PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력발전이 연계된 실 배전계통의 모델링

김 소희*, 전 진택*, 노 대석*, 이 창우**
*한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학과,**한국폴리텍Ⅶ대학
e-mail:sh-kim2579@kut.ac.kr, dsrho@kut.ac.kr

Modeling of Real Distribution System with Wind Power Generation Using the PSCAD/EMTDC

So-Hee Kim*,Jin-taek Jeon* Dae-Seok Rho*
*Dept of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education,**Korea Polytechnic Ⅶ

요 약

최근 정부의 녹색정책의 일환으로 태양광 및 풍력발전 등의 분산전원이 도입·운용되고 있다. 현재 풍력발전은 배전계통에 전용선로에 주로 연계되어 실 계통에 미치는 영향은 미미하지만, 3[MW]이상의 대규모풍력발전이 일반 배전선로에 운용되면 배선선로의 전압품질문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 통해 풍력발전이 연계되어 운용되고 있는 제주도 김녕 D/L을 모델링하여 그 특성을 분석하고자 한다. 수계산과 다양한 모델링을 통한 Simulation 값을 비교·분석하여 풍력발전이 연계된 김녕 D/L의 말단 수용가의 전압변동을 해석하고 풍력발전이 배전선로에 미치는 영향을 평가하였다.

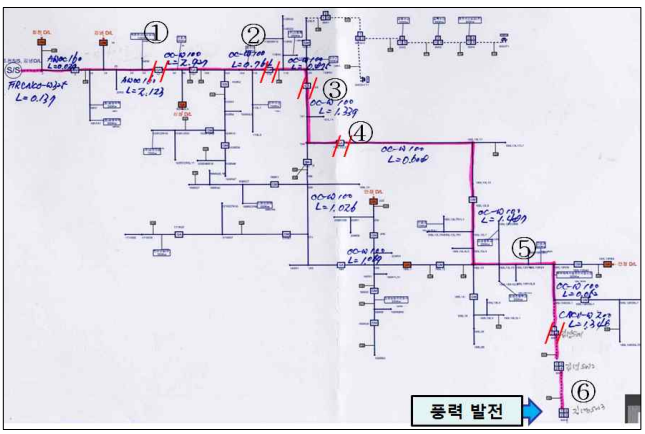
1. 서론

최근 녹색정책 및 환경문제 등에 따른 에너지 부족현상에 대한 방안으로 태양광 및 풍력발전 등의 분산전원이 도입·운용되고 있다. 현재 풍력발전은 배전계통에 전용선로에 주로 연계되어 실 계통에 미치는 영향은 미미하지만 3[MW]이상의 대규모풍력발전이 일반 배전선로에 확대 운용되면 기존의 부하모델의 특징 및 역조류에 의해 정상상태에서 순시전압의 상승·하강과 같은 전압품질 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제점들이 해결되지 못한다면 전력품질의 큰 테두리 안에서 수용가에 또 다른 악영향을 끼치거나 부하용량변동에 따른 전압변동이 발생하게 될 것이다.

이에 따라 본 논문에서는 전력계통의 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 통해 실제 풍력발전이 연계되어 운용되고 있는 제주도 김녕 D/L을 모델링하였다. 배전계통에 연계된 풍력발전(DFIG)과 부하를 실 계통의 데이터를 기반으로 모델링하였으며, 풍력발전의 역조류를 고려한 전압강하/상승 계산식을 이용한 이론적인 수계산과 PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 값을 비교·분석하였다. 풍력발전 연계 전/후의 김녕 D/L의 말단 수용가의 전압변동을 해석하여 풍력발전이 배전선로에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실 계통의 모델링

2.1. 배전선로의 모델링



[그림 1] 김녕D/L의 회선별 단선도

분산전원(풍력발전)이 연계된 실제 제주도 조천변전소 김녕 D/L(Distribution Line)의 전압변동 특성을 분석하기 위하여 김녕 D/L의 간략 계통도를 그림 1과 같이 나타내었다. 배전변전소부터 풍력발전기까지 GA(개폐기)가 설치된 여러 지점을 기준으로 임의의 총 6개의 구간(Section)으로 모델링하였다.

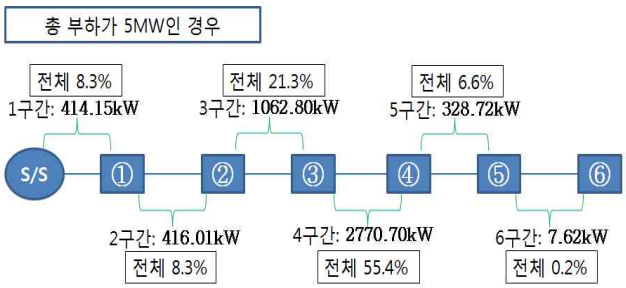
말단구간(⑥번 구간 말단)에 1.5MW급의 풍력발전이 연계되어 있으며 실제 김녕 D/L의 회선별 단선도인 그림 2의 구간 세부정보를 바탕으로 각 구간에 연계된 부하(고압부하 및 저압부하 포함)의 크기를 산정하였다.

○ 회선별단선도 구간세부정보
○ 단선도명:조천 - 김녕
○ 작성일 :20110128 12:25:15

구간번호	설비 1	설비 2	선종	상	긍장(m)	고압부하	저압부하 용량합(KVA)	저압부하 부하
101	CB	2	CF 325 X3	ABC	137	0	0	0
	2	3	EW 160 X3	ABC	29	0	0	0
	2	1	EW 160 X3	ABC	30	0	0	0
102	3	18	EW 160 X3	ABC	660	0	225	56.0
	18	19	EH 100 X3	ABC	48	0	0	0
	19	20	EH 100 X3	ABC	71	0	0	0
	20	22	EH 100 X3	ABC	88	0	0	0
	22	34	EH 100 X3	ABC	606	0	485	158.
	34	41	EW 160 X3	ABC	350	0	0	0

[그림 2] 김녕D/L의 회선별단선도 구간세부정보(부하)

각 구간에서 고압수용가의 kW부하는 계약용량을 이용하여 수용가별로 합산을 하고, 가정집의 부하는 kW로 나타나지 않고 사용량인 kWh로 주어지므로 역률을 고려하여 kW값으로 환산을 하거나 주상변압기의 용량에 이용률을 곱하여 kW값으로 환산하는 방법으로 모델링을 수행하여, 실제 부하의 값에 더욱 가깝도록 구체적으로 계산하였다. 전체 구간의 총 부하는 약 37MW정도로 큰 값을 가지지만 실제의 부하는 비례식을 사용하여 구한다. 예를 들어 김녕 D/L의 부하가 5MW라고 가정하면, 각 구간의 부하들을 비례적으로 계산하여 그림 3과 같이 모의된다. 한편 대상선로의 부하분포를 살펴보면, 중간지점(④번 구간)에 부하가 50%이상 집중되어 있음을 그림 3에서 알 수 있다.



실제 모든 구간의 부하의 합= 37177.846kW

<5MW기준으로 각 구간의 부하를 환산>

37177.846 : 5000 = 3079.45 : ①구간=414.15kW
37177.846 : 5000 = 3093.27 : ②구간=416.01kW
37177.846 : 5000 = 7902.54 : ③구간=1062.80kW
37177.846 : 5000 = 20601.706: ④구간=2770.70kW
37177.846 : 5000 = 2444.21 : ⑤구간=328.72kW
37177.846 : 5000 = 56.67 : ⑥구간=7.62kW

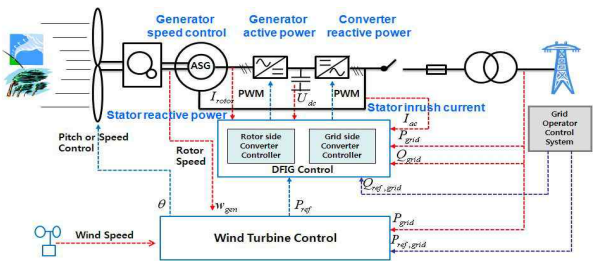
[그림 3] 김녕D/L의 각 구간부하 분포도(전체 5MW기준)

2.2. PSCAD/EMTDC에 의한 모델링

앞서 해석한 부하모델링과 풍력발전모델을 분석하고 실 계통을 PSCAD/EMTDC로 모의하여 풍력발전이 연계된 배전계통의 전압변동을 해석하고자 한다.

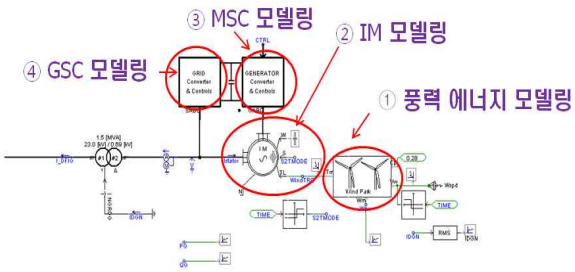
(1) 이중여자유도발전기(DFIG)모델링

그림 4는 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)를 간단히 나타낸 그림이다. DFIG를 이용한 풍력발전시스템은 블레이드와 발전기 전력변환 장치를 포함한 기계구조부분과 각 부분을 제어기하는 부분과 각 부분을 제어하는 시스템 제어기로 구성된다. 전력변환장치는 동일한 구조의 컨버터 두 대를 연결하여 구성된다. DFIG 회전자측 AC-DC컨버터와 그리드측 DC-AC컨버터로 구분되는데, 회전자측에 연결된 RSC라고 하며 그리드측에 연결된 컨버터를 GSC라고 한다. 두 컨버터 모두 DC전압원에서 AC전압을 합성하기 위해 IGBT 전력전자 소자를 사용하였다. GSC의 역할은 직류단 전압을 일정하게 유지하고 그리드와 그리드측 전력 컨버터 사이에 교환되는 무효전력의 양을 제어해서 시스템의 역률을 향상 시키는 것이고, RSC의 역할은 발전기의 고정자와 그리드 사이에 교환되는 유효/무효 전력을 제어하는 것이다.



[그림 4] DFIG 시스템의 개념도

상기의 이론을 바탕으로 PSCAD를 이용하여 그림 5와 같이 1.5[MW]의 DFIG를 모델링 하였으며, 크게 풍력에너지, IM, MSC, GSC부분으로 구성된다.



[그림 5] DFIG의 구성

(2) 부하 모델링

배전계통 부하는 경향성, 순환성, 계절성, 수렴성, 유사성의 성질을 가지고 있으며 모선에 걸려있는 부하는 용도별, 계절별, 일별, 지역별 등으로 구분된다. 일반적으로 배전계통해석을 위한 부하의 종류는 크게 3가지로 나누어 볼 수 있는데, 첫째는 부하가 소비하는 전력이 전압의 제곱에 비례하여 변화하는 부하 즉 정임피던스 부하(Constant Z)이며, 둘째는 부하가 소비하는 전력이 전압의 변화와 비례하여 변화하는 부하로 정전류 부하(Constant I)라고 한다. 마지막으로 부하가 소비하는 전력이 전압의 변화와 무관한 부하로 정전력 부하(Constant P)라고 한다. 상기의 3가지 부하를 일컬어 다항식 모델 또는 ZIP 모델이라고 하며 식 (1)과 같이 표현된다.

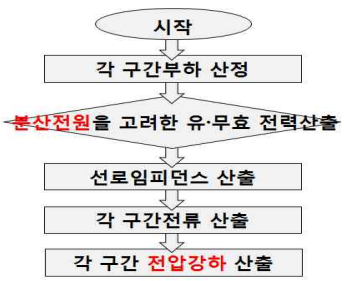
$$P = P_0[a_1(\frac{V}{V_o})^2 + a_2(\frac{V}{V_o}) + a_3] \quad (1)$$
$$Q = Q_0[a_4(\frac{V}{V_o})^2 + a_5(\frac{V}{V_o}) + a_6]$$

ZIP 모델 중 정임피던스 부하는 전등, 전열 부하이며 계통 전체 부하의 대략 30%를 차지하며 하고, 정전류 부하는 대략 20%를 차지한다. 정전력 부하는 소비전력이 항상 일정하게 되는 특성을 가지는 가장 악성부하로 볼 수 있다. 대표적인 정전력 부하는 인버터, 에어컨, 전동기 등이며 계통 전체 부하의 대략 50%를 차지한다. 전기제품의 증가에 따라 특히 하절기 중부하시의 전압 불안정 현상의 원인이 되고 있다.

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력연계 특성해석

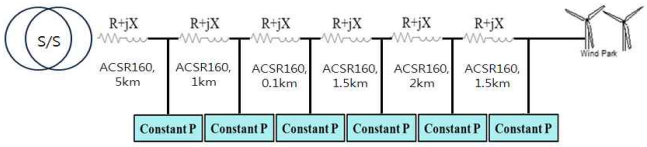
3.1. 전압강하 알고리즘

그림 6은 분산전원의 연계를 고려한 전압강하 계산 알고리즘을 나타낸 것이다. 실제 각 구간부하를 비례적으로 산정하여 분산전원의 유·무에 따라 전력을 산출하여 전압강하를 해석한다.



[그림 6] 전압강하 계산 알고리즘

그림 7은 김녕 D/L 고압 측 배전계통을 간략하게 나타낸 구성도이며 알고리즘의 각 순서에 따라 각 구간별 전압강하를 구할 수 있도록 실제 김녕 D/L의 데이터를 바탕으로 구성하였다.



[그림 7] 김녕 D/L 배전선로 구성도

각 구간별 임피던스는 정임피던스 부하로 상정하였으며, 배전변전소부터 풍력발전기까지 총 6구간으로 나누고 식 (5)와 같이 풍력발전을 고려하여 유효전력을 계산한다.

$$P_{ns'} = P_{ns} - P_{wind}[MVA], \quad (5)$$
$$P_n = P_{ns} \times \cos\theta[MW], Q_n = P_{ns} \times \sin\theta[MVAR]$$

각 구간의 부하전류는 식 (6)과 같이 계산하여 산출하였다. 선로는 식 (7)과 같이 임피던스를 구한 후 긍장을 곱하여 식 (8)의 전압강하 식에 이용하였다.

$$i_{np} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times V \times \cos\theta}, \quad i_{nq} = \frac{Q_n}{\sqrt{3} \times V \times \sin\theta} \quad (6)$$
$$Z_n = (R \cdot \cos\theta + X \cdot \sin\theta) \times l \quad (7)$$
$$\triangle V = k \times I \times z \quad (8)$$

여기서, $P_{ns'}$:풍력을 고려한 전력, P_{ns}: n구간의 전력,P_{wind}: 연계된 풍력발전전력,P_n: n지점의 유효전력, Q_n:n지점의 무효전력, Z_n:n지점의 선로 임피던스, l:선로의 길이[Km], k: 전압공급방식에 따른 계수, I: 선 전류, z: 선로임피던스

3.2. 부하에 따른 이론적인 전압강하 계산

실제 부하설비용량은 그림 3에서 제시한 비례식을 이용하여 37MW를 기준으로 1.5MW(경부하 시), 5MW(중간부하 시), 10MW(Peak부하 시)로 모의하였다. 표 1은 분산전원이 연계되기 전 실제 사용되는 부하가 1.5MW, 5MW, 10MW인 경우, 13200V 기준에서 각 구간의 전압강하율을 나타낸 것이다.

[표 1] 분산전원 연계 전 각 구간의 전압강하율

	각 구간의 전압강하율(13,200V 기준) [V]					
전체구간부하	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간
1.5MW	0.37	0.47	0.48	0.57	0.59	0.59
5MW	1.23	1.56	1.59	1.91	1.96	1.96
10MW	**2.47**	**3.11**	**3.17**	3.83	3.92	3.92

경부하(1.5MW)인 경우 각 구간의 전압강하율이 경미한 것을 확인할 수 있으며 Peak부하(10MW)시에는 경부하에 비해 전압강하율이 선로말단으로 갈수록 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 표 2는 분산전원 연계 전, 부하종류에 따른 저압배전선로 말단구간(5, 6구간)의 전압을 비교한 것이다. 주상변압기 TAP은 일반적인 경우로 13,200TAP을 사용하였으며 부하율을 고려한 전압강하 분담율을 적용하여 주상변압기 직하의 전압은 2%의 손실, 말단은 선로와 인입구 손실을 포함한 6%의 손실을 적용하였다.

[표 2] 분산전원 연계 전 선로 말단 구간의 주상변압기 직하/말단 전압

		전압[V]	
		13200TAP 사용	
전체구간부하		P.Tr 직하	P.Tr 말단
1.5MW	5구간	227.99	226.01
	6구간	227.99	226.01
5MW	5구간	223.29	218.89
	6구간	223.29	218.89
10MW	**5구간**	**216.58**	**207.78**
	6구간	**216.57**	**207.77**

표 3은 분산전원(풍력발전 3MW) 연계 후 전체부하가 1.5MW, 5MW, 10MW인 경우, 그림 6에서 제시한 분산전원을 고려하는 알고리즘을 이용하여 각 구간의 전압강하율을 나타낸 것이다. 경부하(1.5MW)인 경우 분산전원이 연계되기 전과 달리, 부하설비용량이 연계된 분산전원의 용량보다 작아 전압상승으로 인하여 전압강하율이 모두 음수로 표현되었음을 알 수 있다. Peak부하(10MW)의 경우의 전압강하율 또한 분산전원으로 인하여 연계 전 보다 작은 것을 알 수 있다.

[표 3] 분산전원(풍력발전 3MW) 연계 후 각 구간의 전압강하율

	각 구간의 전압강하율(13200V 기준)					
전체구간부하	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간
1.5MW	-0.37	-0.48	-0.49	-0.68	-0.99	-1.22
5MW	0.87	1.11	1.13	1.41	0.86	0.44
10MW	**2.1**	**2.68**	**2.73**	**3.44**	**2.56**	**1.86**

표 4는 분산전원(풍력발전 3MW) 연계 후, 부하종류에 따른 저압배전선로 말단구간(5, 6구간)의 전압을 비교한 것이다. 연계전과 같이 주상변압기에 13,200TAP을 그대로 사용하였을 때, 경부하(1.5MW)시 주상변압기 직하의 전압이 규정전압을 벗어나 과전압현상이 일어남을 확인할 수 있다.

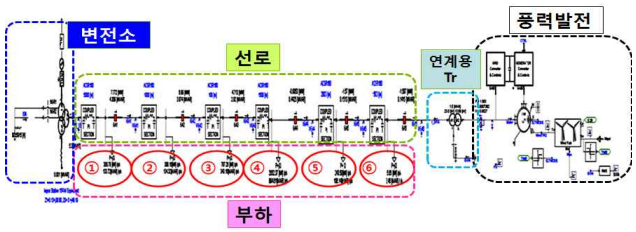
따라서 기존 배전계통의 운영방식과 같이 분산전원을 고려하지 않는 방식을 유지하는 경우, 분산전원의 연계가 지속적으로 증가한다면 더 큰 전력품질의 문제로 확산될 우려가 있음을 알 수 있다.

[표 4] 분산전원(풍력발전 3MW) 연계 후 선로 말단 구간의 주상변압기 직하/말단 전압

		전압[V]	
		13200TAP 사용	
전체구간부하		P.Tr 직하	P.Tr 말단
1.5MW	5구간	232.61	231.29
	6구간	233.15	231.83
5MW	5구간	225.82	221.42
	6구간	226.80	222.40
10MW	**5구간**	**219.72**	**210.92**
	6구간	**221.32**	**212.52**

3.3. 시뮬레이션 및 분석

그림 16은 김녕 D/L 모델링으로 배전용 변전소로부터 3.5[Km](①),그 이후 1[Km](②), 0.1[Km](③), 1.5[Km](④), 2[Km](⑤), 1.5[Km](⑥)로 6구간으로 총 9.6[Km]를 모델링하였으며 시뮬레이션 조건은 표 5와 같다.



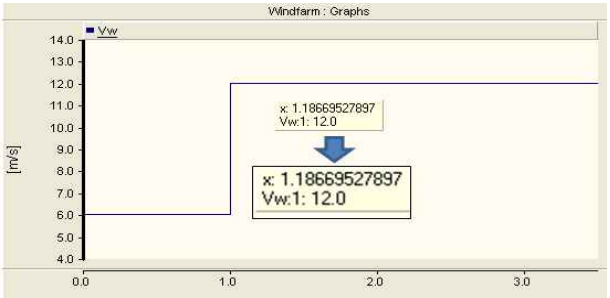
[그림 6] 김녕 D/L 모델링

[표 5] 김녕 D/L 제원

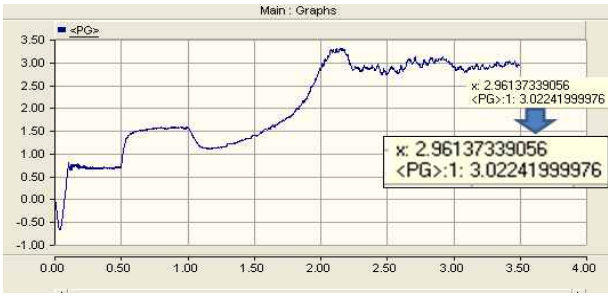
종 류		내 용
배전용 변전소		45[MVA]
계통 기준전압		22.9[kV]
역 률		0.9
배전선로		ACSR - 160/95, ①지점 3.5[km], ②지점 1[km], ③지점 0.1[km], ④지점 1.5[km], ⑤지점 2[km], ⑥지점 1.5[km],
부하패턴 (정임피던스부하)	Case 1	Constant P 1.5MW ① (WP 연계 전) ② (WP 연계 후)
	Case 2	Constant P 5MW ① (WP연계 전) ② (WP연계 후)
	Case 3	Constant P 10MW ① (WP연계 전) ② (WP연계 후)
풍 력		DFIG, 3[MW]

풍력발전(DFIG)이 3MW연계된 경우, Peak부하(10MW), 중간부하 (5MW), 경부하(1.5MW)로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 시간에 따른 풍속의 변동이 6m/s~12m/s 임을 나타내는 그래프이며 그림 8은 시간에 따른 풍력발전(DFIG)의 출

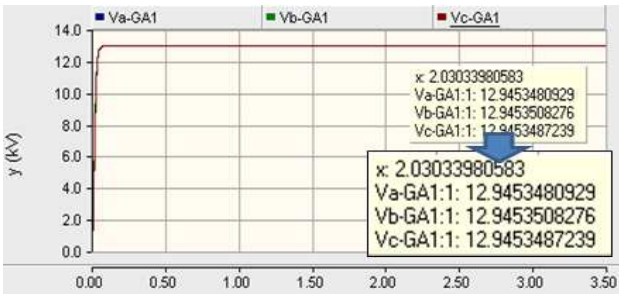
력(3MW)특성 그래프이다.



[그림 7] 시간에 따른 풍력발전의 속도(6m/s~12m/s)



[그림 8] 시간에 따른 DFIG의 출력(3MW)



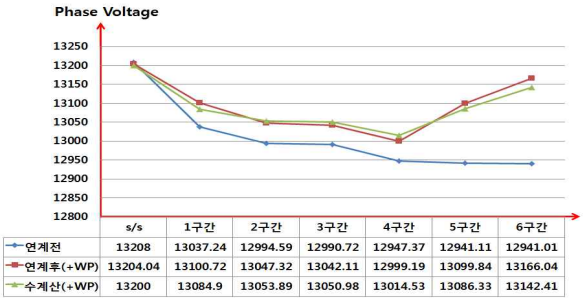
[그림 9] Peak부하(10MW)시 1번구간의 전압그래프

그림 9는 풍력발전(DFIG)이 연계된 경우, Peak부하(10MW)시 1번구간의 전압강하그래프이다. 표 2와 같이 분산전원을 고려한 이론적인 수계산 결과와 그림 9와 같은 PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 데이터를 비교하여 분석한 결과, 부하용량별로 각 구간의 전압이 서로 일치하는 것을 그림 10(부하설비용량 1.5MW), 그림 11(부하설비용량 5MW), 그림 12(부하설비용량 10MW)을 통해 확인할 수 있다.

따라서 분산전원을 고려하지 않는 배전계통 운영방식을 유지하는 경우, 대규모 분산전원의 지속적인 연계는 큰 전력품질의 문제로 확산될 우려가 있음을 이론적 계산값과 PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하한 대안으로 선로전압조정장치인 SVR(Step Voltage Regulator)의 LDC(Line Drop Compensator)운전을 통하여 분산전원의 연계에 따른 선로말단에 발생하는 과전압을 방지할 수 있다.

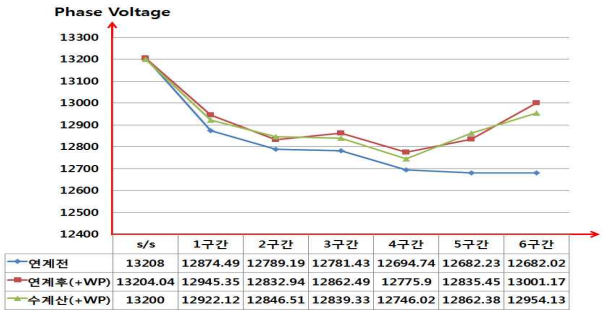
	s/s	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간
연계전	13208	13151.17	13138.38	13137.21	13124.21	13122.33	13122.30
연계후(+WP)	13204.04	13265.32	13275.1	13279.22	13300.3	13349.98	13380
수계산(+WP)	13200	13248.84	13263.36	13264.87	13289.66	13330.26	13361.38

[그림 10] 경부하(1.5MW)시 결과 그래프



	s/s	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간
연계전	13208	13037.24	12994.59	12990.72	12947.37	12941.11	12941.01
연계후(+WP)	13204.04	13100.72	13047.32	13042.11	12999.19	13099.84	13166.04
수계산(+WP)	13200	13084.9	13053.89	13050.98	13014.53	13086.33	13142.41

[그림 11] 중간부하(5MW)시 결과 그래프



	s/s	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간
연계전	13208	12874.49	12789.19	12781.43	12694.74	12682.23	12682.02
연계후(+WP)	13204.04	12945.35	12832.94	12862.49	12775.9	12835.45	13001.17
수계산(+WP)	13200	12922.12	12846.51	12839.33	12746.02	12862.38	12954.13

[그림 12] 과부하(10MW)시 결과 그래프

4. 결론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 실계통인 김녕 D/L을 모의하였으며 DFIG를 모델링하였다. 배전계통에 풍력발전의 연계 용량이 점차 증가할수록 경부하(1.5MW)시 선로말단의 과전압현상이 발생할 수 있음을 이론적인 수계산 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고문헌

[1] 노대석 외 3, “PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력발전기(DFIG) 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집, 제12권 1호, pp. 12~16, 2011.

[2] 전진택 외 3. “PSCAD/EMTDC에 의한 풍제주도 김녕 D/L의 풍력발전기의 연계특성해석에 관한 연구”, 대한전기학회 전력기술부문회 추계 학술대회논문집, pp. 47~49, 2011.