

하이브리드 차량 양방향 컨버터의 효율 분석

이국선* 최익* 최주엽** 송승호** 이상준*** 이현동*** 권태석***
 광운대학교 제어계측공학과* 광운대학교 전기공학과** 현대 MOBIS***

Accurate Efficiency analysis of a Bi-directional converter for Hybrid Electrical Vehicles

Kook-Sun Lee* Ick Choy* Ju-Yeop Choi** Seung-Ho Song**

Sang-Joon Lee*** Tae-Seok Kwon*** Hyeoun-Dong Lee***

Dept. of Information and Control Eng. Kwangwoon Univ.*

Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ.** Hyundai Mobis***

ABSTRACT

HEV(Hybrid Electrical Vehicle)의 배터리와 전동기/발전기 용 인버터 사이에 장착되는 양방향 컨버터는 boost/buck 동작을 수행함으로써 차량이 효율적으로 동작되도록 한다.

대표적인 단상(single-phase)의 Half bridge topology를 기준으로 효율을 분석 하였으며 효율 개선을 위하여 다상(multi-phase) 인터리빙, 소프트 스위칭 기술 등이 사용되고 있으나 여기서는 하드 스위칭 상태만 다룬다.

Ideal한 컨버터의 경우 단순히 Duty비와 동작 영역에 따라서 출력 상태가 결정되며 입력전력과 출력전력은 동일하다. 그러나 손실이 있는 경우 입/출력 전력은 동일하지 않게 되고, Duty 역시 변화 한다. 따라서 각 손실 파라미터를 Ideal한 Duty로 가정하고 구할 경우 오차가 발생한다. 또한, 스위칭 소자의 on/off시 발생하는 스위칭 손실은 실험 측정값과 계산값의 차이가 크기 때문에 이 역시 오차의 원인이 된다.

본 논문에서는 각 손실 파라미터와 입/출력 전력을 Duty에 대한 다항식으로 표현 하였다. 고차 다항식의 근을 수치 해석적으로 구하여 손실을 고려한 Duty비를 찾아 낼 수 있다. 스위칭 손실의 경우 데이터 시트에 주어진 손실 그래프를 테스트 영역까지 1차 근사하여 사용함으로써 정확한 효율 측정이 가능하도록 하였다.

1. 서론

화석 연료 고갈로 인하여 차량의 동력원이 기존의 내연 기관에서 전기로 대체 되고 있으며 이에 따라서 기존 동력원과 전기 에너지를 함께 사용하는 HEV(Hybrid Electrical Vehicle)의 연구가 활발히 진행 되고 있다. 그 결과 다양한 HEV 전기 동력 시스템이 개발 되었으며 배터리와 출력단(DC-link) 사이에 고승압/고효율의 양방향 컨버터를 장착하는 구조가 많이 쓰이고 있다.[1] 컨버터로 DC-link전압을 상승시킴으로써 높은 정격전압의 모터가 사용 가능해 질 뿐 아니라 손실 전력을 줄이는 이점이 있다.[2]

본 논문에서 분석 할 구조는 가장 기본적인 비절연형 단상 Half-bridge 구조이다. 스위치1이 동작할 때 DC-link에서 배터리를 buck 동작을 수행 하며 스위치2는 배터리에서 DC-link측으로 boost 동작을 수행 한다.

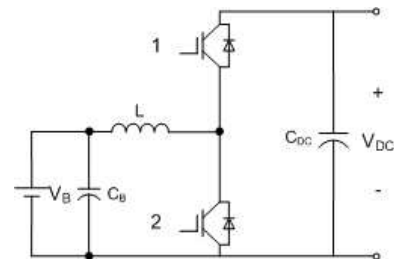


그림 1 양 방향 컨버터 구조

Fig. 1 Bi-directional converter's topology

또한, buck/boost 동작은 DCM(Discontinuous Conduction Mode)과 CCM(Continuous Conduction Mode)으로 동작 영역이 구분된다. 따라서 양방향 컨버터의 효율 분석은 총 4가지 경우에 대하여 해석이 요구 된다.

본 논문에서는 동작 영역(CCM/DCM)과 컨버터의 종류(buck/boost)에 상관없이 모두 적용 가능한 통합 손실 모델을 제시하고, 이를 이용하여 각각의 효율을 분석한다.

2. 양방향 컨버터 동작 분석

2.1. 양방향 컨버터 동작

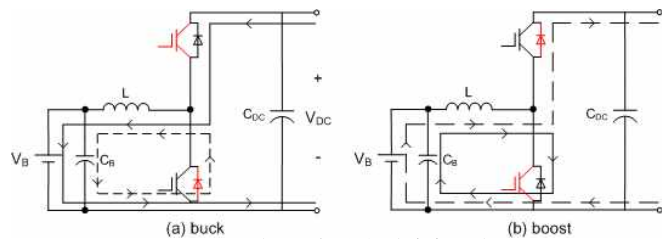


그림 2 양 방향 컨버터 동작

Fig. 2 Bi-directional converter's operation

그림2는 양방향 컨버터의 동작을 나타내고 있다. 스위치 on 시의 전류는 실선으로, off시의 전류는 점선으로 표기 하였다. (a)의 경우 V_{DC} 를 무시 할 때, buck 컨버터의 구조가 되며, (b)의 경우 C_B 를 무시 하면 boost 컨버터의 구조가 된다.

• Assumption 1

각 동작 모드에서 입력 캐패시터의 손실은 무시한다.

설명의 편의를 위해서 필요한 파라미터들을 아래와 같이 정의 하겠다.

-PARAMETERS-

- i_X : Current of X
- I_X : Average current of X
- $I_{X,rms}$: rms current of X
- V_X : Average voltage of X
- P_{XC} : Conduction loss of X
- P_{XS} : Switching loss of X
- D : Switch's Duty-ratio
- D_Z : Zero crossing Duty-ratio
- D_o : Output connected Duty-ratio

2.2. 컨버터의 전류 통합 해석

앞에서 언급한 4가지 상황에 대해서 각각의 모델을 따로 만들고 손실을 분석하는 것은 시간소모적인 일이다. 효과적인 접근법은 모든 상황에서 적용 가능한(unified approach) 수식을 구하고 이를 이용하여 각각의 손실을 구하는 것이다.

2.2.1. 인덕터 전류

인덕터 양단에 걸리는 전압과 전류 파형은 그림3과 같다.

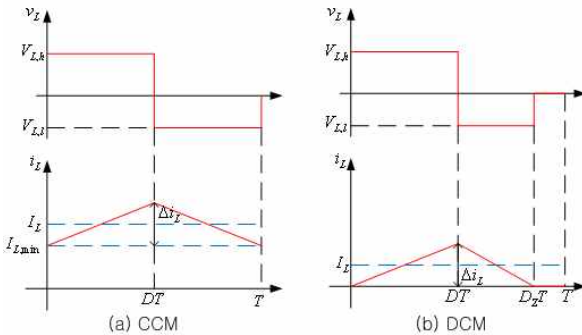


그림 3 인덕터 전류 파형

Fig. 3 Inductor current waveforms

동작 영역에 따라서 아래와 같은 수식을 구할 수 있다.

-CCM Mode-

$$I_L = \frac{I_o}{D_o}$$

$$I_L = I_{L,min} + \frac{XD}{2}$$

$$I_{L,rms}^2 = I_L^2 + \left(\frac{XD}{2\sqrt{3}}\right)^2$$

-Constant-

$$K = \frac{(V_{L,l} - V_{L,h})}{V_{L,l}}$$

-DCM Mode-

$$I_L = \frac{XD}{2} D_Z$$

$$I_{L,min} = 0$$

$$I_{L,rms}^2 = \left(\frac{XD}{\sqrt{3}}\right)^2 D_Z$$

$$D_Z = KD$$

$$X = \left(\frac{V_{L,h}}{Lf_s}\right)$$

최종적으로 인덕터의 평균 전류와 rms 전류는 CCM/DCM 영역을 모두 표현 할 수 있는 하나의 수식으로 정리 된다.

$$I_L = I_{L,min} + \frac{XD}{2} D_Z \quad I_{L,rms}^2 = \frac{I_L^2}{D_Z} + \left(\frac{XD}{2\sqrt{3}}\right)^2 D_Z$$

CCM인 경우 $D_Z=1$ 고, DCM인 경우 $I_{L,min}=0$ 이다. 경계 조건에서는 $D_Z=1$, $I_{L,min}=0$ 이므로 두 개 수식이 완벽하게 일치 한다.

• Assumption 2

실제로는 손실로 인하여 인덕터 전류는 그림3과 같이 Ideal 하지 않다. 이에 따라서 발생하는 문제는 뒤에서 언급한다.

2.2.2. 스위치 / 다이오드 전류

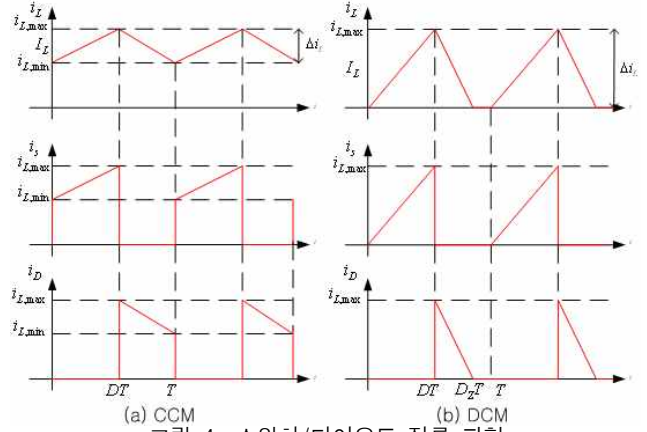


그림 4 스위치/다이오드 전류 파형

Fig. 4 Switch/Diode current waveforms

그림 4는 스위치/다이오드에 흐르는 전류와 인덕터에 흐르는 전류 그래프이다. D_Z 와 인덕터 전류를 이용하여 각 소자에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

$$I_S = \frac{D}{D_Z} I_L$$

$$I_{S,rms}^2 = \frac{D}{D_Z} I_{L,rms}^2$$

$$I_D = \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_L$$

$$I_{D,rms}^2 = \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_{L,rms}^2$$

2.2.3. 캐패시터 전류

캐패시터에 흐르는 전류는 출력 DC 전류를 제외한 교류 성분이다. 부하와 인덕터가 접속되는 구간을 D_o 로 정의 하면 캐패시터의 전류는 아래와 같다.

$$I_{C,rms}^2 = D_o I_{L,rms}^2 - I_o^2$$

• Assumption 3

출력단의 전류 리플은 충분히 작아서 무시 할 수 있다.

3. 양방향 컨버터 손실 분석

2절에서 구한 각 소자의 전류 수식을 이용하여 손실을 분석 할 수 있다.

3.1. 소자의 손실 분석

3.1.1. 인덕터의 손실

인덕터의 내부 기생 저항으로 인해서 손실이 발생한다. 따라서 인덕터의 손실은 아래와 같다.

$$P_{LC} = r_L I_{L,rms}^2$$

3.1.2. 캐패시터의 손실

캐패시터 내부 ESR로 인하여 손실이 발생한다. 인덕터와 비슷한 방법으로 캐패시터의 손실을 구할 수 있다.

$$P_{CC} = r_C I_{C,rms}^2 = r_C (D_o I_{L,rms}^2 - I_o^2)$$

3.1.3. 스위치 손실

스위치의 손실은 on/off시 발생하는 스위칭 손실과 도통 손실로 나뉜다. 도통 손실은 아래와 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$P_{SC} = V_{CE0}I_S + r_{CE}I_{S,rms}^2$$

$$= V_{CE0} \frac{D}{D_Z} I_L + r_{CE} \frac{D}{D_Z} I_{L,rms}^2$$

스위칭 손실의 경우 계산값과 실제 측정값 사이의 차이가 큰 단점이 있다. 특히 IGBT의 경우 Current tailing 현상으로 인하여 실제 손실과 오차가 발생한다. 이를 보완하는 방법으로 데이터 시트의 손실 그래프를 근사화 하여 사용할 수 있다.

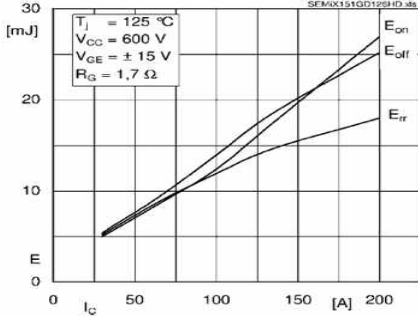


그림 5 세미크론사의 IGBT 스위칭 손실 그래프
Fig. 5 Semikron's IGBT Switching loss graph

그림5의 그래프들은 기울기 a와 y절편 E₀를 갖는 1차 함수로 근사화 가능 하고 Vcc가 600V인 상황의 측정 결과 이므로 스위칭 손실은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{SS} = f_s ((a_{on} + a_{off}) I_L + E_{on0} + E_{off0}) \frac{V_{CC}}{600}$$

• Assumption 4

스위칭 손실은 Vcc에 비례한다고 가정한다.

3.1.4. 다이오드 손실

다이오드는 Reverse recovery 현상으로 인한 스위칭 손실과 Forward voltage drop으로 인한 도통 손실이 있다. 스위치와 동일한 방법으로 아래의 손실들을 구할 수 있다.

$$P_{DC} = V_{F0}I_D + r_F I_{D,rms}^2$$

$$= V_{F0} \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_L + r_F \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_{L,rms}^2$$

$$P_{DS} = f_s (a_{rr} I_L + E_{rr0}) \frac{V_{CC}}{600}$$

3.1.5. 컨버터의 효율

컨버터의 효율을 아래와 같이 정의 하겠다.

$$\eta[\%] = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100$$

컨버터에서 발생하는 총 손실은 아래와 같다.

$$P_{loss} = P_{LC} + P_{CC} + P_{SC} + P_{SS} + P_{DC} + P_{DS}$$

따라서 입력 전력과 출력 전력의 관계를 정의 할 수 있다.

$$P_i = P_o + P_{loss}$$

상기 식은 f(D)에 대한 고차 다항식으로 볼 수 있다.

$$0 = -P_i + P_o + P_{loss} \Rightarrow 0 = f(D)$$

결론적으로 효율을 구하는 문제는 Duty에 대한 고차 다항식 f(D)에 근을 수치 해석적으로 풀어냄으로써 얻을 수 있다.

3.2. Simulation

유도한 손실 수식에 표 1의 값들을 대입하여 dc-link 전압 변동에 따른 효율 변화를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 경계 조건에서 0.04%(max)의 에러가 발생 하였다. 이는 인덕터의 전류를 Ideal하다고 가정했기 때문이다.(Assumption 2).

V_{DC} [V]	450~650	V_B [V]	250
fs[khz]	10	L[uH]	330
r_L [mOhm]	50	r_C [mOhm]	1
V_{CE0} [V]	1.2	r_{CE} [mOhm]	13.5
V_{F0} [V]	1.2	r_F [mOhm]	8
a_{on}	0.119e-3	E_{on0} [mJ]	1.304
a_{off}	0.125e-3	E_{off0} [mJ]	1.605
a_{rr}	0.0858e-3	E_{rr0} [mJ]	3.087

표 1 시뮬레이션 파라미터 테이블
Table 1 Simulation parameter table

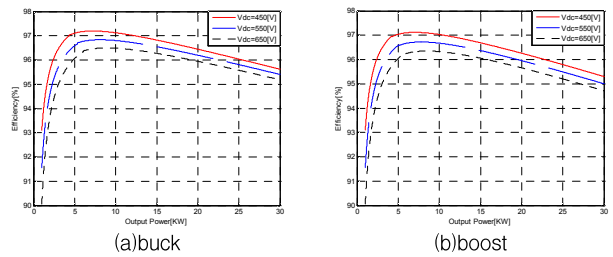


그림 6 효율 측정 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Result of efficiency simulation

4. 결론

본 연구에서는 그림 1과 같은 양방향 컨버터의 효율을 분석 하였다. 시뮬레이션 결과 dc-link 전압이 상승 할수록 컨버터의 효율은 감소 한다.(그림6)

제한한 효율 분석방식의 장점은 다음과 같다.

- 컨버터의 종류와 동작 영역에 상관없이 일괄적으로 적용 가능한 손실 수식을 사용하였다.
- 확실한 손실 성분들은 데이터 시트를 이용함으로써 보완 했다.

- 손실로 인해 변동하는 Duty-ratio가 반영되어 있다.

반면, CCM과 DCM의 경계영역에서 0.04%의 효율 오차가 발생 한다. 그러나 이는 매우 적은 수치이므로 무시할 수 있다.

또한, 본 분석 방식은 출력단 리플이 적다고 가정 하였다.(Assumption3) 이는 잘 설계된 dc-dc 컨버터가 충족해야 할 조건이므로 역시 타당 하다.

참고 문헌

- [1] T.A. Burress, et al, *Evaluation of the 2007 Toyota Camry Hybrid Synergy Drive System*, Oak Ridge National Lab. Jan. 2008.
- [2] Toyota Environmental Technology Report *Toyota Hybrid System IHS II*
- [3] T. Eichhorn, "Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations," *Power Electronics Technology*, pp.30-35, Sep. 2008.
- [4] W. Aloisi, G. Palumbo "Efficiency model of boost dc - dc PWM converters," *Int. J. Circ. Theor. Appl.* 2005; 33:419 - 432.