

## 二次升压式逆变器工作特性的研究

李文华<sup>1</sup>, 胡琦<sup>1</sup>, 卢山念<sup>2</sup>, 张贺<sup>1</sup>, 郑杭<sup>1</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130;  
2. 浙江天正电气股份有限公司, 浙江温州 325604)

**摘要:** 针对传统单级升压式逆变器升压能力低、电容应力大的问题, 提出了一种二次升压式逆变器拓扑结构。分析了不同导通模式下电路的工作方式、升压系数和临界电感, 建立了升压网络的小信号模型, 通过系统零极点分布讨论了参数变化对电路动态响应和纹波的影响。仿真和实验证明这种二次升压式逆变器在 CCM 下升压系数与非直通比的二次方成反比, 具有升压系数高、可靠性高和输入电流连续的优点, 适用于光伏、风力发电等输入电压低、电压变化范围大的场合。

**关键词:** 逆变器; 单级升压; 直通零矢量; 临界电感; 小信号建模

**DOI:** 10.12067/ATEEE1801025

**文章编号:** 1003-3076(2018)12-0039-06

**中图分类号:** TM464

### 1 引言

化石能源过度利用导致了温室效应、热污染等环境问题, 环境破坏对人类生活产生严重影响, 使用可再生的新型能源取代传统化石燃料是有效解决途径<sup>[1,2]</sup>。因此, 分布式发电成为当今研究的热点, 尤其是光伏和风力发电<sup>[3]</sup>。分布式发电输出电压低、电压波动大, 而且传统电压源型逆变器只能对输入电能降压输出, 因此不能直接使用分布式电能对负载进行供电, 需要提高逆变器直流母线电压<sup>[4]</sup>。

目前常用的升压逆变结构有两级式和单级式。两级式结构中二极管的反向恢复问题严重, 开关器件众多导致系统效率降低, 成本增加。与两级式相比, 单级式逆变器具有效率高、控制简单、直流纹波小、体积小的优点, 是当今研究的热点<sup>[5,6]</sup>。单级式逆变器可分为 Z 源型、差动型、二极管耦合型和电流源型。文献[7]提出了 Z 源逆变器, 克服了电压逆变器不能直通、只能降压输出的缺点, 但具有起动机冲击振荡、升压系数低及电容应力大的不足, 在应用中受到局限<sup>[8]</sup>。文献[9]提出了准 Z 源逆变器, 其具有输入输出共地、电容应力小的优势, 升压能力有所提高, 但升压系数与直通比仍然是一次方反比的关系, 升压能力不足。文献[10,11]提出了 Z 源和

准 Z 源 T 型逆变器, 其升压系数与准 Z 源逆变器相同, 但开关器件数量多, 共模干扰严重<sup>[12]</sup>。文献[13]提出了一种差动式逆变器及其控制方式, 但该拓扑结构不能使用传统三相逆变桥 PWM 控制, 增加了控制难度, 且升压系数较低。文献[14]提出了一种二极管耦合型逆变器, 但其与 Z 源型相比多使用一个开关管, 控制相对复杂。电流源逆变器只能升压输出, 电压输出范围小, 而且由于换流重叠时间的引入, 输出波形会产生畸变, 在应用中受到局限。

为了提高单级升压式逆变器的升压系数、减小电容应力, 提出了一种二次升压式逆变器拓扑结构, 通过仿真和实验证明了其升压系数与非直通比的二次方成反比, 具有升压系数高、控制灵活、可靠性高和输入电流连续等优点。

### 2 工作原理分析

二次升压式逆变器电路图如图 1 所示。电路由升压网络、缓冲网络和三相逆变桥三部分组成。升压网络由  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $C_1$  组成, 用来对输入电压  $U_{in}$  进行升压。缓冲网络由  $C_2$ 、 $L_3$ 、 $D_3$  和  $D_4$  组成, 可以缓冲电感  $L_2$  放电时产生的瞬时高电压, 减小输出失真度。三相逆变桥由开关器件  $S_1 \sim S_6$  组成, 其与电网或交流负载连接。

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377044)

作者简介: 李文华(1973-), 男, 河北籍, 教授, 博士, 研究方向为智能电器及其通讯技术;

胡琦(1993-), 男, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为智能电器及其通讯技术。

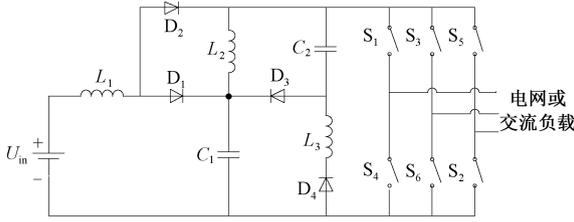


图1 二次升压式逆变器电路图

Fig.1 Circuit diagram quadratic boost inverter

为简化分析,假设  $L_2$  工作于连续导通模式 (Continuous Conduction Mode, CCM)。电感  $L_1$  工作于 CCM,从输入电源到直流母线之间的等效电路如图2和图3所示,分别对应直通状态和非直通状态。

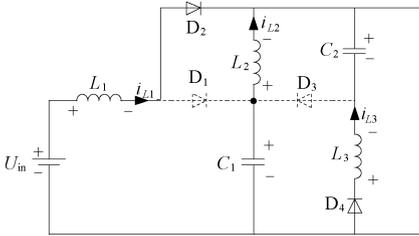
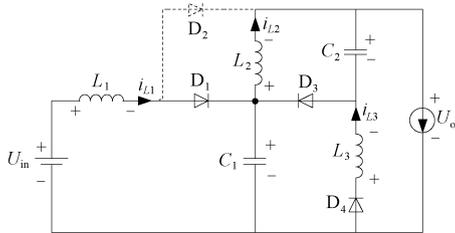
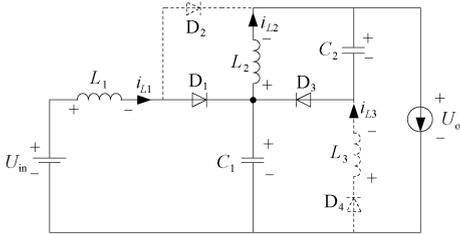


图2 CCM下直通零矢量状态等效电路

Fig.2 Equivalent circuits of through zero vector state under CCM



(a)  $i_{L3} > 0$



(b)  $i_{L3} = 0$

图3 CCM下非直通零矢量状态等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of non through zero vector state under CCM

(1)图2为直通状态下的等效电路。当逆变桥上、下两组开关同时导通时,逆变桥短路,直流母线电压为零。此时  $D_1$  和  $D_3$  关断,  $D_2$  导通。输入直流电源  $U_{in}$  给  $L_1$  充电,  $C_1$  给  $L_2$  充电,  $C_2$  给  $L_3$  充电,  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  线性增加。

(2)图3为非直通状态下的等效电路。当开关管工作在非直通零矢量状态时,可将三相逆变桥等效替换为电流源。此时  $D_2$  关断。此过程包含  $i_{L3} > 0$  和  $i_{L3} = 0$  两种状态。

当  $i_{L3} > 0$  时,  $D_4$  导通,如图3(a)所示。此时输入直流电源  $U_{in}$  和  $L_1$  给  $C_1$  充电,导电回路为  $U_{in}-L_1-D_1-C_1; L_2$  给  $C_2$  充电,导电回路为  $L_2-C_2-D_3; L_3$  给  $C_1$  充电,导电回路为  $L_3-D_3-C_1-D_4; U_{in}$  和  $L_1、L_2$  同时向负载放电,导电回路为  $U_{in}-L_1-D_1-L_2$ -负载。

当  $L_3$  续流结束,即  $i_{L3} = 0$  时,  $D_4$  关断,如图3(b)所示。导电回路  $L_3-D_3-C_1-D_4$  关断,其他回路继续导通,  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  线性降低。设开关周期为  $T$ ,直通比为  $D$ 。电容电压为:

$$U_{C1} = \frac{1}{1-D}U_{in} \quad (1)$$

$$U_{C2} = \frac{D}{(1-D)^2}U_{in} \quad (2)$$

定义  $B_{CCM}$  为  $L_1$  在 CCM 下电路的升压系数,可以求得输出直流母线电压为:

$$U_o = B_{CCM}U_{in} = \frac{1}{(1-D)^2}U_{in} \quad (3)$$

由式(3)可知,二次升压式逆变器在 CCM 下升压系数与非直通比的二次方成反比,故称之为二次升压式逆变器。

$L_1$  在断续导通模式 (Discontinuous Conduction Mode, DCM) 与 CCM 的不同在于,增加了  $i_{L1} = 0$  的状态,DCM 下非直通零矢量状态等效电路如图4所示。设  $L_1$  续流占空比为  $D_{on}$ ,则  $D_{on} < 1 - D$ 。在 DCM 下直流母线电压为:

$$U_o = B_{DCM}U_{in} = \frac{D_{on} + D}{(1-D)D_{on}}U_{in} \quad (4)$$

式中,  $B_{DCM}$  为 DCM 模式下电路的升压系数。比较可知  $B_{DCM} > B_{CCM}$ ,当需要较大升压系数时可使逆变器工作于 DCM,但缺点是断续的输入电流对输入侧电能质量影响较大。

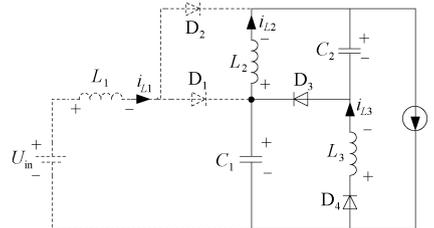


图4 DCM下非直通零矢量状态等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of non through zero vector state under DCM

### 3 升压网络分析

#### 3.1 临界电感分析

一个开关周期输入电流平均值为:

$$I_{L1} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{L1} dt = \frac{D(D + D_{on})T}{2L_1} U_{in} \quad (5)$$

假设所有器件均为理想器件, 升压网络中的功率损耗可忽略不计, 故输入功率等于输出功率, 设负载在直流母线侧的等效负载为  $R$ , 则电感  $L_1$  续流占空比  $D_{on}$  为:

$$D_{on} = \frac{L_1 + \sqrt{L_1^2 + 2(1-D)^2 DRT L_1}}{(1-D)^2 DRT} \quad (6)$$

电感  $L_1$  在 CCM 模式和 DCM 模式之间的临界条件为  $D_{on} = 1 - D$ , 根据式(6)可知, 临界电感  $L_{1c}$

$$\begin{aligned} N(s) &= -L_0 L_1 L_2 I_{L1} (1-D)s^2 + [L_0 L_2 U_{C1} (1-D)^2 - L_0 L_1 U_{C1} (1-2D) - L_1 L_2 R_0 I_{L1} (1-D)]s + \\ &U_{C1} R_0 [L_2 (1-D)^2 - L_1 (1-2D)] \\ D(s) &= L_0 L_1 L_2 C_1 (1-D)s^3 + L_1 L_2 C_1 R_0 (1-D)s^2 + L_0 [L_2 (1-D)^2 + 2L_1 D](1-D)s + \\ &R_0 [L_2 (1-D)^2 + 2L_1 D](1-D) \end{aligned}$$

其中,  $\hat{u}_{C1}(s)$ 、 $\hat{d}(s)$ 、 $\hat{u}_{in}(s)$  为电容  $C_1$  电压、直通比、输入直流电源的小信号表达式;  $I_{L1}$  为电感  $L_1$  的偏置电流。

升压网络的零点、极点随着电路参数变化而移动。电路参数为:  $L_1 = 10\text{mH}$ ,  $L_2 = 40\text{mH}$ ,  $C_1 = 100\mu\text{F}$ ,  $D = 0.2$ 。只改变其中一个参数, 零极点位置变化情况如图 5 所示。系统左半平面存在零点, 为非最小相位系统, 输出响应存在负超调<sup>[15]</sup>。 $L_1$  由  $10\text{mH}$  变化到  $20\text{mH}$  零极点位置如图 5(a) 所示, 零极点均向原点移动, 负超调更加严重, 系统阻尼增大。 $L_2$  由  $20\text{mH}$  变化到  $40\text{mH}$  时如图 5(b) 所示, 极点靠近原点, 零点远离原点。系统负超调减小, 阻尼增大。增大电感虽然可以减小电压、电流纹波, 但会恶化动态响应。 $C_1$  由  $100\mu\text{F}$  变化到  $200\mu\text{F}$  时如图 5(c) 所示, 极点靠近原点, 零点位置不变, 增大电容  $C_1$  会增大系统过渡时间。 $D$  由  $0.2$  变化到  $0.4$  时如图 5(d) 所示, 系统阻尼增大, 负超调更加严重。通过升压网络特性分析和预期纹波大小, 可以确定系统参数。

#### 4 仿真研究

在 Saber 仿真软件下搭建了系统模型, 对二次升压式逆变器进行分析。逆变器采用恒定直通比的

为:

$$L_{1c} = \frac{(1-D)^4 DRT}{2} \quad (7)$$

通过式(7)可知, 若电路的直通比、输出功率、开关周期不变, 若增大电感值, 可以使电路工作在 CCM 模式。

#### 3.2 零极点特性分析

通过状态空间平均法建立了二次升压式逆变器的升压网络在 CCM 模式下的小信号模型。电容  $C_1$  的电压对于直通比的传递函数为:

$$G(s) = \left. \frac{\hat{u}_{C1}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{in}(s)=0} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (8)$$

式中

SPWM 控制方式。仿真参数为:  $L_1 = 40\text{mH}$ ,  $L_2 = 50\text{mH}$ ,  $L_3 = 5\text{mH}$ ,  $C_1 = 100\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 100\mu\text{F}$ , 滤波电容为  $40\mu\text{F}$ , 滤波电感为  $20\text{mH}$ , 输入电压为  $\text{DC}50\text{V}$ ,  $D = 0.4$ , 调制比  $M = 0.6$ 。逆变器在不同模式下仿真波形如图 6 和图 7 所示, 不同工作模式下逆变器电压如表 1 所示, 各电压值与公式计算结果相同, 验证了电路工作原理的正确性。

在同样的参数下, 对 Z 源逆变器进行仿真, 仿真波形如图 8 所示。Z 源逆变器直流母线电压为  $108\text{V}$ , 升压系数为  $2.16$ 。表 1 将二次升压式逆变器的不同工作模式以及 Z 源逆变器做比较, 可知在相同的输入电压和直通比下, 二次升压式逆变器与 Z 源逆变器相比, 输出电压更高, 电容应力小。二次升压式逆变器在 DCM 模式下输出电压高于 CCM 模式, 说明该逆变器具有升压系数高的优点。

#### 5 实验结果

以二次升压式逆变器运行在 CCM 模式为例, 设计的样机参数为:  $L_1 = 40\text{mH}$ ,  $L_2 = 50\text{mH}$ ,  $L_3 = 5\text{mH}$ ,  $C_1 = 100\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 100\mu\text{F}$ , 滤波电容为  $40\mu\text{F}$ , 滤波电感为  $20\text{mH}$ 。逆变器采用恒定直通比的 SPWM 控制方式, 开关频率为  $15\text{kHz}$ ,  $D = 0.4$ 。以 dsPIC30F 单片机作为控制器, 在输入电压为  $\text{DC}50\text{V}$  时进行实验。

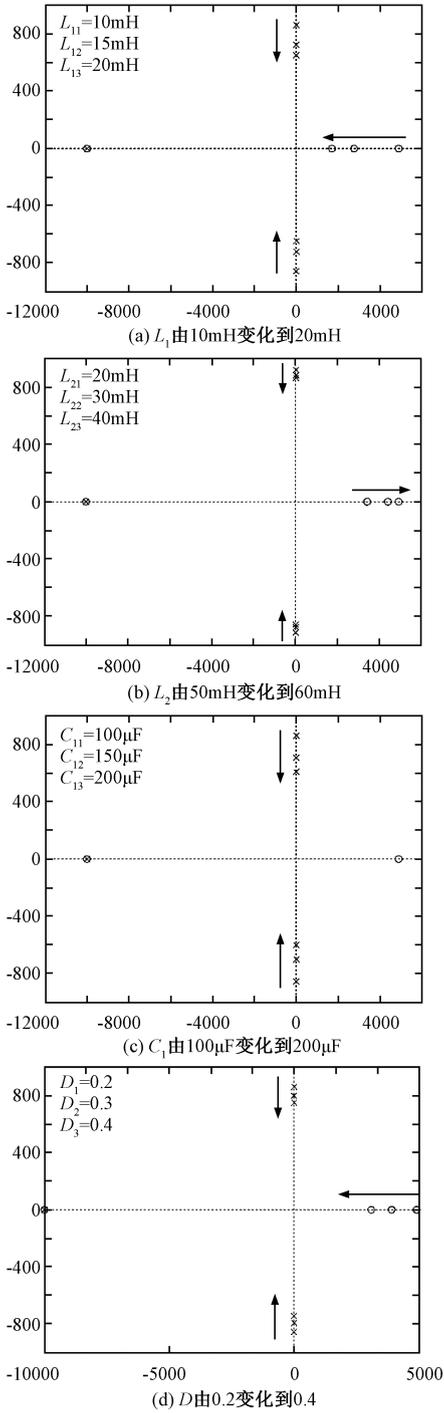


图5 升压网络零极点分布

Fig. 5 Zero pole distribution of boost network

表1 不同工作模式下逆变器电压

Tab. 1 Inverter voltage in different operating modes

拓扑及工作模式	$U_{c1}/V$	$U_{c2}/V$	$U_o/V$	升压系数
二次升压 CCM	77	42	119	2.38
二次升压 DCM	116	63	179	3.58
Z源逆变器	108	108	108	2.16

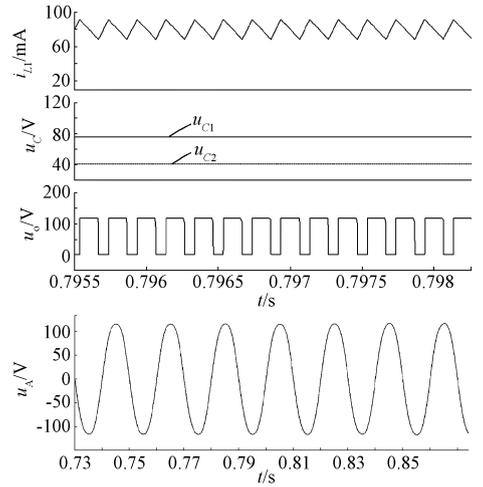


图6 CCM下电感电流、电容电压、直流母线电压和A相输出电压波形

Fig. 6 Waveforms of inductor current, capacitor voltage, DC bus voltage and A phase output voltage under CCM

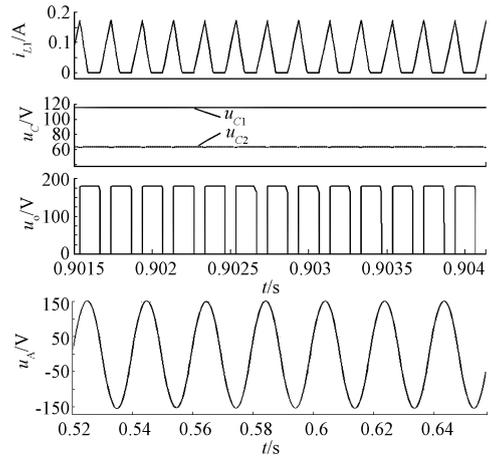


图7 DCM下电感电流、电容电压、直流母线电压和A相输出电压波形

Fig. 7 Waveforms of inductor current, capacitor voltage, DC bus voltage and A phase output voltage under DCM

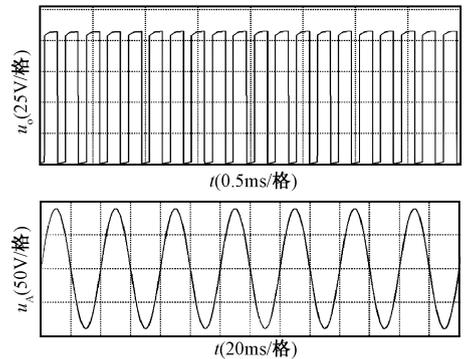


图8 Z源逆变器直流母线电压和A相输出电压  
Fig. 8 DC bus voltage and A phase output voltage of Z-source inverter

实验结果如图9所示。图9(a)为电感 $L_1$ 电流,可以看出逆变器工作于CCM模式,图9(b)和图9(c)所示 $U_{C1}$ 和 $U_{C2}$ 分别为83V和41V,图9(d)所示直流母线电压幅值为124V,图9(e)所示A相输出电压幅值为111V。各电压值与公式计算值近似相等,验证了原理的正确性,说明该逆变器具有升压系数高的优点。

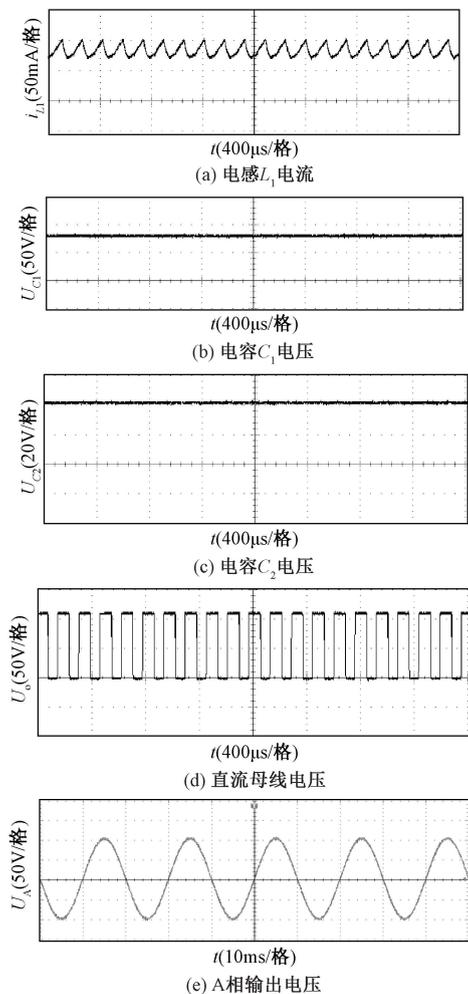


图9 逆变器实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of inverter

## 6 结论

研究了二次升压式逆变器的拓扑结构及其特性,分析了电路在CCM和DCM模式下的工作情况和升压系数。仿真和实验表明二次升压式逆变器具有如下优势:

(1)能够实现单级升压逆变,通过调节直通比和调制比灵活调节输出电压,电路升压能力强,电压调节范围大。

(2)在CCM模式下输入电流连续,对输入侧电能质量影响小,在DCM模式下可以获得更高的升压系数。

(3)电路包含升压部分和缓冲部分,可降低瞬态过电压和器件开关损耗。

(4)二次升压式逆变器可以直接使用传统电压源型逆变器的控制方式,控制方式灵活。

## 参考文献 (References):

- [1] 谷青发, 王杰 (Gu Qingfa, Wang Jie). 逆变型微网下垂控制器参数选择和稳定性分析 (Droop controller parameter selection and stability analysis for inverter-interfaced microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 34-40.
- [2] Tseng K, Huang C, Shih W. A high step-up converter with a voltage multiplier module for a photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (6): 3047-3057.
- [3] 周哲, 王萍, 薛利坤, 等 (Zhou Zhe, Wang Ping, Xue Likun, et al.). 高增益开关电容光伏微型逆变器 (High-gain photovoltaic micro-inverter based on switched capacitor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (6): 64-69.
- [4] 陆治国, 刘捷丰, 郑路遥, 等 (Lu Zhiguo, Liu Jiefeng, Zheng Luyao, et al.). 输入串联输出串联高增益Boost变换器 (Input-series output-series high gain boost converter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (30): 27-31.
- [5] 张阳, 黄守道 (Zhang Yang, Huang Shoudao). 基于Z源逆变器的直驱永磁风力发电并网控制 (Control strategy of three-phase Z-source grid-connected inverter for direct-drive wind generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 14-18.
- [6] 韩西坪, 同向前, 卢志, 等 (Han Xiping, Tong Xianqian, Lu Zhi, et al.). 变流器型分布式电源的短路电流响应特性 (Short-circuit current characteristics of inverter based distributed generators) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 28-33.
- [7] Peng Fangzheng. Z-Source Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2003, 39(2): 504-510.
- [8] Tang Yu, Xie Shaojun, Ding Jiudong. Pulse width modulation of Z-source inverters with minimum inductor current ripple [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

- 2014, 61(1): 98-106.
- [9] Supatti U, Peng F Z. Z-source inverter based wind power generation system [A]. 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies [C]. 2008. 634-638.
- [10] Xing Xiangyang, Zhang Chenghui, Chen Alian, et al. Space vector modulated method for boosting and neutral voltage balancing in Z-source three-level T-type inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (2): 1621-1631.
- [11] Pires V Fernão, Cordeiro Armando, Foito Daniel, et al. Quasi Z-source inverter with a T-type converter in normal and failure mode [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (11): 7462-7470.
- [12] 孙凯, 王全东, 李方正, 等 (Sun Kai, Wang Qundong, Li Fangzheng, et al.). T型三电平逆变器的共模干扰机理研究 (Study on common mode interference mechanism in T-type three-level inverters) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 1-7.
- [13] Arunkumar G, Gnanambal I, Karthik P C, et al. Proportional and integral constants optimization using bacterial foraging algorithm for boost inverter [J]. Energy Procedia, 2016, 90: 535-539.
- [14] 丁新平, 苑红, 杨水涛, 等 (Ding Xinping, Yuan Hong, Yang Shuitao, et al.). 单级可升压逆变电路统一拓扑: 电抗源逆变电路 (X-Source inverter: generic topology of the single-stage boost inverters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (19): 5030-5038.
- [15] 赵健伍, 黄文新, 周玉斐, 等 (Zhao Jianwu, Huang Wenxin, Zhou Yufei, et al.). 带抽头电感的准Z源逆变器建模与特性分析 (Modeling and analysis of tapped-inductor quasi-Z-source inverter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (6): 7-16.

## Research on operating characteristics of quadratic boost inverter

LI Wen-hua<sup>1</sup>, HU Qi<sup>1</sup>, LU Shan-nian<sup>2</sup>, ZHANG He<sup>1</sup>, ZHENG Hang<sup>1</sup>

(1. Province-Ministry Joint State Key Laboratory of Electrical Equipment Reliability and Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Tengen Electric Co. Ltd., Wenzhou 325604, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low boost capacity and large capacitive stress of the traditional single stage boost inverter, a topology of quadratic boost inverter is proposed. The working characteristics, boost coefficient and critical inductance of the circuit under different conduction modes are analyzed. The small signal model of boost network is established. The influence of the parameter variation on the dynamic response and ripple of the circuit is discussed through the pole-zero distribution of the system. Simulations and experiments show that the boost coefficient of quadratic boost inverter is inversely proportional to the square of the non-through ratio under CCM. The inverter has the advantages of high boost coefficient, high reliability and continuous input current, which is suitable for the situation of low input voltage and large voltage range, such as photovoltaic, wind power and so on.

**Key words:** inverter; single stage boost; through zero vector; threshold inductance; small signal model