

인버터 기반 풍력발전단지 등가 집합 시뮬레이션 모델의 구현

오해빈^[1], 김현식^[2]

^[1]가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과, ^[2]가천대학교 전기공학과

Implementation of Equivalent Aggregation Simulation Model for Inverter-based Wind Farms

Hae-Bin Oh, Hyeon-Sik Kim

^[1]Dept. of Next Generation Smart Energy System Convergence, Gachon University

^[2]Dept. of Electrical Engineering, Gachon University

ABSTRACT

본 논문에서는 인버터 기반 대규모 풍력발전단지의 집합 등가 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 대규모 풍력발전단지의 안정성 분석을 위해 단순화된 등가 집합 모델링은 필수적이다. 이를 위해 해밀턴 작용에 기반한 등가 모델링 기법과 등가 매개변수의 계산 방법을 적용하였다. 제안된 등가 모델을 통해 발전량 및 계통 상황 변동을 비롯한 동적 상황에서의 동특성을 보다 효율적으로 모델링 할 수 있다. 본 논문에서는 풍력발전시스템 모델에 대해 설명하고, 이를 기반으로 단순화된 등가 집합 모델을 모델링하였다. 제안된 인버터 기반 풍력발전단지 모델은 MATLAB/Simulink 및 PLECS를 통해 구현하였다.

1. 서론

태양광, 풍력 등의 신재생에너지를 사용한 친환경 발전원은 전 세계적으로 많이 사용되고 있으며, 계통에 연결된 대규모 신재생 발전원의 비율은 계속해서 증가할 것으로 전망된다. 대규모 풍력발전단지의 경우, 동일한 구조와 제어 방법을 가지는 인버터가 다중 병렬 연결된 경우가 많다. 이러한 다중 병렬 시스템의 시뮬레이션 분석은 계산 부담이 증가하여 많은 시간이 소요된다. 따라서 대규모 풍력발전단지 시스템의 효율적이고 정확한 등가 모델링이 필요하다. 여러 집합 등가 모델링 방법 가운데 계통 사고시 인버터 출력 전류의 변화율이 유사한 인버터를 군집하는 해밀턴 작용에 기반한 방법을 적용하였다. 이는 풍속, 즉 발전량이 서로 다름에도 보다 정확한 등가 집합 모델링이 가능하며 인버터의 동적 특성을 반영할 수 있다.

본 논문에서는 발전기 측 등가 집합 모델을 구현하기 위해 풍력발전 시스템에 속한 풍력터빈을 풍력 공기역학 함수를 기반으로 하나의 전류원으로 표현하였다. 해밀턴 작용으로 제시된 등가 집합 모델에 대해 설명하고, 이를 기반으로 풍력발전단지 시스템을 시뮬레이션 모델로 구현하였다. 제안된 시뮬레이션 모델의 타당성은 풍속 변동 및 계통 사고 등에 대하여 등가 집합 모델과 개별 모델의 비교를 통해 검증하였다.

2. 시스템 구성

그림 1은 2레벨 3상 계통 연계형 인버터 기반의 Type 4 풍력발전 시스템 구성을 나타낸다. 블레이드로 입력된 바람 에너지는 기계 에너지로 변환되어 PMSG와 발전기 측 컨버터를 거쳐 전기 에너지로 변환된다. 변환된 전기에너지는 계통연계 인버터를 통하여 계통 전압, 주파수에 맞게 변환시킨 후 출력 고조파 필터와 변압기를 거쳐 계통으로 공급된다. 이 때, 등가

LCL 출력 필터는 인버터 측 인덕터 L_f , 커패시터 C_f , 댐핑 저항 R_f 및 변압기 임피던스를 포함한 계통 측 인덕터 L_t 로 구성된다.

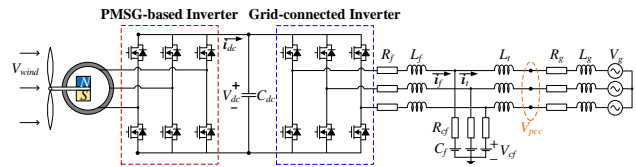


그림1. 풍력발전 시스템 구성

2.1 풍력 발전기 모델

풍속 V_{wind} 의 바람이 불 때, 풍력발전 시스템의 블레이드가 받아들이는 에너지는 식 (1)과 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{blade}^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서, R_{blade} 는 터빈 블레이드가 커버하는 유효면적의 반지름 [m], ρ 는 공기 밀도, $C_p(\lambda, \beta)$ 는 주속비(Tip Speed Ratio) λ 와 피치각 β 의 함수로서 블레이드의 출력계수이다. 출력계수는 주어진 풍속과 회전자 속도, 피치각에 대해 블레이드의 기계적 에너지로 입력되는 비율을 의미하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\Gamma} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\Gamma}} \quad (2)$$

여기서, $C_1 \sim C_6$ 및 x 는 블레이드 형상에 따른 상수이며 변수 $1/\Gamma$ 는 식 (3)과 같이 정의한다.^[3]

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

위의 식 (2)와 (3)에서 피치각이 0° 로 일정하게 유지된다고 가정하면, 출력계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 를 $C_{p,max}$ 로 최대화하는 최적의 주속비 λ_{opt} 는 풍속에 관계없이 하나의 값으로 정해지며, 이에 따라 최대 가능출력 P_{max} 는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{blade}^2 V_{wind}^3 C_{p,max}(\lambda_{opt}, \beta) \quad (4)$$

2.2 계통 측 인버터 제어

계통측 인버터는 상위 제어인 직류단 전압 제어와 하위 제어인 계통 전류 제어로 구성된다. 이때, 발전기 측 컨버터에서 공급되는 입력 전력에 따라 직류단 전압이 변화하므로 입력 전력을 제어함으로써 직류단 전압을 제어할 수 있다. 따라서, 직류단 전압을 일정하게 제어하여 풍력 발전기로부터 계통으로 최대 유효 전력을 전달하는 것을 목적으로 하며 계통으로 전달되는 유효전력은 식 (5)와 같다. 계통으로 출력되는

무효전력이 0이 되도록 하기 위해 d축 전류 i_d 를 0으로 제어하고, 직류단 전압 제어에서 PI 제어를 통해 유효 전력분 q축 전류 지령 i_q^* 을 결정한다.^[5]

$$P = \frac{3}{2}(e_q^e i_q^e + e_d^e i_d^e) = \frac{3}{2}E i_q^e \quad (5)$$

3. 등가 집합 모델링

개별 모델과 등가 집합 모델의 회로도도 그림 2와 같다. 등가 모델 시뮬레이션 구현을 위해 풍력발전원, 3상 인버터, LCL 필터는 등가 집합 모델로 구현하였다. 여기서, 개별 풍력발전 시스템의 개수는 3개로 선정하였다.

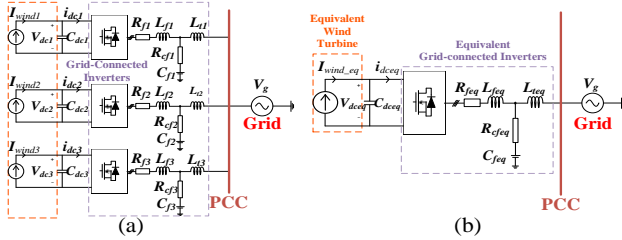


그림 2. 집합 풍력발전 시스템 구성. (a)개별 모델 (b)등가 집합 모델

3.1 풍력발전 시스템 등가 모델

개별 풍력발전기의 출력의 총합은 등가 풍력발전단지의 출력과 같아야 한다. 병렬 풍력발전 시스템과 등가 집합 시스템 간의 전력 관계는 식 (6)과 같다.

$$P_{Windeq} = \sum_{l=1}^n P_{Windl} \quad (6)$$

발전기 측 컨버터가 식 (4)와 같이 최적의 주속비를 유지하여 최대 전력 P_{max} 를 출력하고, 일정한 직류단 전압 제어가 이루어지고 있다는 가정하에 입력 DC 전류는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{wind} = \frac{P_{wind}}{V_{dc}} = \frac{P_{max}}{V_{dc}} = \frac{1}{V_{dc}} \left\{ \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 C_{p,max} (\lambda_{opt}, \beta) \right\} \quad (7)$$

이 때 각 개별 풍력 터빈의 블레이드 면적이 서로 같다면 등가 입력 DC 전류는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 따라서, 그림 2와 같이 풍력발전원을 개별 전류원의 합으로 표현하여 풍력발전 시스템의 등가모델을 구현할 수 있다.

$$I_{wind_eq} = I_{wind1} + I_{wind2} + I_{wind3} \\ = \frac{1}{V_{dc}} \frac{1}{2} \rho A (V_{Wind1}^3 + V_{Wind2}^3 + V_{Wind3}^3) C_{p,max} \quad (8)$$

따라서 전류원으로 등가 모델링 할 시 등가 풍속을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{Windeq}^3 = V_{Wind1}^3 + V_{Wind2}^3 + V_{Wind3}^3 \quad (9)$$

3.2 계통 연계형 컨버터 등가 모델

해밀턴 작용의 원리에 따르면, 계통 사고시 인버터의 전류 변화율이 다른 인버터의 전류 변화율과 일치하면 두 시스템은 일관성을 갖는다.^[2] 이러한 서로 일관성이 있는 시스템은 모든 상태변수가 비례하는 특성을 갖는다.^[4] 따라서 두 인버터의 전류 사이의 비율 관계를 식 (10)와 같이 표현할 수 있다. 식 (10)에서 K 와 k_L 은 상수이며, 아래 첨자 1과 2는 개별 인버터 1과 2를 의미한다.

$$\frac{i_{f1}}{i_{f2}} = \frac{i_{n1}}{i_{n2}} = \sqrt{\frac{K}{k_L}} \quad (10)$$

일관성을 갖는 두 시스템의 상태변수는 식 (11)의 관계를

만족한다.

$$\begin{cases} \frac{L_{f1}}{L_{f2}} = \frac{L_{n1}}{L_{n2}} = \frac{C_{dc2}}{C_{dc1}} = \frac{C_{f2}}{C_{f1}} = k_L \\ \frac{v_{pcc1}}{v_{pcc2}} = \frac{v_{dc1}}{v_{dc2}} = \frac{v_{cf1}}{v_{cf2}} = \sqrt{K k_L} \end{cases} \quad (11)$$

이를 기반으로 등가 집합 모델의 상태변수 값을 결정할 수 있다.^[4] 따라서, 계통 측 인버터의 직류단 캐패시터 및 LCL 필터의 등가 집합 매개변수는 식 (12)와 같이 유도할 수 있다. 마찬가지로, 계통 전류 PI 제어기 이득 값과 직류단 전압 PI 제어기의 이득 값은 제어 이득과 등가 매개변수의 관계에 따라 식 (13)과 같이 정의할 수 있다.^[4]

$$\begin{cases} C_{dceq} = \sum_{l=1}^n C_{dcl}, \quad C_{feq} = \sum_{l=1}^n C_{fl} \\ \frac{1}{L_{feq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{L_{fl}}, \quad \frac{1}{L_{teq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{L_{tl}} \\ \frac{1}{R_{feq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{R_{fl}}, \quad \frac{1}{R_{cfeq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{R_{cfl}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} k_{pdceq} = \sum_{l=1}^n k_{pdcl}, \quad k_{idceq} = \sum_{l=1}^n k_{idcl} \\ \frac{1}{k_{pdeq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{k_{pdll}}, \quad \frac{1}{k_{ideq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{k_{idll}} \\ \frac{1}{k_{paeq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{k_{pall}}, \quad \frac{1}{k_{iaeq}} = \sum_{l=1}^n \frac{1}{k_{iall}} \end{cases} \quad (13)$$

4. 시뮬레이션 결과

제안한 등가 모델링 기법은 MATLAB/Simulink 및 PLECS를 이용하여 그림 2과 같은 시스템을 구성하여 검증하였다. 시뮬레이션에 사용된 개별 모델 및 등가 집합 모델의 시스템 및 제어기의 제정수는 다음 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 매개변수 ($i=1 \sim 3$)

제정수	P	R_{dc}	C_{dc}	C_{cf}	R_f
i -차 개별 모델	2MW	1.1 mΩ	0.106 F	0.367 mF	0.72 mΩ
집합 등가 모델	6MW	0.375mΩ	0.318 F	0.001 mF	0.24 mΩ
제정수	L_f	R_{cf}	L_t	R_g	L_g
i -차 개별 모델	47.7 μH	24.8 mΩ	2.12 μH	0.72 mΩ	9.58 μH
집합 등가 모델	15.9 μH	8.3 mΩ	0.71 μH	0.72 mΩ	9.58 μH

제정수	k_{pdc}	k_{idc}	k_{pq}	k_{iq}	k_{pd}	k_{id}
i -차 개별 모델	181.14	12,139	0.09	8.17	0.09	8.17
집합 등가 모델	546.43	36,416	0.03	2.72	0.03	2.72

V_{dc}	1500 V	$C_{p,max}$	0.4412
R_{blade}	38 m	f_{sw}	10 kHz

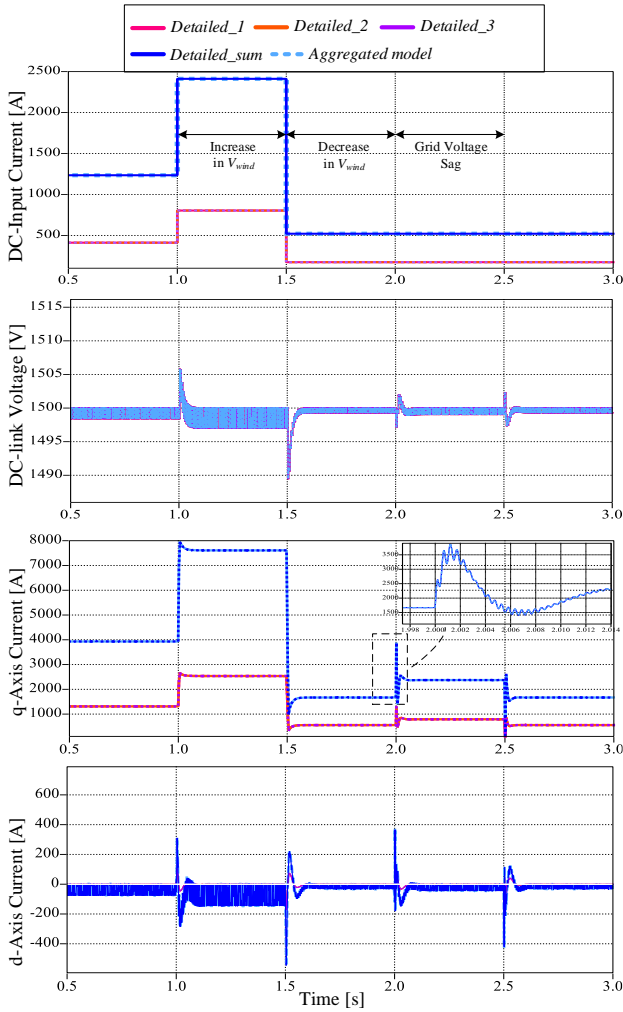


그림 3. 동일 풍속 변동 시 개별 모델과 등가 집합 모델의 시뮬레이션 결과

그림 3은 개별 발전원이 모두 같은 풍속으로 8→10→6[m/s] 순으로 순차적으로 변동한 뒤 3상 계통 전압에 30% 하강, 상승 시 동특성을 나타낸다. 직류단 입력 전류 및 전압, 계통 측 d/q 축 전류를 보았을 때, 등가 집합 모델의 정상 상태 특성과 동적 특성이 개별 모델의 합과 일치함을 확인할 수 있다.

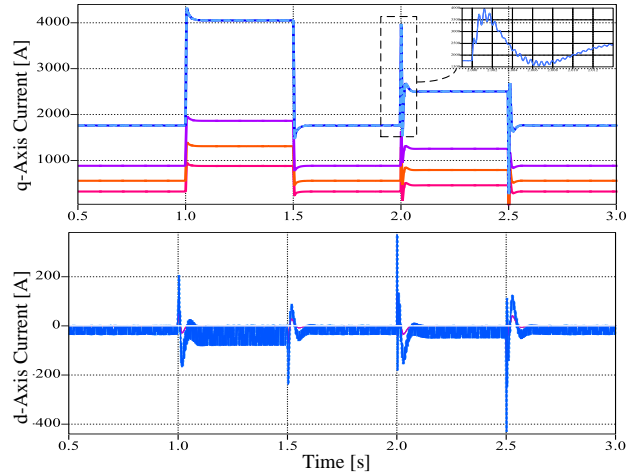
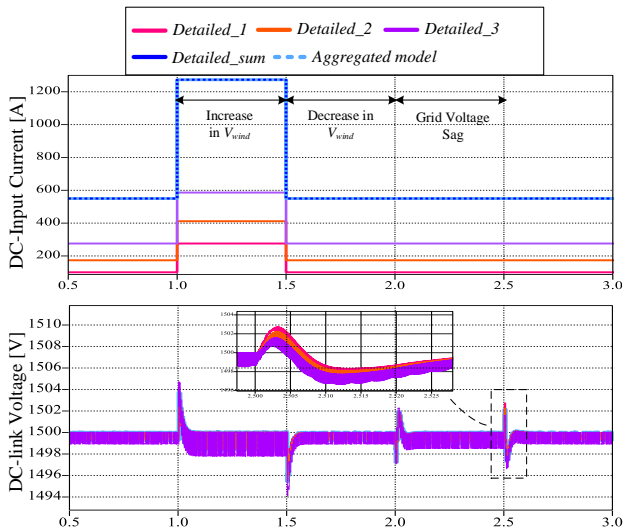


그림 4. 다른 풍속 변동 시 개별 모델과 등가 집합 모델의 시뮬레이션 결과

그림 4는 3개의 풍력발전 시스템에 서로 다른 풍속으로 5, 6, 7[m/s]에서 발전 시작 후 순차적으로 2[m/s]씩 증가, 2[m/s] 감소하여 변동한 뒤 3상 계통 전압이 30% 하강, 상승 시 동적 특성을 나타낸다. 서로 다른 발전원의 직류단 전압은 발전량에 따라 동적 응답이 다르지만 계통측 q축 전류와 d축 전류의 등가 집합 모델의 정상 상태 특성과 동적 특성이 개별 모델의 합과 일치함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 해밀턴 작용에 기반한 계통연계형 인버터 시스템의 등가 집합 모델링 방법을 통해 등가 매개변수 및 제어기의 이득 값을 선정하였고, 이에 기반한 등가 집합 모델을 시뮬레이션으로 구현하였다. 개별 모델과 비교한 결과, 집합 등가 모델로 단순화함에도 풍속 및 계통 전압 변동에 따른 풍력발전 시스템의 동적 특성을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2023년 착수 사외공모 기초연구 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R23XO05-8)

참고 문헌

- [1] B. Shao, S. Zhao, B. Gao, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Adequacy of the Single-Generator Equivalent Model for Stability Analysis in Wind Farms With VSC-HVDC Systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 2, pp. 907-918, Jun. 2021.
- [2] X. Zha, S. Liao, M. Huang, Z. Yang and J. Sun, "Dynamic Aggregation Modeling of Grid-Connected Inverters Using Hamilton's-Action-Based Coherent Equivalence," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 8, pp. 6437-6448, Aug. 2019.
- [3] 김정재, 송승호, "영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발", *전력전자학회논문지*, 10(6), pp.610-617, 2005.
- [4] Y. Han, X. Lin, P. Yang, L. Xu, Y. Xu and F. Blaabjerg, "Structure-Preservation Model Aggregation for Two-Stage Inverters Based Large-Scale Photovoltaic System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1824-1839, 2020.
- [5] 설승기, "전기기기 제어론", 홍릉과학출판사, 2009.