

변압기 영향을 포함한 고정주파수 LCL형 DC-DC 컨버터 해석

Analysis of A Fixed Frequency LCL-type DC-DC Converter Including the Effect of High-Frequency Transformer

박 상 은* · 차 한 주*
(Sangeun Park · Hanju Cha)

Abstract - An LCL-type Isolated dc-dc converter operating for constant output voltage is analyzed, including the effect of a high frequency transformer using ac complex circuit approximation. Its solution is derived and is used to obtain the characteristics of the proposed converter. The analyses show through converter modeling, phasor diagram and gain comparison that inclusion of a high frequency transformer results in introduction of magnetizing inductance and leakage inductances at conventional LCL dc-dc converter with ideal transformer. The theoretical and simulation results are presented in case of the wide variations in input voltage and load current in detail. Analysis and simulation results observed that introduction of a transformer in the dc-dc converter had considerable effect on the performance, especially in the case of low output voltage and large load.

Key Words : LCL, DC-DC converter, High frequency transformer

1. 서 론

공진형 인버터를 적용하는 파워 컨버터의 사용은 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 이러한 컨버터들은 가벼우며, 고주파수에서 운영이 가능하고, 높은 효율을 보인다. 또한, 빠른 응답을 가지고 소프트 스위칭하는 공진형 컨버터의 고주파수 스위치는 영전압 스위칭(zero voltage switching, ZVS)과 영전류 스위칭(zero current switching, ZCS)이 가능하기 때문에 전자기적 간섭(Electromagnetic Interference, EMI)을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 공진형 컨버터는 공진방식에 따라 직렬 공진형, 병렬 공진형 및 직/병렬 혼합 공진형으로 구분된다 [1]. 이러한 컨버터는 소형, 경량을 요구하는 항공, 우주분야의 전원공급장치에 적용되기 시작하여 최근에는 거의 모든 산업분야에서 적용되어지고 있다. 특히, 펄스형태의 부하, 에너지를 충전하는 충전기 및 충전, 방전을 위한 양방향성 컨버터 등에서 많이 연구되어지고 있다 [2, 5-8].

본 논문에서는 그림 1에서와 같이, LCL형태의 네트워크와 변압기를 적용한 전압형 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 DC 전압을 공급하는 전원 V_d , 공급되는 전압을 사각파형으로 출력하는 풀-브릿지 형태의 인버터, L_{rf} -C- L_{rr} 형태의 공진네트워크, 고주파수 변압기, 정류기 $D_{r1} \sim D_{r4}$ 및 출력필터 C_f 로 구성된다.

이 컨버터는 어느 특정한 주파수를 선정하여, 50%의 고정듀티비와 고정주파수에서 동작시켜 모든 부하 영역에서 요구하는 일정한 출력전압을 발생시키는 간단한 구조의 전원공급 장치이다. 또한, 별도의 추가회로 없이 간단한 제어를 통해서 인덕턴스 비에 따라 출력전압이 선형적으로 증가 또는 감소하고, 인버터의 출력전압이 출력전류보다 앞서는 특징을 나타낸다.

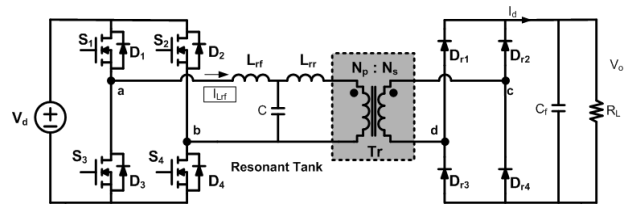


그림 1 LCL형 전압형 컨버터 회로

Fig. 1 Circuit schematic of LCL-type voltage converter

그림 1과 같은 형태로 제안된, 일정출력 전압형인 LCL형 컨버터에 대한 본 논문에서의 목적은 다음과 같다. [10]에서와 같이 수행된 분석은 컨버터를 구성하는 요소들 중 변압기를 이상적이라고 가정하였다. 이는 실제와는 차이가 존재하기 때문에, 실제와 근접한 변압기 모델 즉, 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스의 영향을 포함한 LCL형 컨버터에 대한 좀 더 상세한 분석을 수행하였다. 이러한 분석을 바탕으로 다양한 입력과 출력 부하 조건에서 이론적 분석을 검증하기 위해서 시뮬레이션을 통해 실제적인 변압기 매개변수의 영향에 대해 분석하였다.

본 논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 컨버터가 일정

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chung-nam Nat'l University, Korea
E-mail : hjcha@cnu.ac.kr

* Agency for defense development, Korea

Received : March 15, 2015; Accepted : December 24, 2015

한 출력전압을 내도록 고정주파수에서 50%의 듀티비로 제어되는 컨버터에 대한 동작원리를 간략하게 언급하고, ac 접근법을 사용하여 변압기 영향을 고려한 컨버터의 입력/출력 특성에 대해 요구되는 해를 구하여, 그 해에 근거하여 실제적인 변압기를 포함한 컨버터 특성에 대해 논의하였다. 3장에서는 실제적인 변압기에 해당하는 매개변수를 포함에 따른 제안된 컨버터에 대한 특성 및 영향들을 기술하였다. 4장에서는 변압기 매개변수인 자화인덕턴스와 누설 인덕턴스에 따른 다양한 조건에서 수행한 결과를 바탕으로 컨버터 특성을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 마지막으로 5장에서는 수행한 결과들을 요약하였다.

2. 컨버터의 동작원리와 모델링

2.1 동작원리

이 절에서는 제안된 컨버터의 동작원리를 간략히 언급한다. 그림 2는 한주기에 해당하는 동작원리를 보여준다. 그림 2에서 V_{ab} 는 풀-브리지 형태의 인버터 출력 터미널, $i_{L_{rf}}$ 는 공진성분인 L_{rf} 에 흐르는 인덕터 전류, $GS_1 \sim GS_4$ 는 인버터를 제어하는 게이트 신호를 각각 나타낸다. 이에 제안된 컨버터의 동작원리를 게이트 스위칭 신호에 따라 인버터의 출력전압과 인덕턴스에 흐르는 전류 및 도통되는 소자들을 각각 보여준다. 컨버터의 스위칭 동작은 50%의 듀티비로 상하 대칭으로 고정주파수로 동작하게 된다. $t = t_0$ 전에는 스위치 S_2, S_3 가 도통되어진 상태이다. $t = t_0$ 에서, 스위치 S_2, S_3 는 턴-오프되고, i_L 는 음(-)으로 흐르기 때문에, 다이오드 D_1, D_4 를 통해서 흐른다. $t = t_1$ 에서 게이트 펄스, 즉 인버터 제어신호가 스위치 S_1, S_4 에 인가된다. 이때 역시 i_{L1} 전류가 D_1, D_4 를 통해 흐르며, 스위치 S_1, S_4 는 영전압, 영전류에서 턴-온함을 알 수 있다. $t = t_2$ 에서 다이오드 D_1, D_4 는 영전류에서 자연스럽게 턴-오프되고, 전류 i_L 는 스위치 S_1, S_4 를 통해서 흐른다. $t = t_3$ 에서, 스위치 S_1, S_4 는 일정한 전류가 흐르는 상태에서 스위치가 오프하게 된다. 이 순간에는 모든 스위치가 오프되고, 다이오드 D_2, D_3 를 통해 전류가 양(+)으로 흐른다. $t = t_4$ 에서, 게이트 펄스가 스위치 S_2, S_3 에 인가된다. i_{L1} 는 양(+)으로 흐르기 때문에, 다이오드 D_2, D_3 를 통해서 흐르게 되며, S_2, S_3 가 영전압, 영전류에서 스위치가 켜지게 된다. $t = t_5$ 에서 다이오드 D_2, D_3 는 영전류에서 자연스럽게 턴-오프 되고, 전류 i_{L1} 은 스위치 S_2, S_3 를 통해서 흐른다. $t = t_6$ 에서, 스위치 S_2, S_3 는 일정한 전류가 흐르는 상태에서 오프하게 된다. 여기서는 컨버터 스위칭 동작에 따라 도통되는 순서는 스위치들이 도통되기 전에 바디에 존재하는 역병렬 다이오드들이 먼저 도통하는 영전압 스위칭(ZVS) 턴-온을 보여준다. 하지만, 스위치 오프의 경우에는 일정한 전류가 존재하는 상태에서 스위치가 오프하게 된다. 또한, 실제로 제어할 수 있기 위해서는 t_0 과 t_1 및 t_3 과 t_4 에는 데드타임이 존재하도록 하며, 데드타임은 영전류/영전류 스위칭과 출력전압에 영향을 미치지 않는 범위에서 설정한다.

실제적인 변압기 매개변수인 누설인덕턴스와 자화인덕턴스를 고려했을 경우에도 그림 2에서 보여지는 동일한 동작원리를 갖는다. 인버터의 출력전류 $i_{L_{rf}}$ 는 출력전압 V_{ab} 를 따르는 지상모드(lagging mode) 동작함을 알 수 있고, 실질적인 변압기가 존재할 경우에 있어서는 출력전류 $i_{L_{rf}}$ 가 역병렬 다이오드를 통해 흐르는 시간을 커짐을 알 수 있다. 즉, 인덕터 전류 $i_{L_{rf}}$ 의 방향이 바뀌는 시간 t_1 과 t_2 와 t_4 과 t_5 가 사이의 간격이 커지게 된다.

2.2 변압기를 포함한 컨버터 모델링

제안된 컨버터에 대한 해석을 수행하기 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 컨버터에 사용된 모든 스위치, 다이오드, 및 모든 성분 L_{rf} , C , L_{rr} 는 이상적이다.
- 2) 출력 캐패시터의 C 는 출력 전압 리플을 없애기 위해서 충분히 크다.
- 3) 컨버터는 정상상태에 동작한다.
- 4) 적용되는 변압기는 누설인덕턴스와 자화인덕턴스를 고려한 'T형'-등가회로를 적용한다.

이를 바탕으로 하여 변압기 영향을 고려한 컨버터 해석을 수행하였다. 이는 누설인덕턴스와 자화 인덕턴스를 지닌 변압기에 턴 수를 지닌 LCL형 dc-dc 컨버터 해석에 목적을 두었다[3].

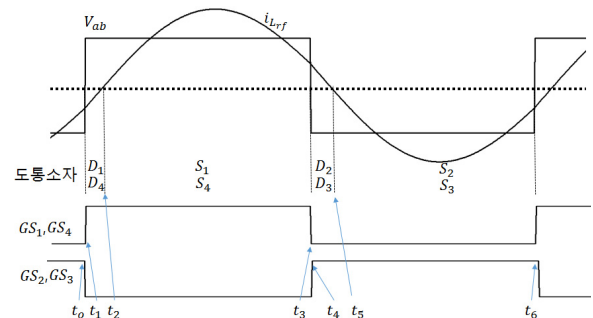


그림 2 제안된 LCL형 컨버터의 동작원리

Fig. 2 Operation principle of the proposed LCL-type dc-dc converter with transformer

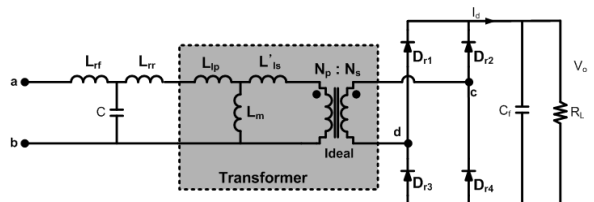


그림 3 변압기의 누설인덕턴스와 자화인덕턴스를 고려한 LCL형 dc-dc 컨버터 회로

Fig. 3 Circuit diagram of full-bridge LCL-type dc-dc converter with transformer parameters.

그림 3은 본 논문에서 해석하고자하는 변압기를 포함한 컨버터에 대한 등가회로를 보여준다. 해석에 적용된 변압기의 등가회로는 T-형 변압기를 적용하였으며, 그림 3에서 보여지는 변압기는 이상적 변압기로 1차측과 2차측 권선비에 따른 특성만을 가지게 된다.

그림 4는 인버터 출력 터미널 a, b에서 변압기의 1차측을 기준으로 하여 모델링하였다. 이 회로는 그림 3에서 보여지는 것처럼 마그네틱 코일들로 결합된 T-등가회로 내에서 이상적인 변압기를 이용하여 간략하게 표현하였으며, 그림 4(a), (b)와 같이 모델링하였다. 여기서, L_{rf} , L'_{is} , 및 L_m 은 1차측 변압기 누설 인덕턴스, 2차측 누설 인덕턴스 및 1차측에 기준한 자화 인덕턴스를 그림 4(a)와 같이 나타낸다. 또한, 변압기 1차측 누설 인덕턴스의 경우는 공진 성분 L_{rr} 과 외부적으로 그림 4(b)와 같이 결합되어진다. 일반적으로 변압기의 자화인덕턴스 L_m 은 누설 인덕턴스와 비교해서 매우 크게 설계한다. 변압기를 포함한 등가회로는 1차측 누설인덕턴스로 공진성분 L_{rr} 에 직렬로 연결되어 하나로 간략화 되어, 하나의 인덕턴스인 $L_{ra}=L_{rr}+L_{rf}$ 로 그림 4(b)와 같이 모델링된다.

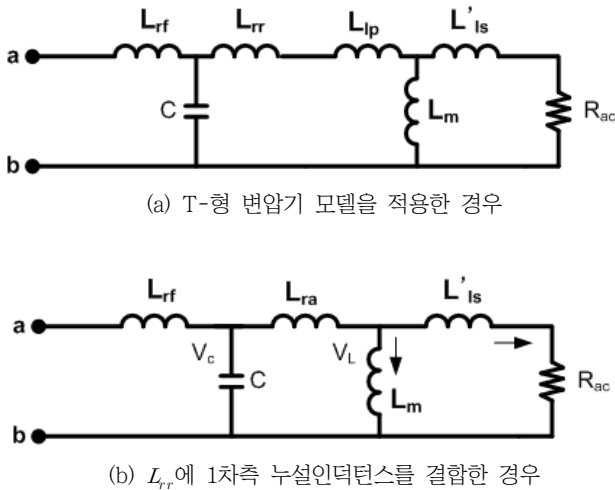


그림 4 T형 모델 변압기를 이용한 컨버터 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuits of LCL-type converter with T-transformer

2.3 변압기를 포함한 컨버터 해석

기존에 언급한 컨버터에 대한 해로 해석은 변압기 매개변수의 영향을 고려하지 않고 수행하였으며, 그 결과 식 (1)과 같은 컨버터 이득에 대한 결과가 얻어진다. 식 (1)과 같은 결과, 즉, 인버터의 입력 대 출력 전압비를 구하기 위해서는 요구되는 파라미터들이 다음과 같이 정의하여 수행하였다. 공진주파수 w_o , 정규화된 주파수 비 w_n , 부하 저항 R_L 에 따른 선택도 Q , 공진성분인 인덕턴스 비 γ , 및 부하 저항과 변압기를 포함한 부하저항 R_{ac} 를 고려하여, 다음과 같이 $w_o = 1/\sqrt{L_{rf}C}$, $w_n = w/w_o$, $Q = w_o L_{rf}/R_L$,

$\gamma = L_{rr}/L_{rf}$, $R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} n^2 R_L$, $n = N_p/N_s$ 로 각각 정의한다[3, 4]. 그 결과, 식 (1)에서 허수부분이 0, 즉 부하저항 R_L 에 관계되는 Q 값에 무관한 주파수에서의 전압 이득을 나타내는 해를 구할 수 있으며, 그 주파수에서는 인덕턴스의 비 γ 에 따라서 전압이득이 선형적으로 상승 또는 하강하는 특성을 나타낸다[5-7].

$$M = \frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{(1-w_n^2) + j\frac{\pi^2}{8} Q[(1+\gamma)w_n - \gamma w_n^3]} \quad (1)$$

2.2절에서 적용한 컨버터 모델링을 바탕으로 위에서 수행한 컨버터 ac 회로해석 방법을 동일하게 적용하였다. 해석을 위해서 정의된 값 역시, 동일하게 하여 적용하였으며, 변압기의 영향을 고려한 부분은 다음과 같이 정의하기로 한다.

그 결과, 식 (2)와 같은 해를 구할 수 있으며 이상적인 변압기를 고려한 식 (1)과 비교하였을 경우에, 분모 부분에 한 개의 실수 부분과 두 개의 허수 부분이 추가적으로 발생함을 알 수 있다.

$$M = \frac{1}{[r(1-w_n^2) + \alpha\{(1+\gamma_{eq}) - \gamma_{eq}w_n^2\} + j\frac{\pi^2}{8}\beta Q(w_n - w_n^3) + j\frac{\pi^2}{8}\alpha\beta Q\{(1+\gamma_{eq})w_n - \gamma_{eq}w_n^3\} + j\frac{\pi^2}{8}Q\{(1+\gamma_{eq})w_n - \gamma_{eq}w_n^3\}]} \quad (2)$$

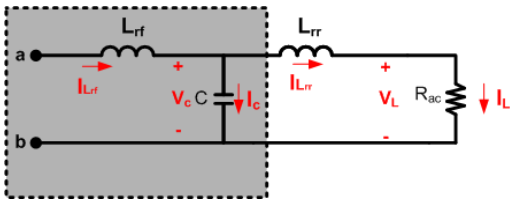
여기서, 변압기 매개변수인 자화인덕턴스와 공진성분 L_{rf} 와의 비를 $\alpha = L_{rf}/L_m$, 인덕터 L_{rf} 에 대한 변압기의 1차측에서 본 2차측 누설 인덕턴스의 비를 $\beta = L'_{is}/L_{rf}$, 및 앞에서 정의한 인덕턴스 비 $\gamma (= L_{rr}/L_{rf})$ 에 변압기의 1차측 누설인덕턴스를 포함한 인덕턴스 비를 새로이 $\gamma_{eq} = L_{ra}/L_{rf}$ 로 재 정의한다. 추가된 실수부분은 변압기의 자화 인덕턴스에 영향을 받는 항목이고, 허수부분은 변압기 공진성분과 누설 인덕턴스에 영향을 미치는 부분이다. 수식을 좀 더 간략하게 하기 위해서, $A = (1+\gamma_{eq})w_n - \gamma_{eq}w_n^3$ 정의하면 식 (3)과 같다.

$$M = \frac{1}{(1-w_n^2) + \frac{\alpha}{w_n}A + j\frac{\pi^2}{8}\beta Q(w_n - w_n^3) + j\frac{\pi^2}{8}\alpha\beta QA + j\frac{\pi^2}{8}QA} \quad (3)$$

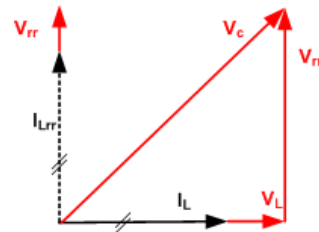
3. 컨버터 특성 분석

이 장에서는 2장에서 수행한 모델링에 바탕으로 실제적인 변압기 매개변수를 포함한 제안된 컨버터의 특성에 대하여 네 가지 측면에서 분석한 결과를 언급하였다.

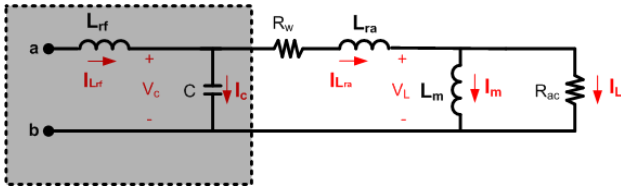
첫째로, 기존의 LCL형 컨버터에 대한 해석과 변압기를 포함한 파라미터에 대한 영향을 비교하기 위해서, 페이서 다이어그램을 통해 변압기 매개변수가 출력 값과 위상에 영향을 미치고 있음을



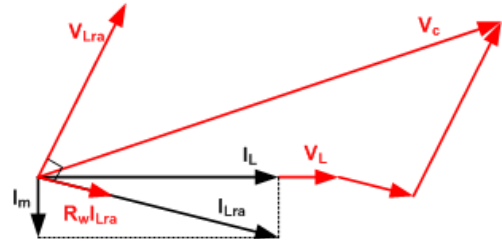
(a) 이상적인 변압기가 적용됐을 경우



(a) 이상적인 변압기



(b) 실제적인 변압기가 적용됐을 경우



(b) 실제적인 변압기

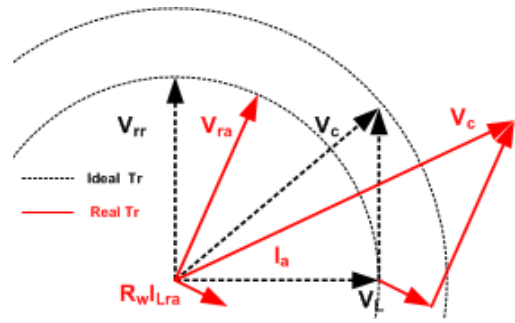
그림 5 페이서 다이어그램 해석을 위한 변압기를 고려한 컨버터 등가회로

Fig. 5 The equivalent circuit for phasor diagram including transformer

시각적으로 확인할 수 있다. 이는 2.2절에서 언급한 컨버터 모델링을 바탕으로 하여 구성하였다. 단, 해석에 사용하는 변압기의 자화인덕턴스 L_m 은 일반적으로 누설 인덕턴스와 비교해서 매우 크다고 가정하여, L_m 이 주로 영향을 미치게 된다. 여기서는 변압기 영향을 고려한 페이서 다이어그램 특성 분석을 위해서 2차측 누설인덕턴스인 L'_{ls} 는 해석상에서 무시한다.

그림 5는 페이서를 이용한 컨버터의 특성을 분석하기 위한 등가회로를 보여준다. 그림 5(a)는 변압기를 포함하지 않거나 이상적인 변압기를 고려했을 경우의 컨버터 모델링을 나타내며, 그림 5(b)는 자화인덕턴스와 누설인덕턴스를 지닌 T-형 변압기를 적용한 컨버터 등가회로를 보여준다. 그림 5(b)는 컨버터 모델은 1차측 누설 인덕턴스와 케이블에 따른 인덕턴스는 공진성분인 후방의 인덕턴스 L_r 에 포함하였다. 변압기의 자화인덕턴스에 병렬 캐패시턴스 값으로 존재하는 값은 참고문헌[9]에서 언급한 파라미터는 고주파수와 변압기의 턴 수비가 큰 경우에 있어 고려될 수 있는 매개변수에 대해서는 고려하지 않았다. 이상적인 변압기와 실제적인 변압기에 따른 컨버터 특성에 대한 비교 분석을 수행하기 위해서 캐패시터(C)에 나타나는 전압의 크기와 위상을 페이서 다이어그램을 이용하여 비교하였다.

그림 6은 그림 5의 등가회로를 통해 나타나는 컨버터의 구성 성분에 대한 전압, 전류의 크기와 방향을 페이서를 통해서 나타낸 결과이다. 그림 6(a)는 이상적인 변압기이거나 변압기가 존재하지 않을 경우에 있어서의 페이서 다이어그램이고, 그림 6(b)는 변압기 매개변수 성분인 자화인덕턴스 L_m 과 권선 저항 R_w 을 고려한 페이서 다이어그램을 보여준다. 그림 6(c)는 그림 6(a)와 (b)에서 보여지는 캐패시터의 전압과 위상을 비교한 결과이다. 이상적인 변압기를 고려한 그림 6(a)에서 캐패시터(C)에 나타나는 전압은 그림 6(a)에서 보여지는 것과 같이 V_{rr} 과 V_L 합으로 이



(c) 이상적인 변압기와 실제적인 변압기의 페이서 다이어그램 비교

그림 6 변압기의 파라미터를 고려한 전압, 전류의 페이서 다이어그램

Fig. 6 Phasor diagrams of the effect adding transformer parameters

루어지고, 여기서는 공진성분 L_r 에 흐르는 전류는 부하저항(R_{uc})에 흐르는 전류와 동일하다. 그림 6(b)에서 캐패시터 C에 나타나는 전압은 부하저항 R_{uc} 에 흐르는 전류 I_L 에 나타나는 전압과 변압기 자화인덕턴스에 흐르는 전류 I_m 에 의한 전압의 합을 나타내는 전압 V_L , 권선 저항 R_w 에 흐르는 전류에 의한 전압 및 자화인덕턴스에 흐르는 전류 I_m 에 의한 전압을 통해 캐패시터 C의 전압 V_c 의 크기와 위상을 보여준다. 그림 6(c)는 그림 6(a)와 그림 6(b)를 비교한 결과를 보여준다. 여기서는 부하에 나타나는 출력 전압 V_L 를 동일하게 한다는 조건으로 비교하였다. 실제적인 변압기가 존재하는 경우에 있어, 동일한 출력전압 V_L 을 보이기 위해서는 이상적인 변압기가 존재하는 경우보다 V_c 전압이 크게 존재해야만 가능함을 알 수 있다. 이는 입력전압 V_i 을 크게 해야

만 가능하다는 것을 의미한다. 고정주파수, 고정된 인덕턴스에서 동작하는 컨버터에서 입력전압을 높일 수 있는 없으므로, 실제적인 변압기의 매개변수에 의해서 출력전압 V_L 값이 작아지게 된다. 이는 자화인덕턴스와 권선저항이 출력전압에 영향을 미치게 된다. V_c 에 위상 역시 변압기 매개변수에 의해서 차이를 보임을 그림 6(c)을 통해서 간략하게 확인 할 수 있다.

둘째로, 위에서 페이스러 다이어그램으로 분석을 수행하는 중에 제외된 변압기의 2차측 누설 인덕턴스를 포함하여 좀 더 상세하게 수식적으로 분석을 수행하였다. 그림 7은 ac 접근법에 의해서 얻어진 해인 식 (1)과 식 (2)에 대한 컨버터의 이득에 대해서 부하변동, Q 값 변동에 의한 주파수 응답곡선을 비교 분석한 결과를 나타낸다. 점선은 이상적인 변압기에서의 전압이득 곡선이고 실선은 실제적인 변압기를 적용한 변압기 이득 곡선이다. 그림 7에서 부하변동에 따른 컨버터 이득이 다소 변동이 있음을 알 수 있으며, 부하에 관계없이 일정한 이득을 보이는 부분이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 변압기에 따른 영향으로 이상적인 변압기에서 해당하는 주파수가 실제적인 변압기를 고려함으로써 해당되는 주파수가 작아지고, 전압 이득은 다소 증가하는 방향으로 이동함을 알 수 있다. 이로써 고정주파수로 제어되는 경우에 있어 이 점을 고려하여 제어할 필요가 있다.

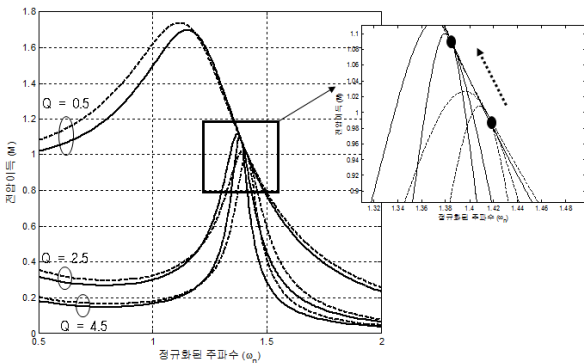


그림 7 부하변동 시 이상적 변압기와 실제적 변압기에 따른 컨버터 이득 비교

Fig. 7 Comparison of converter gain at ideal and real transformer

셋째로, 그림 7에서와 같이, 이상적인 변압기를 고려한 조건에서 얻어진 주파수와 동일한 주파수를 가지고, 실제적인 변압기에서 매개변수를 포함한 컨버터를 제어하게 되면, 부하 변동에 따라서 출력전압이 변하게 됨을 알 수 있다. 또한, 식 (1)에서 논의된 부하변동에 상관없는 조건에 해당하는 주파수 $w_n = \sqrt{\frac{1+\gamma}{r}}$ 를 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다. 이는 부하변동에 따라 이득이 작아지게 되고, 특히, 변압기의 누설 인덕턴스에 영향을 받음을 확인할 수 있다. 여기서, 인덕턴스 비 γ 가 동일할 경우에는 정규화된 주파수 $w_n = \sqrt{2}$, 이득은 1이 된다. 이에 공진 성분인 인덕터 설계, 누설 인덕턴스와 자화인덕턴스를 포함하는 변압기 설계를 포함하는 LCL형 컨버터 설계를 하는데 고려해야

할 항목이다.

$$M|_{\gamma=1} = \frac{1}{1 + j \frac{\sqrt{2}\pi^2}{8} Q\beta} \quad (4)$$

그림 8은 식 (4)를 이용하여 공진성분과 누설인덕턴스 비에 따른 컨버터의 전압이득 곡선을 보여준다. 부하가 작을 경우에 있어서 전압이득은 β 에 상관없이 변화율이 작지만, 부하가 커질수록 β 가 컨버터 이득에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히, β 가 커지고, 부하가 커질수록 전압이득 값이 영향을 많이 받아서 더욱 작아지게 된다.

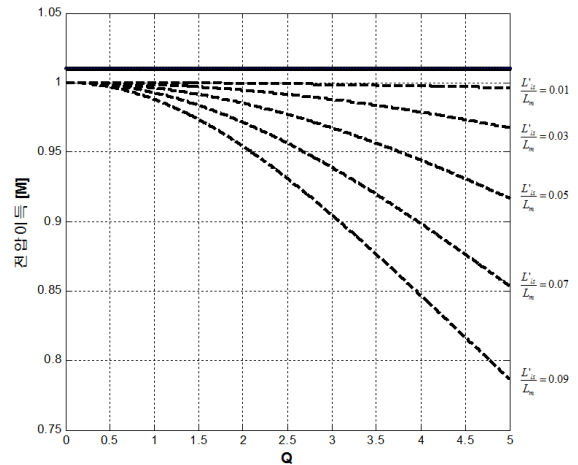


그림 8 변압기의 누설인덕턴스와 공진성분의 비(β)에 따른 컨버터 전압이득 특성 곡선

Fig. 8 Effect of transformer leakage inductance & resonant component (L_r) on the voltage gain LCL-type dc/dc converter

본 논문에서의 목적인 변압기 매개변수 영향을 고려한 해석을 바탕으로 실제적인 변압기의 자화인덕턴스 L_m 와 누설인덕턴스 L_s 를 고려했을 경우에도, 부하변동에 상관없이 일정한 출력전압을 나타내기 위해서는 식 (3)에서 분모의 허수부분이 0이 되는 주파수를 획득했을 경우에 가능하다. 식 (5)는 분모의 허수부가 0이 되는 정규화된 주파수 w_n 를 나타내며, 이와 같은 조건에서 제어함으로써 항상 일정한 출력전압을 얻을 수 있으며, 그에 해당하는 컨버터의 입력 대 출력 전압의 이득은 식 (6)과 같다. 식 (5), 식 (6)과 같이, 실제적인 변압기의 매개변수에 의해서 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8의 실선은 부하저항 변화에 관계없이 동작하는 주파수로 제어하는 경우의 이득으로 모두 부하 영역에서 입력 값 보다 다소 상승한 일정한 출력 값, 즉 식 (6)과 같은 이득을 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 2개의 인덕터에 대한 인덕턴스 비와 변압기의 매개변수인 자화인덕턴스, 누설 인덕턴스에 관련한 변수가 컨버터 이득에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

$$w_n = \sqrt{1 + \frac{1 + \alpha\beta}{\alpha\beta\gamma_{eq} + \beta + \gamma_{eq}}} \quad (5)$$

$$M = \alpha\beta\gamma_{eq} + \beta + \gamma_{eq} \quad (6)$$

또한, 변압기의 1차측 누설인덕턴스 L_p 를 공진성분 L_r 에 포함시킨 인덕턴스의 비가 $\gamma_{eq}=1$ 인 경우에는 식 (7)과 식 (8)과 같이 구해진다. 이 두 식은 통해서 2차측 누설인덕턴스가 존재하지 않을 경우, ($\beta=0$), 변압기를 포함하지 않은 경우, 즉, $w_n = \sqrt{2}$ 과 $\gamma=1$ 로 같은 값을 가짐을 알 수 있다.

$$w_n |_{\gamma_{eq}=1} = \sqrt{2 - \frac{\beta}{\alpha\beta + \beta + 1}} \quad (7)$$

$$M |_{\gamma_{eq}=1} = \frac{V_{cd}}{V_{ab}} = \alpha\beta + \beta + 1 \quad (8)$$

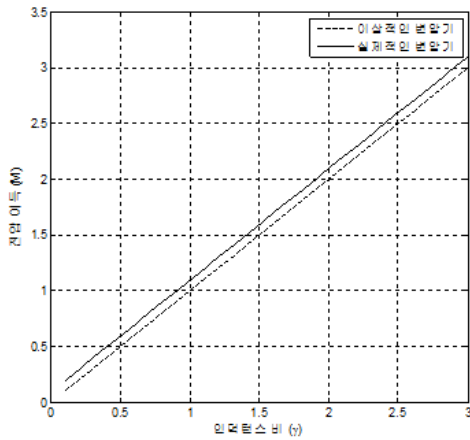


그림 9 이상적인 변압기, 실제적인 변압기에 따른 인덕턴스비 대 전압이득의 비교

Fig. 9 Comparison of inductance ratio vs. voltage gain at ideal and real transformer

마지막으로, 이상적인 변압기와 실제적인 변압기를 고려하여 부하에 무관하게 동작하는 특정지점에 대한 분석 결과이다. 그림 9는 인덕턴스 비에 따른 전압이득을 이상적인 변압기(점선)와 실제적인 변압기(실선)를 비교한 결과를 각각 보여준다. 실제적인 변압기에서 전압이득이 다소 커짐을 알 수 있다. 이는 식 (5), 식 (6)의 결과로 알 수 있다. 그림 10은 인덕턴스비와 전압이득에 대한 주파수를 이상적인 변압기(점선)와 실제적인 변압기(실선)를 비교한 결과를 각각 나타낸다. 여기서는 인덕턴스비가 큰 부분 또는 전압이득이 큰 부분에서는 변압기에 관계없이 해당 주파수가 거의 유사하지만 비가 작아질수록 주파수 부분에서 많은 차이를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 분석 결과

이 장에서는 3장에서 수행한 특성을 바탕으로, 변압기의 매개

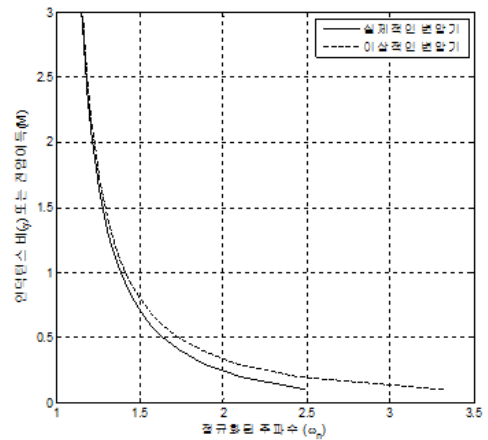


그림 10 이상적인 변압기, 실제적인 변압기에 따른 정규화된 주파수 대 전압이득/인덕턴스 비의 비교

Fig. 10 Comparison of inductance ratio/voltage gain vs. normalized frequency at ideal and real transformer

변수를 고려한 시뮬레이션을 수행한 결과를 언급하였다. 시뮬레이션은 입력 직류 전압을 30[V], 공진성분 L_r 와 변압기 누설인덕턴스 비, β 에 따른 분석내용이다. 다양한 부하 조건에서 출력 전압에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 변압기의 매개변수에 해당하는 β 를 0.03, 0.05, 0.09 와 0.13의 4가지 조건으로 하여 수행하였다.

그림 11은 변압기 매개변수를 고려한 영향을 컨버터의 출력전압에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 특히, 인덕터 L_r 에 대한 2차측 누설 인덕턴스 비의 변화에 따른 출력 전압을 나타낸다. β 가 작을수록 부하변동에 영향을 덜 받으며, β 가 커질수록 부하

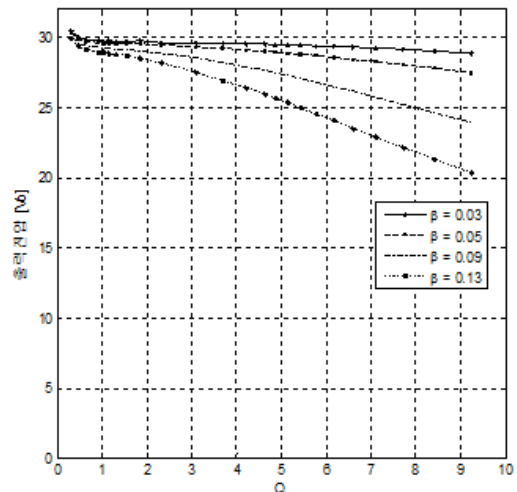


그림 11 변압기의 누설인덕턴스와 공진성분의 비에 따른 출력전압에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 11 The effect of the output voltage adding transformer leakage inductance & resonant component (L_r)

변동에 영향을 많이 받음을 보인다. 특히, 부하가 커질수록 확연하게 이득에 많은 영향을 주며, 그림 8에서 언급한 해석 결과와 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 인버터 출력 파형 V_{ab} 와 변압기의 2차측 파형 V_{cd} 는 부하에 따라 영향을 받아 크기가 작아지게 되고, 특히 부하가 커지면서 V_{cd} 의 파형이 사각파 형태에서 완만한 곡선 형태 변하게 되면서 출력 값의 크기가 작아지면서 이득이 작아지게 된다. 또한, 실제적인 변압기에 존재하는 매개변수를 고려하지 않고, 이상적인 변압기에 해당되는 스위칭 주파수로 제어하는 경우에 식 (4) 같은 인버터 출력 V_{ab} 와 변압기 2차측 전압 V_{cd} 사이에 위상 차이가 발생함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서 제안된 풀-브릿지 형태의 LCL형 공진탱크를 지닌 컨버터에서 변압기의 영향을 포함한 컨버터에 대한 해석을 ac 접근 방법을 이용하여 분석을 수행하였다. 이 컨버터는 부하변동에 상관없이 일정 출력 전압을 보이도록 고정주파수에서 듀티비 50%로 제어하는 컨버터이다. 해석을 수행하는데 있어, 기존의 이상적인 변압기를 지닌 LCL형 컨버터의 경우에는 자화 인덕턴스, 누설 인덕턴스 영향을 무시하고 수행하여, 입출력 특성은 공진탱크에 존재하는 인덕턴스의 비에 의존하여 출력전압이 나오게 됨을 확인할 수 있었다. 하지만, 실질적으로 인덕턴스의 권선저항, 변압기의 누설인덕턴스 및 자화인덕턴스, 와이어링 저항 등에 따라 출력전압의 크기라든지 인버터의 입력과 출력의 위상에 영향을 미치는 결과를 T-형 변압기를 적용하여 수학적으로 해석하고, 페이스 다이어그램을 통해 비교 분석 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이러한 실제적인 변압기의 영향은 특히, 저전압, 큰 부하를 갖는 경우에 훨씬 많은 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

References

- [1] A. K. S. Bhat, and M. M. Swamy, "Analysis and Design of a High-Frequency Parallel Resonant Converter Operating above Resonance", IEEE Applied Power Electronic Conf. Record, pp. 182-189, Feb. 1988.
- [2] Deepak. S. Gautam and Ashoka K. S.Bhat, "A Comparison of Soft-Switched DC-to-DC Converters for Electrolyzer Application", IEEE Transactions on Power Electronic, Vol. 28, No. 1, pp. 54-63, Jan. 2013.
- [3] A. K. S. Bhat, and M. M. Swamy, "Analysis and Design of a Parallel Resonant Converter Including the effect for High-Frequency Transformer", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 37, no. 4, pp. 297-306, August. 1990.
- [4] ROBERT L. STEIGERWALD "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Trans.

Power Electronics, vol. 3, no. 2, pp. 174-183, Apr. 1988.

- [5] Stanislaw Jalbrzykowski, Antoni Bogdan, and Tadeusz, "A Dual full-Bridge Resonant Class-E Bidirectional DC-DC Converter", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3879-3883, Sep.2011.
- [6] Mangesh Borge, Sunil Tiwari, and Swarna Kotaiah, "Analysis and Design of LCL-T Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 52, no. 6, pp. 1547-1554, Dec. 2005
- [7] Mangesh Borge, Sunil Tiwari, and Swarna kotaiah, "Analysis and Design of an LCL-T Resonant Converter as a Constant-Current Power Supply", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 52, no. 6, pp. 1547-1554, 2005
- [8] M. Borge, S. Tiwar, and S Kotaiah, "Constant - current, constant-voltage half-bridge resonant power supply for capacitor charging", IEE Proc.-Electr: Power Appl., vol. 153, no. 9, pp. 343-347, May. 2006
- [9] M. Borge, S. K. V. Nagesh, M. S. Bhatia, and S Sunil Tiwari, "Design of LCL-T Resonant Converter Including the effect transformer winding capacitance", IEEE Trans. on industrial electronics, vol. 56, no. 5, pp. 1420-1427, May. 2009.

저 자 소 개



박 상 은 (Sangeun Park)

1999년 충남대 전기공학과 졸업. 2001년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원



차 한 주 (Hanju Cha)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 부교수