



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230007

基于 60°坐标系的改进三电平逆变器中点电压调制策略

廖 微¹, 李 飞², 伊 鸣², 游国栋²

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 102300; 2. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘 要: 中点电压不平衡直接影响逆变器输出电压波形的质量以及器件的寿命。针对 NPC 型三电平逆变器中点电压不平衡问题, 对传统的虚拟空间矢量调制方法进行改进, 设计了一种改进的虚拟空间矢量脉冲宽度调制(improved virtual space vector pulse width modulation, IVSVPWM)方法。首先, 定义了新的虚拟矢量, 目的是降低共模电压幅值; 然后, 对扇区小三角形区域进行划分, 计算了虚拟矢量的作用时间, 设计了空间矢量的作用顺序; 最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型, 对传统的虚拟空间矢量脉冲宽度调制(virtual space vector pulse width modulation, VSVPWM)方法和本文设计的 IVSVPWM 方法进行比较。结果表明本文设计的方法具有更好的中点电压平衡效果。

关键词: NPC 型三电平逆变器; 中点电压平衡; 虚拟空间矢量; 共模电压

中图分类号: TK51 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2023)05-0036-05

An Improved Neutral-Point Voltage Modulation Strategy Based on 60° Coordinate System for Three-Level Inverter

LIAO Wei¹, LI Fei², YI Ming², YOU Guodong²

(1. System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 102300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The neutral point voltage imbalance directly affects the quality of the inverter output voltage waveform and the lifetime of the device. Aiming at the problem of neutral point voltage imbalance in NPC type three-level inverters, we improved the traditional virtual space vector modulation method and designed an improved virtual space vector pulse width modulation (IVSVPWM) method. In our proposed method, first, a new virtual vector is defined to reduce the amplitude of common-mode voltage. Then, the small triangular area of the sector is divided, the action time of the virtual vector is calculated, and the action sequence of the space vector is designed. Finally, a simulation model is built in MATLAB/Simulink, and the traditional virtual space vector pulse width modulation (VSVPWM) method is compared with the IVSVPWM method designed in this article. The results show that our proposed method has better midpoint voltage balance effect.

Key words: NPC type three-level inverter; neutral point voltage balance; virtual space vector; common mode voltage

NPC 型三电平逆变器是目前广泛应用的逆变器类型之一, 其中点电压不平衡和共模电压幅值高的问题关系到逆变器的性能及实际应用^[1-4]。中点电压不平衡直接影响逆变器输出电压波形的质量以及器件的寿命等; 共模电压虽然不会对逆变器的性能产生明显影响, 但是共模电压高不仅会对周围的操作人员以

及设备造成危害, 还会降低逆变器的稳定性^[5-7]。这两个问题如果不加以控制, 会给逆变器的运行产生很大的影响, 甚至会阻碍逆变器的发展和广泛应用。

关于中点电压的平衡方法, 目前国内外主要使用硬件控制和软件控制 2 种方法。在硬件控制方面, 主要有 3 种途径^[8-12], 分别为电阻分压法、集成运放法、

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-05-02

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(17YFZCNC00230); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(自然科学基金)重点项目(13JCZDJC29100)

作者简介: 廖 微(1979—), 男, 湖南人, 副研究员; 通信作者: 游国栋, 教授, yougdong1973@sohu.com

电感耦合法。相对硬件控制方法,软件控制则具有很大的优势:首先,它不需要额外添加硬件电路和器件,可以有效控制成本^[13];其次,只需要对逆变器拓扑的控制策略进行优化,就能够实现中点电压平衡,更适合实际应用^[14]。因此,软件控制一直是研究者们研究的热点。

基于正弦载波的脉冲宽度调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)方法一般是向逆变器注入零序电流,以抵消中点电压的不平衡分量,从而达到中点电压平衡^[15]。空间矢量脉冲宽度调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)方法是 Yosuluro Murai 教授在 20 世纪 80 年代提出的^[16],该方法容易实现,且对中点电压的控制也更加简单。其原理是利用三相桥臂上不同开关的通断产生不同的状态组合,将这些组合状态表示为电压矢量,并通过这些不同的状态组合合成输出电压^[17]。文献[18-19]提出基于 60°坐标系的 SVPWM 方法,该类方法是将 SVPWM 方法从 90° α - β 坐标系转换到 60° g - h 坐标系上进行运算,结果表明该方法简化了计算流程,提高了运算效率。

本文以 NPC 型三电平逆变器为研究对象,在分析传统空间矢量调制方法的基础上,设计了一种基于 60°坐标系改进的虚拟空间矢量脉冲宽度调制(improved virtual space vector pulse width modulation, IVSVPWM)方法,重新定义了虚拟矢量,划分小三角形,在实现 NPC 三电平逆变器中点电压平衡的同时,降低共模电压幅值。在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型进行验证,结果显示:相比于传统的 VSVPWM 方法,本文方法不仅能够使中点电压平衡,而且能够降低共模电压幅值。

1 传统的中点电压平衡方法分析

1.1 空间矢量调制策略

传统 SVPWM 方法的空间矢量图一般在直角坐标系下绘制,即将三相坐标系转换到两相坐标系,然后在直角坐标系中将参考电压进行分解^[20-21],图 1 为空间矢量划分图。图中 I—VI 为 6 大扇区, U_{ref} 为参考电压矢量, L_1 、 L_2 为 2 条辅助线。

1.2 虚拟空间矢量调制策略

虚拟空间矢量脉冲宽度调制(virtual space vector pulse width modulation, VSVPWM)方法是利用不同的电压矢量合成一种在一个周期内对中点电压的影响可以抵消或者不对中点电压产生影响的虚拟矢量

的方法^[22],该方法的关键是重新定义电压矢量,且重新定义的虚拟矢量不会对中点电压产生影响。第 I 大扇区虚拟空间矢量如图 2 所示。图中: U_{z0} 为虚拟零矢量, U_{zs1} 、 U_{zs2} 为虚拟短矢量, U_{zm} 为虚拟中矢量, U_{zl1} 、 U_{zl2} 为虚拟长矢量, L_1 、 L_2 、 L_3 为 3 条辅助线。

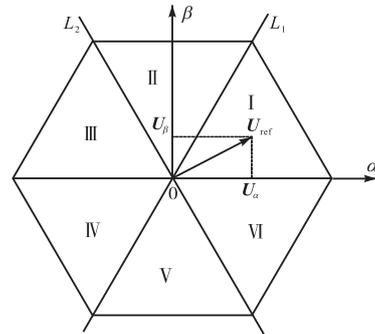


图 1 空间矢量划分图

Fig. 1 Space vector division diagram

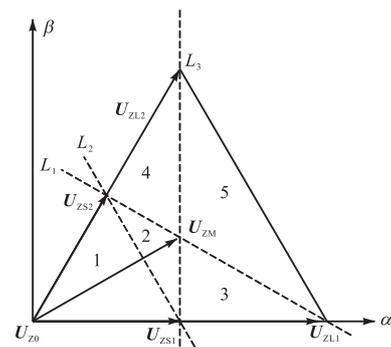


图 2 第 I 大扇区虚拟空间矢量

Fig. 2 Virtual space vector of the I largest sector

1.3 基于 60°坐标系的 SVPWM 方法

α - β 坐标系与 g - h 坐标系之间的转换如图 3 所示。

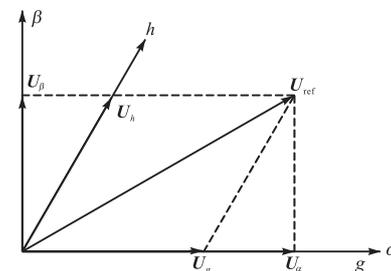


图 3 α - β 坐标系与 g - h 坐标系之间的转换

Fig. 3 Conversion between α - β coordinate system and g - h coordinate system

基于 60°坐标系的 SVPWM 方法是将 SVPWM 方法从 90° α - β 坐标系转换到 60° g - h 坐标系进行运算,这样就不会涉及庞大的三角函数运算,可以提高

算法的效率^[18-19, 23]。第 I 大扇区起始建立 60°坐标系,即新 60°坐标系的 g 轴与原 90° α - β 坐标系的 α 轴重合,再将 g 轴逆时针旋转 60°得到 h 轴。将 U_{ref} 分别在 2 个坐标系下进行分解,故 U_{ref} 可由 α - β 坐标系下的 (U_α, U_β) 转换为 g - h 坐标系下的 (U_g, U_h) 。

2 基于 60°坐标系的改进虚拟空间矢量调制

2.1 虚拟矢量的构建

基于 VSVPWM 的控制思想,以第 I 大扇区为例,对新虚拟矢量进行重新定义。

$$U_{vs1} = \frac{1}{2}U_{OON} + \frac{1}{2}U_{PNO} \quad (1)$$

$$U_{vs2} = \frac{1}{2}U_{POO} + \frac{1}{2}U_{OPN} \quad (2)$$

式中: U_{vs1} 、 U_{vs2} 为新定义的虚拟小矢量, U_{POO} 、 U_{OON} 为基本短矢量, U_{PNO} 、 U_{OPN} 为基本中矢量,下标 P、N、O 分别表示三电平逆变器每一相可以有三种状态,即正电平、负电平和零电平; U_{ref} 与 U_{POO} 相比, U_{vs2} 与 U_{OON} 相比,其方向和模长均相同。

结合各矢量对 midpoint 电压产生的影响可知

$$i_{vs1} = \frac{1}{2}i_{OON} + \frac{1}{2}i_{PNO} = \frac{1}{2}(-i_c + i_c) = 0 \quad (3)$$

$$i_{vs2} = \frac{1}{2}i_{POO} + \frac{1}{2}i_{OPN} = \frac{1}{2}(-i_a + i_a) = 0 \quad (4)$$

同理,新虚拟中矢量可以定义为

$$U_{vm} = \frac{1}{3}U_{PNO} + \frac{1}{3}U_{PON} + \frac{1}{3}U_{OPN} \quad (5)$$

结合各矢量对 midpoint 电压产生的影响可知

$$i_{vm} = \frac{1}{3}(i_{OPO} + i_{PON} + i_{PNN}) = \frac{1}{3}(-i_b + i_b) = 0 \quad (6)$$

$$i_{vm} = \frac{1}{3}i_{PNO} + \frac{1}{3}i_{PON} + \frac{1}{3}i_{OPN} = \frac{1}{3}(i_c + i_b + i_a) = 0 \quad (7)$$

式中: $i_{X(X=vs1, vs2, OON\cdots)}$ 表示 $U_{X(X=vs1, vs2, OON\cdots)}$, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三电平逆变器不同开关状态下产生的 midpoint 电流。

同理,新的虚拟长矢量为

$$U_{v11} = U_{PNN} \quad (8)$$

$$U_{v12} = U_{PPN} \quad (9)$$

从推导过程可知,新的虚拟空间矢量均不会对 midpoint 电压产生影响,并且新的虚拟矢量产生的共模电压幅值最高为 $U_{dc}/6$ (U_{dc} 为三电平逆变器的输出电压)。因此,本文设计的 IVSVPWM 方法不仅使得三

电平逆变器的 midpoint 电压平衡,而且还将逆变器系统的共模电压缩小为传统虚拟空间矢量调制方法的 1/2。

2.2 大扇区内小三角形的判定

以第 I 大扇区为例,对大扇区进行小三角形区域的划分,如图 4 所示。以各矢量顶点连线为界,将其划分为 5 个小三角形,添加 2 条辅助线 $2g+h=2$ 和 $g+2h=2$,这样可以容易地判断出 U_{ref} 的具体位置。其他大扇区可以旋转到第 I 大扇区进行判断。

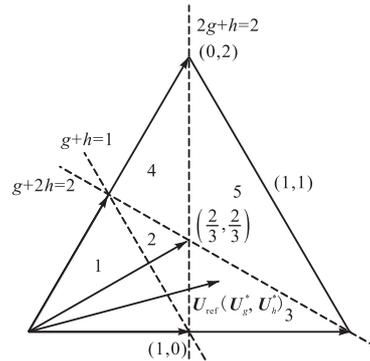


图 4 第 I 大扇区小三角形区域划分

Fig. 4 Division of the small triangle area of the I largest sector

经过划分区域并借助辅助线,就可依据逻辑判断确定 U_{ref} 的位置,假设 U_{ref} 的坐标为 (U_g^*, U_h^*) ,则判断条件见表 1。

表 1 第 I 大扇区小三角形区域判断条件

Tab. 1 Judgment condition for the small triangle area of the I largest sector

n	$U_g^* + U_h^*$	$2U_g^* + U_h^*$	$U_g^* + 2U_h^*$
1	<1	—	—
2	>1	<2	<2
3	—	>2	<2
4	—	<2	>2
5	<2	>2	>2

注: “—” 表示超出第 I 大扇区。

2.3 矢量作用时间的计算

假设参考电压矢量 U_{ref} 的采样周期为 T_s ,以小三角形区域 1 为例进行计算。

当 U_{ref} 位于小三角形区域 1 内时,选取虚拟矢量

U_{vs1} 、 U_{vs2} 及 U_{vz} 合成 U_{ref} 。

$$\begin{cases} T_{vs1} + T_{vs2} + T_{vz} = T_s \\ U_{vs1} \cdot T_1 + U_{vs2} \cdot T_2 + U_{vz} \cdot T_3 = U_{ref} \cdot T_s \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_{vs1} = (1, 0) \\ U_{vs2} = (0, 1) \\ U_{vz} = (0, 0) \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_{vs1} 、 T_{vs2} 、 T_{vz} 分别为虚拟矢量 U_{vs1} 、 U_{vs2} 、 U_{vz} 的作用时间。

联立式(10)和式(11)可得

$$\begin{cases} T_1 = T_s U_g^* \\ T_2 = T_s U_h^* \\ T_3 = T_s (1 - U_g^* - U_h^*) \end{cases} \quad (12)$$

同理,可以计算出其他小三角形区域内虚拟矢量的作用时间。

2.4 空间矢量作用顺序的设计

以第 I 大扇区的小三角形 1 区域为例进行空间矢量作用顺序设计^[24-25],共有 5 个基本空间矢量参与,采用九段式的脉冲发生波,作用顺序见表 2。

表 2 第 I 大扇区各小三角形区域空间矢量作用顺序

Tab. 2 Action sequence of the space vector of each small triangular area in the I largest sector

n	空间矢量作用顺序
1	PNO→POO→OOO→OON→OPN→OON→OOO→POO→PNO
2	PNO→POO→PON→OON→OPN→OON→PON→POO→PNO
3	OPN→OON→PON→PNN→PNO→PNN→PON→OON→OPN
4	PNO→POO→PON→PNN→OPN→PNN→PON→POO→PNO
5	OPN→PPN→PON→PNN→PNO→PNN→PON→PPN→OPN

第 I 大扇区的小三角形 1 区域的开关序列及共模电压如图 5 所示。从图 5 中可以看出,此开关序列作用期间逆变器的共模电压幅值为 $U_{dc}/6$,为传统 VSVPWM 方法的一半。

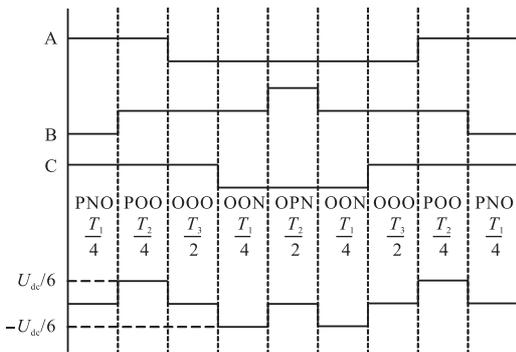


图 5 第 I 大扇区的小三角形 1 区域的开关序列及共模电压

Fig. 5 Switching sequence and common-mode voltage in the small triangle 1 area of the I largest sector

3 仿真实验分析

为了验证本文设计的空间矢量调制方法的有效性,搭建基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型。系统模型主要是由两部分组成,一部分是 NPC 逆变器主电路模块,另一部分是 VSVPWM 控制策略模块。仿

真参数设置:直流侧电压 $U_{dc} = 600\text{ V}$,频率 $f = 50\text{ Hz}$,直流侧上下电容 $C_1 = C_2 = 4700\text{ }\mu\text{F}$,采样周期 0.2 ms ,三相对称负载电阻 $R = 10\text{ }\Omega$,电感 $L = 15\text{ mH}$,调制度 $m = 0.8$ 。仿真实验结果如图 6—图 9 所示。

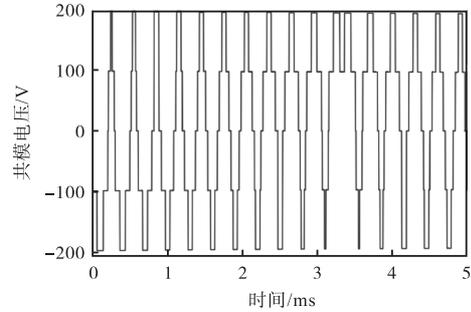


图 6 传统 VSVPWM 方法的共模电压幅值

Fig. 6 Common mode voltage amplitude of traditional VSVPWM method

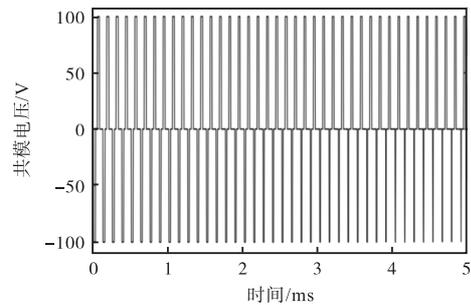


图 7 IVSVPWM 方法的共模电压幅值

Fig. 7 Common mode voltage amplitude of IVSVPWM method

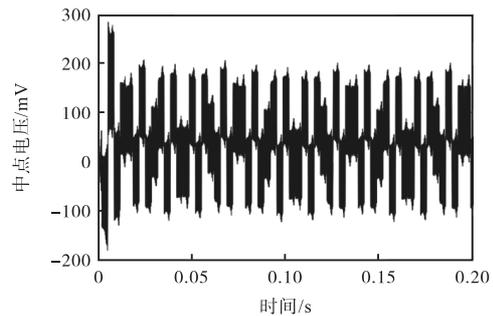


图 8 传统 VSVPWM 方法的中点电压

Fig. 8 Midpoint voltage of traditional VSVPWM method

从仿真结果中可以看出,传统 VSVPWM 方法的共模电压幅值为 $U_{dc}/3$,而改进之后的 IVSVPWM 方法的共模电压幅值为 $U_{dc}/6$,中点电压波动幅度减小,共模电压幅值减小为传统方法的 1/2。本文设计的基于 $60^\circ g-h$ 坐标系的改进虚拟空间矢量调制 (IVSVPWM) 方法不仅使逆变器的中点电压平衡,而且弃用了共模电压幅值高的短小矢量以及零矢量

U_{PPP} 、 U_{NNN} ,使得系统共模电压幅值最高为 $U_{dc}/6$,是传统的虚拟空间矢量调制方法的1/2。本文方法的空间矢量作用顺序仍为九段式。相对于全部弃用小矢量的方法,本文方法在降低共模电压的同时,减少了输出电压中的谐波成分,在理想情况下可以维持逆变器系统的中点电压平衡以及低共模电压状态,有效提高逆变器输出电压波形的质量并延长器件的寿命,模拟结果有效验证了本文方法的正确性。

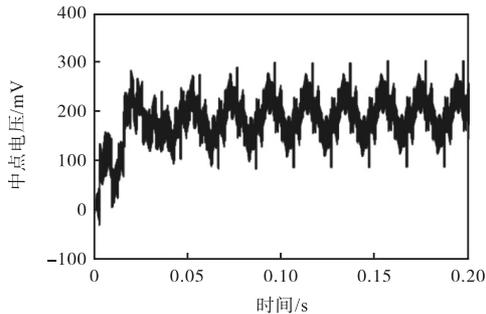


图9 IVSVPWM方法的中点电压

Fig. 9 Midpoint voltage of IVSVPWM method

4 结 论

本文在对传统的 SVPWM 方法和 VSVPWM 方法进行分析的基础上,针对 VSVPWM 方法存在的计算复杂、共模电压幅值高等问题,提出基于 $60^\circ g-h$ 坐标系的改进虚拟空间矢量脉冲宽度调制 (IVSVPWM) 方法。本文方法重新定义了虚拟矢量,控制简单,易于计算,不仅能够使逆变器的中点电压保持平衡,而且能够降低共模电压幅值。在 MATLAB/simulink 平台中搭建仿真模型对本文方法进行验证。对比传统的 VSVPWM 方法,本文方法能够将共模电压幅值由 $U_{dc}/3$ 降低到了 $U_{dc}/6$,中点电压也能够保持平衡且效果更好,验证了本文方法的正确性及有效性。

参考文献:

- [1] 朱虹,张兴,李明,等. T型三电平逆变器模型预测多目标优化控制方法[J]. 太阳能学报,2021,42(9):90-96.
- [2] RAMASAMY P, KRISHNASAMY V. SVPWM control strategy for a three phase five level dual inverter fed open-end winding induction motor[J]. ISA Transactions, 2020, 102: 105-116.
- [3] 邱继浪,何英杰,焦乾明,等. 非隔离型三电平逆变器漏电流抑制与中点电位平衡控制[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):161-170.
- [4] 任娇,付光杰. 改善共模电压和中点电位的虚拟 SVPWM 策略[J]. 重庆大学学报,2021,44(8):125-133.
- [5] MONTERO-ROBINA P, GORDILLO F, GÓMEZ-ESTERN F, et al. Voltage balance for five-level DCC based on mixed-integer linear programming[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 124: 106302.
- [6] MERAL M E, ÇELİK D. Mitigation of DC-link voltage oscillations to reduce size of DC-side capacitor and improve lifetime of power converter[J]. Electric power systems research, 2021, 194: 107048.
- [7] QIN C W, LI X Y. Improved virtual space vector modulation scheme for the reduced switch count three-level inverter with balanced and unbalanced neutral-point voltage conditions[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2022, 38(2):2092-2104.
- [8] 刘汉阳,杜启行,王奎,等. 基于空间矢量调制的三电平逆变器中点电位波动分析及估算[J]. 电机技术, 2021(4):15-19.
- [9] 薛艳平. 三电平逆变器的 PMSM 驱动控制系统研究与设计[D]. 西安:西安工业大学,2022.
- [10] HE R Z, JIN Y, HOU W Y, et al. A capacitor overvoltage elimination strategy for reduced-voltage-sensor-based MMC[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 132: 107181.
- [11] KHAN M N H, BARZEGARKHOO R, SIWAKOTI Y P, et al. A new switched-capacitor multilevel inverter with soft start and quasi resonant charging capabilities[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2022, 135: 107412.
- [12] HAQ S S A, JEYAROHINI R, MEENALOCHINI P, et al. A sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique for capacitor voltage balancing of nested I-type four-level inverter[J]. Materials today : proceedings , 2021, 45: 2435-2439.
- [13] 娄晓杰. 基于 60° 坐标系下三电平 NPC 逆变器控制策略研究[D]. 天津:天津理工大学,2020.
- [14] 苏鑫. 三电平 NPC 逆变器 SVPWM 控制策略及中点电位平衡研究[D]. 芜湖:安徽工程大学,2020.
- [15] 李文善,温旭辉,张剑,等. 一种三电平虚拟空间矢量调制简化方法[J]. 电力电子技术,2021,55(9):112-114.
- [16] MURAI Y, OHASHI K, HOSONO I. New PWM method for fully digitized inverters[J]. IEEE Transactions on in-

(下转第73页)

- The role of disentanglement in generalisation[EB/OL]. [2023-01-10]. <https://openreview.net/pdf?id=qbH974jKUVy>.
- [13] SØNDERBY C K, RAIKO T, MAALØE L, et al. Ladder variational autoencoders[EB/OL]. [2023-01-10]. <https://arxiv.org/pdf/1602.02282.pdf>.
- [14] ZHAO S, SONG J, ERMON S. Learning hierarchical features from deep generative models[C]//ACM. Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. Waco: ACM, 2017: 4091-4099.
- [15] KARRAS T, AILA T, LAINE S, et al. Progressive growing of gans for improved quality, stability, and variation[EB/OL]. [2023-01-10]. <http://arxiv.org/pdf/1710.10196>.
- [16] WANG Y, PERAZZI F, MCWILLIAMS B, et al. A fully progressive approach to single-image super-resolution [C]//IEEE. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops. New York: IEEE, 2018: 864-873.
- [17] BURGESS C, KIM H. 3Dshapes dataset[EB/OL]. [2023-01-10]. <https://github.com/deepmind/3dshapes-dataset/2018>.
- [18] AUBRY M, MATURANA D, EFROS A A, et al. Seeing 3D chairs: exemplar part-based 2D-3D alignment using a large dataset of cad models[C]//IEEE. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. New York: IEEE, 2014: 3762-3769.
- [19] LIU Z, LUO P, WANG X, et al. Deep learning face attributes in the wild[C]//IEEE. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. New York: IEEE, 2015: 3730-3738.
- [20] CHEN R T Q, LI X C, GROSSE R, et al. Isolating sources of disentanglement in variational autoencoders [EB/OL]. [2023-01-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.04942>.
- [21] ZHAO S J, SONG J M, ERMON S. Learning hierarchical features from generative models[EB/OL]. [2023-01-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.08396>.

责任编辑:郎婧

(上接第40页)

- dustry applications, 1987(5): 887-893.
- [17] CRISTIANO R, PAGANO D J, HENAO M M. Multiple boundaries sliding mode control applied to capacitor voltage-balancing systems[J]. Communications in nonlinear science and numerical simulation, 2020, 91: 105430.
- [18] 贾万水. NPC 三电平逆变器中点电压平衡研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2022.
- [19] 夏玉政, 胡海兵, 邢岩. 谐波补偿下考虑中点平衡的等效三电平调制[J]. 电力电子技术, 2021, 55(4): 133-136.
- [20] HASSAN M S, ABDELHAKIM A, SHOYAMA M, et al. On-the-analysis and reduction of common-mode voltage of a single-stage inverter through control of a four-leg-based topology[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 127: 106710.
- [21] YUE Y F, XU Q M, GUO P, et al. Capacitor voltage predictor-corrector balancing approach with single sensor for single-phase modular multilevel converter[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2021, 129: 106729.
- [22] OZDEMIR S, ALTIN N, SEFA I, et al. Super twisting sliding mode control of three-phase grid-tied neutral point clamped inverters[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 547-559.
- [23] USHA S, GEETHA A, THENRAL T M T, et al. Mitigation of common mode voltage in five phase multilevel inverter[J]. Materials today: proceedings, 2021, 45: 1761-1769.
- [24] 胡昭, 潘三博. 一种抑制共模电压的 T 型三电平逆变器调制策略[J]. 上海电机学院学报, 2022, 25(3): 125-131.
- [25] HAKAMI S S, LEE K B. Enhanced predictive torque control for three-level NPC inverter-fed PMSM drives based on optimal voltage magnitude control method[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2022, 38(3): 3725-3738.

责任编辑:周建军