

# 중대용량 컨버터용 트랜스포머의 고효율 권선법 비교

조남진, 김윤성, 김민국, 이병국  
성균관대학교 정보통신대학

## Comparison Of the High Efficiency Winding Methods for Transformer on High Power Converters

Nam-Jin Cho, Yun-Sung Kim, Min-Kook Kim, Byoung-Kuk Lee  
College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 고효율 중대용량 컨버터에 적용되는 트랜스포머의 권선법에 따른 성능 및 특성을 분석한다. 누설 인덕턴스 및 EMI를 저감하는 권선법, 고주파 스위칭 트랜스포머의 최적 적층법, 공극과 권선의 위치에 따른 영향 등을 분석하였다. 또한 트랜스포머의 기생성분 계산법을 설명한다.

### 1. 서론

최근 신재생 에너지 및 전기자동차 분야에서는 저전압 고전류 컨버터에 대한 응용분야가 활발히 연구되고 있다. 특히 중대용량 컨버터에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 반면, 저전압 고전류의 응용분야에서는 고전류에 의해 스위치 및 자성 소자들에서 전류 스트레스가 발생한다. 이때 전체 시스템의 효율을 올릴 수 있는 방법 중 하나가 트랜스포머의 성능을 향상시키는 것이다. 트랜스포머는 절연된 스테이지에 전기적 에너지를 자기적 에너지로 변환하는 과정에서 자기 손실과 전기적 도통 손실이 발생한다. 트랜스포머의 손실을 분석해보면 Eddy 전류 손실, 권선의 저항에 의한 줄 열 손실, 누설 자속 등이 있다. 전기적 손실 스트레스는 회로 구조에 따라서 대부분 결정되지만, 자기 손실은 정해진 손실 스트레스 안에서 권선법이나 코일의 종류에 따라 개선 할 수 있다. 본 논문에서는 중대용량 컨버터에 적용할 수 있는 트랜스포머 효과적인 권선법을 분석하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 Winding Methods for Reducing Leakage Inductance

효율적으로 권선을 하기 위해 가장 기본적으로 2가지 방법이 있다. 첫 번째, 각 권선을 권 폭이 꼭 차게 감는다. 이는 권선 사이의 간격을 최대한 좁게 하여 누설 자속 성분을 최소화 하고 부하 레플렉션을 최소화 한다. 권선 수가 적어 공간이 많이 남을 때는 그림 1처럼 권선을 일정 간격을 두고 폭이 균등하게 감는다. 그리고 그림 2와 같이 권선의 선 지름을 줄여 공간을 꼭 채워서 감는다. 특히 다출력 권선법이 필요한 트랜스포머에서는 가장 높은 출력을 내는 권선을 1차 측과 가장 가깝게 위치시키는 것이 효과적이다. 가장 높은 출력측은 턴수가 가장 많으며 상대적으로 전기에너지가 자기에너지로 변

환되어 전달되는 에너지양이 많아서 누설 성분이 생길 가능성이 높다.<sup>[1]</sup> 두 번째는 그림 3과 같은 인터리빙 권선법이다. 이 권선 법은 보빈의 가장 안쪽에서부터 1차 측 권선을 감은 뒤 2차 측 권선, 남은 1차 측 권선을 차례대로 감는 방법이다. 이 방법은 권선 간의 결합율을 증가시킨다. 그림 4는 각 권선 층의 배치에 따른 누설인덕턴스와의 관계를 나타내었다. 그림 4(a)는 1차 측과 2차 측을 차례대로 감은 것이다. 이때 1차 측과 2차 측의 중앙 쪽으로 갈수록 누설인덕턴스가 증가함을 볼 수 있다. 그림 4(b)처럼 인터리빙 방식으로 감았을 때는 그림 4(a)보다 1차 측 2차 측 자속이 쇄교되는 거리가 가까워져 누설인덕턴스가 감소한다. 그림 4(c)의 경우는 그림 4(b)보다 1차 측 권선층의 시작과 끝부분을 나눠 배치함으로써 누설인덕턴스가 더 감소한다. 하지만 권선층을 인터리빙으로 배치함에 따라 부유 커패시턴스도 증가하게 된다.

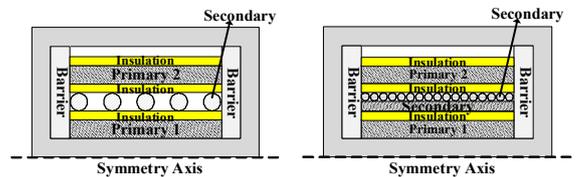


그림 1 균등한 권폭 권선법

그림 2 빈공간을 채운 권선법

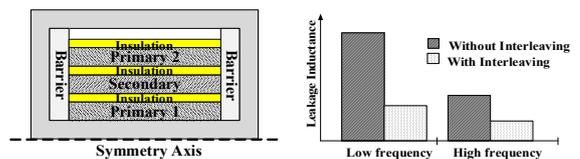


그림 3 인터리빙 권선법

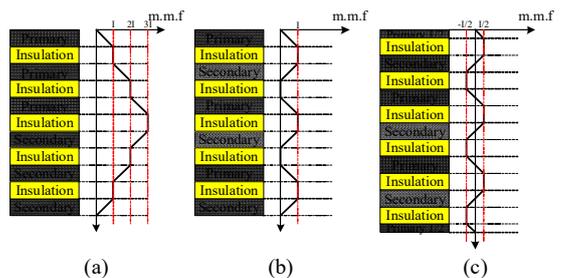


그림 4 권선 배치에 따른 m.m.f 관계도

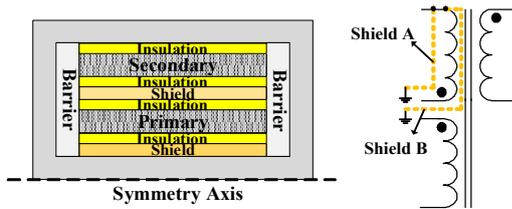


그림 5 실딩 권선법

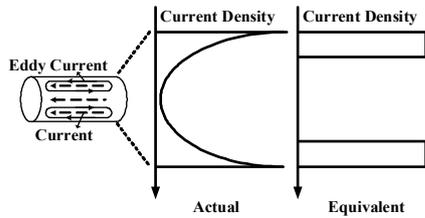


그림 6 Eddy 전류와 전류밀도

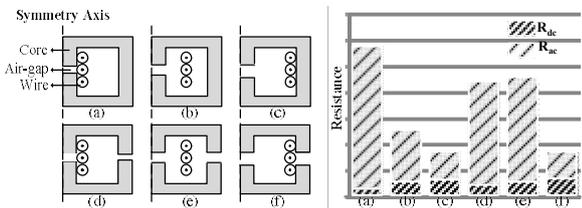


그림 7 공극과 권선 위치 간의 관계

1차 측이나 2차 측에서 발생한 고주파 노이즈가 커패시턴스를 통해 다른 권선 측으로 유기되는 단점이 있다.<sup>[2]</sup>

## 2.2 Winding Methods to EMI

인터리빙 권선법에서 나타나는 부유 캐패시턴스를 통해 전달되는 고주파 노이즈를 저감하기 위해서, 페리데이 쉴드 효과를 이용한 권선법을 이용할 수 있다. 그림 5에 실딩 권선법을 나타내었다. 1차 측 권선의 상위부분과 하위부분에 구리박막을 삽입하여 쉴드를 하게 된다. 삽입한 구리박막은 그라운드에 단락시킨다. 이렇게 되면 1차 측 권선과 2차 측 사이의 부유 커패시턴스를 분리하게 된다.<sup>[2]</sup>

## 2.3 Winding Methods for Reducing Eddy Current

고주파 스위칭에서는 그림 6과 같이 자속이 빨리 변하게 되어 도선 표면의 유도 전압 루프 발생으로 인해 Eddy 전류가 형성되는 것이다. 도선 표면에 전류 밀도가 증가하게 되면 중심 쪽은 전류 밀도가 0으로 감소한다. 실제 전류가 흐르는 부분이 감소하기 때문에 손실이 증가한다. 고주파에서 권선 층이 증가할수록 전기장이 증가되고 이에 따라 Eddy 전류에 대한 손실이 지수 함수적으로 증가한다. 따라서 권선층이 적을수록 손실이 줄어든다. 인터리빙 권선법으로도 전기장을 줄여 Eddy 전류 손실을 줄일 수 있다.<sup>[3]</sup>

## 2.4 Relationship between air gap and wire

트랜스포머의 성능을 최적화하기 위해서는 권선과 공극 사이의 배치도 중요하다. 그림 7은 공극과 권선 간의 위치에 따라 교류저항의 크기를 나타내었다. 공극이 클수록 교류 저항 값이 커지고 자화 에너지는 공극과 그 주위에 집중되어 나타난다. 공극 근처의 도체에서 유도전류가 발생하면 그 도체의

교류저항이 증가하게 된다. 또한 공극이 하나일 때보다 2개 일 때 교류 저항이 더 작게 나타난다.

## 2.5 Modeling of Parasitics

최적의 트랜스포머 설계를 위해 수식으로 기생성분들을 계산할 수 있다. 식 (1)은 1차 측과 2차 측 사이의 단위 길이 당 누설인덕턴스와 캐패시턴스에 대해 나타낸 것이다.  $w, x$ 는 각각 전체 권선의 너비와 권선 사이의 폭을 의미한다.  $N$ 은 1차 측 권선 수를 의미한다. 다층 구조로 권선된 1차 측과 2차 측을 하나의 섹션으로 본다.  $m$ 은 단위 섹션 당 각 층이 몇 층으로 감겨있는지를 의미한다. 식 (2),(3)은 각 섹션을 합쳤을 때의 총 누설인덕턴스와 캐패시턴스를 수식화 한 것이다. 1차 측의 층 수가 증가할수록 누설인덕턴스도 증가함을 확인할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$L_{layer} = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r x}{w} \quad C_{layer} = \epsilon_o \epsilon_r \frac{w}{x} \quad (1)$$

$$L_{total\_leakage} = \frac{\mu_0 \mu_r N_{prim} N(m^2 + m)x}{w} \quad (2)$$

$$C_{total\_leakage} = C_{layer} \left( 2 \cdot \frac{N_{prim}}{N \cdot m} - 1 \right) \quad (3)$$

## 3. 결론

본 논문에서는 중대용량 컨버터에 적용할 수 있는 트랜스포머의 권선법에 따른 효과를 리뷰하였다. 누설 인덕턴스 성분을 줄이기 위해서 인터리빙 권선법을 이용할 수 있다. 반면 증가하는 기생 캐패시터의 크기도 고려해야 한다. 페리데이 쉴드 효과를 이용한 권선법으로 EMI 노이즈를 저감할 수 있다. 또한 고주파에서 권선과 공극사이의 관계에 대해 나타내었고, 마지막으로 트랜스포머 설계시 필요한 기생 성분들을 계산할 수 있는 수식을 소개하였다. 향후 고효율 중대용량 컨버터 설계에서 본 논문을 참고할 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgment

본 연구는 한국산업기술평가원 지원 하에 수행된 우수제조기술연구센터사업 (No. 10038825)의 연구결과입니다.

## 참고 문헌

- [1] R. Prieto, "Optimizing the Winding Strategy of the Transformer in a Flyback Converter", Power Electronics Specialists Conference 27<sup>th</sup> Annual IEEE, Vol. 2, pp. 1456-1462, 1996, June.
- [2] Hang-Seok Choi, "Transformer Design Consideration for off-line Flyback Converters using Fairchild Power Switch", Fairchild Application Note, AN4140, 2004, March.
- [3] Lloyd H. "Eddy Current Losses in Transformer Windings and Circuit Wiring", Texas Instruments, Slup197, 2003
- [4] Mika Sippola, "Developments for the High Frequency Power Transformer Design and Implementation", Series E: Electronic Publications E3, 2003.