

토로이달 타입 변압기 권선의 Interleave 효과 분석

신경구, 강병극, 이국희, 정세교
경상대학교

Analysis of Interleave Effect for Toroidal Type Transformer Windings

Kyoung Gu Shin, Byeong Geuk Kang, Kuk Hee Lee, and Se Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the interleaved effects for the secondary winding distribution of a toroidal transformer. The equations to calculate the leakage inductance are derived using the MMF diagram for the distributed secondary windings. The simulation and experimental results are provided to show the effect of the leakage inductance reduction.

1. 서론

토로이달 코어는 타 코어에 비해 전력밀도가 높고 누설 자속이 적어 효율이 좋으며 소형으로 큰 인덕턴스를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 토로이달 변압기의 구조 특성상 권선 구조가 다양하지 못하다는 단점이 있다.

토로이달 변압기 권선에서 1, 2차 권선의 폭이 일치하지 않을 경우 방사형 누설 자속으로 인해 누설 인덕턴스의 값은 커지게 되며 수식적 해석에 있어서 많은 어려움이 있다. 현재까지 1, 2차 권선의 폭이 같은 경우에 대한 누설 인덕턴스의 수식적 해석은 많은 연구결과가 있지만, 권선의 폭이 다른 경우에 대한 결과는 드물다.^[1]

따라서 본 논문에서는 2차 권선의 분포에 따른 Interleave 효과를 MMF 다이어그램을 통해 분석하고 이를 일반화된 수식으로 도출하였으며 Maxwell 3D simulation과 실험을 통해 누설 인덕턴스를 비교 하고 오차 분석을 하였다.

2. 2차 권선의 형태에 따른 누설 인덕턴스

2.1 누설 인덕턴스 수식 유도

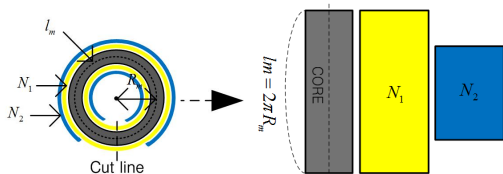


그림 1 토로이달 변압기 구조
Fig. 1 Structure of the toroidal core transformer

그림 1은 1, 2차 권선으로 구성되어 있는 토로이달 변압기의 단면을 잘라 원통 모양으로 표현한 모습이다. 그림 2는 1, 2차 권선의 폭이 다른 토로이달 변압기의 MMF 해석을 위해 1, 2차 권선을 하나의 등가적인 권선으로 나타내는 방법이다. 여기서 1차 권선은 코어의 단면을 모두 감싸고 있고 2차 권선은 1차 권선의 $x\%$ 만을 감싸고 있다고 가정한다. 그림 2의 (a)는 1, 2차 권선으로 구성되어 있는 토로이달 변압기의 단면을 잘라 전개한 모형이다. l_m 은 코어의 높이, r 은 코어의 반지름, h_1, h_2 는 1, 2차 권선의 두께로 표현된다. 그림 2의 (b),(c)는 두 개의 권선을 하나의 등가적인 권선으로 표현 하는 절차이다. 여기서 h 는 1, 2차 권선의 두께의 합이다. 그림 2(c)에 각 색선 수치는 전체 권선의 MMF를 100으로 볼 경우 등가적인 권선의 MMF 비율이다. 이때 MMF 다이어그램을 x 축으로 회전하여 표현하게 되면 그림 2의 (d)와 같이 나타 낼 수 있다.^[1]

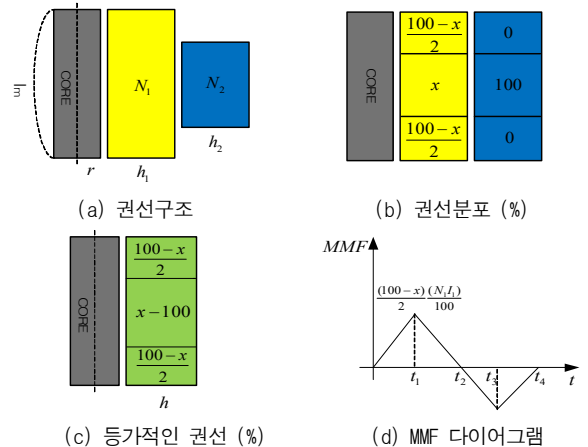


그림 2 2차 권선 분포에 따른 등가권선 및 MMF 다이어그램
Fig. 2 Equivalent windings and MMF diagram of the distribution of the secondary winding

그림 2의 (d)에서 각 구간의 에너지와 누설 인덕턴스는 식 (1), (2)의 수식으로 나타낼 수 있다.^{[2][3]} 식 (1)에서 n 은 MMF 다이어그램의 각 적분 구간을 표현한 것이다. 식 (2)에서 k 는 2차 권선의 등분 개수를 표현한 것이다. 식 (1), (2)를 통해 2차 권선을 등분 할수록 적분 구간이 증가하는 것을 알 수가 있다. 식 (3)은 2차 권선을 등분함에 따라 유도되는 일반화 식이다. 2차 권선을 등분함에 따라 MMF 최대값이 각각 다

르며 누설 인덕턴스는 이에 의존한다.

$$W_n = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{\mu H_n^2}{2} [\pi(r+h)^2 - r^2] dx \quad (1)$$

$$L = \frac{2}{I^2} \sum_{n=1}^{4k} W_n \quad (2)$$

여기서 $n = 1, 2, \dots, 4k$ 이다.

2.2 2차 권선의 분할에 따른 Interleave 효과

그림 2로부터 2차 권선이 분할 될 경우 MMF의 최대값이 감소함을 알 수 있다. 따라서 2차 측 권선의 분할을 통해 변압기의 누설 인덕턴스를 저감 할 수 있다. 표 1은 2차 권선을 1~4등분 한 경우, MMF의 최대값을 나타낸 것이다. 여기서 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭은 50~80% 인 경우를 가정하였다.

표 1 2차 권선분할에 대한 MMF 최대값
Table 1 Maximum value of MMF for secondary winding split

	MMF 최대값			
	50%	60%	70%	80%
1등분	0.25NI	0.2NI	0.15NI	0.1NI
2등분	0.1666NI	0.1333NI	0.1NI	0.0666NI
3등분	0.125NI	0.1NI	0.075NI	0.05NI
4등분	0.1NI	0.08NI	0.06NI	0.04NI

표 1에서 MMF 최대값은 2차 권선을 분할할수록 감소하며, 이에 따라 누설 인덕턴스도 감소한다. 따라서 Interleave 권선 방법과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 그리고 2차 권선이 1차 권선의 폭과 일치 할수록 누설 인덕턴스가 감소함을 알 수 있다. 따라서 MMF 최대값을 작게 하기 위해서는 2차 권선의 폭을 1차 권선의 폭과 최대한 같게 하고 2차 권선을 가능한 많이 분할하면 됨을 알 수 있다.

2.3 Maxwell 3D simulation

앞의 이론적인 계산 결과를 검증하기 위해서 Maxwell 3D Simulation을 수행하였다. 그림 3은 토로이달 변압기의 2차 권선 분할에 대한 시뮬레이션 모델이다. 그림 3(a)~(d)는 2차 권선을 각각 1~4 등분한 것이며, 2차 권선의 폭이 1차 권선의 80% 인 경우를 나타내었다.

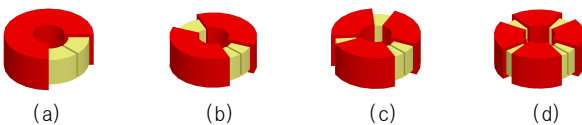


그림 3 2차 권선 분할에 대한 시뮬레이션 모델
Fig. 3 Simulation model by the secondary winding split

그림 4는 그림 3과 같은 2차 권선구조에 대한 누설 인덕턴스의 계산, 시뮬레이션 및 실험값을 나타낸 그래프이다. 그림 4(a)는 2차 권선의 폭이 1차 권선의 50% 일 때, (b)는 60% 일 때, (c)는 70%일 때, (d)는 80%일 때를 나타내며 2차 권선을 각각 1~4개로 분할하였다.

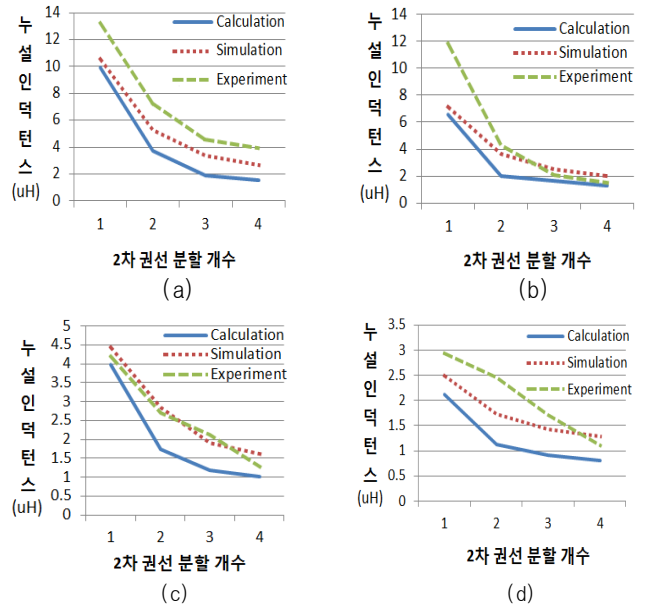


그림 4 누설 인덕턴스의 계산, 시뮬레이션, 실험 결과
Fig. 4 Calculation, simulation

그림 4의 결과로부터 2차 권선을 많이 분할할수록, 그리고 1, 2차 권선의 폭이 일치할수록 누설 인덕턴스가 작아짐을 알 수 있다. 이는 1, 2차 권선의 폭이 다를 경우 방사형 누설자속이 누설 인덕턴스의 주 요인이 되며, 2차 권선을 분할하여 1차 권선을 덮는 면적이 커질수록 방사형 누설자속이 감소하기 때문으로 생각된다.

3. 결론

본 논문에서는 토로이달 타입 변압기 권선의 Interleave 효과를 분석하였고 2차 권선의 분포에 따른 MMF 다이어그램을 해석하여 계산식을 유도하였다. 또한 시뮬레이션과 실험을 통해 수식을 검증 및 비교, 분석 하였다. 누설 인덕턴스를 최소화하기 위해서는 2차 권선이 1차 권선의 폭과 최대한 일치시키고 2차 권선을 많이 분할해야 함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. Wang, A. F. Witulski, J. L. Wollin, T. K. Phelps, and G. I. Cardwell, "Derivation, calculation and measurement of parameters for a multiwinding transformer electrical model", IEEE APEC 1999, Vol. 1, pp. 220-226, 1999.
- [2] Shima, Kazumasa and Miyoshi, "Finite element calculation of leakage inductance of a saturated salient pole synchronous machine with damper Circuits", IEEE Trans. Energy Conver., Vol 17, pp. 463-470, 2002.
- [3] A. Naderian Jahromi, Jawad Faiz and Hossein Mohseni, "A fast method for calculation of transformers leakage reactance using energy technique", IJE Transaction B: Applications, Vol. 16, 2003.