

대용량 수전해용 PWM 정류기의 토폴로지별 손실 및 효율 분석

최수진¹, 김해인¹, 유정선¹, 백승우², 김학원[†], 조관열¹
 한국교통대학교¹, 테크로스²

Comparative Analysis of Efficiency and Loss in Three High-Power PWM Rectifier Types

Su Jin Choi¹, Hae In Kim¹, Jeong Seon Yu¹, Seung Woo Back², Hag Wone Kim[†], Kwan Yuhl Cho¹

Korea National University of Transportation¹, Techcross²

ABSTRACT

본 논문에서는 수전해 시스템에 사용되는 대용량 정류기의 토폴로지별 손실을 분석하기 위하여 3상 2-Level PWM 정류기, 3-Level NPC 정류기 및 3-Level 비엔나 정류기에서 사용되는 다이오드와 IGBT의 도통손실과 스위칭 손실을 계산하고 PSIM의 Thermal Module을 사용하여 검증한다. 또한 토폴로지 차이에 의해 발생되어지는 손실 파라미터를 분석하고 토폴로지를 선정한다.

1. 서 론

최근 탄소중립을 위해 수전해 시스템의 연구가 활발해지고 있다. 수전해 시스템에서 물 전기분해를 통한 수소생산을 위해서는 DC전압이 공급되어야한다. 이에 따라 AC 전원인 계통전압으로부터 받은 전력을 DC전원 형태로 공급해주는 AC-DC 컨버터(이하 정류기)에 대한 연구가 필요하다. 수전해용 전력변환 장치의 용량은 10kW부터 크게는 MW급의 제품까지 점점 높은 용량으로 개발되어지고 있다. 기존의 대용량 특성을 가지는 시스템에서는 반도체 스위칭 소자의 내압 및 전류 용량문제로 인해 다이오드, 사이리스터 및 GTO(Gate Turn Off 사이리스터)를 이용한 토폴로지를 사용하였지만 최근 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 발전으로 인해, 대전력 시스템에도 고역율 달성에 유리한 PWM(Pulse Width Modulation) 정류기를 사용할 수 있게 되었다.

본 논문은 대용량 수전해용 정류기의 전력전달 효율 향상을 목적으로 하는 PWM 정류기의 토폴로지별 손실 분석을 통해 대용량 단위역률 시스템에 적용될 토폴로지의 선정을 목적으로 한다. 토폴로지는 기존에 가장 많이 알려져 있는 2-Level PWM 정류기, 멀티레벨 정류기인 3-Level NPC (Neutral-Point-Clamped) 정류기와 3-Level비엔나 정류기로 나누어 분석하였다. 각 토폴로지의 파라미터를 이용하여 손실을 계산하고 PSIM의 Thermal Module을 사용하여 토폴로지별 손실을 비교 분석하여 토폴로지를 선정하였다.

2. 정류기 토폴로지

2.1 2-Level PWM 정류기

3상 2-Level PWM 정류기 토폴로지는 그림 1과 같다.

2-Level 정류기의 회로구성은 각 상당 2개씩 총 6개의 IGBT가 상·하단으로 구성되어있다. 단자전압 $v_{A,B,C}$ 는 $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ 로 동작한다.

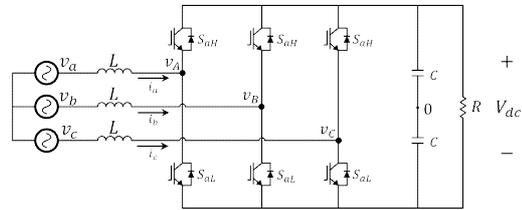


그림 1 2-Level PWM 정류기 회로도
 Fig. 1 2-Level PWM Rectifier Circuit Diagram

2.2 3-Level NPC 정류기

3상 3-Level NPC 정류기 토폴로지는 그림 2와 같다. 정류기의 회로는 각 상마다 2개의 IGBT와 4개의 다이오드로 구성된다. 단자전압 $v_{A,B,C}$ 는 $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$, 0 으로 동작한다.

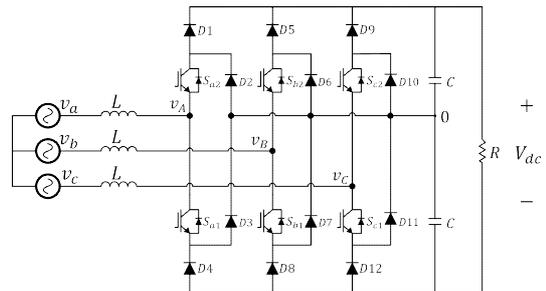


그림 2 3-Level NPC 정류기 회로도
 Fig. 2 3-Level NPC Rectifier Circuit Diagram

2.3 3-Level 비엔나 정류기

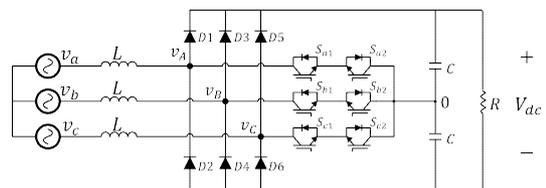


그림 3 3-Level 비엔나 정류기 회로도
 Fig. 3 3-Level T-type Rectifier Circuit Diagram

3상 3-Level 비엔나 정류기 토폴로지는 그림 3와 같다. 회로 구성은 각 상마다 2개의 IGBT와 2개의 다이오드로 구성된다. 단자전압 $v_{A,B,C}$ 는 $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$, 0 으로 동작한다.

3. 정류기 손실 계산

3.1 스위칭 손실

스위칭 손실에는 스위칭 주파수와 스위치가 온, 오프시 발생하는 에너지 손실 E_{on}, E_{off} 가 포함되며 입력전압 v_a 가 $V_{max}\sin\theta$ 이고 입력전류 i_a 가 $I_{max}\sin\theta$ 면 각 소자에 발생하는 손실을 각 소자의 데이터시트를 참고하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.^[1]

$$P_{sw} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (E_{on} + E_{off}) \sin\theta \cdot f_{sw} \cdot d\theta \quad (1)$$

$$= (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} \cdot \frac{1}{\pi}$$

3.2 도통 손실

도통손실은 스위치가 온 상태일 때, 전압강하에 의하여 발생되며 각 소자의 데이터시트를 참고하여 식 (2)와 같이 계산하였다.^[2]

$$P_{con} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\delta_1 P_{c1} + \delta_2 P_{c2} + \dots + \delta_n P_{cn}) \cdot d\theta \quad (2)$$

δ_n 는 각 소자들의 한주기 도통률이며, 매 스위치 상태에 따라 0 또는 1의 값을 가진다. P_{cn} 은 스위치와 다이오드의 도통손실로 소자 종류에 따라 P_{cT} 와 P_{cD} 로 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다. V_{CE} 와 I_C 는 스위치에 걸리는 전압 및 흐르는 전류이고 V_F 와 I_F 는 다이오드에 걸리는 전압 및 흐르는 전류이다.

$$P_{cT} = (V_{CE} \sin(\theta))(I_C \sin(\theta)) \quad (3)$$

$$P_{cD} = (V_F \sin(\theta))(I_F \sin(\theta)) \quad (4)$$

4. 시뮬레이션

4.1 Psim Thermal Module

앞에서 언급했던 토폴로지들을 PSIM Thermal Module에 적용하여 구성하였다. 각 토폴로지별 사용한 스위칭 소자는 표 1에 정리하였고 PSIM회로의 파라미터는 표 2에 정리 하였다. 토폴로지별 맥동값을 동일하게 만족 시키기위한 L, C값을 선정하여 사용하였다.

표 1 토폴로지 별 사용 소자
Table 1 Elements Used in Topology

Topology		2-Level PWM	3-Level NPC	3-Level Vienna
Diode	Manufacturer	-	Powerex	Infineon
	Part Number	-	A430N	D1230N16TX PSA1
IGBT	Manufacturer	Infineon	Infineon	Infienon
	Part Number	FZ2400R17HP 4_B9	FZ2400R12H E4_B9	FZ2400R12H E4_B9

표 2 정류기 파라미터

Table 2 Rectifier parameters

700kW Rectifier Parameter					
$v_{a,b,c}$ (rms/Hz)		220V/60Hz	V_{dc}		1000V
f_{sw}		20kHz	R		0.0125Ω
L	2-Level PWM	65μH	C	2-Level PWM	2.4mF
	NPC, Vienna	8μH		NPC, Vienna	0.28mF

표 3 토폴로지 별 손실 결과

Table 3 Loss Results by Topology

Topology	2-Level PWM		3-Level NPC		3-Level Vienna	
	PSIM	Cal.	PSIM	Cal.	PSIM	Cal.
도통손실[W] (1-Phase)	1428	1283	2259	2169	1854	1698
스위칭손실[W] (1-Phase)	15459	14943	5600	5612	5563	5612
IGBT손실[W] (1-Phase)	16978	16206	6879	6836	6856	6781
Diode손실[W] (1-Phase)	0	0	979	945	560	529
1-Phase 전체손실[W]	16978	16206	7859	7782	7417	7311
효율(%)	92.7		96.6		96.8	

5. 결 론

본 논문에서는 700kW급 2-Level PWM 정류기, 3-Level NPC 정류기와 3-Level 비엔나 정류기의 토폴로지 별 손실을 분석하여 표 3에 나타내었다. 도통손실과 스위칭손실 별, 스위칭소자 종류 별 손실을 나누어 분석하였다. 확인 결과 시뮬레이션 값과 계산 값이 근사함을 보였다. 전체손실의 경우 2-Level 정류기에서 가장 크게 나타났으며 3-Level NPC 정류기와 3-Level 비엔나 정류기의 경우 스위칭 손실은 서로 근사한 값을 보이고 도통손실에서 3-Level NPC 정류기가 더 큰 손실 값을 보인다. 소자별 손실을 보면 3-Level NPC정류기의 다이오드손실이 3-Level 비엔나 정류기 다이오드손실 보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 3-Level NPC 정류기의 동작 특성상 다이오드에 전류가 도통되는 시간이 3-Level 비엔나 정류기 보다 길기 때문이다. 따라서 토폴로지를 선정함에 있어 세 개의 토폴로지중 효율이 가장 높은 3-Level 비엔나 정류기를 선정하는 것이 손실 저감 측면에서 유리한 선택이 될 것이라 기대할 수 있다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0020614, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

참 고 문 헌

- [1] 강태환, 유지훈, 이광운. (2008). PSIM을 이용한 전력 반도체 소자의 개선된 손실추정. 전력전자학회 학술대회 논문집, 127-129.
- [2] 신호준, 하정익, 서한술, 박영재.(2012). T-타입 3레벨 인버터에서의 PWM 방식에 따른 손실 분석. 전력전자학회 학술대회 논문집, 54-55.