

계통연계 Quasi-Z-Source 인버터의 평균 모델 기반 제어

강경우, 이광운
 목포해양대학교

Averaged Model Based Control of a Grid Connected Quasi-Z-Source Inverter

Kyeong-Woo Kang, Kwang-Woon Lee
 Mokpo National Maritime University

ABSTRACT

본 논문에서는 Quasi-Z-Source 인버터의 평균 모델을 이용하여 제어 시스템을 설계함으로써 기존 소신호 모델 기반 제어의 동작점이 변동하는 경우 과도 응답 특성이 저하되는 단점을 개선하고자 한다. 또한, PSIM 시뮬레이션을 통해 제시된 설계 방법의 우수성을 실증하고자 한다.

1. 서 론

Z-Source Inverter(ZSI)의 변형된 형태인 Quasi-Z-Source Inverter(QZSI)는 ZSI와 비슷한 특성을 가지면서 입력 전원과 인버터측이 공통접지이고, 입력전류가 연속인 장점이 있다. 전력변환 시스템의 제어를 위해서는 모델링 과정을 거치게 되는데, 일반적으로 특정 동작 점에서만 유효한 소신호 (small-signal) 모델로부터 전달함수를 구하고, 원하는 위상 여유 및 이득 여유를 만족하는 제어기를 설계하는 방식이 사용되고 있다. 따라서 계통 연계 인버터 시스템에서 기존의 소신호 모델 기반 제어 기법을 사용하는 경우 동작점 변동에 따라서 제어기의 과도 응답 성능이 저하되는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 소신호 모델 기반 전력 변환 시스템의 제어기 설계 기법의 단점을 해결할 수 있는 제어기 설계 방법에 대해서 연구하고자 한다.

2. QZSI 동작원리

QZSI의 동작모드는 활성 상태와 암단락 상태로 구성된다. 이 절에서는 각 동작모드별 등가회로를 해석하고 정상적인 상태에서의 입력전압과 두 커패시터에 대한 식을 유도한다.

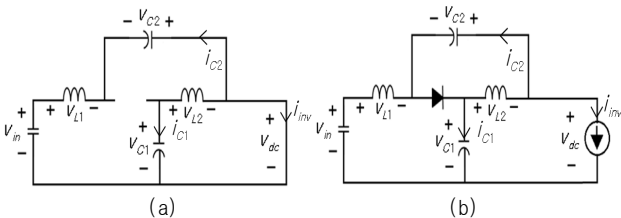


그림 1 QZSI 등가회로 (a) 암단락 상태, (b) 활성 상태
 Fig. 1 Equivalent circuit of the QZSI (a) shoot-through state, (b) non shoot-through state

그림 1(a)는 암단락 상태에서의 QZSI 등가회로이다. 인덕터 전압은 식 (1), (2)과 같이 나타낼 수 있으며, 인덕터 L1과 L2는 커패시터 C1과 C2에 의해 각각 충전되므로 전류는 식 (3), (4)과 같이 표현된다.

$$v_{L1} = v_{C2} + v_{in} \quad (1)$$

$$v_{L2} = v_{C1} \quad (2)$$

$$i_{L1} = -i_{C1} \quad (3)$$

$$i_{L2} = -i_{C2} \quad (4)$$

그림 1(b)는 활성 상태에서의 등가회로이며, 인덕터 전압과 전류는 각각 식 (5), (6)과 식 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다. 암 단락 상태와 반대로 임피던스 네트워크의 인덕터 L1과 L2가 각각 커패시터 C2와 C2를 충전시킨다.

$$v_{L1} = v_{in} - v_{C1} \quad (5)$$

$$v_{L2} = v_{C1} - v_{dc} = -v_{C2} \quad (6)$$

$$i_{L1} = i_{C2} - i_{inv} \quad (7)$$

$$i_{L2} = i_{C1} - i_{inv} \quad (8)$$

정상상태에서 한 주기의 스위칭 시간 (T_s)동안 인덕터에 인가되는 평균전압은 0이 되어야 한다. T_{sh} 와 T_{nsh} 는 각각 ST와 NST상태의 시간 폭을 의미한다고 하면, 각 모드 동작 시 기본 조건으로부터 인덕터 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{L1} = \frac{(v_{L1} + v_{C2})T_{sh} + (v_{in} - v_{C1})T_{nsh}}{T_s} = 0 \quad (9)$$

$$v_{L2} = \frac{v_{C1}T_{sh} - v_{C2}T_{nsh}}{T_s} = 0 \quad (10)$$

암 단락비(T_{sh}/T_s)를 시비율(D_{sh})로 나타내고 식 (9)를 정리하면 직류단 전압과 커패시터 전압의 관계식 (11)과 커패시터 사이의 관계식 (12)이 유도된다.

$$v_{C1} = (1 - D_{sh})v_{dc} \quad (11)$$

$$v_{C2} = \frac{D_{sh}}{1 - D_{sh}}v_{C1} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)을 정리하여 식 (10)에 대입하면 입력 전압과 두 커패시터 전압과의 관계식 (13)과 (14)이 유도된다.

$$v_{C1} = \frac{1 - D_{sh}}{1 - 2D_{sh}} v_{in} \quad (13)$$

$$v_{C2} = \frac{D_{sh}}{1 - 2D_{sh}} v_{in} \quad (14)$$

3. 평균모델 기반 QZSI 제어 방식

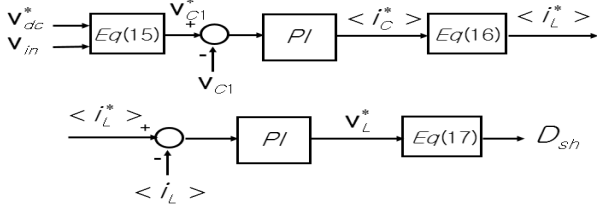


그림 2 QZSI 제어 블록 선도

Fig. 2 Overall block diagram for control of QZSI

QZSI의 커패시터 전압제어 시스템의 전체 구성은 그림 2와 같다. QZSI에서는 유효전압 출력 구간에서 dc-link 전압은 $2v_{C1} - v_{in}$ 이 되기 때문에 dc-link 전압지령은 Z-네트워크 커패시터 전압지령(v_{C1}^*)으로 변환되며, 식 (15)은 다음과 같다.

$$v_{C1}^* = \frac{(v_{dc}^* + v_{in})}{2} \quad (15)$$

전압제어기에서 커패시터 전류지령(i_C^*)을 출력하면, 커패시터 평균전류 모델을 이용하여 이 값을 인덕터 전류지령(i_L^*)으로 변환한다. 평균전류 모델식은 다음과 같다.

$$\bar{i}_L^* = \frac{(2v_{C1} - v_{in})}{v_{in}} (\bar{i}_C^* + \bar{i}_{inv}) \quad (16)$$

식 (9)에서 인덕터 평균전압(v_L)이 지령(v_L^*)과 동일하다고 하면, 전류제어기의 출력인 인덕터 평균전압 지령(v_L^*)으로부터 ST 시비율(D_{sh})을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{sh} = \frac{v_L^* - v_{in} + v_{C1}}{2v_{C1} - v_{in}} \quad (17)$$

전류제어기에서는 인덕터 평균전압 지령(v_L^*)을 출력하며, 식 (17)를 이용하여 ST 시비율(D_{sh})을 구한다.

그림 2에서 전압 제어기의 비례 및 적분 이득들은 식 (18)과 같이 구할 수 있고, 전류 제어기의 비례 및 적분 이득을 식 (19)과 같이 설정함으로써 Z-네트워크 인덕터의 전류 응답이 원하는 대역폭을 갖는다.

$$k_{pv} = 2C\omega_n, k_{iv} = C\omega_n^2 \quad (18)$$

$$k_{pc} = L\omega_{cc}, k_{ic} = R\omega_{cc} \quad (19)$$

본 논문에서의 QZSI 전압 제어 방식에서는 커패시터의 평균 전류 및 인덕터의 평균전압을 이용하여 모든 동작 점에서 원하는 제어 특성을 갖도록 할 수 있다.

4. 시뮬레이션

표 1 QZSI 파라미터
Table 1 QZSI parameters

Input voltage	170 [V]
Z-network inductance	10 [mH]
ESR of Z-network inductance	0.1 [Ω]
Z-network capacitance	470 [μ F]
Load resistance	0.1 [Ω]
Load inductance	10 [mH]

전압 제어 방식의 효과를 파악할 목적으로 표 1의 조건을 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. QZSI의 PWM 주파수는 10kHz로 설정하였고, 전류 제어기의 대역폭은 3,000 [rad/s]로 설정하였으며, 전류 제어기의 이득은 식 (19), 전압 제어기 이득은 식 (18)로부터 ($\zeta=1, \omega_n=200$)으로 설정하였다. 그림 3는 Z-네트워크 인덕터의 전류 지령을 1[A]에서 2[A]로 계단 형태 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과이다.

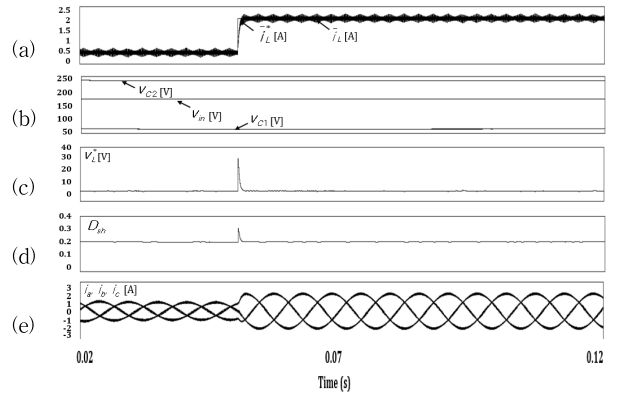


그림 3 시뮬레이션 결과 파형 (a) 전류응답, (b) 입력전압과 커패시터 전압, (c) 인덕터 평균 전압지령, (d) 시비율, (e) 부하전류

Fig. 3 Simulation results (a) Current response, (b) DC source and capacitor voltages (c) Inductor average voltage command, (d) PWM duty ratio (e) Load currents

5. 결론

본 논문에서는 Z-네트워크 커패시터의 평균전류 모델에 기반한 전압 제어기와 Z-네트워크 인덕터의 평균전압 모델에 기반한 전류 제어기로 구성되는 QZSI 커패시터 전압제어 방식에 대해 연구하였고, PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.
(2015H1C1A1035813)

참고 문헌

- [1] 이광운, "평균 모델을 이용한 Z-소스 인버터의 제어", 전력전자학회 논문지, 2014
- [2] 박종형, "QZSI를 이용한 계통연계형 태양광발전 시스템", 경북대학교 공학박사학위논문, 2013