

코어 종류에 따른 PCS 인덕터와 트랜스포머 손실 분석

양승대*, 심재휘*, 최주엽*, 송승호*, 최익**, 안진웅***

*광운대학교 전기공학과(yang0927@kw.ac.kr), 광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr)

광운대학교 로봇학과, *대구경북과학기술원

Loss analysis to the various kinds of core for PCS inductor and transformer

Yang, Seung-Dae* Shim, Jae-Hwe* Choi, Ju-Yeop* Song, Seung-Ho* Choy, Ick**
An, Jin-Ung*** Lee, Dong-Ha***

*Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University(hiphipiyo@kw.ac.kr)

**Dept. of Information and Control Engineering, Kwangwoon University

***Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

Abstract

In recently, inductor and transformer is the common device using widely in the photovoltaic system and power electronics. Therefore, each inductor and transformer has different core loss and iron loss depending on the size and kinds of core materials, it is important to analyze loss characteristics for better transformer efficiency. This paper offers an efficiency calculation method for PCS inductor and transformer loss, and different kinds of core materials are analyzed for optimized PCS design.

Keywords : 인덕터(inductor), 트랜스포머(transformer), 코어손실(core loss), 효율(efficiency)

기 호 설 명

L	: Inductance	l_X	: Length of X
I_X	: Current of X	A_X	: Cross-sectional Area of X
B_X	: Flux density of X	V_c	: Volume of core
ϕ	: Magnetic flux	N_X	: X Number of iron turns
R_X	: Reactance of X	n_X	: Number of iron turns in X
D_{cu}	: Diameter of iron	P_X	: Power loss of X
h_w	: Horizontal length of window	ρ	: Resistance of iron

1. 서론

현재, 개발되고 있는 태양광 인버터 및 전력전자 시스템에서 인덕터와 트랜스포머는 광범위하게 사용되고 있는 소자이다. 이러한 인덕터와 트랜스포머의 설계는 코어의 종류와 크기, 권선의 종류와 형태, 전체의 크기, 인덕턴스 등과 같이 많은 부분들이 고려되어야 한다. 이러한 복잡한 인덕터와 트랜스포머의 설계에서 인덕터와 트랜스포머의 손실과 그로 인한 전체 시스템에 미치는 효율에 대하여는 고려되지 않는 경우가 많다. 그 중에서도 Toroidal, EE, PQ 형태의 high flux, ferrite 코어는 현장에서 많이 사용되는 코어의 종류로 공극의 크기 등 고려되어야 할 부분이 많아 손실부분은 미리 고려하여 설계하기 어렵다.

PCS 인덕터와 트랜스포머 설계는 시스템의 사양에 맞는 종류와 크기의 코어와 권선을 선정하는 것은 인덕터와 트랜스포머의 설계에 있어 매우 중요한 부분이지만 본 논문에서는 다루지 않기로 한다. 정해진 코어와 권선으로 인덕터와 트랜스포머의 손실을 수식적으로 정리하여 보다 쉽게 효율분석을 설계 과정에서 고려하는 방법을 제시하고 태양광 인버터에 실제 사용되고 있는 코어들을 적용하여 봄으로써 효율을 고려한 인덕터 및 트랜스포머 설계 방법을 제시하고자 한다.

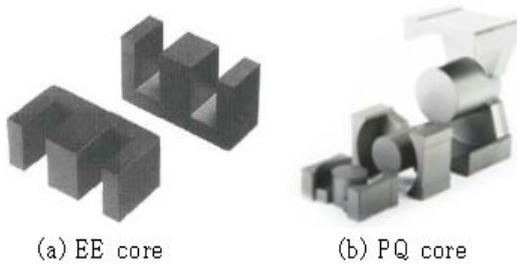


그림 1. 인덕터의 코어의 종류

2. PCS 인덕터의 설계

PCS 인덕터 설계는 먼저 시스템의 사양에

맞는 종류와 크기의 코어와 권선을 선정하여야 한다. 본 논문에서는 이를 다루지 않기로 하였으므로 정해진 코어와 권선을 가지고 시스템에 적합하도록 인덕터를 설계하는 부분만 다루도록 한다.

2.1 일반적인 PCS 인덕터 설계

선정된 코어와 권선의 data 값과 시스템의 필요 인덕턴스, 입력전류 값에 공극의 길이를 조절하며 턴수와 자속밀도 값을 계산할 수 있다. 실제 공극의 길이를 조절하며 계산하여 최대가능 턴수와 비교하여 적절한 설계 턴수를 확인하여야 한다.

- step 1. 코어와 권선의 data를 가지고 최대 턴수를 계산하고 코어의 saturation 자속밀도를 확인한다.
- step 2. 시스템의 인덕턴스, 입력전류 값과 공극의 길이를 바꾸어가며 계산하여 설계 턴수와 자속밀도 값을 확인하고 최대 가능 턴수와 saturation 자속밀도와 그 값을 비교하여 적절한 설계, 공극의 길이와 턴수를 결정한다.

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
h_w	[cm]		창길이_가로	N	[회]		턴수
h_v	[cm]		창길이_세로	B	[mT]		flux density
D_{cw}	[cm]		권선의 지름				
A_c	[cm ²]		코어 단면적				
l_c	[cm]		코어 길이				
μ_r	-		비투자율				
L	[mH]		인덕턴스				
I	[A]		입력전류				
l_g	[cm]		공극의 길이				
B_{sat}	[mT]		한계fluxdensity				
N_{max}	[회]		최대턴수				
a	-		손실계수	P_c	[W]		코어손실전력
b	-		손실상수	P_{cu}	[W]		권선손실전력
V_c	[cm ³]		코어부피	P_t	[W]		전체손실전력
l_1	[cm]		권선길이_1턴				
l_{20}	[cm]		권선중가길이_1층				
ρ	[Ω/cm]		권선계수				
I_{rms}	[A]		rms 전류값				

그림 2. 손실계산 PCS 인덕터 설계용 엑셀 표

2.2 손실 계산 PCS 인덕터 설계

코어와 권선의 data들과 자속밀도와 단위

전력손실 관계 그래프를 통하여 계산한 손실 기술기와 손실상수를 턴수, 자속밀도 그리고 손실의 수식이 들어간 그림2와 같은 표에 넣은 후, 공극의 길이를 가변하며 턴수, 자속밀도 그리고 전력손실을 확인하여 공극의 길이와 턴수를 정한다. 따라서 최소전력손실의 설계가 가능하다. 자세한 손실의 계산식은 3.1에서 자세히 다루도록 한다.

(예시) 손실기술기와 손실상수의 계산

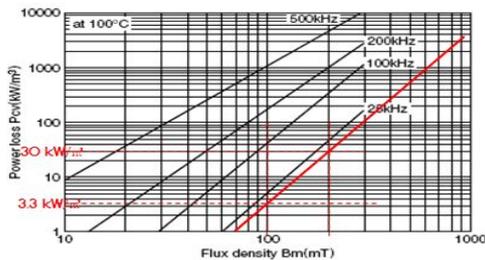


그림 3. 자속밀도와 단위전력손실 관계 그래프의 예

$$\log_{10} P_L = a \log_{10} B + b \quad (1)$$

$$P_L = 10^{a \log_{10} B + b} \quad [kW/m^3] \quad (2)$$

$$\log_{10} 30 = a \log_{10} 200 + b$$

$$\log_{10} 3.3 = a \log_{10} 100 + b$$

방정식을 풀면 $a = 3.18$, $b = -5.84$

3. PCS 인덕터의 손실 계산 방법

3.1 PCS 인덕터의 손실

이상적인 인덕터의 경우 입력 전력과 출력 전력이 동일하지만 실제의 경우 손실이 발생하여 입력전력과 출력전력은 동일하지 않다.

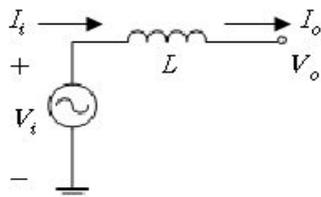


그림 4. 인덕터의 입/출력 관계

(1) Ideal case

Ideal한 인덕터는 쉽게 계산 가능하고 효율은 당연히 100[%]이다.(수식 6)

$$P_i = V_i I_i \quad (4)$$

$$P_o = V_o I_o = L \frac{dI_i}{dt} \times \int \frac{V_i}{L} dt \quad (5)$$

$$= V_i I_i \quad (6)$$

$$\eta[\%] = \frac{P_o}{P_i} 100 = 100$$

(2) Non-Ideal case

손실이 있는 실제의 경우는 전력 손실이 생기게 되며(수식 8), 우리가 구해야 할 변수가 된다. 이를 구하는 방법은 뒤에서 설명 한다.

$$P_i = P_o + P_{loss} \quad (6)$$

$$\eta[\%] = \frac{P_o}{P_i} 100 = \frac{(P_i - P_{loss})}{P_i} 100 \quad (8)$$

3.2 일반적 PCS 인덕터의 손실 계산

PCS 인덕터의 손실은 실험이나 계산으로 측정이 가능하다. 실험적 측정은 PCS 시스템 및 인덕터의 제작이 완료된 상태에서 확인이 가능하여, 설계과정에서는 반영이 어려우므로 본 논문에서는 손실의 측정의 계산 부분을 다루도록 한다.

계산적 측정은 100% 실제효율과 일치하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 계산적 접근의 방식은 인덕터의 설계과정에서 예상 자료로 활용될 수 있기에 의미가 있다. 계산적으로 손실을 측정하는 방법 코어의 손실에 해당하는 철손과 권선의 손실인 동손으로 나누어 다음과 같이 계산한다.

(1) 철손(core loss) 계산

- step 1. 권선의 턴수와 인덕턴스 값을 가지고 코어의 자기저항을 계산한다.

$$R_c = \frac{N^2}{L} \quad [A/Wb] \quad (9)$$

- step 2. 권선의 턴수, 입력전류, 자기저항 그리고 코어의 단면적 값을 가지고 자속밀도를 계산한다.

$$B = \frac{\phi}{A_c} = \frac{N \times I}{R_c \times A_c} \quad [\text{T}] \quad (10)$$

- step 3. 시스템 주파수와 자속밀도 값을 그림3과 같은 자속밀도와 단위전력손실 관계 그래프를 이용하여 단위면적당 전력손실 값을 계산한다.

$$P_L = 10^{\text{alog}_{10} B + b} \quad [\text{kW/m}^3]$$

- step 4. 단위전력손실 값에 코어의 부피를 곱하여 철손 값을 계산한다.

$$P_c = V_c \times P_L \quad [\text{W}] \quad (11)$$

(2) 동손(iron loss) 계산

- step 1. 코어의 창 길이, 공극의 길이 그리고 권선의 지름을 가지고 한 층에 가능한 턴수를 계산한다.

$$n_l = \frac{0.9 \times (h_w + l_g)}{D_{cu}} \quad [\text{회}] \quad (12)$$

- step 2. 턴수를 층당 가능 턴수로 나누면 층수를 계산한다.

$$n_f = \frac{N}{n_l} \quad [\text{층}] \quad (13)$$

- step 3. 한 층이 증가할 때 한 턴에서 늘어나는 길이 값과 첫 번째 층의 한 턴의 길이를 턴수, 층수와 함께 계산하여 권선의 길이를 구할 수 있다.

$$l_{cu} = N(l_f + (\frac{n_f + 1}{2} - 1)l_{up}) \quad [\text{cm}] \quad (14)$$

- step 4. 권선의 길이, 권선계수 그리고 권선의 단면적을 가지고 권선의 자기저항 값을 계산할 수 있다.

$$R_{cu} = \frac{\rho}{A_{cu}} \times l_{cu} \quad [\Omega] \quad (15)$$

- step 5. 실효 입력전류 값과 권선 자기저항 값으로 동손 값을 계산한다.

$$P_{cu} = I_s^2 \times R_{cu} \quad [\text{W}] \quad (16)$$

(3) 인덕터 손실 계산

철손과 동손을 합쳐 인덕터의 전체손실을 계산할 수 있다.

$$P_t = P_{cu} + P_c \quad [\text{W}] \quad (17)$$

3.3 효과적인 PCS 인덕터 효율계산법

인덕터의 손실 계산 수식들의 정리하여 턴수의 방정식으로 정리하고 식의 최소 점을 구할 수 있다면 최소 손실 값과 그 때의 설계 턴수를 찾을 수 있다.

(1) 철손 수식 정리

$$\begin{aligned} B &= \frac{\phi}{A_c} \quad (\because \phi = \frac{NI}{R_c}) \\ &= \frac{N \times I}{R_c \times A_c} \quad (\because R_c = \frac{N^2}{L}) \\ &= \frac{L \times I}{N \times A_c} \\ P_L &= 10^{\text{alog}_{10} B + b} = 10^{\text{alog}_{10} \frac{L \times I}{N \times A_c} + b} \\ P_c &= V_c \times P_L = V_c \times 10^{\text{alog}_{10} \frac{L \times I}{N \times A_c} + b} \end{aligned} \quad (18)$$

(2) 동손 수식 정리

$$\begin{aligned} n_l &= \frac{0.9 \times (h_w + l_g)}{D_{cu}} \\ n_f &= \frac{N}{n_l} = \frac{N \times D_{cu}}{0.9 \times (h_w + l_g)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{cu} &= N \times (l_f + ((\frac{n_f + 1}{2}) - 1) \times l_{up}) \\
 &= N \times (l_f + ((\frac{n_f - 1}{2}) \times l_{up}) \\
 &= N \times (l_f + (\frac{N \times D_{cu}}{1.8(h_w + l_g)} - \frac{1}{2})l_{up}) \\
 &= N \times (l_f + N(\frac{D_{cu} \times l_{up}}{1.8(h_w + l_g)}) - \frac{l_{up}}{2}) \\
 &= N^2 \frac{5D_{cu} \times l_{up}}{9(h_w + l_g)} + N(l_f - 0.5l_{up})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{cu} &= \frac{\rho}{A_{cu}} \times l_{cu} \\
 &= \frac{4\rho}{D_{cu}^2 \pi} \times (N^2 \frac{5(D_{cu} \times l_{up})}{9(h_w + l_g)} \\
 &\quad + N(l_f - 0.5l_{up})) \\
 &= N^2 \frac{20(\rho \times l_{up})}{9D_{cu} \times \pi \times (h_w + l_g)} \\
 &\quad + N \frac{2\rho(2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{cu} &= I_s^2 \times R_{cu} \\
 &= N^2 \frac{20I_s^2 \times \rho \times l_{up}}{9D_{cu} \times \pi \times (h_w + l_g)} \\
 &\quad + N \frac{2I_s^2 \times \rho(2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi}
 \end{aligned} \tag{19}$$

(3) PCS 인덕터 손실 수식 정리

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_{cu} + P_c \\
 &= N^2 \frac{20I_s^2 \times \rho \times l_{up}}{9D_{cu} \times \pi \times (h_w + l_g)} \\
 &\quad + N \frac{2I_s^2 \times \rho(2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi} \\
 &\quad + V_c \times 10^{\frac{alog_{10} \frac{L \times I}{N \times A_c} + b}{}}
 \end{aligned} \tag{20}$$

PCS 인덕터 손실 수식에서 공극의 길이는 턴수와 연동되어 변경되는 값이므로 사전 계산과정에서 수식에 적용이 어렵다. 하지만 일반적으로 창 가로길이에 비하여 매우 작은 값이므로 무시하고 계산하여도 거의 동일한 최소 손실 턴수를 구할 수 있다. 따라서 수식20을 수식21로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_{cu} + P_c \\
 &= N^2 \frac{20I_s^2 \times \rho \times l_{up}}{9D_{cu} \times \pi \times h_w} \\
 &\quad + N \frac{2I_s^2 \times \rho(2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi} \\
 &\quad + V_c \times 10^{\frac{alog_{10} \frac{L \times I}{N \times A_c} + b}{}}
 \end{aligned} \tag{21}$$

코어와 권선의 data값으로 턴수에 대한 방정식으로 정리가 가능하므로 최소 손실 턴수를 반복적 손실 값 확인 작업 없이 계산하여 설계에 적용하여 볼 수 있다.

4. PCS 인덕터 손실 수식의 적용

PCS 시스템 및 권선의 사양은 표1과 같이 동일하게 적용하기로 한다.

표 1. PCS 시스템 및 권선 사양 설정

변수	data값	변수	data값
L	330uH	I	15A
f	20kHz	D_{cu}	2.3mm
ρ	1.7×10^{-6}	I_s	16.1A

실제 PCS 시스템에 적용되고 있는 EE, PQ 코어들을 적용하여 확인하여 보았다.

(1) PM7, EE7066

코어의 data(표2)를 수식25에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 P_t &= 0.0005696057806N^2 + 0.104682101N \\
 &\quad + 0.21282 \times 10^{\frac{2.68 \log_{10} \frac{3291.2}{N} - 4.53}{}}
 \end{aligned}$$

최소 손실 턴수를 확인을 위해 Matlab을 이용하여 구하면 그림5에서와 같이 31턴일 때 5.4817W 정도의 최소 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

이 값을 그림8와 같이 손실계산 PCS 인덕

터 설계용 엑셀 표에서 확인하여 보아도 31턴이 되도록 공극의 길이를 0.27cm로 넣어보면 손실이 4.458W로 비슷한 값으로 최소가 되는 것을 확인 할 수 있다.

(2) MB3, PQ5050

동일한 방법으로 표3 data를 대입하여 수식을 정리한다.

$$P_t = 0.0002704306862N^2 + 0.062819872N + 0.0742 \times 10^{3.18 \log_{10} \frac{6913.4}{N} - 5.84}$$

동일하게 Matlab을 이용하여 확인하면 그림6에서와 같이 43턴일 때 4.3135W 정도의 최소 손실을 확인할 수 있으며 그림9과 같이 손실계산 PCS 인덕터 설계용 엑셀 표에서 43턴, 공극의 길이 0.25cm에서 4.281W의 비슷한 최소 손실을 확인 할 수 있다.

(3) MB3, PQ10787

동일한 방법으로 표4 data를 대입하여 수식을 정리한다.

$$P_t = 0.0001743312102N^2 + 0.132749426N + 0.5826 \times 10^{3.18 \log_{10} \frac{1733.2}{N} - 5.84}$$

동일하게 Matlab을 이용하여 확인하면 그림7에서와 같이 22턴일 때 3.9085W 정도의 최소 손실을 확인할 수 있으며 그림10과 같이 손실계산 PCS 인덕터 설계용 엑셀 표에서 22턴, 공극의 길이 0.25cm에서 3.906W의 비슷한 최소 손실을 확인 할 수 있다.

표 2. PM7, EE7066 data

변수	data값	변수	data값
A_c	7.52cm ²	V_c	106.41cm ³
a	2.68	b	-4.53
l_f	10.8cm	l_{up}	1.84cm
h_w	4.38cm	l_w	1.3cm

표 3. MB3, PQ5050 data

변수	data값	변수	data값
A_c	3.58cm ²	V_c	37.1cm ³
a	3.18	b	-5.84
l_f	6.28cm	l_{up}	0.72cm
h_w	3.61cm	l_w	1.2cm

표 4. MB3, PQ10787 data

변수	data값	변수	data값
A_c	14.28cm ²	V_c	291.3cm ³
a	3.18	b	-5.84
l_f	12.84cm	l_{up}	0.72cm
h_w	5.6cm	l_w	2.64cm

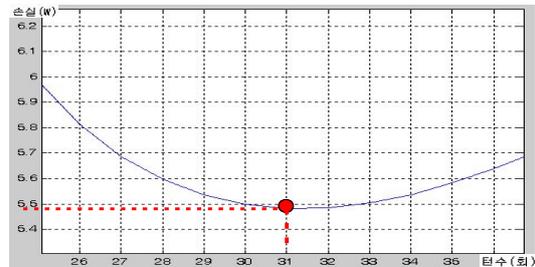


그림 5. PM7, EE7066 Matlab 턴수 대비 손실 그래프

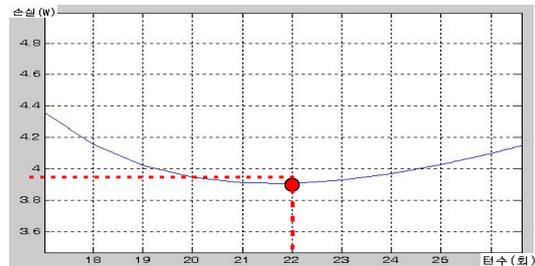


그림 6. MB3, PQ5050 Matlab 턴수 대비 손실 그래프

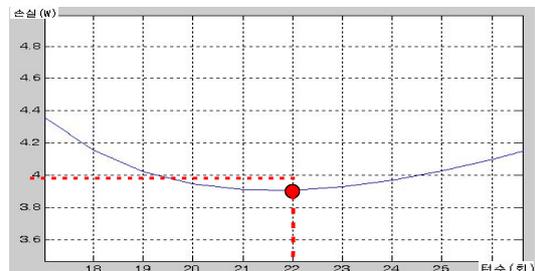


그림 7. MB3, PQ10787 Matlab 턴수 대비 손실 그래프

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
h_w	[cm]	4.98	창길이_가로	N	[회]	31	턴수
l_w	[cm]	1.30	창길이_세로	B	[mT]	106	flux density
D_{cu}	[cm]	0.23	권선의 지름				
A_c	[m ²]	7.52	코어 단면적				
l_c	[cm]	29.76	코어 길이				
μ_r	-	2400	비투자율				
L	[mH]	0.33	인덕턴스				
I	[A]	15	입력전류				
l_g	[cm]	0.27	공극의 길이				
B_{33}	[mT]	430	한계fluxdensity				
N_{max}	[회]	100	최대턴수				
a	-	2.68	손실기울기	P_c	[W]	1.692	코어손실전력
b	-	-4.53	손실상수	P_{cu}	[W]	3.786	권선손실전력
V_c	[m ³]	108.41	코어부피	P_t	[W]	5.438	전체손실전력
li	[cm]	10.80	권선길이_1턴				
l_{cu}	[cm]	1.84	권선중가길이_1층				
ρ	[Ω/cm]	0.0000017	권선계수				
I_{rms}	[A]	16.10	rms 전류값				

그림 8. PM7, EE7066 손실계산 PCS인덕터 설계

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
h_w	[cm]	3.61	창길이_가로	N	[회]	43	턴수
l_w	[cm]	1.20	창길이_세로	B	[mT]	161	flux density
D_{cu}	[cm]	0.23	권선의 지름				
A_c	[m ²]	3.58	코어 단면적				
l_c	[cm]	22.60	코어 길이				
μ_r	-	2500	비투자율				
L	[mH]	0.33	인덕턴스				
I	[A]	15	입력전류				
l_g	[cm]	0.25	공극의 길이				
B_{33}	[mT]	450	한계fluxdensity				
N_{max}	[회]	78	최대턴수				
a	-	3.18	손실기울기	P_c	[W]	1.112	코어손실전력
b	-	-5.84	손실상수	P_{cu}	[W]	3.169	권선손실전력
V_c	[m ³]	37.10	코어부피	P_t	[W]	4.281	전체손실전력
li	[cm]	8.28	권선길이_1턴				
l_{cu}	[cm]	0.72	권선중가길이_1층				
ρ	[Ω/cm]	0.0000017	권선계수				
I_{rms}	[A]	16.10	rms 전류값				

그림 9. MB3, PQ5050 손실계산 PCS인덕터 설계 표

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
h_w	[cm]	5.60	창길이_가로	N	[회]	22	턴수
l_w	[cm]	2.64	창길이_세로	B	[mT]	79	flux density
D_{cu}	[cm]	0.23	권선의 지름				
A_c	[m ²]	14.28	코어 단면적				
l_c	[cm]	40.80	코어 길이				
μ_r	-	2500	비투자율				
L	[mH]	0.33	인덕턴스				
I	[A]	15	입력전류				
l_g	[cm]	0.25	공극의 길이				
B_{33}	[mT]	450	한계fluxdensity				
N_{max}	[회]	259	최대턴수				
a	-	3.18	손실기울기	P_c	[W]	0.904	코어손실전력
b	-	-5.84	손실상수	P_{cu}	[W]	3.002	권선손실전력
V_c	[m ³]	291.30	코어부피	P_t	[W]	3.906	전체손실전력
li	[cm]	12.87	권선길이_1턴				
l_{cu}	[cm]	0.72	권선중가길이_1층				
ρ	[Ω/cm]	0.0000017	권선계수				
I_{rms}	[A]	16.10	rms 전류값				

그림 10. MB3, PQ10787 손실계산 PCS인덕터 설계 표

5. PCS 트랜스포머의 설계

인덕터에서와 같이 정해진 코어와 권선을

가지고 시스템에 적합하도록 트랜스포머를 설계하는 부분만 다루도록 한다.

5.1 일반적인 PCS 트랜스포머의 설계

선정된 코어와 권선의 data 값과 시스템의 필요 입출력 전압, 전류 값이 나오도록 1차 측의 턴수를 조절해가며 전체턴수와 자속밀도 값을 계산하며 한계 자속밀도와 비교하여 임의의 적절한 설계 턴수를 확인한다.

5.2 PCS 트랜스포머 손실 수식 정리

기본적으로 인덕터의 손실계산 수식을 그대로 적용되고 자속밀도(B, flux density) 값을 트랜스포머의 수식으로 적용한다.

$$B = \frac{V_{in}}{4 \times N_1 \times A_c \times f} \quad (22)$$

(1) 철손 수식 정리

$$P_c = V_c \times 10^{a \times \log_{10} \frac{V_{in}}{4 \times N_1 \times A_c \times f} + b} \quad (23)$$

(2) 동손 수식 정리

$$P_{cu1} = N_1^2 \frac{20I_{s1}^2 \times \rho \times l_{up}}{9D_{cu} \times \pi \times (h_w + l_g)} + N_1 \frac{2I_{s1}^2 \times \rho (2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi} \quad (24)$$

$$P_{cu2} = N_2^2 \frac{20I_{s2}^2 \times \rho \times l_{up}}{9D_{cu} \times \pi \times (h_w + l_g)} + N_2 \frac{2I_{s2}^2 \times \rho (2l_f - l_{up})}{D_{cu}^2 \times \pi} \quad (25)$$

인덕터와는 다르게 1차 측 턴수와 2차 측 턴수가 나누어져 계산되므로 하나의 수식으로 계산하기는 어렵다. 하지만 이 수식을 토대로 손실계산 PCS 트랜스포머 설계 표를 만들어 손실이 최소가 되는 설계 턴수를 확인할 수 있다.

6. PCS 트랜스포머 손실계산 적용

PCS 시스템 및 권선의 사양은 표5와 같이 동일하게 적용하기로 한다.

표 5. PCS 시스템 및 권선 사양 설정

변수	data 값	변수	data 값
V_1	175V	V_2	380V
f	20kHz	D_{cu}	1.1mm(4개)

표 6. PL11, OR7824-51 data

변수	data 값	변수	data 값
A_c	3.52cm ²	V_c	63.70cm ³
a	2.71	b	-4.82
l_f	12.35cm	l_{up}	1.76cm
A_w	20.43cm ²		

표 7. PL11, OR7822-51 data

변수	data 값	변수	data 값
A_c	2.98cm ²	V_c	58.25cm ³
a	2.71	b	-4.82
l_f	12.35cm	l_{up}	1.76cm
A_w	20.02cm ²		

(1) PL11, OR7824-51

코어의 data(표6)를 PCS 트랜스포머 손실 수식이 적용된 설계 표에 대입한다.(그림11)

1차 측에 37턴을 감아주었을 때 총 턴수가 124턴이 되고 손실이 3.789W의 최소가 된다. 이는 3kW의 전체 용량을 고려하였을 때 약 0.126%의 효율 감소를 나타냄을 볼 수 있다.

(2) PL11, OR7822-51

코어의 data(표7)를 PCS 트랜스포머 손실 수식이 적용된 설계 표에 대입한다.(그림12)

1차 측에 39턴을 감아주었을 때 총 턴수가 131턴이 되고 손실이 3.949W의 최소가 된다. 이는 3kW의 전체 용량을 고려하였을 때 약 0.132%의 효율 감소를 나타냄을 볼 수 있다.

(3) PM7, EE7066

코어의 data(표2)를 PCS 트랜스포머 손실 수식이 적용된 설계 표에 대입한다.(그림13)

1차 측에 20턴을 감아주었을 때 총 턴수가 60턴이 되고 손실이 1.8W의 최소가 된다. 이는 3kW의 전체 용량을 고려하였을 때 약 0.06%의 효율 감소를 나타냄을 볼 수 있다.

이와 같이 PCS 시스템, 코어 와 권선의 사양을 가지고 손실을 쉽게 계산하여 손실을 고려한 코어의 선택 및 설계 턴수의 설계를 할 수 있다.

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
P_{rated}	[VA]	3000	정격용량	n	-	0.423	권선비
V_1	[V]	165	1차측 전압	N_2	[회]	87	2차측 턴수
V_2	[V]	390	2차측 전압	N_1	[회]	124	전체 턴수
f	[Hz]	20	주파수	I_{sec}	[A]	7.69	2차측 전류
A_c	[cm ²]	3.25	코어 단면적	I_{in}	[A]	18.18	1차측 전류
l_c	[cm]	19.80	코어 길이				
N_c	[회]	1	코어갯수				
μ_r	-	2500	비투자율	L_1	[mH]	7.128	1차측 인덕턴스
A_w	[cm ²]	20.43	창면적	L_2	[mH]	39.822	2차측 인덕턴스
l_w	[cm]	16.01	창둘레				
D_{cu}	[cm]	0.11	권선의 지름	B_{max}	[mT]	172	최대 자속밀도
N_{cs}	-	4	권선수				
N_1	[회]	37	1차측 턴수				
N_{max}	[회]	376	최대턴수				
B_{50}	[mT]	510	한계fluxdensity				
a	-	2.71	손실기울기	P_c	[W]	1.094	코어손실전력
b	-	-4.82	손실상수				
V_c	[cm ³]	63.70	코어부피	P_{sc}	[W]	1.775	1차측 권선손실전력
l_f	[cm]	12.35	권선길이_1턴	P_{sw}	[W]	0.920	2차측 권선손실전력
l_{se}	[cm]	1.76	권선중가길이_1층	P_{cu}	[W]	2.695	권선손실전력
ρ	[Ω/cm]	0.00001724	권선저수				
I_{rms}	[A]	18.51	rms 전류값	P_t	[W]	3.789	전체손실전력
I_{rms}	[A]	8.44					

그림 11. PL11, OR7824 PCS트랜스포머 설계 표

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
P_{rated}	[VA]	3000	정격용량	n	-	0.423	권선비
V_1	[V]	165	1차측 전압	N_2	[회]	92	2차측 턴수
V_2	[V]	390	2차측 전압	N_1	[회]	131	전체 턴수
f	[Hz]	20	주파수	I_{sec}	[A]	7.69	2차측 전류
A_c	[cm ²]	2.98	코어 단면적	I_{in}	[A]	18.18	1차측 전류
l_c	[cm]	19.80	코어 길이				
N_c	[회]	1	코어갯수				
μ_r	-	2500	비투자율	L_1	[mH]	7.261	1차측 인덕턴스
A_w	[cm ²]	20.02	창면적	L_2	[mH]	40.568	2차측 인덕턴스
l_w	[cm]	15.88	창둘레				
D_{cu}	[cm]	0.11	권선의 지름	B_{max}	[mT]	177	최대 자속밀도
N_{cs}	-	4	권선수				
N_1	[회]	39	1차측 턴수				
N_{max}	[회]	369	최대턴수				
B_{50}	[mT]	510	한계fluxdensity				
a	-	2.71	손실기울기	P_c	[W]	1.097	코어손실전력
b	-	-4.82	손실상수				
V_c	[cm ³]	58.25	코어부피	P_{sc}	[W]	1.876	1차측 권선손실전력
l_f	[cm]	12.35	권선길이_1턴	P_{sw}	[W]	0.975	2차측 권선손실전력
l_{se}	[cm]	1.76	권선중가길이_1층	P_{cu}	[W]	2.851	권선손실전력
ρ	[Ω/cm]	0.00001724	권선저수				
I_{rms}	[A]	18.51	rms 전류값	P_t	[W]	3.949	전체손실전력
I_{rms}	[A]	8.44					

그림 12. PL11, OR7822 PCS트랜스포머 설계 표

변수	단위	data 값	변수설명	변수	단위	계산 값	변수설명
P_{rated}	[VA]	3000	정격용량	n	-	0.423	권선비
V_1	[V]	165	1차측 전압	N_1	[회]	47	2차측 턴수
V_2	[V]	390	2차측 전압	N_2	[회]	67	전체 턴수
f	[kHz]	20	주파수	I_{sec}	[A]	7.69	2차측 전류
A_c	[cm ²]	7.52	코어 단면적	I_m	[A]	18.18	1차측 전류
l_c	[cm]	14.28	코어 길이				
N_c	[개]	2	코어갯수				
M_r	-	2400	비투자율	L_1	[mH]	6.090	1차측 입력인덕턴스
h_w	[cm]	4.38	창길이_가로	L_2	[mH]	34.021	2차측 입력인덕턴스
l_w	[cm]	1.30	창길이_세로				
D_{ca}	[cm]	0.11	권선의 지름	B_{max}	[mT]	69	최대 자속밀도
N_{ca}	-	4	권선수				
N_1	[회]	20	1차측 턴수				
N_{max}	[회]	109	최대턴수				
B_{sa}	[mT]	430	한계fluxdensity				
a	-	2.68	손실기울기	P_c	[W]	0.524	코어손실전력
b	-	-4.53	손실상수				
V_c	[cm ³]	106.41	코어부피	P_{sc1}	[W]	0.839	1차측 권선손실전력
h	[cm]	10.80	권선길이_1턴	P_{sc2}	[W]	0.437	2차측 권선손실전력
l_{wp}	[cm]	0.88	권선중가길이_1층	P_{cu}	[W]	1.276	권선손실전력
ρ	[Ω/cm]	0.00001724	권선계수				
I_{rms}	[A]	18.51	rms 전류값	P_r	[W]	1.800	전체손실전력
I_{rms}	[A]	8.44					

그림 13. PM7, EE7066 PCS트랜스포머 설계 표

7. 결 론

본 논문에서는 PCS 시스템의 가장 기본적인 소자인 인덕터와 트랜스포머의 손실을 고려한 효율적 설계, 그 중에서도 손실을 효율적으로 계산하고 이를 적용하여 손쉽게 효율적 설계의 방법을 제시하였다. 제시한 방법의 장점은 다음과 같다.

- PCS 시스템 및 인덕터와 트랜스포머를 제작하기 전 손실의 값을 예측할 수 있다.
 - 최소 손실 설계 사양, 공극의 길이 및 턴수를 쉽게 계산할 수 있다.
 - PCS 인덕터의 제작 전에 손실 값을 비교하여 올바른 코어 선택에 도움을 줄 수 있다.
- 오차발생의 가능성은 존재하지만 쉽게 손실을 고려한 PCS 인덕터와 트랜스포머를 설계할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. H. W. Whittington, B. W. Flynn, D. E. Macpherson, "Switched Mode Power Supplies: Design and Construction" Research Studies Press Ltd, John Wiley & Sons Inc, pp.52-74.
2. Hee-Jun Kim, "Switched Mode Power Supplies" Sung-An Dang, pp.62-73.
3. Kook-Sun Lee, "Efficiency analysis of the boost converter for compact solar array system" The Korean Solar Energy Society 2009.11.19.
4. Colonel Wm. T. McLyman, "Designing Magnetic Components for High Frequency DC-DC Converters" Kg Magnetics, Inc. San Marino, California, pp.54-282
5. Mark J. Nave, "Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supplies" Van Nostrand Reinhold, New York, pp.152-170