

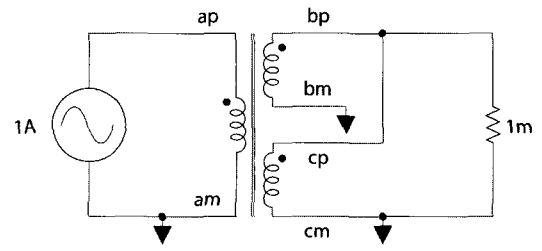
해외기사 소개

고주파 변압기 및 인덕터의 병렬권선

한 상 규

(국민대 전자정보통신대학 교수)

본 원고는 2004년 IEEE PELS newsletter 4, 5, 6월호의 pp. 10-11에 실린 Jose Cobos 및 Roberto Prieto의 "Parallel Windings in High-Frequency Transformers and Inductors"에 대한 주요내용을 번역한 것입니다.



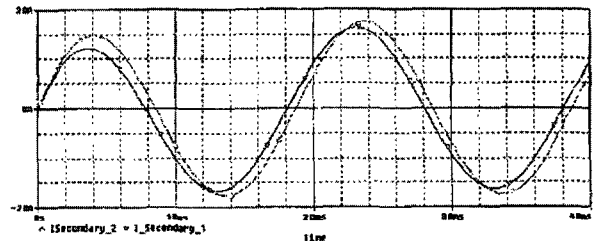
(a)

1. 서론

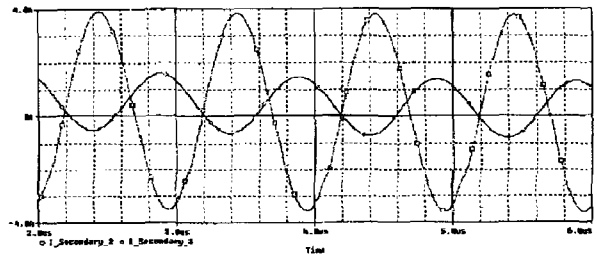
전력전자에서 소자를 병렬로 사용하는 것은 손실이나 전류 스트레스를 줄이기 위한 매우 일반적인 방법으로 알려져 있다. 소자 병렬 시 전류평형은 항상 중요한 이슈로서 다이오드나 트랜지스터에 대한 전류분할 메커니즘은 잘 알려져 있는 반면 고주파 변압기나 인덕터의 병렬권선에 대해서는 명확히 알려진 바 없다.

많은 변압기가 실제로 병렬권선을 이용하여 설계 및 제작되고 있으므로 상기한 전류평형은 자기소자 설계 시 반드시 고려되어야 할 부분이다. 권선저항을 줄이기 위해 병렬권선을 이용하기도 하지만 누설 에너지를 최소화시키기 위해 변압기의 다른 권선과의 인터리브(interleave)를 위한 목적으로 병렬권선을 이용하기도 한다.

본 기사는 병렬권선간 전류평형을 위한 유용한 지침을 제공하기 위해 정확한 정량적 분석 결과를 토대로 한 설계 대신 정성적으로 고찰된 실제적 방법을 제시하고자 한다.



(b)



(c)

2. 문제의 정의

그림 1은 두개의 이차 측 권선이 병렬로 결선 되어있으며,

그림 1 (a) 테스트 회로. 병렬 결선된 2개의 2차 측 권선
(b) 50Hz에서 전류 불평형
(c) 1MHz에서 전류 불평형. 전류 방향 반대

병렬권선 시 발생될 수 있는 일반적인 문제점을 보이고 있다. 주파수 50Hz에서 두 병렬 권선 각각의 전류는 크기와 위상에 있어 다소 차이를 보이고 있으며, 약간의 전류 불평형이 존재 하지만 적절한 범위 내에 존재하고 있음을 알 수 있다.

그러나 주파수 1MHz에서는 그 크기에 있어서 큰 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라 180°의 심한 위상 차이를 보이고 있다. 이는 변압기 권선의 병렬화를 통해 권선저항을 줄이기보다 오히려 증가시키고 있으며 그 결과가 동작 주파수에 의해 좌우됨을 보이고 있다.

3. 전류 불평형의 물리적 원인

상기한 모든 현상들은 전기자기적 수식에 의해 분석적으로 증명될 수 있으나, 이해의 편의를 돕기 위해 정확성은 떨어지지만 개념적인 설명을 하도록 한다.

전류는 저항에 의한 i^2R 손실(에너지 손실)과 자계(에너지 저장)를 생성한다. 전류는 도체 또는 병렬 도체 단면을 흐를 때 항상 "쉬운 경로"를 택하여 흐른다. 여기서 "쉬운 경로"라 함은 전압강하($i \times R + L di/dt$)가 최소가 되는 경로를 말하며, 최소의 손실과 최소의 에너지 변화율을 갖는 경로를 의미한다. 또한 위 두 효과 모두 주파수에 따라 달라진다.

이는 단일 도선의 "표피효과"와 "근접효과"를 기술한다. 직류 회로에서는 전류 변화가 없으므로 가능한 도통 경로의 직류저항에 따라 전류가 흐른다. 반면 교류 회로에서는 시스템 내에 에너지 변화가 존재하므로 전류는 에너지 변화와 손실이 최소화되는 경로를 통해 흐른다.

단일 도체에서 전류가 도체표면을 따라 흐르는 경향이 클수록 저항에 의한 손실은 증가하나 도체 내에 저장되는 에너지는 더 작아진다. 전류가 표면에만 흐르는 극단적이 경우 도체 내에 저장되는 에너지는 0이다. 따라서 도체 내에 저장된 에너지가 작을수록 에너지 변화는 더욱 쉬워진다. 이것이 바로

모든 주파수 대역에 대해 이들 두 가지 상반되는 효과를 최적화하려는 최적 전류 분포가 존재하는 이유이다.

두개의 근접한 도체에서 만약 동일한 방향으로 전류가 흐른다면 에너지는 이들 도체를 분리하면서 에너지는 최소화 된다. 그러나 전류가 서로 반대되는 방향으로 흐른다면 에너지는 이들 도체를 가까이 가져가도록 함으로써 에너지는 최소화 된다. 이것이 바로 도체 단면내의 전류가 반대방향으로 흐르고 있을 때 서로 모이려고 하며 동일한 방향으로 흐르고 있을 때는 서로 분리되려고 하는 이유이다. 이 효과는 주파수가 증가할수록 더욱 강해지는데 이는 에너지가 더 높은 비율로 변화하기 때문이며, 그 효과는 저항에 의한 전압강하보다 더 크다.

위 사항은 두 권선이 병렬로 결선되어 있을 때 동일하게 적용된다. 직류회로에서 전류는 손실을 최소화하기 위해 권선의 직류저항에 따라 흐른다. 그러나 교류회로에서는 에너지 저장(즉, 에너지 변화)이 최소화 되도록 전류가 흐른다. 이 효과 역시 주파수에 의존한다.

그림 2는 두개의 권선을 가진 변압기에 대한 위의 개념을 보이고 있다. 1차 측 권선은 직렬 4턴을 가지고 있고 2차 측 권선은 각각 직렬 2턴을 가진 병렬 결선된 4개의 권선으로 구성되어 있다. 구동되는 주파수에서 층의 두께는 해당 주파수에 의한 표피깊이보다 작다.

그림 2(a)는 2차 측 전류가 1차 측과 가장 가까이 위치한 S1과 S2에 주로 흐르고 있음을 보이고 있다. 이는 에너지를 줄이기 위해 앞서 고찰된 성질과 일치한다. 이는 S3와 S4에 전류가 거의 흐르지 않기 때문에 좋지 않은 권선법이다. 그림 2(b)와 2(c)에서는 2차 측 권선 사이에 몇 가지 인터리브 권선방법을 적용하고 있다. 비록 1차 측에 인접한 권선에 더 큰 전류가 흐르긴 하지만 그 결과는 그림 2(a)에 비해 훨씬 양호하다.

그림 2(d)에서 S1과 S2는 상대적으로 동일한 위치에 있으

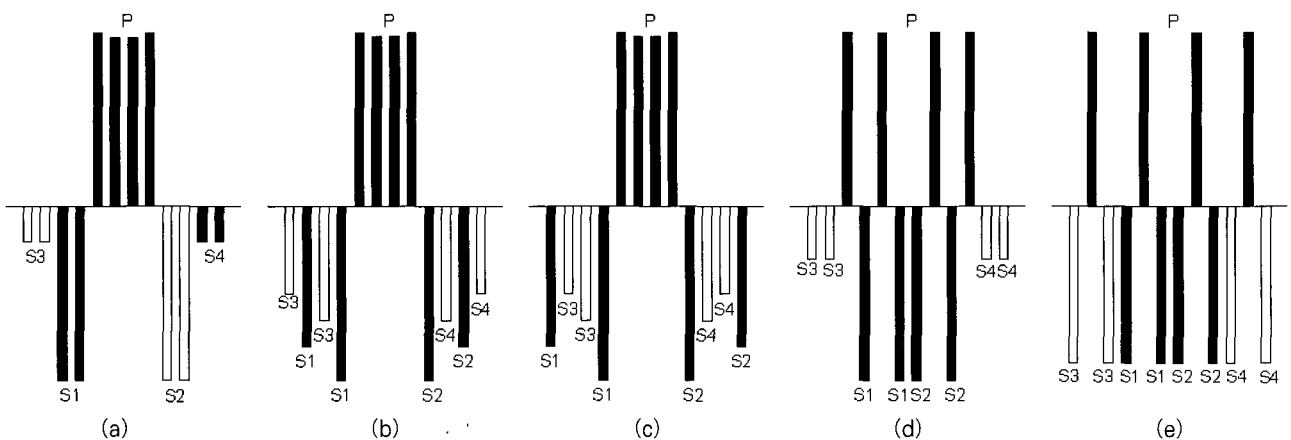


그림 2 두개의 권선을 가진 변압기의 5가지 구성. 1차측(P): 직렬 4턴, 2차측(S): 병렬 결선된 4 권선(S1, S2, S3, S4)이며 각 권선은 직렬 2턴

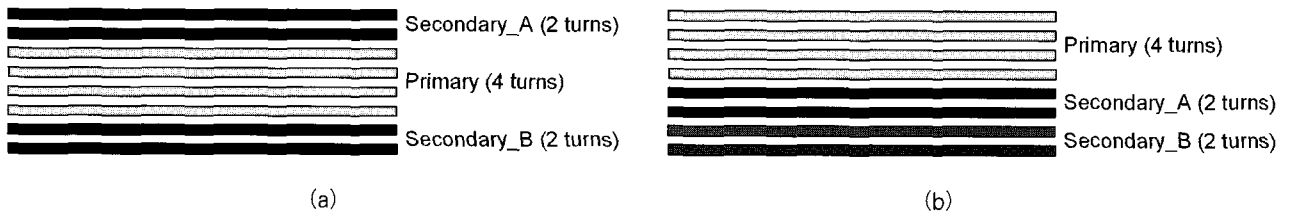


그림 3 두개의 권선을 가진 변압기 구조 (a) Good Design (b) Bad Design

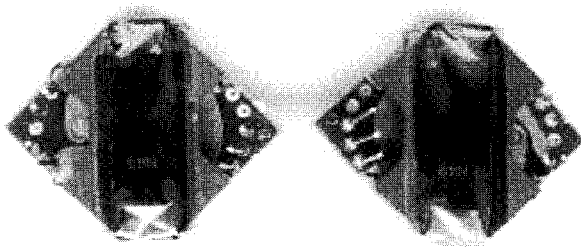


그림 4 제작된 두 변압기 사진

며 1차 측 권선과 인터리브 되어있다. S3와 S4의 경우 동등한 위치에 있으나 1차 측 권선과 인터리브 되어있지 않다. 그 결과 S1과 S2의 전류는 서로 동일하며 S3와 S4의 전류보다 더 크다.

마지막으로 그림 2(e)는 최적의 권선법을 보이고 있다. 모든 2차 측 권선이 1차 측 권선과 서로 인터리브 되어있고 권선 모두 1차 측 턴에 대해 동등한 위치를 가지고 있다. 그 결과 모든 병렬 권선에 흐르는 전류가 이상적으로 평형을 유지하고 있다.

4. 일반적인 해결방법 (실제적인 지침)

병렬권선법의 전류평형을 위한 타당한 결과를 얻기 위해 다음과 같은 두 가지 간단한 경험칙이 적용될 수 있다.

- (a) 전류 고조파성분(일반적으로 컨버터의 스위칭 주파수)을 고려하여 표피깊이보다 더 작은 도체의 굵기를 선택한다.
- (b) 동등한 위치에 병렬 권선을 둔다. 이들 권선은 모두 그 주위에 동일한 자속과 자계 분포를 가져야 한다. 즉 각 병렬 권선은 자계 또는 에너지 저장에 관하여 동등한 위치를 차지하고 있어야 한다.

전류분포와 권선저항에 관한 정확한 정량적 해석을 위해서는 일반적으로 유한요소 해석을 기초로 한 모델링 기법을 사용해야 한다. 그러나 위에서 고찰된 실제적인 설계방법은 변

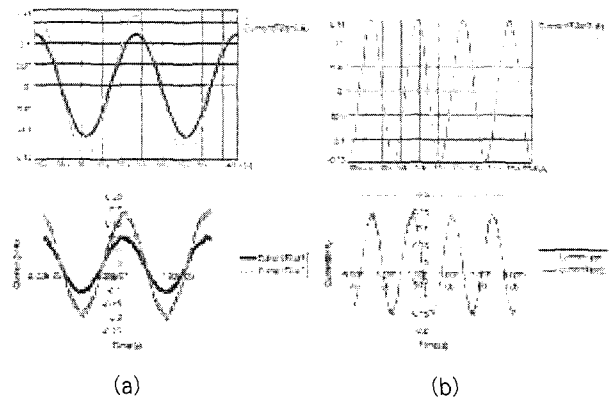


그림 5 모의실험 및 실제실험으로 측정된 2차 측 전류 파형 (a) Good Design (b) Bad Design

압기 및 인덕터 설계가 타당한지를 검토하기 위한 간단한 지침을 제공할 것이다.

5. 실험결과

앞서 고찰된 개념을 실험적으로 검토해 보기 위해 2개의 간단한 Planar 변압기를 제작하였다. 1차 측 권선은 직렬 4턴을 가지고 있고, 2차 측은 병렬 결선된 2개의 권선이 각각 직렬 2턴으로 구성되어 있다. 그림 3에서 보인바와 같이 “Good Design”에서는 두 2차 측 권선이 1차 측 권선에 대해 상대적으로 동등한 위치에 있으며, 반면 “Bad Design”에서는 2차 측 권선 중 하나가 다른 권선보다 1차 측 권선에 더 가까이 위치해 있다. 그림 4는 제작된 두 변압기를 보이고 있다.

그림 5는 모의실험과 실제 실험으로부터 측정된 두 변압기의 2차 측 전류파형을 보이고 있다. “Bad Design”에서는 100% 불평형을 보이고 있는 반면 “Good Design”에서는 평형을 이루고 있음을 보이고 있다.

6. 결론

최근 컴퓨터의 고 사양화 및 서버시장의 급속신장으로 인해 중대용량 전력컨버터의 고 집적화 및 슬림(slim)화를 위한 연

구개발이 활발히 이루어지고 있다. 이를 위해 Planar 코어를 비롯한 작은 사이즈의 자기소자가 제품개발에 적용되는 사례가 매우 빈번하며 큰 부하전류가 요구되는 경우 변압기 2차 측 권선을 병렬로 사용하는 것이 매우 일반적이다. 이를 위해 본고에서는 Jose Cobos 및 Roberto Prieto가 2004년 IEEE PELS newsletter 4, 5, 6월호에 기고한 "Parallel Windings in High-Frequency Transformers and Inductors"에 대한 주요내용을 전력전자학회 회원에게 간단히 번역하여 소개하고자 기술되었다. 물론 여기에 기술된 내용은 여러 가지 문헌이나 자료를 통해 이미 알려진 내용이지만 병렬권선법을 처음 접하는 회원에게는 매우 간단하면서도 유용한 설계 지침이 될 것으로 기대된다. ■

〈 저 자 소 개 〉



한상규(韓翔圭)

1999년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학 전공 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 졸업(공학박). 2005년 3월~2005년 8월 한국과학기술원 정보전자 연구소 연수 연구원. 2005년 9월~현재

국민대 전자정보통신대학 전자공학과 전임강사.