

해상 풍력 발전용 3-level ANPC PWM inverter 스위칭 소자의 열 분석 모델링을 통한 손실 분배 기법

현승욱*, 이희준*, 신수철*, 이종무*, 원충연*
성균관대학교*

Loss Distribution based on electro thermal model of 3-level ANPC PWM inverter switches for Off Shore Wind Power System

Seung Wook Hyun*, Hee Jun Lee*, Soo Cheol Sin*, Jong Mu Lee Chung Yuen Won
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

본 논문에서는 3레벨 NPC(Neutral Point Clamped)와 Active NPC 인버터의 스위치 손실 분배 기법에 따른 출력전력 분석을 하였다. 기존 3레벨 NPC 인버터의 경우 특정 불균형한 스위치 발열 때문에 전력밀도를 높이 설계할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 ANPC inverter의 손실 분배기법을 적용하여 시뮬레이션으로 검증하였다.

1. 서론

PMSG를 이용한 풍력 발전 시스템 설계를 위해 DC/AC inverter 제어가 필요하다. 특히 해상 풍력 발전 시스템에서는 물리적인 공간의 제한을 받을 수밖에 없다. 그러므로 높은 전력밀도를 갖는 인버터 설계 기술이 필요하다.[1]

해상 풍력 발전 시스템에서는 3 level inverter가 많이 사용된다. 3 level inverter는 NPC inverter가 주로 사용된다. 하지만 NPC는 각 IGBT마다 손실이 균등하게 나타나지 않는 단점이 있어 가장 열이 많이 발생하는 IGBT를 기준으로 인버터의 용량을 제한할 수 밖에 없다. 이에 비해 ANPC는 NPC의 중성점 다이오드를 IGBT로 바꾸어 모드에 따라 원하는 스위치에서 손실이 발생하도록 제어할 수 있어 각각의 IGBT에서 발생하는 열을 균등하게 할 수 있다. 이를 통해 같은 스위치와 같은 방열 시스템으로 더 높은 전력밀도의 인버터 설계가 가능하다.

본 논문에서는 기본적인 NPC와 ANPC의 동작 특성을 설명하고 IGBT에서 발생하는 열을 모델링 하여 각각의 스위치에서 발생하는 열을 균등하게 제어하는 Loss Distribution 기법을 제안하였다.

2. NPC와 ANPC 동작 모드 및 손실

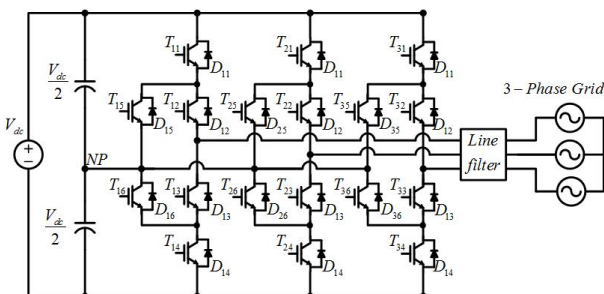


그림 1. ANPC(Active Neutral Point Clamped) PWM inverter

NPC와 ANPC의 스위칭 상태는 표 1과 표 2 와 같다.[1] 그림 2와 그림 3은 각각 NPC와 ANPC의 스위칭 상태와 전류의 변화에 따른 손실을 나타낸 그림이다. NPC에서는 스위칭 상태 변화에 따른 손실이 특정한 스위치에서만 나타나는 것을 볼 수 있지만 ANPC에서는 State"0"을 4가지 상태로 분할하여 그림과 같은 스위치에 손실이 나타나도록 제어할 수 있다.

표 1. 3-Level NPC 스위칭 상태

	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4
State"+"	1	1	0	0
State"0"	0	1	1	0
State"-"	0	1	0	1

표 2. 3-Level ANPC 스위칭 상태

	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6
State"+"	1	1	0	0	0	1
State"0U2"	0	1	0	0	1	0
State"0U1"	0	1	0	1	1	0
State"0L1"	1	0	1	0	0	1
State"0L2"	0	0	1	0	0	1
State"-"	0	0	1	1	1	0

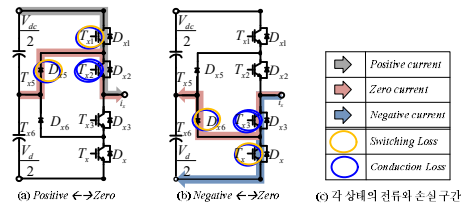


그림 2. NPC의 모드 전환에 대한 손실 분석

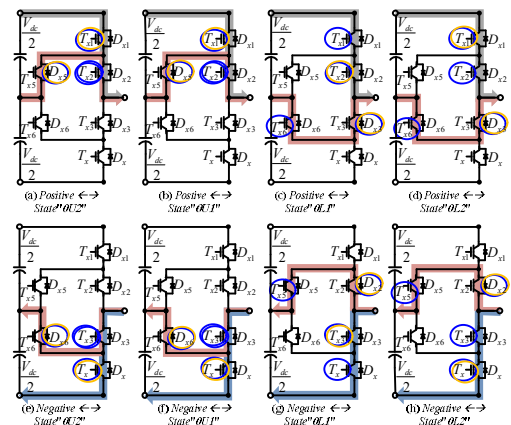


그림 3. ANPC의 모드 전환에 대한 손실 분석

3. Switch thermal modeling과 Loss Distribution

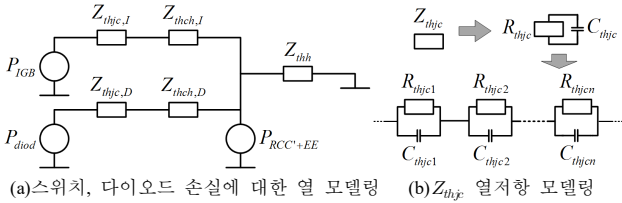


그림 4. IGBT의 열 임피던스에 대한 Thermal modeling

$$P_{av} = \frac{1}{T_0} \sum (E_{cond} + E_{on} + E_{off}) \quad (1)$$

$$= P_{cond} + P_{sw}$$

$$Z_{thjc} = \sum_{i=1}^n R_{thi} (1 + e^{t/\tau_i}) \quad (2)$$

그림 4(a)는 IGBT의 열 모델링 방식이고, IGBT에서 발생하는 손실은 식 (1)과 같다. 전체 손실은 집합부 케이스 열저항 Z_{thjc} 와 케이스 방열판 열저항 Z_{thch} , 방열판 열저항 Z_{thh} 로 모델링 되고, 열은 IGBT의 데이터시트에 기재된 Z_{thjc} 의 시정수에 따라 그림 4(b)와 같이 모델링 되며 식(2)와 같이 유도할 수 있다.[2] 발생하는 열은 식 (3)과 같이 계산한다.

$$\vartheta_j(k) = (1 - \frac{T_{sample}}{R_{th}C_{th}})\vartheta_j(k-1) + \frac{T_{sample}}{C_{th}}P_{av} \quad (3)$$

표 3은 ANPC의 State"0"를 선정하여 Loss Distribution을 하는 방법이다. 각각의 스위치 모델링을 통해 얻은 열을 비교하여 열이 적은 스위치에서 손실이 발생하도록 유도한다.

표 3. 각각의 스위치와 다이오드 온도특성 비교를 통한 ANPC의 Loss Distribution 기법[1]

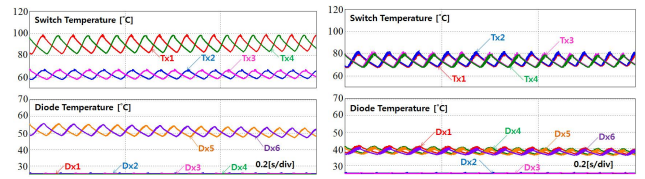
Modulation	Phase current	Junction temperatures		Zero State
Positive voltage (+ → 0)	$i_{ph} > 0$	$\vartheta_{jT1} > \vartheta_{jT2}$	$\vartheta_{jD5} > \vartheta_{jD3}$	0L1
			$\vartheta_{jD5} < \vartheta_{jD3}$	0L1
		$\vartheta_{jT1} > \vartheta_{jD3}$	0U2	
	$i_{ph} < 0$	$\vartheta_{jT1} < \vartheta_{jT2}$	$\vartheta_{jD5} > \vartheta_{jD3}$	0L2
			$\vartheta_{jD5} < \vartheta_{jD3}$	0U2
		$\vartheta_{jD1} > \vartheta_{jD2}$	0L1	
Negative voltage (- → 0)	$i_{ph} > 0$	$\vartheta_{jT2} > \vartheta_{jT6}$	$\vartheta_{jDx} > \vartheta_{jD3}$	0L2
			$\vartheta_{jT2} < \vartheta_{jDx}$	0U1
		$\vartheta_{jDx} < \vartheta_{jD3}$	0L2	
	$i_{ph} < 0$	$\vartheta_{jT2} < \vartheta_{jT6}$	$\vartheta_{jDx} > \vartheta_{jD3}$	0U1
			$\vartheta_{jDx} < \vartheta_{jD3}$	0U2
		$\vartheta_{jT2} > \vartheta_{jT6}$	0L2	
$i_{ph} < 0$	$\vartheta_{jT2} > \vartheta_{jT6}$	$\vartheta_{jDx} > \vartheta_{jD3}$	0U1	
		$\vartheta_{jDx} < \vartheta_{jD3}$	0U2	
	$\vartheta_{jT2} < \vartheta_{jT6}$	0L2		

4. 시뮬레이션

표 4는 시뮬레이션에서 사용한 스위치의 집합부 케이스 열저항과 임피던스 모델링에 대한 저항과 커패시턴스 값이다. 시뮬레이션에서는 NPC와 ANPC에서 동일한 스위칭 소자를 사용하여 열 비교를 하였다.

표 4. FF200R12KT4의 집합부 - 케이스 열저항 모델링

i	Switch				Diode			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_{thjc}	0.008	0.045	0.043	0.039	0.012	0.066	0.064	0.058
τ_i [s]	0.010	0.020	0.050	0.100	0.010	0.020	0.050	0.100
C_{thjc}	1.235	0.449	1.157	2.554	0.833	0.303	0.781	1.724



(a)NPC의 각 스위치 온도특성 곡선 (b)ANPC의 각 스위치 온도특성 곡선

그림 5. NPC와 loss-balancing 기법을 사용한 ANPC의 스위칭 소자의 온도특성 시뮬레이션

그림 6은 NPC와 ANPC의 스위칭 주파수와 지령토크에 대한 스위치 온도특성 그래프와 전력 생산 가능 범위를 비교한 그래프이다. 그림과 같이 ANPC는 NPC보다 온도가 낮기 때문에 같은 온도에서 생산할 수 있는 전력의 크기가 크다는 것을 알 수 있다.

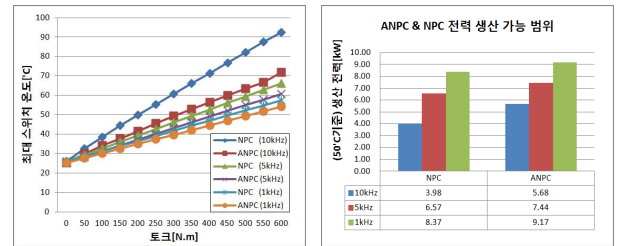


그림 6. NPC와 ANPC의 스위칭 주파수와 토크에 대한 스위치 온도특성과 전력 생산 가능 범위

5. 결론

본 논문에서는 스위치의 열 모델링을 통한 ANPC의 Loss Distribution을 제안하였고, NPC와 ANPC 스위칭 소자의 온도특성을 비교하였다. 이를 통해 NPC에서 제어되지 않는 스위치와 다이오드의 온도특성을 균등하게 제어하여 더 높은 전력을 사용할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 삼성중공업(2012T00100064)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

[1] Bruckner, T.; Bernet, S.; Guldner, H. "The Active NPC Converter and Its Loss Balancing Control" Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 52, Issue: 3

[2] Blasko, V.; Lukaszewski, R. "On the Loading of Power Modules in a Three Phase Voltage Source Converter" pp. 1241-1246, Proceedings of Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997