

PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 풍력 발전 시스템의 기동제어 알고리즘

정병창, 권대화*, 송승호*, 김일환**

이엠티(주), *전북대학교 전자정보공학부, **제주대학교 전기전자공학부

Starting Algorithm for Doubly-fed Wind Power Generation System using PWM Inverter-Converter

Byoung-Chang Jeong, Tea-Wha Kwon*, Seung-Ho Song*, Eel-Hwan Kim**
EMT Co. Ltd, *Chonbuk National University, **Cheju National University

Abstract - 이중여자 유도기의 고정자를 계통에 연결할 때 발생하는 과도 전류를 억제하기 위하여 회전자측에 설치된 인버터 컨버터를 사용하여 고정자에 유기되는 전압을 제어하였다. 고정자에 유기되는 전압을 계통 전원에 동기화 시키는 알고리즘을 제안하였으며, 제안한 알고리즘을 적용한 시뮬레이터를 설계, 제작하여 알고리즘의 동작을 확인하였다.

1. 서 론

자연환경에서 에너지를 얻기 위한 방법으로 태양광, 태양열, 풍력, 소수력, 그리고 조력 등 다양한 방법이 연구되고 있으며, 그 중에서 풍력이 가장 실용화에 근접한 에너지로 인식되고 있다. 최근에 상용화된 풍력 발전 시스템의 경우 시스템 용량이 수 MW급 이상의 대용량으로 화석에너지나 원자력 발전에 의한 전력 생산 원가에 근접한 수준까지 도달하였다. 풍력 발전 시스템이 발전하면서 최근에는 가격 대비 효율이 우수한 농형 유도기를 사용한 시스템을 중심으로 상용 제품이 발표되고 있으며, 권선형 유도기를 사용한 이중여자 발전 시스템이 시스템의 효율 및 시스템의 설치비용 등의 이점 때문에 다음세대 풍력 발전 방식으로 인식되고 있다.[1]

이중여자 발전 시스템은 권선형 유도기의 고정자측은 계통에 직결하고, 회전자 전압을 제어하는 방식으로, 본 논문은 회전자측에서 발생한 에너지를 계통에 공급하는 슬립 에너지 회복 방식의 이중여자 풍력 발전 시스템을 대상으로 하고 있으며, 그림 1에서 구조를 보여주고 있다. 기존의 농형 유도기를 사용하는 방식과는 달리 회전자측에 인버터-컨버터 세트가 설치되어, 회전자의 단자 전압을 제어하고 직류단 전압을 일정하게 제어하고 있다.[2]

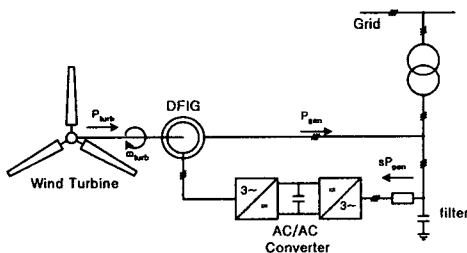


그림 1. 이중여자 유도 발전 시스템

유도기의 고정자는 발전이 가능할 때만 계통에 연결하므로, 발전 개시 조건이 만족되어, 계통 전압을 유도기의 고정자에 직접 인가할 경우 고정자에는 과도 전류가 흐르게 되고, 과도 전류에 따른 시스템의 피로 누적은 발전 시스템 고장의 원인으로 작용하게 된다. 또, 계

통에서는 순간적으로는 대전력을 소비하고 다시 계통에 전력을 공급하는 점에서 전원으로서 신뢰성이 떨어지게 된다.

이중여자 유도기의 고정자를 계통에 투입하는 방법으로는 고정자측에 소프트 스타터를 설치하는 방법이 있다. 이방법의 경우 계통과 유도기 고정자를 연결할 때, 과도전류를 정격 범위에서 억제하고 있지만, 별도의 장치를 설치해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이중여자 유도기의 회전자측에 설치된 컨버터를 사용하여 고정자에 유기되는 전압을 제어함으로써 별도의 장비를 설치하지 않고도 계통과 유도기의 고정자를 연결할 수 있는 기동 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 유도기의 고정자에 유기되는 전압이 계통 전원에 동기화되도록 회전자측 컨버터의 출력 전압을 제어함으로써 고정자와 계통의 연결 순간, 과도 전류를 제한하였다.

2. 이중여자 유도 발전기의 기동 알고리즘

2.1 이중여자 유도기의 모델링

유도기의 고정자측을 전압에 대하여 d-q 좌표계로 모델링하면 다음과 같이 정리할 수 있다.[1]~[4]

$$V_{ds}^e = r_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$V_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

r_s 는 고정자 저항, ω_e 는 동기 각속도, λ_{ds}^e 와 λ_{qs}^e 는 고정자의 d, q축 자속

만일, 발전을 개시하지 않는 상태, 즉, 유도기의 고정자가 계통에서 분리되어 있는 상태라면 고정자 전류는 0이므로 고정자 전압은 식 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 정리된다.

$$V_{ds}^e = \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \quad (3)$$

$$V_{qs}^e = \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \quad (4)$$

이때, $V_{ds}^e = \text{constant}_1$, $V_{qs}^e = \text{constant}_2$, 즉, 일정한 크기의 전압 벡터를 일정한 속도로 회전시키면 자속 역시 일정한 크기의 벡터가 회전하게 되므로, $\frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e = 0$,

$\frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e = 0$ 이 되므로, 고정자 전압은 다음과 같이 고정자 자속으로 표현할 수 있다.

$$V_{ds}^e = -\omega_e \lambda_{qs}^e \quad (5)$$

$$V_{qs}^e = \omega_e \lambda_{ds}^e \quad (6)$$

그리고, 고정자 자속은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (7)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (8)$$

식(5)와 (6)에 식(7)과 (8)을 대입하여 정리하면 고정자 전압은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V_{ds}^e = -\omega_e L_m i_{qr}^e \quad (9)$$

$$V_{qs}^e = \omega_e L_m i_{dr}^e \quad (10)$$

즉, 회전자 d축 전류를 제어하면 원하는 고정자 q축 전압을, 회전자 q축 전류를 제어하면 원하는 고정자 d축 전압을 얻을 수 있다. 만일, 계통 전압이 모두 동기 좌표계 q축에 존재한다면($V_{qs}^e = 0$, $V_{ds}^e = E_{max}$), 회전자 d축 전류를 다음과 같이 제어하면 된다.

$$i_{dr}^e = \frac{E_{max}}{\omega_e L_m} \quad (11)$$

여기서 E_{max} 는 계통 상전압의 peak 값을 의미한다. 그리고, 계통 전압과 고정자 전압의 주파수를 일치시키기 위해서, 회전자 전류의 벡터제어를 위한 동기 각 속도는 계통 전압을 사용하여 계산한다. 그러나 식(11)과 같이 회전자 d축 전류를 제어하여 고정자에 계통 전원에 동기된 전압이 인가되도록 하는 것은 고정자 권선과 회전자 권선의 위상차가 0인 경우에만 가능하다. 만일 그림 2와 같이 두 권선 사이에 $\Delta\theta$ 의 전기각 위상차(P극 일 경우 기계각 위상차는 $\frac{2}{p}\Delta\theta$)가 존재한다면, 고정자에 유기되는 상전압의 최대값과 주파수는 계통 전압과 같아지지만, 고정자의 상전압과 계통 상전압에는 전기적 위상차 $\Delta\theta$ 가 발생한다.

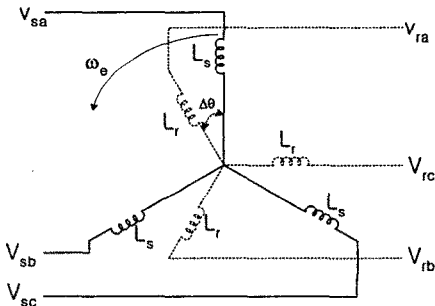


그림 2. 권선형 유도기의 초기 위치각

고정자 권선과 회전자 권선의 초기 위치각의 차이를 반영하여 고정자에 원하는 전압이 인가되도록 하기 위해서는 회전자 전압에 인가하는 전압의 벡터를 d축에서 위치각의 차이 $\Delta\theta$ 만큼 회전시켜야 한다. 그리고, 유도기의 회전자 전압은 전류에 비례하므로 결국 원하는 고정자 전압을 얻기 위해서는 유도기 회전자 d-q축 전류를 위상차 만큼 회전시켜야 한다. 즉, 제어해야 할 회전자 전류는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{dr}^{e*} \\ i_{qr}^{e*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & -\sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_{max}}{\omega_e L_m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2 전원 위상 동기화 알고리즘

유도기의 고정자를 계통에 연결하기 위한 제어 알고리즘은 그림 3과 같다. 발전기가 회전을 시작하여 회전 속도가 설정값 이상이 되면, 발전기의 동기화 제어가 시작된다. 먼저 식(11)을 사용하여 계통 전원과 동일한 크기의 고정자 전압을 발생시키기 위한 회전자 전류의 크기, I_r^* 를 계산한다. 회전자 전류가 계산되면, 계산된 전류를 모두 회전자 d축 전류로 인가하여 고정자에 유기된 전압과 계통 전압의 위상차 $\Delta\theta$ 를 측정한다. 그리고 측정된 $\Delta\theta$ 만큼 회전시킨 전류 벡터를 회전자에

인가하면 고정자에 유기되는 전압을 계통 전압에 동기화시킬 수 있다.

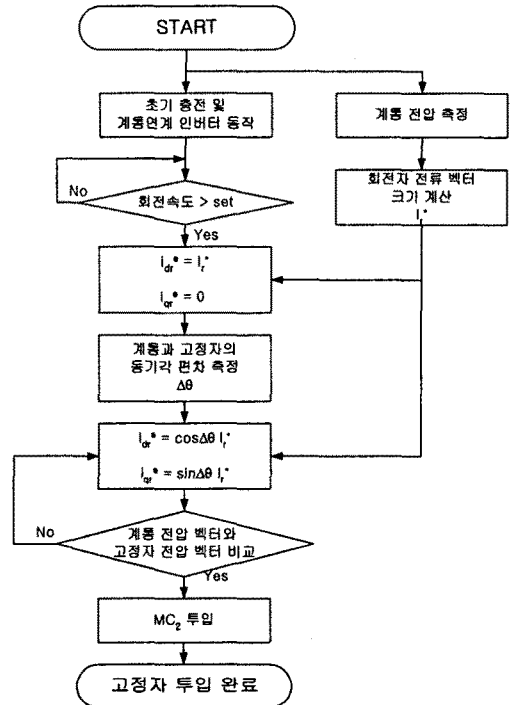


그림 3. 고정자의 계통 투입 알고리즘

그러나, 계통 전원의 불평형이나 왜곡, 회전자측 컨버터의 스위칭에 의해 고정자 전압에 포함된 잡음 성분 등이 존재하기 때문에, 계통 전원과 고정자에 유기된 전압을 정확하게 동기화 시키는 것은 거의 불가능하다. 그래서, 그림 4와 같이 일정 오차 범위까지는 동기화가 이뤄진 것으로 판단하였으며, 본 연구에서는 한변의 오차폭 $\Delta V = 0.28$ pu인 정사각형 형태의 오차 범위를 사용하였으며, 고정자에 유기된 전압이 4msec 이상 오차 범위내에 위치할 때, 고정자와 계통을 연결하는 자기 접촉기를 동작시켰다.

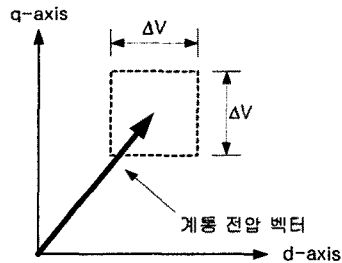


그림 4. 동기 판단 오차 범위

또, 자기 접촉기의 제어 신호가 출력되고, 고정자가 계통에 연결되기까지 20~40msec의 시간이 소요된다. 이 시간동안에 회전자 전류의 제어방법이 변경될 경우, 고정자와 계통이 연결되는 순간 고정자 정격의 수배 이상의 과전류가 인가된다. 과전류를 해결하기 위하여, 이 시간동안에도 회전자 전류는 고정자 전압을 동기화시킬 수 있도록 제어되어야 하며, 실제 자기 접촉기가 투입된 이후에 속도제어를 실행하여야 한다.

3. 실험

제한한 알고리즘을 검증하기 위하여 이중여자 풍력 발전 시뮬레이터를 설계, 제작하여 실험을 진행하였다. 그림 5에서 제작한 컨버터-인버터 세트를 보여주고 있다.

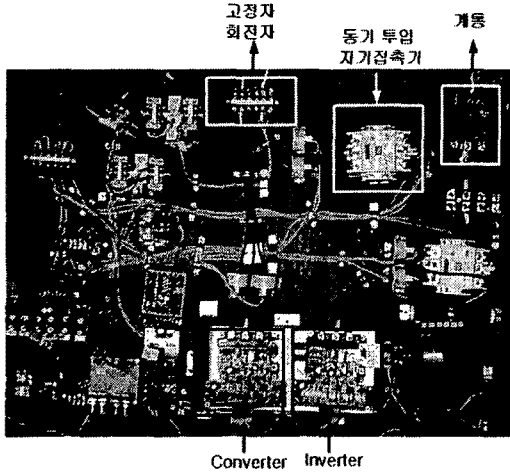


그림 5. 컨버터-인버터 세트

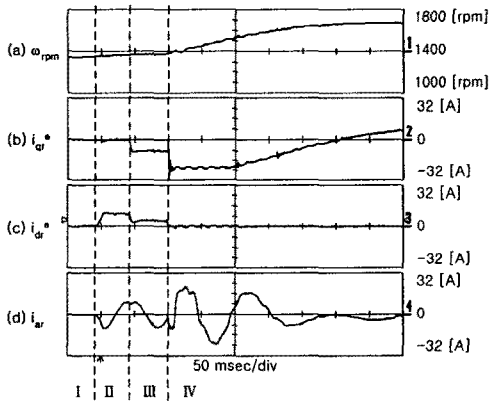


그림 6. 이중여자 유도 발전기의 동기 투입

- (a) 발전기의 회전속도 ω_{rpm}
- (b) 동기 좌표계 회전자 q축 전류 i_{qr}^s
- (c) 동기 좌표계 회전자 d축 전류 i_{dr}^s
- (d) 회전자 a상 전류 i_a

그림 6과 그림 7은 동기 투입 순간 이중여자 유도기의 전압과 전류, 회전자 권선과 고정자 권선의 위상차 θ 를 보여주고 있다. 그림 6과 7에서 구간 I은 발전기의 회전 속도가 발전 개시 조건이하의 경우이고, 구간 II에서는 고정자 권선과 회전자 권선의 위치각 차이를 측정하기 위하여 회전자에 d축 전류만 인가하고 있다. 구간 III에서는 고정자 전압을 계통 전압에 동기화 시키고, 구간 IV는 동기화가 완료되어 고정자가 계통에 연결되어 있다. 발전기의 회전속도가 일정 속도 이상이 되면 (구간II) 그림 6의 (c)와 같이 회전자의 d축 전류를 인가한다. 이때, 그림 7의 (a)와 (b)에서 볼수 있듯이 계통 전압과 고정자에 유기된 전압은 위상차를 갖고, 이 위상차를 측정하면 고정자와 회전자 권선의 초기 위치각 차이를 측정할 수 있다. 그리고, 구간 III에서와 같이 d축 전류와 q축 전류를 동시에 인가하여 고정자에 유기되는 전압을 계통에 동기시키고, 동기화 여부를 판단하

여 고정자와 계통 사이의 자기 접촉기를 동작시킨다. 이 구간에서 고정자 전압과 회전자 전압은 그림 7의 (a)와 (b)처럼 위상과 전압이 같아지게 된다. 그리고, (d)에서 볼 수 있듯이 이 구간에서 두 전압 사이의 위상차는 0이 된다. 구간 IV는 자기 접촉기가 동작된 이후를 보여준다. 계통 전원이 고정자에 투입되었기 때문에 고정자 전압과 계통 전압 사이의 위상차는 없으며, 발전기는 속도 제어 모드로 동작한다.

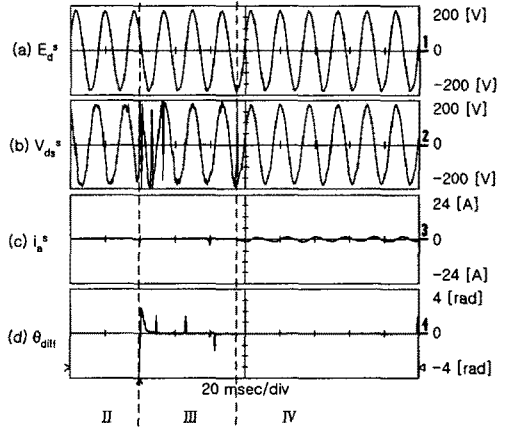


그림 7. 이중여자 유도 발전기의 동기 투입

- (a) 정지 좌표계 계통 d축 전압 E_d^s
- (b) 정지 좌표계 고정자 d축 전압 V_{ds}^s
- (c) 정지 좌표계 고정자 a상 전류 i_{as}
- (d) 계통 전압과 고정자 전압의 위상차 θ_{diff}

4. 결 론

이중여자 풍력 발전시스템은 발전이 가능할때만 고정자를 계통에 투입하고, 정지상태에서는 고정자를 계통에서 분리한다. 이때, 고정자를 계통에 투입하는 순간, 고정자 유기 전압과 계통 전압의 오차에 의해 발생하는 과도전류를 억제할 수 있는 제어 방법이 요구된다. 본 논문에서는 별도의 소프트 스타터를 사용하는 대신에, 이중여자 유도기의 회전자측 전력을 제어하기 위하여 사용되는 컨버터를 사용한 기동 제어 알고리즘을 제안하였으며, 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 향후에는 이중여자 풍력 발전 시스템의 고정자측을 계통에서 분리하는 알고리즘 및 정상 상태에서의 제어 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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, 2249-2254, 2000.
- [2] 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, 231-241, 1996.
- [3] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, Vol. 5, No.5, 451-458, 2000.
- [4] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력형 시뮬레이터", 대한 전기학회 논문지, Vol 51, No. 8, pp. 467-474, 2002.-