

3-레벨 인버터의 손실 개선을 위한 모듈분석

이광희*, 최재호*

충북대학교 전력전자연구소

The Module Analysis of 3-level Inverter for Low Power Loss

Kwang hee Lee , Jae ho Choi

School of Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea

ABSTRACT

전력변환장치의 효율을 개선하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있는 가운데, 본 논문에서는 3 레벨 인버터 중에서도 NPC 인버터와 T 타입 인버터를 사용한다. 각 인버터는 서로 다른 스위치 정격에 의해 손실 차이가 생기며, 또한 손실에 영향을 미치는 MI(Modulation Index), PF(Power Factor), 그리고 스위칭 주파수에 따라 손실의 크기가 좌우 되었다. 하지만 두 인버터는 각 구조의 특성상 NPC의 경우 도통손실이 매우 크며, T 타입의 경우 스위칭 손실이 크게 나타난다는 모듈상의 한계가 있다. 본 논문에서는 인버터 구조에 따라 손실에 지배적으로 영향을 미치는 각 Device의 특성을 고려하여, 전력변환장치에서 발생되어지는 도통손실과 스위칭손실을 분석 하였다.

1. 서론

시스템에서 사용되어지는 전력변환장치 중에서도 3 레벨 인버터는 정현파에 가까운 출력 전압을 갖으며, 전류 THD가 작다. NPC 인버터의 경우 스위치의 개수가 많아 T 타입 인버터 보다 도통손실이 크지만 각 소자의 정격을 낮게 가져감으로써 T 타입 인버터보다 작은 스위칭 주파수를 가지므로 스위칭에 가해지는 스트레스가 적어 스위칭 손실이 작다는 이점이 있다. 본 논문에서는 NPC 및 T 타입 모듈 IGBT를 이용하여 3 레벨 인버터를 구성하고, 인버터의 손실을 PSIM의 Thermal Module을 사용하여 확인한다. 또한 시뮬레이션에 적용한 파라미터 값들을 수식에 직접 적용하여 손실에 영향을 미치는 파라미터를 확인하고, 주어진 조건에서 각 회사별 모듈의 손실 계산과 시뮬레이션 결과를 비교하고자 한다. 또한 각 모듈의 손실 을 분석하여 인버터 구성 시 같은 정격을 갖는 스위치 일지라도 각각 도통손실과 스위칭손실의 비중을 고려하여, 인버터의 스위치를 구성 할 수 있도록 제시한다.

2. 3-레벨 NPC 및 T-타입 인버터 토폴로지

3 레벨 NPC 인버터는 그림 1과 같은 구조를 가지며, 각 상마다 4개의 IGBT와 역병렬 다이오드 그리고 2개의 클램핑 다이오드로 구성되며, T 타입 인버터에 비하여 소자의 개수가 많기 때문에 도통 손실이 상대적으로 크다. T 타입 인버터는 그림 2와 같은 구조를 가진다. 이는 NPC와 비교 할 경우 다이오드를 6개 줄인 구조이며, 최상단과 하단의 스위치 정격이 NPC 인버터의 2배이기 때문에 스위칭 손실이 크다는 단점이 있지만, 상단의 S_1 또는 하단의 S_4 을 통해서 도통될 경우 도통 경로상 스위치 하나만 도통이 되므로 NPC보다 평균적으로 도통소자의 개수가 적어 도통손실이 적다는 장점이 있다.

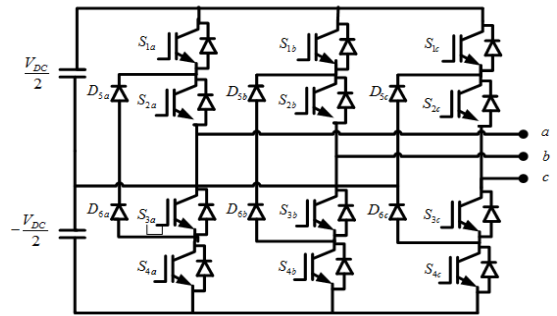


그림 1 3-레벨 NPC 인버터

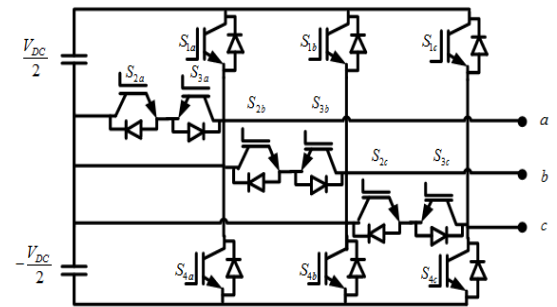


그림 2 3-레벨 T-타입 인버터

3. 3-레벨 인버터의 손실 계산

3.1 도통 손실 및 스위칭 손실

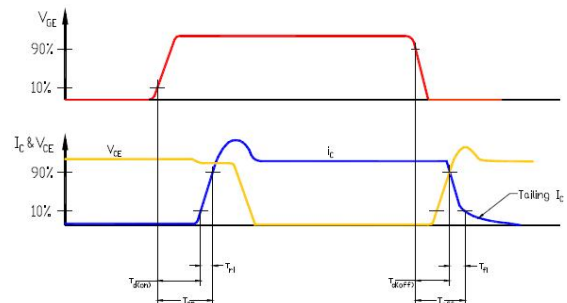


그림 3 IGBT의 스위칭 파형(5)

도통손실은 스위치가 포화영역에서 동작하는 동안 발생되는 손실로 포화전압과 이때 흐르는 전류의 곱으로 구해지며, 스위칭 손실의 경우 온, 오프시에 I의 영향으로 지연된 구간에서 흐르는 전류와 전압의 곱을 적분하여 구할 수 있다.

3.2 도통 손실 및 스위칭 손실 계산식(NPC 인버터)

$$IGBT(T_1, T_4) \quad P_{cond} = \frac{MI}{12\pi} \left\{ 3V_{ceo} \cdot [(\pi - \varphi)\cos(\varphi) + \sin(\varphi)] + 2r_{ce}\hat{I} \cdot [1 + \cos(\varphi)]^2 \right\} \quad (1)$$

$$IGBT(T_2, T_3) \quad P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{ceo} \cdot [12 + 3M(\varphi\cos(\varphi) - \sin(\varphi))] + r_{ce}\hat{I} \cdot [3\pi - 2M(1 - \cos(\varphi))]^2 \right\} \quad (2)$$

$$Clamping Diode(D_5, D_6) \quad P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \left\{ V_{fo} \cdot [12 + 3M(2\varphi - \pi)\cos(\varphi) - \sin(\varphi)] + r_f\hat{I} \cdot [3\pi - 4M(1 + \cos^2(\varphi))] \right\} \quad (3)$$

$$FWD(D_1, D_2, D_3, D_4) \quad P_{cond} = \frac{MI}{12\pi} \left\{ 3V_{fo} \cdot [-\varphi\cos(\varphi) + \sin(\varphi)] + 2r_f\hat{I} \cdot [1 - \cos(\varphi)]^2 \right\} \quad (4)$$

$$IGBT(T_1, T_4), Clamping Diode(D_5, D_6) \quad P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}}\right)^{K_I} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{ref}}\right)^{K_V} \cdot \left(\frac{1}{2\pi}[1 + \cos(\varphi)]\right) \cdot G_I \quad (5)$$

$$IGBT(T_2, T_3), Diode(D_1, D_4) \quad P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}}\right)^{K_I} \cdot \left(\frac{V_{CC}}{V_{ref}}\right)^{K_V} \cdot \left(\frac{1}{2\pi}[1 - \cos(\varphi)]\right) \cdot G_I \quad (6)$$

위의 수식은 NPC 인버터의 도통손실을 구하는 수식으로 도통손실의 경우 내부저항과 포화영역에서의 콜렉터 에미터 전압과 전류의 곱으로 나타내어지며, MI와 역률(cosφ)에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다.^[2]

스위칭 손실을 계산하기 위해서는 스위칭 주파수(f_{sw})와 스위치 온, 오프시 발생하는 에너지 손실(E_{on}, E_{off}, E_{rr})이 포함되며, 역병렬 다이오드(FWD)의 온 상태 손실의 경우 전체손실에 대해서 매우 작은 값을 가지므로 무시 한다. NPC 및 T 타입 인버터의 자세한 손실계산식은 참고문헌^[7]에 정리되어 있다.

3.3 시뮬레이션 및 손실 분석 결과(NPC 인버터)

본 논문에서는 V,I,사사의 NPC(600V,75A) 및 V,I,F사의 T 타입(1200V,80A)모듈을 대상으로 각각의 손실을 계산하고 시뮬레이션하여 각 모듈의 손실추이를 확인하였다. 아래의 표 1은 수식에 있는 파라미터를 정리한 것이며, 표 2는 각 NPC 와 T 타입 모듈의 세부 파라미터 값으로 이 값들을 시뮬레이션 값 및 손실계산 값으로 사용한다. 그 결과로 표 3과 표 4는 표 2를 토대로 NPC 및 T 타입 인버터의 손실 분석결과를 정리한 결과표이다.

표 1 수식 파라미터

\hat{I}	인버터 출력전류
MI	변조 지수
cosφ	역률
f_{sw}	스위칭 주파수
$E_{on/off}$	온 오프시 스위칭 에너지 손실

표 2 NPC 인버터 IGBT 파라미터

Parameter	Device A		Device B		Device C	
	NPC	T	NPC	T	NPC	T
Type	NPC	T	NPC	T	NPC	T
V_{CES}	600	1200	650	1200	600	1200
$V_{CE(Sat)}$	1.83	2.33	1.60	1.55	1.65	2.20
V_{ceo}	1	1.7	1	1	0.7	1
V_F	1.40	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5
V_{R0}	1	1.35	1	1	0.9	0.9
I_C	75	80	75	75	75	75
$E_{On}(mJ)$	1.88	0.96	0.60	0.60	1.7	2.3
$E_{Off}(mJ)$	2.58	2.24	2.30	1.60	2.8	2.8
$E_{rr}(mJ)$	1.33	2.42	1.50	1.30	1.1	1.1

표 3 Device Module 별 손실 결과(NPC)

손실결과	Device A		Device B		Device C	
	$f_{sw} = 10kHz, \cos\phi = 1, MI = 0.95$					
도통손실(1 Phase)	24.0460		24.0820		26.0272	
스위칭손실(1 Phase)	19.2150		20.6818		55.7047	
1 Phase 전체손실	43.5575		44.7638		81.7319	
전체 손실	PSIM	Cal	PSIM	Cal	PSIM	Cal
	129	145	132	152	243	254

* Device A: V사 Device B: I사 Device C: S사

표 4 Device Module 별 손실 결과(T-타입)

손실결과	Device A		Device B		Device C	
	$f_{sw} = 10kHz, \cos\phi = 1, MI = 0.95$					
도통손실(1 Phase)	19.1232		21.0291		20.6278	
스위칭손실(1 Phase)	10.7651		9.6907		13.2972	
1 Phase 전체손실	29.8883		30.7199		33.7348	
전체 손실(W)	PSIM	Cal	PSIM	Cal	PSIM	Cal
	88	108	91	111	99	110

* Device A: V사 Device B: I사 Device C: F사

4. 결론

본 논문에서는 3 레벨 NPC와 T 타입 인버터의 손실을 분석하기위하여 3가지의 모듈형태의 IGBT를 선정하였다. 각 모듈은 서로 비슷한 정격을 갖지만 같은 시뮬레이션 상의 조건에서 그 결과가 서로 상이하게 차이를 보였다. 따라서 NPC의 경우 같은 정격이라 할지라도 많은 스위칭을 요구하는 T_1, T_4 의 경우 스위치손실이 낮은 Device A 모듈을 가져감으로써 인버터에 사용하는 스위치의 손실을 줄일 수 있겠다. 그러므로, 위와 같이 손실분석을 함으로써 모듈을 각 토폴로지의 스위치 손실특성에 따라 선택적으로 가져갈 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 “충청지역사업평가원”의 “고신뢰성 대용량 태양광 전력변환시스템 개발”로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Patam Alemi, Dong Choon Lee “Power Loss Comparison in Two and Three Level PWM Converters”, 8th International Conference on Power Electronics ECCE Asia May 30 June 3, 2011
- [2] 김태진, 강대욱, 이요한, 현동석 “멀티레벨 인버터 시스템의 전도손실과 스위칭손실 해석” 전력전자학회, 전력전자학회 논문지 7(2), 2002. 4, 111 120(10 pages)
- [3] Fuji Electronics IGBT Module data sheet Online. Available : www.fujielectronic.com
- [4] Semikron IGBT Module data sheet Online Available : www.Semikron.com
- [5] IXYS IGBT Basics application note Online Available : www.Ixys.com
- [6] Vincotech IGBT Module data sheet Online. Available : www.vincotech.com
- [7] Semikron Application Note AN 11001 Online Available : www.Semikron.com