

Active Clamp Forward 컨버터 설계 방법 및 제어기 설계

박해찬, 김래영

한양대학교 에너지전력전자연구실

Design Methodology for Active Clamp Forward Converter and Controller Design

Hae-Chan Park, Rae-Young Kim

Department of Energy Power Electronics Control System Lab, Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 ACF(Active Clamp Forward) 컨버터 설계 시 발생하는 오차를 줄이고, 스위칭 소자의 스트레스 및 컨버터의 운용 범위를 고려한 설계 방법을 제안한다. 기존의 ACF 컨버터 설계에서는 소자의 기생 특성과 변압기의 누설 인덕턴스를 고려하지 않아 설계 오차가 발생하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 변압기의 임피던스와 소자의 기생 특성을 포함한 정밀한 설계 방법을 제안하며, 컨버터의 입출력 관계, 스위칭 소자의 스트레스, 그리고 운용 범위를 광범위하게 분석하여 설계 오차를 최소화하는 전략을 도입한다. 또한, 본 연구는 small-signal 모델 구현과 이를 기반으로 한 제어기 설계 방법에 대해서도 소개한다. 제안된 설계 접근법은 이론적 분석과 시뮬레이션 비교, 실험적 검증 등을 통해 그 타당성을 입증하며, 이 과정에서 제어기의 정확성 검증 또한 이루어진다. 이러한 방식은 설계 오차를 현저히 줄이는 데 중점을 두어 ACF 컨버터 설계의 정밀도를 향상시키고, 컨버터의 신뢰성을 더욱 강화한다.

1. 서론

전기자동차(EV)의 Auxiliary Power Module(APM)용 컨버터는 200V-500V의 전압 범위를 입력으로 받아 9V-18V로 변환해야 한다. 이는 컨버터의 매우 넓은 입출력 계인과 고감압을 요구하는 사양이다. 그리고 Zero Voltage Switching(ZVS) 동작을 통해 고효율을 달성하며, 적은 순환 전류, 적은 수의 전력 반도체 소자를 사용해 저비용과 고밀도를 달성하는 Active Clamp Forward(ACF) 컨버터가 APM용으로 많이 채택되고 있다. 설계 시 소자의 스펙이 과도하면 비용과 크기가 증가하고, 부족하면 소자가 손상될 위험이 있다. 따라서 컨버터의 정확한 설계는 중요하며, 이는 시행착오를 줄이고 개발 시간을 단축하는 데 필수적이다. 이에 따라 ACF 컨버터 파라미터 설계와 분석에 관한 연구가 오래전부터 진행되어 왔다^{[1]-[2]}. 참고 논문 [1]에서는 ACF 컨버터의 정상 상태 동작을 8개의 구간으로 나누어 분석했다. 이 연구들은 최대 듀티 비를 0.45로 제한하고, 이를 바탕으로 변압기의 턴비를 정밀하게 계산했다. 또한, 출력 필터와 ZVS 구현을 위한 공진 인덕터를 설계하여 효율적인 동작을 달성했다. 참고 논문 [2]은 정상 상태 동작을 10개 구간으로 나누어 분석했다. 이들 연구에서는 최대 듀티 비를 0.5로 설정하고, 스위치의 off 시 전압을 제한하는 설계 제약 조건을 도

입하여 스위치의 안전성을 보장하려 했다. 또한, ZVS 조건을 만족시키기 위한 공진 회로와 출력 필터를 설계하여 안정적인 동작과 높은 효율성을 달성하고자 했다. 그러나 이 방법들은 최대 듀티 비를 0.5로 제한하여 실제 ACF 컨버터의 이용율을 제한했다. 또한, 이상적인 수식에 기반한 설계 접근법은 실제 운용 시 다양한 비이상적 조건을 충분히 반영하지 못해 설계 값과 실제 운용 값 사이에 큰 오차를 초래할 수 있다. 부하 저항을 DC 저항으로 계산하기 때문에 설계 듀티 비와 실제 듀티 비 간의 오차가 발생하며, 이는 컨버터의 성능 예측을 어렵게 하고 시스템 신뢰성을 낮출 수 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 인식하고, ACF 컨버터의 실제 성능에 더 근접한 결과를 도출하기 위한 새로운 설계 방법을 제시한다. 이를 위해 최대 듀티 비와 관련된 제한을 다른 관점에서 제시하고, 변압기 턴비 및 출력 필터 설계에 있어 실제 운용 조건을 더욱 정밀하게 반영하였다. 또한, 제안된 설계 방법을 통해 얻은 결과를 바탕으로 한 Average 모델을 제안하고, 이를 통해 컨버터의 제어기 설계에 대해서도 논의한다. 이 과정을 통해, 본 논문은 실제 응용에서 ACF 컨버터의 성능과 신뢰성을 향상시킬 수 있는 구체적인 방안을 제공한다.

2. 제안하는 방법

2.1 ACF 컨버터 설계 절차

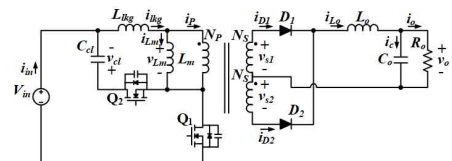


그림 1 센터탭 변압기를 적용한 Active Clamp Forward 컨버터

Fig. 1 Active Clamp Forward Converter Circuit with Center-Tap Transformer Structure

APM 어플리케이션에 적용된 토폴로지는 그림 1과 같이 ACF 컨버터로 선정하였다. 1차측의 구성은 주 스위치(Q1), 보조 스위치(Q2), 클램프 커패시터(Cc)와 누설 인덕턴스(Llk)를 포함하는 변압기의 1차측과 연결된다. 그리고 2차측은 변압기가 센터탭 구조를 가지며, 정류 다이오드 D1, D2와 출력 필터(Lc, Cc)로 구성된다.

본 논문은 정상 상태 모드의 분석을 깊게 다루지 않으며, 이미 참고문헌 [1]-[2]에서 상세한 분석을 다뤘기 때문에, 본 연

구는 1장에서 지적된 문제점들에 대한 해결책을 제시하는 데 중점을 둔다. 문제 해결을 위해 첫째, 정확한 입출력 계인을 통해 구성 요소들의 스트레스와 응답 특성을 더 정밀하게 분석하고 구현한다. 둘째, 스위치 스트레스를 더 정확히 계산하여 고려하고, ACF 컨버터의 듀티 제한을 넓혀 이용률을 향상시키는 방안을 제안한다. 이를 달성하기 위해, 출력 저항(R_o)을 AC 등가 저항(R_{ac})으로 변환하고, 변압기의 누설 인덕턴스로 인해 2차측으로 전달되지 못하는 성분을 계산하여 설계를 최적화한다. 부하저항을 AC 등가모델로 변환하는 과정은 컨버터의 성능과 효율성을 최적화하고, 컨버터의 동작을 보다 정확하게 예측하고 분석하기 위해 필수적이다. 설계의 정확성을 높이기 위해 R_o 를 R_{ac} 로 변환하여 적용한다. 추가로 변압기의 L_m 과 L_{lk} 값을 포함하여 입출력 계인과 실제 적용되는 턴비로 계산한다. R_{ac} 는 First harmonic Fundamental 방법에 의해 사각파 전압을 정현파로 모델링하는 과정을 통해 얻을 수 있다. R_o 를 AC 등가모델로 변환하면 식(1)과 같다.

$$R_{ac} = \frac{8R_o}{\pi^2} \quad (1)$$

변압기의 L_m , L_{lk} 의 성분과 R_{ac} 을 적용한 1차측에서 2차측으로 전달되는 턴비(n_{real})는 식(2)과 같다.

$$n_{real} = \frac{2j\omega L_m L_r + (L_m + L_r) R_{ac} N^2}{L_m R_{ac} N^2} \quad (2)$$

여기서 N 은 변압기의 물리적 턴비 그리고 ω 는 스위칭 주파수의 각주파수인 $2\pi f_s$ 이다.

클램프 커패시터의 기생저항(R_{ci}), 스위치의 on저항($R_{ds(on)}$), 변압기 동손(R_w), 그리고 출력 인덕터 기생저항(R_{Lo})을 적용한 실제 듀티(D_{real})는 식(3)로 표현되고, 실제 스위치의 off시에 걸리는 전압($V_{real, Q_{off, ds}}$)은 식(4)와 같다.

$$D_{real} = \frac{(V_o + V_{fd} + R_{Lo} I_o) n_{real}}{2(V_{in} - (R_{ds(on)} + R_w + R_{Lo}) I_{o, avg})} \quad (3)$$

$$V_{real, Q_{off, ds}} = V_{in} + V_{in} \frac{D_{real}}{1 - D_{real}} \quad (4)$$

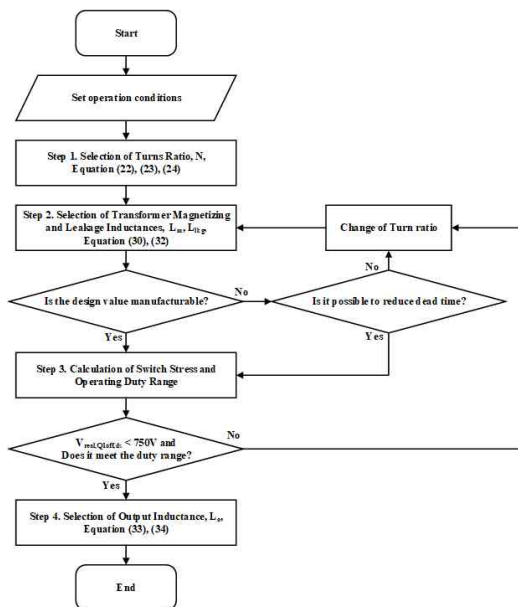


그림 2 제안하는 ACF 컨버터 설계 절차
Fig. 2 Proposed ACF Converter Design Procedure

식(3), 식(4)을 반영한 ACF 컨버터의 입출력 계인은 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$G_{real} = \frac{v_o}{V_{in}} = \frac{2D_{real}}{n_{real}} \quad (5)$$

그림 2는 식(1)-(5)을 반영한 ACF 컨버터의 설계 절차를 보여준다. 이 설계 절차는 본 논문에서 제안된 ACF 컨버터의 설계 과정을 나타낸다.

2.1.1 Step 1 : Selection of Transformer Turn Ratio

변압기의 턴비 결정은 설계 과정의 Step 1로서, 첫 번째 조건은 $V_{Q_{off, ds}}$ 에 대한 제한 조건을 설정하는 것이며, 변압기의 턴비에 따라 변화하는 $V_{Q_{off, ds}}$ 의 값을 검토하여 이를 기준으로 적절한 변압기 턴비를 선정한다. 두 번째로는 ACF 컨버터의 동작 듀티 범위를 너무 낮은 영역으로 선정하지 않게 하는 것이다.

이 단계에서는 아직 변압기의 파라미터 값이 선정되지 않았기 때문에 ideal한 수식을 사용하여 설계를 진행한다. 사용되는 수식은 다음과 같다.

$$D_{ideal} = \frac{(V_o - V_{fd})N}{2V_{in}} \quad (6)$$

$$V_{in, min}, V_{Q_{off, ds}} = V_{in, min} + V_{in, min} \frac{D_{max}(V_{in, min})}{1 - D_{max}(V_{in, min})} \quad (7)$$

$$V_{in, max}, V_{Q_{off, ds}} = V_{in, max} + V_{in, max} \frac{D_{min}(V_{in, max})}{1 - D_{min}(V_{in, max})} \quad (8)$$

2.1.2 Step 2 : Selection of Transformer Magnetizing and Leakage Inductance

Step 2에서는 ZVS 동작을 달성하기 위한 공진 파라미터, 즉 최대 L_m 과 최소 L_{lk} 를 계산한다. 스위치의 출력 커패시터(C_{oss})로 사용되는 공진 커패시터는 소자의 데이터시트를 참조하여 선정한다. ZVS를 달성하기 위한 첫 번째 조건으로는, Q_1 이 on이 될 때 L_{lk} 에 흐르는 전류($i_{L_{lk}, Q1(on)}$), 즉 Q_2 가 off가 되고 deadtime 이후 인 $i_{L_{lk}}$ 값이 음수가 되어야 한다는 점이다. 이는 $i_{L_{lk}}$ 가 음수인 상황에서 Q_1 이 아직 on이 되지 않았기 때문에, Q_1 의 내부 다이오드가 도통 상태에 있다는 것을 의미한다. 따라서, Q_1 이 on이 되는 시점에서, ZVS 동작이 발생하게 된다. 두 번째 조건은 Q_1 이 on이 되는 시점의 L_{lk} 의 에너지가 Q_1 이 off되는 시점에서 C_{oss} 에 충전된 에너지보다 커야 한다는 점이다. L_m 의 최대 값과 L_{lk} 의 최소값의 수식은 다음과 같다.

$$L_{m, max} < \frac{N(V_o - V_{fd})T_s I_{o, avg}(N - n_{real})}{2L_m n_{real}N} \quad (9)$$

$$L_{lk, min} < \frac{2C_{oss} V_{Q_{off, ds}}^2}{i_{L_{lk}, Q1(on)}^2} \quad (10)$$

2.1.3 Step 3 : Check Switch Stress and Operating Duty Range

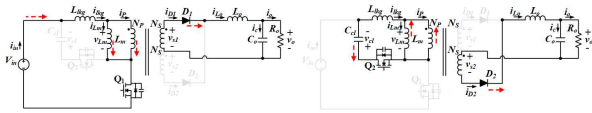
Step 3에서는 Step 2에서 결정된 L_m 과 L_{lk} 를 활용하여 Step 1에서 도출한 이상적인 변압기 턴수비에 따른 스위치의 스트레스와 듀티 동작 범위를 본 논문에서 제안하는 식(1)-(5)을 활용하여 재계산한다. 이 과정에서 $V_{real, Q_{off, ds}}$ 의 값이 750V를 초과하거나 D의 동작 범위가 너무 낮게 설정되는 경우, N 을 조정하고 다시 Step 2로 돌아가 해당 단계를 재실행한다.

2.1.4 Step 4 : Selection of Clamp Capacitance and Output Inductance

Step 4에서는 C_{cl} 과 L_o 를 설계한다. C_{cl} 은 공진 회로에 영향을 주지 않기 위해 충분히 큰 전압원으로 기능할 수 있도록, 그 커패시턴스를 최초 10배 이상으로 선정한다.

그리고 출력 필터의 경우 벡컨버터와 동일한 방법 및 동일한 수식을 통해 얻을 수 있다.

2.2 ACF 컨버터 제어기 설계



(a) Q1 On Operation (b) Q1 Off Operation

그림 3 ACF 컨버터의 전류 흐름
Fig. 3 Current Flow in ACF Converter

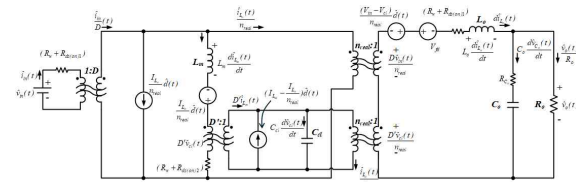


그림 4 기생성분을 포함한 ACF 컨버터 소신호 모델
Fig. 4 Small-Signal Model of the ACF Converter with Resistive Parasitics

그림 3은 ACF 컨버터의 주 스위치의 ON-OFF 시 동작을 나타낸 것이다. 이때의 동작 특성을 고려하여 다음 그림 4와 같이 소신호 모델을 구할 수 있다.

그리고 제어기는 Two-Loop 시스템을 가지며, Inner Loop에 전류 제어기, Outer Loop에 전압 제어기로 구성된다. 제어기의 전달함수는 식 (11), 식 (12)와 같다.

$$C_i(s) = \frac{8.1296 \times 10^5}{s(s + 1.128 \times 10^5)} \quad (11)$$

$$C_v(s) = \frac{12743(s + 13.79)}{s(s + 181.1)} \quad (12)$$

3. 실험

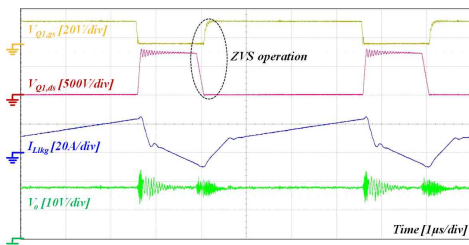


그림 5 정상 상태에서 ZVS 동작 파형
Fig. 5 ZVS operating waveform in steady state

그림 5는 최대 전력 조건에서 정상 상태일 때 Q_1 의 ZVS 동작 파형을 보여준다. Q_1 의 on 시점에서 $I_{L,kg}$ 는 음의 값을 나타내며, $V_{Q1,ds}$ 가 0V에 도달한 후 $V_{Q1,gs}$ 가 on 상태가 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 관찰은 ZVS 동작이 성공적으로 수행되었음을 시사한다. 따라서, 본 연구에서 사용된 ZVS 기법은 고효율 스위칭 동작을 위한 핵심 전략으로 간주될 수 있다.

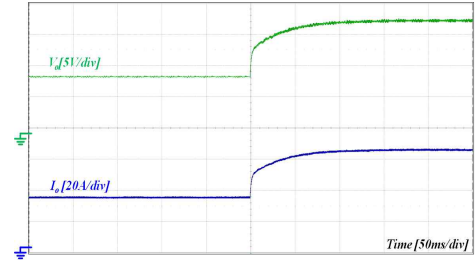


그림 6 출력 990W에서 전압 Step 가변시 응답 파형
Fig. 6 Experimental waveform with variable voltage step at output power 990W

그림 6은 전적으로 저항 부하를 사용한 실험의 결과를 보여준다. 이 실험에서는 부하 저항을 0.32Ω 에 연결하고, 전압 지령치를 9V에서 18V로 스텝 함수로 변화시켰다. 실험 결과는 오버슈트 없이 안정적인 제어가 가능함을 시사하며, 이를 통해 제안된 제어기 설계의 정확성과 신뢰성이 입증된다.

4. 결론

본 논문은 ACF 컨버터의 설계 정확도를 향상시키기 위해 부하 저항을 AC 등가 모델로 전환하고 변압기 임피던스를 반영한 새로운 설계 방식을 도입했다. 이 방식은 단순히 설계의 정확성을 높이는 것을 넘어서, 컨버터의 이용율을 향상시키고 스위치에 걸리는 전압 스트레스를 정확하게 계산하여 스위치 선정에 도움을 줄 수 있다. 기존의 듀티 비율 0.5 이하로 제한되었던 동작 범위를 넘어서, 동작 범위를 확장하여 컨버터의 성능을 최적화한다. 제안된 설계 방식의 타당성을 입증하기 위해, 전체 부하 조건에서 ZVS 동작을 확인하고, 실험 및 시뮬레이션을 통해 얻은 듀티 비율과 스위치의 전압 스트레스 값을 비교 분석하였으며, 이를 통해 설계 방식의 정확성과 신뢰성을 확인했다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018201010650A)

참고 문헌

[1] S. -S. Lee, S. -W. Choi and G. -W. Moon, "High-Efficiency Active-Clamp Forward Converter With Transient Current Build-Up (TCB) ZVS Technique," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 310-318, Feb. 2007.

[2] Bor-Ren Lin, Kevin Huang and David Wang, "Analysis, design, and implementation of an active clamp forward converter with synchronous rectifier," in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 53, no. 6, pp. 1310-1319, June 2006.