

전원 전압 불평형시 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 토크 리플 저감을 위한
계통연계 인버터 제어 알고리즘

정병창, 송승호
전북대학교 전자정보공학부

Grid-connected Inverter Control Algorithm for Torque Ripple Compensation
in Doubly-Fed Induction-type Wind Power Generation System

Byoung-Chang Jeong, Seung-Ho Song

Division of Electronics and Information Eng. Chonbuk National University

Abstract - In this paper, control algorithm for torque ripple compensation in DFIG wind power generation system is proposed. A simple PI controller is designed for the negative sequence voltage cancellation using negative sequence currents in the grid-side converter. As a result, the stator voltage contains only the positive sequence components and the torque pulsation of the generator is effectively compensated. Propose algorithm is confirmed with PSCAD simulation model.

1. 서 론

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 발전기의 고정자를 계통에 직접 연결하기 때문에 다른 가변속 풍력발전 시스템에 비하여 계통과 밀접한 관계를 갖는다. 특히 3상 평형 전원에서는 발전기 회전자계의 크기와 회전속도가 일정하지만 불평형 전원에서는 시간에 따라서 크기와 회전속도가 달라진다.

회전자계의 크기와 회전속도가 달라질 경우 발전기에는 토크 리플이 발생한다. 불평형 전원에서 발전기의 토크 리플은 계통 전압 주파수의 2배 주파수를 갖는다. 토크 리플에 의하여 사람이 들을 수 있는 가청 주파수의 소음이 발생하고 블레이드, 기어 그리고 발전시스템의 기계적 회전축에 지속적으로 피로를 누적시켜서 결국에는 기계적 사고를 유발하게 된다.

토크 리플을 억제하기 위하여 불평형 전원에 의해서 발전기 자화 전류의 크기가 달라질 경우 이중여자 유도기의 회전자측 전류를 제어함으로써 전체적으로 발전기의 토크를 일정하게 유지하는 알고리즘이 발표되었다.[1] 회전자측 전류를 제어하여 발전기의 토크를 억제할 수 있었지만, 사고가 발생하지 않은 상의 전류는 증가하고 사고가 발생한 상의 전류는 감소하기 때문에 계통의 불평형을 더욱 악화시키는 문제가 있다.

본 논문에서는 계통 불평형 시에 이중여자 유도기의 토크 리플을 억제하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 계통의 불평형을 검출하기 위하여 계통 전원을 정상분과 역상분으로 분리 검출하고 계통에 연결된 인버터에서 역상분 전압을 제어함으로써 이중여자 유도기의 고정자에 인가되는 전압에는 정상분만 존재하게 하였다. 고정자에 인가되는 역상분 전압을 제거함으로써 발전기의 토크 리플을 억제할 수 있다. PSCAD 시뮬레이션 모델을 사용하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 역상분 전압 제어

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 역상분 전압 보상을 위하여 그림1과 같이 간략화된 구조를 채택하였다. 발전기(DFIG), 전력변환 회로, 계통 선로 그리고 계통 전원으로 구성되어 있다. 전력변환 회로는 회전자측 컨버터(Machine Side Converter : MSC)와 계통측 컨버터

(Grid Side Converter : GSC)로 구성되어 있다. 계통측 컨버터는 계통과 연계되어 있기 때문에 계통연계 인버터라고도 한다. 계통 선로는 풍력발전 시스템과 계통을 연결하는 변압기와 변압기에서 계통의 노드까지의 선로 임피던스를 인덕터(Lline)로 간단하게 표현하였다. 풍력발전 시스템과 계통을 연결하는 변압기의 풍력발전 시스템측을 계통연계 지점 CP으로 하였다.

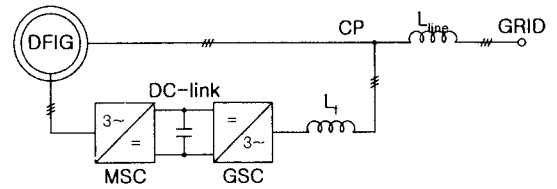


그림 1 이중여자 풍력발전 시스템
Fig. 1 DFIG system with line

본 논문에서는 계통이 평형인 정상상태에서의 제어는 별도로 설명하지 않고 참고 문헌을 따른다.[2][4]

2.1 풍력발전 시스템의 역상분 모델링

계통연계 지점의 역상분 전압을 보상하기 위하여 먼저 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 역상분에 대하여 모델링하였다. 그림 2에서 등가회로를 보여주고 있다. 각 부분의 전압과 전류 그리고 각 파라미터를 보여주고 있다. 다른 전압과는 달리 계통연계 지점의 전압은 E_{CP} 라고 표현하였다.

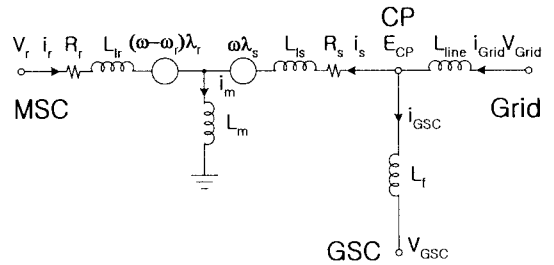


그림 2 시스템 등가회로(그림 1)
Fig. 2 Equivaient circuit of Fig. 1

이중여자 유도 발전기, 전력용 필터 그리고 선로에 대하여 각각 d-q축으로 역상분을 모델링하였다. 각각의 상태 방정식은 계통연계 지점의 전압 E_{CP} 를 기준으로 정리하였다. 이렇게 정리된 6개의 상태 방정식을 d축과 q축

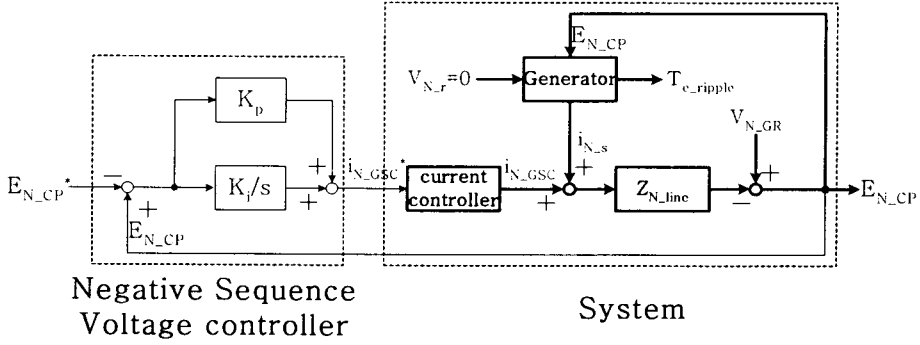


그림 3 역상분 전압 보상을 위한 PI 제어기
Fig. 3 PI Controller for negative voltage

으로 통합하여 2개로 정리하였다. 다음에서 동기 좌표계로 정리한 상태 방정식을 보여주고 있다.

$$\begin{aligned}
 3E_{dN-CP}^e &= V_{dN-Grid}^e + V_{dN-GSC}^e + \frac{L_m}{L_s} V_{dN-r}^e \\
 &- L_{line} \frac{d}{dt} i_{dN-Grid}^e + L_f \frac{d}{dt} i_{dN-GSC}^e \\
 &+ \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{dN-s}^e - \omega_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qN-r}^e \\
 &- R_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dN-r}^e + \left(R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) i_{dN-s}^2 \\
 &- \omega_e (L_{line} i_{qN-Grid}^e - L_f i_{qN-GSC}^e - \sigma L_s i_{qN-s}^e)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 3E_{qN-CP}^e &= V_{qN-Grid}^e + V_{qN-GSC}^e + \frac{L_m}{L_s} V_{qN-r}^e \\
 &- L_{line} \frac{d}{dt} i_{qN-Grid}^e + L_f \frac{d}{dt} i_{qN-GSC}^e \\
 &+ \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{qN-s}^e + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dN-r}^e \\
 &- R_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qN-r}^e + \left(R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) i_{qN-s}^2 \\
 &+ \omega_e (L_{line} i_{dN-Grid}^e - L_f i_{dN-GSC}^e - \sigma L_s i_{dN-s}^e)
 \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 연계지점의 역상분 전압 제어기

계통측 컨버터는 정상분과 역상분을 분리하여 벡터 제어를 수행한다.[5] 검출된 정상분은 계통측 컨버터의 벡터 제어를 위한 동기 위상각 계산에 사용된다. 정상분 전류는 직류단 전압을 일정하게 제어하기 위하여 사용하였다. 역상분 전류는 계통연계 지점의 역상분 전압을 제어하기 위하여 사용하였다.

그림 3에서 계통연계 지점에서의 역상분 전압을 제어하기 위한 제어기의 구조를 보여주고 있다. 검출된 역상분 전압과 역상분 전압 기준값에 따라서 역상분 전류 기준값을 계산한다. 계산된 역상분 전류 기준값은 계통측 컨버터에서 합성해야 할 전압 기준값을 계산하기 위하여 사용된다. 정상분 전류와 역상분 전류를 제어하기 위하여 정상분과 역상분 전압 기준값을 각각 계산하며 두 전

압 기준값을 산술적으로 더하여 컨버터에서 합성해야 할 전압 기준값으로 사용하고 있다[5]

2.3 계통측 컨버터의 전류 용량

계통측 컨버터의 전류 용량은 정상분과 역상분 전류를 제어하기 위하여 필요한 용량을 각각 계산하여 산정해야 한다. 그림 4에서 정상분과 역상분 벡터에 따른 합성 벡터의 크기를 보여주고 있다. 정상분과 역상분의 크기가 약 2:1일 때 첫 번째 경우와 같이 정상분 벡터(f_{dq1})와 역상분 벡터(f_{dqN1})가 위상차가 존재할 때 합성벡터(f_{abc1})의 크기는 정격보다 작다. 그러나 두 번째 경우와 같이 두 벡터의 위상이 동일할 때 합성벡터(f_{abc2})의 크기는 정격을 초과하게 된다.

일반적으로 사고 등에 의해서 발생하는 불평형에서 역상분 전압의 크기는 정격 전압에 비하여 작기 때문에 계통측 컨버터의 전압 정격을 계산할 때 역상분 전압의 크기는 고려하지 않아도 된다.

그러나 역상분 전류의 경우 사고의 위치와 종류에 따라서 크기가 달라지고 작은 불평형에도 큰 역상분 전류가 흐르기 때문에 전류 정격을 계산할 경우에는 정상분과 역상분 전류의 정격을 모두 고려해야 한다.

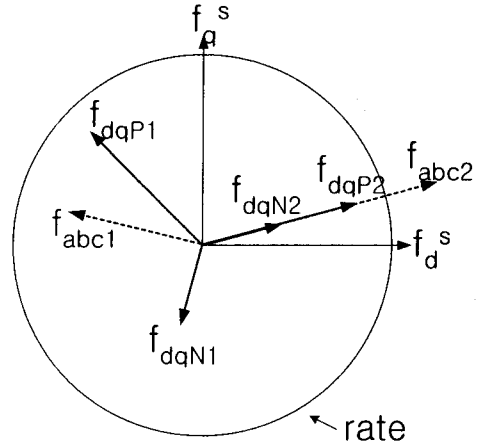


그림 4 정격과 정상분/역상분의 관계
Fig. 4 Rate and positive/negative sequence

계통측 컨버터의 전류 정격 i_{ratu} 은 다음과 같이 계산해야 한다.

$$i_{ratu} = |i_{positive-max}| + |i_{negative-max}| \quad (3)$$

2.4 시뮬레이션 및 결과

제안한 알고리즘을 확인하여 PSCAD에서 시뮬레이션을 수행하였다. 계통 전원은 7초에 불평형이 발생하도록 하였으며, 계통연계 지점의 역상분 전압은 8초부터 제어하도록 하였다. 평형상태에서 전압은 220Vrms가 인가되고 불평형 시에는 정상분 200Vrms 역상분 20Vrms가 인가되었다.

그림 5에서 역상분 전압 보상 보상특성을 동기좌표계로 보여주고 있다. (a)는 역상분 d-q 전류 기준값으로 8초 이전에는 '0'으로 유지되고 있다. 8초 이후에 PI 제어기에서 역상분 전류 기준값을 제어하고 있다. (b)는 컨버터의 역상분 d축 전압 기준값과 계통연계 지점의 역상분 d축 전압을 보여주고 있다. 8초 이후에 제어에 의하여 연계지점의 역상분 전압이 '0'으로 수렴한다. (c)는 컨버터의 q축 전압 기준값과 연계지점의 q축 전압을 보여준다. d축과 마찬가지로 '0'으로 수렴한다. 역상분 전압을 제어하기 위하여 약 0.2초가 소요되었다.

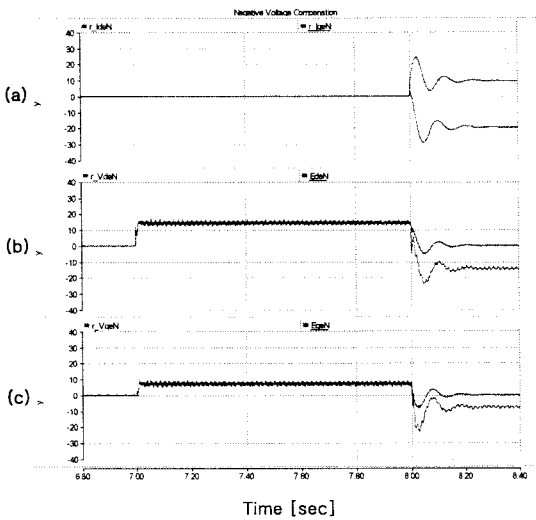


그림 5 역상분 전압 제어 결과
Fig. 5 Simulation result : negative voltage control

그림 6과 7에서 계통연계 지점의 역상분 전압 제어에 의한 토크 리플의 변화를 비교하고 있다. 불평형의 크기는 불평형지수(Unbalance Factor)로 표현하며 정상분은 200Vrms일 때 역상분 전압은 10, 20, 30, 40Vrms에 대하여 시뮬레이션 하였다.

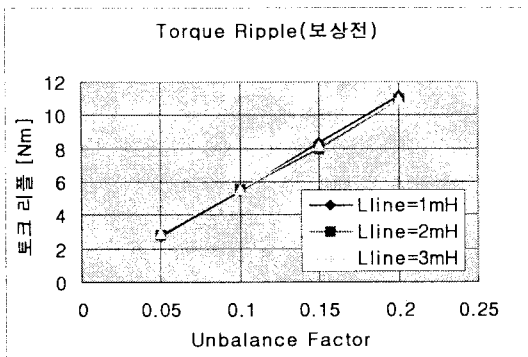


그림 6 토크 리플(보상전)
Fig. 6 Torque ripple(before compensation)

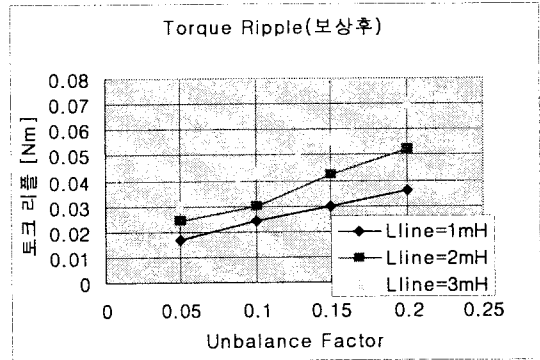


그림 7 토크 리플(보상후)
Fig. 7 Torque ripple(after compensation)

역상분 전압을 제어하기 이전과 이후를 비교했을 때 동일한 조건에서 토크 리플이 1/100 이하로 감소하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 계통측 컨버터에서 계통연계지점의 역상분 전압을 보상함으로써 이중역자 유도형 풍력발전 시스템의 토크 리플을 억제하는 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 PI 제어기를 사용하여 연계 지점의 역상분 전압을 '0'으로 제어하도록 하였으며 PSCAD 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

제안한 알고리즘은 앞으로 불평형 전원에서 이중역자 유도형 풍력발전 시스템을 운전하기 위하여 활용 될 것으로 기대되며, 향후에 컨버터의 전체 경계에서 정상분과 역상분 전류의 제한값을 최적으로 분할하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ted Brekken, Ned Mohan, "A Novel Doubly-fed Induction Wind Generator Control Scheme for Reactive Power Control and Torque Pulsation Compensation Under Unbalanced Grid Voltage Conditions", PESC 2003, Conference Record, June, pp. 760-764, 2003.
- [2] S. Müller, 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", IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, pp. 2249-2254, 2000.
- [3] 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, May, pp. 231-241, 1996.
- [4] 정병광, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자속 PWM 인버터 컨버터를 사용한 이중역자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘", 전기학회논문지 Vol. 52, No. 10, pp. 528-534, 2003.
- [5] 이상준, "순간 저압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구", 박사학위 논문, 서울대학교, 2003.