

# Time-domain Analysis 기반 위상 천이 풀 브릿지 컨버터 다목적 최적 설계 알고리즘

장영섭, 김래영  
한양대학교 에너지전력전자연구실

## Multi-objective Optimal Design Algorithm Based on Time-domain Analysis of Phase-shift Full Bridge Converter

Yeong-Seop Jang, Rae-Young Kim  
Energy Power Electronics Control System Lab, Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 위상 천이 풀 브릿지(PSFB) 컨버터의 손실과 자성체 소자의 부피 최적화를 위한 다목적 최적 설계 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 Time-domain Analysis(TDA)를 기반으로 PSFB 컨버터의 기존 선형 해석 기반보다 정확한 분석을 통하여 전류를 추정하고 이를 바탕으로 설계 제약 조건 판별 및 컨버터의 손실과 자성체 부피를 추정하여 손실과 부피에 대하여 두 가지 목표를 최소화하는 방향의 회로 파라미터를 도출한다. 또한 TDA 기반의 분석을 위한 수식의 복잡성에 의한 느린 연산속도를 극복하기 위하여 선형 해석과 TDA를 복합적으로 사용하여 TDA의 해석 정확성을 유지하며 알고리즘의 연산 속도를 향상시켰다.

### 1. 서론

Phase-shift full bridge(PSFB) 컨버터는 Zero-voltage switching(ZVS)를 통해 전력 반도체 소자의 스위칭 손실을 저감함으로써 높은 변환 효율과 높은 전력 밀도를 달성할 수 있어 다양한 어플리케이션에서 사용되는 토폴로지이다. PSFB 컨버터의 ZVS 동작은 공진 인덕턴스의 에너지를 활용한 반도체 소자의 출력 커패시턴스 충전 동작을 통해 이루어지기 때문에 부하 전류의 크기에 영향을 받으며 경부하 동작에서의 ZVS 달성이 어려울 수 있다.<sup>[1]</sup>

PSFB 컨버터의 설계 정확도를 높이기 위해서는 컨버터의 동작을 보다 정밀하게 분석할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 ZVS 동작과 전력 손실을 추정하여 고효율의 PSFB 컨버터를 설계자가 원하는 조건에 맞게 설계할 수 있다. 또한 PSFB 컨버터는 자성체의 부피가 큰 비중을 차지하고 있으며 자성체 파라미터들에 의해 동작이 크게 변화하기 때문에 변압기의 최적화 설계나 자성체 설계 파라미터의 최적화에 대한 연구들이 이루어졌다.<sup>[2-3]</sup> 그러나 PSFB 컨버터 설계 파라미터의 최적화를 위해 반복적인 시뮬레이션을 통한 정확한 손실 추정을 진행하는 등의 설계에 소요되는 시간이 오래 걸리기 때문에 정확한 수식모델을 기반으로 PSFB 컨버터의 설계 파라미터의 최적값을 도출하기 위한 설계 알고리즘의 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 TDA 기법을 통해 도출한 PSFB 컨버터의 수식모델을 기반으로 손실과 자성체 부피에 대하여 회로 설계 파라미터의 최적화를 위한 설계 알고리즘을 연구한다. TDA 기법의 경우에는 회로의 다양한 변수들에 의해 비선형

방정식을 기반으로 수식모델이 도출되며, 이에 따른 솔루션의 해석 시간이 길어지기 때문에 기존의 단순한 선형 해석과 TDA를 복합적으로 사용하여 알고리즘의 연산 속도를 향상시킨다.

### 2. TDA 기반 PSFB 컨버터 최적 설계 알고리즘

#### 2.1 PSFB 컨버터 동작분석

##### 2.1.1 PSFB 컨버터 선형 동작분석

그림 1은 일반적인 구조의 PSFB 컨버터의 토폴로지를 나타내며 그림 2는 PSFB 컨버터의 스위치의 게이트 신호와 1차측 전류 파형을 나타낸다. 선형 동작분석에서는 일반적으로 데드타임 영역의 동작은 해석을 생략하여 진행한다. 따라서 동작은 크게 6개의 구간으로 나뉘며 반주기를 기준으로 대칭적으로 동작함에 따라 3개의 구간에 대하여 분석된다.

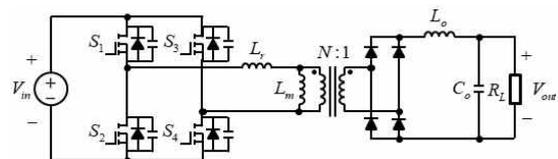


그림 1 위상 천이 풀 브릿지 컨버터 토폴로지  
Fig. 1 Phase-shift full bridge converter topology

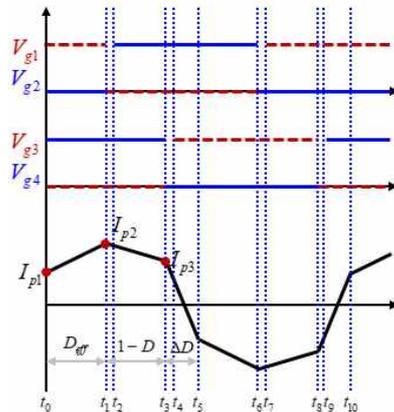


그림 2 PSFB 컨버터의 1차측 전류 파형  
Fig. 2 Primary current waveforms of PSFB converter  
선형 동작분석에 따른 3개의 구간의 전류의 수식 모델을 정

리하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$i_{p01}(t) = I_{p1} + \frac{I_{p2} - I_{p1}}{D_{eff}T_s/2}(t - t_0) \quad (1)$$

$$i_{p13}(t) = I_{p2} + \frac{I_{p3} - I_{p2}}{(1-D)T_s/2}(t - t_1) \quad (2)$$

$$i_{p35}(t) = I_{p3} - \frac{I_{p1} + I_{p2}}{\Delta DT_s/2}(t - t_3) \quad (3)$$

여기서 각 구간의 전류 초기값  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $I_{p3}$ 는 2차측 출력 전류와의 관계식을 통해 구할 수 있으며  $D_{eff}$ 는 전압이득 관계식,  $\Delta D$ 는 공진 인덕턴스의 전압 방정식을 통해 유추할 수 있다. 식 (1) ~ (3)을 기반으로 전류의 RMS 값을 도출할 수 있으며 상대적으로 ZVS 달성이 어려운 lagging leg의 turn-off 전류  $I_{p3}$  값을 기반으로 ZVS 달성 조건은 공진 인덕턴스의 에너지와 스위치 소자의 출력 커패시턴스의 관계에 의해 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{2}L_r I_{p3}^2 \geq \frac{1}{2}(C_{oss(S1)} + C_{oss(S2)})V_{in}^2 \quad (4)$$

### 2.1.2 PSFB 컨버터 TDA 동작분석

TDA 기법을 기반으로 PSFB 컨버터의 반주기 동안의 동작 상태를 구분할 경우 약간의 간소화를 통해 다섯 가지 구간으로 나눌 수 있으며, 그림 3은 각 구간의 등가 회로를 나타낸다.

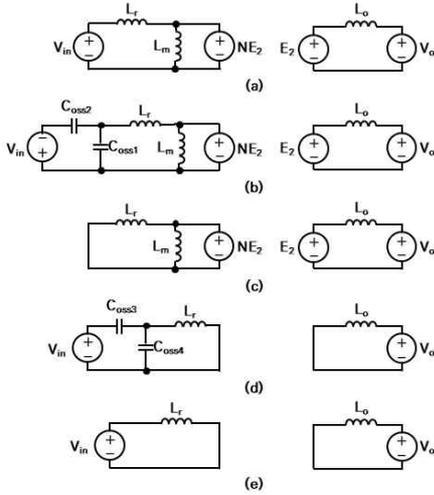


그림 3 PSFB 컨버터 동작 구간별 등가 회로 (a)T 구간( $t_0 \sim t_1$ ), (b)A 구간( $t_1 \sim t_2$ ), (c)F 구간( $t_2 \sim t_3$ ), (d)G 구간( $t_3 \sim t_4$ ), (e)C 구간( $t_4 \sim t_5$ )

Fig. 3 Equivalent circuits of PSFB converter in operation interval (a)T stage( $t_0 \sim t_1$ ), (b)A stage( $t_1 \sim t_2$ ), (c)F stage( $t_2 \sim t_3$ ), (d)G stage( $t_3 \sim t_4$ ), (e)C stage( $t_4 \sim t_5$ )

그림 3 (a)는 1차측에서 2차측으로 에너지가 전달되는 구간으로 공진 인덕턴스, 자화 인덕턴스, 출력 인덕턴스의 전압 방정식 관계를 연립하여 정리할 경우 1차측 전류와 자화 전류의 방정식은 아래 수식과 같이 표현된다.

$$i_{Lr(T)} = k_1 + \frac{L_m V_{in} + N^2 L_o V_{in} - N L_m V_o}{M}(t - t_0) \quad (5)$$

$$i_{Lm(T)} = k_2 + \frac{N L_r V_o + N^2 L_o V_{in}}{L_r L_m + N^2 L_r L_o + N^2 L_m L_o}(t - t_0) \quad (6)$$

여기서  $k_1$ ,  $k_2$ 는 각각 1차측 전류의 초기값과 자화 전류의

초기값을 나타내며 다섯 가지 구간의 전류 방정식의 솔루션을 통해 도출할 수 있다.  $M$ 은  $L_r L_m + N^2 L_r L_o + N^2 L_m L_o$ 를 간략히 표현한 변수이다.

그림 3 (b)는  $S_1$ 이 turn-off 되며 leading-leg의 스위치들의 출력 커패시턴스가 공진 인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 충전되며 공진이 이루어지는 구간으로 커패시턴스의 전류 방정식과 인덕턴스의 전압 방정식들의 정리를 통해 아래와 같이 정리된다.

$$i_{Lr(A)} = 2C_{oss}\omega_{r1}A_1\cos(\omega_{r1}(t-t_1)) + 2C_{oss}\omega_{r1}A_2\sin(\omega_{r1}(t-t_1)) \quad (5)$$

$$i_{Lm(A)} = k_2 + \frac{N^2 L_o V_{in} - N L_r V_o}{M}t - \frac{N^2 L_o A_2}{M}(t - t_1) + \frac{N^2 L_o}{\omega_{r1}M}(A_1\cos(\omega_{r1}(t-t_1)) + A_2\sin(\omega_{r1}(t-t_1)) - A_1) \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{i_{Lr(T)}(t_1)}{2C_{oss}\omega_{r1}} \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{L_m V_{in} + N^2 L_o V_{in} - N L_m V_o}{2C_{oss}\omega_{r1}M} \quad (8)$$

$$\omega_{r1} = \sqrt{\frac{L_m + N^2 L_o}{2C_{oss}M}} \quad (9)$$

위에서 진행한 것과 같이 그림 3 (c)는 입력 전압원과의 단절로 인한 전류의 free-wheeling 동작이 발생하는 구간, (d)는  $S_4$ 가 turn-off 되며 lagging-leg의 스위치들의 출력 커패시턴스가 공진 인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 충전되며 공진이 이루어지는 구간, (e)는 1차측과 2차측이 단절되며 1차측 전류가 순환하는 구간으로 각 구간에 대하여 등가회로에 대한 방정식의 정리를 통해 PSFB 컨버터의 반주기 동작에 대한 1차측 전류와 자화 전류에 대한 수식 모델을 도출할 수 있으며 수식 모델을 기반으로 보다 정확한 전류 추정을 통해 손실과 ZVS 동작에 대한 추정을 달성할 수 있다. 이 때 수식은 삼각함수가 포함된 비선형 방정식으로 솔루션의 해답을 찾는 데 필요한 연산량이 선형 해석에 비하여 커지게 되며, 이에 따라 설계에 필요한 시간이 길어질 수 있다.

### 2.2 PSFB 컨버터 최적 설계 알고리즘

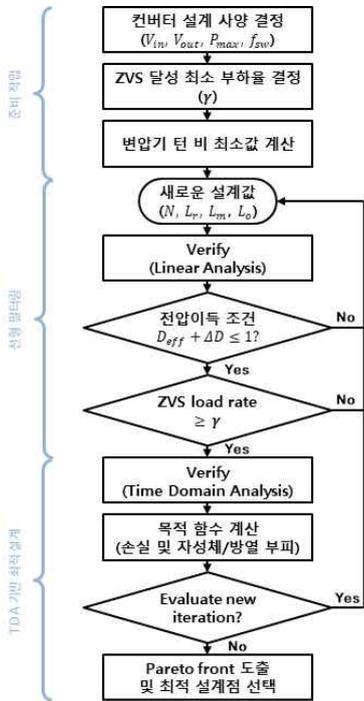
PSFB 컨버터의 설계는 설계자가 요구하는 입출력 전압 조건을 만족하며 넓은 범위의 ZVS 달성을 목표로 진행된다. PSFB 컨버터의 ZVS 동작은 앞서 설명한 것과 같이 공진 인덕턴스의 에너지와 관련되기 때문에 부하의 크기에 따라 스위치 소자의 출력 커패시턴스의 충전전에 필요한 에너지를 공급하지 못할 경우 body diode를 통한 전류 도통이 이루어지지 않고 부분적인 하드 스위칭 동작이 발생하게 된다. 본 논문의 최적 설계 알고리즘은 설계자가 요구하는 최소 부하율에 대하여 ZVS 동작을 만족하며 손실과 부피를 최소화하는 최적 회로 파라미터를 선정하는 것을 목표로 하며 TDA 기반의 비선형 방정식의 연산량을 최소화하기 위하여 선형 해석을 기반으로 필터링을 적용하여 빠른 설계 시간과 높은 정확도의 달성을 목표로 진행된다.

그림 4는 본 논문이 제안하는 최적 설계 알고리즘을 나타낸다. 우선 설계자가 입출력 전압 범위와 최대 전력, 동작 주파수

와 같은 컨버터의 기본적인 설계 사양과 설계자가 요구하는 ZVS 동작의 달성을 원하는 최소 부하율을 결정한다. 이후 전압이득의 달성을 위한 최소한의 턴 비를 계산하여 변압기 턴 비를 최소부터 늘려가며 최적의 설계값을 탐색한다. 변압기 턴 비의 최소값은 아래의 수식을 통해 대략적인 마진을 감안하여 계산하게 된다.

$$N \geq D_{eff(max)} \frac{V_{out(max)}}{V_{in(min)}} \quad (10)$$

여기서  $D_{eff(max)}$ 는 full-load 조건에서 발생하는  $\Delta D$ 의 크기를 고려하여 설계자가 임의로 선택하는 값으로 너무 작게 선정할 경우에는 전체적인 컨버터의 효율이 낮은 지점부터 설계를 진행하게 되어 최적의 턴 비를 탐색하기까지 설계 반복량이 증가하며, 너무 높게 선정할 경우에는 목표로 하는 ZVS 달성이 어려워질 수 있다. 일반적으로  $\Delta D$ 의 마진을 0.3 선정함으로써  $D_{eff(max)}$ 는 0.7로 선정하여 진행한다.



변압기의 턴 비는 계산된 최소값부터 점차 증가시키며 설계를 진행하여 최적의 값을 탐색하며 회로 설계 파라미터  $L_r$ ,  $L_m$ ,  $L_o$  값을 설계자가 지정한 범위 내에서 일정 간격으로 변경하며 설계값을 선정하며 최적 설계점을 탐색하게 된다. 이때, TDA의 연산량을 줄이기 위한 선형 해석을 통한 필터링을 진행하며 전압이득 달성을 위한 유효 듀티와 손실 듀티에 대한 제약조건을 선형 해석을 통해 일차적으로 판별하며 이 때 유효 듀티와 손실 듀티는 아래의 방정식을 통해 계산된다.

$$D_{eff} = \frac{NV_{out}}{V_{in}} \quad (11)$$

$$\Delta D = L_r \frac{2}{T_s} \frac{I_{p1} + I_{p3}}{V_{in}} \quad (12)$$

$$D = D_{eff} + \Delta D \leq 1 \quad (13)$$

전압이득 제약조건을 만족하는 설계값에 대하여 추가적으로 설계자가 원하는 ZVS 동작의 달성을 위한 최소 부하율을 만족하는지에 대한 조건을 통한 필터링을 진행하며 식 (4)를 기반으로 ZVS 달성을 위한 최소 부하를 선형 해석을 통한 대략적

인 정보를 바탕으로 판별 후 두 조건을 모두 만족한 설계값에 대하여 TDA를 통한 보다 정확한 PSFB 컨버터 동작분석을 통한 검증을 진행하고 설계 조건의 만족 여부를 재검토한다. 설계자가 요구하는 조건을 모두 만족한 경우 최적 설계의 목적함수인 컨버터의 손실과 부피에 대한 계산을 진행한다. 손실 목적함수는 반도체 소자의 전도 손실과 스위칭 손실, 자성체의 코어 손실과 구리 손실을 포함하며 부피 목적함수의 경우 큰 비중을 차지하는 자성체의 코어 부피와 손실을 기반으로 방열에 필요한 heatsink의 부피를 목적함수로써 사용한다. 위 과정을 설계자가 정한 설계 변수들의 범위 내에서 반복 설계하며 최종적으로 도출된 결과들에 대하여 다목적 최적 설계를 위한 pareto-front를 도출하고 이 중 최적의 설계점을 선택하여 PSFB 컨버터의 손실과 부피에 대한 다목적 최적 설계를 완료한다.

### 3. 결론

본 논문에서는 PSFB 컨버터의 설계 정확도를 높이기 위해서 TDA 기법을 적용하여 동작분석을 진행하며 이를 기반으로 설계자가 요구하는 부하율에서의 ZVS 동작을 달성하며 손실과 부피에 대한 최적의 설계 파라미터를 탐색하는 다목적 최적 설계 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 선형 해석을 통한 필터링을 통해 TDA 기법의 높은 연산량에 의한 설계 시간을 단축시키며 선형 해석보다 높은 정확도의 해석을 통해 최적의 회로 설계 파라미터를 도출할 수 있다. 또한 TDA 기법을 통한 보다 정확한 동작분석을 바탕으로 손실과 ZVS 동작에 대한 추정의 정확도를 높이고 자성체의 부피와 방열판의 부피를 고려한 PSFB 컨버터의 다목적 최적 설계가 가능하다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원에 의해 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

### 참고 문헌

- [1] Zhao, Lei, et al. "High efficiency variable-frequency full-bridge converter with a load adaptive control method based on the loss model." *Energies* 8.4 (2015): 2647-2673.
- [2] Pereira, Thiago A., et al. "Optimal design of planar transformer for GaN based phase-shifted full bridge converter." 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2020.
- [3] Teng, Jen-Hao, et al. "Parameter Optimization of Magnetic Components for Phase-Shifted Full-Bridge Converters Using a Digital Twin." *Energies* 16.15 (2023): 5773.