

능동 클램프 플라이백 인버터에서의 변압기 누설 인덕턴스 영향 분석

박정규*, 김영호*, 지용혁*, 이태원**, 정용채*** 원중연*
 성균관대학교*, 삼성전기**, 남서울대학교***

Analysis of Transformer Leakage Inductance in Active Clamped Flyback Inverter

Jeong-Kyu Park*, Young-Ho Kim*, Young-Hyok Ji*, Tae-Won Lee**, Yong-Chae Jung***, Chung-Yuen Won*
 Sungkyunkwan University*, Samsung Electro-Mechanics**, Namseoul University***

ABSTRACT

In this paper, an analysis for leakage inductance of transformer in active clamped flyback inverter is presented. In the active clamp circuit of flyback inverter, the leakage inductance influences on the voltage across the primary switch and the resonant capacitor. Therefore, it is essential to optimize the leakage inductance design. In order to verify the theoretical analysis for the leakage inductance, PSIM simulation is used.

1. 서 론

태양광 발전 시스템에 부분 음영이 생길 경우 시스템 에너지 생산량이 줄어들며, 이를 해결하기 위해 태양전지 모듈을 직접 계통에 연계하는 AC 모듈형 PV-MIC에 관한 연구가 지속되고 있다.^[1] 다양한 토폴로지 중 능동 클램프 기법을 적용한 플라이백 인버터는 스위치 턴-온시 ZVS 동작과 스위치 턴-오프시 주 스위치 전압 클램프를 통해 높은 효율을 얻을 수 있다.^[2] 그러나 1차측 누설 인덕턴스만 고려할 경우, 1차측 스위치에 인가되는 전압 스트레스가 설계값과 달라진다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 새로운 액티브 클램프 기법을 적용한 플라이백 인버터에서의 변압기 2차측 누설 인덕턴스의 영향에 대하여 고찰한다.^[3]

2. 회로 구성

본 논문의 능동 클램프 플라이백 인버터는 그림 1과 같이 주 스위치 Q_p , 능동 클램프 회로의 보조 스위치 Q_a 와 클램프 커패시터 C_r , H-bridge($Q_1 \sim Q_4$), 그리고 L-C 필터로 구성된다. 주 스위치 Q_p 는 50kHz로 스위칭하며 2차측 전류를 계통과 동상의 정류 정현파로 제어한다. 보조 스위치 Q_a 및 클램프 커패시터 C_r 은 누설 인덕턴스에 축적된 에너지에 의한 주 스위치의 전압 스트레스를 저감하고, 이 에너지를 출력 측으로 전달하는 역할을 수행한다. 에너지 전달 시 보조 스위치의 도통손실을 최소화하기 위하여, Q_a 는 Q_p 가 턴-온 되기 전 짧은 시간 동안만 턴-온 된다. H-bridge는 계통위상과 동기되어 상용주파수(60Hz)로 스위칭하며, 계통전압의 양의 반주기 동안에는 스위치 Q_1, Q_4 가 도통하고 음의 반주기 동안은 Q_2, Q_3 를 도통하여 출력전류의 방향을 제어한다.

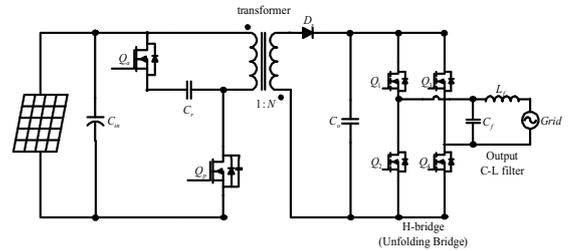


그림 1. 능동 클램프 플라이백 인버터 회로
 Fig. 1 Circuit configuration of active clamp flyback inverter

3. 2차측 누설 인덕턴스의 영향 고려

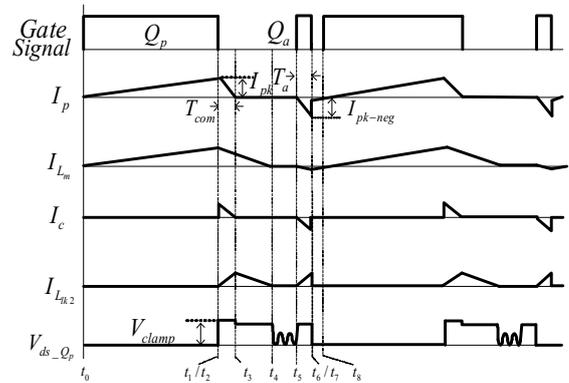


그림 2. 이론적 동작 파형
 Fig. 2 Theoretical operation waveforms

변압기 2차측으로부터 1차측으로 투영된 피드백 전압 V_{FB} 이 일정하다고 가정할 때, C_r 의 전류-시간 평형조건에 의하여 변압기 1차측에 흐르는 양의 첨두전류 I_{pk} 와 음의 첨두전류 I_{pk-neg} 는 같은 크기를 가진다.

$$I_{pk} = I_{p-neg}, \quad T_{com} = T_a \quad (1)$$

C_r 에 인가되는 전압은 식(2)와 같이 표현되며,

$$V_{C_r} = V_{FB} + \frac{L_{lk1}}{T_a} I_{pk} + \frac{L_{lk2}}{T_a} I_{pk} \quad (2)$$

능동 클램프 플라이백 인버터에서 주 스위치의 턴-오프시 전압은 식 (3)과 같다.

$$V_{Q_p, peak} = V_{in} + V_{C_r} = V_{in} + V_{L_{lk1}} + V_{L_{lk2}} + V_{FB} \quad (3)$$

주 스위치의 클램프 전압을 V_{clamp} 라고 할 때, 누설 인덕턴스 L_{lk1} 과 L_{lk2} 에 인가되는 전압은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{L_{lk1}}{T_a} \cdot I_p + \frac{L_{lk2}}{T_a} \cdot I_p \leq V_{clamp} - V_{in} - V_{FB} \quad (4)$$

자화 인덕턴스 L_m 과 누설 인덕턴스 L_{lk1} 의 비가 k 일 때($k=L_m/L_{lk1}$), L_m 에 인가되는 전압은 식(5)와 같으며,

$$V_{L_m} = k \cdot \frac{V_{C_r} + V_{FB}}{1 + 2k} \quad (5)$$

Q_a 의 턴-온 시간은 다음과 같은 설계식으로 결정된다.

$$T_a = \frac{L_{lk2}}{V_{L_m} - V_{FB}} \cdot I_{pk} \quad (L_{lk1} \text{과 } L_{lk2} \text{ 고려시}) \quad (6)$$

$$T_a = \frac{L_{lk1}}{V_{L_m} + V_{L_{lk1}} - V_{FB}} \cdot I_{pk} \quad (L_{lk1} \text{만 고려시})$$

클램프 커패시터 C_r 는 다음과 같다.

$$C_r \geq \frac{I_p T_a}{2V_c \times \text{ripple}\%} \quad (7)$$

식 (6)으로부터 변압기 2차측의 누설 인덕턴스를 고려함에 따라 Q_a 의 턴-온 시간이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 식 (7)에 따라 클램프 커패시터 역시 2차측 누설 인덕턴스를 고려한 설계가 요구됨을 확인하였다.

4. 시뮬레이션

표 1은 본 논문에서 분석한 능동 클램프 플라이백 인버터의 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 본 논문의 플라이백 인버터는 250[W]의 출력전력을 갖도록 설계되었으며, 각 소자의 전압 파형은 그림 3에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation Parameters

항목	값	항목	값
용량	250[W]	스위칭 주파수	50[kHz]
입력전압	25~40[V]	C_r	470[nF]
C_{in}	1.1[mF]	C_o	150[nF]
L_m	7.91[μH]	L_f	5.6[mH]
L_{lk1}	80[nH]	C_f	33[nF]
L_{lk2}	75.5[nH]	V_{clamp}	150[V]

그림 3(a)는 L_{lk1} 만 고려하여 설계한 회로의 결과파형이다. 이 때, 보조 스위치 턴-온 시간 $T_a=160[ns]$, 데드 타임 $T_d=12[ns]$, 그리고 클램프 커패시터 $C_r=470[nF]$ 로 Q_p 의 전압이 150[V]로 클램프 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 (b)는 (a)의 설계에 L_{lk2} 를 추가한 후 영향을 확인한 파형으로, 스위치와 클램프 커패시터의 전압에 L_{lk2} 의 전압이 함께 나타나 각 소자에

인가되는 전압이 20[V] 정도 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 L_{lk1} 과 L_{lk2} 를 영향을 함께 고려하여 재설계한 회로의 전압파형으로, $T_a=200[ns]$, $T_d=10[ns]$, 그리고 $C_r=430[nF]$ 이며, Q_p 의 전압이 설계값 150[V]로 클램프 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(d)는 계통연계 특성을 나타낸다. DC-Link 커패시터의 전압이 H-bridge를 통해 계통과 동상이 됨으로써 출력전류가 계통과 동위상의 정현파로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

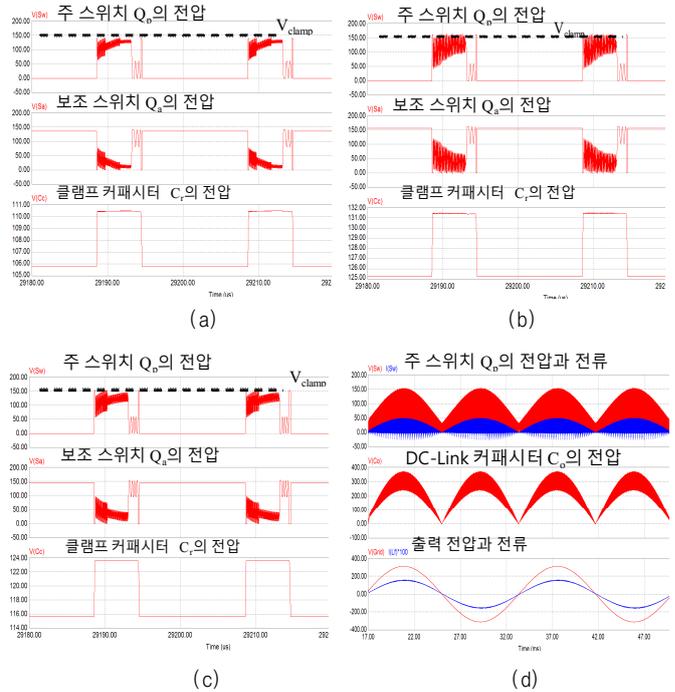


그림 3. PSIM 시뮬레이션의 주요 결과파형
Fig. 3 Key waveforms of PSIM simulation

5. 결론

본 논문은 AC 모듈형 능동 클램프 플라이백 인버터에서 변압기 2차측 누설 인덕턴스에 의한 클램프 전압 및 스위칭 도통시간의 변동에 대하여 분석하였으며, 재설계 및 시뮬레이션을 통해 타당성을 확인하였다.

이 논문은 삼성전기의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Rodriguez, C., and Amaratunga, G.A.J., "Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 7, pp. 2593~2601, July. 2008.
- [2] Watson, R., LEE, F.C., and Hua, G.C., "Utilization of an active-clamp circuit to achieve soft switching in flyback converters". IEEE PESC Record, Vol. 2, pp. 909-916, June. 2004.
- [3] Junming Zhang, Xiucheng Huang, Xinke Wu, and Zhaoming Qian, "A high efficiency flyback converter with new active clamp technique," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 25, No. 7, pp. 1775-1785, July. 2010.