

풍력 발전기의 조류해석 모델의 적용

김영곤
군산대학교

송화창
서울산업대학교

Application of Wind Turbine Models for Power Flow Analysis

Young-Gon Kim
Kunsan National University

Hwachang Song
Seoul Nat'l Univ. of Technology

Abstract: As a result of environmental concerns, the production of electricity through renewable energy resources is rapidly increasing. Wind energy is among the fastest growing renewable energy resources now being integrated in the power system, and the penetration rate of wind generation has been gradually increased. For power flow analysis of the recent systems, thus, steady-state modeling of wind turbines and their application are of great importance. This paper presents the procedure we applied for implementation of a steady-state wind turbine model in power flow.

그림1에서 P는 U(풍속)로부터 풍력발전기에 의해 발생하는 유효전력 ($P=f(u)$)이며 V는 전압, Ir은 회전자에 흐르는 전류이다. Xr은 회전자누설리액턴스 Xs는 고정자누설리액턴스이고 Rr은 회전자저항, Rs는 고정자저항, Xc는 커패시터뱅크, Xm은 여자리액턴스이다. PQ기법을 적용시켜 전력조류계산 하는 절차는 다음과 같이 4단계로 나눌 수 있으며 PQ기법에 대한 알고리즘은 그림2와 같다.

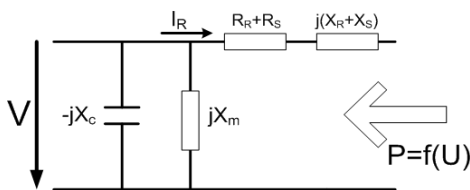
1. 서 론

최근 연일 폭등하고 있는 고유가로 인한 문제와 화석연료의 환경파괴문제에 의하여 신재생 에너지원의 공급확대에 대한 사회적 관심이 증가하고 있다. 특히 우리나라는 자원수입 의존도가 높고 온실가스 배출량이 세계 10위권이며 기후변화 협약(Kyoto Protocol)에 가입에 의하여 점진적으로 온실가스 발생량을 감축해야 하는 의무를 가지고 있다. 이러한 환경에서, 관련 사업의 활성화를 위해 신재생 에너지원의 계통 적용 시 발생될 수 있는 여러 가지 운용 및 계획 단계에서의 문제들에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

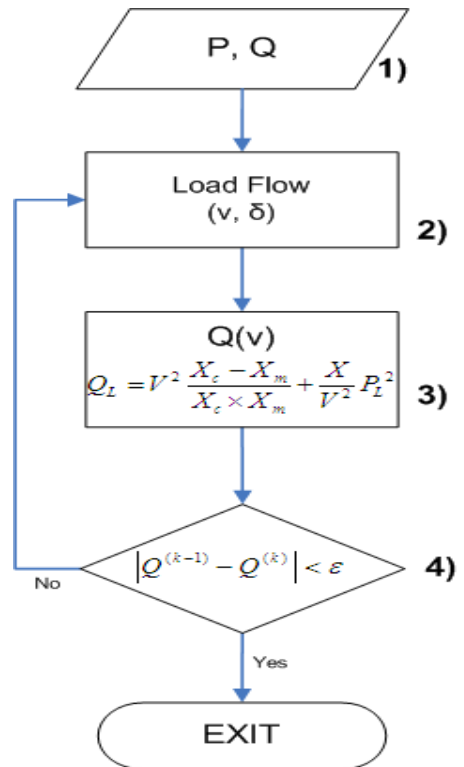
청정 대체에너지로서의 전기에너지원의 한 부분을 담당하고 있는 풍력에너지는 경제성 및 자원의 효율적 이용, 수용가의 공급안정성과 확보라는 측면에서 바라볼 때 단독운전보다 송전계통에 연계하여 운전해야 할 필요가 있다 [1]. 풍력 발전기의 신뢰성 있는 계통 연계운전을 위해 전력품질, 보호협조, 안전성을 고려한 penetration 한계 결정 및 안정성 등의 기술적 과제에 연구가 필수적으로 수행되어야 한다. 전력조류계산은 계통 적절한 운전, 미래 전력설비 확충계획, 상정고장 해석 등에 대한 문제에 적용될 수 있으며, 계통의 각 모선에서의 전압 및 유효 및 무효 전력 조류 상태를 수학적 방법에 의해 분석하는 방법이다. 본 논문에서는 풍력발전기를 포함하는 계통에 대한 해석을 위하여 PQ 기법 [2]을 기존에 개발된 전력조류계산 모듈에 적용하였다. PQ 기법은 풍력 발전기모선을 PV 모선이 아닌 PQ 모선으로 취급하여 조류계산 결과로부터 모선 전압, 무효전력 출력을 반복적으로 계산하는 방법이다.

2. 풍력발전기의 조류계산 모델

본 논문은 기존계통에 풍력발전기를 연계했을 때 전력조류계산을 수행할 수 있는 방법으로 PQ기법을 적용시켰다. 기존 전력계통에 포함되는 풍력발전기는 동형유도발전기로 그림 1과 같다.[2]



<그림 1> PQ기법의 알고리즘



<그림 2> PQ기법의 알고리즘

1단계-풍력발전기 모선을 PQ모선으로 지정하고 주어진 풍력발전기 파라미터로 풍력발전기로부터 발생하는 유효전력(P_L)을 구한다. 풍력발전기에서 소비되는 무효전력(Q_L)을 구한다. 일반적으로 풍력발전기로부터 발생하는 에너지는 베츠(Betz)의 법칙에 의해 식(1)과 같이 구해진다.

$$P_L = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U^3 \times C_p \tag{1}$$

여기서 ρ : 공기밀도 [kg/m^3], A: 블레이드면적 [m^2],

U: 풍속 [ms^{-1}], C_p : 전력계수이다.

풍력발전기에 의해 소비되는 무효전력은 Boucherot의 이론에 다음과 같이 표현된다.

$$Q_L = V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c \times X_m} + X \frac{V_2 + 2RP}{2(R^2 + X^2)} - X \frac{\sqrt{(V^2 + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X^2)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (2)$$

위 (2)번식은 맥라우린의 급수에 의해 식(3)과 같이 간결하게 근사화될 수 있다.[2]

$$Q_L = V^2 \frac{X_c - X_m}{X_c \times X_m} + \frac{X}{V^2} P_L^2 \quad (3)$$

바람에 의해 풍력발전기에서 나오는 P를 (1)식을 이용 계산하고 계산되어진 P와 식(3)을 이용 $Q^{(k-1)}$ 값을 구한다. 이때 $Q^{(k-1)}$ 값에 사용되는 V 값을 적절한 값으로 초기화시켜 계산한다.

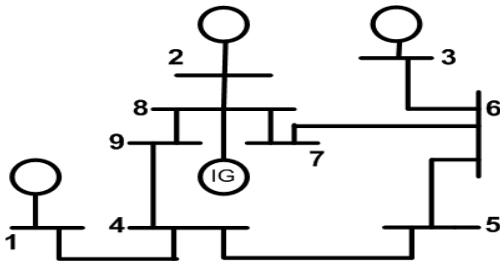
2단계 -1) 단계에서 구해진 초기화된 P와 Q 값을 발전모선(PV)이 아닌 부하모선(PQ)으로 가정하고 Load Flow를 수행한 후 풍력발전기가 포함된 모선의 전압크기(Vm)와 전압위상(δ)를 계산한다.

3단계 -2) 단계에서 얻은 전압크기(Vm)로 $Q^{(k)}$ 를 재계산한다.

4단계 -1) 단계에서 얻어진 $Q^{(k-1)}$ 와 3) 단계에서 계산되어진 $Q^{(k)}$ 를 비교하여 수렴조건 ($|Q^{(k-1)} - Q^{(k)}| < \xi$)에 만족하면 모든 계산을 종료하고 수렴조건을 만족하지 못하면 2) 단계로 가서 반복계산을 수행한다.

3. 사례연구

풍력발전기를 포함하는 전력계통에 대한 해석을 위해 풍력발전기의 PQ모델을 N-R법 기반의 전력조류계산에 적용하였다. 본 사례연구에서는 그림 3에서 나타내고 있는 3 발전기 9 모선 시험계통[3]을 이용하였다. 표 1은 9 모선 계통의 모선데이터를 나타내고 있으며, 표 2는 선로 데이터를 보여주고 있다. 표 3은 본 연구에서 적용한 발전기 데이터를 나타내고 있으며, 모델 파라미터는 시뮬레이션을 위해 임의로 주어진 데이터이다.



<그림 3> 9모선 계통도

<표 1> 9모선 계통 모선 데이터

Bus	V	$P_{G,pu}$	$P_{L,pu}$	$Q_{L,pu}$	Type
1	1.04	0	0	0	Slack
2	1.025	1.63	0	0	PV
3	1.025	0.85	0	0	PV
4	1.0	0	0	0	PQ
5	1.0	0	1.89	0.63	PQ
6	1.0	0	0	0	PQ
7	1.0	0	2.1	0.735	PQ
8	1.0	0	0.5	0.35	PQ
9	1.0	0	2.625	1.05	PQ

<표 2> 9모선 계통 선로 데이터

From	To	R	X	B
1	4	0	0.0576	0
4	5	0.017	0.092	0.158
5	6	0.039	0.17	0.358
3	6	0	0.0586	0
6	7	0.0119	0.1009	0.209

7	8	0.0085	0.072	0.149
8	2	0	0.0625	0
8	9	0.032	0.161	0.306
9	4	0.01	0.085	0.176

<표 3> 풍력발전기 데이터

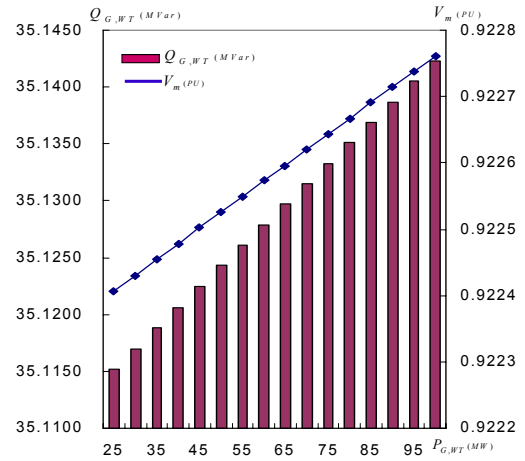
r_s	X_s	X_m	r_r	X_r	X_c
0.0574	0.0769	2.9061	0.0238	0.0709	0.0240

위의 조건대로 PQ기법을 적용시켜 시뮬레이션을 한 결과 표4의 결과를 얻을 수 있었다. 무효전력은 유효전력과 모선전압의 크기로 결정이 되는데 유효전력은 첫 번째 반복계산에서 계산되어진후 변화하지 않는 상수로 추정되기 때문에 오로지 변수로서 모선전압만이 남게 되어 풍력발전기가 포함된 모선은 기존의 PQ모선으로서 동작하게 된다는 것을 확인 할 수 있었다.

<표 4> 시뮬레이션 결과

반복횟수	모선번호	$V_{M,pu}$	$Q_{L,pu}$
1	8	1.0	-3.28177
2	8	0.925205	0.353291
3	8	0.925525	0.351243
4	8	0.925525	0.351243

그림3은 풍력발전기의 유효발전량($P_{G,WT}$)을 25MW에서 100MW까지 매 단계 5MW씩 증가시켰을 때 Vm값과 풍력발전기의 무효발전량($Q_{G,WT}$)도 아주 작게 증가 변화하고 있음을 보여준다.



<그림 4> 풍력발전량 증가시 Vm과 QG,WT의 변화

4. 결론

기존전력계통에 풍력발전기를 연계했을 때 풍력발전기를 포함하는 모선을 PV모선이 아닌 PQ모선으로 설정을 한 후 전력조류계산을 반복 수행함으로써 풍력발전기의 무효전력 출력 및 모선 전압을 결정하는 PQ기법을 기존의 전력조류계산 모델에 적용하였다. 추후 본 결과를 바탕으로 하여 송전계통 해석을 위한 풍력발전단지 모델에 대한 연구를 진행할 계획이다.

[참고 문헌]

- [1] 김용삼, “대체에너지전원의 배전계통 연계운전 기술”, 월간 전기설비지, 2002년 11월호, pp53-57, 2002
- [2] Andres E. Feijoo and Jose Cidras, “Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis”, IEEE Transactions on power systems, Vol. 15, pp. 110-115, 2000
- [3] Kiran Nadigam, Badrul H. Chowdhury, “Power Flow and Stability Models for Induction Generators Used in Wind Turbines”, IEEE Power Engineering Society General Meeting 2004.