

인터리빙 방식을 이용한 3병렬 풍력 발전 시스템의 직류단 전류 리플 저감 기법

정민교, 아나톨리, 이교범
아주대학교

DC-Link Current Ripple Reduction with an Interleaving Scheme in Three-Parallel Wind Power System

Min-Gyo Jeong, Tcai Anatolii, and Kyo-Beum Lee
AJOU UNIVERSITY

ABSTRACT

본 논문에서는 3병렬 풍력발전 시스템의 직류단 전류 리플을 저감하기 위한 인터리빙 기법을 제안한다. 병렬 구조의 풍력 발전 시스템은 각 발전기 측 컨버터의 전류 고조파로 인해 직류단에 전류 리플이 발생한다. 이러한 전류 고조파들의 합과 관련된 전류 리플은 직류단 커패시터의 수명 단축 및 전체 시스템의 손실을 유발한다. 이를 방지하기 위해 3병렬 풍력발전 시스템에서의 전류 고조파를 분석하고, 전류 리플을 최소화하기 위한 최적의 인터리빙 각을 구하여 전류 리플을 저감하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 타당성을 PSIM 시뮬레이션을 통해 확인한다.

1. 서론

풍력발전 시스템은 다수의 풍력발전기와 전력변환장치인 back-to-back 컨버터를 병렬로 연결함으로써 전체 시스템을 대용량, 고효율화 할 수 있다. 하지만 다수의 풍력발전기를 직류단을 공유하여 병렬 연결하면 각 발전기 측 컨버터의 PWM (Pulse Width Modulation) 스위칭에 의해 발생하는 전류 고조파 성분에 의해 전류 리플이 발생한다. 이러한 전류 리플은 직류단 커패시터의 수명 단축 및 전체 발전 시스템의 전력 손실과 신뢰성에 문제가 될 수 있다.^[1] 따라서, 직류단을 공유하는 병렬 시스템에서 전류 리플 저감 기법은 필수적이다.

본 논문에서는 SPWM (Sinusoidal PWM)과 SVPWM (Space Vector PWM) 스위칭 방식을 고려하여 전류의 고조파를 이종적분 푸리에 급수를 통해 분석하고, 이를 통해 최적의 인터리빙 각을 계산하여 수행함으로써 각 발전기 측의 컨버터가 공유하는 직류단의 전류 리플을 저감하는 기법을 제안한다. 또한, PSIM 시뮬레이션의 결과를 통해 제안하는 직류단 전류 리플 저감 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 직류단 전류 리플 저감 기법

2.1 발전기 측 컨버터의 전류 고조파 분석

그림 1은 3병렬 풍력발전 시스템의 회로도이다. 3개의 풍력 발전기를 통해 발전된 전력은 back-to-back 컨버터를 통해 계통 측으로 이동한다. 하지만 발전된 전력이 교류에서 직류로 전력 변환되어 직류단 측으로 이동하는 과정에서 PWM 스위칭에 의해 전류에 고조파가 발생한다. 이와 같이 발생한 전류의 고조파는 직류단의 전류 리플 성분이 되어 전체 시스템의

효율을 감소시킨다. 따라서, 직류단을 공유하는 병렬 시스템은 전류 리플 성분의 저감을 위해 PWM 스위칭에 의해 발생하는 전류의 고조파에 대한 분석이 필수적이다.

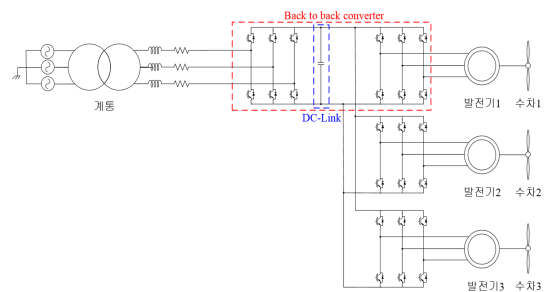


그림 1 병렬연결 풍력발전 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of the three-parallel wind generation system

각 발전기 측 컨버터에 의해 직류단 측으로 흐르는 전류는 PWM 스위칭 방식에 따른 스위칭 함수와 입력 3상 전류로 표현 된다. 여기서, 스위칭 함수는 PWM 스위칭 방식에 따라 다른 값을 갖게 되는데, 이를 이종적분 푸리에 급수를 통해 시변 함수로 나타내면 식 (1)과 같다.^[2]

$$S(t) = \frac{A_{00}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_{0n} \cos(ny) + B_{0n} \sin(ny)] + \sum_{m=1}^{\infty} [A_{m0} \cos(mx) + B_{m0} \sin(mx)] + \sum_{m=1n=\pm 1}^{\infty} [A_{mn} \cos(mx + ny) + B_{mn} \sin(mx + ny)] \quad (1)$$

$(x = \omega_c + \theta_c, y = \omega_o + \theta_o)$

여기서, ω_c 와 θ_c 는 반송파의 각속도 및 초기 각, ω_o 와 θ_o 는 지령 전압의 각속도 및 초기 각이며, 식의 좌측 첫째항부터 각각 직류 성분, 지령 전압 파형 성분에 의한 기본파 성분, 반송파 성분, 기본파와 반송파의 영향을 받아 나타나는 측파대 성분을 나타낸다. 식에서 나타나는 이종 적분 푸리에 급수의 계수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$A_{mn} + jB_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{x_{down}}^{x_{up}} S(t) e^{j(mx+ny)} dx dy. \quad (2)$$

위의 식들을 통해 스위칭 함수를 구하고, 이를 입력 3상전류와 합성곱을 하면, 식 (3)과 같이 발전기 측 컨버터에 의한 전류의 식을 주파수 측면으로 나타낼 수 있다.

$$i_{dc1} = i_a \otimes S_a(m,n) + i_b \otimes S_b(m,n) + i_c \otimes S_c(m,n) \quad (3)$$

식 (3)과 각 스위칭 방식 관련 식을 통해 구한 SPWM 방식과 SVPWM 방식의 전류의 고조파 성분은 2차 기본파 성분에 분포함을 알 수 있다.^[3]

2.2 전류 리플 저감을 위한 인터리빙 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 앞서 분석한 각 발전기 측 컨버터에서 발생하는 전류 고조파에 의해 직류단에 발생하는 전류 리플을 인터리빙 방식을 통해 저감한다. 제안하는 인터리빙 방식은 그림 2와 같다.

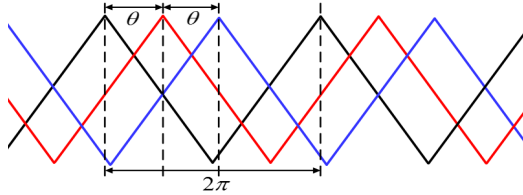


그림 2 인터리빙 각의 정의
Fig. 2 Definition of the interleaving angle

각 θ 만큼 인터리빙을 수행한 이 삼각파들은 각 컨버터의 반송파로 사용된다. 인터리빙 기법을 수행한 각 발전기 컨버터 측의 전류 성분은 θ 를 이용해 식 (4)와 같이 표현 된다.

$$i_{dc3-h}(m,n) = i_{dc2-h}(m,n)e^{jm\theta} = i_{dc1-h}(m,n)e^{jm2\theta} \quad (4)$$

병렬 연결된 풍력발전 시스템에서의 직류단 측 전체 전류 리플의 크기는 식 (5)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} |i_{dc-h}| &= |i_{dc1-h}(m,n) + i_{dc2-h}(m,n) + i_{dc3-h}(m,n)| \\ &= |i_{dc1-h}(m,n)(1 + e^{jm\theta} + e^{jm2\theta})| \end{aligned} \quad (5)$$

오일러 공식과 삼각함수 공식을 통해 식 (5)를 전개하면, 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$|i_{dc-h}| = |2\cos m\theta + 1| |i_{dc1-h}| \quad (6)$$

제안하는 3병렬 풍력발전 시스템에서 SPWM과 SVPWM 스위칭 방식이 2차 기본파 성분에서 가장 큰 전류 고조파를 포함하고 있음을 고려하면, $\theta = 60^\circ$ 만큼 인터리빙 기법을 수행할 경우 가장 직류단의 전류 리플을 저감할 수 있음을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션

제안하는 직류단 전류 리플 저감 기법의 시뮬레이션은 그림 1과 같이 3상 계통 연계형 2레벨 인버터와 직류단을 공유하며 병렬 연결된 영구자석 동기 발전기를 사용하여 진행하였다.

최적의 인터리빙 각을 분석하여 기법을 수행함으로써, SPWM과 SVPWM 스위칭 방식에 의해 발생하는 직류단 전류 리플의 저감 효과를 표 1을 통해 확인할 수 있다.

표 1 각 스위칭 방식 별 인터리빙 각에 따른 전류 리플 값
Table 1 The current ripple according to interleaving angle

		스위칭 방식에 따른 전류 리플[RMS 값]	
		SPWM	SVPWM
인터리빙 각	0°	19.45 A	20.19 A
	30°	11.46 A	11.74 A
	60°	7.20 A	9.55 A
	90°	12.21 A	5.72 A

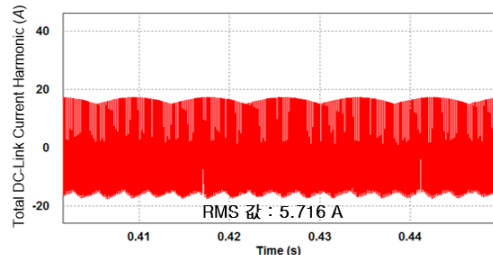
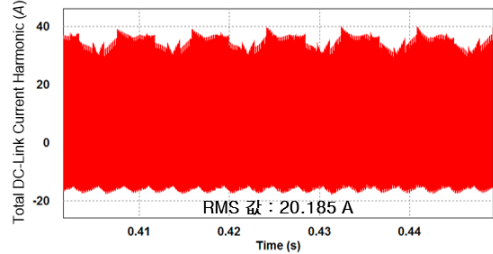


그림 3 SVPWM 스위칭 방식을 이용한 직류단 전류 리플 시뮬레이션 파형 (a) 인터리빙 기법 적용 전 (b) 60° 인터리빙 기법 적용 후

Fig. 3 DC-link current harmonics with SVPWM scheme (a) Without interleaving control and (b) With 60° interleaving control

그림 3은 SVPWM 스위칭 방식을 사용하는 시스템에서 제안하는 인터리빙 기법 수행 전과 후의 직류단 전류 리플의 시뮬레이션 파형이다. 각 발전기 측 컨버터의 전류 고조파에 의해 발생하는 직류단의 전류 리플의 RMS 값을 비교하였을 때, 제안하는 기법을 수행함에 따라 전류 리플이 저감됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3병렬 풍력발전 시스템에서 공유하는 직류단의 전류 리플 저감을 위한 인터리빙 기법을 제안한다. 제안하는 방식은 먼저 이중적분 푸리에 급수를 통해 각 발전기 측 컨버터의 PWM 스위칭 방식에 따라 발생하는 전류의 고조파를 분석한다. 분석한 전류 고조파들의 합에 의해 발생하는 직류단의 전류 리플은 계산을 통해 얻은 최적의 인터리빙 각을 이용함으로써 저감된다. 제안하는 전류 리플 저감 방식의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] H. Ye and A. Emadi, "An Interleaving Scheme to Reduce DC-Link Current Harmonics of Dual Traction Inverters in Hybrid Electric Vehicles," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 29th Annual IEEE, pp. 3205-3211, Mar. 2014.
- [2] D. G. Holmes and T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters-Principle and Practice, New York/Piscataway, NJ: Wiley IEEE Press, 2003.
- [3] D. Zhang, F. Wang, R. Burgos, R. Lai, and D. Boroyevich, "DC-Link Ripple Current Reduction for Paralleled Three-Phase Voltage-Source Converters with Interleaving," IEEE Trans. Power Electron, vol. 26, no. 6, pp. 1741-1753, Jun. 2011.