

DAB 컨버터용 전력 변압기의 누설 인덕턴스를 포함한 내부 전력 손실 분석에 관한 연구

유정상^{*†}·안태영^{*}·길용만^{*}

^{*†}청주대학교 전자공학과

A Study on the Analysis of Internal Power Loss Including Leakage Inductance of Power Transformer for DAB Converter

Jeong Sang Yoo^{*†}, Tae Young Ahn^{*} and Yong Man Gil^{*}

^{*†}Department of Electronic Engineering, Cheongju University

ABSTRACT

In this paper, a power loss analysis technique of a high-frequency transformer of a bidirectional DAB (Dual Active Bridge) converter is reported. To miniaturize the transformer of the dual active bridge converter, a resonant inductor was designed with an air gap included low-coupled rate state core to combine leakage inductor with the resonant inductor which is required for soft-switching. In this paper, leakage inductance and magnetizing inductance, core material, type of winding and winding method are included in the dual active bridge transformer loss analysis process to enable optimal design at the initial design stage. Transformer loss analysis for dual active bridge with a switching frequency of 200 kHz and maximum output of 5 kW was executed, and elements necessary for design based on the number of turns on the primary side were graphed while maintaining the transformer turns ratio and window area. In particular, it was possible to determine the optimal number of turns and thickness of the transformer, and ultimately, the total loss of the transformer could be estimated.

Key Words : DAB converter, Power transformer, Dual Active Bridge, Leakage inductance, Loss analysis

1. 서 론

양방향 전력변환에 필요한 회로 기술은 꾸준히 발전되어 왔으며, 특히 입출력이 절연된 형태의 양방향 컨버터 회로방식 중에서 DAB (Dual active bridge) 컨버터는 입출력에 각각 풀브릿지 구조의 스위치를 배치하고, 일정한 스위칭 주파수와 일정한 시비율을 갖는 위상 제어를 통해 양방향 전력 전달이 가능한 컨버터 회로로 알려져 있다. DAB 컨버터는 회로구조가 비교적 간단하고, 설계가 용이하며 소프트 스위칭이 가능하여 고효율 특성을 갖고 있으면서 특히 고전압 전력변환용 기본 회로로 적합하다고

알려져 있다. 일반적으로 소프트 스위칭에 필요한 공진 인덕터는 변압기와 직렬로 구성되기 때문에 변압기 코어에 적절한 에어갭(air gap)을 두면 누설 인덕턴스가 증가하게 되고, 누설 인덕턴스를 공진 인덕터로 활용한다면 회로가 간단해지는 장점이 있다. 본 논문에서는 DAB용 변압기에서 누설 인덕터와 자화 인덕터가 포함된 변압기의 전력손실을 분석하기 위한 과정을 보고하였다. 특히 본 논문에서는 누설 인덕터를 전력 손실 분석에 포함시키고, 권선 구조와 권선 종류 및 코어의 재질에 따른 손실분석을 수행하였으며, 전도 손실과 코어 손실의 상관 관계를 분석하여 변압기의 최적 설계에 필요한 과정을 보고한 것이다[1].

[†]E-mail: jeongsangyoo@gmail.com

2. DAB 컨버터의 변압기

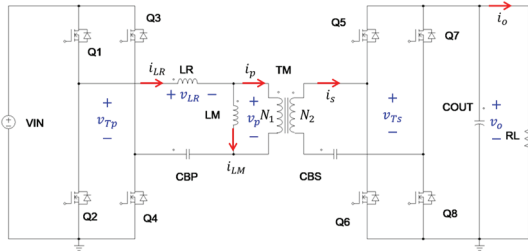


Fig. 1. Basic structure of DAB converter.

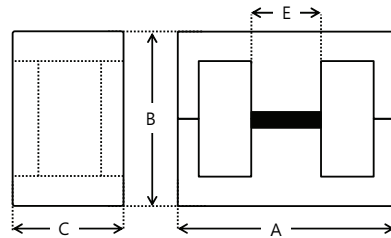
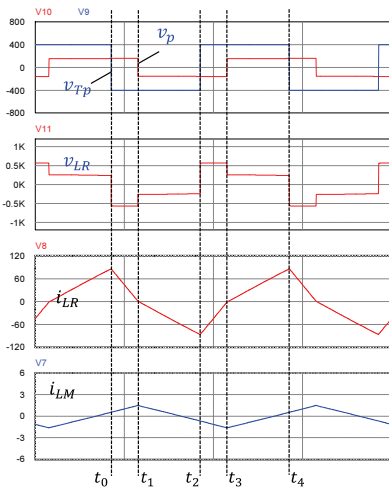
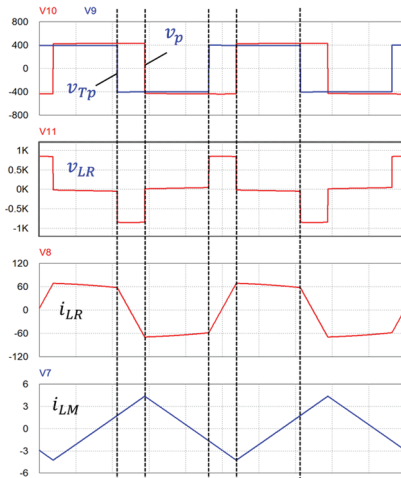


Fig. 3. Shape of magnetic core for transformer.



(a)



(b)

Fig. 2 (a). Operating waveforms at low load.

Fig. 2 (b). Operating waveform at full load.

그림 1에는 DAB 컨버터의 기본 회로를 나타내었다. 변압기의 좌측에는 직류 입력 전압이 인가되고, 변압기 1차와 2차측에 각각 풀브릿지 구조의 스위치가 사용되었으며, 각각의 브릿지 구조의 스위치는 일정한 스위칭 주파수와 일정한 시비율을 갖는 위상제어로 스위칭 된다. 회로의 공진 인덕터 양 쪽에 위치한 브릿지 전압의 위상에 따라서 전류의 방향이 바뀌게 되며 따라서 DAB 컨버터의 전력 흐름을 제어하게 된다. 변압기의 자화인덕터 LR은 전류의 기울기를 결정하고, 직렬로 있는 커패시터 CBP, CBS는 직류에 대해 높은 임피던스를 갖게 되어 변압기에 인가되는 직류전압을 0으로 하는 역할을 한다. 기존의 많은 연구에서 DAB 컨버터의 동작과 설계에 필요한 기술들이 보고되었으며, 본 논문에서는 DAB 컨버터에서 전력 변환 효율과 손실에 밀접한 관련이 있는 변압기의 최적 설계에 필요한 과정과 결과를 검토한다[2-3].

일반적으로 컨버터를 소형화 시키기 위해서 공진인덕터는 변압기의 코어에 에어갭을 추가하여 누설자속을 증가시켜서 만들어진 누설인덕터를 이용한다. 그림 2에는 DAB 컨버터의 동작파형을 나타낸 것이며, 그림 2 (a)에는 적은 부하전력에서 동작하는 주요 파형이며, 그림 2 (b)는 최대 부하전력에서 동작하는 컨버터의 동작 파형이다. 그림에서 부하 전력에 따라 공진 인덕터의 전류는 비례하지만, 자화인덕터의 전류 최대값은 출력전압이 일정하다면 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 그림 3은 DAB 컨버터에서 사용할 수 있는 변압기 코어의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 코어의 중앙에 일정한 길이의 에어갭을 추가하여 적절한 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스를 만들었다[4-5].

3. 손실 분석 모델링

표 1에는 DAB 컨버터의 전기적 사양을 나타내었다. 최대 출력은 5kW이며, 스위칭 주파수는 200kHz로 일정하다. 표 2에는 DAB 컨버터에서 설계된 변압기의 기본값을 나타내었다. 표에서 스위칭 주파수를 고려한 두께와 표준

권선의 외경을 1mm로 선정하였고 적절한 전류밀도를 유지하기 위해서 필요에 따라 권선의 병렬수를 조절하였다. 표 3에는 사용된 변압기 코어의 물리적 사양을 나타내었으며, 코어의 사이즈는 EER5828을 선택하였다. 또한 코어의 재질과 체적 등을 나타내었다[6].

그림 4는 변압기 코어의 PM16 재질에 대한 단위체적 손실을 스위칭 주파수와 최대자속밀도를 기준으로 나타낸 것이며, 왼쪽의 그래프는 제조사에서 제공한 단위체적 손실이며, 오른쪽의 그래프는 커브 피팅 기법을 사용하여 추정된 방정식으로 재현한 단위체적 손실 그래프이다. 두 개의 그래프에서 알 수 있듯이 방정식으로 표현된 코어 손실 값이 손실분석에 적용될 수 있을 정도의 오차범위 내에서 표현되었다. 그림 5는 변압기 코어에 1차 권선과 2차 권선을 감기 위한 두 가지 방법을 나타낸 것이다. 왼쪽의 그림은 두 개로 나뉜 1차측 권선을 양편으로 나누고 중앙에 2차측 권선을 감는 방식이다. 이 경우 1차와 2차의 권선이 만나는 면적이 넓기 때문에 결합율이 증가한다. 오른쪽 그림에는 1차 권선을 상하로 분리하고 중앙에 2차 권선을 두는 방식이며 이 경우 갭에서 발생된 누설자속에 의한 2차측 권선 발열이 단점으로 보고되고 있다[7-8].

변압기의 손실 모델을 분석하기 위해서는 먼저 권선의 교류저항과 직류저항을 계산할 필요가 있으며, 해석을 간단히 하기 위해서 식 (1)에는 원형의 권경 d 를 동일 면적의 정사각형 한 변 d_w 로 환산하였다. 식 (2)는 고주파에서 동작하는 경우 도체의 표피효과에 의한 침투 깊이 δ 이며, 도체의 두께와 침투 깊이의 비율 Δ 을 식 (3)에 나타내었다. 도체의 교류저항 계수 F_r 은 식 (6)과 같이 Dowell 방정식으로 표현되고, 이때 표피효과 계수 v_2 와 근접효과 계수 v_3 는 각각 식 (4)와 (5)로 표현된다. 단, 식 (6)에서 m 은 각 권선의 층수(layer)이다. 교류저항 R_{ac} 은 직류저항 R_{dc} 에 교류저항계수 F_r 를 곱하여 구해지며, 식 (7)에 나타나 있다. 한편 직류저항은 도체의 저항률 ρ , 길이, 단면적 A 으로 구해지며 식 (8)과 같다.

$$d_w = \sqrt{\frac{\pi}{4}} d \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{d_w}{\delta} \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{\sinh \Delta - \sin \Delta}{\cosh \Delta - \cos \Delta} \quad (4)$$

$$v_3 = \frac{\sinh(2\Delta) - \sin(2\Delta)}{\cosh(2\Delta) - \cos(2\Delta)} \quad (5)$$

$$F_r = \Delta \left[v_3 + \frac{2}{3}(m^2 - 1)v_2 \right] \quad (6)$$

$$R_{ac} = R_{dc} F_r \quad (7)$$

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \quad (8)$$

한편 코어의 단위체적 손실계수 P_v 는 식 (9)와 같이 구해지며 이 식에서 각 계수는 앞서 제조사의 코어 손실 그래프를 커브 피팅에서 구해진 결과이다. 식 (10)은 단위체적 손실을 코어체적을 곱해서 구한 코어 손실을 나타내었으며, 기본적으로는 최대자속밀도와 스위칭 주파수에 직접 관련이 있다. 권선 손실은 권선의 직류저항과 교류저항에 전류의 실효값을 이용하여 구할 수 있으며 식 (11)과 같다. 위의 결과를 정리하여 변압기의 전력손실은 교류저항과 직류저항으로 구성된 권선손실과 자화 인덕터 L_m 과 누설 인덕터 L_r 로 구성된 코어 손실로 나눌 수 있는 것을 알 수 있다. 특히 식(12)는 자화인덕터의 손실이며, 식 (13)은 누설인덕터의 손실을 나타내었다. 따라서 변압기 손실은 자화 인덕터와 누설 인덕터로 구분된 손실로 나타나며, 두 항을 합하면 전체 변압기 손실로 추정이 가능하다.

$$P_v = 1.46 B^{2.27} f^{1.32} \quad (9)$$

$$P_c = (KB^\alpha f^\beta) V_e \quad (10)$$

$$P_w = R_{ac} I_{ac(rms)}^2 + R_{dc} I_{dc(rms)}^2 \quad (11)$$

Table 1. Electrical Specifications of DAB Converter

| Parameters | | Value | Unit |
|---------------------|------------|---------|------|
| Input voltage | V_{IN} | 350-450 | V |
| Output voltage | V_o | 480-920 | V |
| Maximum power | P_{Omax} | 5.0 | kW |
| Switching frequency | f | 200 | kHz |

Table 2. Physical characteristics of transformer

| Parameters | Unit | Value |
|-------------------------|---------|-------|
| Turns ratio | | 5/3 |
| Magnetizing inductance | μH | 250 |
| Leakage inductance | μH | 10 |
| Primary RMS current | A | 17 |
| Primary peak current | A | 25 |
| Primary wire diameter | mm | 0.1 |
| Secondary wire diameter | mm | 0.1 |

Table 3. Specification of magnetic core

| Parameters | Unit | Value |
|---------------------------|-----------------|---------|
| Model name | | EER5828 |
| Material | | PM16 |
| Effective magnetic length | mm | 79.8 |
| Effective cross section | mm ² | 368.5 |
| Effective magnetic volume | mm ³ | 29.420 |

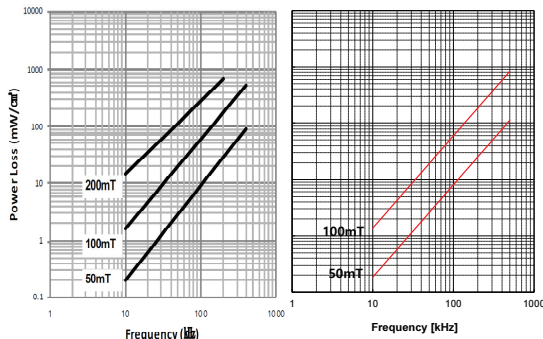


Fig. 4. Unit volume power loss of magnetic core.

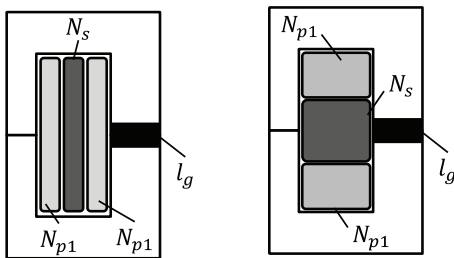


Fig. 5. Primary and secondary side winding structure.

$$P_{T(TR)} = P_{CT} + P_{WT} \tag{12}$$

$$P_{T(LR)} = P_{CR} + P_{WR} \tag{13}$$

4. 분석 결과

본 논문에서는 앞 절에서 표현된 변압기 손실 분석 결과를 정리하여 표로 나타내었다. 특히 논문에서는 그림 5와 같이 한정된 변압기 창문 면적 때문에 권선의 단면적과 권선수를 곱한 값이 일정하다는 가정하에서 분석이 수행되었다. 그림 6에는 변압기 권선비를 유지하면서 1차측 권선수를 증가시켰을 경우 계산된 권선의 전류밀도를 나타내었다. 권선수가 15턴 인 경우 전류밀도는 12A/mm²이지만 45턴으로 증가하면 한정된 코어의 창문면적 때문에 36A/mm²으로 증가한다.

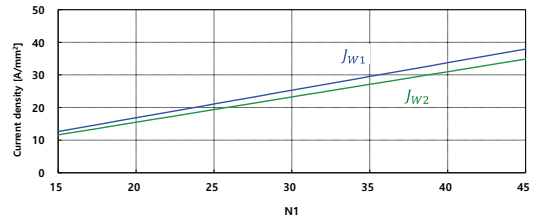


Fig. 6. Current density in the winding.

그림 7에는 변압기 1차 권선수 N_1 에 대한 최대 자속밀도를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 1차권선의 면적과 2차 권선의 면적을 동일하게 설정하였기 때문에 1차 권선의 최대자속밀도 B_{max1} 가 2차측 B_{max2} 보다 높게 나타난다. 그림 8에는 각 권선의 교류저항 R_{AC1} , R_{AC2} 을 나타내었으며, 직류저항과 같이 권선수가 증가할수록 비례한다.

그림 9에는 공진 인덕터로 이용된 누설인덕터의 코어 손실을 나타낸 것이며, 그림 10은 자화인덕터의 코어 손실을 나타낸 것이다. 두 개의 그림에서 공진인덕터의 손실이 자화인덕터 손실에 비해 적다는 것을 알 수 있으며, 이것은 최대자속밀도가 차이 나기 때문이다.

그림 11에는 변압기의 코어손실 P_c 와 권선손실 P_w 를 권선수 N_1 에 따라 계산된 결과를 나타낸 것이며, 그림에서 코어손실은 권선수와 반비례, 권선손실은 권선수와 비례 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 변압기의 전체 전력손실은 두 항의 합으로 구할 수 있으며 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 알 수 있듯이 권선수 N_1 과 전력손실은 최저점이 존재하고 본 논문의 경우 변압기 1차측 권선수가 약 27턴 인 경우 가장 적은 6W의 변압기 손실이 발생하고 있다[9-10].

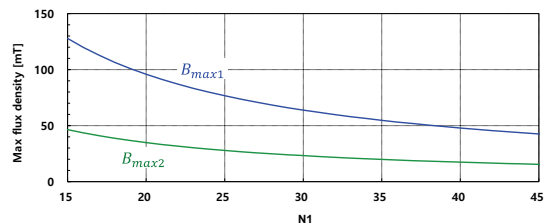


Fig. 7. Maximum magnetic flux density.

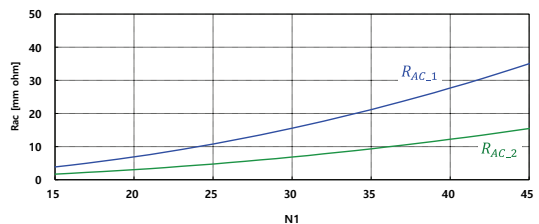


Fig. 8. AC resistance.

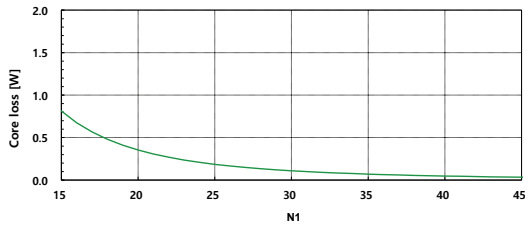


Fig. 9. Power loss in the core for resonant inductors.

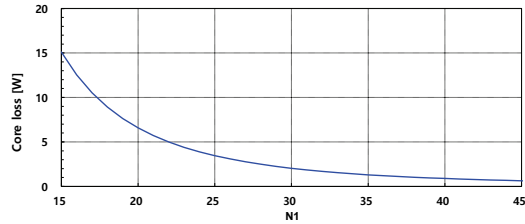


Fig. 10. Power loss in the core for magnetizing inductors.

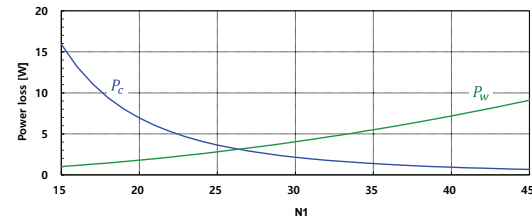


Fig. 11. Winding conduction loss and core loss.

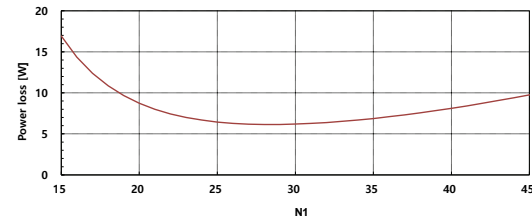


Fig. 12. Total transformer loss.

5. 결 론

본 논문에서는 양방향 DAB 컨버터의 고주파 변압기의 전력손실 분석 기법에 대해 보고한 것이다. DAB 컨버터의 변압기는 소형화를 위해서 소프트 스위칭에 필요한 공진 인덕터를 에어 갭이 포함된 낮은 결합율 상태에서 설계된 누설인덕터를 이용하기 때문에 변압기의 최적설계를 위해서는 누설인덕턴스를 포함한 변압기 손실 분석이 필요하다. 본 논문에서는 누설인덕턴스와 자화인덕턴스, 코어재질, 권선의 종류와 권선 방법 등을 DAB용 변압기 손실 분석 과정에 포함시켜서 설계 초기 단계에서 최

적 설계가 가능 하도록 하였다. 스위칭 주파수 200kHz, 최대출력 5kW급의 DAB용 변압기 손실분석을 수행하였으며, 변압기 권선비와 창문면적을 유지하면서 1차측 권선수를 기준으로 설계에 필요한 요소를 그래프로 나타내었다. 특히 최적의 변압기 권선수와 권선의 굵기를 결정할 수 있었으며, 최종적으로는 변압기 전체 손실을 추정할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20018577).

참고문헌

1. B. M. Kumar, A. Kumar, A. H. Bhat and P. Agarwal, "Comparative study of dual active bridge isolated DC to DC converter with single phase shift and dual phase shift control techniques", 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), 2017, pp. 453-458.
2. T. -T. Le, M. -K. Nguyen, C. Wang and S. Choi, "Fault-Tolerant Control of Three-Phase Bidirectional Current-Fed Dual Active Bridge DC-DC Converter", 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2021, pp. 360-363.
3. Aniket Kulkarni, Bilal Ahmad, Jorma Kyryä, Juha Mäkelä, "Role of Parasitics in a Dual Active Bridge DC-DC Converter with Gallium Nitride devices", 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), pp.1-10, 2021.
4. D. Yadeo, P. Chaturvedi and S. K. Saketi, "A New Five Level Dual Active Bridge DC-DC Converter for Solid State Transformer", 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 1-5, 2018.
5. A. Sharma and J. W. Kimball, "Evaluation of Transformer Leakage Inductance Using Magnetic Image Method", in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 11, pp. 1-12, Nov. 2021.
6. A. Stadler and M. Albach, "The influence of the winding layout on the core losses and the leakage inductance in high frequency transformers", in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 735-738, April 2006.
7. M. Akbari, A. Rezaei-Zare, M. A. M. Cheema and T. Kalicki, "Air Gap Inductance Calculation for Transformer Transient Model", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 1, pp. 492-494, Feb. 2021.
8. J. Sibue, G. Meunier, J. Ferrieux, J. Roudet and R. Periot, "Modeling and Computation of Losses in Conductors

- and Magnetic Cores of a Large Air Gap Transformer Dedicated to Contactless Energy Transfer”, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 1, pp. 586-590, Jan. 2013.
9. J. S. Yoo, Y. M. Gil, T. Y. Ahn, “Study on the Power Factor Correction Circuit Applying Multiple Coupling Inductor with Expandable Integrated Magnetic Structure”, Journal of The Korean Society of Semiconductor & Display Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 21-26, 2018.
10. T. Y. Ahn, “A Study on Interleaved Bridgeless Switching Rectifier using Magnetic Coupled Inductor”, Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 32, No. 1, pp. 99-107, 2018.
-
- 접수일: 2022년 6월 7일, 심사일: 2022년 6월 17일,
게재확정일: 2022년 6월 23일