

基于开关电感的增强型 Z 源三电平逆变器

王晓刚, 张杰

(广州大学机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 分析了基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)的常规单Z源三电平中点钳位(NPC)逆变器的升压能力, 指出若直通矢量作用时间不超过某一有效矢量的作用时间, 则逆变器的电压增益最大值仅为1.15, 不具备升压能力。对SVPWM方法作出修改, 使电压增益与Z源两电平逆变器的相同。为了进一步提高升压能力, 提出一种增强型Z源网络, 直流母线的正端和负端各引入1个开关电感(SL)单元, 不仅提高电压增益, 而且在相同电压增益的条件下降低了在Z源网络电容的电压应力, 还能实现中点电位平衡。在此基础上又提出了升压能力更强的多单元开关电感增强型Z源网络。仿真结果表明, 改进SVPWM方法和新型拓扑对提高Z源三电平NPC逆变器的升压能力十分有效。
关键词: Z源逆变器; 三电平; 开关电感; 空间矢量脉宽调制

Enhanced Z-source three-level inverter based on switched-inductor

WANG Xiaogang, ZHANG Jie

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The voltage boost capability of conventional single Z-source three-level neutral point clamped (NPC) inverter based on space vector pulse width modulation (SVPWM) is analyzed. If the duty time of a shoot through vector is less than that of a particular effective vector, the maximum voltage gain of the inverter will be just 1.15. The inverter has no voltage boost capability. On that basis, the SVPWM method is modified, this results in higher voltage gain which is identical to that of a two-level Z-source inverter. In order to further improve voltage boost capability, an enhanced Z-source network is proposed. Two switched-inductor (SL) units are connected to the positive bus and negative bus respectively to improve the voltage boost gain. This new topology can achieve lower voltage stress of Z-source capacitors than the conventional three-level Z-source inverter when they have identical voltage gains, and it makes it possible to implement neutral-point potential balancing control. And then, Multicell SL enhanced Z-source network is proposed, which has stronger voltage boost capability than that of SL based topology. Simulation results show that both the improved SVPWM methods and the new topologies can improve the voltage boost capability of Z-source three-level NPC inverter effectively.

Key words: Z-source inverter; three-level; switched inductor; space vector pulse width modulation

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0065-08

0 引言

三电平逆变器因具有开关器件电压应力低、可以工作在较低的开关频率、输出电压电流波形畸变小等优点而在高压、大功率场合有着广阔的应用前景^[1-4]。在各种三电平逆变器拓扑中, 中点钳位式(Neutral Point Clamped, NPC)逆变器的研究和应用最为广泛。但是, 三电平 NPC 逆变器属于降压型拓

扑, 为了保证正常工作, 必须保证直流侧电压大于交流电压的幅值, 从而限制了它在并网发电等场合的应用。

Z 源逆变器自提出以来, 引发了人们的极大兴趣, 并在传统 Z 源逆变器的基础上, 提出了很多新型的 Z 源变换器^[5-8]。Z 源网络也可以和常规三电平 NPC 逆变器结合构成 Z 源三电平 NPC 逆变器。文献[9]提出一种双 Z 源三电平逆变器, 即直流侧包含两个相同的 Z 源网络, 二者的中点与直流侧电容的中点连接, 虽然实现了升压但使用较多的无源器件; 文献[10-12]研究单 Z 源三电平逆变器, Z 源网络少用了一半的无源器件且升压能力与双 Z 源网络相

基金项目: 广州市科技计划项目(2013J4100017); 广州市属高校科研计划项目(2012A034); 广东省高等学校高层次人才项目(2050205-194)

同, 因此应用前景较好。但是, 单 Z 源三电平逆变器的电压增益不高, 三电平逆变器开关器件电压应力为直流侧电压一半的优点没有得到充分利用, 有进一步改进的余地。目前, 对 Z 源两电平逆变器拓扑的研究较多, 如文献[13]介绍的准 Z 源逆变器、文献[14]提出的开关电感准 Z 源逆变器、文献[15]提出的增强型 Z 源逆变器等。这几种拓扑的共同特点是 Z 源网络上下不对称, 即全部 Z 源网络的无源器件均位于直流母线的正端, 若将它们引入到三电平逆变器, 将无法实现直流侧电容的中点电位平衡。

本文首先分析了基于空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)的常规 Z 源三电平逆变器的升压能力, 指出若直通矢量作用时间不超过某一有效矢量的作用时间, 则逆变器的电压增益最大值仅为 1.15, 不具备升压能力。对 SVPWM 方法作出修改, 使电压增益与 Z 源两电平逆变器的相同。为了进一步提高升压能力, 提出一种增强型 Z 源网络, 直流母线的正端和负端各引入 1 个开关电感(Switched-inductor, SL)单元, 不仅提高了电压增益, 而且在相同电压增益的条件下降低了 Z 源网络电容的电压应力, 还能实现中点电位平衡。在此基础上又提出了升压能力更强的多单元开关电感增强型 Z 源网络。仿真结果表明, 改进 SVPWM 方法和新型拓扑对提高 Z 源三电平 NPC 逆变器的升压能力十分有效。

1 Z 源三电平逆变器拓扑和 SVPWM 方法

图 1 所示为常规 Z 源三电平 NPC 逆变器。为了实现升压, 采用半直通的工作方式, 半直通包括上直通和下直通两种状态, 两者的作用时间相等。以 a 相为例, 上直通时, 二极管 VD₁ 导通、VD₂ 截止, V_{DA1} 截止、V_{DA2} 导通, 开关管 VT_{A1}、VT_{A2}、VT_{A3} 导通而 VT_{A4} 关断, 电容 C_{S1} 对电感 L₁ 充电; 下直通时, 二极管 VD₁ 截止、VD₂ 导通, V_{DA1} 导通、V_{DA2} 截止, 开关管 VT_{A1} 关断而 VT_{A2}、VT_{A3}、VT_{A4} 导通, 电容 C_{S2} 对电感 L₂ 充电。可以推导出直流链电压 u_i 和直流输入电压 u_{dc} 之比, 即升压因子为

$$B = \frac{1}{1-2d_s} \quad (1)$$

式中, d_s 是上直通和下直通的占空比。

常规三电平 NPC 逆变器采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)策略, 空间矢量图如图 2 所示。整个矢量空间被分成 6 个大扇区 S₁~S₆, 每个大扇区又被分为 A₁、A₂、B、C₁、C₂、D 共 6 个小扇区, 如图 3 所示。SVPWM 的基本工作原理已有多篇文献作了介绍, 其基本步骤是: 在每个控制周期内判

断参考矢量 u_r 所处的大扇区和小扇区, 确定作用矢量, 再计算每个矢量的作用时间。

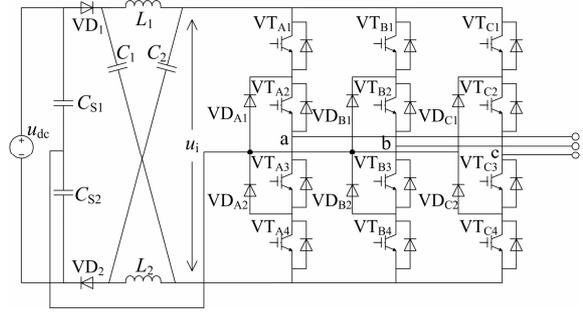


图 1 常规 Z 源三电平 NPC 逆变器

Fig. 1 Conventional Z-source three-level NPC inverter

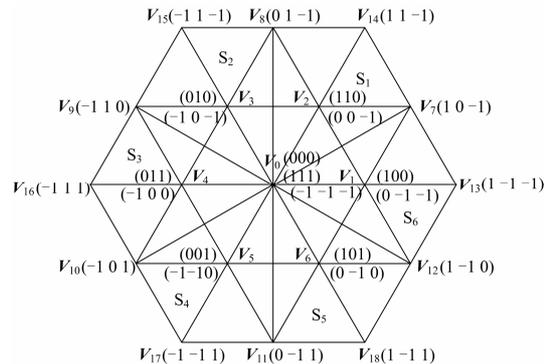


图 2 三电平逆变器空间矢量图

Fig. 2 Space vector diagram of three-level inverter

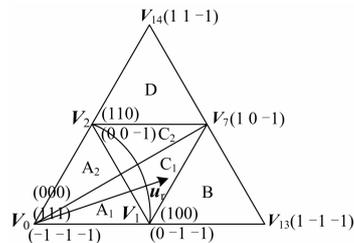


图 3 扇区 S₁ 的划分

Fig. 3 Division of sector S₁

Z 源三电平 NPC 逆变器的 SVPWM 方法是在常规三电平 NPC 逆变器 SVPWM 的基础上插入直通矢量得到的。以参考矢量 u_r 位于扇区 S₁ 的三角形 C₁ 内为例说明直通矢量的插入原理。常规三电平 NPC 逆变器的调制波形如图 4 上半部分所示, 矢量作用顺序为 V₁-V₇-V₂-V₁-V₂-V₇-V₁。Z 源三电平 NPC 逆变器的调制波形如图 4 下半部分所示, 根据直通矢量的插入原则, 在常规三电平 NPC 逆变器调制波的基础上, 在 a 相插入上直通矢量, 在 c 相插入下直通矢量。具体方法是: 在原矢量(100)的作用时间

t_b 内划出 t_s 分配给下直通矢量, 且左右对称, 各作用 $t_s/2$; 在原矢量(0 0 -1)的作用时间 t_a 内划出 t_s 分配给上直通矢量, 且左右对称, 各作用 $t_s/2$ 。在其他小三角形内直通矢量插入原理与此相似。

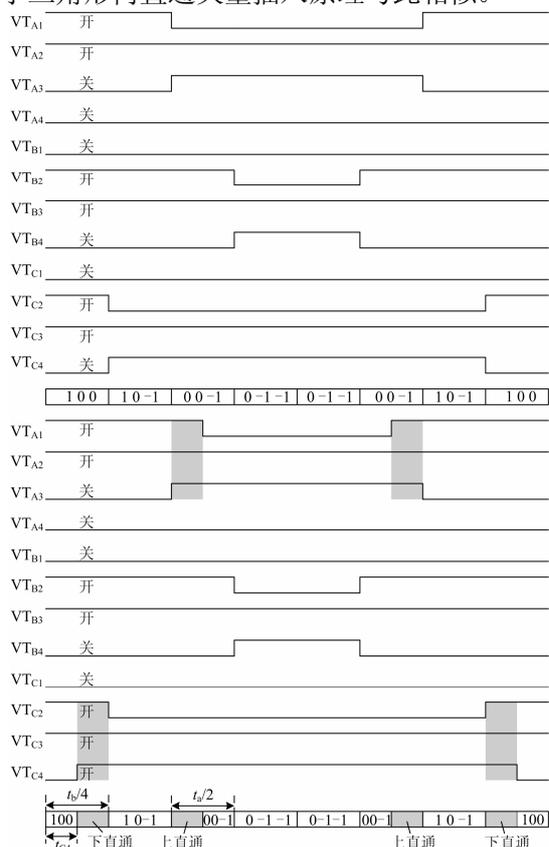


图 4 传统三电平 NPC 逆变器和 Z 源三电平 NPC 逆变器调制波形

Fig. 4 Modulation waveforms of traditional three-level NPC inverter and Z-source three-level NPC inverter

上述 Z 源三电平 NPC 逆变器的常规 SVPWM 方法只在某个有效矢量的作用时间内插入直通矢量, 直通矢量的作用时间不能超过该有效矢量的作用时间, 因此升压能力有限, B 的范围是 $B \leq 2/\sqrt{3}M$, 其中 M 是采用空间矢量脉宽调制控制时的调制因子。逆变器的电压增益 $G=BM$, 其最大值为 $2/\sqrt{3} \approx 1.15$ 。可见, Z 源三电平逆变器的常规 SVPWM 方法不具备升压能力。

仔细观察图 4, 可以发现紧随矢量 $V_2(0 0 -1)$ 的是矢量 $V_1(0 -1 -1)$, 即在这 2 个矢量作用时间内, a 相的开关函数始终为 0。如果直通时间较长, 超过矢量(0 0 -1)的最大作用时间, 可以考虑将上直通的作用时间延长至矢量(0 -1 -1)的作用时间内, 因为无论 a 相处于 {0} 状态还是上直通状态, a 相输出的相电压都为 0, 即对输出电压没有影响。另外, 矢

量 V_1 也不一定平均分成 4 段插入, 即为了获得更长的下直通时间, 可以令两端矢量(1 0 0)的作用时间长于中间矢量(0 0 -1)的作用时间。

仍以扇区 S_1 的三角形 C_1 为例。令 $V_1(1 0 0)$ 的作用时间和 $V_2(0 0 -1)$ 与 $V_1(0 -1 -1)$ 作用时间之和相等, 均为 $(t_a+t_b)/2$ (半个开关周期内为 $(t_a+t_b)/4$), 如图 5 的上半部分所示。上直通在 a 相的(0 0 -1)和(0 -1 -1)作用时间内插入, 下直通在 c 相的(100)作用时间内插入, 上直通和下直通的时间相等, 即 $t_{US}=t_{DS}=t_s$, 可见与原方法相比, 在其他条件相同的情况下, 上直通和下直通时间的范围得到了扩展, Z 源三电平逆变器的升压能力得到了提升。

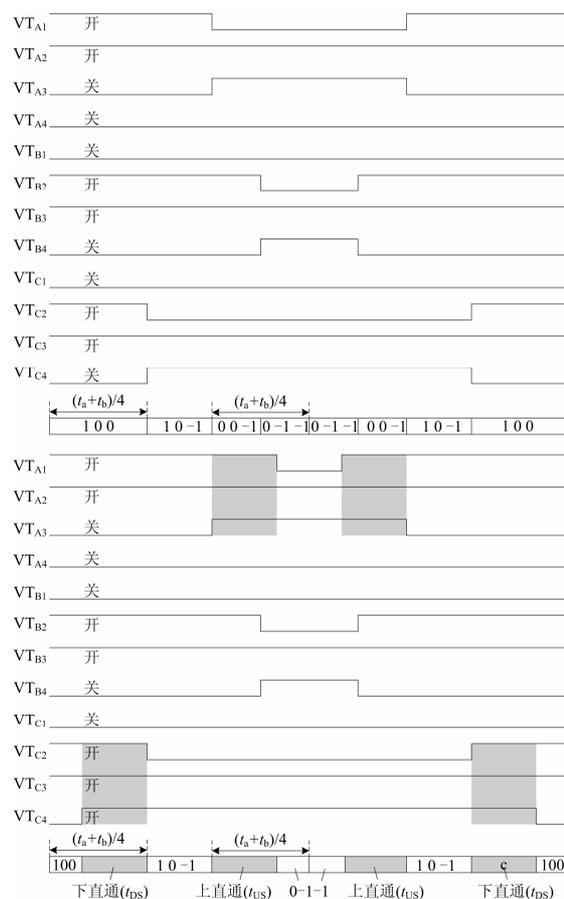


图 5 传统三电平 NPC 逆变器和改进后的 Z 源三电平 NPC 逆变器调制波形

Fig. 5 Modulation waveforms of traditional three-level NPC inverter and Z-source three-level NPC inverter

下面分析采用改进 SVPWM 策略后 Z 源三电平逆变器的升压能力。因为 t_s 不能超过 $(t_a+t_b)/2$, 有

$$t_s \leq (t_a + t_b) / 2 = T - \frac{\sqrt{3}}{2} M \left[\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) + \sin \theta \right] \quad (2)$$

利用三角函数将上式变换为

$$\frac{t_s}{T} \leq 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} M \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3)$$

式中, $0 \leq \theta \leq \pi/6$ 。结合 u_r 位于三角形 B 和 D 内的分析, 最终得

$$d_s = \frac{t_s}{T} \leq 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} M \quad (4)$$

代入升压因子公式, 得

$$B = \frac{1}{\sqrt{3}M - 1} \quad (5)$$

电压增益为

$$G = \frac{M}{\sqrt{3}M - 1} \quad (6)$$

可见, 采用这种改进的 SVPWM 策略后, Z 源三电平逆变器的升压因子和电压增益与 Z 源两电平逆变器采用最大恒定升压调制方法时相同。如 $M=0.7$ 时, $G=3.30$ 。

2 基于 SL 的增强型 Z 源三电平逆变器

2.1 电路拓扑

基于开关电感的增强型 Z 源三电平逆变器主电路如图 6 所示, 由于 Z 源网络上下对称, 因此能够实现中点电位平衡控制。

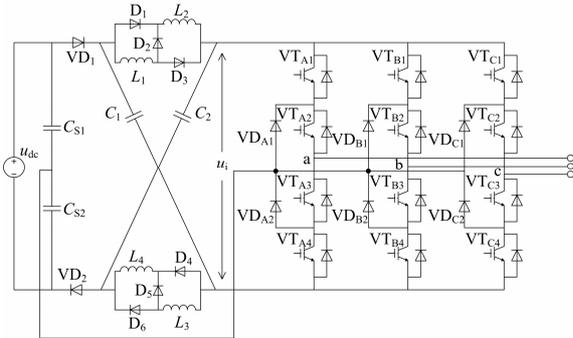


图 6 基于 SL 的增强型 Z 源三电平逆变器

Fig. 6 Enhanced Z-source three-level inverter based on switched-inductor

C_{S1} 和 C_{S2} 为直流侧电容, 在控制中点电位平衡的情况下, 有 $u_{CS1}=u_{CS2}=u_{dc}/2$ 。电感 L_1 、 L_2 以及二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 构成第一组开关电感, 电感 L_3 、 L_4 以及二极管 D_4 、 D_5 、 D_6 构成第二组开关电感。两组开关电感、电容 C_1 和 C_2 以及二极管 VD_1 和 VD_2 组成增强型 Z 源网络, 其作用是实现升压, 且升压因子高于传统 Z 源网络。由于增强型 Z 源网络结构对称, 因此 4 个电感电压和两个电容电压在任何时刻均相等, 即

$$\begin{cases} u_{L1} = u_{L2} = u_{L3} = u_{L4} = u_L \\ u_{C1} = u_{C2} = u_C \end{cases} \quad (7)$$

2.2 工作原理

NPC 逆变器有两类工作状态: 非直通状态和直通状态。具体原理如下:

(1) 非直通状态

非直通时的等效电路如图 7 所示。

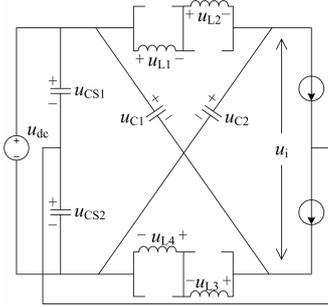


图 7 增强型 Z 源三电平逆变器非直通状态等效电路
Fig. 7 Equivalent circuit of enhanced Z-source three-level inverter under non-shoot-through state

此时二极管 VD_1 、 VD_2 导通, 2 个开关电感单元中 D_2 、 D_5 导通, D_1 、 D_3 、 D_4 、 D_6 截止, 电感 L_1 和 L_2 串联, L_3 和 L_4 串联。三电平 NPC 逆变器和负载可等效为两个电流源, 由 KVL 定律得

$$\begin{cases} 2u_L + u_C = u_{dc} \\ u_i = u_C - 2u_L \end{cases} \quad (8)$$

(2) 半直通状态

所谓半直通指得是在一个开关周期内插入等时间的上直通矢量和下直通矢量。以 a 相为例, 上直通时的等效电路如图 8(a) 所示, 此时逆变器中开关管 VT_{A1} 、 VT_{A2} 、 VT_{A3} 和二极管 VD_{A2} 导通, Z 源网络中二极管 VD_1 和开关电感单元中的 D_1 、 D_3 、 D_4 、 D_6 导通, D_2 、 D_5 截止, 电容 C_{S1} 中的能量转移到电感 L_1 和 L_2 中。下直通时的等效电路如图 8(b) 所示。此时逆变器中开关管 VT_{A2} 、 VT_{A3} 、 VT_{A4} 和二极管 VD_{A1} 导通, Z 源网络中二极管 VD_2 和开关电感单元中的 D_1 、 D_3 、 D_4 、 D_6 导通, D_2 、 D_5 截止, 电容 C_{S2} 中的能量转移到电感 L_3 和 L_4 中。

无论上直通还是下直通, 根据 KVL 定律, 均有

$$\begin{cases} u_L = u_{dc} / 2 \\ u_i = u_C - u_L \end{cases} \quad (9)$$

根据电感电压的伏秒平衡, 由式(8)和式(9)可得电容电压

$$u_C = \frac{u_{dc}}{1 - 2d_s} \quad (10)$$

由式(9)和式(10), 得直流链电压为

$$u_i = 2u_C - u_{dc} = \frac{1+2d_s}{1-2d_s} u_{dc} = B u_{dc} \quad (11)$$

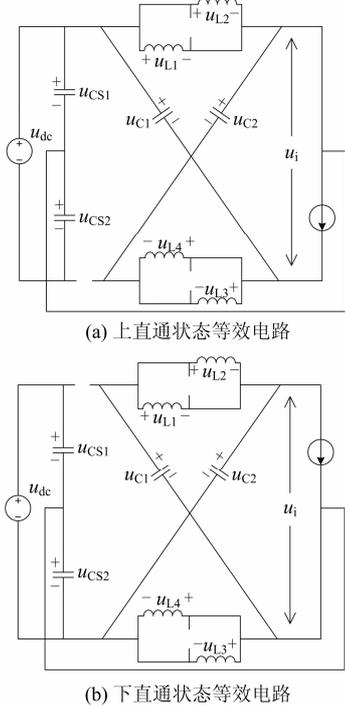


图 8 增强型 Z 源三电平逆变器半直通状态等效电路
Fig. 8 Equivalent circuits of enhanced Z-source three-level inverter under upper and lower shoot-through states

2.3 Z 源网络的升压能力

为了对比增强型 Z 源网络和常规 Z 源网络的升压能力, 由式(1)和式(11)作出两种 Z 源网络升压因子和直通占空比的关系曲线, 如图 9 所示。可见基于 SL 的增强型 Z 源网络比常规 Z 源网络有更强的升压能力。例如 d_s 为 0.4 时, 常规 Z 源网络的升压因子为 5, 而增强型 Z 源网络的升压因子达到 9。

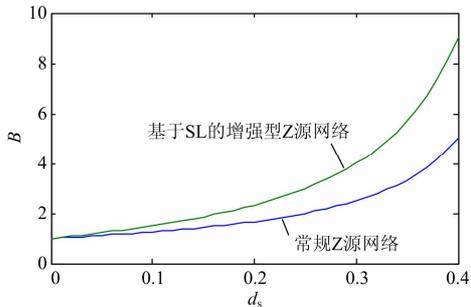


图 9 基于 SL 的增强型拓扑和常规拓扑的升压能力对比
Fig. 9 Comparison of voltage boost capability of SL based topology and conventional topology

2.4 采用改进 SVPWM 时逆变器的整体升压能力

直通占空比 d_s 被限制在 $1-\sqrt{3}M/2$, 代入式(11),

再由电压增益 $G=MB$, 得电压增益为

$$G = \frac{M(3-\sqrt{3}M)}{\sqrt{3}M-1} \quad (12)$$

SVPWM 调制策略下, 三电平逆变器工作在 C 模式或 BCD 模式时调制因子的范围是 $1/\sqrt{3} \leq M < 2/\sqrt{3}$ 。由式(6)和式(12)作出常规 Z 源三电平逆变器和基于 SL 的增强型 Z 源三电平逆变器的电压增益和调制因子的关系曲线, 如图 10 所示。可见在整个 M 取值范围内, 基于 SL 的增强型 Z 源三电平具有更高的电压增益 G , 整体升压能力更强。

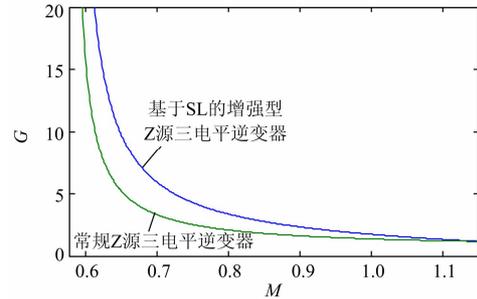


图 10 两种逆变器在 SVPWM 下的电压增益对比
Fig. 10 Comparison of voltage gains of two inverters under control of SVPWM

3 基于多单元 SL 的增强型 Z 源网络

3.1 多单元 SL 增强型 Z 源网络及其升压能力

为了进一步提高 Z 源网络的升压因子, 用 1 个电感和 3 个二极管构成如图 11(a)所示的开关电感单元, 单元之间可按图 11(b)所示的方式连接, 构成多单元增强型 Z 源网络。

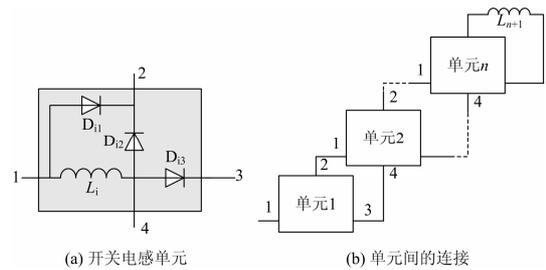


图 11 多单元开关电感
Fig. 11 Multicell switched-inductor

设 Z 源网络上部和下部的开关电感模块数为 n , 非直通时有

$$\begin{cases} (n+1)u_L + u_C = u_{dc} \\ u_i = u_C - (n+1)u_L \end{cases} \quad (13)$$

上直通和下直通时有

$$\begin{cases} u_L = u_{dc} / 2 \\ u_i = u_C - u_L \end{cases} \quad (14)$$

根据电感电压的伏秒平衡原则, 有

$$u_c = \frac{1 + (n-1)d_s}{1 - 2d_s} u_{dc} \quad (15)$$

直流链电压为

$$u_i = \frac{1 + 2nd_s}{1 - 2d_s} u_{dc} = Bu_{dc} \quad (16)$$

模块数 $n=1\sim 3$ 时, 基于 SL 单元的 Z 源网络升压因子和直通占空比的关系曲线如图 12 所示, 可见, 增加 SL 单元的数量, 可进一步提高升压因子。

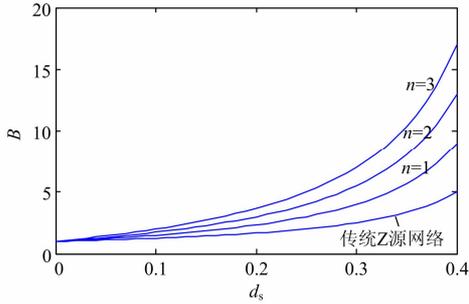


图 12 基于多单元 SL 的模块化增强型 Z 源网络 ($n=1\sim 3$ 时) 升压能力

Fig. 12 Voltage boost capability of enhanced Z-source networks based on multicell SL ($n=1\sim 3$)

3.2 逆变器的整体升压能力

采用改进 SVPWM, 逆变器的整体升压能力即电压增益为

$$G = \frac{M[1 + n(2 - \sqrt{3}M)]}{\sqrt{3}M - 1} \quad (17)$$

单元数 $n=1\sim 3$ 时, 基于 SL 单元的增强型 Z 源三电平逆变器电压增益和调制因子的关系曲线如图 13 所示, 可见增加单元数可大大提高 Z 源三电平逆变器的整体升压能力。如 $n=2$ 、 $M=0.7$ 时, $G=8.49$, 高于常规 Z 源三电平 NPC 逆变器在 $M=0.7$ 时的 3.30 和基于 SL 的 Z 源三电平逆变器在 $n=1$ 、 $M=0.7$ 时的 5.89。

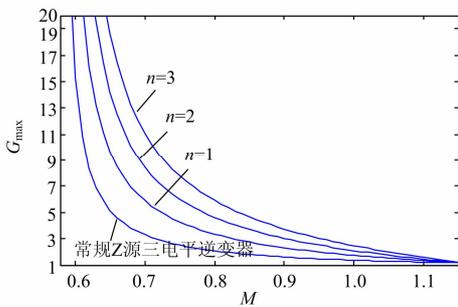


图 13 基于多单元 SL 的增强型 Z 源三电平逆变器 ($n=1\sim 3$ 时) 整体升压能力

Fig. 13 Overall voltage boost capability of enhanced Z-source inverter based on multicell SL ($n=1\sim 3$)

3.3 电容电压应力分析

常规 Z 源三电平 NPC 逆变器的电容电压为

$$u_c = \frac{\sqrt{3}G}{2} u_{dc} \quad (18)$$

对于基于多单元 SL 的 Z 源三电平 NPC 逆变器, 由式(15)~式(17), 得

$$u_c = \left(\frac{\sqrt{3}Gn}{\sqrt{(\sqrt{3}G - 2n - 1)^2 + 4\sqrt{3}nG} - \sqrt{3}G + 2n + 1} + \frac{1}{2} \right) u_{dc} \quad (19)$$

作出两种逆变器 Z 源电容电压与输出电压之比和电压增益 G 的关系曲线, 如图 14 所示。在 G 相同的情况下, 基于多单元 SL 的 Z 源三电平 NPC 逆变器的电容电压应力小于常规 Z 源三电平 NPC 逆变器的电容电压应力, 且 n 越大, 电容电压应力越小。

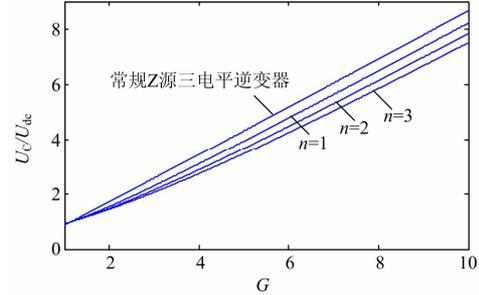


图 14 两种拓扑电容电压应力的对比

Fig. 14 Capacitor voltage stress comparison of the two topologies

4 仿真分析

为了验证改进 SVPWM 算法和基于开关电感的增强型 Z 源三电平 NPC 逆变器拓扑的正确性, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了仿真模型。仿真中使用的参数为: 直流侧电压 $u_{dc}=200$ V, 单 Z 源网络和增强型 Z 源网络中的电容 $C_1=C_2=800$ μ F, 常规 Z 源网络中电感 $L_1=L_2=3$ mH, 而增强型 Z 源网络的单元数 $n=2$, 电感 $L_1=L_2=L_3=L_4=1.2$ mH, 开关频率均为 $f=10$ kHz。

首先分析常规 Z 源三电平 NPC 逆变器使用改进 SVPWM 方法时的升压能力。设 $M=0.7$, 由式(5)算得 $B=4.71$, 由式(6)算得 $G=3.30$ 。图 15 为仿真结果, 其中图 15(a)为脉动的直流链电压, 最大值约为 920 V(理论值 $4.71 \times 200=942$ V), 最小值约为 460 V(理论值 471 V); 图 15(b)为逆变器输出的线电压, 包含 5 个电平; 图 15(c)为滤波后负载得到的相电压, 其幅值约为 320 V(理论值 330 V)。实际值比理论值偏低的原因是由于未采用直流链电压闭环控制, 为避免 Z 源网络谐振, 加入的阻尼电阻产生了压降。

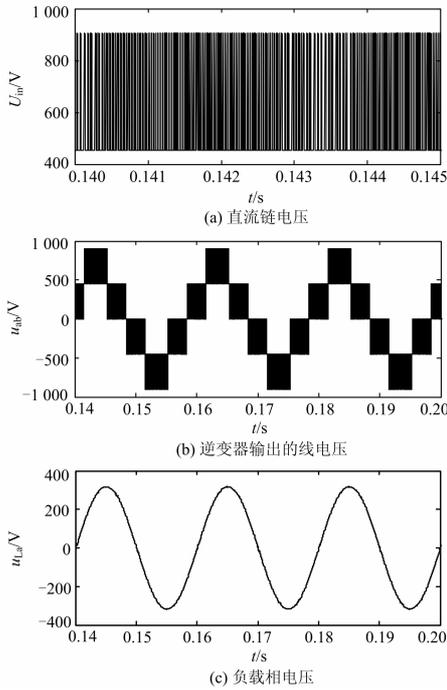


图 15 常规 Z 源三电平逆变器的仿真结果
Fig. 15 Simulation results of conventional Z-source three-level inverter

然后分析基于 SL 的增强型 Z 源三电平 NPC 逆变器使用改进 SVPWM 方法时的升压能力。设 $n=2$ 、 $M=0.7$ ，由式(17)算得 $G=8.49$ ， $B=12.13$ 。图 16 为

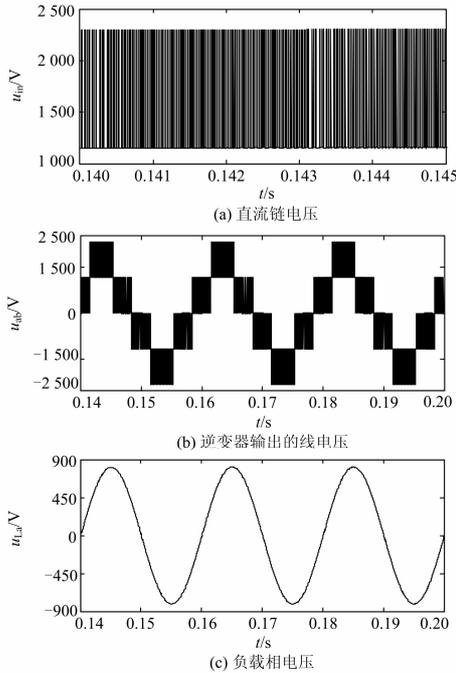


图 16 基于多单元 SL 的增强型 Z 源三电平逆变器仿真结果($n=2$)
Fig. 16 Simulation results of multicell SL enhanced Z-source three-level inverter ($n=2$)

仿真结果,图 16(a)的直流链电压在 2 382 V 和 1 191 V 之间脉动,图 16(b)的线电压峰值为 2 382 V,图 16(c)的负载相电压幅值为 831 V,也稍低于理论值 849 V。

最后比较常规 Z 源网络和基于 SL 的增强型 Z 源网络的电容电压应力。增强型拓扑的 $n=2$,两种拓扑的电压增益 G 均为 5,电容电压应力如图 17 所示,常规拓扑和增强型拓扑的电容电压分别为 838 V 和 715 V,可见在 G 相同的情况下,增强型拓扑的电容电压应力更低。

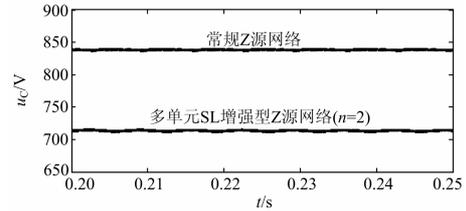


图 17 电容电压应力对比的仿真结果
Fig. 17 Simulation result of voltage stress comparison

5 结论

常规单 Z 源三电平 NPC 逆变器使用改进的 SVPWM 方法能获得与两电平 Z 源逆变器相同的升压能力。基于开关电感的增强型 Z 源三电平 NPC 逆变器升压能力比常规单 Z 源三电平 NPC 逆变器高,基于多单元开关电感的增强型 Z 源三电平 NPC 逆变器的升压能力随着单元数的增加而进一步提高。在电压增益相同的条件下,单元数越高,电容电压应力越低,且均低于常规单 Z 源网络的电容电压应力。改进型 SVPWM 方法和新型拓扑将促进三电平 Z 源逆变器的应用。新型拓扑的直流链电压控制和 midpoint 电位平衡控制将是未来的研究方向。

参考文献

[1] 王峰, 张旭隆, 何凤有, 等. 基于复合模型预测控制的三电平 APF 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 79-85.
WANG Feng, ZHANG Xulong, HE Fengyou, et al. Research of three-level shunt APF control method based on composite model predictive control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 79-85.

[2] 王峰, 张旭隆, 何凤有, 等. 基于复合模型预测控制的三电平 APF 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 79-85.
WANG Feng, ZHANG Xulong, HE Fengyou, et al. Research of three-level shunt APF control method based on composite model predictive control strategy[J]. Power

- System Protection and Control, 2014, 42(11): 79-85.
- [3] 龚博, 程善美, 秦忆. 基于载波的三电平中点电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 172-177.
GONG Bo, CHENG Shanmei, QIN Yi. A three-level neutral point voltage balance control strategy based on carriers of SPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 172-177.
- [4] XIAO H F, XIE S J. Transformerless split-capacitor neutral point clamped three-level PV grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(4): 1799-1808.
- [5] CAO D, JIANG S, YU X H, et al. Low-cost semi-Z-source inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3514-3523.
- [6] QIAN W, PENG F Z, CHA H. Trans-Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 22(2): 706-711.
- [7] 周玉斐, 黄文新, 赵健伍, 等. 一种高升压比的 Z 源逆变器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 239-246.
ZHOU Yufei, HUANG Wenxin, ZHAO Jianwu, et al. A high gain Z-source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 239-246.
- [8] BANAEI M R, DEGHANZADEH A R, SALARY E, et al. Z-source-based multilevel inverter with reduction of switches[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(3): 385-392.
- [9] LOH P C, BLAABJERG F, FENG S Y, et al. Pulse-width modulated Z-source neutral-point-clamped inverter[C] // IEEE APEC'06, 2006, Dallas, USA.
- [10] 张瑾, 齐铂金, 张少如. Z 源三电平中点钳位逆变器的空间矢量调制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 108-114, 144.
ZHANG Jin, QI Bojin, ZHANG Shaoru. A space vector PWM algorithm for Z-source three-level NPC inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 108-114, 144.
- [11] 张伦健, 谭国俊, 陈利萍. 基于双调制波技术的三电平 Z 源逆变器中点电位平衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 91-96.
ZHANG Lunjian, TAN Guojun, CHEN Liping. Neutral-point potential balance control for three-level Z-source inverters based on double modulation wave technique[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 91-96.
- [12] LOH P C, GAO F, BLAABJERG F, et al. Operational analysis and modulation control of three-level Z-source inverters with enhanced output waveform quality[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1767-1774.
- [13] LI Y, JIANG S, CINTRON-RIVERA J G, et al. Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1532-1542.
- [14] NGUYEN M K, LIM Y C, CHO G B. Switched-inductor quasi-Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3183-3191.
- [15] 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(增刊): 259-266.
CAI Chunwei, QU Yanbin, SHENG Kuang. Enhanced Z-source inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 259-266.

收稿日期: 2014-11-17

作者简介:

王晓刚(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与微电网技术; E-mail: iecwng@163.com

张杰(1979-), 男, 博士研究生, 实验师, 研究方向为电力系统控制和可靠性分析。

(编辑 魏小丽)