[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 26, No. 2, 2006

풍력발전이 연계된 배전선로 전압 및 과도상태 해석

김세호*, 나경윤**, 김건훈***

*제주대학교 전기전자공학부(hosk@cheju.ac.kr), **제주대학교 대학원 전기전자공학과(raky21@naver.com),
***한국 에너지기술연구원(kkh4417@kier.re.kr)

Voltage and Transient State Analysis of Distribution Line connected to Wind Power Generation

Kim, Se-Ho*, Na, Kyoung-Yoon**, Kim, Gun-Hoon***

*Faculty of Electrical & Electronic Eng.,, Cheju National University(hosk@cheju.ac.kr),
**Dept. of Electrical & Electronic Eng., Graduate School, Cheju National University(raky21@naver.com),
***Korea Institute of Energy Research(kkh4417@kier.re.kr)

Abstract

The use of the wind energy resource 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. In this paper, it is investigated the voltage impact and transient state analysis on distribution line, with which wind power generation system is connected. Connections of wind power system usually occur to voltage drop due to reactive power absorption and sometime result in higher than nominal voltage.

Keywards : 풍력발전시스템(wind power generation system), 전압영향(voltage impact), 과도상태 해석(transient state analysis), 풍력시스템연계(Connection of wind power system)

1. 서 론

대체에너지원 중 가장 경제성이 있는 풍력발전은 2003년 현재 세계 전력수요의 0.49 %(82.24 TWh)를 차지하고 있으며 2012년 4.11 %, 2020년 11.98%, 2030년 20.14 %로 급신장할 전망이다[1]. 현재 독일은 전력수요의 약 6 %, 덴마크는 18 % 수준에 이르고 있으며 풍력발전 선도국가에서는 풍력발전설비 도입의무화, 투자에 대한 안정된 수익보장 및 전력시장의 장애요인 제

접수일자:2006년 4월 25일, 심사완료일자:2006년 5월 25일

거 등의 정책적인 지원으로 보급확대를 추진하고 있다.

국내에서는 1990년 초에 대학과 연구원을 중심으로 기초 및 소형풍력시스템에 대한 연구를 시작하여 1990년대 중반부터 본격적으로 기술개발이 진행되고 있으며 제주, 전북 새만금, 경북 포항, 강원도 대관령 등에서 상업용 발전이 이루어지고 있다.

풍력발전설비가 배전선로에 연계되는 경우 연계점에서의 전기품질은 기준을 만족할 수 있으나 계통연계로 인하여 연계점이외의 선로에서 전압이 규정범위를 유지하지 못하는 현상이 나타날 수 있으며 이는 풍력발전시스템의 유효전력 및 무효전력의 공급관계에서 비롯되고 있다.

Tande 등[2]은 풍력발전이 연계되는 경우 풍력발전의 용량에 따른 전압의 크기를 해석하였으며, Nigel C. Scott 등[3]은 풍력발전시스템이 연계되는 경우 부하를 제어하여 전압을 허용범위로 유지하는 방법을 제안하였다.

또한 Salman K.등[4]은 분산형전원이 동기기인 경우와 유도기인 경우에 대해 임계제거시간을 비교하여 유도기인 경우 임계제거시간이 짧게 되어 보호계전기 정정시 고려해야 된다는 것을 강조하였고, Salman K. Salman 등[5]은 계통연계형 풍력발전시스템이 안정도에 미치는 요인들을 분석하였다.

본 논문에서는 계통해석 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent power factory를 이용하여 풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 배전선로 전압에의 영향을 고찰하였다. 우선 정상상태 해석으로서 NEG MICON사의 1.5 MW 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계용량 및 풍력발전기 역률에 따라 배전선로 전압에 미치는 영향을 분석하였으며 과도상태 해석으로서 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 분석하고자 한다.

2. 풍력발전시스템이 연계된 배전선로 전압해석

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 전압변동범위와는 다른 형태가 될 수 있으며 전압강하의 방향도 역으로 되어 적정치를 유지하지 못할 가능성도 있다.

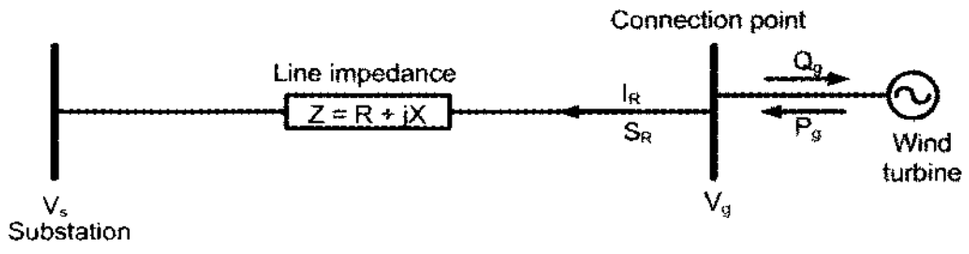

그림 1. 풍력발전이 연계된 모델계통

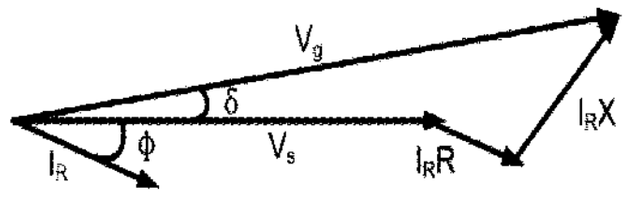

그림 2. 풍력발전이 연계된 계통의 전압페이저

그림 1에 풍력발전기가 연계된 모델계통을 나타내었으며 풍력발전기의 유효전력 및 무효전력은 Pg와 Qg이고, 선로 임피던스는 $Z = R + jX$, 풍력발전이 연계되는 지점의 전압 및 풍력발전기의 전압은 각각 Vs와 Vg 이다.

여기서,.

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

그리고,

$$S_R = V_g I^*_R, \quad I_R = (P_R - jQ_R)/V^*_g$$

이므로

$$V_g = V_s + I_R Z$$

$$= V_s + (R + jX)(P_R - jQ_g)/V_g^* = V_s + (P_R R + XQ_R)/V_g^* + j(P_R X - Q_R R)/V_g^* \quad (2)$$

가 된다. **그림 2**의 페이저에서,

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

이다. 식 (3)에서 전압각 δ가 매우 작기 때문에 $(P_R X - Q_R R)/V_s$ 값 또한 매우 작은 값이 되기 때문에 식 (2)를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

계통의 전압변동을 $\triangle V$ 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

3. 사례분석

풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 배전선로 전압에의 영향을 고찰하기 위해 1.5 MW의 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계용량 및 풍력발전기 역률에 따른 배전선로 전압을 분석하였으며 과도상태 해석으로서 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 배전선로가 적정전압을 유지하는지 여부를 분석하였다.

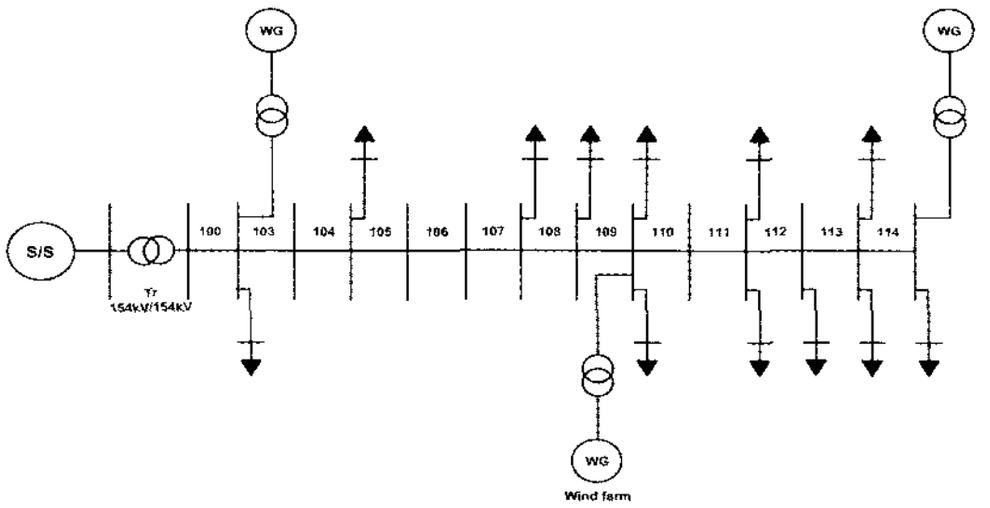

그림 3. 풍력발전이 연계된 배전계통

그림 3에 풍력발전시스템이 연계된 배전선로의 단선도를 나타내었다. 배전선로와 풍력발전시스템은 Y-Δ, 22900/690V 의 변압기로 연계되어 있고 배전선로는 22.9kV 계통으로 CNCV 325 ㎟, 60 ㎟와 ACSR 160 ㎟ 등으로 구성되어 있다.

연계되는 풍력발전기 모델은 NEG MICON사의 AMH 500L6L BAH 1.5 MW 모델을 사용하였으며 등가모델은 **그림 4**, 발전기 사양은 **표 1**에 나타내었다.

국내의 저압 수용가에 대한 전압허용범위는 207 ~ 233 V 이지만, 주상변압기로부터 수용가에 이르기까지 주상변압기, 저압선 및 인입선에서 전압강하가 발생하게 되며 전압강하를 고려하여 주상변압기의 변압비는 전압강하가 5 % 이하의 지역에서는 5 %의 변압비를, 5 % 초과 지역에서는 10 %의 변압비를 사용한다.

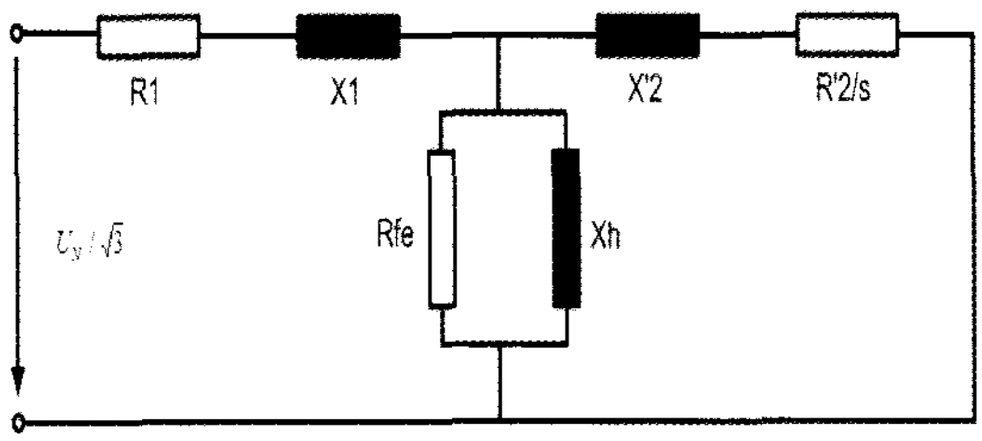

그림 4. 풍력발전기 모델

표 1. 발전기 정수

정격출력	1.5〔MW〕
전압	690〔V〕
극수	6
역률	0.9
고정자 저항(R1)	0.0012〔Ω〕
고정자 누설리액턴스(X1)	0.0302〔Ω〕
자화 리액턴스(Xh)	0.8730〔Ω〕
회전자 리액턴스(X′2)	0.0198〔Ω〕
회전자 저항(R′2/s)	0.0026〔Ω〕
자화 저항(Rfe)	35.2〔Ω〕

3.1 풍력발전설비 용량에 따른 배전선로의 전압

변전소 인출지점과 배전선로 중간, 말단에 1.5 MW, 3MW 용량의 풍력발전시스템을 연계하여 경부하(5,000 kW)와 중부하(10,000 kW)일 때의 배전선로 전압을 분석하였으며 **표 2**와 **3**에 변전소 인출구 및 선로말단의 전압변동율을 나타내었고, **표 4**와 **5**에는 선로말단의 전압강하율을 나타내었다. 표에서 (-)는 전압강하를, (+)는 전압상승을 의미한다. 전압 변동률 및 전압 강하율에 관한 표로부터 배전선로에 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압변동율과 전압강하율이 증가하는 경향이 있으며 변전소 전원단보다는 선로말단 지점에 연계하는 것이 적음을 알 수 있다.

표 2. 전압변동율(풍력발전용량 : 1.5〔MW〕)

구 분			전압(p.u)		변동률(%)	
부하	연계점	연계 전후	인출	말단	인출	말단
경부하	인출	전	0.9738	0.9315	-0.4108	-0.4616
		후	0.9698	0.9272		
	선로 중간	전	0.9738	0.9315	-0.3800	-0.4831
		후	0.9701	0.927		
	말단	전	0.9738	0.9315	-0.3800	-0.3650
		후	0.9701	0.9281		
중부하	인출	전	1.0393	0.9463	-0.3464	-0.4333
		후	1.0357	0.9422		
	중간	전	1.0393	0.9463	-0.2502	-0.3276
		후	1.0367	0.9432		
	말단	전	1.0393	0.9463	-0.2405	-0.1479
		후	1.0368	0.9449		

표 3. 전압변동율(풍력발전용량 : 3〔MW〕)

구분			전압(p.u)		변동률(%)	
부하	연계점	연계 전후	인출	말단	인출	말단
경부하	인출	전	0.9738	0.9315	-0.8626	-0.9554
		후	0.9654	0.9226		
	중간	전	0.9738	0.9315	-0.8215	-1.0735
		후	0.9658	0.9215		
	말단	전	0.9738	0.9315	-0.8421	-0.9018
		후	0.9656	0.9231		
중부하	인출	전	1.0393	0.9463	-0.7313	-0.8982
		후	1.0317	0.9378		
	중간	전	1.0393	0.9463	-0.5773	-0.7714
		후	1.0333	0.939		
	말단	전	1.0393	0.9463	-0.5677	-0.4967
		후	1.0334	0.9416		

표 4. 전압강하율(풍력발전용량 : 1.5〔MW〕)

구분			전압(p.u)		강하율(%)
부하	연계점	연계전후	인출	말단	
경부하	인출	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9698	0.9272	4.3927
	중간	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9701	0.927	4.4428
	말단	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9701	0.9281	4.3295
중부하	인출	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0357	0.9422	9.0277
	중간	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0367	0.9432	9.0190
	말단	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0368	0.9449	8.8638

표 5. 전압강하율(풍력발전용량 : 3〔MW〕)

구분			전압(p.u)		강하율(%)
부하	연계점	연계전후	인출	말단	
경부하	인출	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9654	0.9226	4.4334
	중간	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9658	0.9215	4.5869
	말단	전	0.9738	0.9315	4.3438
		후	0.9656	0.9231	4.4014
중부하	인출	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0317	0.9378	9.1015
	중간	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0333	0.939	9.1261
	말단	전	1.0393	0.9463	8.9483
		후	1.0334	0.9416	8.8833

3.2 풍력발전기 역률에 따른 배전선로 전압분석

배전선로의 중간과 말단에 1.5 MW 및 3 MW용량의 풍력발전설비를 연계하여 풍력발전기의 역률변화(0.7, 0.8, 0.9, 1.0)에 따른 배전선로 전압을 분석하여 **그림 5-8**에 나타내었으며 변압비 5 %, 10% 지점에 따라 전압의 허용범위가 다르게 표시되어 있다.

풍력발전기의 역률변화에 따른 전압을 해석해 보면 선로말단에 큰 용량의 풍력발전기가 연계되는 경우 전압이 상승하며 역률이 1.0의 경우 과전압의 우려가 있고 역률이 낮을 경우에는 선로말단 부분에서는 저전압의 우려가 있음을 알 수 있다. 또한 연계되는 풍력발전기의 용량이 클수록 배전선로 전압에의 영향이 크다는 것을 파악할 수 있다.

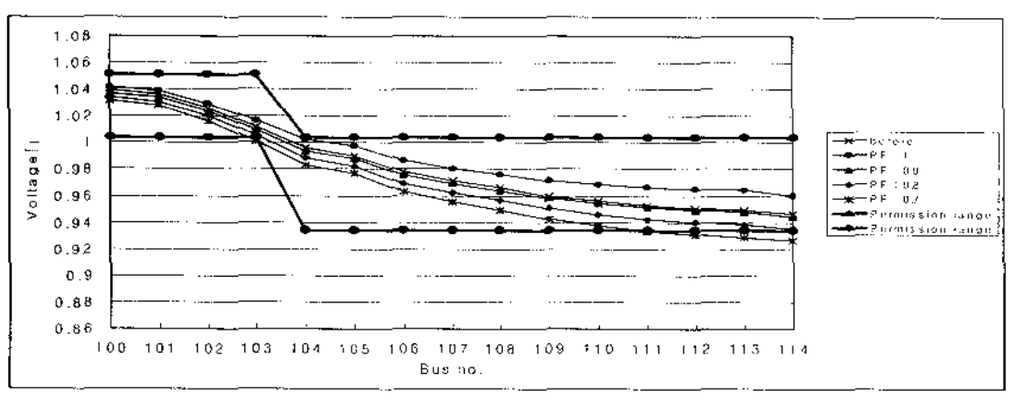

그림 5. 전압분석(1.5[MW]풍력 선로말단연계)

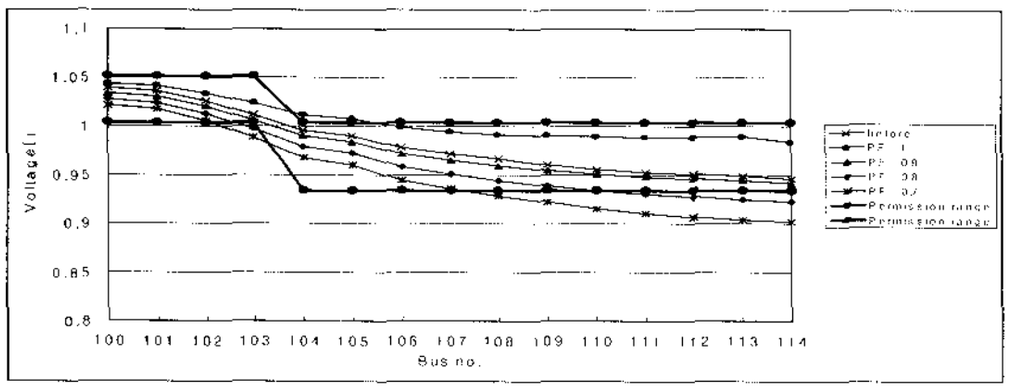

그림 6. 전압분석(3[MW]풍력 선로말단연계)

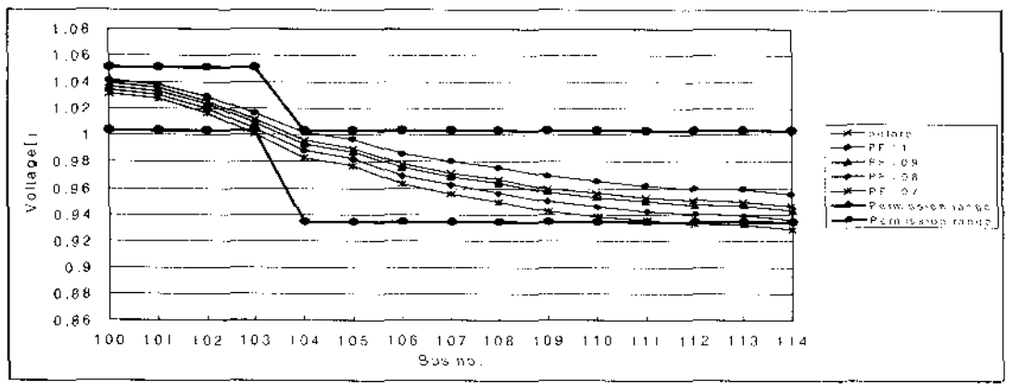

그림 7. 전압분석(1.5[MW]풍력 선로중간연계)

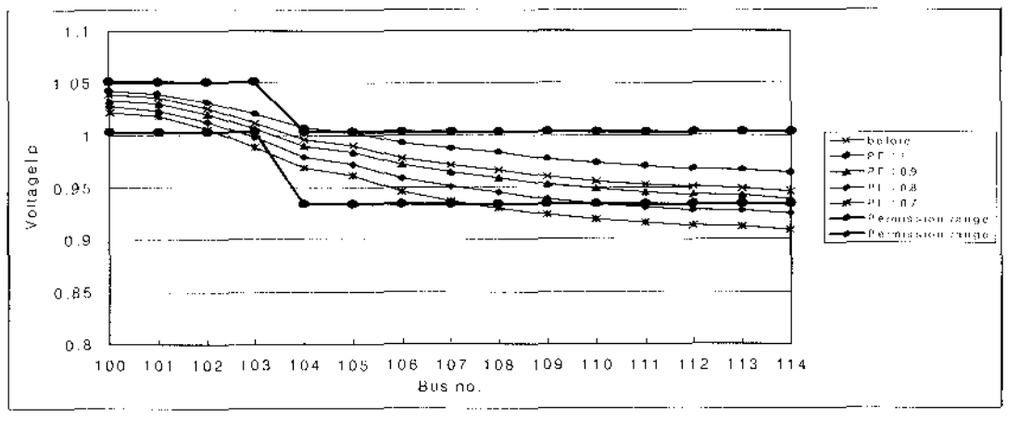

그림 8. 전압분석(3[MW]풍력 선로중간연계)

3.3 풍력발전시스템이 연계된 배전계통의 과도상태 해석

변전소의 차단기(CB)나 배전선로의 보호기기 중 리클로우저는 전위와 후위 보호기기간에 보호협조를 유지하는 중추적 역할을 하고 있다. 리클로우저는 순간고장과 영구고장을 구별할 수 있는 기능을 갖고 있으며 순간고장시 선로를 순시 차단한 후 자동으로 재폐로 시킬 수 있을 뿐만 아니라 영구고장시 미리 설정된 동작 시퀀스를 수행한 후 고장구간을 선로로부터 분리시킬 수 있다.

그림 9와 같은 배전선로의 ① ~ ⑤ 지점에서 사고가 발생했을 경우에 풍력발전기를 제거하지 않을 경우 전압이 원상회복될 수 있는 보호기기의 차단시간(임계제거시간 : Critical Clearing Time, CCT)을 사고위치별로 **표 6**에 나타내었다. **표 6**을 보면 풍력발전시스템의 연계지점에 가까운 사고일수록 임계제거시간이 짧아 보호기기의 신속한 차단이 요구된다.

표 6. 사고지점에 따른 임계제거시간

사고지점	①	②	③	④	⑤
임계제거시간	49ms	46ms	45ms	56ms	73ms

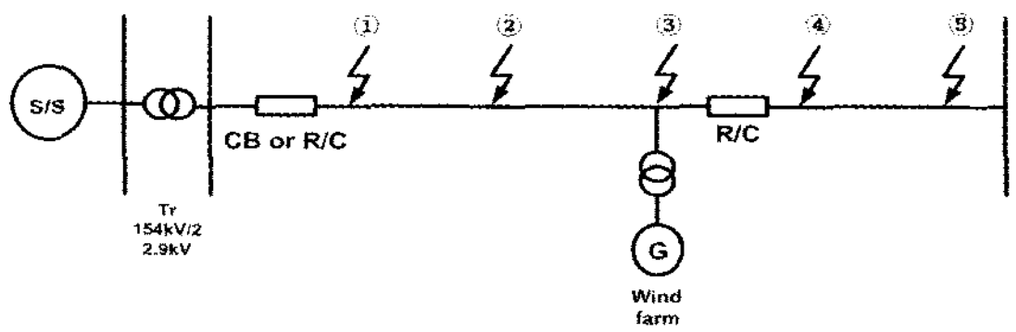

그림 9. 풍력발전이 연계된 배전계통의 예

그림 9의 배전선로에서 ④나 ⑤지점에 1초에 3상사고가 발생하는 경우 보호기기인 리클로우져가 100 ms 후에 동작하여 사고지점을 차단한다고 가정하는 경우에 대한 ①지점의 파형을 **그림 10 - 12**에 표시하였다. **그림 10**는 풍력발전시스템이 차단되지 않은 경우의 파형이며 **그림 11**은 리클로우져 동작이전에 풍력발전시스템 측의 차단기가 동작(사고발생 후 80 ms에서 동작) 후 한 경우, **그림 12**는 리클로우져의 순시동작 후 풍력발전시스템 측의 차단기가 동작(사고발생 후 150 ms에서 동작)한 경우에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 사고발생 후 정상상태로의 전압회복여부는 풍력발전시스템의 차단기가 중요한 역할을 한다는 것을 할 수 있다.

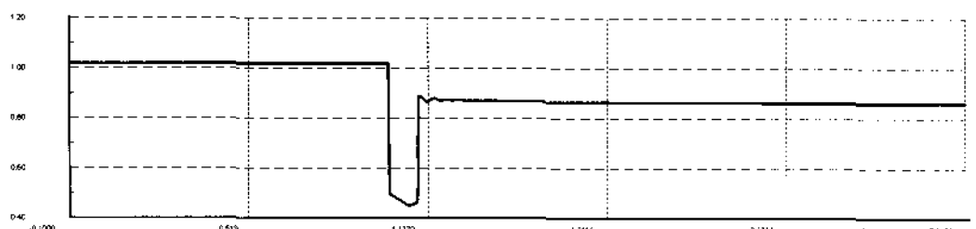

그림 10. 리클로우져 순시차단 후 전압파형

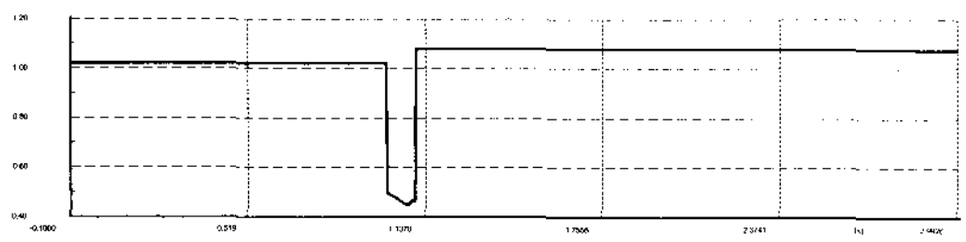

그림 11. 풍력발전 차단후의 전압파형(80[ms] 후 차단)

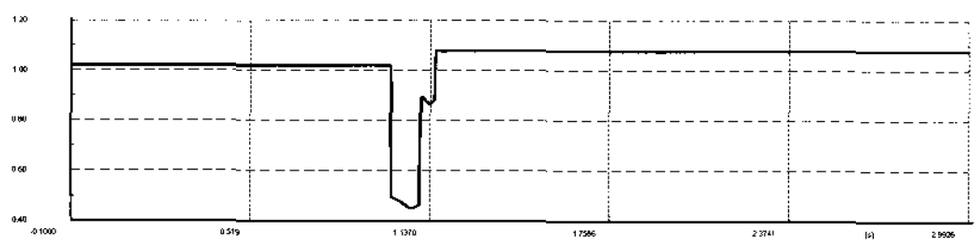

그림 12. 풍력발전 차단후의 전압파형(150[ms] 후 차단)

4. 결 론

본 논문에서는 계통해석 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent power factory를 이용하여 1.5 MW의 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계용량 및 풍력발전기 역률에 따른 전압을 분석하였으며 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 배전선로에 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압변동율과 전압강하율이 증가하는 경향이 있어 풍력발전시스템의 연계 검토시 배전선로의 부하 분포 등을 고려하여 전압변동 및 전압강하 등에 검토가 미리 이루어져야 한다.
2) 풍력발전기의 운전역률에 따라 배전선로 전압상승 또는 전압강하가 발생하여 허용전압 범위를 벗어날 우려가 있으므로, 운전역률에 따른 연계되는 배전선로의 전압 분포를 미리 검토하여 풍력발전시스템의 연계지점을 결정하여야 한다.
3) 풍력발전기의 운전역률에 따라 배전선로 전압상승 또는 전압강하가 발생하여 허용전압 범위를 벗어날 우려가 있으므로, 운전역률에 따른 연계되는 배전선로의 전압 분포를 미리 검토하여 풍력발전시스템의 연계지점을 결정하여야 한다.

후 기

본 연구는 엔너지 관리공단 연구 사업의 일환(관리번호:2003-N-WD03-P-01-0-000-2003)으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Wind Force 12, 2004, European Wind Energy Association, Greenpeace, BTM Consult Aps.
2. JOG Tande and K Uhlen, 2001, "Wind Turbines in Weak Grids - Constraints and Solutions", IEE Conference, pp. 416

3. Nigel C. Scott, David J. Atkinson, and James E. Morrell, 2002, "Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks with Embedded Generation", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 510-515
4. Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, 2001, "Investigating the Impact of Embedded Generation on Realy Settings of Utilities' Electrical Feeders", IEEE Trans. Power Delivery. Vol. 16, No. 2, pp. 246 - 251
5. Salman K. Salman, Anita L. J. Teo, 2003, "Windmill Modelling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator"
6. 김세호, "풍력발전시스템이 연계된 계통의 과도상태 해석", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 23, No. 3, pp. 29-36, 2003. 9.