

## 변압기의 형태에 따른 설계기술

이오걸\*, 송호신\*\*

\*동의공업대학, \*\*부산정보대학

### Design technology by structure of transformer

O.K. Lee\* and S.H. Song\*\*

\*Donggeui I.T, \*\*Busan I.T.

#### ABSTRACT

Investigated about topology of each component of transformer and material choice method and property in this paper. Component of transformer is bobin, winding, insulating paper, Varnish etc. And, experiment and investigated special quality by primary winding of transformer and composition of secondary winding. Investigated loss of transformer and EMI decrease method. Investigated method to select winding size that consider frequency.

#### 1. 서 론

본 논문에서는, 변압기의 각각 구성요소의 형태 및 재료 선정 방법과 특성에 대해 고찰하고 이를 기초로 하여 손실이 최소가 되는 변압기를 개발하였다.

변압기의 구성요소는 bobin, 권선, 절연지, Varnish 등에 대해 논하고 이를 기초로 하여 변압기의 1차권선과 2차 권선의 구성에 따른 특성을 실험 고찰하였다(1-4) 그리고, 변압기의 손실과 EMI 감소 방법 및 주파수를 고려한 권선 size를 선택하는 방법을 제시하여 향후 변압기 제조 업체 등 변압기 설계 제작시 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 사료되어 본 연구에서는 이러한 고역률 및 고효율의 요구를 만족하면서 손실이 적은 변압기를 개발하고자 한다.

#### 2. 변압기의 구성

##### 2.1 개요

##### 2.1.1 용도

본 기술은 에너지 절약형 변압기에 관한 것으로서, 변압기의 효율을 10[%] 상승시키고, 손실을 15[%]이상 에너지를 절약할 수 있는 기술로 변압기 설계 시 기초 자료로 활용할 수 있도록 함이다.

##### 2.1.2 기능 및 성격

##### ① 에너지 절전 효과

기존의 일반 코아 및 철심 재료를 이용한 변압기는 무부하 손실 전력이 상당하고 있는 실정이다 이를 보다 감소시킬 수 있는 구성 형태 선정 방법과 사용 재료의 선정 기술에 따라 손실을 약 10[%] 이상 감소시킬 수 있을 것으로 본다.

##### ② 전자파 장애

철심 및 코일의 형태 및 크기 등을 선정하는 기술을 제시하여 전자파를 10%이내로 최소화한다.

#### 2.2 변압기의 구성형태 및 재료 선정

##### 2.2.1 Bobbin

Bobbin은 에나멜선을 감기 위한 틀로써, Bobbin type의 선정은 SMPS의 Topology, 출력 power, Noise 특성, Winding Area, Cost등을 고려하여 선정한다. Bobbin의 material 절연성, 난연성, soldering에 의해서 손상 정도, 가격 등을 고려하여 선정한다. 현재 사용하는 material는 열경화성 물질을 사용하는데 페놀 수지와 Polibutylene (PBT)이 많이 쓰인다. Bobbin이 없어도 winding이 가능하지만 변압기 제작시 권선을 감는 제조과정이 어려워 변압기 제작비가 올라간다.

##### 2.2.2 Wire

Enamel Wire는 순동(99.9%)에 여러 가지 enamel을 코팅한 것으로 일반적으로 Polyurethan coating을 많이 사용한다. 이 물질은 solderring 때 coating이 녹아서 변압기 pin에 연결하기 편하다. Polyimide 등의 Enamel Material을 사용 할 경우에는 tran. pin에 연결하기 위해서 피복을 제거해야 한다. Enamel coating 할 때는 winding stress을 견디기 위해 두겹 또는 두겹계 coating 한다.

Enamel coating이 얼마나 잘 되었는가는 pinhall(에나멜 코팅이 안 되어 있는 부분) check을 통해서 알 수 있

다. Coating 불량 여부는 거리 당 몇 개의 Pinhall을 불량 여부의 판단 기준으로 삼는다. Pinhall에 의해서 변압기의 신뢰성 실험 특히 내열성 실험시 wire가 short가 일어날 수 있다. 현재 만들어지는 wire size는 다양하고 0.1Ø이하인 경우는 0.01Ø단위로 나타낸다.

Triple Insulated wire는 wire의 solid 부분에서 세 겹의 Insulation later가 있어서 1차와 2차 사이의 안전규격을 만족한다. 이 wire를 사용하면 insulation tape로 안전규격을 만족시킬 필요가 없다. 그리고 margin(barrier tape)이 필요 없기 때문에 변압기 size을 작게 만들 수 있다. 이 때문에 Cost가 비싸도 trans의 size가 작은 것을 요구하는 곳에 적합하다. 현재 사용되는 곳은 노트북 어댑터에 같은 곳에 적합하다.

Triple Insulated wire는 현재 전량 수입하고 있으며 가격이 10~15배 비싸기 때문에 일반적인 tans.에서는 적용하지 않는다.

### 2.2.3 Insulation Tape

일반적으로 사용하고 있는 insulation tape로는 polyester(폴리에스테르)를 많이 사용하고 있으며 Mylar material도 사용 가능하다. 안전규격을 고려하면 primary와 secondary 경계 부분에 insulation tape,을 여러겹 이용하면 150um가 되게 한다. Tape 두께에 따라서 몇 겹을 할 것인지 결정된다. 일반적으로 50um 두께를 많이 이용한다. (50um×3겹=150um)각각 primary나 secondary 부분에서의 insulation tape는 leakage 성분에 작게 하는 역할이 있다. 굳이 두겹게 할 필요가 없다. 일반적으로 1차와 2차 사이에는 50um두께에 4겹을 이용하고 각각의 1차, 2차에서는 50um 2겹을 많이 이용한다. 보통 노란색 tape을 이용한다.

### 2.2.4 Barrier tape

에나멜선을 이용하여 winding 할 때 안전규격, creepage distance을 만족하기 위해 bobbin의 윗 부분에 2~3mm, 아래 부분(변압기 pin)에 5~6mm 남겨 두고 winding 한다. Creepage distance 거리는 입력 AC 전압의 크기에 따라 달라질 수 있는데 대우전자 TV에서 free voltahe경우는 윗 부분에는 3mm, 아래 부분(변압기 pin쪽)dp 6mma이다.

Creepage distance을 지키기 위해 tape을 감아서 winding 하지 마라는 표시를 위해 사용된 tape가 Barrier tape이다. 사용하는 bobbin 제작시 bobbin에 winding 하지 마라는 표시를 하여 barrier tape이 없어도 되는 경우가 있다.

### 2.2.5 Insulation Sleeveing

그림 1에서와 같이 winding의 start와 finish lead을 insulation 하기 위해서 사용 되어 진다. 주어진 bobbin에서 winding사 insulation margin이 나오지 않을 경우

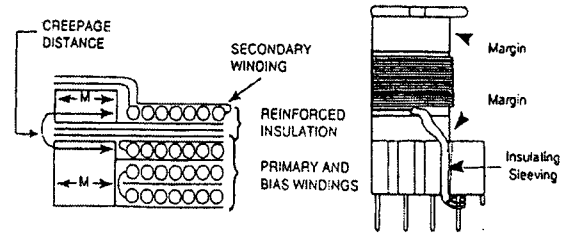


그림 1. 변압기 creepage distance를 위한 margin

bobbin의 pin에 연결된 부분의 insulation을 보강한다. solder시의 온도를 견디어 하는데 일반적으로 Teflon(테플론)tubing을 많이 이용하고 Polyolefin heat shrink tubing을 사용하기도 한다.

### 2.2.6 Varnish

Varnish(니스)sms 사출물을 고정시키는 목적(함침이라고 불리어 진다)으로 사용되어 진다. 실제로 SMPS가 불안하게 동작시 wire 사이의 진동에 의해서 변압기에서 소리가 나는 현상이 일어나는데 함침을 하면 줄언르거나 없앨 수 있다.

### 2.2.7 Flux band

변압기 내부에서 발생하는 leakage 성분이 noise로 발생하여 외부에 영향을 주는 것을 줄이기 위해 변압기 gap. 주의를 copper band로 둘러싼다.

## 2.3 권선 방법

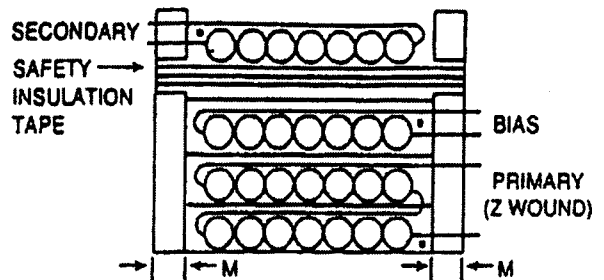


그림 2 변압기 절연 방법

변압기의 안전 규격을 만족하기 위해 1차와 2차 사이를 insulation tape두께가 150um가 되도록 여러겹 감고 Bobbin의 아래쪽(변압기 pin쪽)에 5~6mm(대우전자 6mm) 위쪽에 2~3mm(대우전자 3mm) 만큼의 creepage 공간을 두어 이 부분에는 winding 하지 않고 변압기를 제작하는 방법이다.

기준에 사용하고 있는 wire는 특별한 검사 없이 그대로 사용한다. 현재 만들어지는 wire size는 0.1Ø이하인 경우는 0.01Ø 단위로 나오고 있다. 0.1Ø보다 작은 size는 winding시 세밀하게 winding 하기 어렵다.

그림 2와 같은 구조를 가지며, Cost가 저렴하기 때문

에 현재 국내에서 널리 쓰이는 방법이다

### 2.3.1 Primary winding

일반적으로 Bobbin에 가장 가까운 첫 번째 layer에 winding 한다. 이것은 Primary parasitic capacitance을 작게 하려면 가능한한 wire가 짧을수록 좋다. 그리고 Primary winding와 근전환 compionant 사이에 noise coupling을 줄일수 있다.

winding turn 수가 많거나 출력 power가 큰 경우 primary winding을 둘로 나누어서 first half primary winding과 second primary winding 사이에 tape에 의해서 primart parasitic capacitance을 작게 할 수 있다.

### 2.3.2 Primary Bias Winding

SMPS에서 feedback regulation 방법에 따라 primary referenced regulation과 secondary referenced reulation 방법으로 나눈다. 각각의 경우 regulation과 noise향상을 위해 winding 방법이 다르다.

Primary referenced regulation 방법일 경우 primary bias winding과 secondary winding 사이의 coupling을 최대로 하고 primary winding에 의한 영향을 최소화 하기 위해서 가장 바깥에 winding 한다.

Secondary referenced regulation 방법일 경우 primary winding과 secondary winding 사이에 primary winding 과 붙어 있으면 Insulation이 간편하고 1차측에서 EMI shielding 역할이 된다.

Primary bias winding은 일반적으로 작은 turn 수이기 때문에 winding간에 coupling을 좋게 하기 위해서 bobbin에서 winding 면적을 폭 넓게 이용하고(일정한 간격을 두고 winding) 가급적 두꺼운 wire나 multiple wire을 사용하는 것이 좋다.

primary referenced regulation 방법과 secondary referenced regulation 방법에 따라서 winding 방법을 그림으로 나타낸 것이다.

### 2.3.4 Reduction Leakage Inductance

SMPS 출력 power가 40watt 이상인 경우 secondary referenced regulation 방법에서는 primary winding을 둘로 나누어 first half primary winding을 bobbin에 가장 가까운 layer에 winding 하고 second primary winding을 가장 바깥쪽 layer에 winding 한다. 이 방법을 split winding이라고 부른다. primary winding을 이용하면 leakage inductance가 줄어든다. primary referenced regulation에서 는 load regulation이 나빠지기 때문에 적합하지 않다.

secondary winding에서 turn 수가 작은 경우 2.3.3 절에서 제한하는 방법외에도 Cost가 허락한다면 foil winding을 이용하면 coupling이 높아진다. 현재

transformer 제작에서 coil과 foil을 함께 사용하는 방법은 제조과정에 복잡한 관계로 cost가 올라가서 적합하지 않다.

### 2.3.5 EMI reduction technique

다음과 같은 방법을 이용하면 EMI을 줄일 수 있다.

1. Piremart winding의 start을 MOSFET의 Drain에 연결한다.
2. Transformer 주위에 stray field을 줄이기 위해 Flux band을 둔다.
3. Primary와 secondary winding 사이에 shield 한다. 간단한 shield 방법으로는 winding을 추가하는 것인데 한쪽 RMx을 primary Bais을 두고 다른 한쪽 끝을 float 시킨다.

## 2.4 Wire 규격 선정

### 2.4.1 Wire Size 선정방법

RMS current을 알고 있으면 SMPS상태가 fan 냉각 방식과 자연 냉각 방식에 따라서 다음과 같은 식을 이용한다.

$$\text{직경}D = \sqrt{S/\pi} \times 2 \quad \text{면적 } S = \frac{I_s}{I_D} \quad (1)$$

자연냉각에서  $I_D$ 는  $1.5-4A/A/mm^2$ 를 이용하고 Fan 냉각에서는  $I_D$ 는  $3-6A/A/mm^2$ 을 사용한다.

SMPS 동작 주파수가 높을 경우 Skin effect을 고려하여 size가 작은 것을 여러 가닥 이용하는 Litz wire(Twist Wire)을 이용한다.

### 2.4.2 Optimization

최적의 wire size을 선정하기 위해서는 Effective bobbin width BWe 계산방법으로 다음의 과정을 거친다.

$$BWe = L \times (BW - (2 \times M)) \quad (2)$$

M : Margin, BW : Bobbine width, L : Layer 수

위의 식에서 Margin을 고려한  $2 \times M$ 는 Bonnine에서 아래쪽에서 Margin M, 위쪽에서 MarginM, 위쪽에서 Margin M을 이용한다는 의미인데 위쪽의 M은  $1/2M$ 을 이용해도 Isolation 문제가 없으므로  $2 \times M$  대신  $3/2 \times M$ 을 이용해도 된다.

## 2.5 주파수를 고려한 wire size 선택

SMPS 동작 주파수가 올라가면 SKin effect에 의해서 wire의 도체 부분에서 전류가 표면으로 흐른다. 도체 부분에서 center에서 외각으로 갈수록 흐르는 전류 밀도가

높다. 이 현상은 주파수가 높을수록 외각으로 흐르는 전류 밀도가 높아진다. 실험 결과에서 다음 식과 같이 된다.

$$\sigma = \frac{0.066}{\sqrt{f}} \quad \sigma: \text{Skin depth} \quad (3)$$

Skin depth는 wire의 도체 표면에서 부터의 거리가 표면 전류 밀도의 37%(1/e)되는 지점까지의 거리이다. 그림 3은 Skin effect을 고려한 저항을 나타낸다.

Skin effect에 의해서 wire 표면의 전류밀도가 높아지고 전류가 흐르는 면적이 작아져 wire 저항이 커진다. 이 저항(wire의 AG 저항 Rac 이라고 부름)이 커지면 power loss로 커진다는 의미이고 그리고 열이 발생시켜 변압기 특히 core에 부담을 줄 수 있다.

이 문제를 해결하기 위해서 동작 주파수가 올라가면 얇은 wire을 여러 가닥 이용하는 Litz wire을 이용해야 한다. 그림 48는 주파수에 따라 사용할 수 있는 Maximum AWG을 나타내는데 만약 100KHZ로 동작하면 maximum AWG을 나타내는데 만약 100KHZ로 동작하면 maximum AWG size가 26이라는 의미이다. 만약 100kHz에 임의의 전류가 흐르면 AWG 26 size보다 작은 wire을 여러가닥 이용해야 된다는 의미이고 많이 이용하면 할수록 SMPS 특성 면에서 좋아진다.

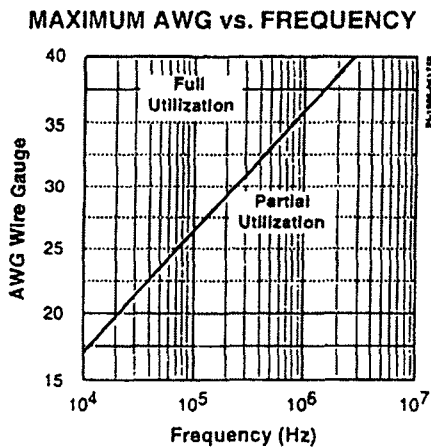


그림 3. 최대 AWG와 주파수의 관계도

### 3. 기술개발결과

현재 생산되고 있는 변압기에서는 다음 중에서 한 항목이라도 만족한다면, 비교적 우수한 제품으로 평가받는 실정이다.

- 1) 효율 : 95%
- 2) 고조파 왜율 (T.H.D) : 1.1 %
- 3) 출력역율 : 98%
- 4) EMI : Class B

본 개발 제품은 상기의 모든 항목을 동시에 만족하고 있다. 뿐만 아니라 변압기의 일반성능도 고무 만족하고 있으면서도 가격적인 면에서도 매우 저렴하기 때문에 대단히 우수한 제품으로 평가받고 있다.

본 기술은 전력용 변압기 단일 제품에만 국한되는 것이 아니라, 조명용 안정기 등에 일부 기술이 적용되고 있으며, 조명기기, 산업용 전력변환기 분야의 전원공급 분야에 광범위하게 적용되는 기반 기술이다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 고역률 및 고효율의 요구를 만족하는 변압기를 제작할 수 있는 기술과 변압기의 특성에 대해 고찰하였다. 기존의 일반 코어 및 철심 재료를 이용한 변압기는 무부하 손실 전력이 상당하고 있는 반면 이를 보다 감소시킬 수 있는 구성 형태 선정 방법과 사용 재료의 선정 기술에 따라 손실을 약 10[%] 이상 감소시킬 수 있을 것으로 본다.

제안된 변압기 설계 기술 및 특성은 기존의 변압기에 비해 간단한 구조를 지니면서 변압기로서 우수한 특성을 갖고 있으며, 주파수에 의한 EMI를 감소시킬 수 있는 우수한 변압기의 설계 제작 기술을 제시하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] SAMSUNG POWER SYSTEM DESIGN TEAM, "공진형 전자식 안정기 설계 사례 및 향후 기술 동향", 1991.
- [2] L. Genuit, "Maximizing Converter Reliability with a Thyristor High Frequency Resonant Technique", Proc. Powercon 8, A-3, pp. 1~11., 1981.
- [3] P.M. Espelage and B. K. Bose, "High-Frequency Link Power Conversion", IEEE 변압기 Ind. Appl. vol. IA-13, pp. 387~394., 1977.
- [4] R.L. Steigerwaid, "High-Frequency Resonant Transistor DC-DC Converters", IEEE 변압기 Ind. Elec., vol. IE-31, No. 2, pp. 181-191., 1984.