

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.04.010

# 一种增强型 Z 源逆变器的研究

周亚星, 龙永红, 李军军, 黄林森

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对在低功率因数以及 Z 源电感值较小的情况下, Z 源逆变器二极管电流断续引起的直流链电压畸变的问题, 研究了一种电容辅助增强型准 Z 源逆变器。深入分析 Z 源逆变器非正常工作状态产生的原因, 利用 Matlab/Simulink 对电容辅助增强型准 Z 源逆变器和传统准 Z 源逆变器进行仿真分析。仿真结果表明, 在低功率因数及 Z 源电感值较小的运行条件下, 该增强型 Z 源逆变器可较好地解决直流链电压畸变的问题, 有效改善逆变器输出电压的质量, 简化 Z 源电感的设计。

**关键词:** 准 Z 源逆变器; 低功率因数; 电容辅助增强型

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)04-0041-05

## Study on an Enhanced Z-Source Inverter

Zhou Yaxing, Long Yonghong, Li Junjun, Huang Linsen

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of Z-source inverter diode current interruption resulting in DC link voltage distortion under the conditions of low power factor or small Z-source inductance value, studies a capacitor-assisted enhanced quasi-Z-source inverter (qZSI). Analyzes the cause of the Z-source inverter abnormal operating states and simulates the capacitor-assisted enhanced qZSI and the traditional qZSI by Matlab/Simulink. The results indicate that the proposed qZSI can better solve the problem of the DC link voltage distortion under the operating conditions of low power factor or small Z-source inductance value, and it improves the output voltage of Z-source inverter effectively and simplifies the inductor design.

**Keywords:** quasi-Z-source inverter; low power factor; capacitor-assisted enhanced boost

## 0 引言

目前, DC/AC 功率变换技术主要基于 2 种逆变器拓扑: 电压源逆变器和电流源逆变器<sup>[1]</sup>。这 2 种逆变器的局限性在于:

1) 无论采取何种控制策略, 电压源逆变器的输出电压只能低于其直流母线电压, 电流源逆变器的输出电压只能高于其直流母线电压, 因而不适合输入电压变化范围较大的场合;

2) 由于电磁干扰等原因造成的上下管直通或者误关断都会损坏器件, 因而需要设置死区时间。

2003 年彭方正教授提出了一种 Z 源逆变器<sup>[1]</sup>。该逆变器为功率变换提供了一种新的逆变器拓扑, 具有以下优点: 1) 利用 X 型 LC 网络能够单级实现升降压; 2) 无需设置死区时间, 消除了逆变器死区时间带来的输出噪声; 3) 同桥臂直通成为常态, 增加了逆变器的抗干扰能力。近几年, 国内外学者致力于从不同方面研究 Z 源逆变器。文献[2-3]针对传

收稿日期: 2014-03-02

基金项目: 湖南省高校科学研究基金资助项目(12C0055), 湖南省自然科学省市联合基金资助项目(12JJ9042)

作者简介: 周亚星(1989-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子技术及应用,

E-mail: 731435703@qq.com

统 Z 源电容电压应力较大和输入电流断续的问题,提出了几种准 Z 源逆变器。文献[4-6]对 Z 源逆变器在轻载或 Z 源电感较小情况下运行时存在的局限性进行了详细地分析,并提出了 2 种改进方案:一种是增大 Z 源电感值,另一种是用一个可控型器件取代二极管。但上述方法要么牺牲了逆变器在满载下的效率,要么增加了系统成本,且上述文献都对 Z 源逆变器在负载低功率因数下的工作状态进行分析。

针对有关 Z 源逆变器已有研究的不足,本文研究了一种电容辅助增强型准 Z 源逆变器<sup>[7]</sup>。详细分析了 Z 源逆变器产生非正常工作状态的原因及临界条件,仿真分析了电容辅助增强型准 Z 源逆变器和 Z 源逆变器在负载低功率因数以及 Z 源电感较小时的工作状态。本文对解决传统 Z 源直流链电压畸变的问题做了一些有意义的研究工作。

### 1 负载低功率因数下准 Z 源逆变器非正常工作状态分析

减少电容电压应力的准 Z 源逆变器<sup>[2]</sup>的主电路如图 1 所示。

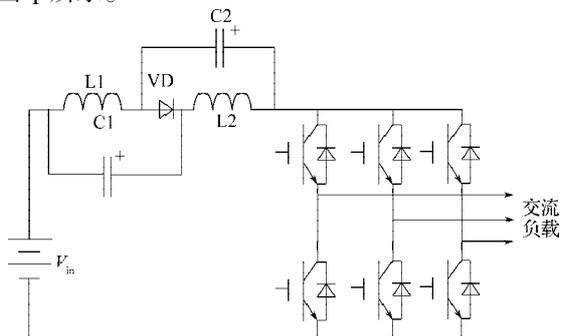
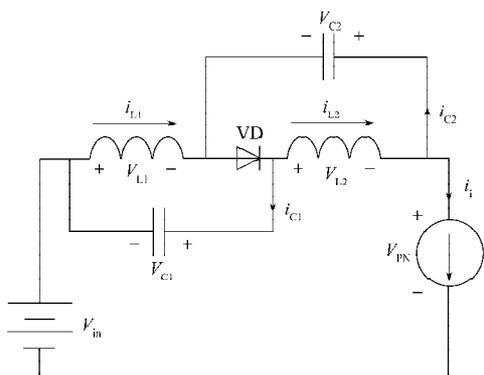


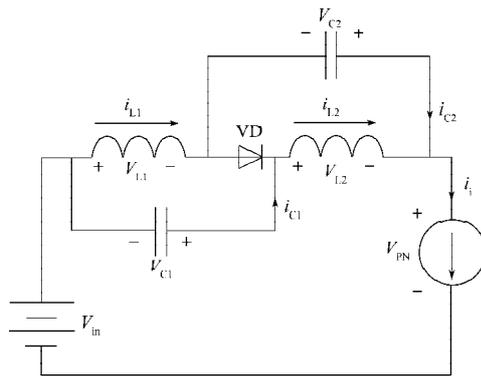
图 1 准 Z 源逆变器的主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of quasiz-source inverter

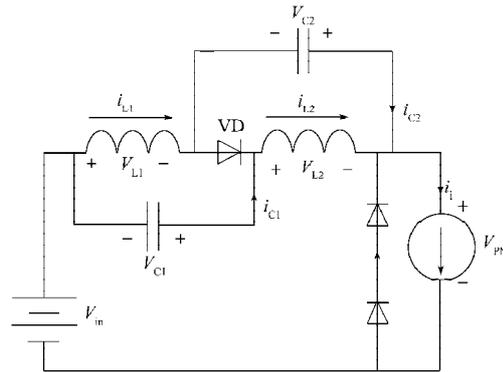
电路处于负载低功率因数时,将出现非正常工作状态。在有效矢量时,电路的非正常工作状态不同于在轻载或 Z 源电感较小情况下的。电路会出现 3 种不同的有效矢量工作状态,如图 2 所示。



a) 状态 1



b) 状态 2



c) 状态 3

图 2 准 Z 源逆变器处于低功率因数下的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuits of quasiz-source inverter with low power factor

#### 1) 状态 1

状态 1 中,电路处于有效矢量状态,且电感电流  $i_L$  满足  $i_L > i_1$ ,其中  $i_1$  为负载瞬时电流。此时,电感向电容充电,电容的充电电流为  $i_L - i_1$ ,经过二极管的电流为

$$i_{VD} = 2i_L - i_1 > 0, \tag{1}$$

二极管导通,Z 源电感的电压为

$$V_{L1} = V_{L2} = -V_{C1} = -V_{C2}, \tag{2}$$

式中,  $V_{C1}$  和  $V_{C2}$  为 Z 源电容的电压。

假设一个开关周期内电容电压稳定,则电感电流将线性下降。

#### 2) 状态 2

状态 2 中,电路处于有效矢量状态,且电感电流满足  $i_1/2 < i_L < i_1$ 。此时,Z 源电容将处于放电状态,电容的充电电流为  $i_1 - i_L$ ,经过二极管的电流仍然满足式 (1),二极管处于导通状态,Z 源电感的电压满足式 (2),电感电流将线性下降。

#### 3) 状态 3

电路从零矢量状态进入有效矢量状态,或者从一种有效矢量状态进入另一种有效矢量状态时,由于逆变器电流的阶跃变化,电感电流满足  $i_L < i_1/2$ ,此时,二极管电流为

$$i_{VD}=2i_L-i_1<0, \quad (3)$$

二极管处于截止状态。由于Z源逆变器的最大输出电流为 $2i_L$ , 逆变器IGBT并联的二极管将被迫导通, 以给负载电感电流提供通路, 这相当于Z源逆变器输出短路。与直通零状态相似,Z源电感电流将线性上升。这种状态将持续到Z源电感电流上升到 $i_L>i_1/2$ , 或者进入下一个传统零矢量状态。

状态3主要出现在负载功率因数较低的情况下。在有效矢量时, 逆变桥的输入直流电压跌落为零, 极大地影响了逆变器输出交流电压的质量。下面将分析该状态出现的临界条件。假设Z源逆变器为三相LR负载, 输出功率为<sup>[4]</sup>

$$P_{out}=3\left(\frac{MV_{in}}{2Z\sqrt{2}(1-2D)}\right)^2 R_{load}=\frac{3}{8}(MBV_{in})^2 \frac{\cos\varphi}{Z}, \quad (4)$$

式中: $M$ 为调制比; $V_{in}$ 为Z源输入电压; $Z$ 为负载阻抗; $D$ 为直通占空比; $R_{load}$ 为负载电阻; $B$ 为直流升压因子; $\cos\varphi$ 为负载功率因数。

Z源电感电流等于Z源二极管流过的平均电流, 根据功率平衡有

$$i_{LDC}=i_{VD}=\frac{3M^2B^2V_{in}\cos\varphi}{8Z}, \quad (5)$$

式中, $i_{LDC}$ 为电感电流的直流分量。

电感电流 $i_L$ 的高频载波为三角形。逆变桥处于有效矢量时, 其输入电流峰值为输出交流相电流峰值。因此, 逆变桥二极管VD的电流不连续条件是

$$2i_{LDC}-\Delta i_L=\frac{3M^2B^2V_{in}\cos\varphi}{4Z}-\Delta i_L\geq i_{i,max}, \quad (6)$$

式中: $i_{i,max}$ 为逆变桥输入电流最大值, 即 $i_{i,max}=\frac{MBV_{in}}{2\sqrt{2}Z}$ ;

$\Delta i_L$ 为电感电流高频分量的峰值。

整理式(6)可得

$$\frac{3\sqrt{2}MB\cos\varphi}{2}-\frac{2\sqrt{2}\Delta i_L Z}{MBV_{in}}\geq 1^\circ \quad (7)$$

当逆变器为SPWM调制时, 一个开关周期内插入2个直通零矢量, 则

$$\Delta i_L=\frac{V_C D}{2Lf_s}, \quad (8)$$

式中: $f_s$ 为逆变器的开关频率; $L$ 为Z源电感。

由式(7)~(8)可知, 当负载较轻、Z源电感 $L$ 较小以及负载功率因数较低时, 式(7)将不再成立, 因而出现Z源网络二极管电流断续而引起直流链电压跌落; 传统准Z源网络的最大输出瞬时电流只有电感电流 $i_L$ 的2倍。当负载低功率因数时,Z源电感电流 $i_L$ 减小, 不论Z源电感 $L$ 值取多大(忽略 $\Delta i_L$ 对电路的影响), 电路都将出现非正常工作状态。

## 2 电容辅助增强型准Z源逆变器

本文研究了文献[7]中所提的一种电容级联的电容辅助增强型准Z源逆变器。该逆变器可以较好地克服电路在负载低功率因数以及Z源电感值较小情况下出现直流链电压跌落的缺陷。该电路拓扑结构如图3所示。

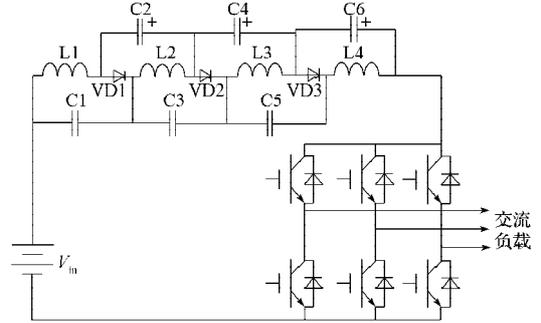


图3 电容辅助增强型准Z源逆变器拓扑结构

Fig. 3 The capacitor-assisted enhanced quasiz-source inverter topology

从主电路的开关状态来看, 电容辅助增强型准Z源逆变器拓扑的工作原理与传统Z源逆变器的一样。其直流链峰值电压可表示为

$$V_{PN}=V_{in}+4V_C=\frac{1}{1-4D}V_{in}=BV_{in}. \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 在相同直通占空比 $D$ 下, 本电路相比于传统Z源拓扑具有更强的升压能力, 其电容电压仅为准Z源网络电容电压的一半, 从而可以减少电压应力。

当电路处于有效矢量状态时, 其等效电路如图4所示。

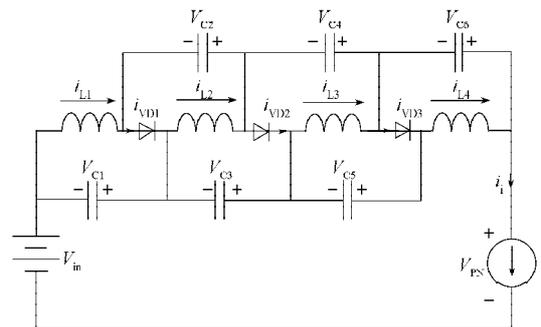


图4 增强型准Z源逆变器处于有效矢量下的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of the enhanced quasiz-source inverter under active vector

有效矢量状态下, 逆变器可以用电流源代替, 二极管导通, 电感 $L1, L2, L3, L4$ 串联, 分别向电容 $C1, C2$ 和 $C3, C4$ 和 $C5, C6$ 和负载供电。当负载电流瞬时值较大时,Z源电容可能由充电状态转为放电状态。此时, $C1, C2, C3, C4, C5, C6$ 同时向负载供电,Z源输

出电流为

$$i_{\text{out}} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_{L4} - i_{VD1} - i_{VD2} - i_{VD3} \quad (10)$$

由上式可知, 二极管导通的条件为

$$4(i_{\text{LDC}} - \Delta i_L / 2) \geq i_{i, \text{max}} \quad (11)$$

式(11)可化为

$$3\sqrt{2}MB \cos \varphi - \frac{4\sqrt{2}\Delta i_L Z}{MBV_{\text{in}}} \geq 1 \quad (12)$$

对比式(6)和(11)可以看出, 电容辅助增强型Z源逆变器的输出电流可以达到Z源电感的瞬时电流 $i_L$ 的4倍。相比于传统准Z源逆变器, 电容辅助增强型Z源逆变器具有更宽的稳定工作范围, 允许负载工作在更低的功率因数以及 $\Delta i_L$ 更大的情况下, 因此, 设计的Z源电感值可以较小。

电容辅助增强型准Z源拓扑是利用电容级联Z源网络, 使得逆变器直流升压增益增大, 减少了Z源电容电压应力, 可以工作在负载低功率因数的场合, 同时通过耦合电感可以改善Z源电感电流纹波。不足的是, 在直通状态时, 流过逆变桥的电流成倍增加, 逆变桥开关应力加大, 同时要求的器件数增加, 使得成本增加。

### 3 仿真分析

为了验证上文的理论分析, 将电容辅助增强型准Z源逆变器和传统准Z源逆变器在开环方式下的运行状况进行对比仿真研究。其具体仿真参数设置如下: 系统输入电压 $V_{\text{in}}=100\text{ V}$ ; 直通占空比 $D$ 分别为0.05和0.10; 调制比 $M$ 为0.9。因此, 直流链峰值电压 $V_{\text{PN}}$ 为

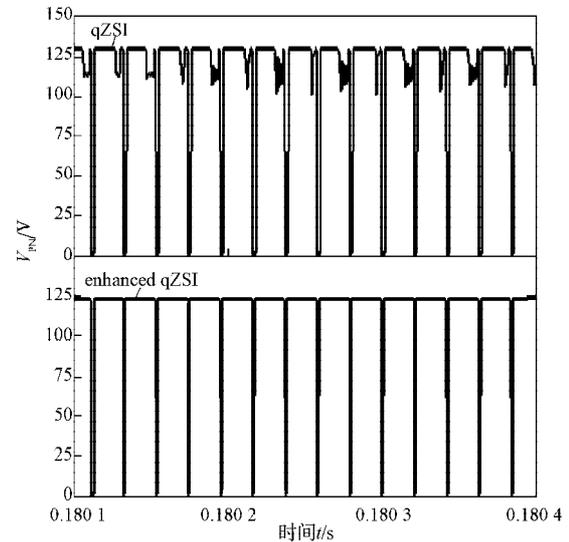
$$V_{\text{PN}} = BV_{\text{in}} = 100 \times 0.9 / (1 - 4 \times 0.05) = 100 \times 0.9 / (1 - 2 \times 0.10) = 125(\text{V}) \quad (12)$$

在负载低功率因数下的仿真, 电容辅助增强型Z源和传统准Z源网络参数均设置为: 电容 $C=2\ 200\ \mu\text{F}$ , 电感 $L=1\ 000\ \mu\text{H}$ , 载波频率 $f_s=13.3\ \text{Hz}$ 。三相负载参数为:  $L_{\text{load}}=500\ \mu\text{H}$ ,  $R_{\text{load}}=0.2\ \Omega$ 。

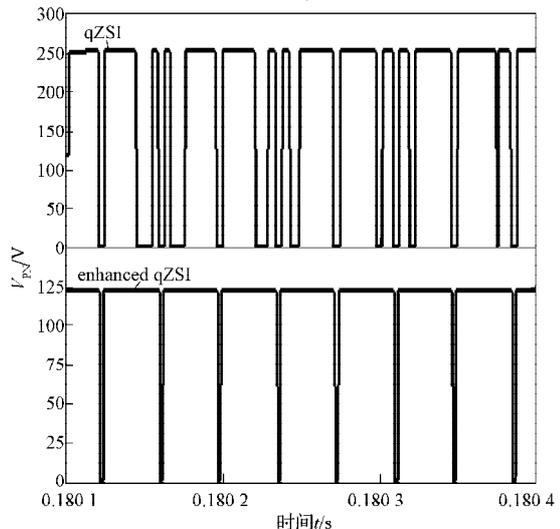
在Z源电感较小下的仿真, 电容辅助增强型Z源和传统准Z源网络参数均设置为电容 $C=2\ 200\ \mu\text{F}$ , 载波频率 $f_s=23.6\ \text{Hz}$ 。三相负载参数为:  $L_{\text{load}}=1\ 000\ \mu\text{H}$ ,  $R_{\text{load}}=10\ \Omega$ , 频率 $f_{\text{load}}$ 为 $50\ \text{Hz}$ 。

图5是电容辅助增强型准Z源逆变器和传统准Z源逆变器的直流链电压仿真结果图。由图a可知, 当Z源电感值较小( $L=60\ \mu\text{H}$ )时, 在非直通状态, 传统准Z源逆变器的直流链电压出现电压跌落现象, 而增强型准Z源逆变器正常工作。由图b可知, 当负载功率因数较低( $\cos\varphi=0.3$ )时, 在非直通状态,

传统准Z源逆变器的直流链电压出现电压畸变现象, 且由于这种现象还导致了附加的直通状态, 使得直流链电压升高(传统准Z源逆变器的直流链电压接近 $250\ \text{V}$ ), 而增强型准Z源逆变器消除了直流链电压畸变现象, 直流链电压接近理论计算值 $125\ \text{V}$ 。



a) Z源电感值 $L=60\ \mu\text{H}$ 时的仿真波形



b) 负载功率因数为 $\cos\varphi=0.3$ 时的仿真波形

图5 准Z源和电容辅助增强型准Z源逆变器的直流链电压波形

Fig. 5 DC-link voltage waveforms for qZSI and capacitor-assisted enhanced qZSI

图6~7是电容辅助增强型准Z源逆变器和传统准Z源逆变器的输出交流电压的谐波图。由图可知, 在负载功率因数较高或者Z源电感值较大时, 电容辅助增强型Z源逆变器和传统准Z源逆变器具有相同的输出交流电压谐波; 随着负载低功率因数或者Z源电感值不断减小, 有效状态时, 传统准Z源逆变器的直流链电压出现畸变, 使得逆变器的输出交流电压总畸变率(total harmonic distortion, THD)明显高

于电容辅助增强型Z源逆变器, 其中, 5次和7次谐波占基波百分比明显增大; 当Z源电感  $L < 50 \text{ mH}$  (此时, 三相负载  $L_{\text{load}} = 1\,000 \mu\text{H}$ ,  $R_{\text{load}} = 10 \Omega$ ,  $f_{\text{load}} = 50 \text{ Hz}$ ) 或者负载功率因数  $\cos\varphi < 0.19$  (升压比  $G = 1.25$ ) 时, 电容辅助增强型Z源逆变器直流链电压出现小范围跌落, 但通过THD分析可以看出, 逆变器的输出交流电压总畸变率变化不大。通过不同参数下的对比仿真结果表明, 电容辅助增强型Z源逆变器相比传统Z源逆变器的稳定工作范围更宽。

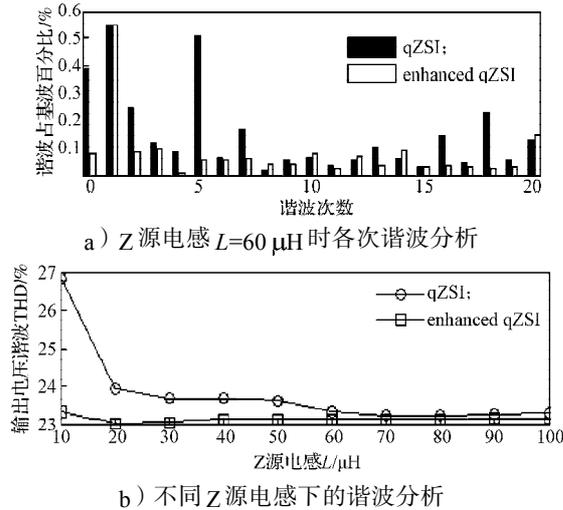


图6 Z源低电感时输出电压谐波分析图

Fig. 6 Harmonic analysis of the output voltage at small Z-source inductance

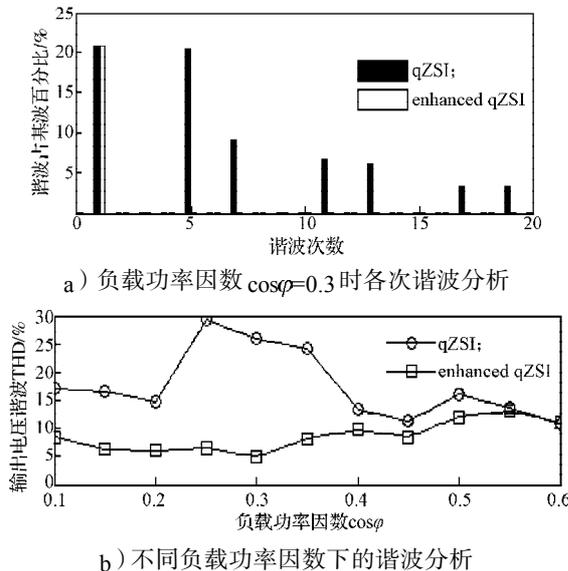


图7 负载低功率因数时输出电压谐波分析图

Fig. 7 Harmonic analysis of the output voltage with low power factor

## 4 结语

在低功率因数及低电感条件下, 对电容辅助增强型准Z源逆变器和传统准Z源逆变器进行仿真分析可知, 该增强型逆变器能输出更高的Z源电感瞬时电流, 且稳定的工作范围更宽; 其能更好地运行在低功率因数及低电感条件下, 解决了传统Z源直流链电压畸变的问题, 有效改善逆变器的输出电压质量; 其具有更强的升压能力, 且Z源电感的设计值明显减小, 因此, 电容辅助增强型准Z源逆变器相比于传统准Z源逆变器具有一定优势。本文为Z源逆变器的设计和应用提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1] Peng Fangzheng. Z-Source Inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (2): 504-510.
- [2] Anderson J, Peng Fangzheng. Four Quasi-Z-Source Inverters[C]//2008 Power Electronics Specialists Conference. Rhodes: IEEE, 2008: 2743-2749.
- [3] Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chao, et al. Improved Z-Source Inverter with Reduced Z-Source Capacitor Voltage Stress and Soft-Start Capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 409-415.
- [4] Shen Miaosen. Z-Source Inverter Design, Analysis, and Its Application in Fuel Cell Vehicles[D]. East Lansing: Michigan State University, 2006.
- [5] Shen Miaosen, Peng Fangzheng. Operation Modes and Characteristics of the Z-Source Inverter with Small Inductance[C]//Fourtieth IAS Annual Meeting. [S. l.]: IEEE, 2005: 1253-1260.
- [6] Ding Xinping, Qian Zhaoming, Yang Shuitao, et al. A High-Performance Z-Source Inverter Operating with Small Inductor at Wide-Range Load[C]//Applied Power Electronics Conference. Anaheim: IEEE, 2007: 615-620.
- [7] Gajanayake C J, Luo Fanglin, Gooi H B, et al. Extended-Boost Z-Source Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2642-2652.

(责任编辑: 邓彬)

