

PWM DC-AC 인버터에서의 출력 AC 필터 인덕터 코아 손실 계산 방법

이경준*, 차헌녕***, 이종필**, 유동욱**, 김희제*
부산대학교*, 한국전기연구원**, 경북대학교***

A Core Loss Calculation Method for AC Filter Inductor in PWM DC-AC Inverter

Kyoung Jun Lee*, Honnyong Cha**, Jong Pil Lee**, Dong Wook Yoo**, Hee Je Kim*
Pusan National University*, Korea Electro-technology Research Institute**,
Kyungpook National University***

ABSTRACT

본 논문은 PWM DC AC 인버터에서의 AC 필터 인덕터 코아 손실 계산을 위한 간단한 방법을 제시한다. 코아 손실 분석을 위해서 AC 필터 인덕터로 아몰퍼스 C Core (AMCC 320)를 선택하였다. 단상하프브릿지 전압형 인버터와 간이 열량계를 이용하여 코아 손실을 측정하고 제시한 방법을 검증하였다. 기본적으로 인버터 스위칭은 SPWM 방법을 사용하였으며, 스위칭 주파수와 모듈레이션 인덱스를 가변하면서 실제 제작한 간이 열량계로 코아 손실을 측정하였다.

1. 서 론

전력변환 장치에서 인덕터와 변압기와 같은 자성체는 부피, 무게 그리고 가격적인 측면에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재 전력변환 장치의 토폴로지(Topology) 및 제어 방법이 최적화 되어 있는 반면에 자성체의 비선형적인 특성으로 인해 인덕터 코아의 최적 설계 시 고려되어야 할 사항이 몇 가지 있다. 먼저 인덕터 코아의 재질 및 권선 방법이 고려되어야 한다. 다음으로 인덕터의 최적 설계를 위해서는 자성체 내부에서 발생하는 모든 손실부분이 고려되어야 한다. 인덕터에서의 손실은 크게 코아 손실(Core Loss)과 동손(Winding Loss)으로 나뉜다. DC DC 컨버터의 경우 정상상태에서 코아에서의 플럭스 스윙(Flux Swing)이 일정하다. 하지만 PWM(Pulse Width Modulation) DC AC 인버터의 경우 플럭스 스윙이 스위칭 주기에 따라 변하므로 AC 필터 인덕터 코아 손실을 계산하는 일은 쉽지 않다. 기존에는 변형된 Steinmetz 식(equation)을 이용하여 간단하게 계산하는 방법이 있으나, PWM DC AC 인버터의 복잡한 특성을 고려하지 못해 정확하지 않다. 대상 코아의 재질 별로 주파수, 전압, 전류를 가변하여 손실 맵(Core Loss Map)을 구축하여 놓고 조건별로 이에 대응하는 손실을 구하는 경우, 미리 구축해 놓아야 할 데이터가 많은 번거로움이 있다. 직접 B H Curve의 자취 면적을 구하는 경우에는 루프(Loop)가 PWM DC AC 인버터의 경우 폐곡선이 아니므로 모두 계산하는 것은 매우 번거로운 일이다.^[1,2]

본 논문에서는 간단한 AC 필터 인덕터의 코아 손실 계산 방법을 제시하고, 이를 간이 열량계를 이용하여 검증하는 방법을 제시한다. 이를 통해 향후 대용량 전력변환 장치에서의 최적 인덕터 설계를 도모한다.

2. 본 론

2.1 간이 열량계의 제작

PCS의 전체 효율 및 손실을 측정하기 위해서는 기존의 Power Analyzer 또는 Digital oscilloscopes를 통한 방법이 일반적이다. 하지만 디지털 계측기에 사용되는 센서에 의한 측정 오차도 존재하며, 코아 손실이 수 W일 경우 일반적인 계측기를 통한 정확한 손실 측정이 어렵다. 전력변환장치에서의 손실은 대부분 열로 방출되는데, 이에 착안하여 여러 가지 타입의 열량계를 이용하여 손실을 측정하는 방법에 제시된 바 있다.^[3] 아래의 그림 1과 같이 간이 열량계 중간에 칸막이를 두고 한쪽에는 열량을 측정할 인덕터 두고 반대편에는 박스내부 공기 순환을 통한 빠른 열평형 도달을 위하여 DC 팬을 설치하였다.

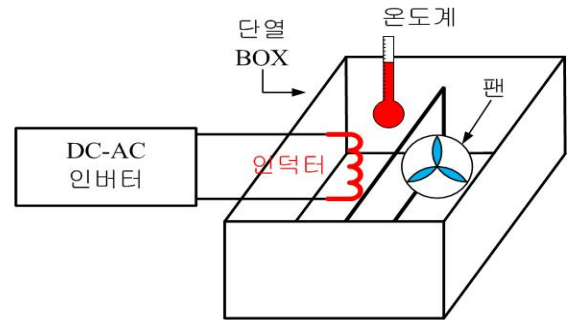


그림 1 코아 손실 측정을 위한 간이 열량계 구조
Fig. 1 Calorimeter for measuring iron loss of filter inductor

2.2. 단상 하프브릿지 인버터의 필터 인덕터 손실

실제 실험에 앞서 본 논문에서 제안하는 방법으로 단상 하프브릿지 인버터의 필터 인덕터 손실을 계산해보았다. 인버터의 출력 전원 주파수=60 Hz, 인버터의 스위칭 주파수 $f_{sw}=4.8, 9.6, 19.2$ kHz, 모듈레이션 인덱스 $m_a=0.5, 0.8, 1.0$. DC 링크 전압은 400V로 하였다. 단상 하프브릿지 인버터의 출력 필터 인덕터 코아로 Metglas社의 아몰퍼스 코아인 AMCC 320 코아를 사용하였다. 설계 포인트는 동손을 최소화 하고 충분한 코아 손실이 발생하도록 하여 간이 열량계를 통한 검증시 코아

손실에 의한 열량을 정확히 측정할 수 있도록 하였다. L값은 1.65mH 로 하였다.

먼저 인버터의 스위칭 주파수 (fsw) 를 출력 주파수 (60 Hz)로 나누어 N개의 스위칭 구간으로 나눈다. 그리고 각각의 스위칭 구간에서의 시비율 (Duty)에 따른 플럭스 스윙(ΔB)를 아래 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\Delta B(\theta_j) = \frac{V_{in}}{NSf_{sw}} [1 - D(\theta_j)] D(\theta_j) \quad (j = 1, 2, \dots, n, N) \quad (1)$$

그리고 제조사에서 제공하는 코어 손실 계산식에 플럭스 스윙 (ΔB)값을 대입하여 구간별로 계산하여 1/4 주기 (π/2 ~ π) 동안의 코어 손실을 모두 더한 후 4배를 하고, 최종적으로 출력 주파수 (60 Hz)를 곱하면 AC 필터 인덕터의 코어 손실을 계산할 수 있다.

$$P_{c \text{ total}} = \left(\sum_{j=1}^n P_{c_j} \right) \times 4 \times f_o \quad (2)$$

이 계산 방법은 PWM DC AC 인버터 이외에도 PFC (Power Factor Correction) AC DC 컨버터에서의 인덕터 코어 손실 계산시에도 유용하게 사용될 수 있다.

변수 정의 :

- (1) V_{in} : 입력 DC 전압, V_o : 출력 AC 전압, L_o : 필터 인덕턴스, C_o : 필터 커패시턴스
- (2) m_a : 변조 지수 (Modulation Index), f_{sw} : 스위칭 주파수, f_o : 출력 전압 주파수
- (3) ΔB : 플럭스 스윙 (Flux Swing), D : 시비율 (Duty)
- (4) N : 필터 인덕터의 턴수, S : 코어의 단면적
- (5) $P_{c \text{ total}}$: 코어 손실, P_{c_j} : 구간별 코어 손실

2.3 단상 하프브릿지 인버터 실험

필터 인덕터 코어 손실 계산 방법을 검증하기 위하여 단상 하프브릿지 인버터의 실험에 앞서 간이 열량계에 메탈 클래드 저항(20Ω / 400W)을 넣고 5 ~ 50W 에 해당하는 DC 전압을 인가하여 인가한 파워에 따른 열량계 내부 온도 상승률 (°C/min) 데이터를 구한 후 최소자승법을 이용하여 초기 온도에 관계 없이 선형적인 관계식을 구할 수 있게 된다.

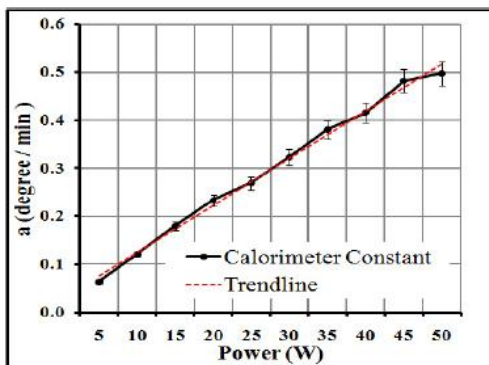


그림 2 열량계 상수 vs. Power (W)
Fig. 2 Calorimeter constant vs. Power

$$y = 0.0098x + 0.0026 \quad (3)$$

변수 정의 : x (Power), y (온도 상승률 : °C/min)

다음으로 필터 인덕터를 간이 열량계에 설치한 후 밀봉하였다. 부하는 권선 저항 22.5 Ω 에 연결하여 약 1kW 급 파워 실험을 하는 상태에서 간이 열량계를 통한 온도 변화 추이를 측정하였다. 좀더 정확한 실험 결과를 위하여 한 시간동안 5분 단위로 온도 변화 추이를 측정하여 얻은 단위 시간(분) 당 온도 증가량을 구한다. 이렇게 구한 온도 증가량을 식 (3)에 대입하여 역으로 코어 손실(W)을 구할 수 있다.

제한한 방법을 이용하여, 스위칭 주파수와 모듈레이션 인덱스를 가변하면서 실험을 하였다.

표 1 모듈레이션 인덱스와 스위칭 주파수에 따른 코어 손실
Table 1 Core Loss in AC filter inductor according to the switching frequency and modulation index.

ma \ fsw (kHz)		4.8	9.6	19.2
		ma		
0.5	측정값 (W)	47.06	39.94	34.94
	계산값 (W)	46.20	39.41	33.69
0.8	측정값 (W)	35.88	31.78	27.79
	계산값 (W)	31.73	27.06	23.13
1.0	측정값 (W)	26.27	23.00	21.71
	계산값 (W)	23.08	19.68	16.83

표 1과 같이 열량계를 통해 실측한 코어 손실 값과 제한한 방법으로 계산 코어 손실 값이 거의 일치하고 있으며, 코어 손실 차이 값은 평균 1W 미만이다. 따라서 향후 대용량 필터 인덕터 설계 과정에 도움이 될 만한 자료가 될 것으로 기대된다.

3. 결론

본 논문에서는 PWM DC AC 인버터에서 AC 필터 인덕터의 간단하고도 효과적인 코어 손실 계산 방법을 제시하였다. 제한한 방법은 실제 제작한 간이 열량계를 통해 검증되었다. 실험결과를 토대로 코어 손실 계산 뿐만 아니라 AC 필터 인덕터 설계에 있어서도 중요한 자료로 사용될 것으로 기대된다. 또한 제안된 방법은 다른 코어 종류에 대해서도 적용될 것이며, 앞으로 실험들 통해 검증할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Toshihisa Shimizu, Seiji Iyasu "A Practical Iron Loss Calculation for AC Filter Inductor Used in PWM Inverters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, No. 7, pp 2600 2609, July. 2009.
- [2] P. Tenant and J. J. Rousseau, "Dynamic model of magnetic materials applied on soft ferrites," IEEE Trans.Power Electron., vol. 13, no. 2, pp. 372 379, Mar. 1998.
- [3] Chucheng Xiao, Gang Chen, and Willem G. H. Odendaal, "Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, No. 3, pp 657 664, July. 2007.