

풍력발전단지 내 송전손실 최소화를 위한 풍력발전기 출력 제어

김윤수*, 정효용*, 문승일*
서울대*

Wind Turbine Power Control to Minimize Power Loss within Wind Farm

Yun-Soo Kim*, Ho-Yong Jeong*, Seung-Il Moon*
Seoul National University*

Abstract - 풍력발전단지가 급속히 증가함에 따라 풍력발전단지의 제어를 통한 계통 규정 참여가 중요해지고 있다. 본 논문에서는 풍력발전단지 내에서의 송전손실을 최소화하기 위한 풍력발전기의 제어 방식을 제안한다. 모의 계통은 덴마크 해상풍력단지 Horns Rev를 본뒀으며 풍력발전기 별로 적용되는 풍속도 Wake Effect를 고려한 실제 데이터를 사용하였다. 손실 최소화를 위해 Linear Programming(LP)에 기반을 둔 Optimal Power Flow(OPF)를 사용하였다.

발전기다. 본 논문에서는 풍력발전기의 P 만 제어하기 때문에 $\partial P_L / \partial P$ 만 손실 민감도로 사용한다.

1. 서 론

고도 의정서 이후에 많은 국가들이 탄소 배출 규제에 의해 신·재생에너지가 각광 받고 있는 가운데, 그 중에서도 효율이 가장 높은 풍력발전기의 보급이 급증하고 있다. 국내에서는 아직 비중이 크지 않기 때문에 최대 출력을 내는 방식으로 운전되고 있지만 점유율이 높아질수록 적극적으로 계통 규정에 참여할 필요가 있다.

덴마크 계통운영자는 다양한 방법의 출력제어가 가능하도록 풍력발전단지를 운영하고 있다[1]. [1]에 언급되는 다양한 방법들에 의해서 풍력발전단지에서 일정한 출력을 내도록 제어하는 것이 가능하다. 하지만 풍력발전단지가 일정한 출력을 낼 때, 개별 풍력발전기에 대한 제어 방법은 특별히 구체화되지 않았다. 제안된 방법 중 하나로는 개별 풍력발전기의 출력을 균등 분배하는 방식이 있다[2].

본 논문에서는 OPF를 이용하여 풍력발전단지 내 송전손실을 최소화하는 방향으로 개별 풍력발전기들을 제어하는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 Optimal Power Flow

본 논문에서는 풍력발전단지 내 손실을 최소화하기 위한 Optimal Power Flow(OPF)를 이용하였다. 최적화 방법에는 여러 가지가 있는데 계산속도와 정확성을 고려했을 때 각각 장단점이 있다. 그 중에서도 Linear Programming(LP)은 간단하고 계산속도가 빠르며 상대적으로도 정확하다. LP를 계산하기 위해 풍속 및 풍향을 고려한 제약 조건과 목적 함수를 선형화하기 위한 손실 민감도 계산이 필요하다.

2.1.1 손실 민감도

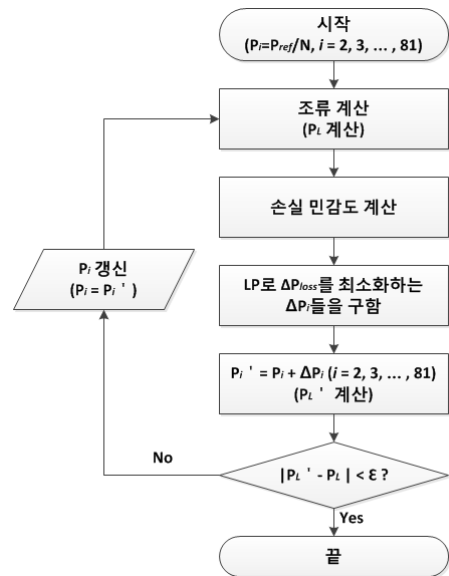
문제를 선형화하는데 있어서 가장 중요한 손실 민감도는 Newton Raphson Power Flow의 Jacobian 행렬을 사용하여 계산한다. [3]에 따르면 유효전력 P 와 무효전력 Q 의 변화에 따른 손실 P_L 의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} = \sum_{j=2}^{N+1} \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = \sum_{j=2}^{N+1} J_{P\theta, (i-1, j-1)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial |V_i|} = \sum_{j=2}^{N+1} \frac{\partial P_j}{\partial |V_i|} = \sum_{j=2}^{N+1} J_{PV, (i-1, j-1)} \quad (3)$$

$i, j = 1$ 은 slack bus이기 때문에 생략하고 N 은 풍력발전기의 개수이다. Slack bus의 발전기는 풍력발전단지 내의 정격 1 MW 보조 디젤



〈그림 1〉 알고리즘 순서도

2.1.2 문제 공식화

풍력발전단지 내 손실을 P_L , 풍력발전기의 최소 출력을 P_{min} , 풍력발전기 i 의 최대 출력을 $P_{i,max}$, 풍력발전단지에서의 출력을 P_{ref} 라고 하면 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min(P_L) \quad (4)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=2}^{N+1} P_i = P_{ref}, P_{min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (5)$$

모든 풍력발전기의 최소 출력은 같게 설정한다. 최대 출력은 wake effect를 고려하여 풍력발전기마다 다르게 설정한다. 풍력발전기들이 P_{ref} 를 균등 분배하여 출력할 때의 손실을 P_{loss} , OPF로 손실을 최소화하는 방향으로 각 풍력발전기의 출력을 바꿀 때 변화하는 손실을 ΔP_{loss} 라고 하면 풍력발전단지 내 손실은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_L = P_{loss} + \Delta P_{loss} \quad (6)$$

(6)에서 P_{loss} 는 일정하므로 ΔP_{loss} 를 최소화하는 방향으로 식을 (7)과 같이 교체할 수 있다.

$$\min(P_L) = \min(P_{loss} + \Delta P_{loss}) = \min(\Delta P_{loss}) \quad (7)$$

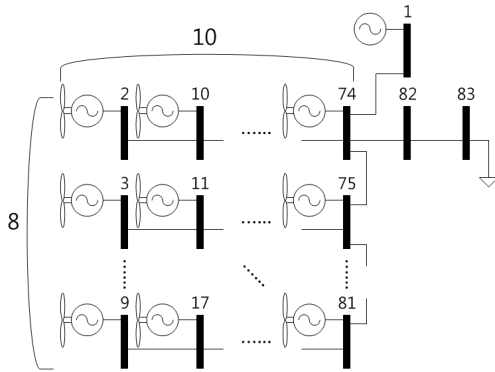
(6)에서 ΔP_{loss} 는 손실 민감도에 관한 식(8)로 표현된다.

$$\Delta P_{loss} = \left[\frac{\partial P_L}{\partial P_2} \cdots \frac{\partial P_L}{\partial P_{N+1}} \right] [\Delta P_2 \cdots \Delta P_{N+1}]^T \quad (8)$$

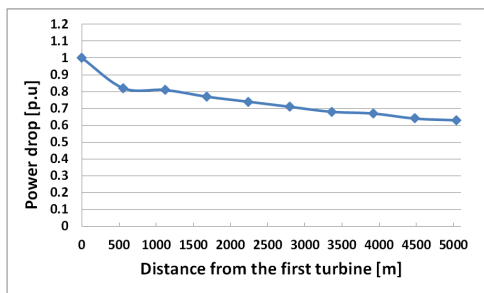
이에 따른 알고리즘 순서도는 <그림 1>과 같다. 알고리즘에서 일시적으로 계산된 손실 민감도에 의해서 P_i 가 너무 크게 변하지 않도록 ΔP_i 의 크기에 제한을 두었다.

2.2 사례 연구

본 논문에서는 실제 풍력발전단지 적용을 위해 덴마크 해상풍력발전단지인 Horns Rev의 계통도를 본렸다. 풍력발전기는 총 80기로 <그림 2>과 같이 8행 10열로 이루어져 있다. <그림 2>의 좌측이 서쪽이라면, 서풍이 불고 1열의 풍력발전기들이 정격 풍속인 13m/s로 바람을 맞는다고 가정한다. 2~10열까지의 풍력발전기들은 wake effect에 의해 낼 수 있는 최대 출력이 감소한다[4]. [4]에서는 풍속별로 wake effect가 조금 다른 패턴을 보이고 있지만 모두 비슷하므로 본 논문에서는 9-10m/s의 데이터를 13m/s의 데이터로 적용한다. 이에 따라 각 열에서 낼 수 있는 풍력발전기의 최대 출력은 <그림 3>와 같다. 이 조건에서 풍력발전단지가 낼 수 있는 최대 출력은 149.2 MW가 된다. 바람의 변화에 따른 출력 변동량을 고려해 정격 출력을 내기 위해 P_{ref} 를 96 MW로 제어한다 — Wake effect의 영향으로 10열의 최대 출력은 1.26 MW가 되므로 이를 고려하여 균등 분배 시 출력이 1.2 MW가 되도록 하기 위한 설정이다. 또한 최대 출력을 내고 있는 풍력발전기의 발전량이 바람의 영향에 의해 감소할 때를 대비하여 모든 풍력발전기들이 출력을 내도록 한다 — 최솟값이 0이 아니도록 설정했고 본 논문에서는 최솟값을 0.2 MW로 설정했다. 풍력발전단지 내부 계통은 Nexans사의 케이블로 연결이 되어 있다[5]. 풍력발전기들은 서로 33 kV 정격, 560 m의 MV(Medium Voltage) 케이블로 연결되어 있고 버스 74-82와 82-83 사이에는 각각 150 kV 정격의 21의 km 해저, 34 km의 지중 케이블로 연결되어 있다.



<그림 2> 풍력발전단지 모선도



<그림 3> 상대적인 출력 감소율

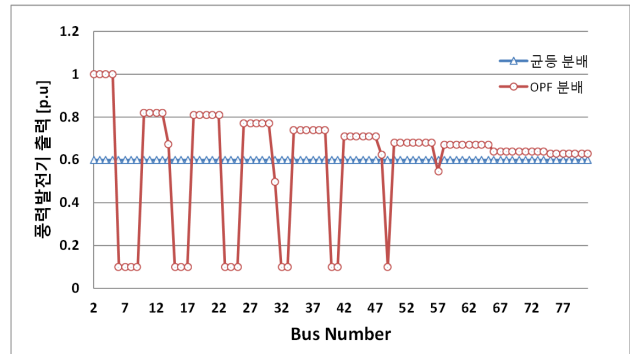
2.2.1 균등 분배

[1]에서 제안하는 방법으로 개별 풍력발전기들의 구체적인 제어 방안이 필요 없다. 따라서 단순하다. 앞서 언급한대로 96 MW의 출력을 80개의 풍력발전기가 균등하게 배분하여 출력하므로 각각 1.2 MW의 출력을 낸다. 이 때의 손실은 <표 1>과 같다.

2.2.2 제안하는 방법

본 논문에서는 정해진 96 MW의 출력을 OPF를 통해 분배한다. OPF를 통해 재분배된 풍력발전기들의 출력은 <그림 4>와 같다. 대부분의 풍력발전기들이 최댓값 또는 최솟값을 출력하지만 OPF에 따라 그 사이값을 출력하는 풍력발전기들도 있다. 이는 바람이 변하는 등의 이유로

인해 제약조건이 바뀌면 OPF에 의해 더 유동적으로 변할 수 있다. 제안된 방법을 통한 제어를 할 경우의 손실은 <표 1>에 나타났다.



<그림 4> OPF를 통한 제어 시 풍력발전기들의 출력 변화

<표 1> 균등 분배 제어와 OPF 제어의 손실 비교

	균등 분배(MW)	OPF 제어(MW)	감소량(MW)	감소율(%)
손실	10.2072	10.0594	0.1478	1.448

각 풍력발전기의 P_{max} 는 풍속과 풍향에 따라 실시간으로 조금씩 변하기 때문에 처음 계산한 OPF 결과 값으로 계속 지령을 내릴 수는 없다. 따라서 P_{max} 가 변함에 따라 새로운 제약 조건에 대한 OPF를 계산함으로써 풍력발전기들을 제어한다.

3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지에서 일정한 출력을 낼 때 손실을 최소화하기 위한 개별 풍력발전기들의 제어 방법을 제안한다. 아직은 이러한 상황에서 풍력발전기들의 출력에 대한 지령이 구체적으로 이루어지지 않은 가운데 [1]에서는 각각의 풍력발전기가 출력을 고르게 내는 균등 분배를 제안하고 있다. 사례 연구를 통해 균등 분배 제어와 OPF 제어의 손실을 비교할 수 있었다. OPF는 다양한 최적화 방법으로 접근할 수 있지만 풍력발전단지가 바람의 상황에 따라 실시간으로 조건이 바뀐다는 점을 고려하였을 때 계산 속도가 빠르고 정확한 LP에 기반을 둔 OPF를 사용하였다. 사례 연구를 위해 Horns Rev의 계통도를 본렸으며 선로 정수는 Horns Rev 계통 구성에 사용한 Nexans사의 것을 적용했다. 두 사례 연구를 비교한 결과 제안한 방법으로 1.448%의 손실 감소율을 얻을 수 있었다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20104010100490).

“이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0029424)”

[참 고 문 헌]

- [1] Poul Sorensen, Anca D. Hansen, Florin Iov, Frede Blaabjerg, Martin H. Donovan, “Wind farm models and control strategies”, Riso National Laboratory, 2005
- [2] Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Florin Iov, Frede Blaabjerg, “Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators”, Renewable Energy, Volume 31, Issue 7, p935-951, 2006
- [3] H. H. Happ, “Optimal Power Dispatch”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-93, Issue 3, p820-830, 1974
- [4] Mechali, M., Barthelmie, R., Frandsen, S., Jensen, L., Rethore, P., “Wake effects at Horns Rev and their influence on energy production”, European Wind Energy Conference and Exhibition, 2006
- [5] Nexans “Power Cables and Conductors” [Online]. Available: http://www.nexans.co.uk/eservice/UK-en_GB/navigate_835/Power_cables_conductors.html