

一种新颖的 Z 源逆变器直流链峰值电压控制策略

李林林 汤雨 谢少军 魏居魁

(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室,南京航空航天大学,南京,210016)

摘要:提出了一种适合于 Z 源逆变器的直流链峰值电压直接检测与控制方法。Z 源逆变器中逆变桥等效输入电压为其直流链峰值电压,控制直流链峰值电压恒定有利于减小功率器件的电压应力,同时给逆变级提供一个相对稳定的工作状态以及简化逆变侧的设计。在分析 Z 源逆变器直流链电压特性的基础上,给出了直流链峰值电压的直接检测方法,具有实现方案简单、成本低,不存在现有直流链峰值检测方法中的延时以及算法复杂等缺点。通过对检测得到的直流链峰值电压进行控制,在不同的输入电压与负载条件下都能实现直流链峰值电压的恒定。交流输出电压采用了峰值电压控制策略,通过采样输出电压,能实时计算得到输出电压峰值,通过控制峰值电压的恒定能够实现输出电压的稳定。基于所提出的直流链峰值电压与输出电压峰值控制策略,能够同时实现直流链峰值电压和输出电压的稳定,稳态与动态性能良好。实验结果证实了该控制策略的有效性。

关键词:Z 源逆变器;直流链峰值电压;控制策略

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)01-0072-06

New Peak DC-Link Voltage Control Strategy of Z-Source Inverters

Li Linlin, Tang Yu, Xie Shaojun, Wei Jukui

(Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A new direct peak DC-link voltage control strategy of Z-source inverter (ZSI) is proposed. For ZSI, the peak DC-link voltage is the actual voltage fed to the inversion stage. Controlling the peak DC-link voltage at the constant level can effectively decrease the voltage stress and simplify the design process of the inversion stage. A direct peak DC-link voltage detection method is developed with a simple sampling circuit, and then controlled directly. Therefore, the constant peak DC-link voltage can be achieved in different input and load conditions. The peak AC output is calculated in real-time by sampling the AC phase voltage, and it is controlled to the desired value without steady-state error. With the proposed direct peak DC-link voltage control and the peak AC output control, both the peak DC-link voltage and AC output are controlled to a desired level under different input and load conditions. Experimental results demonstrate the feasibility of the proposed control strategy.

Key words: Z-source inverter; peak DC-link voltage; control strategy

电压源逆变器的输出电压低于直流母线电压,为了实现升压的功能,需要在前级加入升压变换器,并且需要两套独立的控制系统实现前后级的独立控制,系统整体结构复杂。Z 源逆变器(Z-source inverter, ZSI)利用桥臂的直通状态来实现升压,能够

在单级功率变换中实现传统两级式变换器的功能,系统结构与控制得到简化。由于直通状态成为其正常工作状态,其桥臂上下管的开关信号之间不需要加入死区时间,因此输出电压畸变小、可靠性高^[1-5]。

Z 源逆变器利用桥臂直通进行升压,桥臂直通

基金项目:国家自然科学基金(51307083)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20130795)资助项目;江苏省高校优秀科技创新团队资助项目。

收稿日期:2013-10-18; **修订日期:**2013-12-26

通信作者:汤雨,男,博士,副教授, E-mail: tangyu@nuaa.edu.cn.

时,直流链电压为零,非直通时,Z 源网络的电感和输入电压源串联供电,其直流链电压是变化的,传统的适用于两级式逆变器的控制方法不能直接运用于 Z 源逆变器。因此,Z 源逆变器的控制策略成为 Z 源逆变器研究的一个重要方向。目前,已有多种控制方案得到研究^[6-10]。

Z 源逆变器控制的关键问题是其直流链电压的控制方法,而其交流侧的控制与电压源逆变器类似。因此,对 Z 源逆变器控制策略的研究集中于如何对其直流链电压进行控制。现有的 Z 源逆变器直流链电压控制方式可分为以下两类,即 Z 源电容电压(Z-source capacitor voltage, ZCV)控制^[6]以及直流链峰值电压(Peak DC-link voltage, PDV)控制^[7-8]。在 Z 源电容电压控制方式中,电容电压作为被控对象控制在一恒定值,此时逆变侧等效输入电压即直流链峰值电压在不同输入条件下是变化的,这会增大开关管的电压应力并且增加交流侧控制器设计的复杂性。而直流链峰值电压控制具有明显的优点,它能有效减小开关管的电压应力,同时逆变侧工作在一个相对稳定的状态,从而能简化交流侧控制器的设计。Z 源逆变器中直流链电压为一高频脉冲波形;在非直通状态时直流链电压达到其峰值,而在直通状态时直流链电压为零。这种脉冲状的电压波形增加了峰值电压检测的难度。文献[7]提出了一种基于阻容网络的峰值电压检测电路,并基于此检测电路设计了相应的控制器。该检测电路对阻容元件参数的设计比较敏感,并且引入的采样电路环节会增加系统模型的复杂性。文献[8]提出了一种直流链峰值电压间接控制方案,通过采样 Z 源电容电压并与直通占空比进行除法运算,间接计算得到了直流链峰值电压,从而对其进行控制,但其计算方程是基于稳态关系下得到的,动态条件下并不一定满足,并且存在一定的计算延时,动态性能还有待提高。

本文首先分析了 Z 源逆变器中直流链电压的特性,在此基础上提出了一种适合于 Z 源逆变器的直流链峰值电压直接检测与控制方法,交流侧控制采用了输出电压峰值控制策略。设计了一台串联型 Z 源逆变器原理样机,对控制策略进行了验证。

1 Z 源逆变器直流链电压特性分析

传统 Z 源逆变器拓扑如图 1 所示,逆变器桥臂与 Z 源网络并联。稳态时,变换器有两种工作状态,即直通状态与非直通状态。当处于直通状态时,Z 源电感充电,电容放电,电源与负载之间无能量交换;当处于非直通状态时,电感放电,电容充电,电源向负载提供能量。直通状态时,直流链电

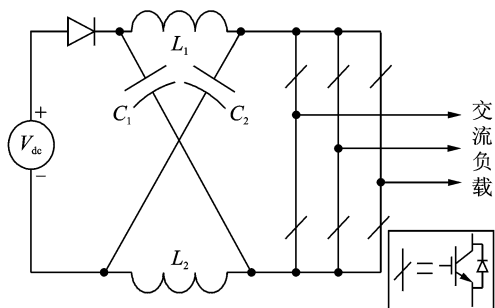


图 1 传统 Z 源逆变器

Fig. 1 Traditional Z-source inverter

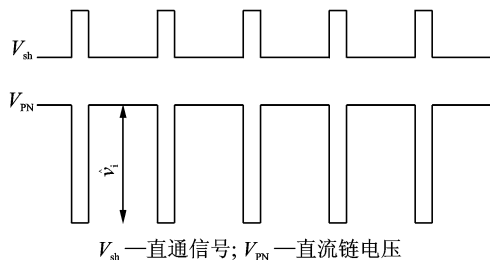
压(逆变桥臂直流母线电压)为零,非直通状态时,直流链电压达到其峰值。图 2 为直通信号与直流链电压波形。

在传统 Z 源逆变器基础上,有学者提出了串联型 Z 源逆变器。通过改变输入电压源、Z 源网络和逆变桥臂之间在拓扑中的位置,串联型 Z 源逆变器其减小了 Z 源网络电容电压应力,输入电压源与逆变器共地,解决了传统 Z 源逆变器开机启动冲击大的缺点,因而比传统 Z 源逆变器更具有优越性。适合于传统 Z 源逆变器的调制策略同样可应用于串联型 Z 源逆变器。

图 3 为串联型 Z 源逆变器拓扑(Series Z-source inverter, SZSI),其 Z 源网络与电源以及逆变桥臂相串联。串联型 Z 源逆变器中,直流链电压特性同样可用图 2 来描述,其直流链峰值电压为

$$\hat{v}_i = 2V_C + V_{dc} = \frac{1}{1 - 2D_0} V_{dc} \quad (1)$$

式中: V_C 为 Z 源电容电压; D_0 为直通占空比。



V_{sh} —直通信号; V_{PN} —直流链电压

图 2 直通信号和直流链电压

Fig. 2 Shoot-through signal and DC-link voltage

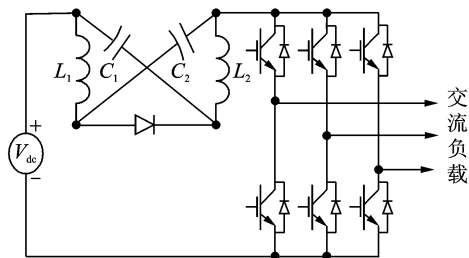


图 3 串联型 Z 源逆变器

Fig. 3 Series Z-source inverter

2 直流链峰值电压采样电路

本文提出了一种 Z 源逆变器的直流链峰值电压直接采样电路。以串联型 Z 源逆变器为例进行分析,图 4 给出了其峰值电压采样电路。采样电路由采样电阻 R_1 , R_2 , R_3 以及电压传感器 LEM 组成。 V_{BA} 由 LEM 采样得到,LEM 的原边与采样电阻 R_3 串联,其原边等效电阻远小于 R_3 ,可以将其忽略。为了简化分析,图 5 给出了采样电路的等效电路。

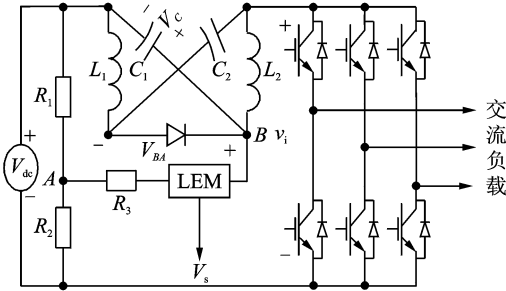


图 4 串联型 Z 源逆变器的直流链峰值电压采样电路
Fig. 4 Direct PDV sampling circuit of series ZSI

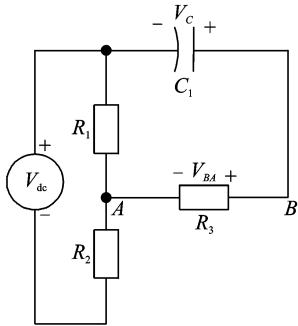


图 5 串联型 Z 源逆变器的采样等效电路
Fig. 5 Simplified sampling circuit of series ZSI

根据节点 A 的 KCL 定律,有

$$\frac{V_{BA} - V_C}{R_1} + \frac{V_{BA}}{R_3} = \frac{V_C + V_{dc} - V_{BA}}{R_2} \quad (2)$$

选取 $R_1 = R_2 = R$, 可得到

$$V_{BA} = \frac{R_3}{R + 2R_3} (V_{dc} + 2V_C) = \frac{R_3}{R + 2R_3} \hat{v}_i \quad (3)$$

式(3)表明, V_{BA} 与直流链峰值电压成比例关系。假设 LEM 的采样比为 k , LEM 副边得到的采样电压 V_s 可表示为

$$V_s = kV_{BA} = \frac{kR_3}{R + 2R_3} \hat{v}_i \quad (4)$$

V_s 同样与直流链峰值电压成比例,可以实时采样得到直流链峰值电压,不存在采样延时,并且该采样电路实现简单。

对于传统 Z 源逆变器和不对称 Z 源逆变

器^[10],直流链峰值电压检测电路如图 6,7 所示,其基本工作原理与以上分析类似。因此,该直流链峰值电压检测方法对所有 Z 源逆变器均适用。

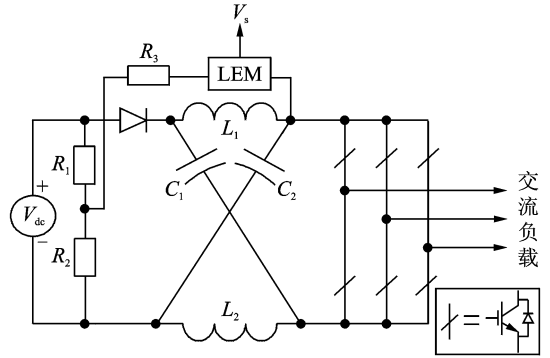


图 6 传统 Z 源逆变器的直流链峰值电压采样电路
Fig. 6 Direct PDV sampling circuit of traditional ZSI

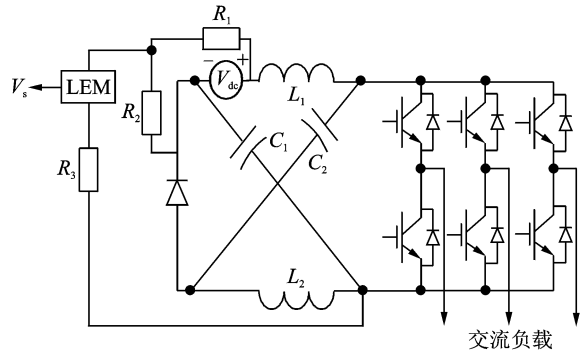


图 7 不对称 Z 源逆变器的直流链峰值电压采样电路
Fig. 7 Direct PDV sampling circuit of embedded ZSI

3 Z 源逆变器控制策略

3.1 空间矢量调制实现及分析

图 8 给出了电压源逆变器和 Z 源逆变器在空间矢量调制策略下的开关时序。通过对电压源逆变器的开关时序进行一定的改动,将直通状态插入到开关状态切换时刻,而保持有效矢量的作用时间不变,就得到了 Z 源逆变器的开关时序。空间矢量调制下 Z 源逆变器在一个开关周期中存在 6 个直通零矢量,Z 源网络的等效工作频率得到提高,能有效减小无源元件的大小^[11-12]。

空间矢量调制策略下, M 和 D_0 满足如下约束关系

$$M \leq \frac{2(1 - D_0)}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

结合式(1),可得

$$B \leq \frac{1}{\sqrt{3}M - 1}, \quad M \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

因此,在给定的 M 下,可得到的最大升压因子为

$$B_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}M - 1} \quad M \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

此时电压增益为

$$G = MB_{\max} = \frac{M}{\sqrt{3}M - 1} \quad M \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

直流链峰值电压为

$$\hat{v}_i = BV_{dc} = (\sqrt{3}G - 1)V_{dc} \quad (9)$$

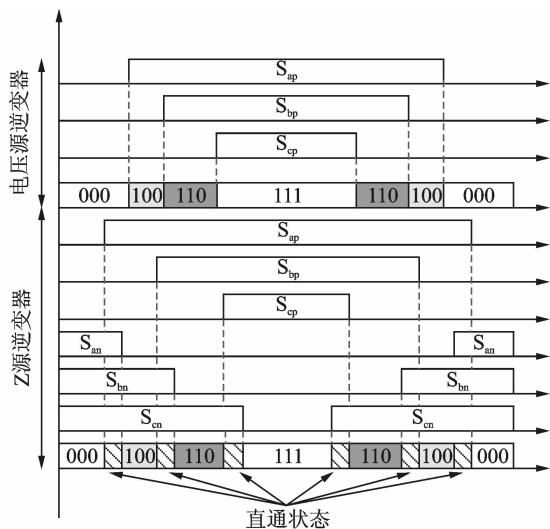


图 8 Z 源逆变器空间矢量调制策略

Fig. 8 SVPWM scheme of ZSI

3.2 控制策略实现

基于直流链峰值电压检测方法,可以得到串联型 Z 源逆变器的控制策略,如图 9 所示。传统 Z 源逆变器和不对称 Z 源逆变器的控制策略与之类似。直流链峰值电压通过第 2 节分析的峰值电压采样电路得到,通过直通占空比 D_0 将其控制于稳定值。通过采样交流输出电压可以实时计算得到其输出电压峰值,通过调制比 M 控制其为额定值。直通占空比和调制比信号综合可以得到 Z 源逆变器的空间矢量调制信号。

从式(1)可以看出,直流链峰值电压与直通占空比有关。因此,通过控制直通占空比就能实现不同输入电压和负载条件下直流链峰值电压的稳定。当输入电压较低时,Z 源逆变器工作于升压模式时,直通占空比大于 0,此时直流链峰值电压高于输入电压;当输入电压足够高时,Z 源逆变器工作于降压模式,此时不需加入直通信号,其工作状态与电压源逆变器类似。

通过采样三相输出电压,输出电压峰值可通过式(10)计算得到

$$V_p = \sqrt{\frac{2}{3}(v_a^2 + v_b^2 + v_c^2)} \quad (10)$$

稳态时,三相输出电压可表示为

$$\begin{cases} v_a = V_m \sin \omega t \\ v_b = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_c = V_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

结合式(10,11),可以得到

$$V_p = V_m \quad (12)$$

式(12)表明,在三相逆变系统中,通过式(12)计算得到的 V_p 能实时反映相电压峰值。稳态时, V_p 也为恒定直流量。因此,通过 PI 调节器就能够实现其无静差控制。

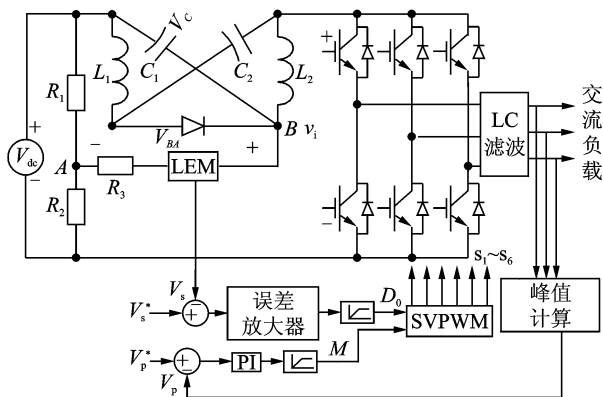


图 9 串联型 Z 源逆变器控制策略

Fig. 9 Control strategy of SZSI

4 实验验证

为了验证所提出的直流链峰值电压检测方法与控制策略的有效性,设计了一台串联型 Z 源逆变器原理样机,电路参数如表 1 所示。

表 1 原理样机参数

Tab. 1 Parameters of experimental prototype

参数名称	数值
输入电压/V	200~400
输出相电压/V	110
输出相频率/Hz	50
容量/kVA	3
Z 源电感/H	5×10^{-4}
Z 源电容/F	2×10^{-3}
滤波电感/H	1×10^{-3}
滤波电容/F	15×10^{-6}
载波频率/kHz	10
采样电阻 R_1, R_2 /kΩ	30
采样电阻 R_3 /kΩ	10

直流链峰值电压参考值按最低输入电压下设计。为了在 200 V 输入电压下输出电压能够达到给定值,由式(8,9)可得此时直流链峰值电压应不小于 340 V,考虑到实际系统中的电压损耗并留有一定的裕量,将直流链峰值电压设定为 370 V。在

控制方法中,当输入电压低于 370 V 时,加入直通状态进行升压;当输入电压高于 370 V 时,无需加入直通状态,逆变器仅由后级调制比控制。

图 10 为输入电压 200 V,阻性半载下的实验波形,此时 Z 源电容电压 V_C 为 85 V,直流链峰值电压升压到 370 V,从展开波形中可以看出,直通状态时,直流链电压为 0,Z 源电感电流增加,非直通状态时,Z 源电感电流减小,直流链电压维持在 370 V,并且在一个开关周期内存在 6 次直通状态,同时电感电流脉动 6 次。

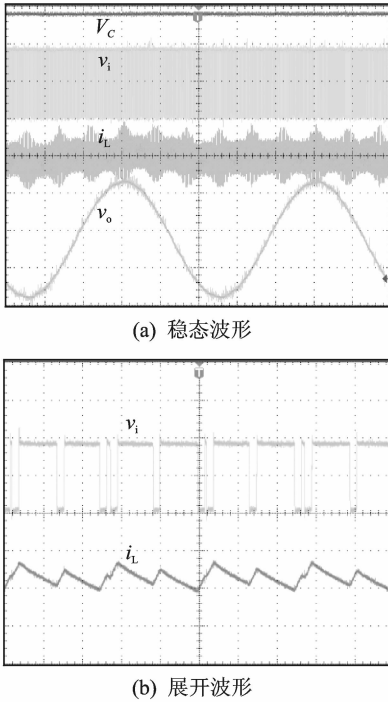
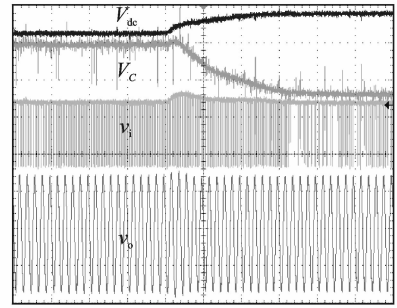


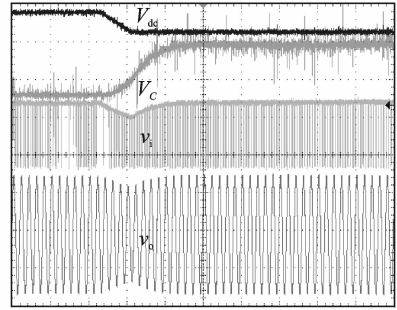
图 10 输入电压 200 V,阻性半载时实验波形

Fig. 10 Experimental results under $V_{dc} = 200$ V, half R load condition

图 11 为输入电压突变时的实验波形,当输入电压从 200 V 突增到 300 V 时,电容电压随之减小,直流链电压有一定的过冲,但很快重新稳定于 370 V,输出电压的波动较小,系统的动态调节时间较短。当输入电压从 300 V 突降到 200 V 时,电容电压随之减小,直流链电压经过一定时间的跌落再上升到 370 V,输出电压也随之跌落,并且需经过较长的时间才能达到稳定。可以看出,当输入电压突降时系统的动态调节时间较输入电压突增时要长,这是因为输入电压突降时,直流链电压和输出电压都随之跌落,此时在前后期闭环调节器作用下,直通占空比和调制比都要增加,但它们受到式(5)所示关系式的约束,不能同时快速增加,因此限



(a) 输入电压从200~300 V突增



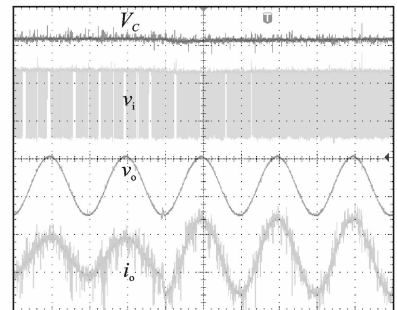
(b) 输入电压从300~200 V突降

图 11 输入电压突变实验波形

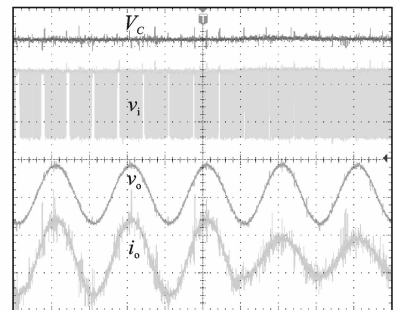
Fig. 11 Experimental results under varied input voltage

制了系统的动态调节能力。

图 12 为负载突变时的实验波形,当负载从半载到满载突增以及从满载到半载突降时,直流链电压和输出电压都能很快达到稳定,动态调节时间很短。



(a) 半载到满载



(b) 满载到半载

图 12 负载突变实验波形

Fig. 12 Experimental results under varied load

从上述实验结果可以看出,基于本文提出的控制策略,系统能有效抑制输入电压和负载扰动,在不同条件下均能实现直流链峰值电压和输出电压的稳定。由于直通占空比和调制比需要满足一定的约束条件,导致输入电压突降时系统的动态调节时间较长,有必要寻求直通占空比和调制比的解耦控制方法,以进一步提高系统的动态性能。

5 结束语

本文提出了一种适合于 Z 源逆变器的直流链峰值电压直接采样和控制策略,该检测电路在稳态与动态条件下都能实时检测出直流链峰值电压,控制实现简单、无需复杂的检测电路以及除法运算过程,动态响应快。结合输出电压峰值反馈控制策略,输出电压无稳态误差,能够实现不同条件下输出电压的稳定。对串联型 Z 源逆变器原理样机进行了实验验证,实验结果证实了该控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] Peng F Z. Z-source inverter[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003,39(2): 504-510.
- [2] Shen M S, Wang J, Joseph A, et al. Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2006, 42(3):770-777.
- [3] 汤雨,谢少军,张超华.改进型 Z 源逆变器[J].中国电机工程学报,2009,29(30):28-34.
Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chaohua. Improved Z-source inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(30):28-34.
- [4] Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chaohua, et al. Improved Z-source inverter with reduced Z-source capacitor voltage stress and soft-start capability[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2009, 24(2):409-415.
- [5] Anderson J, Peng F Z. Four quasi-Z-source inverters [C] // IEEE PESC. Rhodes; IEEE, 2008; 2743-2749.
- [6] Tran Q, Chun T, Ahn J, et al. Algorithms for controlling both the DC boost and AC output voltage of Z-source inverter[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2007,54(5): 2745-2750.
- [7] Ding X P, Qian Z M, Yang S T, et al. A direct peak DC-link boost voltage control strategy in Z-source inverter[C] // IEEE APEC. Anaheim, CA, USA; IEEE, 2007; 648-653.
- [8] Gajanayake C J, Vilathgamuwa D M, Loh P C. Development of a comprehensive model and a multiloop controller for Z-source inverter DG systems [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2007,54(4): 2352-2359.
- [9] Tang Yu, Xie Shaojun, Wei Jukui. An optimal PWM strategy of Z-source inverter[C] // IEEE ECCE. Denver, CO; IEEE, 2013;4221-4226.
- [10] Abu-Rub H, Iqbal A, Moin Ahmed S, et al. Quasi-Z-source inverter-based photovoltaic generation system with maximum power tracking control using ANFIS[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013,4(1):11-20.
- [11] Peng Fangzheng, Shen Miaosen, Qian Zhaoming. Maximum boost control of the Z-source inverter[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2005, 20(4):833-838.
- [12] Loh P C, Vilathgamuwa D M, Lai Y S, et al. Pulse-width modulation of Z-source inverters [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2005, 20(6): 1346-1355.