

多출력 DC-DC 플라이백 컨버터용 변압기 설계방법 및 개발

The Design and Development of Flyback Transformer for Multi - Out Flyback DC-DC Converter

박종연* 강도형**

Park Jong Yeon Kang Do Hyung

Abstract

This paper gives a fundamental study of the design method of Flyback Transformer(FBT) in the Multioutput Flyback DC-DC Converter. We explained a winding strategy and Core selecting of the Flyback transformer to get the design guidelines for optimizing the performance of Flyback DC-DC Converter. The final goal of this paper is to obtain design rules of the Flyback transformer to minimize the leakage inductance for good quality of DC Source

키워드 : 플라이백 DC-DC Converter, 플라이백 변압기, 누설 자속

Keywords : Flyback DC-DC Converter. Flyback transformer, leakage inductance

1. 서론

플라이백 컨버터(Flyback Converter)는 각종 가전 제품 및 OA 기기 등 전자·통신 기기의 직류 안정화 전원으로서 폭 넓게 이용되고 있는 스위치 모드 파워 서플라이(Switch Mode Power Supply) 시스템 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 DC-DC 컨버터이다.[1-2] 플라이백 컨버터는 적은 수의 소자만으로 최적의 솔루션을 제공할 수 파워 어플리케이션이며, 설계 시에 고려해야 할 가장 중요한 소자로서 “변압기”가 있다. 일반적으로 사용되는 변압기는 에너지를 전달하는 기능을 하지만,

플라이백 컨버터에 구비되는 변압기는 고전압 또는 누설 전류로 인한 사고위험으로부터 사용자를 보호하는 기능뿐만 아니라 스위칭 동작에 의한 에너지를 저장하기 때문에 다른 특성을 갖고 있다. [3-4]

이에 따라, 플라이백 변압기를 설계할 시에는 인덕터 설계와 유사한 방법으로 수행될 수 있다. 그러나 블라 이백 변압기의 코어의 선택방법과 권선 방법에 따른 플라이백 DC-DC 컨버터의 성능 평가는 아직 깊이 있게 연구되지 않은 실정이다.

본 논문은 컨버터의 성능을 최적화할 수 있도록 플라이백 변압기의 전류값 설정 및 이에 따른 최선의 코어를 선택할 수 있을 뿐만 아니라 권선하는 방법에 대한 설계지침을 제시하였다.

* 강원대학교 전기공학과 교수

** 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정

2. 본론

2.1 플라이백 변압기의 설계 조건

2.1.1 컨버터의 효율 및 변압기의 출력결정

플라이백 DC-DC 컨버터의 전원측 입력 전압은 A.C Voltage : $V_{in,rms} = 85 \sim 264$ Volt의 범위로 설정하였으며, 40kHz~50kHz에서 약 70~75%인 효율을 낼 수 있는 것을 목적으로 하는 플라이백 변압기는 아래 Fig. 1과 같은 다출력 타입 (Multioutput type)의 변압기로 선택하였다.

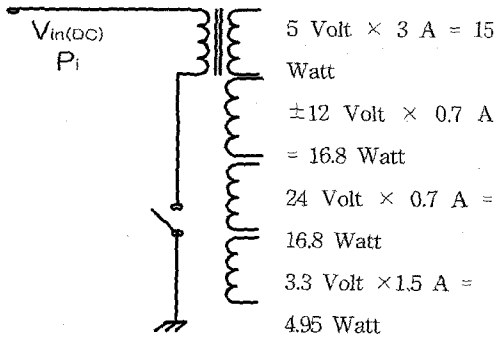


Fig. 1 다출력 타입의 변압기 회로도

따라서 전체 출력 전력은 $P_o = 51.55$ Watt가 된다.

2.1.2 플라이백 컨버터의 시비율 결정

본 연구에 따른 플라이백 DC-DC 컨버터의 시비율은 최소 0.17~ 최대 0.40으로 하였다.

- ① D_{min} 는 $V_{in(DC)}$ 값의 최대치에서 무부하 때에 $D = D_{min}$ 이 된다.

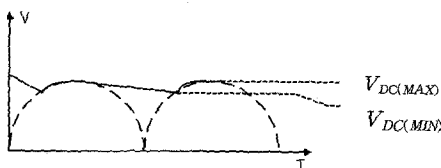


Fig. 2 시비율의 변화에 따른 $V_{in(DC)}$ 의 변화

$V_{DC(MAX)} = 264\sqrt{2} - Diode\text{전압} = 373.3V$
 $V_{DC(MIN)} \approx V_{DC(MAX)} \times 90\% \approx 336$ Volt가 되며, 설계과정에서는 $V_{DC(MIN)} = 336$ Volt를 사용한다.
 변압기의 V_o 가 5 Volt Line 이면, $V_o = 5 + Diode$ 전압 = 6 V가 된다.

따라서 최소 시비율은

$$V = \frac{N_2}{N_1} \times \frac{D}{(D-1)} \times V_{in} \dots \dots (1)$$

에 의하여,

$$6 = \frac{4}{46} \times \frac{D}{(D-1)} \times 336 \text{ 가 되며,}$$

$$D = D_{min} = \frac{138}{672 + 138} = 0.1703$$

따라서 $\therefore D_{min} = 17\%$ 가 된다.

- ② D_{max} 는 $V_{in(DC)}$ 의 최소에서 Full-load 때 발생하게 된다.

만약 Main $V_o = 5$ V이라면, $V_o = 5 + V_{diode} = 6V$ 가 된다.

$$\text{따라서, } V_o = 6 = \frac{4}{46} \times \frac{D}{D-1} \times 112$$

$$D_{max} = 40\%$$

2.2 플라이백 변압기의 코어 선택

2.2.1 변압기에 흐르는 피크 전류값 설정 및 계산

본 연구에 사용된 코어의 형상은 EI-28를 선택하였으며 재질은 TDK社의 페라이트 재질을 선정하였다.

그리고, 변압기의 입력 전력은 $P_{in} = \frac{P_o}{\eta}$ 에 의하여 설계 시 $P = 74$ Watt로 설정하였으며, 효율이 $\eta = 0.70$ 로 하였다.

한편 변압기를 흐르는 peak 전류는 코어(core)의 포화(Saturation)의 기준 전압 역할을 하게 되므로 설계에서 I_{peak} 값 설정 및 계산이 대단히 중요하게 된다.

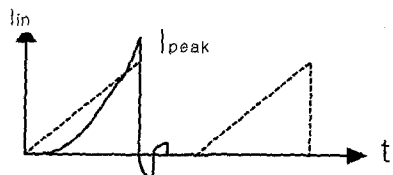
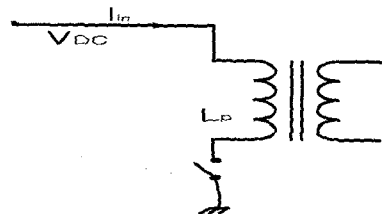


Fig. 3 변압기에 흐르는 전류의 파형

이에 따라, 변압기를 통과하는 Irms는

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_0} \left(\frac{I_{pk} \cdot t}{T}\right)^2 dt} = I \times \sqrt{\frac{T_0}{3T}} \dots (2)$$

가 된다. 그리고 참고문헌 [5]와는 달리 본 연구에서 Infinity 社의 (LX1562 - Manual) 에 의하면 실제적인 Peak 값 증가에 의하여 70 % 의 I 값을 고려하여 전류값을 구했다.

$$I_{rms} = 0.7 \times I_{pk} \times \sqrt{\frac{T_0}{3T}} \dots (3)$$

$$I_{peak} = I_{rms} \times \sqrt{\frac{3}{D_{max}}} \times \frac{1}{0.7} \dots (4)$$

가 되므로, D = D_{max}(Full-Load時)에서 I_{peak}는 최대값을 갖는다. 이에 따라, 본 연구에서는 Full-Load 時에 Irms 값을 계산하였다.

우선 입력 전력(Pi)은 74 watt이고, Minimum V_{in(DC)} = 112 V이므로, I_{in(rms)} = 74 watt/112 Volt = 660 mA가 되었으며, 식 (4)에 의하여 I_{peak} = I_{rms} × √(3/D_{max}) × 1/0.7 = 0.66 × √(3/0.4) × 1/0.7 = 2.582(A)로 되었다.

2.2.2 변압기 1차측 인덕턴스 값 계산

$$L_p = \frac{V_{input(MIN)} \times T_{on(MAX)}}{I_{peak}} \dots (5)$$

의 관계식으로부터 V_{input(Min)} = V_{DC(Min)} = 112 V가 된다. 여기서 T_{on}은 다음과 같이 구해진다.

$$T_{on} = \frac{1}{40k} \times 0.4 = 100 \mu sec$$

$$L_p = 435 \mu H$$

$$\frac{112 Volt \times 10 \mu sec}{2.582} = 434 \mu H$$

이에 본 연구에 적용된 L_p값은 L_p = 500 μH 로 선정하였다.

2.2.3 변압기의 Core 선택

$$K_g = \frac{\Omega}{P_{cu}} \left(\frac{L_1 I_{peak}^2}{B_{max}}\right)^2 \dots (6)$$

I_{peak} : Maximum Peak Inductor Current[A]

L₁ : Required Inductance [Henry]

B_{max} : Maximum Flux-Density [Tesla]

P_{cu} : Maximum Copper Loss [Watt]

(전체 OutPut Power의 약 2 % 정도)

Ω : 상수 1.724 × 10⁻⁸ m 파

$$K_g(Core) = k \times \frac{A_w A_e^2}{l_w} \times 10^{-15} \dots (7)$$

k : winding coefficient(Filling Factor)

k = 0.4 ~ 0.5

A_w : Bobbin의 Window-Area
(Core의 Window Area)

A_E : Effective Core-Area[mm²]
(Cross-Sectional Area)

l : Mean length/turn [mm]

의 관계식 式(6)과 (7)로부터 K_g와 K'_g를 계산한 뒤 K'_g > K_g 를 만족하는 Core를 선택하였다.

이에 따라 본 연구에서 사용된 Core는 EER 3345이며, 그 특성은 다음과 같다.

$$L_p = 435 \mu H$$

$$P_{cu} = 51.25 \times 2\% = 1.02 watt$$

$$B_{max} = 250 \vee 25^\circ C$$

$$150 \vee 100^\circ C$$

여기서 만약 Core의 재질이 YM₂ 이면 상기 Data 와 같으며, PM₂ 이면 B_{max} = 400mT~500mT가 된다.

이에 본 연구에서 설계된 최대 자속 밀도 B_{max} 는 B_{max} = 180mT = 0.18T로 하였으며,

$$\therefore K_g = \frac{1.714 \times 10^{-8}}{1.02} \left(\frac{0.435 \times 10^{-3} \times 2.582^2}{0.18}\right)^2$$

$$= 4.36 \times 10^{-12}$$

로 구해졌으며, Core EER 3345의 Structure에서

k = 0.4

A_E = 97

A_w = 93.5

l_w = 58.25

$$K'_g = 0.4 \times \frac{93.5 \times 97^2}{58.25} \times 10^{-15} = 6.041 \times 10^{-12} 가$$

된다.

따라서 K'_g = 6.04 × 10⁻¹² > K_g = 4.36 × 10⁻¹² 이므로 적절한 Core를 선택하였다.

2.3 플라이백 변압기의 권선방법

2.3.1 변압기의 1차측 turns 수 N_p 의 계산

1차측 권선수 N₁은 다음과 같이 구해진다.

$$N_p = \frac{L_p I_{pk} \times 10^8}{B_{max} A_e} \dots (8)$$

L_p : Henry

I_{pk} : A

B_{max} : Gauss

$A_e : \text{Cm}^2$

여기서 $L_p = 435 \mu H = 435 \times 10^{-6} (H)$

$B_{\max} = 2500 \text{ Gauss}$

$I_{pk} = 2.582 (A)$

$A_l = 0.97 \text{ Cm}^2$

이므로 1차측 권선수 N_1 을 구하면

$$N_p = \frac{435 \times 10^{-6} \times 2.582 \times 10^8}{2,500 \times 0.97} = 46.3 \approx 46 \text{ Turns}$$

이 된다. 만약 $L_p = 500 \mu H$ 인 경우에는

$\frac{435 \mu H}{2500 \text{ Gauss}} = \frac{500 \mu H}{x}$ 에 의하여

$X = B_{\max} = 2873 \text{ Gauss}$ 이므로 $L_p = 500 \mu H$ 로 가정하여도 Core에서 견딜 수 있다.

2.3.2 공극 l_g 의 결정

공극을 결정하는 식은 다음과 같다.

$$l_g = \frac{0.4 \pi \times L_p \times I_{pk}^2 \times 10^8}{A_e \times B_{\max}^2} \dots \dots \dots (9)$$

여기서 플라임백 변압기의 공극 l_g 는 다음과 같다.

$$= \frac{0.4 \times 3.14 \times 435 \times 10^{-6} \times 2.582^2 \times 10^8}{0.97 \times 2500^2} = 0.06 \text{ cm}$$

만약 여기서 $B_{\max} = 3000 \text{ Gauss}$, $L_p = 500 \mu H$ 로 가정하면

$$l_g = \frac{0.4 \times 3.14 \times 500 \times 10^{-6} \times 2.582^2 \times 10^8}{0.97 \times 3000^2}$$

가 되어 $l_g = 0.5 \phi$ 로써 하고 turns 수 조절하였다.

2.3.3 변압기 2차측 권선수

다출력(Multioutput) 변압기의 2차측 권선수는 다음 식

$$N_{sx} = N_p \times \frac{V_{ox}(1 - D_{\max})}{V_{dcMIN} \times D_{\max}} \dots \dots \dots (10)$$

V_{ox} = 정격전압 + Diode 전압

에 의하여 구해질 수 있다. 이에 따른 2차측 권선수를 각각 구해 보면 다음과 같은 결과값을 얻을 수 있었다.

$$N_{s(5 \text{ Volt})} = 46 \times \frac{5.6(1-0.4)}{112 \times 0.4} = 3.45 \text{ Turns} \approx 4 \text{ Turns}$$

$$N_{s(\pm 12 \text{ Volt})} = 46 \times \frac{132(1-0.4)}{112 \times 0.4} = 8.132 \text{ T} \approx 9 \text{ Turns}$$

$$N_{s(\pm 24 \text{ Volt})} = 46 \times \frac{25.2(1-0.4)}{112 \times 0.4} = 15.525 = 16 \text{ turns}$$

$$N_{s(3.3 \text{ Volt})} = 46 \times \frac{4.0(1-0.4)}{112 \times 0.4} = 2.46 = 3 \text{ Turns}$$

$$N_{s(13 \text{ Volt-보조전원})} = 46 \times \frac{13.6(1-0.4)}{112 \times 0.4} = 8.378 \approx 9 \text{ Turns}$$

2.3.4 변압기 권선의 반경(Diameter)

변압기의 권선의 반경은 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$D_p = \sqrt{\frac{I_{peak}}{\pi \sigma}} \dots \dots \dots (11)$$

이에 따라 변압기의 1차측 권선과 2차측 권선의 반경들을 구해보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

① 변압기 1차측 권선의 반경

$$D_p = \sqrt{\frac{I_{peak}}{\pi \sigma}} = \sqrt{\frac{2.582}{3.14 \times 2.5}} = 0.5735 \phi$$

σ : Current Density(A/cm²)

여기서 실제로는 반경이 0.4 ϕ 인 것을 사용하였으나 0.55 ϕ 이상인 것을 사용해야 한다.

② 변압기 $\pm 12V$ 2차측 출력단의 권선 반경

$$D_s(\pm 12 \text{ Volt}) = \sqrt{\frac{2I_0}{\pi \sigma}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.7}{3.14 \times 2.5}} = 0.422$$

실제는 반경이 0.5 ϕ 인 것을 사용하였다.

③ 변압기 24V 2차측 출력단의 권선 반경

$$D_s(24 \text{ Volt}) = \sqrt{\frac{2I_0}{\pi \sigma}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.7}{3.14 \times 2.5}} = 0.422 \phi$$

실제는 반경이 0.5 ϕ 인 것을 사용하였다.

④ 변압기의 3.3V 2차측 출력단의 권선 반경

$$D_s(3.3 \text{ V}) = \sqrt{\frac{2I_0}{\pi \sigma}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.5}{3.14 \times 2.5}} = 0.618 \phi$$

실제로는 0.5 ϕ \times 2개로써 Winding(Bifilar)인 것을 사용하였다.

⑤ 변압기의 5V 2차측 출력단의 권선 반경

$$B_s(5V) = \sqrt{\frac{2 \times 3}{3.14 \times 2.5}} = 0.8742 \psi$$

실제로는 $0.5\psi \times 2$ 개로써 Winding(Bifilar)인 것을 사용하였다.

⑥ 변압기의 2차측 보조 권선의 반경

$$B_s(\text{보조}) = \sqrt{\frac{2 \times 0.7}{3.14 \times 2.5}} = 0.422$$

실제로는 $0.5\psi \times 1$ 개로써 Winding하였다.

2.4 설계 결과

2.4.1 변압기 코어의 실제 형상

코어의 형상은 다음과 같으며 $\text{Gap} \geq 0.5\psi$ 이므로 최초에는 $\text{Gap} = 0.5\psi$ 로써 시도 후 Gap 용지 또는 Tape 에 의해서 늘렸다.

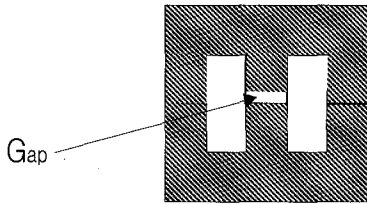


Fig. 4 Core의 형상 : EER3435H

2.4.2 변압기의 실제 회로도

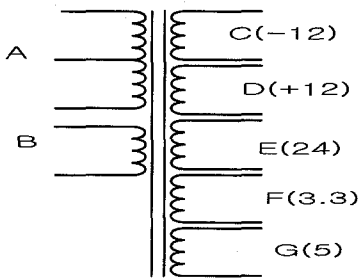
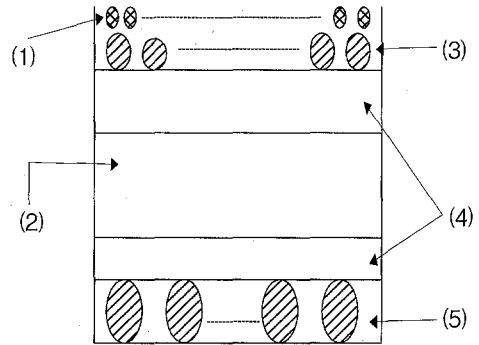


Fig. 5 실제 변압기의 회로도

2.4.3 변압기 Bobbin의 권선 방법



- (1) : Winding B(9T:0.5 ψ 1개)
- (2) : 2차측 Winding
- (3) : $\frac{1}{2}$ Winding A (23T:0.5 \times 2개 bifilar)
- (4) : 철저한 절연(Tape5장)
- (5) : $\frac{1}{2}$ Widning A(23T : 0.5 $\psi \times 2$ 개 bifilar)

Fig. 6 변압기 Bobbin의 권선을 나타낸 단면도

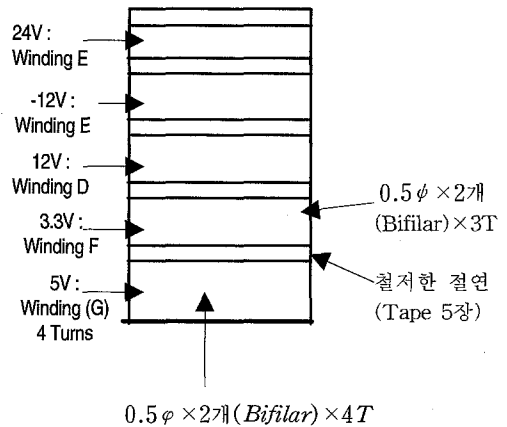


Fig. 7 변압기의 2차측 Winding 방법

5. 결론

본 연구를 통해서 플라이백 방식을 이용한 다출력 DC-DC 컨버터의 변압기 설계방법이 개발되었다.

먼저 스위칭 소자에 발생하는 스파이크 전압의 주요 원인이 되는 누설자속을 감소시키기 위하여 정밀한 커플링 작업을 수행하며 가능한 1차측과 2차측을 가깝게 커플링해야 할 경우 다출력이 가

능하다.

그러나, 본 연구에서는 전원 부분은 인덕터 및 변압기로 인하여 DC-DC 컨버터의 소형 · 경량화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이에 스위칭 주파수를 높여 에너지 축적용 소자를 소형화시킬 수 있게 됨에 따라 고주파용 반도체 스위칭 소자의 도입이 필요한 것으로 사려된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Prieto, J.A. Cobos, O. Garcia, R. Asensi and J. Uceda. "Optimizing the Strategy of the Transformer In a Flyback Converter" IEEE PESC Record, 1996
- [2] Jin-yue Chen, shou-Qian Ding, Guang-Yun Zhu "Study and Design of High Voltage Flyback Transformer For Tv & Monitor"
- [3] K.I. Arshak and B. Almkhtar "The Design and Development of a Novel Flyback Planar Transformer for High Frequency Switch Mode DC-DC Converter Application" PROC.22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELETRONICS (MIEL 2000)
- [4] Hisankatsu kiwaki and takashi yamaguchi "Evaluation of High Power Foil-Type Air-Core Transformer by High-Frequency Flyback Converter" IEEE trans. mgn. 1994
- [5] (月刊) 電子部品 EP & C Monthly 2000년 6월 호 "플라이백 컨버터"