

용량성 부하에서 SiC 인버터 출력 THD 개선을 위한 원인 분석 및 설계

강태원, 정재훈, 김병권

twkang@syscore.co.kr, jhjeong@syscore.co.kr, bkkim@syscore.co.kr

Analysis and Design for Improving SiC Inverter Output THD in Capacitive Load

Taewon Kang, Jaehoon Jeong, and Byoungkweon Kim

ABSTRACT

This paper presents a comparison of optimized designs for a high-frequency transformer intended for SiC inverter output Total Harmonics Distortion (THD). In the case of a capacitive load, the PWM inverter output is tied to a resonance relationship due to capacitive load. When this capacitive load becomes resonant, THD is measured as increased. Cause analysis and solutions are presented for these outputs.

1. 서 론

최근 다양한 산업 응용 분야의 제품이 개발이 이루어지고 있으며 더 높은 전력 사용이 요구되고 있다. 전력변환기의 Topology는 복잡해지며 자성 소자, 커패시터들은 선택에 어려움이 있다. 단일 전원을 사용하게 되면 MOSFET 구성이나 수동소자의 선택에 어려움이 있으며 전력변환기 구성이 어렵다.^{[1]-[3]} 이러한 문제를 해결하기 위해 전력변환기의 다단계 구조가 도입되었다. 다단계 전력변환기는 직렬 또는 병렬로 전력시스템들을 연결하여 구성하는 것으로 쉽게 용량을 증대시킬 수 있다.^[4] 하지만 전력변환 구조는 문제를 쉽게 일으키기도 하는데, 임피던스 오차에 의한 전력 불균형 문제가 대표적인 문제점 중 하나이다. 이러한 오차는 특히 Inductance를 설계할 때 나타나는데 설계된 Inductance 대비 실제 만들어진 Inductance 값이 전류 대비 Inductance가 적거나, DC-bias 등의 문제로 Inductance가 적게 나오기도 한다. 이러한 오차로 인해 Inductance는 설계 시 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 변압기에 대한 Leakage Inductance와 Mutual Inductance의 설계를 방법을 제안하고 시험을 통해 검증한다.

2. 증폭기 구조

전기적 에너지를 소리 에너지로 전환되는 전력변환기를 SONAR(Sound Navigation and Ranging)라 한다. 한때 SONAR 시스템에서는 OP-amp와 변압기로 구성되어 있었다. 이러한 구조는 효율이 낮은 단점이 있으며, 대용량화에 어려움이 따른다. 이러한 문제를 해결하고자 MOSFET를 사용한 전력변환 시스템이 제안되었으며 그 시스템 구성은 다음과 같다.

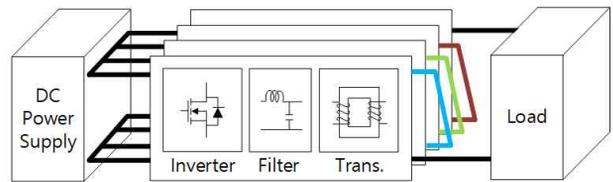


그림 1 SONAR 시스템의 구성

그림1은 SiC를 사용한 인버터를 SONAR 시스템에 적용 후 블록다이어그램 하였다. DC power supply로부터 인버터는 DC를 입력받아 Power rate를 조절하여 변압기로 에너지를 전달하며 변압기는 전달받은 에너지를 필터를 걸쳐 부하로 전달하는 일을 한다. 하지만 이러한 방식을 서론에서 말한 것처럼 문제가 있는데 변압기의 임피던스에 공진하게 된다는 문제점이 있다는 것이다. 이를 해결하기 위하여 필터의 Inductance나 Capacitance를 조절하거나 변압기의 Leakage Inductance와 Mutual Inductance를 조절하는 방법이 있다.

3. 변압기 설계

변압기의 공진 문제를 해결하기 위하여 Leakage Inductance(Lk)와 Mutual Inductance (Lm)를 줄이는 형태로 제작이 진행되어야 한다. 그러기 위해서는 적정 턴 수에 Lk가 적은 형태로 제작이 진행되어야 한다.

3.1 변압기의 등가회로

변압기의 등가회로는 그림 2와 같다. 필터의 Lf와 Cf 그리고 Lm, Lk와 Rk로 구성된다. 여기서 Lf와 Cf는 필터의 값으로 Lf는 자성 소자에 의하여 결정되며, Cf는 설계하는 Capacitance에서 따라 바뀌게 된다. 변압기의 등가회로는 간략하게 표현하면 Mutual Inductance와 Leakage Inductance로 표현할 수 있고 이러한 L과 C를 이용하여 공진이 일어나는 점을 찾을 수 있다.

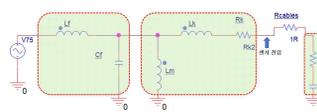


그림 2 변압기의 단순 회로

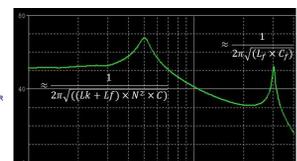


그림 3 입력전압 주파수 특성

그림 3은 부하 측에 본 입력 임피던스를 나타낸 것이다. 여기서 주파수 특성을 확인해 보면 수 kHz에서 그리고 수십kHz 대역에 공진 점이 2가지 보이는 걸 확인할 수 있다. 이때 첫째로 보이는 공진점이 변압기와 필터로 인하여 발생한다. 본 논문에서는 필터 측의 Inductance와 Capacitance가 고정된 상태이므로 바꿀 수 있는 요소는 변압기의 Inductance만 존재한다. 수 식(1) 변압기 Inductance에 의한 공진 점을 표현한 것이다. 그림 4는 시뮬레이션을 위한 변압기와 부하 모델을 나타낸 것이다.

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{(Lk + Lf) \times N^2 \times C}} \quad (1)$$



그림 4 변압기 및 부하 등가모델

표 1은 설계된 변압기 들이다. 사진을 기준으로 턴비, Lm, Lk, 사용된 코어 그리고 Max THD를 나타낸 것이다. 여기서 4번 변압기가 THD가 가장 좋지만, 온도특성이 나쁘다는 단점을 가지고 있고 7번 변압기는 Amorphous 1000를 사용하여 THD 특성을 만족하지만, 코어의 크기 크다는 단점을 가지고 있다. Lk과 Lm을 확실히 줄여야 공진점에 대한 문제와 THD에 대한 문제도 해결할 수 있다.

표 1 설계된 변압기들의 파라미터

변압기	턴비	Lm[H]	Lk[H]	코어	Max THD	비고
1	1 : 2.14	1차 34m	39u	Amorphous 800B	4.24% at 1.3kHz	
		2차 146m	172u			
2	1 : 2.04	1차 38m	110u	Nano 320*2	4.71% at 1.4kHz	49.6°C/10분
		2차 154m	457u			
3	1 : 2.14	1차 48m	45u	Amorphous 800B	3.69% at 1.5kHz	
		2차 218m	207u			
4	1 : 2.24	1차 35m	175u	Amorphous 800B	2.49% at 1.3kHz	104°C/10분
		2차 174m	870u			
5	1 : 2.14	1차 33m	38u	Amorphous 800B	4.00% at 1.7kHz	
		2차 158m	183u			
6	1 : 2.17	1차 6.6m	29u	Amorphous 1000	5.77% at 1.8kHz	
		2차 30.6m	138u			
7	1 : 2.2	1차 40m	49u	Amorphous 1000	2.85% at 1.4kHz	
		2차 194m	236u			

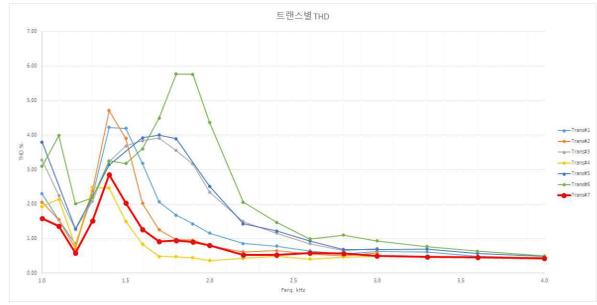


그림 5 설계된 변압기 주파수별 THD

3.2 새로운 변압기의 설계

새로운 변압기를 설계하기 전에 권선에 대해 설계를 다시 했다. 먼저 동판 권선으로 설계했으며, 표 2의 8번 권선이 이에 해당한다. 동판 권선은 THD와 공진점에 대해 만족하는 값이 나왔다. Lk가 0.7uH, Lm이 4.8mH가 나와 셀프 공진점 7kHz 보다 높게 나와 주파수 특성을 만족한다. 또한 THD 또한 3% 미만으로 나오며 THD특성 또한 만족한다. 하지만 열특성과 제작에 어려움이 있어 설계를 변경하게 되었다.

표 2 동판 권선 변압기 파라미터

변압기	턴비	Lm[H]	Lk[H]	코어	Max THD	비고
8	1 : 2.18	1차 4.8m	0.7u	Amorphous 800B	3% 미만	동판권선 38.6°C/10분
		2차 22.5m	3u			

권선의 종류를 동판 권선에서 샌드위치 권선으로 변경하였다. 그림 6이 샌드위치 권선의 블록도를 나타낸 것이다. 샌드위치 권선은 동판권선과 마찬가지로 Leakage 성분을 없애는 특성을 보이고 있다. 표 3이 새로이 설계된 변압기를 나타낸 것으로 공진점은 7 ~ 8kHz에서 공진하도록 설계하였으며, THD는 3% 미만으로 설계하였다.

제한한 변압기는 코어 크기는 Amorphous 1000에서 Amorphous 800B로 축소되었으며 권선은 샌드위치 권선으로써 Lk가 1.5uH로 작은 것이 특징이다. Lm역시 5.5uH로 동판권선 대비 큰 차이가 없고, THD특성 또한 3%프로 미만으로 좋은 결과 값을 보여주었다.

표 3 새로이 설계된 변압기들의 파라미터

변압기	턴비	Lm[H]	Lk[H]	코어	Max THD	비고
9	1 : 2	1차 5.5m	1.5u	Amorphous 800B	3% 미만	샌드위치 권선
		2차 21.5m	6.4u			

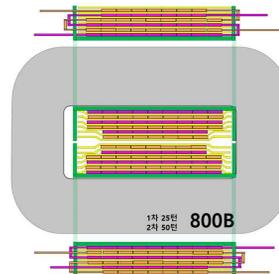


그림 6 새로이 설계되는 변압기 코어와 권선 구조

4. 시 험

그림 7는 변압기의 주파수 특성을 보여주는 AC sweep 파형이다. 파형의 크기는 변압기의 특성을 고려하여 입력 50V를 기준 전압으로 잡았으며, 노랑색(Ch.1)은 전압, 파랑색(Ch.2)는 전류를 나타낸다.



그림 7 변압기 주파수 특성 그래프

공진점은 약 7.5kHz에서 형성되었음을 확인하였다. 표 3은 운영 주파수 대역 1.3kHz ~ 3.0kHz에서의 변압기의 출력 전압의 THD 나타낸 것이다. 그림 8은 출력 주파수를 2kHz로 맞추고 THD 특성을 나타낸 것으로, 그 특성을 확인해 보면 표 4과 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

표 4 설계된 변압기의 주파수별 THD 특성

Freq.	Fund.	3rd	5th	Δ fund-3rd
1.3	52.0	8.2	10.2	43.8
1.5	51.8	14.6	14	37.2
2.0	52.0	18.6	-7.4	33.4
2.1	52.0	19.6	-2	32.4
2.2	52.0	20.2	-2	31.8
2.3	52.2	21.8	-2	30.4
2.4	52.4	23.4	-0.6	29.0
2.5	52.4	23.4	-1	29.0
2.6	52.4	21.6	1	30.8
3.0	52.4	14.4	-1	38.0



그림 8 2kHz에서의 주파수 특성

5. 결 론

본 논문에서는 SONAR 운용 시 나타나게 되는 입력단 LC 필터와 출력단 변압기의 공진에 대하여 원인을 분석하고 해결 방안을 제안하였다. 제안방안을 검증하기 위하여 변압기를 설계 및 시험 함으로써 제안한 방법을 검증하였다. 설계된 변압기는 1:2의 턴 비를 가지며 샌드위치 권선을 사용해 낮은 Lm 과 Lk을 가지게 되었으며, Amorphous 800B를 사용함으로써 작은 크기에서의 특성을 확보할 수 있었다.

본 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소(KRIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-056, 과제명 : 해양생물음 재현 음향센서 구현 기술 연구)

참 고 문 헌

- [1] Choi, J.H. and Mok, H.S. "Simultaneous design of low-pass filter with impedance matching transformer for sonar transducer using particle swarm optimization," *Energies*, Vol. 12, pp. 4646, 2019
- [2] Je-jin Jang, Hyung-soo Mok, and Dong-Hun Lee, "Design Procedure of Cascaded Multilevel Inverter for High Power Amplifier in SONAR System," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 29, pp. 120 - 131, April, 2024
- [3] Hae-Chan Park, Jong-Uk Yang, Jin-Su Jang, and Rae-Young Kim, "Transformer Design Technique Based on the Magnetic Equivalent Model of High-Frequency Isolated LLC Converter With High Accuracy and Reduced Design Time", *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 3948 - 3959, 2024.
- [4] Eun-Chong Noh, Sumi Park, Gildong Kim, Jeongwoo Son, and Seung-Hwan Lee, "Machine Learning Based Optimal Design of a 6.6kW Planar Transformer for igh Power Density On-Board Chargers," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 29, No. 1, pp. 24 - 31, February, 2024.
- [5] S.M. Song, I.D. Kim, B.H. Lee, and J.M. Lee, "Design of matching circuit transformer for high-power transmitter of active sonar," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 2145 - 2155, 2020.
- [6] A. Kolli, A. Gaillard, A. De Bernardinis, O. Bethoux, D. Hissel, and Z. Khatir, "A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 716 - 730, Nov. 2015.
- [7] S. Mukherjee and P. Barbosa, "Design and Optimization of an Integrated Resonant Inductor With high-frequency transformer for wide gain range DC-DC resonant converters in electric vehicle charging applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 38, No. 5, pp. 6380-6394, May 2023.
- [8] A. Balakrishnan, W. T. Joines, and T. G. Wilson, "Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 654 - 663, Jul. 1997.
- [9] C. W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 4th ed. New York, NY, USA: CRC Press, 2011.