누설 층을 이용한 집적 변압기의 누설 인덕턴스 계산

강정철, 정세교
경상국립대학교

Leakage Inductance Calculation of Integrated Transformer Using Leakage Layer

Jung-Cheol Kang, Se-Kyo Chug
Gyengsang National University

ABSTRACT

This paper deals with the method of a leakage inductance calculation of an integrated magnetic transformer using a leakage layer. The leakage inductance of the transfomer is derived using the MMF distribution and magnetic circuit. The calculation method is verified using the simulation and experiments.

1. 서론

고밀도 전력변환장치의 구현에 있어서 변압기는 가장 중요한 소자이다. 변압기의 소형화와 가격 절감을 위해 Integrated Magnetics 기술이 사용되고 있으며, 크게 공통 자기경로 기법과 누설 층을 활용하는 기법으로 나누어 진다. 누설 층을 활용하는 기법은 별도의 권선을 사용하지 않아 구현이 용이하지만, LLC 공진 컨버터와 같이 큰 직렬 공진 인덕턴스가 필요한 경우 큰 누설 인덕턴스를 구현하기 어렵다는 문제점이 있다. 이 문제를 개선하기 위해 코어 사이에 누설 층을 삽입하여 누설 인덕턴스를 증가시킨다[1][2]. 이러한 구조의 집적된 변압기를 설계하기 위해서는 누설 층의 두께와 위치에 따른 정밀한 누설 인덕턴스의 계산이 필요하다.

본 논문에서는 누설 층을 사용하는 집적 변압기의 설계를 위한 누설 인덕턴스의 계산에 대해 연구하였다. 자기회로 모델로부터 누설 인덕턴스 계산 식을 유도하고[3] 시뮬레이션과 실험을 통해 계산 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 누설 인덕턴스의 계산

2.1 MMF의 분포와 자기 에너지

그림 1은 본 논문에서 고려한 인덕터 집적 평면형 변압기의 구조와 MMF 분포를 나타낸다. 이러한 변압기 구조에서 자기 에너지는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E=\frac{1}{2}\int B\cdot HdV=\frac{1}{2}\cdot L_k\cdot I_p^2 \qquad (1)$$

그림에서 두 권선에 유도되는 MMF와 자기 에너지는 다음과 같다[3].

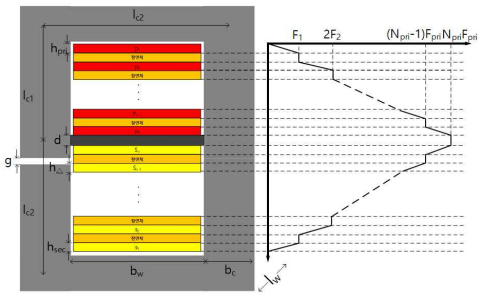

그림 1 변압기의 MMF 분포
Fig. 1 MMF distribution for the transfer

$$F_p=(k_{p1}+k_{p2})\cdot i_p,\ F_s=(k_{s1}+k_{s2})\cdot i_s \qquad (2)$$

$$E_{pri}=\frac{1}{6}\mu_0\frac{l_w}{b_w}[\{(4N_p^3+2N_p)(k_{p1}+k_{p2})^2+3(k_{p1}+k_{p2})$$
$$*((N_p^2-N_p)k_{p2}-(N_p^2+N_p))k_{p1}+2(k_{p1}^2+k_{p2}^2)N_p\}h_p$$
$$+\{(4N_p^3+2N_p)(k_{p1}+k_{p2})^2-6(N_p^2+N_p)(k_{p1}+k_{p2})k_{p1}$$
$$+6k_{p1}^2N_p\}h_{\triangle}] \qquad (3)$$

여기서, k_{p1},k_{p2},k_{s1},k_{s2}는 각각 1차 및 2차 권선의 각 층당 상, 하단의 감은 수를, N_p과 N_s는 1, 2차 권선의 총 층수를 나타낸다. 2차 측 자기 에너지 또한 같은 방식으로 유도할 수 있다.

2.3 누설 인덕턴스의 계산

그림 2는 누설 층을 이용한 집적 변압기의 자기회로 모델을 나타낸다.

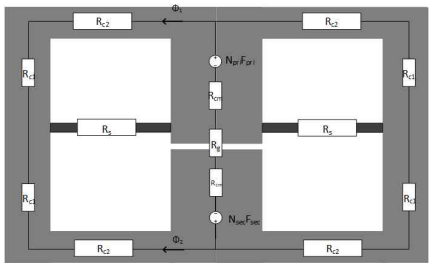

그림 2 집적 변압기의 자기회로
Fig. 2 Magnetic circuit of integrated transfomer

그림 2의 자기회로에서 누설 층으로 통하는 경로의 전체 릴럭턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m = R_{c1} + R_{c2} + R_s + 2R_{cm} \quad (4)$$

여기서, 코어의 중간 다리의 가로 길이는 b_m, l_{c1}과 l_{c2}가 같다고 가정하였다. 릴럭턴스 식으로부터 누설 층의 인덕턴스는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$L_{k_{shunt}} = \frac{2k_p^2N_p^2(R_m+2R_g-R_s)+2k_s^2N_s^2(R_m-R_s)}{(R_m^2+2R_mR_g-R_s^2)} \quad (5)$$

식 (3), (5)를 이용하여 전체 누설 인덕턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{k_{total}} = \frac{2k_p^2N_p^2(R_m+2R_g-R_s)+2k_s^2N_s^2(R_m-R_s)}{(R_m^2+2R_mR_g-R_s^2)}$$
$$+\frac{1}{3}\mu_0\frac{l_w}{b_w}\sum_{i=p,s}[\{(4N_i^3+2N_i)(k_{i1}+k_{i2})^2+3(k_{i1}+k_{i2})$$
$$*((N_i^2-N_i)k_{i2}-(N_i^2+N_i))k_{i1}+2(k_{i1}^2+k_{i2}^2)N_i\}h_i$$
$$+\{(4N_i^3+2N_i)(k_{i1}+k_{i2})^2-6(N_i^2+N_i)(k_{i1}+k_{i2})k_{i1}$$
$$+6k_{i1}^2N_i\}h_\triangle] \quad (6)$$

3. 시뮬레이션

누설 인덕턴스의 계산 식의 검증을 위해 Maxwell 시뮬레이션 툴을 사용하였으며, 누설 층의 두께와 위치에 따른 누설 인덕턴스의 변화를 비교하였다. 적용된 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 변압기의 적용된 설계 사양
Table 1 Design Specifications of the transformer

Parameters	Transfomer
1차 권선 각 층 턴 수 k_{p1}, k_{p2}	2, 2
1차 측 권선 층 수 N_p	3
1차 권선 두께 h_p(mm)	0.6
절연체 두께 $h_\triangle$(mm)	0.07
2차 측 권선 각 층 턴 수 k_{s1}, k_{s2}	2, 1
2차 권선 층 수 N_s	2
2차 권선 두께h_s(mm)	0.6
공극 두께 g (mm)	0.5
누설 층 투자율	230

그림 3은 Maxwell을 사용한 자속밀도 분포 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다, 여기서 누설 층의 두께는 0.3mm이며 비투자율은 230이다. 그림에서 보는 바와 같이 누설 층의 비투자율이 크므로 높은 자속밀도를 나타내는 것을 볼 수 있다.

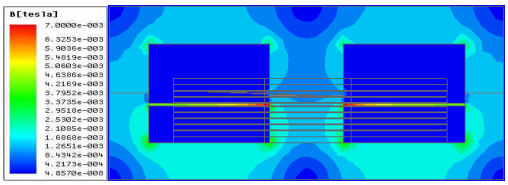

그림 3 자속밀도 시뮬레이션 결과 (두께 = 0.3㎜)
Fig. 3 Simulation results for flux density (Thickness = 0.3㎜)

그림 4와 5는 누설 층 두께와 위치에 따른 누설 인덕턴스의 계산 값과 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 두께에 따른 누설 인덕턴스 비교의 오차는 0.05mm부터 22%, 8%, 1.5%, 4.7%이다.

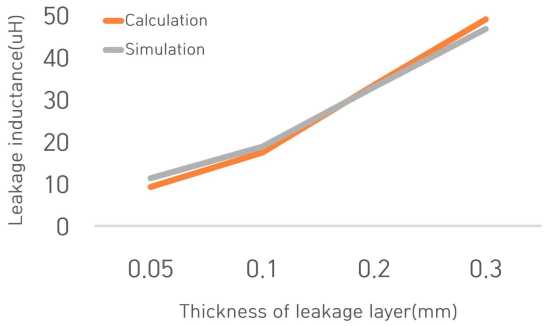

그림 4 누설 층 두께에 따른 누설 인덕턴스 비교
Fig. 4 Comparison of leakage inductance for thickness of the leakage layer

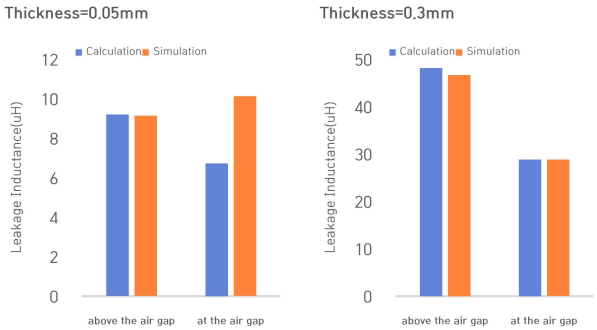

그림 5 누설 층 위치에 따른 누설 인덕턴스 비교 (두께 = 0.05㎜, 0.3㎜)
Fig. 5 Comparison of leakage inductance according to the position of layer (Thickness = 0.05㎜, 0.3㎜)

3. 결론

본 논문에서는 인덕터 집적 변압기의 누설 인덕턴스 계산에 대해 연구하였다. 자기회로 모델로부터 인덕턴스 계산 식을 유도하고 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였으며, 누설 층 두께에 따른 추후 실험을 수행할 계획이다.

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(재단 과제관리번호: 2021RIS-003)

참 고 문 헌

[1] 김진리, 김태완, 정세교. “LLC 공진형 컨버터를 위한 인덕터 집적 평면형 변압기의 설계 및 구현”, 전력전자학회 논문지, 28 (3), pp.170-178, 2023.

[2] M. Ouyang and M. Andersen, "High frequency LLC resonant converter with magnetic shunt integrated planar transformer," Conf. IEEE APEC, pp. 2678-2685, 2018.

[3] Z. Ouyang, J. Zhang, and W. G. Hurley, “Calculation of Leakage Inductance for High-Frequency Transformers,” IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 30, no. 10, pp. 5769 - 5775, 2015.