

초소형 전기차용 양방향 충전기 소형화를 위한 누설 인덕턴스 활용 변압기 설계

박주한¹⁾, 이준영¹⁾, 이민규¹⁾, 구근완¹⁾, 김준호^{† 2)}
한국자동차연구원¹⁾, 계명대학교 전기에너지공학과²⁾

Transformer Design Utilizing Leakage Inductance for Miniaturization of Bidirectional Chargers for Ultra-compact Electric Vehicles

Joo-Han Park¹⁾, Jun-Yung Lee¹⁾, Min-Gue Lee¹⁾, Gwun-Wan Koo¹⁾, Jun-Ho Kim^{† 2)}
Korea Automotive Technology Institute¹⁾
Electrical Energy Engineering Keimyung University²⁾

ABSTRACT

본 논문에서는 초소형 전기차용 양방향 충전기의 소형화를 위해 변압기에 보조 인덕터를 통합한 변압기 설계 방법에 대해 제안한다. 설계의 단순화를 위해 변압기의 자화 인덕턴스만을 DAB 동작에 사용하고 필요한 공진 인덕턴스를 추가적인 인덕터를 통해 구현하던 기존의 자성체 설계 방법의 한계를 극복하여 전력 밀도를 향상하기 위해 PQ 코어의 5055 규격을 이용한 높은 누설 인덕턴스를 달성하는 통합형 변압기를 제안하였다. 해당 설계를 통해 보조 인덕터 없이도 높은 전력 밀도를 달성할 수 있었으며, 기존 변압기 및 보조 인덕터보다 0.85배만큼의 전력 밀도를 향상할 수 있었으며, 시물레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 지구 온난화 및 환경 문제의 심각성으로 인해 친환경 자동차 기술 개발에 관한 관심이 급증하고 있다. 특히 전기차의 수요가 지속해서 증가함에 따라 초소형 전기 상용차와 전기 이륜차와 같은 다양한 형태의 전기차 보급률이 빠르게 상승하고 있다. 이에 따라 전기차 충전 인프라의 확충이 필수적 과제로 주목받고 있으며, 기존의 단방향 충전 방식에서 벗어나 양방향 충전 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

양방향 충전 기술의 구현을 위해서는 Dual Active Bridge (DAB) 및 LLC 공진형 컨버터와 같은 고성능 전력 변환 장치가 필수적이다. 특히, DAB 컨버터의 경우, 양 측의 위상차로 인해 발생하는 양단의 전압 차가 누설 인덕턴스에 인가되어 전력 변환을 실현할 수 있다^[2]. 누설 인덕턴스가 클수록 ZVS(Zero Voltage Switching) 영역이 확장되어 넓은 부하의 범위에서 ZVS를 달성할 수 있다는 이점이 있다. 따라서 넓은 ZVS 영역을 확보하기 위해서는 큰 누설 인덕턴스의 설계가 필요하지만, 지나치게 큰 누설 인덕턴스는 시스템 전체의 효율 저하를 초래할 수 있어, 적절한 누설 인덕턴스의 설계가 요구된다.

전형적인 변압기 설계에서는 변압기의 본래 기능을 극대화하기 위해 누설 인덕턴스를 최소화하고 자화 인덕턴스를 최대화하는 방식을 채택해왔다. 하지만, 해당 설계 방식은 적은 누설 인덕턴스 때문에 DAB 컨버터를 동작시키에는 적절하지 않으며, 원활한 동작을 위해서는 보조 인덕터를 추가로 설치하여 누설 인덕턴스의 값을 보상에 줘야 한다.

보조 인덕터를 설치할 경우 시스템 전체의 전력 밀도가 감소하며, 이에 따른 비용 상승의 문제가 발생한다. 또한, 변압기 자체만 사용 시, 낮은 누설 인덕턴스 때문에 넓은 부하 영역에서 ZVS를 달성하지 못하여 시스템의 효율 저하가 초래된다.

본 논문에서는 DAB 컨버터에 대한 파라미터 선정 및 변압

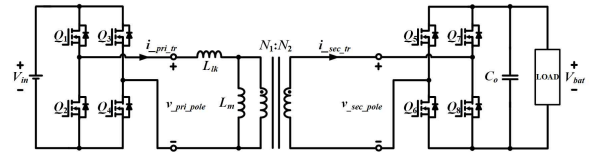


그림. 1 Dual Active Bridge 컨버터 회로
Fig. 1 Dual Active Bridge converter circuit

표 1 DAB 컨버터 시스템 목표 설계 사양
Table 1 DAB converter system target design specification

입력 전압 (V_{in})	380V
출력 전압 (V_{bat})	72V (46V ~ 86V)
출력 전력 (P_{out})	1500W
동작 주파수 (f_{sw})	100kHz
턴 수 ($N_1:N_2$)	5:1
코어 형상	PQ CORE
코어 재질	PL-19

기 설계에 대해 소개하며, 변압기에 보조 인덕터를 통합하여 높은 누설 인덕턴스를 달성하는 통합형 변압기에 대해 제안한다. 또한, 제안하는 변압기 및 함께 기존 보조 인덕터와 같이 사용한 변압기를 비교, 분석하였으며, 시물레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 초소형 전기차용 양방향 DAB 설계

2.1 DAB 파라미터 선정

그림. 1은 DAB 컨버터에 회로이며, 컨버터 설계 목표 사양은 표 1에서 확인 할 수 있다. DAB 파라미터 선정을 위해 표 1의 값을 수식 1에 대입하여 그림. 2 (a)의 그래프를 도출할 수 있다. V_{in} 은 입력 전압, V_{pri_poles} , i_{pri_tr} 은 1차 측 폴 전압 및 변압기에 흐르는 전류이며, L_{pk} 와 L_m 은 누설 인덕턴스 자화 인덕턴스이다. $N_1:N_2$ 는 1차 측 및 2차 측에 대한 권선 비며, V_{sec_poles} , i_{sec_tr} 는 2차 측 폴 전압 및 변압기에 흐르는 전류이다. C_c 는 출력 커패시터이며, V_{bat} 은 부하에 걸리는 전압이다.

$$P_{out} = \frac{N_1 V_{in} V_{out} \phi (\pi - \phi)}{N_2 2\pi^2 f_s L_{lk}} \quad (1)$$

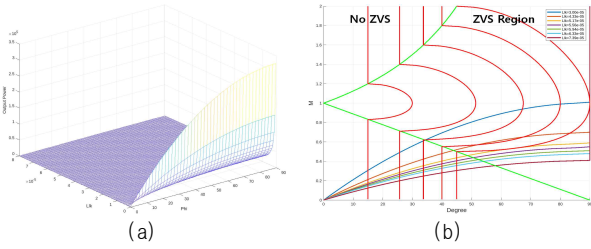


그림. 2 (a) 누설 인덕턴스 및 위상차 변동량에 따른 출력 전력 커브 (b) DAB ZVS 동작 영역
Fig. 2 (a) Output power curve based on leakage inductance and phase difference variation (b) DAB ZVS operation region

ϕ 는 1차 측과 2차 측 레그의 위상차이며, 그림. 1 (a)는 L_{lk} 및 ϕ 변동량에 따른 출력 전력 커브이다. 그림. 2 (a) 을 활용하여 1500 W에 해당하는 L_{lk} 및 ϕ 조합의 데이터를 추출할 수 있다. 추출된 L_{lk} 값들은 그림. 1 (b)인 ZVS 동작 영역 그래프에 대입할 수 있으며, DAB의 출력 전압 범위 전체에서 ZVS를 달성하기 위해 누설 인덕턴스를 70 μ H로 선정하였다.

2.2 DAB 변압기 설계

기존 변압기의 구조는 그림. 3 (a)에 제시되어 있으며, PQ 코어의 5050 규격을 사용하여 변압기를 설계하였다. 변압기 한 측면의 창 면적은 432 mm^2 이며, DAB 컨버터가 풀부하 상태에서 1차 측과 2차 측에 각각 4 A와 21 A의 전류가 흐른다. 이를 바탕으로 허용 전류에 맞춰 1차 측 권선 직경을 2.2 mm, 2차 측 권선 직경을 3.4 mm로 선정하였으며, 전압 비에 의해 권선을 5:1의 비율로 유지하여 감는다. 높은 누설 인덕턴스를 위해 1차 측과 2차 측 권선의 물리적 거리를 늘려 설계하였다. 누설 인덕턴스 측정 시 40 μ H이며, 이는 5050 규격의 작은 창 면적에 의한 결과이다. 해당 규격의 변압기에서 컨버터에 요구되는 누설 인덕턴스 값에 도달하기 위해 보조 인덕터를 추가로 사용해야 한다.

$$A_{p,max} = \left[\frac{11.1 \cdot P_{in}}{K \Delta B f_{sw}} \right]^{1.31} [\text{cm}^4] = 1.50 [\text{cm}^4] \quad (2)$$

제안된 변압기의 설계를 위해 코어 재질과 형상은 표 1에서 확인할 수 있으며, 최소 코어 크기는 수식 (2) 를 이용하여 도출하였다.

여기서 K 는 브릿지 유형에 따른 계수로, 본 논문에서는 풀 브릿지 타입을 사용하였기 때문에 0.165의 값을 적용하였다. P_{in} 은 입력 전력, ΔB_{max} 는 페라이트 코어의 최대 자속 밀도를 나타낸다. 수식 (2) 의 계산 결과, 최소 코어 크기는 1.50 cm^4 로 도출되었다. 권선의 두께, 코어 창 크기, 권선 방식 및 보조 인덕터를 통합하기 위한 최적의 코어 크기를 선정한 결과 5055 규격 PQ 코어를 채택하였다.

해당 규격의 코어의 창 면적은 560 mm^2 이며, 5050 규격의 창 면적보다 128 mm^2 만큼 늘어나 1차 측과 2차 측 권선 사이의 물리적 거리를 증가시켜 결합도를 감소시킬 수 있었다. 이를 통해 누설 인덕턴스를 70 μ H로 설계할 수 있었으며, DAB 컨버터의 정상적인 동작을 위해 자화 인덕턴스는 누설 인덕턴스의 17배인 1.2 mH로 측정되었다. 실제 변압기의 모습은 그림. 3 (b) 에 제시되어 있다.

또한, 변압기의 부피를 비교한 결과, 기존 변압기 및 보조 인덕터의 전체 부피는 103 cm^3 였으나, 제안된 변압기의 부피는 88 cm^3 로 약 0.85배 줄어들었다. 이로 인해 전력 밀도가 증가하여 시스템의 공간 활용 효율이 향상되었다.

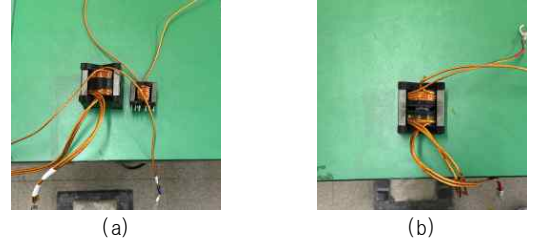


그림. 3 (a) 기존 변압기 및 보조 인덕터 (b) 제안하는 변압기
Fig. 3 (a) Conventional transformer and auxiliary inductor (b) proposed transformer

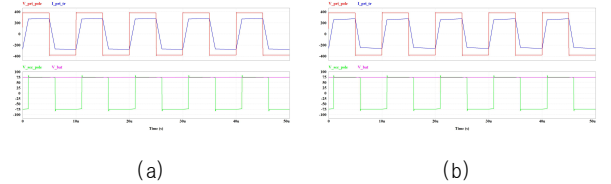


그림. 4 시뮬레이션 파형 (a) 기존 변압기 및 보조 인덕터 활용 (b) 제안하는 변압기 활용
Fig. 4 Simulation waveform (a) Utilize existing transformers and auxiliary inductor (b) Using the proposed transformer

3. 시뮬레이션

제안하는 변압기의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 활용하여 기존 변압기를 사용했을 때의 파형과 비교하였다. 그림. 4 (a) 는 기존 변압기 및 보조 인덕터를 사용하였을 때의 시뮬레이션 파형이며, 그림. 4 (b) 는 제안하는 변압기를 활용하였을 때의 시뮬레이션 파형이다. 파형은 1, 2차 측에 대한 폴 전압 (V_{pri_poles} , V_{sec_pole}), 1차 측 변압기 전류(i_{pri_tr}), 출력 전압 (V_{bat})을 확인할 수 있으며, 1차 측과 2차 측의 위상차는 그림. 4 (a) 는 40°이며, 그림. 4 (b) 는 35°도 이다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 변압기는 변압기 및 보조 인덕터를 사용했을 때와 유사하다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 초소형 전기차용 양방향 충전기의 소형화를 위해 보조 인덕터를 통합하는 새로운 설계 방법을 제안하였다. 제안하는 변압기를 통해 기존보다 높은 전력 밀도를 달성할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 변압기 설계값의 타당성을 검증하였으며, 실제 시제품을 활용한 추가적인 시험을 통해 제안된 변압기에 대한 검증은 진행할 예정이다.

본 연구는 "시장자립형3세대xEV산업육성사업"에 관한 산업통상자원부의 연구 프로젝트 "차종별 플렉시블 전력수요 대응이 가능한 모듈화 전력변환장치 기술개발(과제번호 20024348)"에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. Yuan, L. Dorn-Gomba, A. D. Callegaro, J. Reimers and A. Emadi, "A Review of Bidirectional On-Board Chargers for Electric Vehicles," in IEEE Access, vol. 9, pp. 51501-51518.
- [2] S. -Y. Yu, C. Hsiao and J. Weng, "A High Frequency CLLC Bi-directional Series Resonant Converter DAB Using an Integrated PCB Winding Transformer," 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 1074-1080.