

연속조류계산법을 이용한 대규모 풍력 발전의 정적계통 투입량 결정 알고리즘 개발

김지훈*, 문지혜*, 이환익*, 이병준*
고려대학교*

The development for the determining large-scale steady-state wind penetration using the continuation-power flow

Jihun Kim*, Ji-hye Moon*, Hwanik Lee*, Byongjun Lee*
Korean University*

Abstract - 계통에 대규모의 풍력발전의 투입량이 증가함에 따라 실효치 기반의 해석이 필요하다. 계통 내에 무효전력 불균형에 의한 풍력 발전의 한계량을 결정하기 위하여 연속조류법을 이용한 한계량 선정 알고리즘을 수립하였다. 이를 위하여 풍력발전단지를 등가화하고, 타입에 따른 풍력발전기의 정적 모델을 수립하였다.

1. 서 론

최근 전세계적으로 화석 연료의 고갈 및, 온실가스 배출 제한으로 인하여 신재생에너지에 대한 관심이 늘어나고 있다. 이러한 신재생에너지 중에서 풍력 발전에 대한 관심이 증대되고 있다. 과거의 경우, 전력 계통에 투입되는 풍력 발전 설비의 용량이 크지 않기 때문에, 전력 계통의 안정도에 미치는 영향이 미미하였다. 하지만 최근 세계적으로 전력망에 접속되고 있는 풍력발전 설비의 용량이 급속히 증가하는 추세에 있다. 전력 시스템에 포함된 다른 요소들과 마찬가지로 전력망에 연계된 풍력발전 단지 및 해당 설비들은 전력 시스템 신뢰도 (Power System Reliability)의 심각한 저하를 야기하지 않아야 풍력발전의 지속적인 계통 투입이 가능하다. 풍력 발전기는 타입에 따라 무효전력 특성이 상이하기 때문에 기존 발전기와는 다른 기준에서 전압안정도 해석을 수행하여야 한다. 대규모 풍력발전원의 도입으로 생긴 무효전력 불균형은 계통 전체의 전압 붕괴를 일으킬 수 있다. 그러므로 풍력발전원의 계통 투입량을 설정하기 위해 전압 안정도에 기반한 해석을 하여야 한다. 전압안정도 해석을 통하여 풍력발전 단지의 출력제한 값 (Pmax)이 주어지면 전체 발전기에 대한 출력감소량이 분배되어야 하며, 이를 위해 풍력발전 단지의 효율적인 운영측면에서 결정되어야 한다. 본 논문은 연속조류계산 방법을 이용하여 계통에 투입되는 풍력발전량이 점차 증가함에 따라 풍력발전 단지의 출력제한 값을 자동으로 해석하는 알고리즘을 개발하는 데 있다.

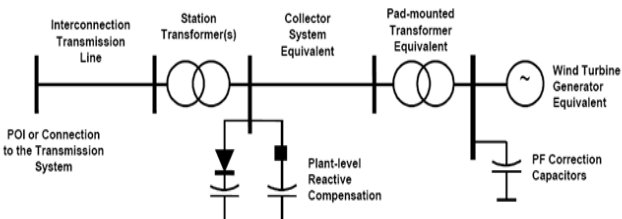
2. 본 론

2.1 실효치 기반의 풍력 발전 해석

기존의 풍력 발전에 대한 해석은 계통에 투입되는 용량이 매우 작아 순시치를 기반으로 한 해석이 주로 수행되었다. 하지만 계통에 투입되는 풍력 발전의 용량이 증가하면서 실효치 기반의 계통 해석이 수반되어야 한다. 미국의 WECC는 신재생에너지원의 계통 투입량 증대에 따른 실효치 기반의 계통 해석의 중요성을 강조하고 있다. 이는 정적 및 동적 모델을 모두 포함하고 있다. 본 논문에서는 풍력 발전원의 계통 투입 증가에 따른 무효 전력 불균형에 의한 전압 안정도 해석을 위하여 정적 해석 모델링을 수행하였다.

2.1.1 풍력 발전단지 등가화

상용되는 풍력 발전기는 타입에 따라 다르지만 보통 그 용량이 단일기에 1~3MW정도 이다. 일반적으로 계통에 접속되는 풍력 발전 단지는 이러한 단일 풍력 발전기가 수~수 십 개 이상이 접속되어 있다. 실효치 기반의 해석에서는 이러한 단일 풍력기를 개별적으로 모델링 하는 것이 아니라 집합된 형태(aggregated model)로 표현한다.



〈그림 1〉 풍력발전단지의 등가화

〈그림 1〉은 풍력 발전단지의 집합된 형태로 등가화된 모델이다. 풍력 발전 단지에 투입되어 있는 수 많은 풍력 발전기와 개별 발전기와 연결되어 있는 승압 변압기를 하나의 발전기와 변압기로 등가화한다. 풍력발전기의 타입에 따라 역률 보상용 캐패시터가 투입된다. 이러한 발전기는 연계 송전 라인(Interconnection Transmission Line)을 통해 계통과의 접속점(POI, Point of Interconnection)을 이룬다. 풍력 발전단지가 계통에 접속되기 위해서는 무효전력&전압 제어 능력을 갖추기 위해 단지급의 무효전력 보상장치가 투입된다.

2.1.2 풍력 발전기 타입에 따른 풍력발전기 모델링

계통에 투입되는 풍력 발전기는 일반적으로 네 가지 타입으로 분류된다. 개별 타입에 따라 다양한 동적 특성을 가지고 있다. 하지만 본 논문에서는 정적 기반의 모델링을 하기 때문에 양적인 특성만을 분석한다. 풍력발전기는 타입에 따라 무효전력 특성이 달라지기 때문에, 무효전력 특성을 반영하여 모델링한다. 타입 1,2는 유도발전기를 사용하기 때문에 계통으로부터 무효전력을 소모하는 특성을 가지고 있다. 운전하는 역률 조건에서 고정되게 무효전력을 소모하게 모델링한다. 발전기 모션을 PQ 모션으로 변경하여 조류계산된다. 예를 들어 역률이 0.95 저역자로 주어진다면 무효전력 특성은 다음과 같이 설계된다.

$$Q_{\min} = Q_{\max} = Q_g = P_{\text{rated}} \tan(\cos^{-1}(PF)) = -1/2P_{\text{rated}} \quad (1)$$

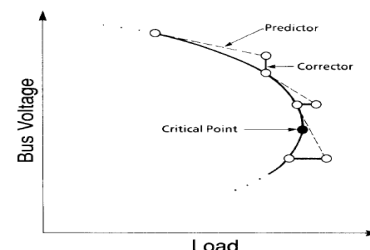
타입 3,4는 발전기 특성에 의해 무효전력 제어 능력을 가지고 있다. 운전되는 역률 범위 내에서 무효전력 범위가 지정된다. 무효전력 특성은 다음과 같이 설계된다.

$$Q_{\min} = P_g \tan(\cos^{-1}(+PF))$$

$$Q_{\max} = P_g \tan(\cos^{-1}(-PF)) \quad (2)$$

2.2 연속 조류계산법을 이용한 풍력발전의 한계량 계산 알고리즘

본 논문에서는 계통 전체의 발전량이 일정한 상태에서, 풍력발전량이 증가하고 기존 발전량이 점차적으로 감소할 때, 계통이 붕괴하는 지점까지의 풍력 발전량을 계통에 투입되는 풍력 한계량으로 설정하였다. 이러한 알고리즘을 적용하기 위해서 연속 조류 계산법을 도입하였다. 연속 조류 계산법은 조류 계산을 해석하는 데 있어, 어떤 특정한 파라미터를 변화시켰을 때 해를 찾기 위해 연속법을 적용한 알고리즘이다. 연속법은 어떠한 평형점(Equilibrium point)을 찾을 때, 그 값을 직접적으로 찾는 것이 아니라 예측과정(Predictor)과 수정과정을 거쳐서 찾아내는 방식을 의미한다. 여러 가지 변수에 대하여, 현재 위치에서서의 기울기를 찾아낸 후, 주어진 Step size 만큼 이동시켜 예측점을 찾아내고, 예측점으로 올 때, 값이 가장 많이 변화한 변수를 고정시키고 정확한 해를 찾는 방식이다.



〈그림 2〉 연속 조류법의 predictor-corrector 개념도

예측과정은 현재의 해에서 노즈 곡선을 따른 접선 벡터 (normal vector)를 먼저 결정하여야 한다. 접선벡터의 결정에 대하여 설명하기 위한 다음 식을 부하 증가 파라미터(λ)를 포함하도록 재구성한 조류방정식을 간단하게 표현한 것이라고 한다.

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (3)$$

여기서 x 는 상태변수를 모두 포함하고 있는 벡터이다. 그럼 접선벡터는 다음 식을 풀어 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \\ e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 f_x, f_λ 는 $f(x, \lambda)$ 의 각각 x 및 λ 에 대한 자코비안 성분을 의미하고, e_k 는 행벡터이며 하나의 성분만이 1이며 그 외의 성분은 0이다. 우측항에서 양(+)과 음(-)은 e_k 로 선택되는 연속 파라미터의 부호를 따라 선택한다. 수식 (3)은 국부 파라미터화 과정에 의한 예측과정을 나타내고 있다. 접선벡터 정보를 이용하여 예측과정은 다음 스텝의 해를 수식 (5)로 예측한다.

$$\begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o \\ \lambda_o \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $[x^* \lambda^*]$ 와 $[x_o \lambda_o]$ 는 각각 다음 스텝의 해에 대한 예측 벡터와 현재 스텝의 해를 나타내며, σ 는 스텝길이를 의미한다. 수정과정은 $[x^* \lambda^*]$ 로부터 다음 스텝의 해를 구하는 과정으로 다음과 같은 뉴턴-랩슨 과정을 따라 해를 구한다.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \\ e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(\cdot) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $[\Delta x \Delta \lambda]^T$ 는 수정벡터이다. 이때 선택된 연속 파라미터는 수정과정 중 일정하게 유지되며, 일반적인 자코비안에 해당하는 f_x 가 수치적으로 ill-condition 상태이더라도 f_λ 와 e_k 에 의하여 수치적인 어려움을 극복할 수 있게 된다.

이러한 연속조류법에 의하여 계통 붕괴점에서의 해를 구할 수 있기 때문에, 풍력발전력의 한계 투입량을 쉽게 구할 수 있다. 또한, 전압 불안정점에서의 감도 정보를 얻을 수 있다. 감도 정보는 연속 알고리즘에서 예측과정(Predictor)과 수정과정(Corrector) 중 예측과정에서 해당 조류단면에서의 접선벡터(tangent vector)를 계산하게 된다. 이러한 접선벡터는 전압, 위상각, 부하증가 파라미터의 미소 변화량($dV, d\delta, d\lambda$)으로 구성되며, 여기서 부하 증가 파라미터인 λ 의 변화에 따른 계통 응답의 민감성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 즉, λ 의 미분변화에 대한 스칼라 함수 $h(x, \lambda)$ 의 미분변화를 나타내는 수식을 유도한다. 여기서 $h(x, \lambda)$ 는 모션 전압, 송전선로의 무효전력 손실, 발전기 무효전력 출력과 같은 계통의 특정한 운영제약이다. 감도 정보(Sensitivity Information)는 아래의 Chain Rule과 같은 수식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\frac{dh}{d\lambda} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{d\lambda} + \frac{\partial h}{\partial \lambda} \quad (7)$$

위와 같은 Chain Rule을 이용하여 전력 조류 방정식내에서 다음과 같이 감도 정보를 전개할 수 있다.

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial F}{\partial V} dV + \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dx}{d\lambda} = - \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial \lambda} \quad (9)$$

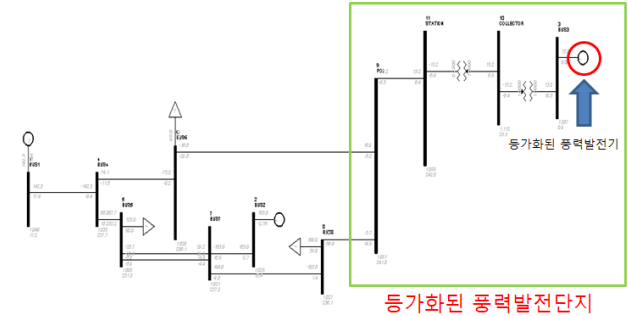
위에서 계산된 감도 정보를 계통에 투입되는 풍력 발전량을 증가시키기 위한 조상 설비 투입을 위한 정보로 사용한다. 계통 내의 무효 전력 문제 때문에 최대 풍력발전량이 제한된다. 그러므로 적절한 위치에 무효 전력 보상을 해주어야 한다. 연속 조류 계산에서 계산한 감도 정보는 파라미터 λ 증가에 따른 감도가 민감한 모션 정보를 부여 한다. 부여한 파라미터 λ 가 풍력 발전의 발전량 증대이기 때문에, 이 시나리오에서 계산된 감도 정보는 풍력 발전 증가에 따라 민감한 모션 정보이다. 그러므로 다른 지역보다 민감도가 높은 모션에 대해서 무효 전력 조상 설비

를 투입하는 것이 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

2.3 사례 연구

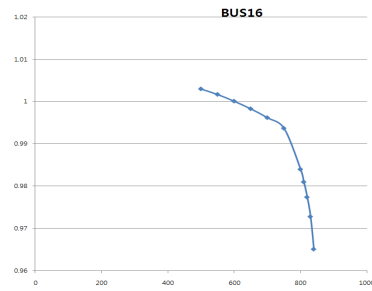
2.3.1 Test 계통

본 논문에서 수행한 알고리즘을 적용하기 위하여 다음과 같은 계통을 구성하였다.



〈그림 3〉 풍력발전단지가 포함된 3기 11모선 계통

등가화된 풍력 발전기는 타입 2로서 무효 전력을 소모하는 특성을 지니고 있다. 연속 조류 계산법에 의한 계통 내 풍력 발전량의 한계량을 정하기 위하여 풍력 발전기의 출력량을 0부터 점차적으로 증가시켰다. 풍력 발전량이 증가하면서 나머지 발전기의 출력량을 감소시켰다. 풍력 발전단지의 투입량이 점차 증가되었을 때, 810MW에서 무효전력 제약에 의해 계통이 붕괴되는 것을 확인할 수 있다. 34번 모선의 풍력 발전기의 투입량을 점차 증가시켜갔을 때, 그 한계량은 810MW이다. 풍력발전기가 가지는 무효전력 제약에 의해, 실제로 투입되는 한계량이 위와 같다는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 풍력발전량 증가에 따른 PV 곡선

3. 결 론

세계적으로 풍력 에너지에 대한 수요가 증가함에 따라 계통 내에 투입할 수 있는 풍력 발전의 한계량을 제한하는 해석 방법의 중요성이 증가하고 있다. 본 논문은 풍력 발전기가 가지고 있는 무효전력 제약에 의한 계통 투입 한계점을 해석하는 알고리즘이다. 풍력 발전기의 타입별에 따른 무효전력 특성을 모델링하고 풍력발전단지 내의 개별 발전기를 하나의 등가 발전기로 표현하였다. 풍력발전단지의 계통 투입량이 점차 증가하고 나머지 기존 발전기의 출력량이 점차 감소하는 시나리오를 연속 조류 방법을 이용하여 해석하였다. 연속 조류 방법을 이용하여 계통 붕괴점을 찾음으로 계통 내에 투입 가능한 풍력 발전량을 상정하고, 전압 불안정점에서 계산되는 감도 정보를 이용하여 투입량을 증대하는 방법이다. 본 논문에서 개발한 방법을 NewEngland39 모선에 적용하였다. 추가적인 형태의 풍력발전기 타입을 반영하여 다양한 형태의 모의 적용이 요구된다.

[감사의 글]

본 연구는 2011년도 한국과학재단의 연구지원에 의해 수행된 연구결과입니다.

[참고 문헌]

- [1] C. W. Taylor, "Power system voltage stability", McGraw-Hill, 1994.
- [2] V. Ajjarapu, "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control", Power Electronics and Power Systems Series Springer, Springer-Verlag New York, 2006
- [3] Palsson, M.P., Toftevaag, T., "Large-scale Wind Power Integration and Voltage Stability Limits in Regional Networks", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE