활용함에도 과발전량 중 일부를 흡수하지 못할 것으로 예상됨. (<표 3> 참고)

〈표 3〉 2030년 시나리오 별 과도발전 예상량

시나리오명	Oversupply 규모(MWh)	양수가능량(MWh)	양수대용 가능여부
S1	2,180	일부 양수 3차 예비력 제공 20,800	기존양수로 가능
S2	39,384		가변속양수 필요
S3	86,070		가변속양수+a
S4	15,835	양수발전 3차 예비력 미제공 25,030	기존양수로 가능
S5	59,384		가변속양수+a
S6	106,623		가변속양수+a
S7	26,496	가변속양수 포함 45,030	가변속양수 필요
S8	71,499		가변속양수+a
S9	120,123		가변속양수+a

자료: 저자작성

- 추석기간 양수 시 가변속양수발전이므로 석탄발전이 제공하는 일부 운영예비력을 대체할 경우, 기존 양수발전과 가변속양수발전으로 대부분 과도발전량을 양수하여 대응할 수 있을 것으로 분석됨. (〈표 4〉 참고)
- 이는 석탄발전이 제공하던 예비력을 양수발전이 대체하면서, 예비력제공을 위해 운영되던 석탄발전 중 일부가 운영을 하지 않게 되면서 석탄의 최소운영용량이 감소했기 때문으로 풀이됨.

〈표 4〉 2030년 시나리오 별 과도발전 예상량

시나리오명	Oversupply 규모(MWh)	양수가능량(MWh)	양수대용 가능여부
S1	-	일부 양수 3차 예비력 제공 20,800	불필요
S2	8,148		기존 양수로 대응 가능
S3	47,968		가변속양수로 대응 가능
S4	-	양수발전 3차 예비력 미제공 25,030	불필요
S5	22,544		가변속양수 필요
S6	66,070		가변속양수+a
S7	-	가변속양수 포함 45,030	불필요
S8	31,544		가변속양수 필요
S9	78,070		가변속양수+a

자료: 저자작성

3. 결론 및 제언

□ 국내 양수발전 수익구조 및 수익현황

- 양수발전은 크게 발전량과 발전 중 운영예비력 용량에 대한 대가를 지불받으며, 펌핑시에는 전력을 소비하므로 이에 대해 양수시간의 계통한계가격을 기준으로 비용을 지불함.

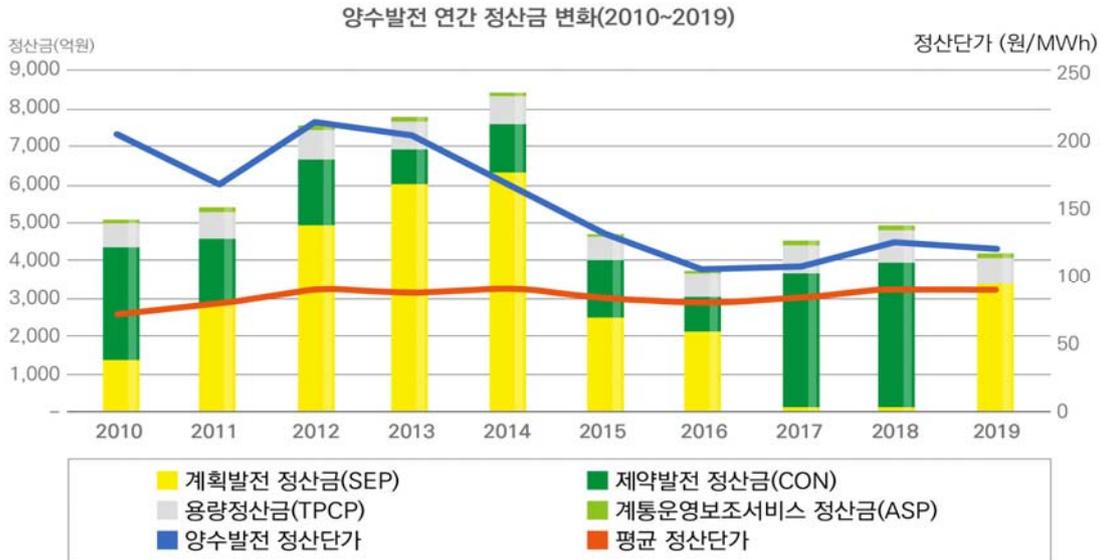
〈표 5〉 양수발전에 대한 정산요소와 정산금 항목명

	정산요소		세부 정산금명
발전을 위한 용량제공시	용량요금		CP
발전시	계획발전량		SEP
	계획발전량 이외의 발전량	예비력을 위한 감발	COFF
		예비력제공을 위한 증발	CON
		예비력 제공량	ASP
펌핑시	계획양수량		PE
	계획양수량 이외의 양수량	예비력을 위한 양수량 축소	COFPE
		예비력제공을 위한 양수량 증가	CONPE

자료: 정산규칙해설서(2019), 전력거래소 를 참고하여 저자작성

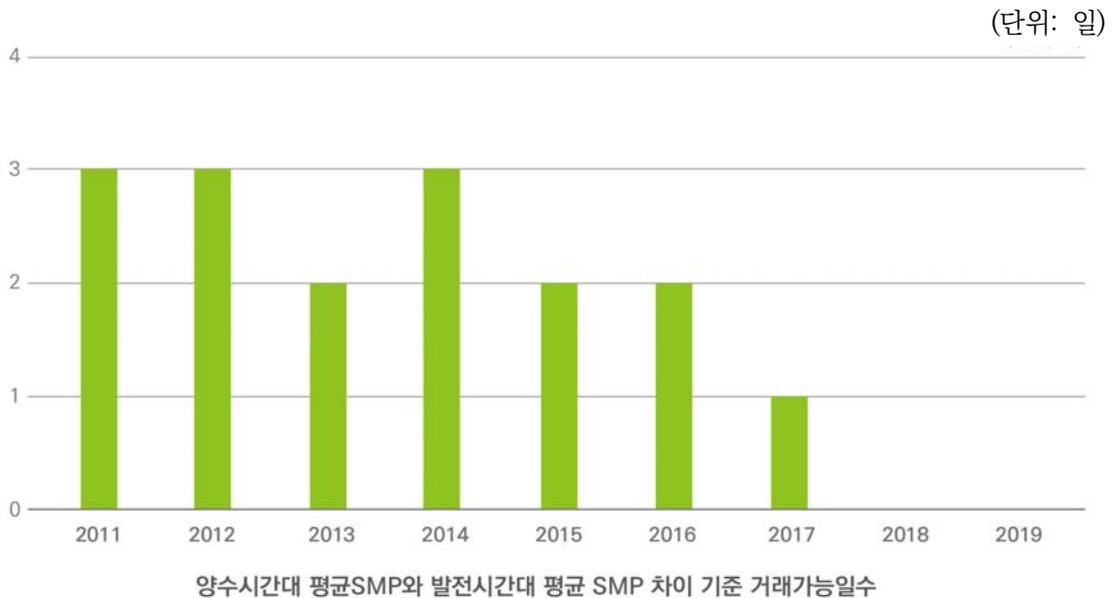
- 2019년까지 양수발전의 수익성이 지속적으로 악화되었는데 (〈그림 4〉 참고), 이는 차익거래 실현이 불가능한 시장환경 때문인 것으로 설명됨.
 - 전력시장가격이 저렴한 시간에 양수하여 가격이 높은 시간에 발전하여 그 차액으로 수익을 실현해야 하나, 국내 시장에서는 가격변동성이 크지 않아 차익거래 실현이 어려운 것으로 조사됨(〈그림 5〉 참고).
 - 이는 해외 시장에서도 공통적인 문제로 제시되고 있음.

〈그림 4〉 양수발전의 연간 정산금 변화(2010년~2019년)



자료: 전력시장통계 2011~2020년 각 호의 양수발전 발전량 관련 항목 정리

〈그림 5〉 2011년~2019년 양수시간대와 발전시간대 평균 SMP를 활용한 차익거래 가능일수



자료: 저자작성

□ 가변속양수발전 확충에 대비한 보상제도 개선안

○ 펌핑운영으로 인한 계통안정성 기여도에 대한 보상

- 펌핑의 사유에 따라 비용지불 정도를 세분화하는 방안을 고려할 필요가 있음
- 급전지시에 의한 펌핑일 경우 이로 인해 소비된 양수동력에 대해서는 계통 운영 안정에 대한 기여를 인정하여 부담을 경감시키는 방안이 필요
- 영국의 DTU(Demand Turn Up) 서비스와 같이 추가수요를 창출하는 시장에 대한 고려도 필요

○ 예비력 보상제도 개선방안

- 유럽에서 가변속양수발전을 활용 중인 독일, 프랑스, 스위스, 스페인, 그리고 재생발전원 용량비중이 큰 영국을 대상으로 운영예비력 중 국내의 주파수유지예비력과 주파수회복예비력에 해당하는 서비스들에 대한 확보와 보상방식 현황에서 시사점을 도출
- 대부분의 국가에서 시장(경매 혹은 계약)을 통해 필요한 운영예비력을 확보함.
- 확보된 용량 및 운영예비력을 위해 제공된 발전량에 대한 보상은 국가별로 상황에 따라 서로 다른 형태(규제가격, 참여자들의 투찰가, 한계발전기의 가격으로 일괄보상하는 방안 등)를 보임.
- 미국과 한국의 전력시장에서는 일물일가의 원칙에 의해 낙찰된 자원들이 동일한 가격으로 보상을 받음. 운영예비력 확보를 위한 입찰시장제도의 급격한 도입은 해외의 운영예비력시장에서의 가격을 고려할 때 비용 상승 요인이 존재하므로, 제도 변화에 따른 급격한 변화를 완화할 수 있도록 현재 제도와 입찰시장제도의 본격적인 도입 사이의 중간단계가 필요한 것으로 보임.
- 하나의 대안으로 유럽과 같이 장기계약과 투찰가 보상방식을 고려해 볼 수 있을 것으로 보임.

- 장기계약의 사례로 2020년 6월, 영국의 계통운영사인 national grid 가 2020년 6월, Cruacha 양수발전소(440MW 규모)를 포함한 5개 설비에 6년간 장기계약을 맺고 관성유지를 위한 운영예비력 자원으로 활용을 시작한 사례를 참고할 수 있을 것임. 이는 계통운영에서 필요한 예비력 설비자원의 안정적인 확보를 위해 장기계약을 활용하여 장기간 안정적인 설비를 직접 확보하여 계통운영의 유연성을 제고할 수 있을 것으로 보임.
- 투찰가 보상방식의 경우 현재 국내 전력 시장의 보상제도의 근간인 일물일가 적용원칙과는 다른 측면이 있으므로, 국내와 유럽의 전력시장, 특히 운영예비력 시장제도와 그 환경을 고려하여 적용을 고려해야 할 것으로 보임.