

AC-AC 전력조정기에서 IGBT의 손실특성 해석

김진리, 김태완, 정세교
경상국립대학교

Analysis of IGBT Loss Characteristics in AC-AC Power Regulator

Jin-Ri Kim, Tae-Wan Kim, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

This paper presents the analysis of the IGBT loss characteristics for AC-AC power regulators. The conduction and switching losses are calculated using the loss model for the IGBTs with different specifications. The optimum switching frequency to maintain the allowable IGBT loss is determined for the IGBT based AC-AC regulator.

1. 서 론

전력조정기(AC power regulator)는 단상 또는 삼상 교류 전압을 제어하여 부하에 공급되는 전력을 제어하며 반도체 및 디스플레이, 금속제련, 열처리 등 다양한 산업용 제조공정에 사용된다. 현재 대부분의 전력조정기에는 사이리스터(Thyristor)가 사용되고 있으며, 제로 크로싱 제어(Zero-crossing) 또는 위상 제어(Phase-control) 방법을 사용하여 전압을 제어한다. 그러나 제로크로싱 제어의 경우 정밀한 전압제어가 어려우며, 위상제어 시에는 역률이 매우 낮아진다는 문제점이 있다. 따라서 최근 전력조정기에 IGBT를 적용하여 PWM 방식으로 제어하는 방법이 고려되고 있으나 IGBT의 손실이 사이리스터에 비해 상당히 크다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 포화전압이 매우 낮은 IGBT가 개발되고 있으나 이러한 소자의 경우 스위칭에 필요한 에너지가 매우 커서 스위칭 주파수의 최적화가 필요하다.^[1]

본 논문에서는 IGBT를 사용한 전력조정기에서 스위칭 소자의 손실특성을 분석하고 이를 기반으로 소자의 손실을 일정하게 유지하는 스위칭 주파수의 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 PWM 방식으로 제어되는 전력조정기에서 IGBT의 손실 모델을 유도하였고, 특성이 다른 두 IGBT에 대한 손실을 분석하였다. 이를 기반으로 일정한 손실을 유지하는 최적의 스위칭 주파수를 산정하였다.

2. AC-AC 전력조정기

2.1 전력조정기 회로

그림 1은 본 논문에서 고려한 IGBT 기반 단상 AC-AC 전력조정기의 구성을 나타내고 있다. 그림 1의 전력조정기는 2개의 다이오드와 2개의 IGBT(Q1, Q2)로 구성되어 있으며, 부하

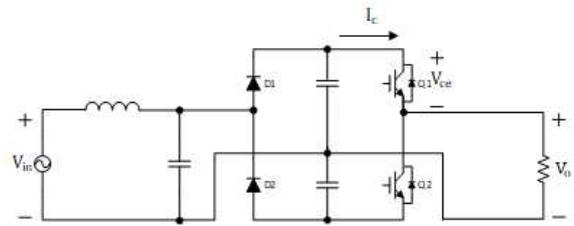


그림 1 IGBT 전력조정기
Fig. 1 IGBT Power Regulator

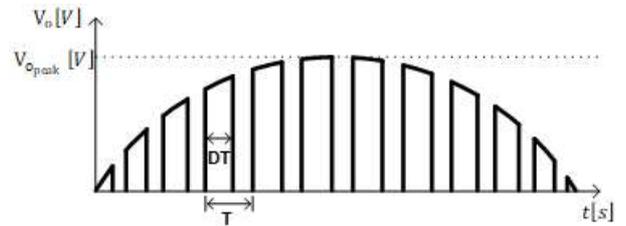


그림 2 전력조정기 출력 파형
Fig. 2 Power Regulator output waveform

는 전기히터이며 저항 부하로 가정하였다.

2.2 전력조정기의 PWM 제어

그림 2는 IGBT 전력조정기의 출력전압 파형을 나타내고 있다. 양의 반 주기 파형을 나타내고 있으며 출력전압의 크기는 PWM 방식으로 제어된다. 전력조정기에 적용되는 낮은 포화전압을 가지는 IGBT는 스위칭 에너지가 매우 크며, 소자의 손실을 일정 수준으로 유지하기 위해 부하에 따라 PWM 스위칭 주파수를 가변하여 제어한다.

3. IGBT의 손실특성 해석

3.1 IGBT의 도통 손실(Conduction loss)

IGBT의 도통 손실은 전류, 듀티 비, 포화 전압, 접합 온도와 관련이 있으며, 한 주기 동안의 평균 도통 손실은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{con_AVG} = \frac{I_{C_peak} V_{CESAT_peak}}{\pi} D \quad (1)$$

여기서, P_{con} 은 IGBT의 한 주기 평균 도통 손실이며

V_{CESAT} , I_C , D 는 각각 포화 전압과 전류, 듀티 비를 나타낸다. 그리고 전류의 침투값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{C_{peak}} = \frac{V_{CE_{peak}}}{R_o} \quad (2)$$

3.2 IGBT의 스위칭 손실(Switching loss)

IGBT의 스위칭 손실은 턴-온 및 턴-오프 시 손실의 합으로 구성되며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{sw} = \frac{f_{sw} I_{C_{peak}} V_{CE_{peak}}}{\pi} (t_r + t_f) \quad (3)$$

여기서, P_{sw} 는 IGBT의 스위칭 손실이며 f_{sw} 는 스위칭 주파수, t_r 과 t_f 는 각각 상승 및 하강시간을 나타낸다.

3.3 IGBT의 손실특성 분석

전력조정기에 적용된 IGBT의 손실특성을 분석하기 위해 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 IGBT는 Infineon사의 IKZ75N65EL5와 IKZ75N65EH5이며 각 소자의 주요 파라미터는 표 1과 같으며, 두 소자의 데이터를 PSIM 모델에 적용하였다.

표 1 IGBT 파라미터(25°C)
Table 1 IGBT Parameters ($T_{vj} = 25^\circ\text{C}$)

Model	I_C (A)	V_{CESAT} (V)	Delay (ns)		Rise/Fall (ns)	
			$t_{d(on)}$	$t_{d(off)}$	t_r	t_f
IKZ75N65EL5	62	1.05	106	330	27	144
IKZ75N65EH5	62	1.79	26	347	13	15

시뮬레이션에 적용된 두 IGBT는 동일한 전압 및 전류 정격을 가지고 있으나 상반된 특성을 가지고 있다. EL5 타입 소자는 포화 전압이 매우 작아 낮은 도통 손실을 가진다. 반면에 EH5 타입 소자는 포화 전압은 크나 스위칭 에너지가 작아 스위칭 손실이 매우 작다. 따라서 IGBT의 온도를 안정되게 유지하기 위해서는 소자의 특성에 따라 적절한 스위칭 주파수의 선정이 필요하다.

그림 3은 스위칭 주파수에 대한 각 IGBT의 총 손실을 나타낸 그래프이며 각각 듀티 비 0.5와 0.9에 대한 결과를 나타내었다. 스위칭 주파수 증가에 따라 EH5 타입 소자에 비해 손실이 EL5 타입 소자가 손실이 크게 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 IGBT의 전력 손실을 일정하게 유지하기 위한 최대 스위칭 주파수를 나타낸 그래프이다. 각각 $P_{total}=20[W]$, $30[W]$ 에 대해 듀티 비 변화에 대한 최대 주파수 값을 나타내었다. EL5 타입 소자의 경우 30W의 전력 손실을 유지하기 위해서는 듀티 비 0.5에서는 10kHz, 듀티 비 0.9에서는 5kHz 정도의 스위칭 주파수로 동작해야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전력조정기에 적용되는 IGBT의 손실특성을 분석하였다. 먼저 PWM 방식으로 제어되는 전력 조정기에서 스위칭 주파수에 대한 IGBT의 손실 특성을 분석하였으며, 이를 기반으로 소자의 특성에 따라 IGBT의 손실을 일정하게 유

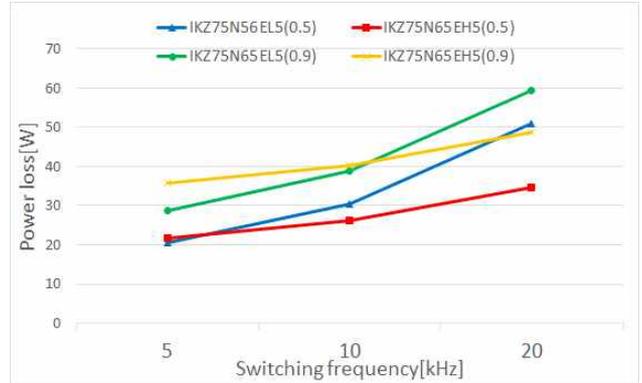


그림 3 듀티 별 스위칭 주파수에 대한 총 손실
Fig. 3 Total loss for switching frequency by duty



그림 4 일정 손실에 대한 최대 주파수
Fig. 4 Maximum frequency for constant total loss

지하는 최적 스위칭 주파수의 선정에 대해 분석하였다. 추후 지하는 최적 스위칭 주파수의 선정에 대해 분석하였다. 추후 과제로 실험을 통한 검증이 필요하며, 본 연구의 결과는 IGBT 기반의 전력조정기에 최적 설계에 적용이 가능하다.

이 논문은 중소벤처기업부의 구매조건부 과제(S3045967)의 연구결과 임.

참고 문헌

- [1] S. M. Hietpas and N. Mark, "Automatic voltage regulator using an AC voltage-voltage converter", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 36, no. 1, pp. 33-38, 2000.
- [2] B. Baodong and C. Dezhi, "Inverter IGBT loss analysis and calculation", 2013 IEEE ICIT, pp. 563-569.
- [3] E. Ioannou, C. Marouchos, M. Darwish, G. A. Putrus, "Efficiency investigation of a protection and correction solid state device for low-voltage distribution networks", 2019 IEEE UPEC, pp. 1-6.
- [4] W. Lee; D. Han, C. Morris, B. Sarlioglu, "Minimizing switching losses in high switching frequency GaN-based synchronous buck converter with zero-voltage resonant-transition switching". 2015 ICPE-ECCE Asia.