

비선형내점법 기반의 풍력발전단지 최적운용 알고리즘

이승민*, 송화창*, 이장호**
 서울과학기술대*, 군산대**

Optimal Operation Algorithm for Wind Farms Based on Nonlinear Interior Point Method

Seungmin Lee*, Hwachang Song*, Jangho Lee**
 Seoul Nat'l Univ. of Science & Tech.*, Kunsan Nat'l University**

Abstract - The recent concerns over the threat of global climate change and the requirements of national reduction of CO₂ emission have led to the diversification of energy resources and a large scale integration of renewable resources. In these circumstances, the policy decision currently made by the government sector includes several programs to promote the equipment of large scale generating assets to use wind energy. However, the power systems and wind farms need such innovative operation scheme schemes that maintain an adequate level of system security for continuing growth of renewable resources. This paper presents a method for determining optimal operating points for wind farms by making use of a nonlinear interior point method.

1. 서 론

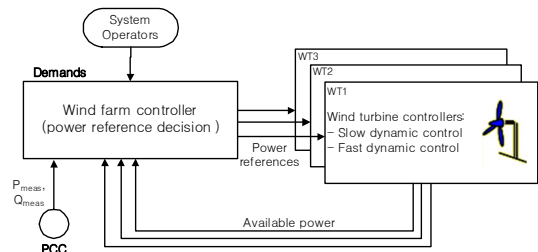
최근 세계적으로 석유, 석탄과 같은 화석연료의 고갈에 대한 위기의식으로 인해 세계 여러 나라들의 신재생에너지에 대한 관심과 연구가 늘어나고 있다. 이러한 신재생에너지 중에 전력계통에 연계하여 운전되는 발전자원으로 풍력발전이 주목받고 있으며, 이미 유럽은 전 세계 풍력발전기 보급량의 73%를 담당하고 있고, 덴마크의 경우 전체 전력 공급량의 21%를 풍력발전이 담당하고 있다. 이러한 세계 흐름에 발맞추어 우리나라도 전기 네트워크에 접속되고 있는 풍력발전 설비의 용량이 급속히 증가하는 추세에 있다. 전력 시스템에 포함된 다른 요소들과 마찬가지로 전기 네트워크에 연계된 풍력발전단지 및 해당 설비는 전력 시스템 신뢰도 (power system reliability)의 심각한 저하를 야기하지 않아야 풍력발전의 지속적인 계통 투입이 가능하다.

기존의 풍력 발전기는 일반적인 원동기 (prime mover) 기반의 동기발전기 시스템과는 달리 자연의 풍속에 의존적이므로 발전량에 대한 예측이 어렵고 발전력 분배 (generation dispatch)가 불가능하였다. 하지만 최근 풍력발전 단지에 적용되고 있는 풍력 발전기는 바람의 에너지로부터 얻을 수 있는 최대 발전 가능량과 발전 제한 능력에 따른 한계값 사이에서 그 출력을 제어할 수 있다 [1-3]. 따라서 계통 신뢰도 유지를 위해 필요한 풍력발전기의 전력망 접속규약을 만족시키기 위해 여러 풍력발전기들로 구성되어 있는 풍력발전단지에 대한 협조제어가 수행되어야 할 필요가 있다. 이러한 접속규약에는 유효/무효전력 조정, 계통의 주파수 및 전압 제어 등이 포함되어 있다.

풍력발전단지의 발전기 협조제어 문제는 최근에는 TSO, 풍력발전기 생산업체, 연구자들의 관심을 끌게 되었다. 따라서 현재까지 문헌 조사에 따르면, 아직까지 연구가 많이 발표되지 않고 있는 상황이다. 먼저 국외에서의 기술을 살펴보면 최근 스페인에서는 DD (delegated dispatches) 라는 중간 단계의 지역 운영 주체를 스페인 시스템 운영자 (TSO) 에 의하여 구성되어 한 지역의 풍력단지 (10MW 이상의 출력용량을 갖는 발전단지)들과 TSO를 중간자적 역할을 담당하게 한다. 이러한 DD의 운영 함수 중의 하나로 출력제한에 대한 유효전력 감소 분배에 대한 연구를 스페인 마드리드 대학의 Castronuovo 교수에 의해서 수행되었다 [4-5]. 이 연구에서 Castronuovo 교수는 이 문제를 비선형 최적화 문제로 구성하여 주-쌍대 내점법 기반의 해법을 제시하였다. 또한, 스페인 마드리드 대학의 Rodriguez-Amenedo 교수는 전압 제어 루프를 통한 감시 제어에 관한 연구를 수행하였으며 [6], 보다 최근에 고정속

및 가변속 풍력발전기들에 대한 협조 제어기법에 대한 연구를 진행하였다 [7]. 그리고 덴마크 Riso 랩에서 여러 가지 방안을 통한 제어 가능성이 검토되었다.

계통의 상황에 따라 유효/무효전력 제어, 전압제어 및 역률제어를 수행해야 할 필요가 있는 풍력발전단지를 효과적으로 제어하는 방법에는 여러 가지 기법들이 고려될 수 있다. 첫 번째 방법은 SCADA (supervisory control and data acquisition) 기반의 준-정상적 (quasi-steady-state) 기법이 적용될 수 있다. 이 방법은 시스템의 아주 빠른 동적 현상이 아주 빠르게 안정화된다고 가정했을 때 시스템의 변화가 점진적인 전개 (evolution)의 형태로 표현된다고 하고 이를 대수방식의 형태로 모델링하여 시스템의 중요 물리적 파라미터를 개방루프의 형태로 제어하는 방법이다. 이 방법으로 풍력발전단지의 유효/무효전력 출력을 제어하고자 할 때 결과적으로는 단지에 포함되어 있는 각 풍력발전기의 출력을 결정하는 문제를 풀어야 하며 이는 어떠한 목적함수를 갖는 최적화의 문제로 표현될 수 있다. 각 발전기의 유효/무효전력 출력이 결정되면 이를 각 발전기에 해당하는 세팅값을 지정하고 발전기 내부의 제어 루프를 통해 조정될 수 있도록 한다. 그림 1은 풍력발전단지 제어의 개념을 간략하게 설명하고 있다. 본 논문에서는 비선형 내점법을 이용하여 풍력발전단지 파라미터의 가능한 제어 범위 내에서 전력망 접속 규약 및 출력제한을 만족하도록 하는 최적 운전점을 구하는 알고리즘을 설명하고 구현된 프로그램을 적용한 결과를 설명함으로써 그 유용성을 보이고자 한다.



〈그림 1〉 풍력발전단지 제어의 개념

2. 풍력발전단지 운전점 최적화

2.1 정식

본 연구개발에서 제안하고자 하는 알고리즘은 전력 그리드의 신뢰도 유지를 위하여 전력망에 연계된 풍력발전단지의 출력의 변경이 요구될 때 이를 만족하는 최적의 운전점을 구하는 것이다. 최적화 문제를 다음과 같은 목적 및 제약을 포함하도록 구성한다.

- 풍력발전단지의 유효전력 출력의 제한할 수 있는 제약조건을 포함한다.
- 발전출력을 최대화의 목적함수를 포함하도록 한다.
- 풍력발전단지 유효/무효전력 출력에 대한 역률각을 지정된 값으로 유지되도록 하는 목적함수를 포함한다.

위 사항들을 고려하여 본 연구개발에서는 풍력발전단지 운용점 최적화 (WFOPT, Wind Farm Optimization)를 위하여 다음과 같은 최적화 정식이 적용될 수 있다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.
 (No. 2008NWD12P0200002009)

$$\begin{aligned}
& \min -\sum_i p_i P_{Gi} + \rho(\phi_{out} - \phi_{des})^2 \\
& \text{s.t. } P_{Ti}(V, \theta) + P_{Li} - P_{Gi} = 0 \\
& \quad Q_{Ti}(V, \theta) + Q_{Li} - Q_{Gi} = 0 \\
& \quad P_{inj} \leq P_{des} \\
& \quad V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\
& \quad P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\
& \quad Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\
& \quad P_{jk}^{\min} \leq P_{jk} \leq P_{jk}^{\max}
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 P 와 Q 는 각각 유효전력 및 무효전력을 의미하며, 아래첨자 G, L, T 는 각각 발전, 부하 및 주입을 나타내고 있다. 식 (1)에서의 ϕ_{out} 과 ϕ_{des} 는 각각 해당 풍력발전단지의 출력의 역률각과 유지하고자 하는 역률각을 나타내고 있다. p_i 는 i 번째 모선의 유효전력 출력에 대한 운영 이익을 나타내고 있으며, ρ 는 역률각 편차 최소화 부분에 대한 가중치를 의미한다. 제약조건에서 위 두 개의 식은 i 번째 모선에서의 유효전력과 무효전력 균형 방정식을 표현하고 있다. P_{inj} 와 P_{des} 는 각각 풍력발전단지의 유효전력 출력과 SO로부터 지정된 출력한계값을 나타낸다. V_i^{\min} 과 V_i^{\max} 는 i 번째 모선 전압의 크기 (V_i)에 대한 최소 및 최대값을 의미한다. P_{Gi}^{\min} 과 P_{Gi}^{\max} 는 i 번째 모선 풍력발전기의 유효전력 발전에 대한 최소 및 최대값을 나타내고, Q_{Gi}^{\min} 과 Q_{Gi}^{\max} 는 i 번째 모선 풍력발전기의 무효전력 발전에 대한 최소 및 최대값을 의미한다. P_{jk}^{\min} 과 P_{jk}^{\max} 는 $j-k$ 선로의 조류 (P_{jk})에 대한 최소 및 최대값에 해당한다. 식 (1)에서 유효전력 출력 제약 P_{Gi}^{\max} 는 현재 i 번째 모선에 위치한 풍력발전기가 출력 가능한 출력의 평균값을 나타낸다. 이는 해당 풍력발전기에 대하여 미리 결정된 파워 곡선 (power curve)과 측정된 바람속도에 의하여 결정된다.

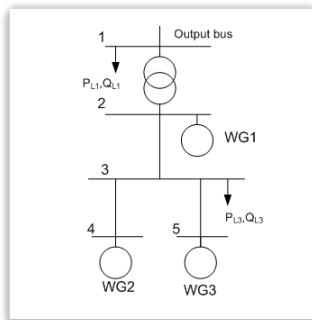
2.2 해법

앞에서 설명한 본 문제의 정식은 일반적으로 알려진 최적조류계산 문제와 본질상 크게 다르지 않으며 비선형 최적화 문제의 범주에 해당한다. 이러한 최적화 문제에 대한 최적해를 구하기 위하여 본 연구에서는 비선형 내점법 (NIPM, nonlinear interior point method)으로 기본적인 프로그램 모형을 개발하였다.

이 방법은 슬랙 변수를 도입하여 부등식 제약을 등식 제약으로 변환하고 Log barrier의 페널티 기법을 사용해서 슬랙 변수가 “음(-)” 값을 갖지 않도록 정식화 함으로써 뉴턴법에서 문제가 되었던 부등식 제약을 효율적으로 다룰 수 있으며, 해가 실행가능영역 내부에서 존재하게 되므로 각 해 단계에서 스텝 사이즈를 결정하는 데 용이하여 기존의 뉴턴법에서의 부등호 제약의 상하한에 걸리는 제약 (binding constraints)를 결정하는 단계가 필요하지 않게 된다.

3. 사례연구

다음 그림은 본 연구에서 개발한 풍력발전단지 운전점 최적화 알고리즘을 적용할 대상 시스템이다. 본 시스템은 [5]에서 DD (delegated dispatch)에서의 최적화 알고리즘을 적용한 대상 시스템이다.



〈그림 2〉 간단한 5모선 계통 시스템

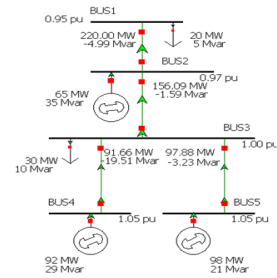
표 1은 풍력발전단지에서의 발전 및 부하를 포함한 모선 데이터를 나타내고 있다. 여기에서 풍력발전단지 내의 3기의 발전기가 모두 무효전력 공급능력이 있다고 가정한다. 본 계통에 포함되어 있는 풍력발전기는 상당히 큰 출력을 내고 있으며 이는 각

발전기가 한 지역의 풍력발전단지를 등가로 표현한 형태이다.

〈표 1〉 5모선 계통 데이터

Bus	P_{Gmax} [MW]	Avail. [%]	P_L [MW]	Q_L [MVar]	B [pu]
1	-	-	20	5	0
2	150	54	0	0	0.09
3	-	-	30	10	0
4	140	65.7	0	0	0.06
5	150	68	0	0	0.096

전체 풍력발전단지의 유효전력 출력 제한을 200 [MW]라고 가정한다. 이는 식 (1)의 풍력발전단지 최적화 문제에서 유효전력 주입 (Pinj)의 최대값을 200 [MW] (=2 [pu])로 선택하여 적용한다. 그리고 각 발전기의 운용 이익 (또는 발전 가격)이 단위 시간당 단위 출력당 10이라고 가정한다. 그리고 각 발전기의 유효전력 출력의 범위를 $0 \sim P_{Gmax} \times Avail./100$ 로 적용하였으며 각 모선의 전압의 크기는 0.95 ~ 1.05 [pu]의 범위 내에 들도록 하였다. 위와 같이 풍력발전단지 최적화 문제를 구성하고 이를 본 연구에서 개발한 NIPM 기반 최적화 알고리즘을 적용하였다. 본 문제에서 수렴성 검토를 위한 상보 갭 (complementary gap)의 수렴 허용 한계 (tolerance)는 10⁻⁴으로 선택하였고 각 모선의 유효 및 무효전력 균형을 나타내는 등호 제약의 허용 최대 mismatch는 10⁻³ [pu]를 이용하였다. 본 시뮬레이션에서는 8회 반복 후 해가 위에서 설명한 수렴 조건을 만족하였다. 그림 9는 NIPM 기반 WFOPT 알고리즘 적용 후 발전단지의 해를 다시 powerworld simulator를 이용하여 조류계산을 수행한 결과를 나타내고 있다. powerworld simulator의 그림 출력의 소수점 표현의 한계를 감안했을 때 본 연구에서 개발한 알고리즘의 해가 허용 가능 오차 내에서 조류해에 해당한다는 것을 알 수 있다.



〈그림 3〉 최적화 후 조류해 결과

4. 결론

본 논문에서는 풍력발전단지 파라미터의 가능한 제어 범위 내에서 전력망 접속 규약 및 출력제한을 만족하도록 하는 최적 운전점을 구하는 알고리즘에 대하여 논하였다. 비선형 내점법을 이용하여 구현된 풍력발전단지 운전점 결정 알고리즘을 간략한 5모선 계통에 적용한 결과를 설명하였다.

〈참고 문헌〉

- [1] J. Ekanayake, N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," IEEE Trans. on Energy Conversion, vo. 19, 2004, pp. 800-802.
- [2] J. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins, "Control of DFIG wind turbines," Power Engineering Journal, vol. 17, 2003, pp. 28-32.
- [3] R. G. De Almeida, E. D. Castronuovo, J. A. Pecas Lopes, "Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests," IEEE Trans. on Power systems, vol. 21, 2006, pp. 718-725.
- [4] E. Castronuovo, J. Usaola, A. Jaramillo, "Delegated dispatching of wind farms: an optimal approach considering continuous control and interruption capabilities," Wind Energy, 2008. DOI: 10.1002/we.296.
- [5] E. Castronuovo, J. Usaola, "Optimal controllability of wind generators in a delegated dispatch," Electric Power Systems Research, vol. 77, 2007, pp. 1442-1448.
- [6] J. L. Rodriguez-Amenedo, S. Arnaltes, M. A. Rodriguez, "Operation and coordinated control of fixed and variable speed wind farms," Renewable Energy, vol. 33, 2008, pp. 406-414.
- [7] P. Sorensen, A. D. Hansen, et. al., Operation and control of large wind turbines and wind farms, Final Report, Riso national Lab., Denmark, Sept. 2005.