

考虑中性点电位的三电平虚拟空间矢量 窄脉冲抑制*

邱绵浩¹, 王明玉², 马岳²

[1. 陆军装甲兵学院 车辆工程系, 北京 100072;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 汽车工程学院, 山东 威海 264209]

摘要: 三电平逆变器虚拟空间矢量脉宽调制(VSVPWM)应用广泛,但由于是三电平控制,在某些区域会产生窄脉冲,从而带来不必要的开关损耗和热量积累。分析了VSVPWM的窄脉冲分布,利用差模电压和共模电压对窄脉冲进行了抑制,同时将中性点电位控制在小范围内波动。仿真和试验证明了该方法能够抑制绝大部分窄脉冲,并且不会造成输出波形畸变和谐波增加。

关键词: 三电平逆变器; 虚拟空间矢量脉宽调制; 窄脉冲; 中性点电位

中图分类号: TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)11-0098-06

doi: 10.12177/emca.2020.128

Narrow Pulse Suppression of Three-Level Virtual Space Vector Considering Neutral-Point Voltage Balancing*

QIU Mianhao¹, WANG Mingyu², MA Yue²

(1. Vehicle Engineering Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Virtual space vector pulse width modulation (VSVPWM) of three-level inverter is widely used. But due to the three-level inverter control, narrow pulses are generated in certain region, which results in unnecessary switching loss and heat accumulation. The narrow pulse distribution of VSVPWM is analyzed, and the narrow pulses are suppressed by the injection of the differential mode voltage and the common mode voltage with the neutral-point voltage controlled within a small range. Simulation and experiment prove that the proposed method can suppress most of the narrow pulses without causing distortion of the output waveform and increase of harmonics.

Key words: three-level inverter; virtual space vector pulse width modulation (VSVPWM); narrow pulse; neutral-point voltage

0 引言

由于输出谐波少、承压能力强等优点,三电平逆变器已广泛应用于光伏逆变、电机驱动等领域^[1]。三电平逆变器的开关策略主要分为正弦脉宽调制(SPWM)^[2]、最近三矢量脉宽调制

(NTVPWM)和虚拟空间矢量脉宽调制(VSVPWM)^[3]。SPWM算法电压利用率较低,NTVPWM中性点电位波动较大,VSVPWM在算法上消除了中性点电位波动,但是开关次数增多的同时容易引起窄脉冲。

开关管在实际工作过程中是非理想状态,存

收稿日期: 2020-06-27; 收到修改稿日期: 2020-08-19

* 基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE011)

作者简介: 邱绵浩(1976—),男,副教授,研究方向为车辆电驱动控制。

王明玉(1991—),男,博士研究生,研究方向为电驱动系统及其控制。

马岳(1993—),男,硕士,研究方向为三电平逆变器系统控制。

在开通延迟、上升时间、关断延迟和下降时间^[4]；为了防止短路击穿,需在调制过程中加入死区时间^[5-6]。若一个开关管的驱动脉冲宽度小于开通延迟、上升时间、关断延迟、下降时间和死区时间之和 $T_{\min}$,则会造成该开关管失效,引起输出波形畸变,甚至可能因热积累造成开关管损坏,该驱动脉冲就称为窄脉冲^[7]。

为了解决窄脉冲问题,学者们做了一系列研究。文献[8]指出若直接将窄脉冲剔除或者拓宽,将会增加输出波形的谐波;文献[9]采用冗余矢量代替的方法,抑制了大部分窄脉冲,但是没有考虑中性点电位平衡问题;文献[10]基于零序电压矢量注入的方法,抑制窄脉冲的同时对中性点电位影响较大,此外,需要复杂的寻优算法来平衡中性点电位,并且没有考虑输出的谐波。

本文分析了 VSVPWM 的窄脉冲分布,提出了一种可以抑制窄脉冲并且维持中性点电位平衡的算法。仿真和试验结果表明大部分窄脉冲得到了抑制,同时将中性点电位控制在一定范围之内,验证了算法的有效性。

1 窄脉冲抑制算法

1.1 虚拟空间矢量窄脉冲分布

利用三相电流之和为零,构建了虚拟空间矢量,使得每个虚拟空间矢量均不会影响中性点电位。 $0^\circ \sim 60^\circ$ 电压矢量图如图1所示。

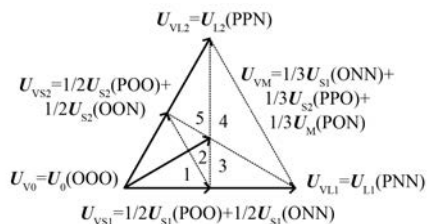


图1 VSVPWM $0^\circ \sim 60^\circ$ 电压矢量图

在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围, VSVPWM 调制方法的各相 P、N 状态的占空比为

$$\begin{cases} d_{ap} = m \times \cos(\theta - \pi/6) \\ d_{an} = 0 \\ d_{bp} = m \times \cos(\theta - \pi/2) \\ d_{bn} = m \times \cos(\theta + \pi/6) \\ d_{cp} = 0 \\ d_{cn} = m \times \cos(\theta - \pi/6) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为调制比; θ 为电角度。

可以得出在一个 PWM 周期内, a 相有 P 和 O 2 个输出状态, b 相有 P、O、N 3 个输出状态, c 相有 O 和 N 2 个输出状态。因此,在 a 相中,当 P 状态或者 O 状态的驱动脉冲宽度小于 $T_{\min}$ 时, a 相会产生窄脉冲;在 b 相中,当 P 状态或者 N 状态的驱动脉冲宽度小于 $T_{\min}$ 时, b 相会产生窄脉冲, O 状态作为 P 和 N 之间的过渡不会产生窄脉冲;在 c 相中,当 O 状态或者 N 状态的驱动脉冲宽度小于 $T_{\min}$ 时, c 相会产生窄脉冲。结合式(1),可以得到窄脉冲在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内的分布: $m=0$ 附近, $\theta=0^\circ$ 附近, $\theta=60^\circ$ 附近, 以及 $m=1$ 且 $\theta=30^\circ$ 附近。根据对称性,可得 VSVPWM 窄脉冲分布如图2灰色阴影部分所示。

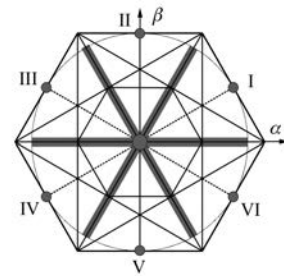


图2 虚拟空间矢量窄脉冲分布

1.2 虚拟空间矢量窄脉冲抑制

根据对称性,仅分析参考电压矢量位于 I 扇区的情况。

在 $\theta=0^\circ$ 附近,当 $T_{POO} < T_{\min}$ 时, b 相驱动脉冲两侧会出现窄脉冲。此时如图3所示,向 b 相注入差模电压:

$$\begin{cases} d_{bp1} = d_{bp} - \Delta d_1 \\ d_{bn1} = d_{bn} - \Delta d_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta d_1 = \Delta d_2$ 。

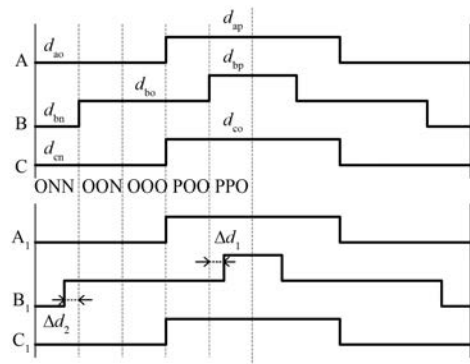


图3 I-1 区域内开关序列及窄脉冲消除方法

当 $\Delta d_1 = d_{bp}$ 时, $d_{bp1} = 0$, b 相窄脉冲部分得到消除, PWM 周期内流经中性点的平均电流 i_{np} 为

$$i_{np} = 2 \times i_b \times d_{bp} \quad (3)$$

当 $\Delta d_1 = d_{bp} - T_{\min}/T_{\text{PWM}}$ 时, $d_{bp1} = T_{\min}/T_{\text{PWM}}$, b 相窄脉冲部分被扩宽从而消除窄脉冲, PWM 周期内流经中性点的平均电流 i_{np} 为

$$i_{np} = -2 \times i_b \times (T_{\min}/T_{\text{PWM}} - d_{bp}) \quad (4)$$

因此,可以根据中性点电位及 b 相电流得到 Δd_1 。

在原始虚拟空间矢量算法中,三相 O 状态作用时间相等,因此中性点电位不平衡不会造成输出波形失真。注入差模电压后会造成三相的 O 状态作用时间不相等,并且会带来一定的中性点电位不平衡,因此会造成输出波形的失真,需要对插入的差模电压进行一定的修正。

如果 PWM 策略的输出波形不存在中性点不平衡失真,则三相端电压误差 ΔU_a 、 ΔU_b 和 ΔU_c 必须相同,因此计算可得 Δd_1 与 Δd_2 之间的关系:

$$\Delta d_2 = \frac{U_{np}}{U_{dc} - U_{np}} \times \Delta d_1 \quad (5)$$

I 扇区内 $\theta = 0^\circ$ 附近和 $\theta = 60^\circ$ 附近窄脉冲抑制方法与上述类似。

当参考电压位于 I-4 时,开关序列如图 4 所示。当参考电压矢量位于点 $m = 1$ 且 $\theta = 30^\circ$ 附近时,三相 O 状态占空比 $d_{ao} = d_{bo} = d_{co}$ 均会很小, a 相中间和 c 相两侧会出现窄脉冲。

注入共模电压:

$$\begin{cases} d_{ap1} = d_{ap} + \Delta d_1 \\ d_{bp1} = d_{bp} + \Delta d_2 \\ d_{bn1} = d_{bn} - \Delta d_2 \\ d_{cn1} = d_{cn} - \Delta d_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta d_2 = \frac{1}{2} \Delta d_1 = \frac{1}{2} \Delta d_3$ 。

考虑到输出波形不受中性点电位影响,令 $\Delta U_a = \Delta U_b = \Delta U_c$, 且

$$\begin{cases} \Delta U_a = \Delta d_1 \times (U_{dc} - U_{np}) \\ \Delta U_b = \Delta d_2 \times U_{dc} \\ \Delta U_c = \Delta d_3 \times U_{np} \end{cases} \quad (7)$$

可得 Δd_1 、 Δd_2 和 Δd_3 之间的关系:

$$\Delta d_2 = \frac{U_{dc} - U_{np}}{U_{dc}} \times \Delta d_1 = \frac{U_{np}}{U_{dc}} \times \Delta d_3 \quad (8)$$

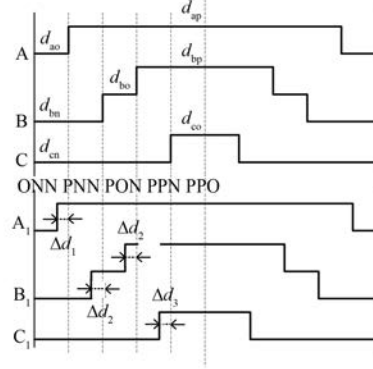


图 4 I-4 区域内开关序列及窄脉冲消除方法

当 $\Delta d_1 = d_{ao}$ 时,可消除 a 相窄脉冲,此时流经中性点的平均电流 i_{np} 为

$$i_{np} = \left(\frac{U_{dc} - U_{np}}{U_{np}} \times i_c - i_a \right) \times d_{ao} \quad (9)$$

当 $\Delta d_3 = -d_{co}$ 时,可消除 c 相窄脉冲,此时流经中性点的平均电流 i_{np} 为

$$i_{np} = - \left(\frac{U_{dc} - U_{np}}{U_{np}} \times i_c - i_a \right) \times d_{co} \quad (10)$$

因为 U_{np} 在 $1/2 U_{dc}$ 附近小范围波动,所以 $(U_{dc} - U_{np})/U_{np}$ 近似于 1,即 $\Delta d_1 \approx \Delta d_3$ 。当 $d_{ao} < 1/2 T_{\min}/T_{\text{PWM}}$ 时, a 相和 c 相的窄脉冲只能消除一相;当 $d_{ao} \geq 1/2 T_{\min}/T_{\text{PWM}}$ 时, a 相和 c 相的窄脉冲都能得到消除。

因此,可以根据中性点电位及 a 相、c 相电流得到 Δd_1 。

2 窄脉冲抑制仿真验证

为了验证算法,搭建了 Simulink 模型,开关频率为 10 kHz,母线电压为 80 V,负载为交流异步电机。为了方便观测,窄脉冲宽度设为 $5 \mu\text{s}$ 。图 5 为调制比 m 取典型值时的窄脉冲分布区域仿真波形。图 5(a) 为 $m = 0.05$, θ 在 30° 附近,即参考电压矢量位于零点 O 附近时的仿真结果,此时可以看到 b 相所有开关管都存在窄脉冲。图 5(b) 为 $m = 0.49$, θ 在 0° 附近时的仿真结果,此时 b 相会出现窄脉冲。图 5(c) 为 $m = 0.98$, θ 在 30° 附近时的仿真结果,此时 a 相和 c 相会出现窄脉冲。仿真结果与前面的分析结果一致,证明了窄脉冲分布区域理论分析的正确性。

图 6 所示为 m 取典型值时窄脉冲的抑制情

况,图 7 是对应的中性点电位波形。可见窄脉冲平衡,在 $1/2U_{dc}$ 附近小幅波动。

得到了很好的抑制,中性点电位也能够快速恢复

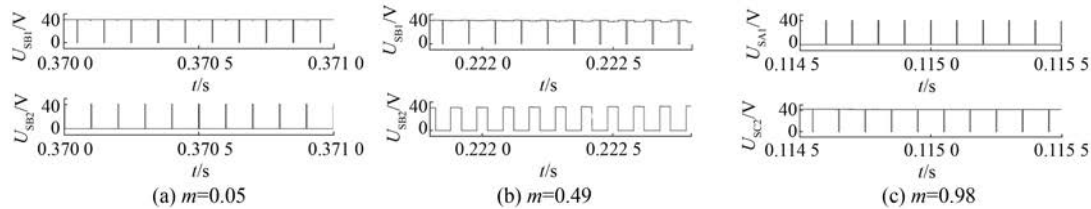


图 5 窄脉冲分布区域仿真波形

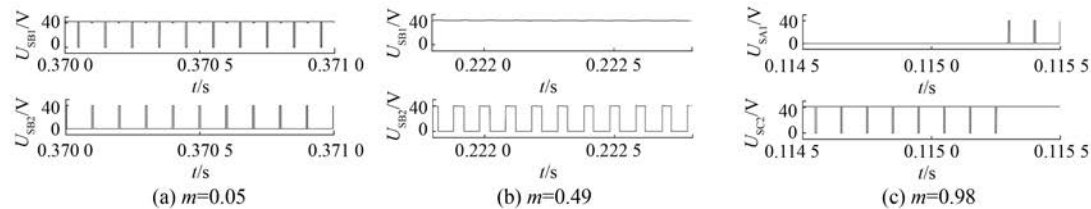


图 6 控制算法窄脉冲抑制仿真波形

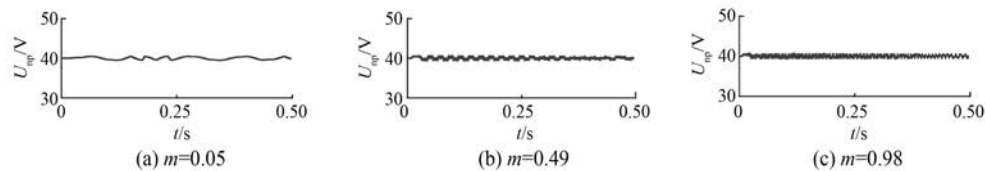


图 7 不同调制比中性点电位波形

3 窄脉冲抑制试验验证

在仿真平台的基础上,搭建了三电平试验平台来进一步验证算法的有效性。主控芯片为 TMS320F28335。试验平台如图 8 所示,包括高压电源、三电平 T 型逆变器、逆变器驱动模块、主控芯片、分压电路、异步电机以及上位机。电机和逆变器参数如表 1 和表 2 所示。



图 8 试验平台

表 1 试验用异步电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	2.24
额定直流电压/V	210
额定频率/Hz	60
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 725

表 2 试验用三电平逆变器参数

参数名称	参数值
IGBT 额定电压/V	1 200
IGBT 额定电流/A	80
直流侧电压/V	80
直流侧电容 C1 和 C2 容量/ μ F	200
中性点电位波动阈值 T_{np} /V	3

图 9(a) 为调制比 $m=0.05$,电角度为 30° 附近时,b 相 SB1 和 SB2 开关管的电压波形。可以看到 b 相 P 状态和 N 状态驱动脉冲为窄脉冲。图 9

(b) 为调制比 $m = 0.49$, 电角度在 0° 附近时, b 相 SB1 和 SB2 开关管的电压波形。可以看到 b 相 P 状态驱动脉冲为窄脉冲。图 9(c) 为调制比 $m = 0.98$, 电角度为 30° 附近时, a 相 SA1 和 c 相 SC2 开关管的电压波形。可以看到 a 相 P 状态和 c 相 N 状态驱动脉冲为窄脉冲。窄脉冲产生区域与仿真结果一致。

图 10 为窄脉冲抑制后的对应调制比和电角度时各开关管两端的电压波形。图 10(a) 与图 9(a) 相比, 可以很明显看到 SB1 的开通驱动脉冲和 SB2 的关断驱动脉冲宽度均被扩宽, b 相 P 状态和 N 状

态窄脉冲得到抑制; 在 0.0503 s 的时候, 边界条件发生了变化, SB1 的开通驱动脉冲仍然被扩宽, SB2 的关断驱动脉冲宽度很小, 即 b 相 P 状态窄脉冲得到抑制, N 状态窄脉冲没有改变。图 10(b) 与图 9(b) 相比, 可以看到 SB1 的开通驱动脉冲被扩宽, b 相 P 状态存在的窄脉冲得到抑制, N 状态和 O 状态不存在窄脉冲。图 10(c) 与图 9(c) 相比, 可以看到 a 相 SA1 关断脉冲得到了拓宽, c 相 SC2 一直保持关断状态, 不进行开关, 即 a 相 O 状态窄脉冲和 c 相 O 状态窄脉冲均得到了抑制。根据上述分析, 窄脉冲抑制效果与仿真一致。

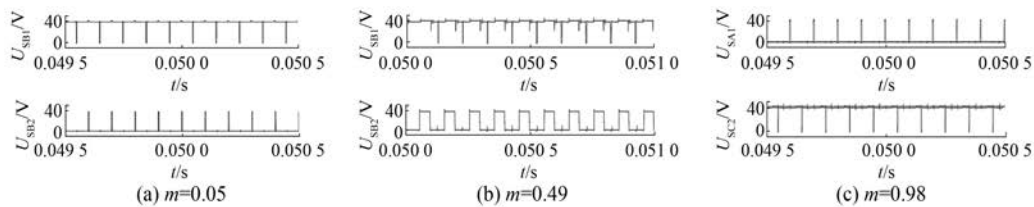


图 9 原始虚拟空间矢量窄脉冲

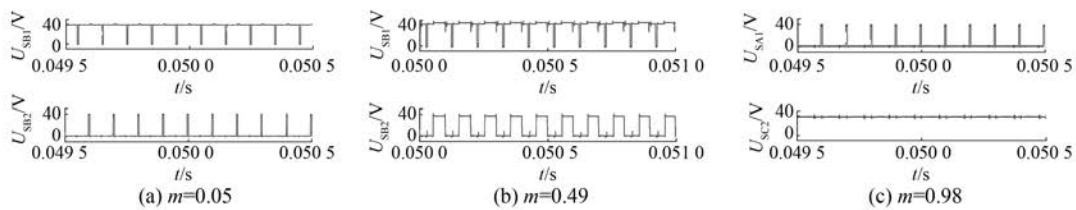


图 10 控制算法窄脉冲抑制波形

图 11 为窄脉冲抑制后的中性点电位, 试验结果与仿真结果基本一致, 证明了算法的有效性。图

12 为不同调制比下电流谐波的分析, 可以看到该算法不会增加电流谐波, 输出波形没有发生畸变。

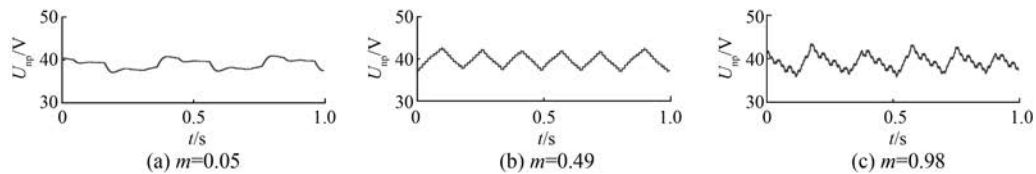


图 11 中性点电位波形

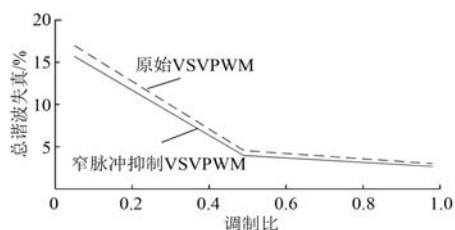


图 12 输出电流谐波对比

4 结 语

分析了虚拟空间矢量算法窄脉冲产生原因及分布情况, 提出一种 VSPWM 算法, 可以有效抑制窄脉冲同时控制中性点电位平衡。通过仿真和试验, 验证了提出算法的有效性。

【参考文献】

- [1] SCHWEIZER M, FRIEDLI T, KOLAR J W. Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5515.
- [2] VIDET A, LE MOIGNE P, IDIR N, et al. A new carrier-based PWM providing common-mode-current reduction and DC-bus balancing for three-level inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3001.
- [3] WU X, TAN G, YE Z, et al. Virtual-space-vector PWM for a three-level neutral-point-clamped inverter with unbalanced DC-links [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2630.
- [4] LIU G, WANG D, WANG M, et al. Neutral-point voltage balancing in three-level inverters using an optimized virtual space vector PWM with reduced commutations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 6959.
- [5] LIU G, WANG D, JIN Y, et al. Current-detection-independent dead-time compensation method based on terminal voltage A/D conversion for PWM VSI [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7689.
- [6] 杨兵建, 杨波, 何湘宁, 等. 三电平逆变器中的死区效应与补偿 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(3): 4.
- [7] 金舜, 钟彦儒, 明正峰, 等. 一种控制中点电位并消除窄脉冲的三电平 PWM 方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 114.
- [8] 金舜, 钟彦儒. 一种新颖的同时考虑中点电位平衡和窄脉冲消除及死区补偿的三电平空间电压矢量脉宽调制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 60.
- [9] 李敏裕, 马晓军, 魏曙光, 等. 三电平虚拟空间矢量脉宽调制算法窄脉冲抑制研究 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3264.
- [10] 王琛琛, 管勃. 一种兼顾二极管钳位型三电平变换器中点电位平衡的窄脉冲处理方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 136.
- [10] 周鹏, 张新燕, 邸强, 等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 71.
- [11] 魏亚龙, 张辉, 孙凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124.
- [12] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089.
- [13] 施永, 赖纪东, 苏建徽, 等. 微网系统运行模式平滑切换控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 85.
- [14] 占伟强, 吴振兴, 邢鹏翔, 等. 虚拟同步发电机及其在独立型微电网中的应用 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 14.
- [15] DU W, FU Q, WANG H F. Power system small-signal angular stability affected by virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3209.
- [16] 漆岳. 基于虚拟同步机的微网并网逆变器控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [17] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 17.
- [18] AOUI NI R, MARINESCU B, KILANI K B, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 278.
- [19] GAO F, IRAVANI M R. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 850.
- [20] 曹元峥. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器控制策略研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [21] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668.
- [22] 郝新星. 基于虚拟同步机的微网逆变器控制策略及系统稳定性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

(上接第 90 页)