

이중여자 유도형 풍력발전기의 유무효전력 제어

정병창, 정용호, 김성환
LS산전 중앙연구소

Active and Reactive Power Control of Doubly-Fed Induction-type Wind Generator

Byoungchang Jeong, Yongho Chung, Sunghwan Kim
LS Industrial Systems Co., Ltd.

Abstract - 본 논문에서는 권선형 유도기를 사용한 이중 여자 유도형 풍력발전기용 제어기를 개발하였다. 제어기는 발전기의 회전속도와 발전량, 그리고 계통 전압 등의 조건에 따라서 발전기를 자동으로 제어한다. 발전이 가능한 조건에서는 발전기의 유효전력은 최적값이 되도록 제어된다. 또한, 풍력발전 시스템의 무효전력은 계통 운영자의 요구, 계통 전압, 그리고 발전량 등을 고려하여 무효전력 제어 모드를 스스로 결정하도록 하였다.

1. 서 론

최근에 개발되는 대형 풍력발전 시스템의 과반수는 권선형 유도기를 발전기로 사용하는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템이다. 이중여자 유도형 풍력발전기(Doubly Fed Induction Generator, 이하 DFIG)는 권선형 유도기의 회전자에 컨버터 세트를 연결하여 발전기의 출력을 제어할 수 있는 방식으로 다른 방식에 비하여 구조와 제어가 복잡한 단점이 있다. 그러나, 발전기의 가변속이 가능하기 때문에 효율을 높이고, 기계적 스트레스는 감소시킨다. 또한, 풍력발전 시스템 정격 용량에 비하여 30% 이내의 정격 용량을 갖는 컨버터 세트를 사용하기 때문에 풍력발전 시스템 전체 가격을 낮추고, 컨버터에서 발생하는 손실도 작은 장점이 있다.[1, 2]

본 연구는 DFIG를 제어하기 위한 유·무효전력 제어 알고리즘 개발에 관한 것이다. 유효전력 제어 알고리즘은 발전기의 회전속도와 발전량에 따라서 최적의 운전점으로 발전기의 회전속도 또는 유효전력을 제어한다. 무효전력 제어 알고리즘은 계통 운영자의 무효전력 지령, 역률 기준값, 계통 공급 유효전력, 계통 전압 등의 조건에 따라서 풍력발전 시스템이 계통에 공급/소비하는 무효전력을 제어한다. 개발한 알고리즘은 1.5MW급 DFIG에 맞게 운전점을 조정하였으며, 그림 1과 같은 풍력발전 시뮬레이터에 적용하여 실험적으로 검증하였다.[3] 시뮬레이터는 블레이드의 토크를 모의하고 전동기와 인버터를 사용하여 발전기에 공급한다.

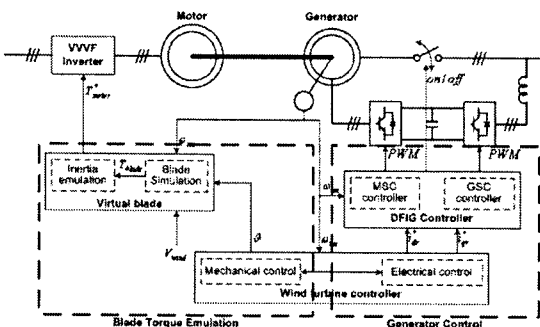


그림 1. 이중여자 유도형 풍력발전 시뮬레이터

2. 본 론

2.1 풍력발전기 제어 알고리즘

DFIG를 제어하기 위한 제어 순서도를 그림2에 정리하였다.[4]

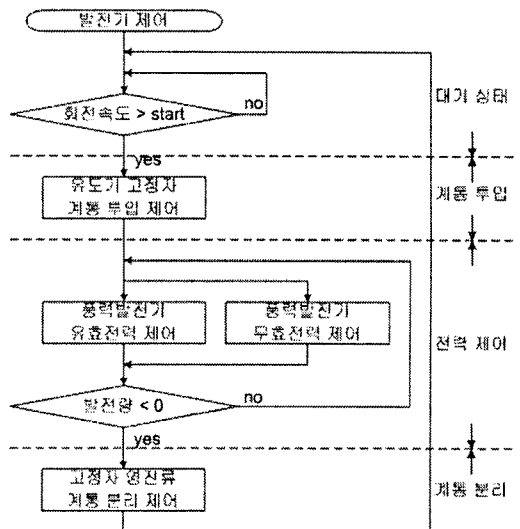


그림 2. 이중여자 유도형 풍력발전기 제어 순서도

제어기가 동작하면 제어기는 발전기의 회전속도를 관측한다. 자속 회전 상태에서 발전기 회전속도가 설정값보다 높아지면 발전기 제어를 시작한다. 발전을 하기 위해서 처음 수행하는 제어는 발전기 고정자를 계통에 연결하는 고정자 계통 투입 제어로, 고정자를 계통에 연결하기 전에 고정자에 계통과 동일한 전압을 유지시킴으로써, 연결하는 순간에 발생하는 돌입전류를 정격 이내로 억제하고 유도기가 계통에 연결될 때 발생하는 전압 강하를 감소시킨다.[5] 고정자가 계통에 연결되면 발전기의 유효전력과 무효전력을 자동으로 제어한다. 발전기를 제어하면서 발전량이 (-)가 되면, 즉 계통에서 발전기로 에너지를 공급하면 발전기 제어를 종료하고 고정자를 계통에서 분리한다. 고정자를 계통에서 분리하기 전에 고정자에 흐르는 전류를 '0'으로 제어함으로써 계통에 미치는 영향을 최소화한다. 유효전력 제어와 무효전력 제어에 대해서는 별도로 설명한다.

2.1.1 풍력발전기 유효전력 제어

풍력발전기는 풍속과 회전속도 등에 따라서 발전기의 출력이 달라진다. 이상적인 풍력발전기 제어라면 풍속에 비례하는 회전속도로 발전기를 제어하면 된다. 그러

나, 블레이드 각부분에 풍속이 다르고, 정확한 풍속 측정도 어렵기 때문에 풍속을 사용하여 발전기를 제어하는 것은 거의 불가능하다. 또한, 제어에 사용하는 컨버터의 용량도 제한되었기 때문에 회전속도를 제한할 수밖에 없다.

본 논문에서는 DFIG를 제어하기 위하여 그림 3과 같은 유효전력 곡선을 사용하였다. 회전속도에 따라서 발전기 전체 유효전력(발전량)을 그림3의 왼쪽 Y축과 같이 설정하였다. 발전량과 회전속도에 따라서 제어 구간을 구별하면 다음과 같다. 첫 번째, 발전량이 310kW 미만일 경우에는 발전기의 회전속도를 1350rpm으로 일정하게 제어한다. 두 번째, 발전량이 310kW보다 높아지면 발전기는, 블레이드가 최대 출력점에서 운전하도록, 회전속도의 3승에 비례하는 유효전력을 발전한다. 세 번째, 회전속도가 1980rpm에 도달하면 회전속도를 일정하게 유지한다. 네 번째, 발전량을 1550kW로 제한한다. 이때 회전속도는 증가할 수 있다. 다섯 번째, 2170rpm 이상에서는 회전속도에 비례하게 발전량도 증가시킨다. 발전량과 회전속도가 감소할 경우에는 역순으로 진행한다.

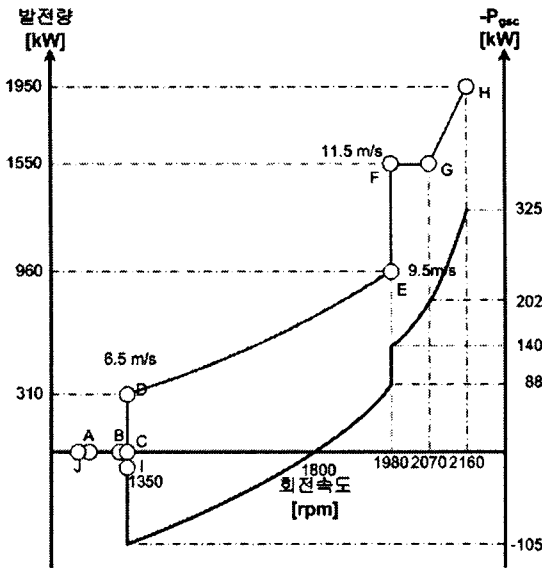


그림 3. 풍력발전기 유효전력 곡선

2.1.2 풍력발전기 무효전력 제어

DFIG는 발전기의 고정자와 계통측 컨버터의 2곳에서 무효전력을 독립적으로 제어할 수 있으며, 두 곳의 무효전력원을 통합하여 풍력발전 전체의 무효전력을 제어할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 3가지 무효전력 제어 알고리즘을 통합하여 풍력발전기의 무효전력 제어 알고리즘으로 개발하였다.

첫째, 계통에서의 사고 또는 계통 전력 품질의 유지를 위하여 계통 운영자가 풍력발전기에 무효전력값을 직접 요구할 수 있다.

둘째, 주어진 역률 기준값에 따라서 풍력발전기가 계통에 공급하는 무효전력량을 제한한다. 역률 기준값을 별도로 제공하지 않을 경우에는 역률 '1'로 제어한다.

셋째, 풍력발전기가 연계된 지점의 전압이 설정 범위에서 벗어나면 연계지점의 전압을 정격으로 제어하기 위하여 무효전력을 공급/소비하도록 하였다. 전압 제어기로 PI 제어를 사용하였으며, 제어기의 출력은 풍력발전 시스템 전체의 무효전력이 된다.

세가지 제어 알고리즘 중에서 계통 운영자에 의한 무효전력 기준값 제어의 우선 순위가 가장 높으며, 평소에

는 역률 기준값으로 운전한다. 역률 제어로 운전할 때 연계지점의 전압이 설정값을 벗어나면 전압 제어로 변경한다. 본 논문에서는 역률 제어 유지 범위를 정격전압 $\pm 5\%$ 로 하였다. 또한, 연계지점 전압 제어에서 역률 제어로 변경해도 연계지점의 전압이 설정범위를 유지할 경우에는 역률 제어로 전환하도록 하였다. 역률 제어에서 전압 제어로 변경할 때와는 다르게, 정격전압 $\pm 4\%$ 를 전압 제어에서 역률 제어로 전환하는 기준으로 설정했다.

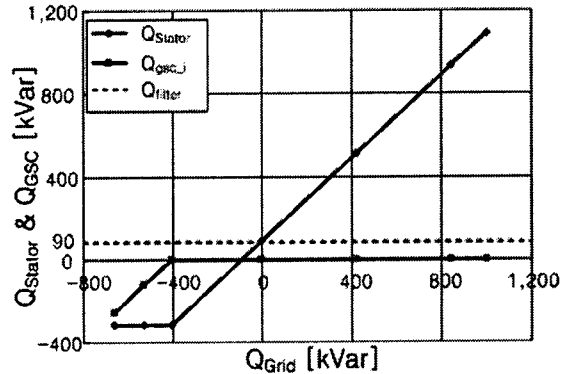


그림 4. 풍력발전 시스템 무효전력 분배 곡선

2.2 실험 결과

개발한 알고리즘은 15MW급 풍력발전 시뮬레이터에 적용하여 실험하였다. 이 절에서는 유효전력 제어와 무효전력 제어의 실험 결과를 정리하였다.

2.2.1 유효전력 제어 결과

풍력발전 시뮬레이터에서 전동기의 입력을 증가시키면서 유효전력 제어를 수행하였을 때 그림 5와 같은 결과를 얻었다.

그림 5(a)는 발전기의 회전속도이다. 인버터의 입력에 따라서 회전속도가 가변한다.

그림 5(b)는 발전기에서 변환되는 기계적 에너지이다. 기계적 에너지는 전부 전기 에너지로 변환되며, 발전기 권선에서의 손실과 컨버터에서의 손실을 제외한 대부분의 에너지가 계통으로 공급된다. 또, (b)에는 계통측 컨버터의 유효전력도 있다. 계통측 컨버터 유효전력에 (-)를 곱하였기 때문에 계통측 컨버터 유효전력이 (-)인 경우는 계통에서 계통측 컨버터로 유효전력이 공급되는 경우이다. 회전속도 1800rpm에서 0kW가 되며, 각 회전속도에서의 값은 그림 3과 같다.

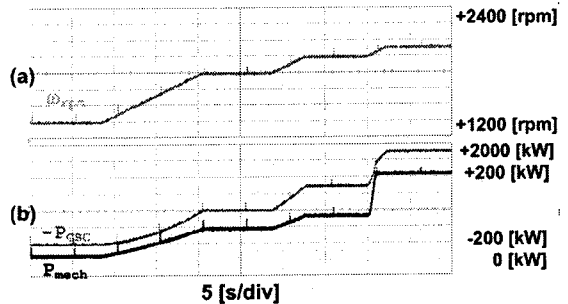


그림 5. 풍력발전기 가변속 제어

(a) 회전속도 ω_{rpm}

(b) 발전기 기계적 에너지 P_{mech}

계통측 컨버터 유효전력 P_{gsc}

그림 6은 회전속도에 따른 발전기 기계적 에너지를

래프로 표시하였다. 전체적으로는 그림 3과 같은 패턴으로 변화한다. 단, 1980rpm에서 회전속도를 일정하게 제어하는 구간을 변형하여 1950rpm(920kW)에서 1980rpm(1550kW)까지 회전속도에 비례하여 발전량이 증가하도록 제어하였다.

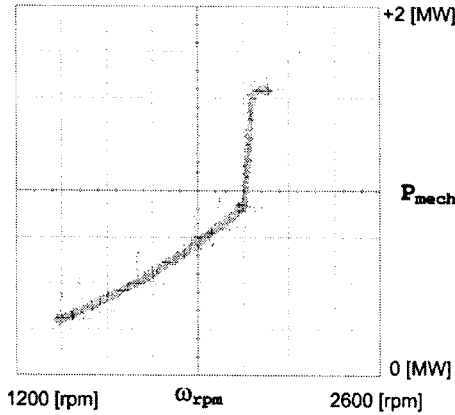


그림 6. 회전속도-발전기 기계적 에너지 곡선

2.2.2 무효전력 제어 결과

그림 7은 풍력발전기의 무효전력을 임의로 제어했을 때 결과이다. 제어 순서대로, 첫 번째 계통 운영자가 풍력발전기의 전체 무효전력을 200kVar로 제어, 두 번째 연계 지점 전압 제어(563V), 세 번째 역률 1제어, 네 번째 역률 0.9 제어, 다섯 번째 역률 -0.9 제어로 변경했을 때 결과이다. 풍력발전 전체 무효전력에 따라서 고정자와 계통측 컨버터에서 무효전력을 분배하고, 연계 지점의 전압이 변화한다.

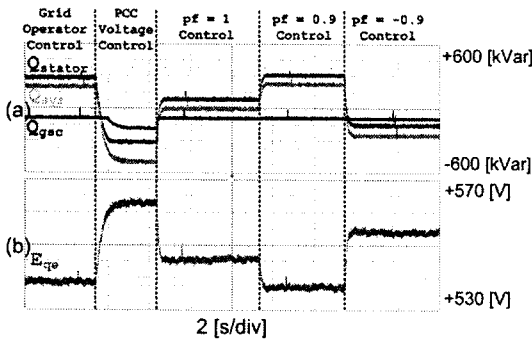


그림 7. 풍력발전기 무효전력 임의 제어

- (a) 풍력발전 시스템 무효전력 Q_{sys} , 고정자 무효전력 Q_{stator} , 계통측 컨버터 무효전력 Q_{gsc}
 (b) 계통 q축 전압 E_{gp}

그림 8은 풍력발전 시스템의 무효전력을 자동으로 제어했을 때 결과이다. 발전기는 1800rpm(720kW)를 유지할 때 역률 기준값을 1 → 0.78 → 1로 변화시켰다. 역률 1로 제어할 경우 풍력발전기의 무효전력은 0kVar가 된다. 역률 기준값을 0.78로 변경하면 초기에는 역률 기준값에 따라서 계통에서 풍력발전기로 유입되는 무효전력이 증가한다. 그러나, 정격 전압으로 설정한 550V의 ±5% 범위를 벗어나기 때문에 연계지점 전압 제어로 전환한다. 전압을 550V로 제어하기 위하여 풍력발전에서 계통으로 무효전력을 주입한다. 그리고, 역률 기준값을 1로 변경하면, 전압제어에서 역률 제어로 변경해도 설정 범위를 벗어나지 않기 때문에 역률 제어로 복귀한다.

무효전력이 변동해도 발전기의 유효전력은 일정 한 값을 유지한다. 단, 무효그림 8에서 확인 가능한 것과 같이 무효전력이 급격하게 변동할 경우 발전기의 유효전력도 순간적으로 변동한다.

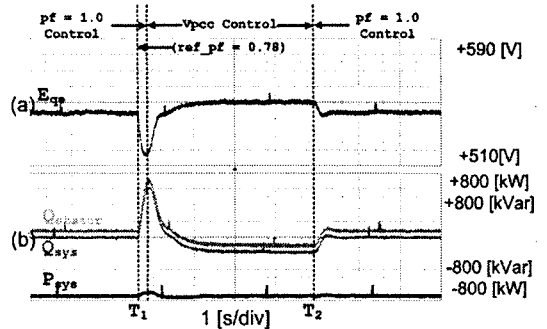


그림 8 풍력발전 시스템 무효전력 자동 제어

- (a) 계통 q축 전압 E_{gp}
 (b) 풍력발전기 유효전력 P_{sys} , 풍력발전기 무효전력 Q_{sys} , 고정자 무효전력 Q_{stator}

3. 결 론

본 연구에서는 이중역자 유도형 풍력발전 시스템이 스스로 운전하기 위한 유효전력 제어 알고리즘과 무효전력 제어 알고리즘을 개발하였으며, 실제 용량의 시뮬레이터에 적용하여 검증하였다. 본문에는 포함하고 있지 않지만 DFIG의 고정자 계통 동기화 제어와 고정자 분리 제어 알고리즘을 포함한 전체 알고리즘이 동작하여 회전속도와 발전량에 따라서 풍력발전기의 전체 출력을 자동으로 제어한다.

개발한 알고리즘을 적용한 풍력발전 시뮬레이터가 전북 고창에 위치한 한전 실증시험장의 분산전원 시험단지에 설치되어 분산전원이 전력계통에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사용할 계획이다.

앞으로는 계통 전압이 급변할 때 DFIG의 low voltage ride-through와 계통 전압의 변화에 따른 풍력발전기의 출력 제어에 대하여 연구하여 풍력발전이 계통에 미치는 영향을 분석할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," IEE Proc. -Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.
- [2] S. Muller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor," IA S 2000 Conference Record, Vol. 4, pp. 2249-2254, 2000.
- [3] 정병창, 김희중, 정승호, "2MW급 이중역자 유도형 풍력발전기용 Power Conditioner Unit 개발," 전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.
- [4] 정병창, 송승호, "이중역자 유도형 가변속 풍력발전기 제어 기술," 전력전자학회지 Vol. 11, No. 1, pp. 19-25, 2006.
- [5] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자측 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중역자 유도형 풍력발전기의 계통 투입 알고리즘," 전기학회논문지 Vol 52 No. 10, pp. 528-534, 2003.