

풍력발전시스템의 배전선로 전압 영향분석

나경윤, 고성민, 김세호, 이수목*, 신삼균**, 김문찬**

제주대학교, 한전고흥지점*, 한전제주지사**

Distribution Line Voltage Impact Analysis of Wind Power Generation System

Na Kyoung-Yun, Ko Sheng-Min, Kim Se-Ho, Yi Sue-Muk*, Shin Sam-Kyun**, Kim Moon-Chan**
Cheju National University, KEPCO Goheung Branch*, KEPCO Jeju Branch**

Abstract - The exploitation of the resource wind energy is a rapidly growing area world-wide. The number of installed units is continuously increasing, and therefore, it is important to respect and to deal with the impact of wind power generation system. From the view of an electric grid utility, there is a major problem with the impact of the wind system on the voltage of the electric grid, to which a turbine is connected. The problem is rather common in the connection of a wind power system to an already existing grid, since the grid is very seldom designed for the transmission of additional power. In this paper, it is investigated the voltage impact of distribution line, to which wind power generation system is connected.

1. 서 론

전력계통의 전원설비 방식은 대규모 집중전원 방식과 소규모 분산전원 방식으로 크게 분류할 수 있으며 지금 까지 우리나라의 전원방식은 대규모 집중방식 위주로 전원계획을 수립하여 왔으나, 최근에 분산전원 설비인 태양광, 연료전지 및 풍력발전 등의 환경 친화적인 전원방식의 소규모 분산전원이 급증하고 있는 추세이며 국가적으로도 분산전원설비를 장려하고 있다.[1]

에너지 부문 온실가스 배출이 세계 9위인 우리나라에는 화석연료에 의한 환경오염을 줄이기 위해 에너지 절약기술과 함께 효율향상 기술을 개발하고 있으며 신재생 청정에너지인 풍력, 태양광, 수소연료전지 등 3대 기술 분야를 중점 개발하고 소형 열병합발전을 포함하여 2011년 까지 1차 에너지 소비의 5%까지 신재생 청정에너지로 확대보급하고자 노력하고 있다.

특히 대체에너지 발전차액 보존제도와 공공기관의 대체에너지 의무 공급비율에 따라 자치단체나 공기업, 민간기업 등은 대체에너지 설비확충에 적극적으로 나서고 있으며 풍력발전에 대해서는 제주 지역에 50MW 이상의 설비가 신청 중에 있고 풍력발전시스템을 계통에 연계하여 발전사업을 하려는 움직임이 전국적인 현상으로 나타나고 있다.

에너지 생산비용이 타 청정에너지 발전 설비에 비하여 적은 풍력발전의 보급은 최근 급격히 확대되고 있고, 세주도의 경우 행운지역에 10MW, 한경면 용당리에 6MW의 풍력발전 단지가 조성되어 상업운전이 이루어지고 있으며 성산일대에 추가로 용량의 풍력발전단지가 조성될 예정이다.[2-3] 이러한 풍력발전시스템은 대규모인 경우 전용선로를 이용하여 변전소에 직접 연계될 수 있으나 3,000kW 미만에 대해서는 배전선로에 직접 연계되고 있어 연계 위치에 따라 배전선로에 직접적인 영향을 미칠 것이다.

본 논문에서는 풍력발전시스템이 연계되는 지점 및 연

계되는 용량에 따른 전압의 변화를 해석하여 풍력발전시스템이 기존 전력계통에 미치는 영향을 분석해 보자 한다.

2. 본 론

2.1 풍력발전시스템에 의한 전압 변화

배전계통은 수지상(방사상) 구조로 되어 있으며 변전소로부터 수용가로 한 방향으로 조류가 흐르도록 설계, 운영되고 있다. 배전계통에 풍력발전시스템이 연계되는 경우 풍력발전시스템의 용량 및 부하에 따라 일부 수용가는 역방향의 조류를 경험하게 되어 평상시의 전압변동 범위와는 다른 형태가 될 수 있으며 전압강하의 방향도 역으로 되어 적정치를 유지하지 못할 가능성도 있다.[4]

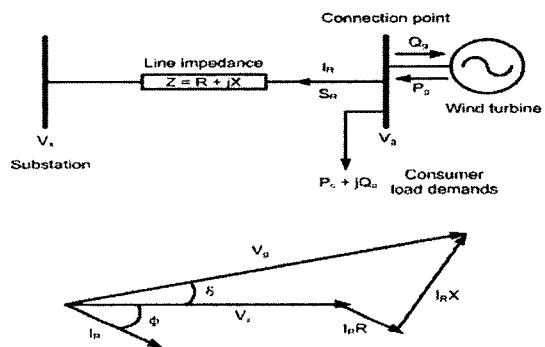


그림 1 풍력발전기가 연계된 전력계통

그림 1은 풍력발전기가 연계된 전력계통을 나타내었다. 그림 1에서 풍력발전기의 전력 및 무효전력은 P_g 와 Q_g 이고, 선로의 유효 및 무효부하는 P_c 와 Q_c , 선로 임피던스는 $Z = R + jX$, 전류는 I_R 이다. 변전소전압 및 연결점의 전압은 각각 V_s 와 V_g 이다. 여기서,

$$S_R = P_R + jQ_R = P_R - jQ_R \quad (1)$$

그리고, $S_R = V_g I_R^*$, $I_R = (P_R - jQ_R)/V_g^*$ 이므로

$$\begin{aligned} V_g &= V_s + I_R Z \\ &= V_s + (R + jX)(P_R - jQ_R)/V_g^* \\ &= V_s + (P_R R + X Q_R)/V_g^* + j(P_R X - Q_R R)/V_g^* \quad (2) \end{aligned}$$

가 된다. 그림 1의 페이저도에서,

$$V_g \sin \delta = (P_R X - Q_R R)/V_s \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서 전압각 δ 가 매우 작기 때문에 $(P_R X - Q_R R)/V_s$ 값 또한 매우 작은 값이 되기 때문에 식 (2)을 모션전압을 기준으로 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = V_g - (P_R X + XQ_R)/V_g^* \quad (4)$$

계통의 전압강하를 ΔV 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = (P_R X + XQ_R)/V_g^* = (P_g R - XQ_g)/V_g^* \quad (5)$$

식 (5)에서 보는 바와 같이 풍력발전시스템이 연계되는 경우 연계점의 전압은 풍력발전량 P_g , Q_g 와 선로 임피던스 R , X 에 따라 전압상승이나 전압강하가 발생할 수 있다.

2.2 사례분석

분석대상 배전선로는 22.9[kV] 선로로서 변전소 인출지점, 배전선로 중간, 선로말단에 풍력발전시스템이 연계되는 것으로 가정하였으며 경부하와 중부하시로 구분하고 풍력발전시스템은 1.5[MW]x1, 1.5[MW]x2, 1.5[MW]x3의 용량으로 구분하여 전압변화를 해석하였다. 풍력발전시스템이 연계된 배전선로를 그림 2에 표시하였다.

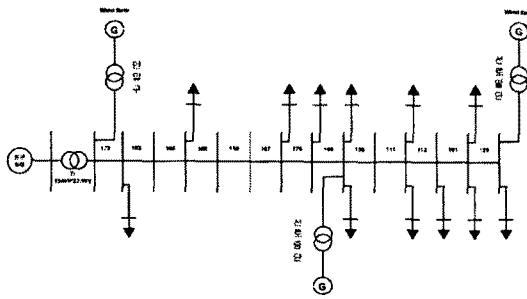


그림 2 풍력발전단지가 연계된 한경D/L 단선도

배전선로에 연계되는 풍력발전기는 N·E·G MICON사의 1.5[MW] 모델을 사용하였으며 발전기 데이터를 표 1에 나타내었다.

표 1 풍력발전기 사양

Rated power output	1.5[MW]
Voltage	690[V]
Number of poles	6
Stator resistance	0.0012 [Ω]
Stator leakage reactance	0.0302 [Ω]
Magnetizing reactance	0.8730 [Ω]
Rotor reactance(referred to stator)	0.0198 [Ω]
Rotor resistance(referred to stator)	0.0026 [Ω]
Magnetizing resistance	35.2 [Ω]

2.2.1 풍력발전설비 연계 전 배전선로의 전압해석

가. 풍력발전설비 연계전 선로의 전압해석

풍력발전설비가 연계되지 않은 배전선로의 각 모선에 대한 전압을 경부하와 중부하로 구분하여 그림 3에 나타내었으며 표 2에 전압크기를 나타내었다. 전압강하는 선

로의 말단에 가장 심하게 발생하므로 선로말단의 전압강하를 부하에 따라 계산해 보면 경부하시 5.686 (%), 중부하시 13.921(%)로 전압강하의 차이가 많음을 알 수 있다. 전압강하에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{전압강하율} = \frac{V_S - V_R}{V_S} \times 100(%) \quad (6)$$

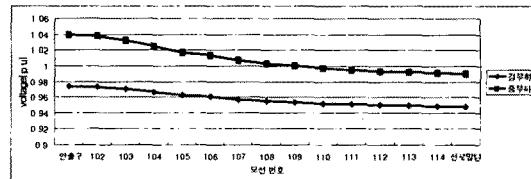


그림 3 풍력발전단지 연계전 선로의 전압파형

표 2 배전선로 전압데이터

단위 : p.u

모선번호	거리(km)	경부하시	중부하시
인출구	0	0.9741	1.0396
102	0.45	0.9732	1.0379
103	1.9	0.9704	1.0325
104	4	0.9666	1.0252
105	6.65	0.9622	1.0168
106	7.65	0.9606	1.0137
107	9.75	0.9572	1.0073
108	11.15	0.9552	1.0034
109	12.4	0.9538	1.0007
110	13.9	0.952	0.9972
111	15.6	0.9509	0.9951
112	17.05	0.95	0.9934
113	18.2	0.9494	0.9923
114	19.55	0.9491	0.9916
선로말단	25.6	0.9482	0.99

나. 풍력발전설비 연계후 전압해석

모델링한 배전계통에 1.5[MW], 3[MW], 4.5[MW]용량의 풍력발전설비를 각각 선로의 인입구와 선로중단, 선로말단에 도입하고 경부하일 때와 중부하일 때의 배전계통을 시뮬레이션하여 분석하였고 이때의 전압파형을 그림 4에서 그림 9에 나타내었다. 그림 4에서 그림 9를 보면 풍력발전설비가 도입됨에 따라서 계통의 전체적인 전압이 약간씩 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 풍력발전단지에서 유효전력을 출력함으로써 계통의 전압을 전체적으로 상승시키는 요인이 되기도 하지만 무효전력을 받아들임으로써 계통의 전압을 전체적으로 감소시키는 요인이 되기 때문이다. 또한 중부하시에 경부하시보다 전압강하가 조금더 많이 일어남을 알 수 있다. 표 3에는 경부하시에 1.5[MW]용량의 풍력발전설비가 연계되었을 경우에 각 선로의 전압변동률을 나타내었다. 전압변동률을 산출하기 위해 다음과 같은 식(10)를 사용하였다. 표 3을 보면 그림 8과 9에서 보듯이 선로말단에 풍력발전기가 도입되었을 때가 인입구나 선로중단에 도입되었을 때보다 선로말단의 전압변동폭이 적음을 알 수 있다.

$$\text{전압변동율} = \frac{V_{DG, \text{before}} - V_{DG, \text{after}}}{V_{DG, \text{before}}} \times 100(%) \quad (10)$$

여기서,

$V_{DG, \text{before}}$: 풍력발전설비가 도입되기 전에 대한 계통의 전압

$V_{DG, \text{after}}$: 풍력발전설비가 도입된 후에 대한 계통의 전압

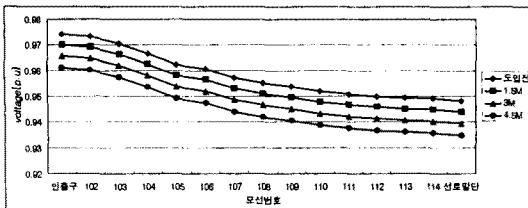


그림 4 경부하시 연계용량별 전압파형(인입구 도입시)

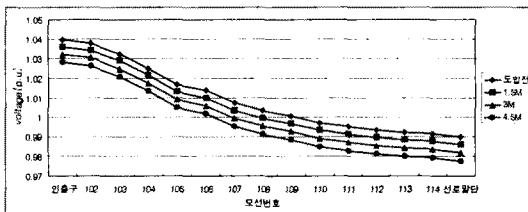


그림 5 중부하시 연계용량별 전압파형(인입구 도입시)

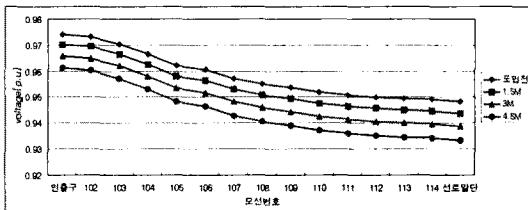


그림 6 경부하시 연계용량별 전압파형(선로중단 도입시)

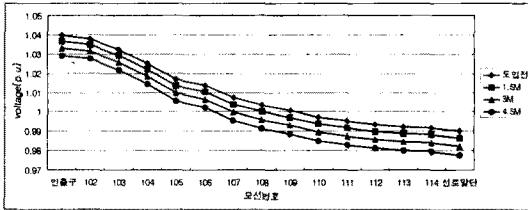


그림 7 중부하시 연계용량별 전압파형(선로중단 도입시)

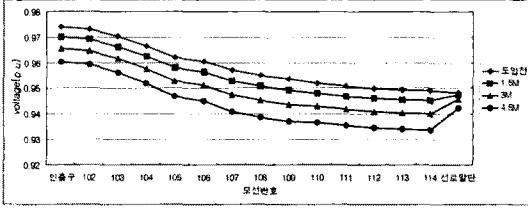


그림 8 경부하시 연계용량별 전압파형(선로말단 도입시)

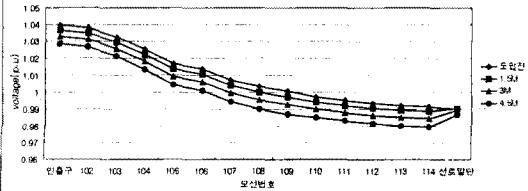


그림 9 중부하시 연계용량별 전압파형(선로말단 도입시)

표 3 선로의 전압변동율(- : 전압강하, + : 전압상승)

도입위치	구분	전압(p.u)		전압변동율(%)	
		풍력발전설비	인출구	선로말단	인출구
인입구	도입전	0.9741	0.9482	-0.4209	-0.4429
	도입후	0.9700	0.9440		
선로중단	도입전	0.9741	0.9482	-0.4004	-0.4640
	도입후	0.9702	0.9438		
선로말단	도입전	0.9741	0.9482	-0.4004	-0.0527
	도입후	0.9702	0.9477		

다. 인접 배전선로의 전압분석

풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 인접한 다른 배전선로의 전압을 분석하여 표 4에 나타내었다. 표 4를 보면 풍력발전단지가 연계되면 연계 배전선로와 인접한 배전선로 모두 약간의 전압강하가 나타나지만 인접한 배전선로의 전압에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

표 4. 연계선로와 인접선로의 전압

	구분	인출구전압 [p.u]		선로말단 전압강하율(%)
		도입전	말단전압 [p.u]	
연계선로	경부하	0.9738	0.9479	2.6597
	도입후	0.9661	0.9391	2.7947
	중부하	1.0393	0.9897	4.7724
	도입후	1.0299	0.9786	4.9811
인접선로	경부하	0.9698	0.9439	2.6707
	도입후	0.9621	0.9359	2.7232
	중부하	1.0316	0.9816	4.8468
	도입후	1.0222	0.9715	4.9599

3. 결 론

풍력발전시스템이 배전선로에 직접 연계되었을 경우, 연계지점 및 연계용량에 따른 배전선로의 전압변화를 분석하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 풍력발전시스템이 도입됨에 따라서 전체적으로 전압이 약간씩 감소하게 되며 이는 유도발전기로 구성되는 풍력발전시스템이 무효전력을 흡수하기 때문이다.
- 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압저하가 크게 나타난다.
- 모델링 한 계통의 선로말단에 풍력발전시스템이 연계되었을 때 전압변동폭이 가장 적어 말단에 연계하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 풍력발전시스템이 연계되어도 인접한 배전선로에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

본 연구는 에너지 관리공단의 지원으로 수행된 결과의 일부이며 한전 제주지사의 협조에 감사드립니다.

【참 고 문 헌】

- [1] 김인동 외 7명, “신에너지 분산전원의 계통연계 보호 및 협조에 관한 연구” 전력계통보호기술연구회논문집, 1999
- [2] 한국남부발전, 제주 풍력건설 타당성 보완조사, 2002. 7.
- [3] 제주도, 제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가(II), 2003. 6.
- [4] Nigel C. Scott, David J. Atkinson, and James E. Morrell, “Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks With Embedded Generation”, IEEE, 2002