

풍력발전기 출력변동성에 대비한 가변속 양수발전기의 주파수 제어효과

Effect of Adjustable Speed Pumped Storage Power Generator on the Frequency Control Against the Intermittence of Wind Turbine Output

박 민 수* · 전 영 환†
(Min-Su Park · Yeong-Han Chun)

Abstract - Energy storage is a key issue when integrating large amounts of intermittent and non-dispatchable renewable energy sources into electric power systems. To maintain the instantaneous power balance and to compensate for the influence of power fluctuations from renewable sources, flexible capability for power control is needed. Adjustable Speed Pumped Storage Power Generator is pumped storage unit that is adjustable for pump output adjustments as well as the highest efficiency operations because it has fast response time. In this paper we address the adjustable speed pumped storage power generator for frequency control against the intermittence of wind turbine output and calculate the appropriate capacity of adjustable speed pumped storage power generator.

Key Words : RPS, Renewable energy, Wind power, Adjustable speed pumped storage power generator

1. 서 론

화석 연료의 고갈로 인한 에너지난과 온실 가스 등의 환경 문제로 신재생 에너지원의 활용도와 중요성은 증가하고 있다.[1] 신재생 에너지원은 날씨와 기후의 영향을 받는 발전량과 발전지점의 불확실성을 갖고 있는 자원으로 이는 전력의 품질을 저해하고 전력시스템 운용의 어려움을 발생시킨다. 우리나라는 RPS(Renewable Portfolio Standards)제도를 도입하여 신재생 에너지의 활용을 제도화하였기 때문에 신재생 에너지원의 발전비율은 급격히 증가할 전망이다. 신재생 에너지원의 발전비율의 증가는 전력계통의 전력품질을 저하시키며, 주파수 안정도 측면에서 새로운 위험 요소로 떠오르고 있다. 특히, 우리나라의 경우에는 조속기 운전을 하지 않는 원자력발전의 비율이 높기 때문에 출력 변동성이 주파수 품질에 미치는 영향이 외국의 시스템에 비해 매우 크다. 따라서, RPS제도 시행에 따른 신재생 에너지원의 증가 대책 마련이 시급한 실정이다.

해외의 경우, 신재생 에너지원의 확대에 따라 풍력과 양수발전을 함께 활용하거나[1] 에너지 저장장치를 풍력단지에 연계하여 운영하는 등 신재생 에너지원의 출력 변동성을 조절하기 위한 연구가 진행되었다[2]. 가변속 양수발전 시스템은 일본에서는 이미 기술이 개발되어 실제 양수발전기에 적용이 되고 있으며 그 효율성이 크다고 보고되고 있다[3]. 가

변속 양수 시스템은 컨버터 제어에 의한 부하제어특성상 출력변화가 빠르기 때문에, 양수발전이 많은 우리나라 계통에서도 신재생 에너지원의 출력변동성을 해결하기 위한 효율적인 방안으로 기대가 크다. 본 논문에서는 다량의 풍력발전기가 국내 계통에 투입될 경우에 대비하여 가변속 양수 시스템의 효율성을 시뮬레이션 연구를 통해 검증하였다. 우리나라 계통에서 풍력발전의 출력변동성에 따른 주파수 변화를 분석하고 주파수 유지기준을 만족시킬 수 있는 가변속 양수발전기의 용량을 산정하였다.

2. 본 론

2.1 가변속 양수 발전기

신재생 에너지원 중 풍력은 변동성이 가장 큰 에너지원이며 변동성에 대한 예측이 불가능하기 때문에 풍력 발전기가 계통에 대규모로 투입되면 계통의 주파수 문제를 야기한다. 풍력 발전량이 순간적으로 감소하거나 증가하는 경우 나타나는 주파수 변화에 대응하여 빠른 응답 특성을 보이는 설비가 필요하며 이러한 역할에 알맞은 설비 중 하나가 가변속 양수 시스템(ASPSPG; Adjustable Speed Pumped Storage Power Generator)이다. 국내 계통은 원자력 발전소의 비율이 높은 계통이며 특히 야간에는 수요가 낮아 원자력의 비중은 더욱 더 증가할 것이다. 야간의 경우 원자력과 소량의 화력 및 수력 발전기와 양수발전기가 펌프 모드로 운전되며, 이러한 상황에서 풍력발전의 출력변동성이 발생하면 전력 수급의 불균형을 제어할 수 있는 발전원이 부족하기 때문에 주파수 제어에 가변속 양수 시스템이 유용하게 활용될 수 있다.

가변속 양수발전 시스템은 발전 전동기의 회전자 코일을

* Department of Electrical and Electronic Engineering, Hongik University, Korea

† Corresponding Author: Department of Electrical and Electronic Engineering, Hongik University, Korea

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

Received : November 13, 2013; Accepted : January 23, 2014

삼상 분포 권선으로 하여, 가변속 주파수 변환 장치(사이클로 컨버터 등)에 의해 저주파 교류여자를 행해 펌프수차의 가변속 운전을 실현하는 시스템이다. 회전속도를 변화시켜 운전상태의 최적화가 가능함과 동시에, 플라이휠 에너지의 이용이 가능한 여러 가지의 특징이 있으며, 펌프수차 측과 전기 측 제어 시스템의 특성을 살린 종합적인 시스템의 동작이 가능하다.

표 1 가변속 양수발전 시스템 특징

Table 1 Characteristics of ASPSPG

항목	내용		비고
정상 운전시의 특징	양수 운전 시	부하조정(AFC) 가능	운전 상태의 최적화
	발전 운전 시	*운전영역의 확대 (낙차변동 / 경부하) *부분부하시의 효율 향상 *수압맥동의 저감	
그 외 운전시의 특징	양수 기동	*부하 급변 량의 저감	
	조상 운전	*손실의 저감	
	계통 병입	*위상 조절이 용이 *저속에서 병입 가능	
과도 상태 (단 시간의 특성)	*순동 예비로서의 이용 *계통의 과도안정도 향상 *탈조 현상이 없는 시스템 *계통 전압 유지		상동(관성 에너지의 유효 이용)

우리나라 양수발전 시스템은 1980년부터 청평을 시작으로 국내에 도입되었고 2011년 기준 총 4700MW의 양수발전 시스템이 도입되었다. 기존의 양수 시스템을 가변속 양수 시스템으로 전환하게 되면 다른 설비를 추가로 설치하는 것에 비해 지역 주민들과의 마찰을 피할 수 있으며 추가적인 건설비용의 지출이 감소하는 효과를 기대할 수 있다. 또한, 가변속 양수발전기는 또한 출력조정에 대한 응답속도가 μs 단위로 순간적으로 증가한 출력조정 지령치에 대해 출력을 조정할 수 있다[3]. 가변속 양수발전 시스템은 빠른 응답특성으로 활용도가 높은 자원이며 발전기와 같이 오랜 수명을 가지고 있다. 다음 표는 국내 양수발전 용량을 나타낸다.

표 2 국내 양수발전 용량

Table 2 Domestic Capacity of ASPSPG

양수발전소	준공년도	설비대수	총용량(MW)
청평	1980	2	400
삼랑진	1985	2	600
무주	1995	2	600
산청	2001	2	700
양양	2006	4	1000
청송	2006	2	600
예천	2011	2	800
총용량			4700

2.2 풍력의 변동성과 주파수 시뮬레이션

2.2.1 주파수 시뮬레이션 설정

계통에 투입된 풍력 발전기들의 출력 변동성이 주파수에 미치는 영향 분석을 위해 주파수 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 2020년 계통에 사용되었으며 운영규칙에 따라 운영되는 모든 원자력 설비들은 최대출력으로 운전되고 그 외의 발전기들이 나머지 수요를 담당한다. 제5차 전력수급 기본 계획의 연도별을 기준으로 2020년 off-peak와 peak 주간의 최대수요와 최소수요를 예측하여 시뮬레이션을 진행하였고 시뮬레이션에 사용된 수요는 수요관리가 적용된 목표 수요이다.[4] 계통의 부하정수는 1(p.u)로 가정하였다.

표 3 2020년 off-peak와 peak 주간 수요

Table 3 Off-peak Weekly load and peak Weekly load in 2020

시나리오		수요(MW)
Off-peak 주간	최소	54845
	최대	68100
Peak 주간	최소	58175
	최대	87110

2020년에는 8,974 MW 설비용량의 풍력발전기가 계통에 투입될 예정이며 60%의 이용률로 풍력발전기가 발전되는 상황을 가정하였다. 계통에 투입되는 풍력 발전기는 동기화 되어 있지 않고 주파수 변화에 따라 출력을 제어할 수 없기 때문에 무계정수(H)와 발전기정수(KG)는 모두 0이다. 60%의 이용률의 풍력발전기 출력은 5384.4MW이고 설비용량 기준 6%, 12%, 18%의 변동성(538.4MW, 1076.8MW, 1615.2 MW)으로 10초 동안 선형적으로 감소하고 이후 다시 본래 출력으로 돌아오는 시뮬레이션을 진행하였다. 주파수만을 고려하였기 때문에 주파수의 전역적인 특성을 고려하여 부하와 발전기 1기로 이뤄진 1-node 시스템으로 전력 시스템을 등가화 하였다.

시뮬레이션에 적용한 예비력 기준은 총 3가지이다. 계통에 투입되어 운전 중인 운전 예비력 1,500MW와 주파수 조정 예비력과 대기예비력을 합한 2,500MW[5], 그리고 수요와 계통 발전상황을 적용한 기동정지계획에 의한 예비력이다. 3가지 기준의 예비력이 준비된 계통에 풍력 변동성이 발생하는 시뮬레이션을 진행하여 주파수 변화를 분석하고 그에 따라 가변속 양수발전기 용량을 산정하였다.

2.2.2 계통 주파수 계산

발전기의 관성계수는 동기속도로 회전하는 발전기의 에너지를 정격용량 기준으로 표준화한 값이다. 여기서 $J[kg \cdot m^2]$ 는 회전모멘텀이고 ω_m^0 는 동기회전속도, S_{rate} 는 발전기의 정격용량이다. 국내의 동기회전속도는 60Hz이다.[6]

$$H[sec] = \frac{1}{2} J \omega_m^0 [MW \cdot sec] / S_{rate} [MVA] \quad (1)$$

동기기의 회전속도 (ω_s) 변화는 다음의 동요 방정식으로 통해 계산되며 여기서 $T_a [N \cdot m]$ 는 가속 토크, T_m 은 기계적 토크, T_e 는 전기적 토크이다.

$$J \frac{d\omega_s}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad P = \omega T \quad (2)$$

$$2H \frac{d\overline{\omega_s}}{dt} = \frac{1}{\omega_s} (\overline{P_m} - \overline{P_e}) \quad (3)$$

$$\overline{\omega_s} = \frac{\omega_s}{\omega_s^0}, \overline{P_m} = \frac{P_m}{S_{rate}}, \overline{P_e} = \frac{P_e}{S_{rate}}$$

발전기의 정수 KG는 및 관성계수 H는 계통에 연계된 발전기 구성에 의해서 계산된다. 최대출력으로 운전하고 주파수가 변화하여도 발전기의 출력이 변화하지 않는 원자력 발전기의 KG는 0이다. 계통의 부하정수는 1로 산정하였으며 계통에 부하와 1기 발전기가 연계되어 있는 1-node system으로 등가화하여 시뮬레이션을 진행하였다.

2.2.2 가변속 양수 발전 알고리즘

가변속 양수발전 시스템의 출력은 0.2 Hz의 주파수편차가 발생한 경우 최대출력을 내고 주파수편차에 비례하여 출력이 변화하도록 설정하였다. 다음 식은 주파수 편차에 따라 가변속 양수발전기의 출력변동을 나타내는 알고리즘이다.

$$P_{pump} = F_{dev} \times K_p \quad (4)$$

$$K_p = P_{pumpmax} / F_{devmax}$$

P_{pump} = 가변속 양수발전기의 출력

F_{dev} = 계통 주파수 편차

$P_{pumpmax}$: 가변속 양수발전기의 최대출력

K_p = 가변속 양수발전기의 gain

P_{pump} 는 가변속 양수발전기의 출력이며 출력의 크기는 주파수 편차에 비례하여 제어된다. 계통에 주파수 편차가 발생하면 가변속 양수발전기는 주파수를 인자하여 계통에 부족한 전력을 공급하며 가변속 양수발전 시스템의 응답특성을 감안하여 출력조정에 대해서 바로 출력이 변화하도록 설정하였다. 양수발전기의 출력조정은 계통부하를 줄여 부족한 예비력자원을 공급하는 역할을 수행하게 된다.

2.2.3 풍력 변동성에 따른 주파수 변화 시뮬레이션 및 가변속 양수발전기 용량 산정

각각의 예비력 1,500MW, 2,500MW, UC를 통한 예비력을 갖는 발전구성에 따라 시뮬레이션을 진행하였으며 풍력발전기는 60%의 이용률로 운전되고 있다. 이때 off-peak의 주간 최소수요 & 최대수요 시의 주파수 시뮬레이션 결과와 Peak 주간 최소수요 & 최대수요 시의 주파수 시뮬레이션을 비교 분석하였다. 앞서 모델링한 가변속 출력 알고리즘에 따라 가변속 양수발전기의 출력이 변동되며 가변속 양수발전 시스템의 적용 유무에 따른 주파수 시뮬레이션 결과를 비교하

표 4 off-peak 주간 최소수요의 가변속 양수발전기 용량
Table 4 The Capacity of ASPSPG at off-peak weekly minimum load

수요	예비력 (MW)	양수 (MW)	풍력 변동(%)	최저주파수 (Hz)	비고
1500	0	0	6	59.7691	원자력30기 34191.7
			12	59.53771	
			18	59.30582	
	250	6	59.85388	화력22기 KG =1.84163	
	600	12	59.80232		
1150	18	59.80467			
최소 수요 54845 (MW)	2500	0	6	59.78367	원자력30기 34191.7
			12	59.56694	
			18	59.3498	
	25	6	59.80330	화력24기 KG =1.97591	
	600	12	59.80814		
1100	18	59.80242			
5506	0	0	6	59.81843	원자력30기 34191.7
			12	59.6366	
			18	59.4545	
	10	6	59.81843	화력28기 KG =2.35418	
	160	12	59.80087		
1000	18	59.80107			

표 5 off-peak 주간 최소수요의 가변속 양수발전기 용량
Table 5 Capacity of ASPSPG at off-peak weekly maximum load

수요	예비력 (MW)	양수 (MW)	풍력 변동(%)	최저주파수 (Hz)	비고
1500	0	0	6	59.87827	원자력30기 34191.7
			12	59.75645	
			18	59.63454	
	0	6	59.87827	화력49기 KG=3.32273	
	180	12	59.80491		
700	18	59.80201			
최대 수요 68100 (MW)	2500	0	6	59.88266	원자력30기 34191.7
			12	59.76522	
			18	59.64768	
	0	6	59.88266	화력50기 KG=3.341294	
	150	12	59.80534		
660	18	59.80108			
2796	0	0	6	59.88385	원자력30기 34191.7
			12	59.76761	
			18	59.65127	
	0	6	59.88385	화력51기 KG=3.43918	
	120	12	59.80156		
650	18	59.780103			

였다. 가변속 양수발전 시스템이 투입되지 않은 상황에서 계통의 주파수 변화를 분석하고 주파수편차가 0.2 Hz를 넘어서는 계통에서 주파수 기준을 유지하기 위해 필요한 가변속 양수발전 시스템의 용량을 산정하였다.

시뮬레이션 결과 수요가 작을수록 주파수 변화가 크게 나타났다. off-peak 주간이 peak 주간보다 주파수 변화가 크게 나타났고 최소수요의 경우가 최대수요의 경우보다 주파수 변화가 크다. 계통의 수요가 클수록 이를 담당하기 위해 많은 양의 발전기가 운전되어 계통의 관성계수가 크다. 그로 인해 같은 양의 풍력변동성에도 주파수 변화비율이 낮기 때문에 주파수 하락이 크게 일어나지 않은 상태에서 예비력이

표 6 off-peak 주간 최소수요의 가변속 양수발전기 용량
Table 6 Capacity of ASPSPG at peak weekly minimum load

수요	예비력 (MW)	양수 (MW)	풍력 변동(%)	최저주파수 (Hz)	비고
최소수요 58175 (MW)	1500	0	6	59.79379	원자력34기 38100. 화력24기 KG=1.64298
			12	59.5872	
			18	59.38025	
		600	59.80225		
		1150	59.80325		
	2500	0	6	59.80571	원자력34기 38100.7 화력25기 KG=1.77338
			12	59.61112	
			18	59.41622	
		600	59.80571		
		1100	59.80273		
	12497	0	6	59.87674	원자력34기 38100.7 화력45기 KG=2.88347
			12	59.75337	
			18	59.62991	
		250	59.87674		
		800	59.80255		
		800	59.80404		

표 7 off-peak 주간 최대수요의 가변속 양수발전기 용량
Table 7 Capacity of ASPSPG at peak weekly maximum load

수요	예비력 (MW)	ESS (MW)	풍력 변동(%)	최저주파수 (Hz)	비고	
최대수요 87110 (MW)	1500	0	6	59.92211	원자력34기 38100.7 화력81기 KG=4.27070	
			12	59.84418		
			18	59.76622		
		0	59.92211			
		0	59.84418			
	2500	0	180	6	59.80015	원자력34기 38100.7 화력81기 KG=4.3329
				12	59.92393	
				18	59.84782	
		0	59.92393			
		0	59.84782			
	1487	0	150	6	59.80049	원자력34기 38100.7 화력81기 KG=4.3173
				12	59.92208	
				18	59.84413	
		0	59.92208			
		0	59.84413			
		180	59.80009			

투입되어 주파수 하락을 방지할 수 있다. 수요가 작은 계통은 투입된 발전기의 수가 적어 낮은 관성계수로 인해 주파수 변화비율이 커 주파수 변화에 따라 부족한 전력이 계통에 투입될 시간이 부족하여 주파수 편차가 크게 나타난다. 또한 원자력 발전기는 기저발전기로 수요가 낮은 계통일수록 원자력 발전기의 발전비용이 상대적으로 높아 낮은 KG 값을 가지며 주파수 변화에 따라 출력을 조정할 발전기가 부족하여 주파수 변화의 폭이 더 크게 나타난다. 결과적으로 수요가 낮은 계통은 원자력 발전기와 적은 수의 발전기로 인해 상대적으로 관성계수와 KG값이 낮아 주파수 변화가 커지게 되고 가변속 양수발전과 같이 빠르게 계통에 전력을 공급할 수 있는 자원의 역할이 매우 크다.

가변속 양수발전기는 출력을 빠르게 조정할 수 있기 때문에 주파수 제어에 유리하다. 조속기에 의한 제어는 발전기 정수 KG 크기에 비례하고 주파수 변화에 따라 출력을 조정한다. 조속기에 의한 주파수제어 응답보다 가변속 양수 시스템의 주파수 제어 응답이 훨씬 빠르기 때문에 풍력변동성을 제어하기 위한 자원으로 효율적이며 특히 off-peak의 계통에 더 효율적으로 사용될 수 있다.

3. 결 론

가변속 양수발전 시스템은 발전기의 출력조정에 대한 응답속도가 μs 단위로 펌프 부하를 빠르게 제어할 수 있기 때문에 순간적으로 변화하는 풍력변동성을 해결에 효율적이며 특히 오프 피크 경우처럼 원자력 비중이 높아 주파수변동에 응동할 에너지원이 부족한 계통에 활용하기 좋은 자원이다.

풍력변동성으로 인해 발생하는 주파수변동을 시뮬레이션을 통해 분석하고 발생하는 풍력변동성에 따라 주파수 기준을 유지하기 위해 필요한 적정의 가변속 양수발전 시스템 용량을 산정하였으며 계통에 투입된 양수발전 시스템으로 주파수 제어효과를 확인하였다. 이미 국내의 다량의 양수발전 시스템이 국내에 도입되어 있기 때문에 기존의 양수발전 시스템을 가변속 양수발전 시스템으로 전환함으로써 추가적인 건설비용 및 주민들의 민원을 피할 수 있어 가변속 양수발전 시스템은 국내 계통의 풍력변동성으로 발생하는 주파수 문제에 효율적으로 활용할 수 있는 자원이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028509).

References

- [1] F. Ralston, S. Granville, M. Pereira, L.A. Barroso, A. Veiga, "Risk constrained contracting strategies of renewable portfolios", Energy Market (EEM), 2010 7th International Conference on the European, pp. 1-7, 2010.
- [2] Ha Thu Le, S. Santoso, W.M. Grady, "Development and analysis of an ESS-based application for regulating wind farm power output variation", Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE , pp. 1-8, 2009.
- [3] T. Kuwabara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, K. Mitsuhashi, "Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi Power Station", Energy Conversion, IEEE Transactions on , Vol.11, pp. 376-384, 1996.
- [4] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 6th National Generation Expansion Planning", 2013.02
- [5] Korea Power Exchange, "Power Market Operation Regulations", 2011.12

[6] PP.M.Anderson, A.A.Fouad, "Power System Control and Stability", 1999

저 자 소 개



박민수 (朴敏秀)

2006년 홍익대학교를 졸업 후 동대학원에 진학하여 2008년에 석사학위를 취득하였으며 2014년에 박사학위를 취득하였다. 주 연구분야는 전력계통 운영 및 제어이다.



전영환 (全瑩煥)

1983년 서울대학교 졸업 후 동대학원에 진학하여 1985년에 공학 석사 학위를 취득하였으며, 1997년 일본 동경대학교에서 공학 박사 학위를 취득하였다. 1985년부터 2002년까지 한국전기연구원(KERI)에서 근무하였으며 그 이후 현재는 홍익대학교 전기 전자 공학부에서 정교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 전력계통 운영 및 제어 그리고 계획이다.