

풍력발전단지가 도입되는 한전 실배전계통의 전압변동에 대한 분석

황진수\*, 정원재\*, 강성수\*, 김병숙\*\*, 강홍식\*\*, 김재언\*  
 \*충북대학교 전기공학과, \*\*한국전력공사

A Study on Voltage Variation in KEPCO Distribution System  
 by Introducing the Wind Power Plant

J.S. Hwang\*, W.J. Jung\*, S.S. Kang\*, B.S. Kim\*\*, H.S. Kang\*\*, J.E. Kim\*  
 \*Chungbuk National University, \*\*KEPCO

**Abstract** - Recently, a study on operation in parallel between Distributed Generation(DG) unit and power distribution system has been growing interest in power distribution system. But, introducing the DG unit causes the problem due to rising the voltage variation on power distribution system. So, This paper presents the effect of introducing DG unit on distribution system. For this simulation, KEPCO distribution system is used.

1. 서 론

최근에 기존의 배전계통에 있어서 태양광발전, 연료전지, 풍력발전단지와 같은 분산전원의 도입에 대한 연구가 적극적으로 검토되고 있다. 그러나, 이들이 기존 계통에 도입되어 원활한 운전이 이루어지기 위해서는 분산전원의 도입에 따른 계통의 전압변동에 대한 분석이 선행적으로 검토되어야 한다.

현재, 국내의 배전계통에 있어서 선로의 전압을 조정하기 위한 방법으로는 LDC 운전방법과 고정탭을 사용한 수동조작법이 널리 사용되고 있다. 만약, 수동조작을 사용하는 배전계통에 분산전원이 도입된다면, 계통의 전압이 전반적으로 상승하게 되어 일부 구간이 전압의 허용범위를 벗어나는 문제가 발생될 가능성이 있다. 특히, 대용량의 분산전원이 도입된다면 이러한 현상은 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 그러므로, 분산전원이 도입되기 전에 변전소의 운전상태 및 추상변압기의 탭설정을 고려하여 분산전원의 도입이 계통의 전압변동에 미치는 영향을 선행적으로 검토하여 분산전원의 도입후에 계통 전압이 허용범위를 초과하지 않도록 하여야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 풍력발전단지가 도입될 예정인 한전계통 포항지구 상정변전소에 대하여 실제의 변전소 운전조건 및 계통 데이터를 사용하여 모델링을 하였으며, 풍력발전단지 도입 후 계통의 전반적인 전압을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석 및 검토하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전단지가 도입된 계통의 조류해석(1,2,3)

그림 1은 일반적인 배전계통에서 각 노드에 분산전원이 도입된 형태를 나타내고 있다.

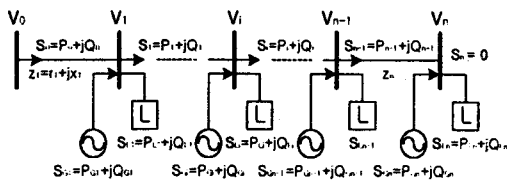


그림 1 분산전원이 도입된 계통의 단선도

그림 1과 같은 단선도에서 노드 i와 노드 i+1사이의 조류관계식을 살펴보면 식 (1), (2)와 같다.

$$S_{i+1} = S_i - S_{loss,i+1} + S_{G,i+1} - S_{L,i+1} \quad (1)$$

$$= S_i - Z_{i+1} \frac{|S_i|^2}{V_i^2} - S_{L,i+1} + S_{G,i+1}$$

$$V_{i+1} = V - Z_{i+1} I_i = V_i - (r_{i+1} + jx_{i+1}) \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (2)$$

식 (1)로부터 전력을 유효전력과 무효전력으로 나누어 전개하면 식 (3), (4)와 같다.

$$P_{i+1} = P_i - r_{i+1} \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - P_{L,i+1} + P_{G,i+1} \quad (3)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_{i+1} \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} - Q_{L,i+1} + Q_{G,i+1} \quad (4)$$

또한, 식 (2)에서 전압값을 스칼라량으로 표현하기 위하여 양변에  $V_{i+1}$ 를 곱해주면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2) \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (5)$$

여기서,

- $P_i, Q_i$  : 노드 i에서 브랜치 i+1에 공급되는 전력
- $V_i$  : 노드 i에서의 전압
- $Z_i$  : 브랜치 i에서의 선로임피던스( $r_i + jX_i$ )
- $P_{Li}, Q_{Li}$  : 노드 i에서의 부하
- $P_{Gi}, Q_{Gi}$  : 노드 i에서 공급되는 분산전원의 출력

또한, 식 (3)-(5)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

변전소 인출부 전압 : 임의의 값으로 지정. (6)

계통의 선로말단 :  $P_n, Q_n = 0$  (7)

결국, 그림 1에서 전력조류방정식은 3n개의 branch equation과 3개의 경계조건으로 나타낼 수 있다. 이와 같은 전력조류 방정식을 DistFlow equation이라고 하며, 이에 의해서 분산전원이 도입된 계통의 각 노드에 대한 전압 및 전력을 구하는 것이 가능하게 된다.

2.2 계통 모델링

본 연구에서는 풍력발전단지가 도입될 예정으로 있는 포항지구 상정변전소 실계통에 대하여 다년간 평균 부하량 데이터와 실제적으로 운용되고 있는 계통 운전조건을 적용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.

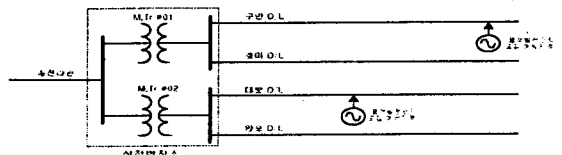


그림 2 상정변전소 계통도

상정변전소는 2개의 주변압기를 가지고 있으며 각각의 주변압기에 2회선의 피더가 연결되어 있다. 주변압기 용량은 3상 45(MVA)이며 임피던스는 14.54(%)이다. 본 계통에서 풍력발전단지는 구만선로의 말단과 대보선로의 중간에 도입될 예정이다. 표 1은 계통의 세부데이터를 나타내며, 표 2는 풍력발전단지의 운전조건에 대해서 나타낸다.

표 1 상정변전소 계통 데이터

구분	부하종류	부하크기 (kW)	송출전압 (kV)	선로길이 (km)
M.Tr #01	구만 D/L	중부하	4,400	25.4
		경부하	2,200	
	호미 D/L	중부하	8,200	9.6
		경부하	4,100	
M.Tr #02	대보 D/L	중부하	7,600	26.2
		경부하	3,800	
	양포 D/L	중부하	9,500	24.7
		경부하	4,750	

표 2 풍력발전단지 운전조건

구분	상태
정격출력	660 [kW]
역률	0.9(지상)
운전형태	정출력 운전

또한, 계통의 각 구간에 설치되어 있는 주상변압기의 변압비는 선로의 전압강하가 5%이하 지역에 대해서는 13,200[V]/230[V](5% Tap)의 변압비를 사용하며, 5% 초과지역에 대해서는 12,600[V]/230[V](10% Tap)의 변압비를 사용한다.

### 2.3 계통해석 및 평가

제시된 계통의 전압과형을 측정하기 위하여 본 연구에서는 계통해석 프로그램(Power Tools)과 시뮬레이션 프로그램(Matlab)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2.3.1 전압의 허용범위 설정

국내의 저압수용가에 대한 전압허용범위는 207~233[V]이다. 하지만, 주상변압기로부터 수용가에 이르기까지 주상변압기, 저압선 및 인입선에서 전압강하가 발생한다.

표 3 전압강하 요인 및 전압강하율

전압강하 요인	전압강하율	
	중부하	경부하
주상변압기	4.6[V] (2%)	2.3[V] (1%)
저압선	9.2[V] (4%)	4.6[V] (2%)
인입선	4.6[V] (2%)	2.3[V] (1%)

그러므로, 주상변압기 2차측 전압허용범위는 다음 식을 통하여 구할 수 있다.

- 최소전압  $\geq 207V +$  전압강하(주상변압기, 인입선)
- 최대전압  $\leq 233V +$  전압강하(주상변압기, 저압선, 인입선)

위의 관계를 통하여 얻어진 중부하 및 경부하에 대한 주상변압기 2차 전압 허용범위를 표 4에 나타내었으며, 주상변압기 탭비에 따른 1차전압의 허용범위를 표 5에 나타내었다.

표 4 주상변압기 2차 전압 허용범위

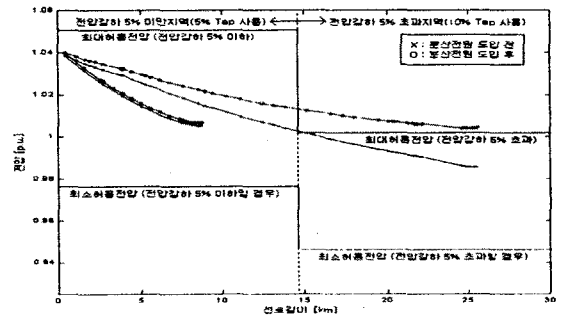
구분	중부하	경부하
최소전압	225.4[V]	216.2[V]
최대전압	242.2[V]	237.6[V]

표 5 주상변압기 1차 전압 허용범위

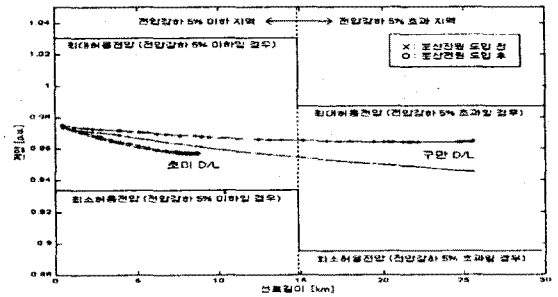
구분	중부하		경부하	
	최소전압	5% Tap 22,406[V]	10% Tap 21,387[V]	5% Tap 21,491[V]
최대전압	5% Tap 24,076[V]	10% Tap 22,982[V]	5% Tap 23,618[V]	10% Tap 22,545[V]

#### 2.3.2 시뮬레이션 및 평가

그림 3은 첫 번째 주변압기에 연결되어 있는 구만선로와 호미선로의 전압곡선을 나타내고 있다. 계통의 허용전압은 표 5에 의해서 나타내었으며, 전압강하 5% 초과지역은 실제 계통에서 10% Tap 변압기를 사용하는 곳을 나타낸다. 중부하에 대하여 10% Tap 변압기를 사용하는 시작점에서의 전압을 살펴보면, 풍력발전단지가 도입되기 전에는 약간의 과전압을 나타내지만, 도입된 후에는 허용한계전압(22,982V)보다 245[V]정도 초과한 것을 볼 수 있다.



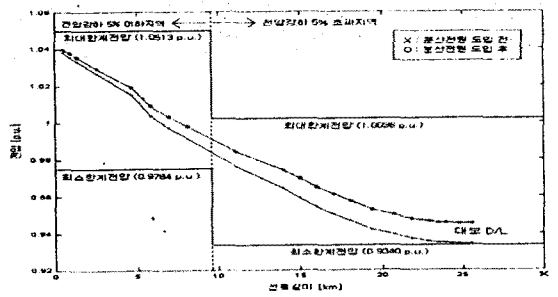
a) 중부하



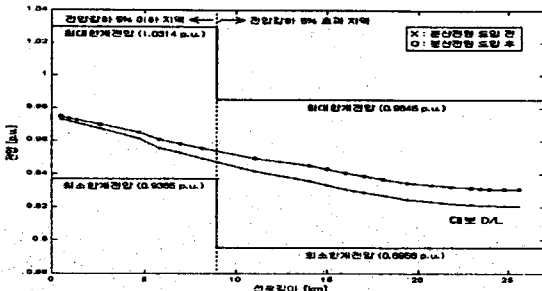
b) 경부하

그림 3 중·경부하에 대한 구만·호미선로 전압곡선

그림 4는 두 번째 주변압기에 연결되어 있는 대보선로의 전압곡선을 나타내고 있다. 중부하시에 풍력발전단지가 도입되기 전에는 선로말단의 전압(21,400V)이 최소허용전압(21,387V)에 근접하였으나, 풍력발전단지가 도입됨에 따라서 선로말단의 전압(21,648V)이 상승하여 안정적인 운전형태를 보여주고 있다.



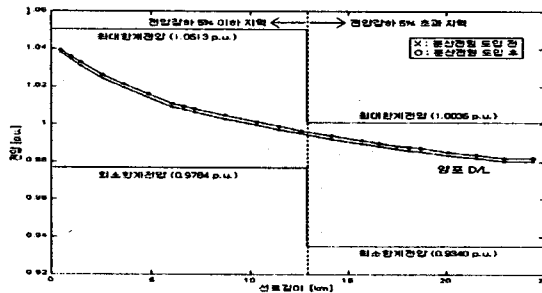
a) 중부하



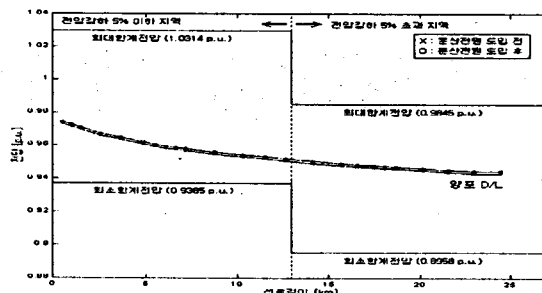
b) 경부하

그림 4 중·경부하에 대한 대보선로 전압곡선

그림 5는 두 번째 변압기에 연결되어 있는 양포선로의 전압곡선을 나타내고 있다. 풍력발전단지가 도입되지 않은 선로는 도입된 선로와 비교하여 전압변동에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.



a) 중부하



b) 경부하

그림 5 중·경부하에 대한 양포선로 전압곡선

풍력발전단지가 계통에 도입되었을 경우 선로의 전압이 전반적으로 증가함으로써, 계통의 일부구간이 최대 허용전압 범위를 초과하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 풍력발전단지의 도입에 따른 선로의 전압증가율과 전압강하율을 표 6, 7에 나타내었다.

표 6 풍력발전단지의 도입에 따른 선로의 전압증가율

선로	구분		인출구	선로말단
	중부하	경부하		
구만 D/L	중부하	30V(0.126%)	434V(1.89%)	
	경부하	28V(0.125%)	436V(1.97%)	
호미 D/L	중부하	30V(0.125%)	31V(0.134%)	
	경부하	28V(0.125%)	28V(0.128%)	
대보 D/L	중부하	37V(0.155%)	248V(1.15%)	
	경부하	31V(0.139%)	231V(1.08%)	
양포 D/L	중부하	37V(0.155%)	39V(0.173%)	
	경부하	31V(0.139%)	33V(0.153%)	

표 7 각 선로의 인출구, 말단전압 및 전압강하율

선로	구분	부하형태	분산전원 도입유무	인출구	선로말단	선로의 전압강하 (%)
				전압 (V)	전압 (V)	
구만 D/L	중부하		도입 전	23,800	22,566	5.19
			도입 후	23,830	23,000	3.48
	경부하	도입 전	22,300	21,656	2.89	
		도입 후	22,328	22,092	1.06	
호미 D/L	중부하		도입 전	23,800	23,023	3.26
			도입 후	23,830	23,054	3.26
	경부하	도입 전	22,300	21,892	1.83	
		도입 후	22,328	21,920	1.83	
대보 D/L	중부하		도입 전	23,800	21,400	10.09
			도입 후	23,837	21,648	9.04
	경부하	도입 전	22,300	21,085	5.45	
		도입 후	22,331	21,316	4.55	
양포 D/L	중부하		도입 전	23,800	22,446	5.69
			도입 후	23,837	22,485	5.67
	경부하	도입 전	22,300	21,596	3.16	
		도입 후	22,331	21,629	3.15	

풍력발전단지가 도입되기 전·후에 대하여 선로말단의 전압변동을 비교하면, 풍력발전단지가 도입된 선로에서는 1.0~2.0% 정도의 큰 폭의 전압증가율을 나타내는 반면에 도입되지 않은 선로에서는 0.5% 이하의 전압증가율을 나타낸다. 이는 풍력발전단지의 도입이 선로의 전압변동에 큰 영향을 주는 것임을 알 수 있으며, 또한 타 선로에는 영향이 거의 없음을 나타내고 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 DistFlow Method를 이용하여 분산전원의 도입될 경우에 대한 조류해석 방법을 제안하였다. 또한, 풍력발전단지가 도입될 예정으로 있는 포항지구 상정변전소 실패통에 이를 적용하여 계통의 전반적인 전압변동에 대하여 시뮬레이션을 하였고 이에 대한 결과를 분석하였다. 풍력발전단지의 도입에 따라서 계통의 전압은 전반적으로 상승하게 되며, 일부 구간은 한계전압을 벗어날 우려가 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며, 분산전원의 도입에 따라서 주상변압기의 탭조정이 선행되어야 한다는 결론을 도출하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] M.E. Baran, F.F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [2] 광도일, 김태웅, 김재연, "DistFlow Method를 이용한 삼상조류해석 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A권, 2000년.
- [3] 광도일, 김재연, "배전계통에서의 새로운 DistFlow Method에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제 49권 7호, pp 365-368, 2000년.