

一种新型开关电感型Quasi-Z源逆变器

传统Z源逆变器通过直通状态实现升降压功能，但是传统Z源逆变器的升压能力有限，随着输出电压的升高，电容电压越来越大，且存在起动冲击问题。提出一种改进型Quasi-Z源逆变器拓扑结构，以改善逆变器的工作性能。在保留传统Quasi-Z源逆变器优点的同时，具有以下特点：可有效降低电容电压应力，提高系统可靠性且有助于降低系统的体积和成本；可有效提高逆变器的升压能力，使其可以适用于需要高增益的场合；有效提高抑制内在的起动冲击电流能力。在理论研究的基础上，基于简单升压控制下，通过仿真验证了新型Quasi-Z源逆变器的正确性和优点。

杨世强 苏宏升 高云波 王双双/兰州交通大学自动化与电气工程学院

0 引言

Z源逆变器^[1]由于其独特的阻抗源（Z源）网络，通过逆变桥同桥臂直通状态升高电压，从而不需要笨重的变压器或DC/DC变换器，可以在很大程度上缩小系统体积，降低系统成本，在以燃料电池、光伏和风力为代表的新能源发电领域得到了高速发展，并且都有着广泛的应用前景^[2-4]。理论上，Z源逆变器可以得到无限大的电压增益，但由于逆变器开关器件的耐压限制，Z源逆变器的直通占空比 D 和调制因数 M 相互牵制，这些因素都限制了输出电压增益。为了可以得到高电压增益的输出电压，就必须使用小的调制因数。然而，小的调制因数会导致开关器件的电压应力更大。同时小的调制因数也会降低电压利用率，增加系统的不稳定性。因而提升Z源网络的升压因子 B ，使得Z源逆变器能够在更大的调制因数下得到相同的电压增益，同

时减少开关器件的电压应力是值得研究的问题。

为了进一步提升Z源逆变器的升压能力，减小成本，使其更好地应用于新能源发电系统。国内外学者对Z源逆变器开展了大量的研究，研究内容主要包括Z源逆变器的电路拓扑结构和调制策略，为此提出了多种新型Z源逆变器拓扑结构^[5-9]。其中部分新型Z源逆变器能够降低电容电压应力，抑制起动浪涌电流，但是不能完全提升升压能力，或者在改进的同时增加了系统的成本和复杂性。

传统Z源逆变器存在以下缺陷：①Z源网络电容两端电压高于输入电压，因此高压电容器就会被使用，这会导致较大的成本和体积；②逆变器存在起动冲击问题，这样会损坏开关器件；③输入电流不连续，导致效率降低且有损直流电流源使用寿命。为解决传统Z源逆变器的缺陷，提出一种新型的准Z源逆变器，与传统Z源逆变器相比，其具有以下优点：①新型拓扑结构具有内在的抑制起动冲击电流能力，并且使得输入电流连续；②可以降低Z源网络电容电压应力，进而降低成本与体积；③开关电感型技术应用到Z源逆变器中，虽然成本有所增加，但升压能力得到了很大的提升。

1 传统Z源逆变器的原理分析

传统三相电压型逆变器一共有8种工作状态，其中有6个为非零电压矢量，2个为零矢量电压，而Z源逆变器可以有9个工作状态，在传统8种工作状态的基础上增加了一个直通零矢量状态。正是由



杨世强/硕士研究生

关键词/Keywords

Z源逆变器·
电压应力·
升压因子·
简单升压控制·

于增加的直通零矢量使得Z源逆变器具有了升压和降压的功能。其主电路结构拓扑图如图1所示。

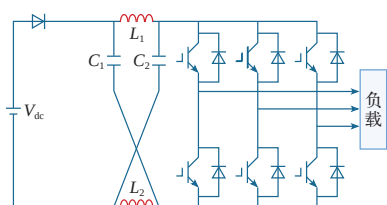


图1 传统Z源逆变器主电路结构

在Z源逆变器中,当逆变器工作在桥臂上下器件同时导通状态,即直通零矢量状态时,逆变器桥臂可以等效为短路,其等效电路如图2a所示。当逆变器工作于其他6个有效工作状态时,逆变器桥臂可以等效为一个电流源,当逆变器工作于两个零电压矢量时,逆变器桥臂可以等效为一个零值电流源,其等效电路图如图2b所示。

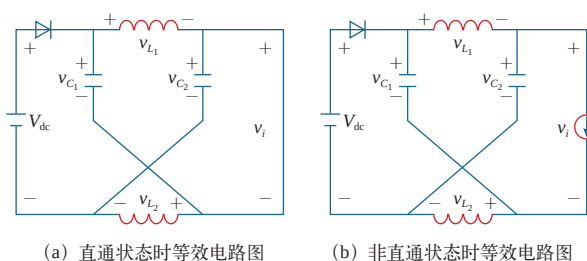


图2 Z源逆变器等效电路

由文献[1]可以知道,Z源电容电压可以表示为

$$v_c = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc} \quad (1)$$

式中, D 为直通占空比, $D = T_0/T$ 。

由式(1)可以看出,电容电压 v_c 比直流电压高,这样会造成电容上的电压应力较大。Z源网络与逆变器之间的直流母线电压峰值可表示为

$$v_i = \frac{V_{dc}}{1-2D} = BV_{dc} \quad (2)$$

式中, B 为升压因子; v_i 为直流母线电压峰值。

逆变器交流侧输出相电压的峰值为

$$v_o = M \frac{v_i}{2} = MB \frac{v_i}{2} \quad (3)$$

式中, M 为逆变器的调制因数。

显然通过调整升压因子和调制因数就可以控制交流侧输出电压的大小。当输入电压较低时,此时 $B > 1$ 实现升压功能。

2 新型Z源逆变器原理分析

将开关电感型技术应用到Z源网络中来提升Z源逆变器的升压能力。其新型Z源逆变器的电路拓扑结构如图3所示,在新型Z源逆变器拓扑结构中,Z源网络是按照直通状态和非直通状态的改变而配置的。在直通状态, VD_1 是关闭的,类似于传统的逆变器。4个二极管 VD_2 、 VD_4 、 VD_5 和 VD_7 导通,2个二极管 VD_3 、 VD_6 截止。然后,3个电感 L_2 、 L_3 和 L_4 并联连接并且由电容器充电。直通状态的等效电路如图4a所示。在非直通状态下, VD_1 是导通的。4个二极管 VD_2 、 VD_4 、 VD_5 和 VD_7 关闭,2个二极管 VD_3 、 VD_6 导通。然后,3个电感 L_2 、 L_3 和 L_4 串联,此时电感和电源同时为负载和电容充电。等效电路如图4b所示。假设电感器(L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4)具有相同的电感。

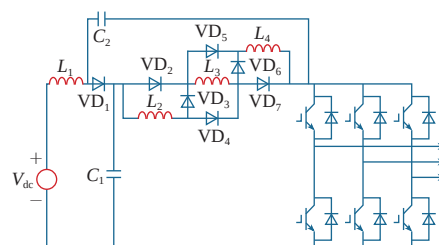


图3 新型开关电感型Z源逆变器

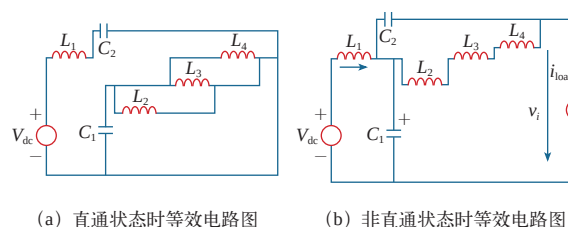


图4 新型Z源逆变器等效电路

直通状态时由图4a的等效电路可得

$$\begin{cases} v_{L1} - v_{dc} - v_{C2} = 0 \\ v_{C1} = v_{L2} = v_{L3} = v_{L4} \end{cases} \quad (4)$$

非直通状态时由图4b的等效电路可得

$$\begin{cases} v_{L1} - v_{dc} + v_{C1} = 0 \\ -v_{C1} = 3v_{L2} = 3v_{L3} = 3v_{L4} \\ v_i = v_{C1} + v_{C2} \end{cases} \quad (5)$$

假设逆变器的开关周期为 T ,直通零电压的作用时间为 T_0 ,非直通状态工作时间为 T_1 ,则在一个开关周期中,电感作为一个储能元件,稳态时的

能量应该为零, 因此电感两端的电压在一个开关周期中的平均值为零, 对于电感 L_1 , 即

$$\bar{v}_1 = \frac{v_{C_1}T_0 + T_1 \frac{v_{C_2}}{3}}{T} = 0 \quad (6)$$

推算式 (6) 可以得到

$$v_{C_2} = \frac{3D}{1-D} v_{C_1} \quad (7)$$

同理对于电感 L_2 , 可以得到

$$\bar{v}_2 = \frac{(v_{dc} + v_{C_2})T_0 + T_1(v_{dc} - v_{C_1})}{T} = 0 \quad (8)$$

将式 (7) 代入推算得

$$\begin{cases} v_{C_1} = \frac{1-D}{1-2D-2D^2} V_{dc} \\ v_{C_2} = \frac{3D}{1-2D-2D^2} V_{dc} \\ v_i = \frac{1+2D}{1-2D-2D^2} V_{dc} = BV_{dc} \end{cases} \quad (9)$$

比较式 (1)、式 (2) 与式 (9) 可得, 相比于传统Z源逆变器, 新型逆变器的Z源网络电容电压应力大大减少, 且升压能力得到了很大的提升。图5给出了两种Z源网络的升压因子与直通占空比的关系曲线。由图5可以看出, 与传统相比, 新型逆变器的升压能力有了很大的提高。

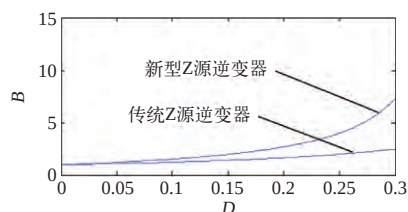


图5 传统Z源网络与新型Z源网络升压能力对比

3 简单升压控制原理

传统三相电压型逆变器工作状态包含6个有效矢量以及2个传统零矢量。三相改进型Z源逆变器工作状态包含6个有效矢量以及2个传统零矢量和1个直通零矢量, 逆变器输出电压由逆变器的6个有效矢量决定。也就是说, 2个传统零矢量和1个直通零矢量对逆变器负载的作用效果是一样的, 因此, 可以用直通零矢量代替部分传统零矢量, 这样既不改变有效矢量的作用效果, 且能实现Z源网络的升压。对于改进型Z源逆变器, 直通零矢量的

作用时间还受逆变器调制因数的影响, 因此在插入直通零矢量时要充分考虑调制因数的限制。改进型Z源逆变器之所以能够实现升压, 就是因为直通零矢量的插入, 因此如何控制直通零矢量的插入是改进型Z源逆变器实现升压控制的关键。

根据需控制的电压增益就可以实现逆变器的升压或者降压。根据式 (3) 可知, 当逆变器直流输入电压与交流输出电压峰值确定时, 就可以确定逆变器电压增益。如果知道了升压因子与逆变器调制因数的关系, 就可以确定Z源网络的直通占空比和逆变器调制因数。通过调节逆变器调制因数得到三角载波与正弦调制波之间的幅值关系, 就可以得到想要的输入输出关系。

所谓简单升压控制^[4,12]就是将直通零矢量部分地代替传统零矢量, 这样既不影响逆变器的调制特性, 而且由于直通零矢量的插入增加了逆变器输入侧直流电压的峰值。

图6为简单升压控制的实现方法。

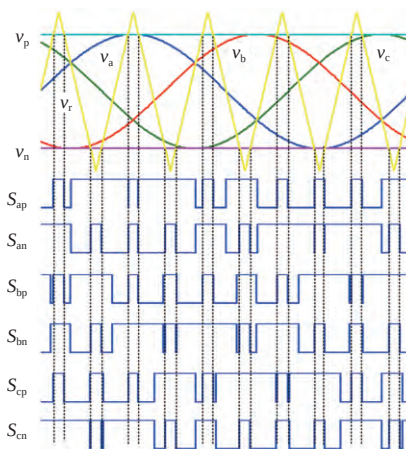


图6 简单升压控制示意图

图6中, v_p 、 v_n 为直通零矢量调制信号; v_a 、 v_b 和 v_c 为三相正弦调制信号; v_r 为三角波载波信号。当三相正弦调制信号满足式 (10) 时, 逆变器工作于零矢量状态。

$$\begin{cases} v_r > v_a \\ v_r > v_b \\ v_r > v_c \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} v_r < v_a \\ v_r < v_b \\ v_r < v_c \end{cases} \quad (10)$$

$$v_r > v_p \text{ 或 } v_r < v_n \quad (11)$$

当直通零矢量调制信号满足式 (11) 时插入

直通零矢量, 就实现了简单升压控制。

4 仿真分析

新型Z源逆变器的控制策略与传统Z源逆变器一致。应用简单升压控制方法对上述两种拓扑结构仿真分析。具体仿真参数如下。

Z源网络: $L_1=L_2=L_3=L_4=2.4\text{ mH}$, $C_1=C_2=1\ 000\ \mu\text{F}$; 输出滤波器: $L_f=3\text{ mH}$, $C_f=10\ \mu\text{F}$; 开关频率: 8.6 kHz ; 每相阻性负载: $12.3\ \Omega$; 输入直流电压: 380 V 。

其仿真结果如图7、图8所示。两图中波形自上而下分别为直流链峰值电压 v_i , 电容的电压 v_C 及其交流输出电压 v_{abc} 。波形为输入 380 V , 直通占空比 $D=0.16$, 调制因子 $M=0.84$ 下的仿真波形。

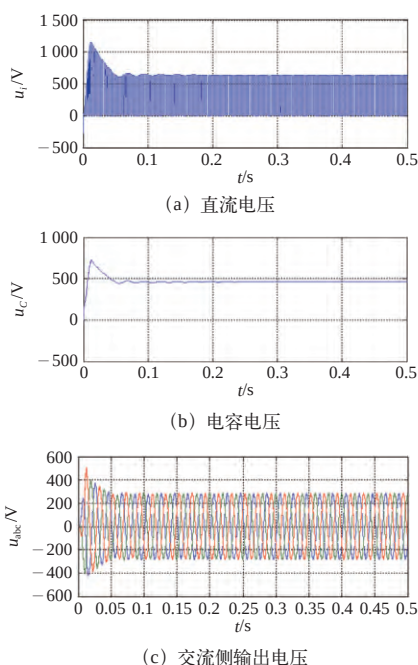
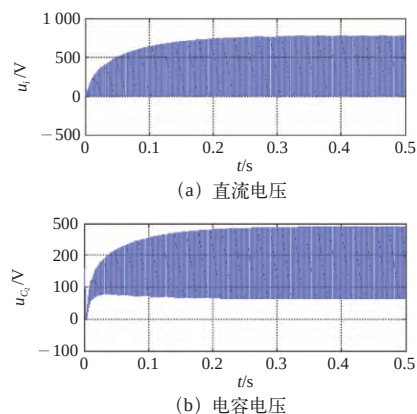
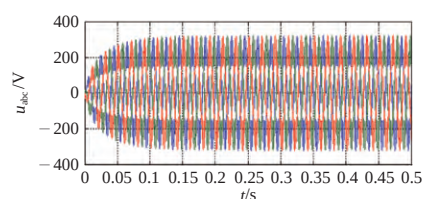


图7 传统Z源逆变器



(c) 交流侧输出电压

图8 新型Z源逆变器

从仿真结果中可以看出, 传统拓扑的开关器件、电容电压应力都高于新型拓扑结构, 并且太低的调制因子会导致输出谐波增大, 影响输出电能质量。新型Z源逆变器可以使起动过程的电容冲击电压和直流侧冲击电压大大降低。充分显示了新型Z源逆变器在降低电压应力和提高升压能力方面的优势。

5 结束语

对所提出的新型Z源逆变器拓扑结构进行了深入分析, 与传统相比, 其具有以下优点。

- 1) 新型拓扑结构具有内在的抑制起动冲击电流能力, 并且使得输入电流连续。
- 2) 可以降低Z源网络电容电压应力, 进而降低成本与体积。
- 3) 开关电感型技术应用到Z源逆变器中, 虽然成本有所增加, 但升压能力得到了很大的提升。

参考文献

- [1] 彭方正, 房绪鹏, 顾斌, 等. Z源变换器 [J]. 电工技术学报, 2004, 19 (2): 47-51.
- [2] Uthane Supatti, Peng F Z. Z-source inverter with grid connected for wind power system [C]. IEEE Transactions on Power Electronics Conference and Exposition, 2009: 398-403.
- [3] Yi Huang, Miaosen Shen, Peng F Z, et al. Z-source inverter for residential photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (6): 1776-1782.
- [4] Research on the Composite Control for PV Grid-connected and Energy-storage based on Quasi-Z-

(下转第45页)

- 2009, 29 (3): 132-137.
- [17] 丁国兴, 王宏彦, 邱建斌, 等. 继电保护装置 IEC 61850通信模型规范化测试软件开发 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (17): 96-101.
- [18] 王德文, 阎春雨, 毕建刚, 等. 变电设备在线监测系统中IEC 61850的一致性测试 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2): 79-85.
- [19] 王德文, 葛亮. 变电站在线监测智能电子设备的自动化测试 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (14): 84-89.
- [20] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (18): 112-116.
- [21] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104.
- [22] 何磊, 郝晓光. 数字化变电站通信网络的性能测试技术 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (10): 75-78.
- [23] 雷霆, 李斌, 黄太贵. 220 kV变电站GPS时间同步系统实现技术 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (11): 71-74.
- [24] 韩本帅, 孙中尉, 崔海鹏, 等. 智能变电站过程层时间同步方式研究 [J]. 中国电力, 2012, 45 (11): 86-90.
- [25] 黄鑫, 王永福, 张道农, 等. 智能变电站IEC 61850时间同步系统与安全评估 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (13): 76-80.
- [26] 王延安, 余义传, 张丹, 等. 一种基于EFSM的变电站通信协议一致性测试模型描述方法 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (4): 91-94.
- [27] 熊海军, 朱永利, 张凡, 等. 基于行为树的IEC 61850智能电子设备互操作性描述与验证 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (24): 66-71.
- [28] 张其林, 王先培, 杜双育, 等. 基于IEC 61850的智能电子设备交互模型形式化描述与验证 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (17): 72-76.
- [29] 曹阳, 张维明, 沙基昌, 等. Petri网在通信网络仿真建模中的应用 [J]. 计算机仿真, 2001, 3 (18): 38-41.
- [30] 廖军, 谭浩, 刘锦德. 基于Pi-演算的Web服务组合的描述和验证 [J]. 计算机学报, 2005, 28 (4): 635-643.
- (收稿日期: 2015-06-30) **EA**

(收稿日期: 2015-06-30) EA

(上接第37页)

- source inverter [C]. 2014 Electronics and Application Conference and Exposition, 2014 : 572-577.
- [5] 徐聪, 程启明, 李明, 等. Z源逆变器及其多种改进拓扑结构的比较 [J]. 电网技术, 2014, 38 (10) : 2926-2931.
- [6] 蔡春伟, 曲延滨, 盛况. 增强型Z源逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (S1) : 259-266.
- [7] 张邵华, 汤雨, 谢少军. 改进Z源逆变器的三次谐波注入控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (10) : 114-119.
- [8] Anderson J, Peng F Z. Four quasi-Z-source inverters [J]. IEEE Power Electronics Specialist Conference, Greece, 2008: 2743-2749.
- [9] Zhu M, Yu K, Luo F L. Switched inductor Electronics, 2010, 25 (8) : 2150-2158.
- [10] Gajanayake C J, Lin L F, Hoay G, et al. Extended boost Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (10) : 2642-2652.
- [11] Shen M, Joseph A, Wang J, et al. Comparison of traditional inverters and Z-source inverter [C]. 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005: 1692-1698.
- [12] Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chaochua, 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.
- (收稿日期: 2015-07-10) EA

(收稿日期: 2015-07-10) EA