

基于准Z源的单相并网逆变器设计

王明彦¹, 黄兔², 王乐三³

^{1,2} 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院

³ 海信(山东)空调有限公司

摘要: 本文针对常见单相逆变器结构复杂的问题, 基于准Z源拓扑来设计单相逆变器, 设计方案满足结构简单、高升压比、逆变电流控制的要求。阐述了所选择的电路拓扑及其工作原理, 对逆变控制策略进行了研究, 在计及纹波系数的条件下获得了系统关键元件参数的设计准则。理论分析与仿真模型结果显示, 本文针对准Z源逆变器的设计合理且控制策略有效。

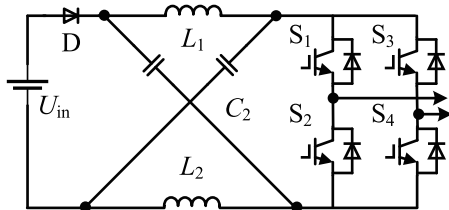
关键词: Z源变换器, 准Z源拓扑, 单相并网逆变器

1 引言

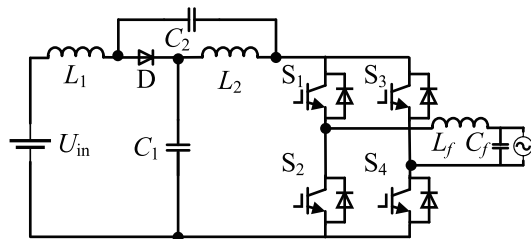
通常应用于单相并网逆变器的常见电能变换拓扑结构有以下两种: 电压源型和电流源型^[1], 这两种结构的器件开关均需要预留一定的死区时间来防止直通, 导致输出电压和电流的谐波含量增大。此外, 针对不同的输入电压形式, 有多种常见的高升压结构, 例如以 boost 为基础的变换拓扑、高频升压变压器、电子变压器等。这些大多数结构复杂, 增加系统体积和成本, 产生电磁干扰, 降低系统效率。

Z源逆变器^[2]是一种单级的拓扑结构, 其高升压比的功能是通过控制同一桥臂上2个开关器件都导通来达到的。这样的直通特点, 既能提高电压转换能力, 还能避免由错误开关动作导致的桥臂器件损坏。准Z源拓扑不只包含Z源拓扑的特点, 还能保持输入电流连续以及 C_2 所承受电压应力较低的特点, 在SPWM控制方式^[3]下合理设计关键元件参数可以减小纹波^[4]。将准Z源拓扑应用于逆变器设计, 充分利用直通特点, 能改善逆变器设计中系统结构复杂、开关器件多、需要利用变压器升压的不足。

2 准Z源拓扑及其工作原理



(a) Z源逆变器



(b) 准Z源逆变器

图1 Z源与准Z源逆变器拓扑

结合准Z源拓扑的单相逆变器电路图如图1(b)所示, 该逆变器由准Z源拓扑与单相H桥结构组成, 二者相结合完成高升压比的功能。将前级准Z源升压与后级单相全桥逆变部分整合, 即直通升压与全桥逆变使用同一组开关器件, 输入电压经过准Z源拓扑升压后进行逆变。

直通状态阶段需要选择合适的逆变调制方式, 使得逆变输出电压存在0V的时段, 使同一桥臂上的2个开关管均处于导通状态, 在此期间二极管截止, 准Z源网络中的电感通过直通回路进行预充电, 电容与直流电源输出能量, 准备在非直通状态进行升压。在非直通阶段, 二极管正向导通, 准Z源电容存储能量, 输入电压与准Z源电感同时为逆变电路的升压提供能量。

若逆变的开关周期时间为 T , 则直通状态时长表示为 T_s , 非直通状态时长为 T_{ns} , 则开关器件动作的周期 $T=T_s+T_{ns}$, 直通占空比 $D_s=T_s/T$ 。根据伏秒平衡特性, 可得

$$\begin{cases} \overline{v_{L_1}} = [T_s(V_{in} + v_{C_2}) + T_{ns}(V_{in} - v_{C_1})] / T = 0 \\ \overline{v_{L_2}} = [T_s v_{C_1} + T_{ns}(-v_{C_2})] / T = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

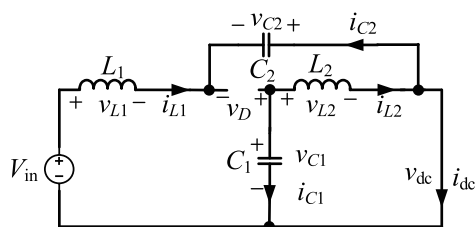
因此可获得以下表达式, 其中 \hat{v}_{dc} 为升压后的直流电压最大值, B 为准 Z 源拓扑的升压比。

$$V_{C_1} = (1-D)V_{in} / (1-2D), \quad V_{C_2} = DV_{in} / (1-2D) \quad (2-2)$$

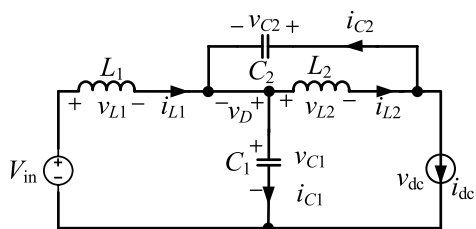
$$\hat{v}_{dc} = V_{C_1} + V_{C_2} = V_{in} / (1-2D) = BV_{in} \quad (2-3)$$

所以, 当采用 SPWM 调制方式时, 能够推导出逆变输出电压基波幅值的表达式, 其中 m 为调制比, 满足 $m + D < 1$ 。

$$\hat{v}_g = mv_{dc} = m(1-D)v_{dc} = m(1-D)BV_{in} \quad (2-4)$$



(a) 直通状态



(b) 非直通状态

图 2 准 Z 源单元的等效电路

3 逆变控制策略

由原理的分析可知升压后的直流电压为方波, 这不利于电路的检测和控制。由准 Z 源电路的数学描述可知, 电容电压 V_{C_1} 与直流母线电压存在一定的关系, 可以通过控制电容电压 V_{C_1} 间接控制直流母线电压。当输出功率恒定且输入功率增加时, 电容器电压上升以吸收能量, 并且并网电流幅度增加以平衡输入和输出功率, 进而释放电容存储的能量; 相反, 则电容电压减小, 并网电流幅值降低。

将 SPWM 单极性调制技术与直通技术结合, 将调制比 m 与直通占空比 D 进行合理的时间分配, 巧妙地将两者

整合于控制策略中, 直通的驱动信号只在逆变侧输出 0V 电压状态时才起作用。当准 Z 源逆变器工作在非直通状态下, 可以通过控制调制比 m 来控制并网电流, 进而保持电容电压 V_{C_1} 的稳定, 可以通过电流闭环反馈来实现, 该反馈控制逆变电流的大小, 完成功率调节的目标。

4 关键元件参数设计

(1) 电容参数。电容值越大对应的电压稳定性越强, 要适当增大电容值提高输出电压的质量, 减小直流侧电压传递到逆变桥臂的电压波动。设最大电压纹波为 ε_{\max} , 因此可以求出电感的表达式为

$$C \geq C_{\lim} = D_s T_s (1-2D_s) \hat{v}_g \hat{i}_g \cos \varphi / [4(1-D_s) \varepsilon_{\max} V_{in}^2] \quad (4-1)$$

(2) 电感参数。电感参数的设计需要考虑纹波的抑制, ε_{\max} 为电流最大允许纹波, 由纹波分析的结果可以获得脉动限制的电感表达式。

$$L \geq L_{\lim} = (1-D_s) V_{in} D_s T_s / [2(1-2D_s) i_L \delta_{\max}] \quad (4-2)$$

电感参数的设计还要保证输入电流的连续, 因此要求在直通状态过程中电感所存储的能量足够多, 这样才能在非直通状态时向电容与负载提供足够的能量。因此设计的电感量要足够大。 \hat{v}_g 为交流输出电压峰值, 则电感电流的平均值和电流纹波满足

$$I_L = \hat{v}_g \hat{i}_g \cos \varphi / (2V_{in}), \quad \Delta i_L = V_C D_s T_s / (2L) \quad (4-3)$$

一般来说, 直流输入侧电流不改变方向, 因此临界电感值

$$L_k \geq V_{in} V_C D_s T_s / [2(\hat{v}_g \cos \varphi - V_{in}) \hat{i}_g] \quad (4-4)$$

阻抗网络中电容和电感在不同状态下的联接方式不同, 两种状态下均有产生谐振的可能性, 为避免谐振产生后对系统造成的不良影响, 则该阻抗拓扑的谐振频率 f_x 要远小于逆变载波频率 f_c , 即

$$f_x = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) < f_c \quad (4-5)$$

(3) LC 滤波器参数。逆变器输出侧的滤波电感电容作为关键元件, 其取值的合适与否直接影响电路的工作性能^[5]。在一个开关周期中, 直通时间 T_s 内逆变侧输出电压为零, 非直通时间 T_{ns} 内逆变输出电压 v_o 和滤波后输出 v_g 都起作用, 设并网电流纹波最大允许量是 Δi_{\max} , 则滤波电感应满足

$$L_f \geq v_g T_s / \Delta i_{\max} = (v_o - v_g) v_g T_s / (\Delta i_{\max} v_o) \quad (4-6)$$

为了获得高质量的交流电压波形, LC 滤波电路的截止频率 f_{LC} 一般为开关频率的 1/10-1/5 且高于基波频率的 10 倍。

$$f_c / 10 < f_{LC} = \sqrt{1/LC} / 2\pi < f_c / 5 \quad (4-7)$$

5 验证

表 1 系统参数和电路元件参数

参数	值	参数	值
电源电压 /V	60	准 Z 源电容 /mF	4
输入电流 /A	20	准 Z 源电感 /mH	1
逆变输出电压 (V/Hz)	220/50	滤波电容 /uF	20
输出功率因数	>0.95	滤波电感 /mH	1

依据上述参数及控制策略, 将准 Z 源逆变器的模型在 Matlab\Simulink 里搭建, 其电容电压波形和输出电压 / 电流波形如图 4 所示, 给定电容电压参考值为 530V, 可以看出由电容电压间接表示的直流侧电压也能较快进入稳态。逆变器输入电压为 60V, 经过准 Z 源拓扑升压和 H 桥逆变后能够输出有效值为 220V 的交流电压。并网电流与电压同相位且正弦度较好, 谐波含量满足要求, 系统能够较好完成逆变。

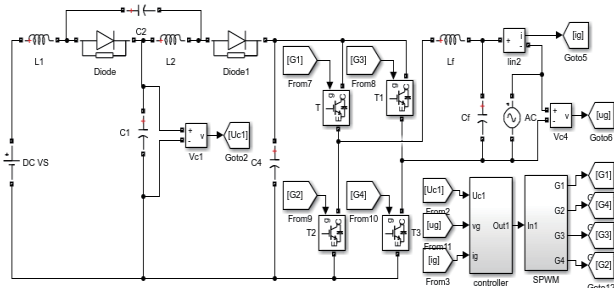
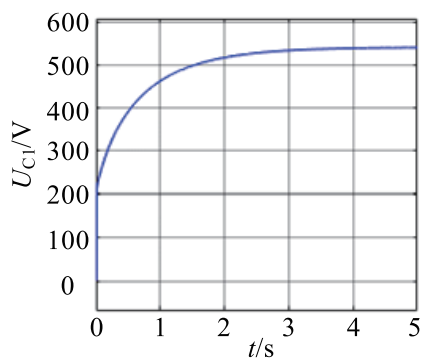
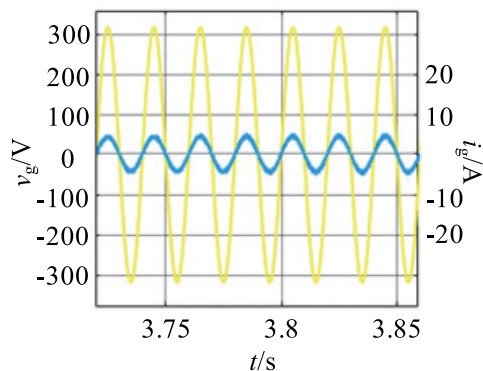


图 3 逆变器主电路与控制策略 Simulink 模型



(a) 准 Z 源电容电压波形



(b) 逆变器并网电流 / 电压波形

图 4 逆变器工作波形

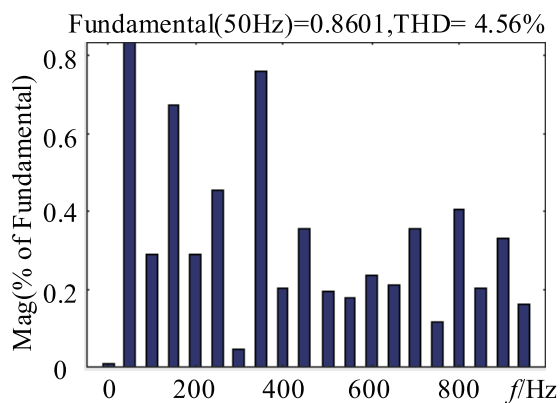


图 5 并网电流谐波总畸变率 (THD)

6 结论

(1) 将准 Z 源结构应用于逆变器的设计, 与 H 桥拓扑相结合, 具备升压比高、结构简单的优点, 采用了准 Z 源电容电压和逆变并网电流双闭环的控制策略。

(2) 计及电感电流、电容电压纹波参数, 并给出了对应的关键电路参数的设计准则, 其中电感的设计考虑了纹波抑制和电流连续两个方面。

(3) 验证了将准 Z 源拓扑应用于逆变器结构这一方案的正确性, 并且说明了所提出的逆变控制策略的可行性与正确性。