PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력발전기(DFIG) 모델링에 관한 연구

손준호[1], 노대석[1], 김찬혁[2], 왕용필[2]
[1]한국기술교육대학교, [2]한국전기산업연구원
e-mail: dsrho@kut.ac.kr

A Study on the Wind Power Generator(DFIG) Modeling Using the PSCAD/EMTDC

Joonho Son[1], Daeseok Rho[1], Chanhyeok Kim[2], Yongpeel Wang[2]
[1]Korea University of Technology and Education, [2]ERIK

요 약

최근 정부의 녹색성장(Green Growth) 정책으로 대규모의 풍력발전소 단지가 배전계통에 적극적으로 도입, 운용되고 있다. 풍력발전기의 대표적인 타입 중에 DFIG(Doubly-Fed Induction Generation)는 MSC와 GSC라는 2가지 요소로 구성된다. MSC(Machine-Side Converter)는 발전량을 이용하여 발전기의 토크 또는 회전속도를 제어하며, 발전기에 여자 전류를 공급함으로써 고정자에서 유입되는 무효전력 제어를 담당한다. 그리고 GSC(Grid-Side Converter)는 전력변환 장치의 직류단 전압을 제어하고, GSC와 배전계통 사이의 무효전력도 제어한다. 본 논문에서는 상기의 이론을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용한 DFIG 모델링을 수행하여, 다양한 Simulation으로 모델링의 유효성을 확인하였다.

1. 서 론

정부의 녹색성장 정책에 의하면 2030년까지 전체 에너지전원 중 신재생에너지의 비중은 전체 에너지원의 7.6%를 차지할 전망이다. 그리고 2008년도 지식경제부의 신재생에너지전원 중 풍력의 보급전망은 2020년 37%, 2030년 42%이다. 현재 풍력은 배전계통에 전용선로에 주로 연계되어 실 계통에 미치는 영향은 미미하지만, 향후 대규모의 풍력발전이 일반 배전선로에 확대 운용되면 전압품질 및 보호협조에 많은 문제를 야기할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 풍력발전이 배전계통에 연계 시, 수용가에 미치는 영향과, 배전계통의 외란이 풍력발전에 미치는 영향을 분석하기 위해서 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 DFIG를 모델링하였으며 시뮬레이션을 통하여 모델링의 유효성을 확인하였다.

2. DFIG 제어 이론

2.1 풍력에너지

풍력에너지는 임의의 단면적을 통과하는 공기의 운동에너지로 3가지 요소에 영향을 받는다. 첫째는 공기의 밀도로 단위체적당 질량에 의존한다. 둘째는 회전자의 면적이며 풍력터빈이 바람으로부터 얼마나 많은 에너지를 획득할 수 있는지 결정된다. 회전자의 면적은 회전자 직경의 제곱에 따라 증가하기 때문에 터빈의 직경이 2배 증가하면 풍력에너지는 4배를 더 획득할 수 있다. 셋째는 바람의 속도로 풍력 터빈이 전기를 변환할 수 있는 에너지의 양에 관련되기 때문에 중요한 요소이며, 바람이 가지고 있는 에너지는 평균 바람속도의 3승에 따라 비례한다. 즉 바람의 속도가 2배 증가하면 에너지의 양은 8배 증가한다. 위의 내용을 이용하여 원의 단면적을 수직으로 통과하는 바람의 동력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = \frac{1}{2}\rho V^3 \pi r^2 c_p \qquad (1)$$

여기서, P : 바람의 동력[W], ρ : 공기의 밀도 1.225 [kg/m^3](해표면에서 대기압, 15℃), V : 바람의 속도[m/s], r : 회전자의 반경[m], c_p : 풍력발전기의 출력계수[%]

2.2 DFIG의 유도 발전기

MSC(Machine-Side Converter)측면에서는 발전량 및 무효전력제어, 그리고 GSC(Grid-Side

Converter)측면에서는 직류단 전압 및 무효전력제어를 위해, 발전기의 3상 고정자 및 회전자의 등가 모델링 후, 전압 및 전류의 d-q좌표변환이 요구된다. DFIG의 유도발전기 모델링에 관한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$T_{es} = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_s}(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2)$$

$$T_{er} = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_r}(\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (3)$$

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} i_{ds} - V_{qs} i_{qs}) \quad (4)$$

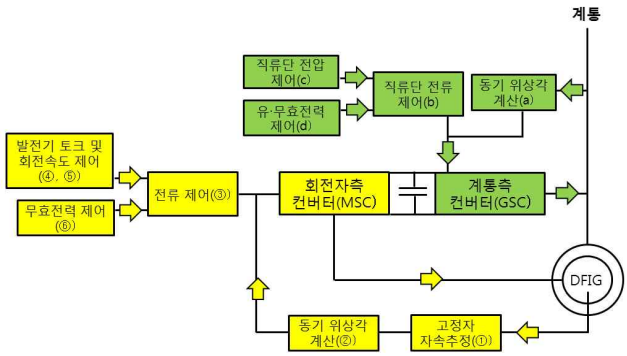
$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \quad (5)$$

여기서, T_{es} : 유도기의 고정자 토크[Nm], T_{er}: 유도기의 회전자 토크[Nm], P : 유도기의 극수, P_s : 유도기의 고정자 유효전력[W], Q_s: 유도기의 고정자 무효전력[VAR], L_s: 고정자권선의 자기 인덕턴스[H], L_r: 회전자권선의 자기 인덕턴스[H], L_m: 고정자와 회전자 권선 사이의 상호인덕턴스[H], $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$: 고정자의 d-q축 자속[Wb], $\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$: 회전자의 d-q축 자속[Wb], i_{ds}, i_{ds}: 고정자의 d-q측 전류[A], i_{dr}, i_{dr}: 회전자의 d-q측 전류[A], V_{dr}, V_{qr}: 회전자의 d-q측 전압[V], $V_{ds}\, V_{qs}$: 고정자의 d-q측 전압[V]

식 (2)는 고정자 토크에 관한 식으로 DFIG의 MSC 제어에 사용되며, 식 (3)은 회전자 토크에 관한 식으로 DFIG의 GSC 제어를 위해 사용된다. 회전자에서 d-q축으로 변환된 유효전력은 동일한 좌표축 변수끼리의 곱에 비례한다. 즉 고정자의 유효전력을 계산하면 식 (4)와 같다. 또한 무효전력은 다른 좌표축 변수의 곱에 비례하며 고정자의 무효전력은 식 (5)와 같다.

2.3 MSC 제어

DFIG의 전체적인 제어 블록도를 나타내면 그림 1과 같다. 먼저 MSC는 그림 1의 하단부와 같이 총 6개의 요소로 구성된다. 즉, 고정자 자속의 추정(①)과 동기 위상각계산(②), 전류제어기(③)의 발전량 제어, 발전기의 토크(④), 회전속도(⑤) 제어, 발전기 여자전류공급에 따른 무효전력 제어(⑥)로 구성된다.



[그림 1] DFIG의 제어 블록도

2.4 GSC 제어

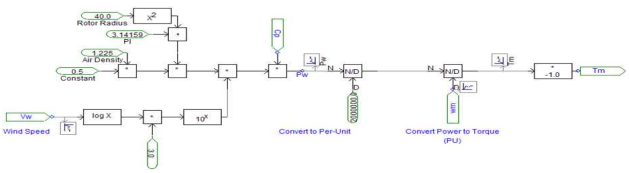
한편 GSC는 그림 1의 상단부와 같이 총 4가지 요소로 구성된다. 계통 전압의 위상각을 계산(a)하고 전류제어(b)를 하며, 직류단 전압 제어(c)와 무효전력을 제어(d)로 구성된다.

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 DFIG 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 1[MW]의 DFIG를 풍력에너지, MSC, GSC순으로 모델링을 수행하였다.

3.1 풍력에너지 모델링

풍력에너지는 상기의 식 (1)을 이용하여 그림 2와 같이 설계하였다. 회전자 반경은 40[m], 공기밀도는 1.225[kg/m^3], 바람의 속도는 11.5[m/s], c_p는 0.28로 이다. P_m는 토크와 회전각속도의 곱으로 나타낼 수 있으며, 유도발전기 입력인 토크로 변환해야한다. 실제 환산 시 토크는 0.62189[pu]이다.



[그림 2] 풍력에너지

3.2 MSC 모델링

(1) 고정자 자속 추정

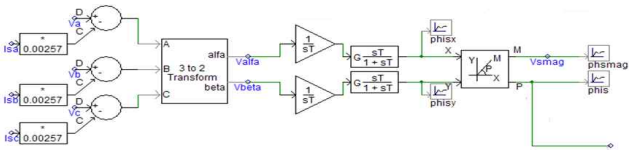
고정자 자속 추정은 그림 1의 ①이며, 식 (7)과 (8)을 이용하여 그림 3과 같이 구현하였다. 먼저 3상 고정자전압에서 발생되는 전압 강하분을 제거 후 d-q 정지좌표 변환한다. 그리고 2상의 교류 전압으로 변환된 값을 적분한 후에 Washout filter를 이용하여 적분된 자속의 DC성분을 제거한다. DC성분이

제거된 2상의 교류전압을 극좌표변환을 통하여 기준삼각파를 얻음으로써 MSC 고정자 자속의 현재 위치를 알 수 있다.

$$\lambda_{ds}^{s} = \int [V_{ds}^{s} - r_s i_{ds}^{s}]dt \quad (7)$$

$$\lambda_{qs}^{s} = \int [V_{qs}^{s} - r_s i_{qs}^{s}]dt \quad (8)$$

여기서, r_s: 고정자 권선 저항[Ω]

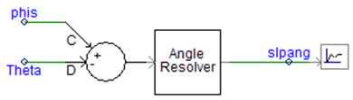


[그림 3] 고정자 자속 추정

(2) 동기 위상각 계산

그림 1의 ②에 해당되며, 식 (9)를 이용하여 그림 4로 구현하였다. 즉 고정자 자속과 회전자 전류에 의한 회전자 위치의 차이를 각도로 변환하였으며, 이는 MSC의 기준 삼각파이며 항상 동일한 위상을 얻을 수 있다.

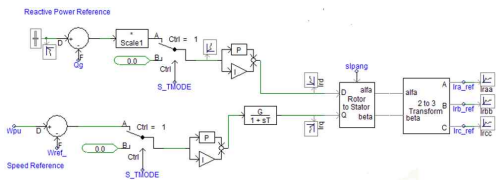
$$\lambda_{qs}^{s} = [L_r - \frac{L_m^2}{L_s}]i_{qr}^{e} \quad (9)$$



[그림 4] 동기 위상각 계산

(3) MSC의 속도/무효전력 제어

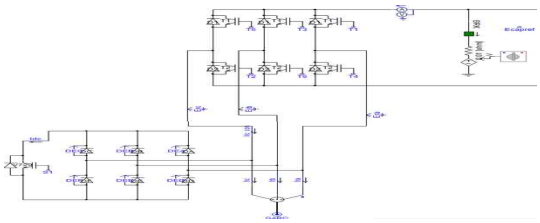
MSC의 속도 및 무효전력은 그림 1의 ⑤, ⑥이며 아래와 같이 구성하였다. PI제어 및 직류값을 3상 역변환 후, 3상 교류정현파가 출력된다.



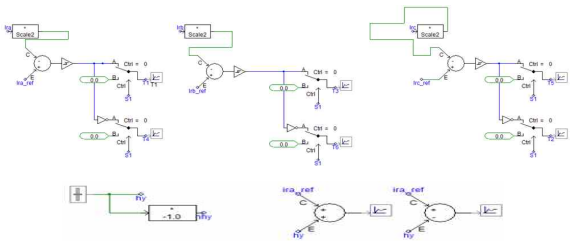
[그림 5] MSC의 속도/무효전력 제어

(4) MSC 회로

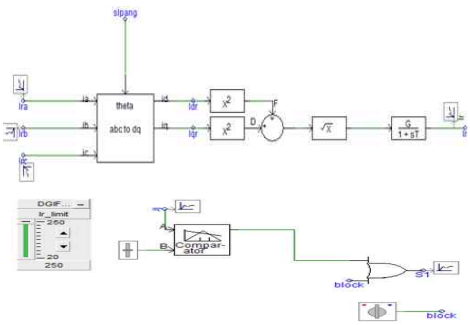
그림 6의 상단에는 CR-PWM을 기준으로 한 MSC가 있으며, 하단에는 Crowbar로 MSC의 과전류로부터 보호한다. 회전자 전류를 기준전류에 최적으로 제어하기 위해서 CR-PWM으로 MSC의 스위칭 신호를 만든다. CR-PWM는 토크 리플을 저감하여 진동을 줄일 수 있는 장점이 있다. 즉 그림 7과 같이 회전자 전류가 기준값보다 밑으로 내려가면 T1/D1이 ON되어 전압 (+)되어 높아지고, 반대로 높아지면 T4/D1이 OFF되고 T1/D2가 ON되어 전압이 (-) 되어 내려간다. Crowbar 회로는 그림 8과 같이 250[A]보다 부하전류가 클 경우 S1이 출력(1)되며, 과전류로 차단기가 동작되며 MSC는 정지하게 된다.



[그림 6] MSC회로



[그림 7] CR-PWM(Current-Reference PWM)

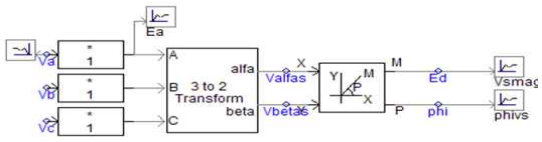


[그림 8] Crowbar 회로

3.3 GSC 모델링

(1) 위상각 계산

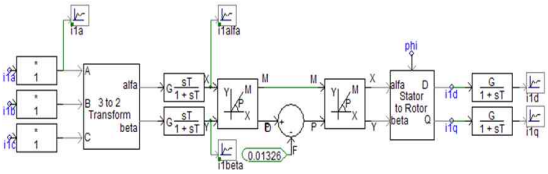
GSC의 위상각 계산은 그림 1의 (a)이며, 아래와 같이 모델링 할 수 있다. 2개의 교류전압을 극좌표변환을 통하여 기준삼각파와 직류 전압의 크기를 도출하였다. 그리고 2상의 교류전압을 극좌표변환을 통하여 기준삼각파와 직류 전압의 크기를 구한다.



[그림 9] 위상각 계산

(2) 직류단 전류제어

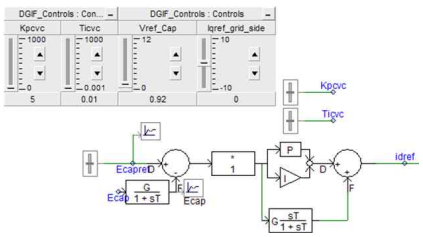
그림 1의 (b)이며, MSC의 전류 제어기와 동일한 구조를 가진다.



[그림 10] 직류단 전류 제어

(3) 직류단 전압제어

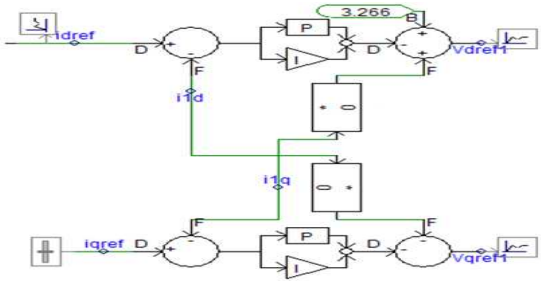
직류단 전압은 그림 1의 (c)이며, 10[KV]로 유지하기 위해 아래의 그림과 같이 모델링하였다. 직류단 유지전압과 현재 직류단전압 차이(전압오차)를 직류단 d축 전류와 일치시킨다. 즉 전류 변동 없이 전압을 항상 일정하게 조정 가능하도록 하기 위해서 전압오차를 PI제어로 보상 후 기준전류에 공급한다.



[그림 11] 직류단 전압 제어

(4) 유·무효전력 제어

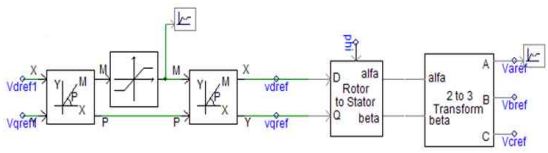
그림 12는 Decoupled id-iq controller이다. 그림 1의 (d)이며, id와 iq를 개별적으로 조절 할 수 있다. iq를 0으로 조절함으로써 무효전력을 항상 0[[VAR]로 유지 할 수 있다. 한편 id를 조절하여 원하는 유효전력을 발생시킬 수 있다. 그리고 Vdref1은 커패시터 전압오차에 의해서 조절되며 Vqref1은 고정자 무효전력 오차에 의해 조절된다. Vdref1와 Vqref1는 스위치들의 투입(동작)을 위한 고정자 기준전압을 발생하는데 사용된다.



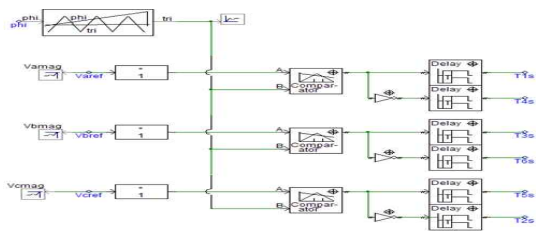
[그림 12] 유·뮤효전력 제어(Decoupled id-iq controller)

(5) GSC 회로

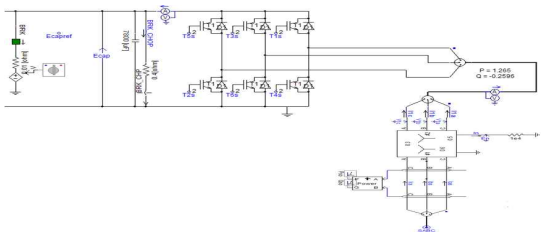
GSC 회로는 2부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 그림 13과 같이 동기좌표의 직류를 PWM의 스위칭 신호를 만들기 위해 120도의 위상차이가 발생하는 3상 교류전압으로 변환한다. 둘째는 그림 14와 같이 3상 교류전압과 기준삼각파를 비교하여 Sinusoidal PWM 스위칭 신호를 만든다. 이 스위칭 신호는 그림 15의 IGBT의 동작 신호이며, 결과적으로 120도 위상차이가 발생하는 3상 교류 정현파가 발생된다.



[그림 13] 직류->3상 교류변환



[그림 14] Sinusoidal PWM



[그림 15] GSC회로

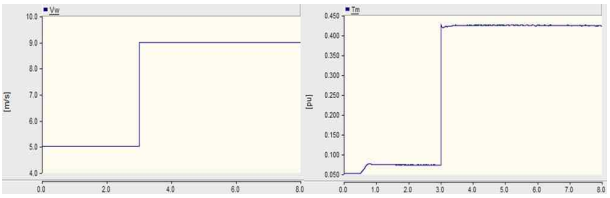
4. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이션 모델을 표 1과 같이 상정하여 풍속에 따른 출력의 변동을 분석하였다.

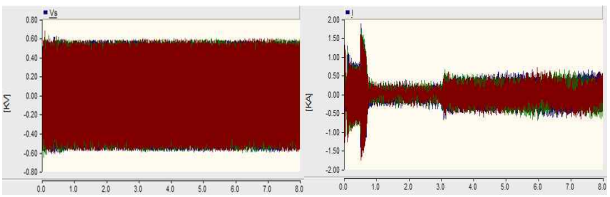
[표 1] 시뮬레이션 모델 및 조건

정격 용량	1[MW]
GSC 전압	0.350[kV]
모드	0 ~ 0.5[s] -> Speed 0.5 ~8[s] -> Torque
정격 풍속	0 ~ 3[s] -> 5[m/s] 3 ~ 8[s] -> 9[m/s]
로터 속도	0 ~ 3[s] -> 0.07[pu] 3 ~ 8[s] -> 0.41[pu]

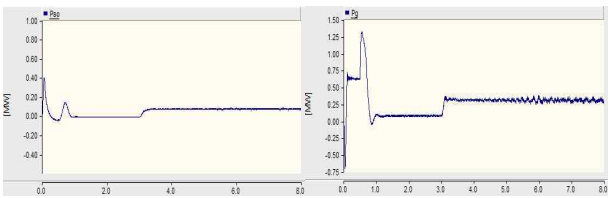
DFIG 유도기는 초기 계통에 연결될 때 풍력발전기의 회전자 속도에 따라 배전계통에 공급되는 전력량이 변할 수 있다. 이는 풍속에 대해 출력이 상당히 달라지게 되어 정출력 동작에 큰 영향을 줄 수 있으므로 풍력 발전기의 계통 연계시 고정자의 회전자속도와 같은 동기속도로 제어를 해준 상태에서 전력 계통으로 연결되는 것이 일반적이다. 그러므로 시뮬레이션에서는 0.5초의 시간을 두고 계통에 투입하도록 하였다. 그림 17과 같이 9[m/s]일 때 토크는 0.425[p.u]로 증가되었으며 그림 18에서 전압은 풍속에 상관없이 일정하지만 전류는 풍속에 비례하여 증가되었다. 최대 전류실효치가 230[A]까지 증가되었으며, 그림 19에서 계통측 유효전력 역시 400[kw]까지 증가되었음을 알 수 있다.



[그림 16] 풍속(좌) 및 로터 속도(우)



[그림 17] DFIG A,B,C상 전압(좌) 및 전류(우)



[그림 18] 고정자측 유효전력(좌) 및 계통측 유효전력(우)

5. 결론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 DFIG를 모델링하였으며, Simulation을 통하여 모델링의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

[1] 정병창, “이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 돌입 전류와 토크 리플 저감을 위한 발전기 제어 알고리즘”, 전북대학교, 박사학위논문, 2006. 2