

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.147

中图分类号: TM464

文献标志码: A

NPC 三电平虚拟同步机桥臂故障容错模型 预测控制

金楠(中国电源学会高级会员), 肖晗, 谢欢, 武洁(中国电源学会高级会员)
(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)通过模拟同步机特性为新能源并网提供惯性和阻尼。然而, 电力电子开关器件高频开关过程中可能会发生断路故障, 导致输出电流波形严重畸变, 影响电网安全稳定运行。针对中点钳位型 NPC(neutral point clamped)三电平 VSG 桥臂故障问题, 提出一种中点电压均衡的 VSG 容错模型预测控制策略。分析 NPC 三电平 VSG 单相桥臂故障后运行机理, 在开关器件故障后利用直流侧电容组成虚拟桥臂, 重构为 VSG 桥臂故障容错结构。建立故障情况下预测电流模型, 重构故障状态空间电压矢量, 将直流侧中点电容电压引入容错模型代价函数, 减小电容电压波动, 实现 VSG 桥臂故障容错运行。实验结果表明, 在开关器件发生故障后, NPC 三电平 VSG 能容错连续运行, 验证了所提模型预测容错控制策略的有效性, 提高了 VSG 运行可靠性。

关键词: 虚拟同步机; 容错模型; 模型预测控制; 中点钳位型变换器; 代价函数

Fault-tolerant Model Predictive Control for Bridge Arm of NPC Three-level Virtual Synchronous Generator

JIN Nan, Senior Member, CPSS, XIAO Han, XIE Huan, WU Jie, Senior Member, CPSS
(College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A virtual synchronous generator(VSG) can provide inertia and damping for the grid connection of new energy by simulating the characteristics of a synchronous generator. However, a circuit breaking fault may occur in the process of high-frequency switching of power electronic switching devices, which will lead to a serious distortion of output current waveform and affect the safe and stable operation of power grid. In this paper, a VSG fault-tolerant model predictive control strategy based on neutral point voltage equalization is proposed to solve the fault problem of neutral point clamped(NPC) three-level VSG bridge arm. The operation mechanism of NPC three-level VSG single-phase bridge arm after fault is analyzed. The DC-side capacitor forms a virtual bridge arm after the switching device fault, which is reconstructed as a VSG bridge arm fault-tolerant structure. Under fault conditions, a current predictive model is established, and the space voltage vector in a fault state is reconstructed. The neutral point capacitor voltage on the DC-side is introduced into the cost function of fault-tolerant model to reduce capacitor voltage fluctuations and realize the fault-tolerant operation of VSG bridge arm. Experimental results show that the NPC three-level VSG can operate continuously after the switching device fault, which verifies the effectiveness of the proposed model predictive fault-tolerant control strategy and improves the operation reliability of VSG.

Keywords: Virtual synchronous generator(VSG); fault-tolerant model; model predictive control; neutral point clamped (NPC) converter; cost function

收稿日期: 2021-08-15; 修回日期: 2021-09-22, 2021-10-24,
2021-11-12; 录用日期: 2021-12-02; 网络首发日期: 2022-
02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2004166); 河南省重点
研发与推广专项(科技攻关)资助项目(202102210103)

This work is supported by National Natural Science Foundation
of China under the grant U2004166; Henan Province Key Re-
search and Development and Promotion of Special Projects(Sci-
ence and Technology) under the grant 202102210103

为加快构建绿色低碳可持续发展现代能源体系, 近年来我国风电、光伏等新能源投资大幅提升。风电、光伏发电通过电力电子变换器接入电网, 但其随机性与波动性给电网的稳定运行带来了挑战。虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)技术克服了新能源发电低惯量、无阻尼的缺点^[1-4], 提高了电网对新能源的消纳能力, 促进了“双碳”政策的

贯彻落实。然而 VSG 在能量转换和传输中的可靠性直接影响电网稳定运行,因此 VSG 桥臂故障容错技术研究受到越来越多专家学者关注。

Beck 教授根据同步发电机特性提出 VSG 技术,根据预设功率和电网参数为并网系统提供控制参考变量,加强电网扰动应对能力,使并网系统具有自我恢复能力^[5-8]。文献[9]基于 VSG 算法提出了一种无频差的有功-频率控制算法,用频率比例积分反馈代替传统阻尼环节,消除了孤网模式下的频率偏移。针对不平衡电网,文献[10-11]提出一种改进型 VSG 控制策略,利用平衡电流 VSG 控制,得到基准正序电流指令和正、负序电流指令,合成最终调制电压信号,实现了输出电流三相平衡。文献[12]分析拓展功率理论与 VSG 结合的可行性,提出一种基于拓展功率的自同步 VSG 控制策略,实现不平衡电网下 VSG 精准自同步并网。然而以上 VSG 控制方法需要 PWM 波调制和 PI 控制,参数设计相对复杂。

模型预测控制 MPC(model predictive control)因其鲁棒性强、控制简单、无需 PWM 调制等优势被应用于非线性控制领域^[13-17]。文献[13-15]针对常规 MPC 计算量大等问题,提出改进型有限集模型预测控制方法,实现电网电流快速跟踪。文献[16]提出基于 MPC 的 VSG 控制方法,根据系统频率和 VSG 输出量计算预测模型功率增量,改变 VSG 设定功率,减小新能源出力波动引发的系统频率震荡。文献[17]结合 MPC 和 VSG,提出一种 VSG 并网模型预测控制方法,由 VSG 和电流预测模型生成参考电流、预测电流,既为电网提供惯性和阻尼,也提供有功和无功功率支撑。然而以上方法未考虑变换器开关器件运行中可能会出现故障的问题,缺少容错设计,在 VSG 出现故障后并网控制策略失效,影响并网系统正常运行。

针对中点钳位型 NPC(neutral point clamped)三电平 VSG 桥臂故障后控制策略失效的问题,本文提出一种容错模型预测控制方法。在 VSG 出现开关器件故障后,将常规 NPC 三电平重构为 VSG 容错结构;通过 VSG 容错结构模拟同步机特性,根据系统预设功率调节并网参考电流;利用电流预测模

型预测下一时刻电流,挑选最优电压矢量,并采用超前预测减小系统延时。考虑 VSG 容错结构存在直流侧电容电压不平衡问题,在代价函数中加入直流侧电容电压预测项均衡电容电压。最后,通过实验验证所提策略有效性,提高了 NPC 三电平 VSG 容错能力和可靠性。

1 虚拟同步机桥臂故障容错电流预测模型

1.1 虚拟同步机桥臂故障容错结构

NPC 三电平 VSG 结构如图 1 所示,其中开关器件可能因为尖峰电压和过电流等原因损坏,进而降低 VSG 可靠性,影响电网安全稳定运行。当 NPC 三电平并网变换器桥臂(如 A 相桥臂)故障时,快速熔断器 F_{n1} 和 $F_{n2}(n=a,b,c)$ 熔断故障桥臂,导通对应双向晶闸管 $T_m(n=a,b,c)$,将故障相通过滤波电感连接到直流侧电容中点,重构为 VSG 容错结构^[18-19],如图 2 所示。

VSG 按功能划分为有功-调频、无功-调压、输出参考电流 3 类功能模块^[20]。调节机械转矩 T_m 和电磁转矩 T_e 实现有功-调频;给定无功功率 Q_{set} 、电网无功功率 Q 和电压差值(VSG 虚拟电势和端电压差值)构成无功-调压;根据 VSG 虚拟电势和端电压差值产生输出参考电流,可表示为

$$\left\{ \begin{array}{ll} \ddot{\theta} = (T_m - T_e - D_p \dot{\theta})/J & \text{转矩方程} \\ \left. \begin{array}{l} T_m = P_{set} / \dot{\theta}_n \\ T_e = M_f i_f \langle i, \sin \theta \rangle \end{array} \right\} \text{有功-调频} \\ \left. \begin{array}{l} M_f = -\dot{\theta} i_f \langle i, \cos \theta \rangle / Q \\ i_{qf,ref} = (\theta M_f i_f \sin \theta - u_{abc}) / (R + j\omega L) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{无功-调压} \\ \text{输出参考值} \end{array} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: J 为 VSG 转动惯量; $\dot{\theta}$ 为 VSG 角频率; $\ddot{\theta}$ 为 VSG 角加速度; D_p 为电压下垂系数; P_{set} 为给定有功功率; M_f 为励磁绕组和三相定子线圈之间最大互感; θ 为 VSG 转动角度; i_f 为转子励磁电流。

1.2 电流预测模型

由图 1 可得 NPC 三电平并网变换器的电压方

程为

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = u_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta} - e_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中: $u_{\alpha\beta}=[u_\alpha, u_\beta]^T$, u_α 和 u_β 为变换器在 $\alpha\beta$ 坐标系下输出电压; $i_{\alpha\beta}=[i_\alpha, i_\beta]^T$, i_α 和 i_β 为变换器输出电流; $e_{\alpha\beta}=[e_\alpha, e_\beta]^T$, e_α 和 e_β 为电网电压; R 为滤波电感寄生电阻。

将式(2)进行欧拉离散得

$$\frac{L}{T} [i_{\alpha\beta}(k+1) - i_{\alpha\beta}(k)] = u_{\alpha\beta}(k) - Ri_{\alpha\beta}(k) - e_{\alpha\beta}(k) \quad (3)$$

式中: L 为滤波电感; T 为采样周期; $X(k)$ 为变量 X 在 k 时刻的值; $X(k+1)$ 为变量 X 在 $(k+1)$ 时刻的值。

化简式(3), 得到 $(k+1)$ 时刻预测电流为

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{RT}{L}\right) i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T}{L} [u_{\alpha\beta}(k) - e_{\alpha\beta}(k)] \quad (4)$$

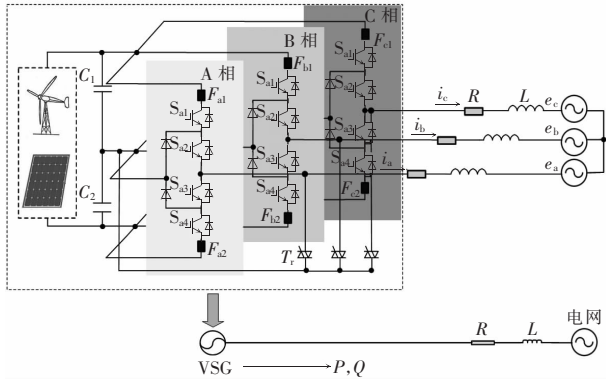


图 1 NPC 三电平 VSG 结构

Fig. 1 Structure of NPC three-level VSG

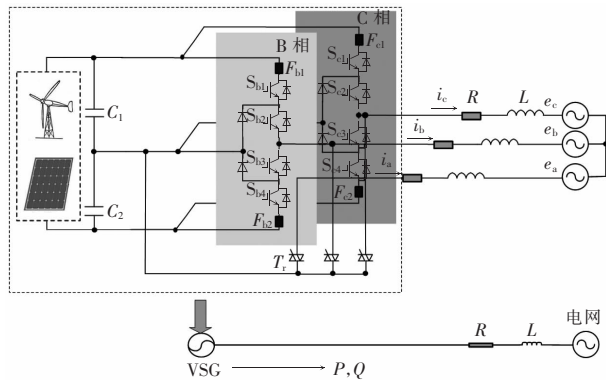
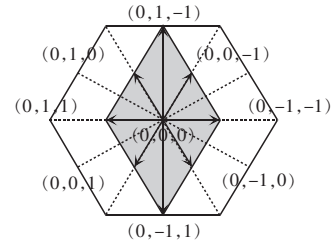


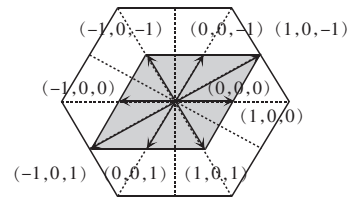
图 2 VSG 桥臂故障容错结构

Fig. 2 Fault-tolerant structure of VSG bridge arm

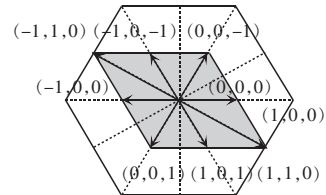
图 2 中, VSG 桥臂故障容错结构有 8 个开关器件, 故障相接到直流侧电容中点为“0”状态, 其他相各有 3 种状态, 共计 9 种开关状态, 如图 3 所示。



(a) A 相故障



(b) B 相故障



(c) C 相故障

图 3 VSG 容错结构空间电压矢量分布

Fig. 3 Space voltage vector distribution of VSG fault-tolerant structure

定义 VSG 开关状态为 S_i ($i=a, b, c$), 即

$$S_i = \begin{cases} 1 & S_{i1} \text{ 和 } S_{i2} \text{ 导通, } S_{i3} \text{ 和 } S_{i4} \text{ 关断} \\ 0 & S_{i2} \text{ 和 } S_{i3} \text{ 导通, } S_{i1} \text{ 和 } S_{i4} \text{ 关断} \\ -1 & S_{i3} \text{ 和 } S_{i4} \text{ 导通, } S_{i1} \text{ 和 } S_{i2} \text{ 关断} \end{cases} \quad (5)$$

$i \in \{a, b, c\}$

当 VSG 发生桥臂故障后, 电压分量 $u_{\alpha\beta}$ 可表示为

$$u_{\alpha\beta} = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{\sqrt{6}} \left(-\frac{S_b + S_c}{2}\right) + j \frac{U_{dc}(S_b - S_c)}{2\sqrt{2}} & \text{A 相故障} \\ \frac{U_{dc}}{\sqrt{6}} \left(S_a - \frac{S_c}{2}\right) + j \frac{-U_{dc}S_c}{2\sqrt{2}} & \text{B 相故障} \\ \frac{U_{dc}}{\sqrt{6}} \left(S_a - \frac{S_b}{2}\right) + j \frac{U_{dc}S_b}{2\sqrt{2}} & \text{C 相故障} \end{cases} \quad (6)$$

该实验平台由 Typhoon602+ 和 PE-Expert4 构成,控制算法在 DSP 和 FPGA 控制芯片组成的 PE-Expert4 处理器板上执行,实验参数如表 2 所示。

表 2 仿真和实验参数

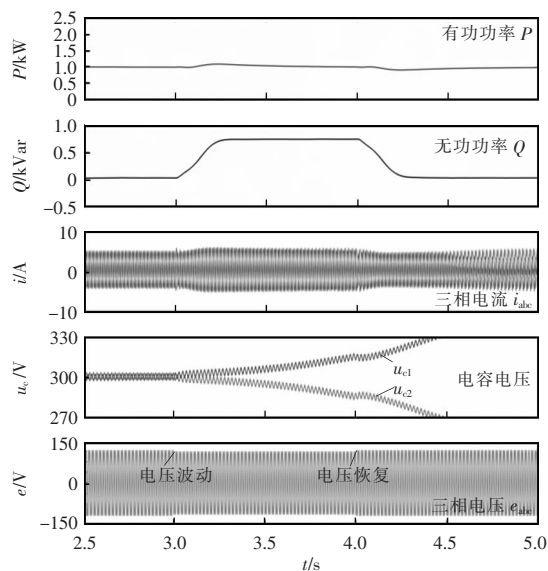
Tab. 2 Simulation and experimental parameters

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	600
电容 $C_1, C_2/\mu F$	4 700
电感 L/mH	10
电阻 R/Ω	0.01
相电压有效值 e/V	110
电网频率 f/Hz	50
权重系数 λ	0.8
采样频率 f_{samp}/kHz	20
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.012 2
阻尼系数 D_p	110
电压下垂系数 D_v	5

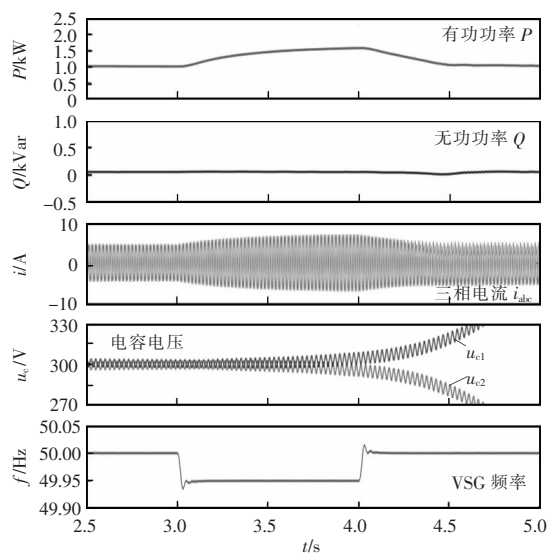
3.1 中点电压平衡能力和对比

为验证引入该中点电压均衡项后的中点电压平衡能力, A 相桥臂故障后不带中点电压平衡和带中点电压平衡的控制效果对比如图 6 和图 7 所示。图 6(a) 为 A 相桥臂故障后不带中点电压平衡 VSG 电压波动时的功率和电压波动情况: 2.5 s 之前电网电压为 110 V 且带有中点电压均衡能力, 系统工作稳定, 直流侧中点电压相对平衡, 电压波动约为 5 V; 在 3~4 s 撤除中点电压均衡项, 电网电压下降为 104.5 V, 无功功率上升, 电网电流增加, 直流侧电容电压波动急剧增加, 不可控制; 在 4~5 s, 电网电压恢复到 110 V, 无功功率和电网电流恢复到原始数值, 直流侧电容电压波动彻底失去控制。

图 6(b) 为 A 相桥臂故障后不带中点电压平衡 VSG 频率波动时的功率和电压波动情况: 2.5 s 之前并网频率为 50 Hz, 系统工作稳定, 带有中点电压均衡, 直流侧中点电压相对平衡, 电压波动约为 5 V; 在 3~4 s, 电网频率下降为 45.95 Hz, 有功功率上升, 电网电流增加, 此时直流侧电容电压波动迅速增加, 不可控制; 在 4~5 s, 电网频率恢复到 50 Hz, 有功功率和电网电流恢复到原始数值, 直流侧电容电压波动失去控制。



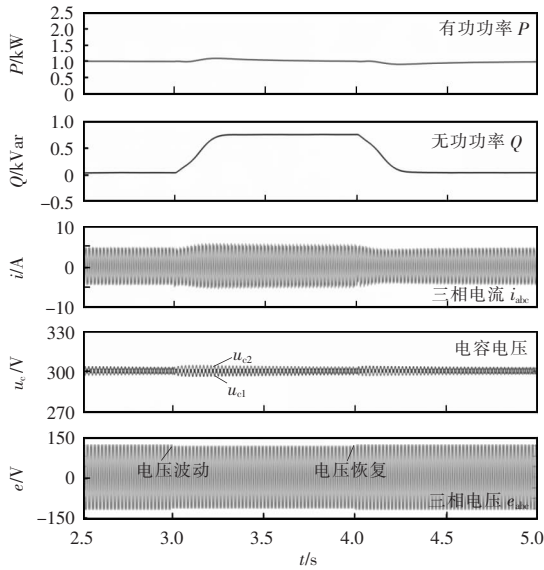
(a) 电压变化



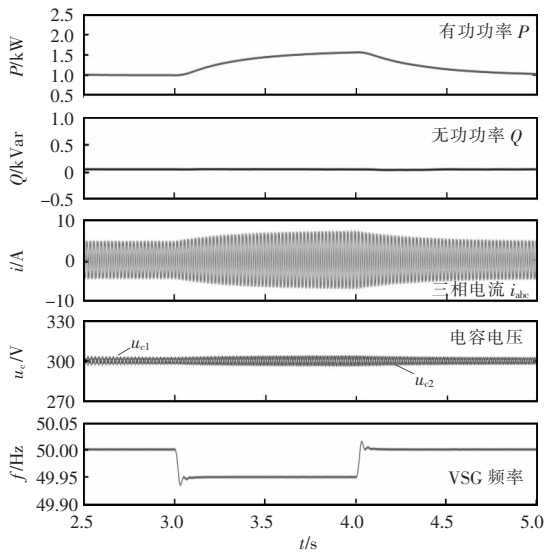
(b) 频率变化

图 6 A 相故障后无中点电压均衡的 VSG 频率变化波形
Fig. 6 Waveforms of VSG frequency without neutral point voltage equalization after phase-A fault

图 7(a) 为 A 相桥臂故障后带中点电压平衡 VSG 电压波动时的功率和电压波动情况: 2.5 s 之前电网电压为 110 V, 系统工作稳定, 直流侧中点电压相对平衡, 电压波动约为 5 V; 在 3~4 s, 电网电压下降为 104.5 V, 无功功率上升, 电网电流增加, 此时直流侧电容电压波动先增加到 10 V, 再以一定系数稳定到 5 V; 在 4~5 s, 电网电压恢复到 110 V, 无功功率和电网电流恢复到原始数值, 直流侧电容电压波动先增加到 10 V, 再稳定到 5 V。



(a) 电压变化



(b) 频率变化

图 7 A 相故障后带中点电压均衡动态波形

Fig. 7 Dynamic waveforms with neutral point voltage equalization after phase-A fault

图 7(b)为 A 相桥臂故障后带中点电压平衡 VSG 频率波动时的功率和电压波动情况:2.5 s 之前并网频率为 50 Hz,系统工作稳定,直流侧中点电压相对平衡,电压波动约为 5 V;在 3~4 s,电网频率下降为 45.95 Hz,有功功率上升,电网电流增加,此时直流侧电容电压波动增加,约为 10 V;在 4~5 s,电网频率恢复到 50 Hz,有功功率和电网电流恢复到原始数值,直流侧电容电压波动缩减为 8 V。由 2 组对比可知,直流侧中点电压均衡项可以有效抑制

电动电压波动。

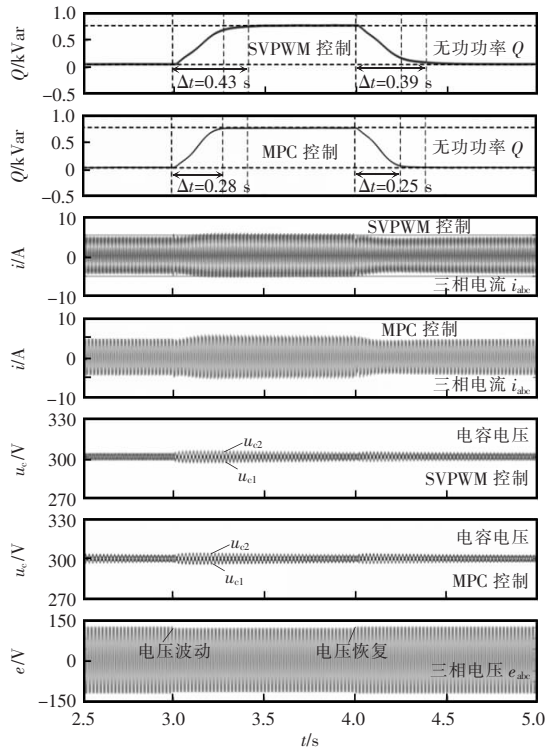
3.2 动态响应速度对比

A 相桥臂故障后使用 MPC 和 SVPWM 控制策略的效果对比如图 8 所示。图 8(a)为 VSG 在电压波动时的响应:2.5 s 之前电网电压为 110 V,系统工作稳定,直流侧中点电压相对平衡,电压波动约为 5 V;在 3~4 s,电网电压下降为 104.5 V,SVPWM 控制下无功功率上升到峰值约 0.43 s,MPC 控制用时 0.28 s。电网电流增加,此时直流侧电容电压波动先增加到 10 V,再稳定到 5 V;在 4~5 s,电网电压恢复到 110 V,SVPWM 控制下无功功率恢复到原值约用了 0.39 s,MPC 控制用时 0.25 s。直流侧电容电压波动先增加到 10 V,再稳定到 5 V。

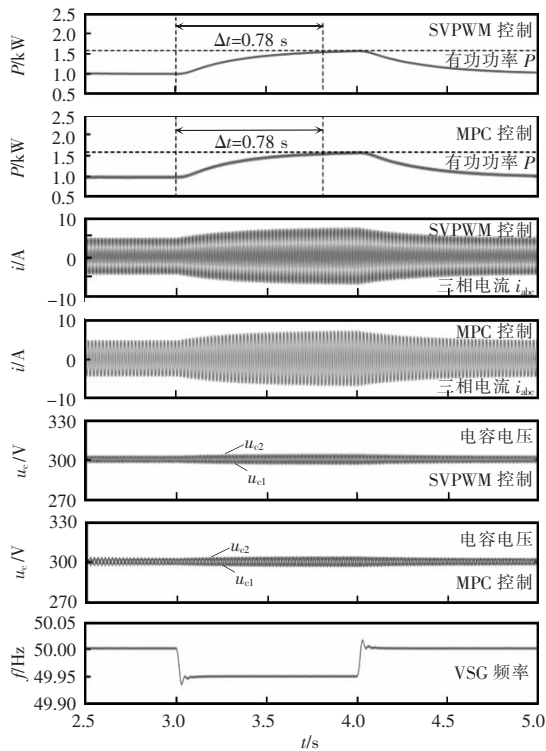
图 8(b)为 VSG 在频率波动时的响应:2.5 s 之前并网频率为 50 Hz,系统工作稳定,直流侧中点电压相对平衡,电压波动约为 5 V;在 3~4 s,电网频率降为 45.95 Hz,SVPWM 控制下有功功率上升到峰值约 0.78 s,和 MPC 控制用时相同;在 4~5 s,电网频率恢复到 50 Hz,有功功率变化趋势也极为相似,直流侧电容电压波动缩减为 8 V。结果表明,相较于 SVPWM,MPC 在“无功-电压”功能上响应速度快,在“有功-频率”功能上响应速度相当。

3.3 有功-频率调节能力验证

给定电网初始频率 $f=50$ Hz,有功功率 $P=1\ 000$ W,无功功率 $Q=0$ Var。如图 9 所示,功率稳定时频率 f 从 50 Hz 下降至 49.95 Hz,有功功率 P 从 1 000 W 上升至 1 400 W,再稳定到 1 200 W。无功功率 Q 在 0 Var 附近波动,三相电流从 4.9 A 上升,然后稳定在 6 A,直流侧电容电压差约为 5 V,且波动幅值相对稳定,无增大趋势,因为中点电压平衡项使最优电压矢量选择产生低中点电流的电压矢量。功率稳定时频率 f 从 49.95 Hz 上升至 50 Hz,如图 10 所示,有功功率 P 从 1 200 W 下降至 1 000 W,无功功率 Q 先上升至 100 Var,再稳定到 0 Var 附近,并网电流从 6 A 下降至 4.9 A,直流侧电容电压差约 4 V,略有减小。当电网频率低于额定频率时,通过有功-频率特性计算调节功率,同时与给定功率和输出有功功率的差值共同生成参考电流的频率,最



(a)电压变化



(b)频率变化

图 8 A 相故障后 SVPWM 控制和 MPC 控制对比

Fig. 8 Comparison between SVPWM control and MPC control after phase-A fault

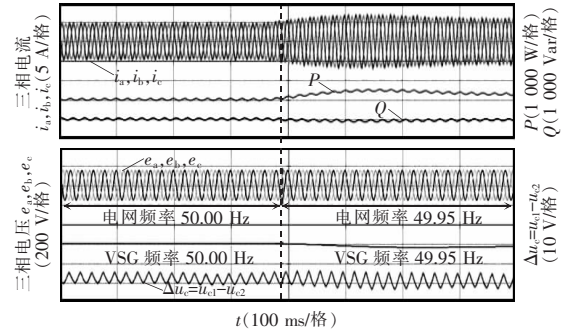


图 9 频率从 50.00 Hz 下降到 49.95 Hz 时功率和电流波形
Fig. 9 Power and current waveforms when frequency drops from 50.00 to 49.95 Hz

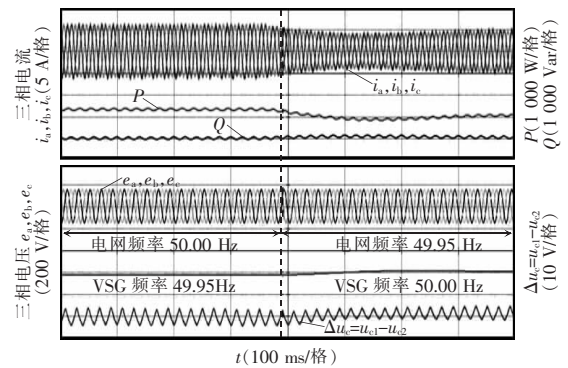


图 10 频率从 49.95 Hz 上升到 50.00 Hz 时功率与
电流波形

Fig. 10 Power and current waveforms when frequency rises from 49.95 to 50.00 Hz

后根据生成的参考电流,用 MPC 选择最优电压矢量输出更多的有功功率,达到新的平衡。实验结果表明,当频率下降时所提 VSG 容错控制策略能实现有功-频率调节,NPC 三电平并网变换器 VSG 有自我恢复能力。

如图 11 所示,功率稳定时频率 f 从 50 Hz 上升至 50.05 Hz,有功功率 P 从 1 000 W 下降至 500 W,再稳定到 700 W 附近。无功功率 Q 在 0 Var 附近,三相电流从 4.9 A 先下降,然后稳定在 3.6 A 附近,直流侧电容电压差约为 4 V,相较稳定时略有减小。功率稳定时频率 f 从 50.05 Hz 下降至 50 Hz,如图 12 所示,有功功率 P 从 700 W 先上升,再稳定至 1 000 W 附近。无功功率 Q 先下降,再稳定到 0 Var 附近。并网电流从 3.6 A 上升至 4.9 A,直流侧电容电压差约为 5 V,相较稳定时略有增加。当电网频率高于额定频率时,通过有功-频率特性计算

调节功率,同时与给定功率和输出无功功率的差值共同生成参考电流的幅值,最后根据生成的参考电流,用 MPC 选择最优电压矢量减少有功功率输出。实验结果表明,当频率上升时,所提 VSG 容错控制策略能实现有功-频率调节,进一步证明了该策略的有效性。

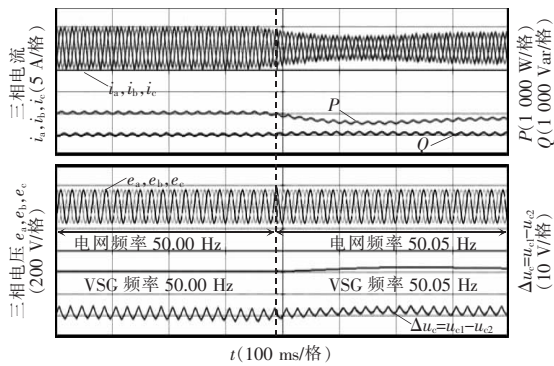


图 11 频率从 50.00 Hz 上升到 50.05 Hz 时功率与电流波形

Fig. 11 Power and current waveforms when frequency rises from 50.00 to 50.05 Hz

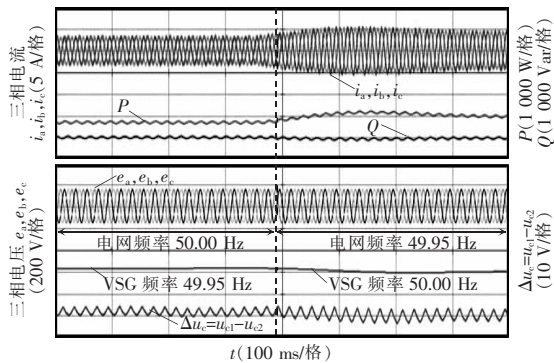


图 12 频率从 50.05 Hz 下降到 50.00 Hz 时功率和电流波形

Fig. 12 Power and current waveforms when frequency drops from 50.05 to 50.00 Hz

3.4 无功-电压调节能力验证

给定电网初始电网电压 $e=110\text{ V}$,功率稳定时电网电压从 110 V 下降到 104.5 V,如图 13 所示,无功功率 Q 由 600 Var 上升到 800 Var,再稳定在 700 Var 附近;有功功率 P 先下降,再稳定至 800 W 附近;并网电流从 4.9 A 上升至 5.8 A 附近。如图 14 所示,功率稳定时电网电压从 104.5 V 上升到 110 V,无功功率 Q 由 700 Var 逐步稳定到 600 Var,有功功

率 P 伴随着电网电压有所波动然后恢复原状态,三相电流从 5.8 A 上升至 4.9 A。当电网电压低于额定电压时,通过无功-电压特性计算调节功率,再经过调节器和积分生成电流参考幅值,最后根据生成的参考电流,用 MPC 选择最优电压矢量增大无功功率输出。实验结果表明:当电网电压下降时,无功功率会上升;当电网电压由下降恢复到额定值时,无功功率也会恢复到额定值。

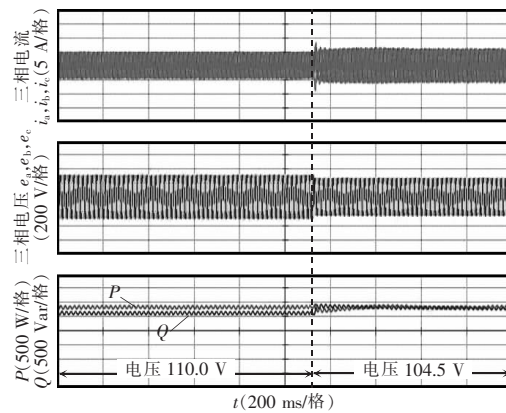


图 13 电压从 110.0 V 下降到 104.5 V 时功率与电流波形

Fig. 13 Power and current waveforms when voltage drops from 110.0 to 104.5 V

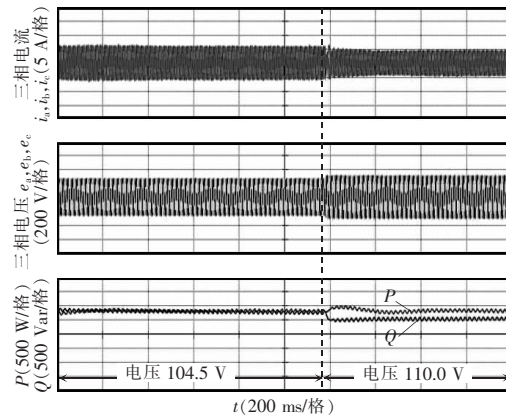


图 14 电压从 104.5 V 上升到 110.0 V 时功率和电流波形

Fig. 14 Power and current waveforms when voltage rises from 104.5 to 110.0 V

功率稳定时电网电压从 110 V 上升到 115.5 V,如图 15 所示,无功功率 Q 由 600 Var 下降到 300 Var,再稳定到 500 Var 附近;有功功率 P 先下降,再稳定至 800 W 附近;并网电流从 4.9 A 上升至 3.8 A 附近。如

图 16 所示,功率稳定时电网电压从 115.5 V 下降到 110 V,无功功率 Q 由 600 Var 逐步稳定到 800 Var,有功功率 P 伴随着电网电压有所波动,然后恢复原状态,三相电流从 3.8 A 上升至 4.9 A。当电网电压高于额定电压时,通过无功-电压特性计算调节功率,再经过调节器和积分生成电流参考幅值,减少无功功率输出。实验结果表明:当电网电压上升时,无功功率会适当下降以适应电网变化;当电网电压由上升恢复到额定值时,无功功率也会恢复到额定值,验证了所提 VSG 容错控制策略能自动调节无功功率-电压变化。

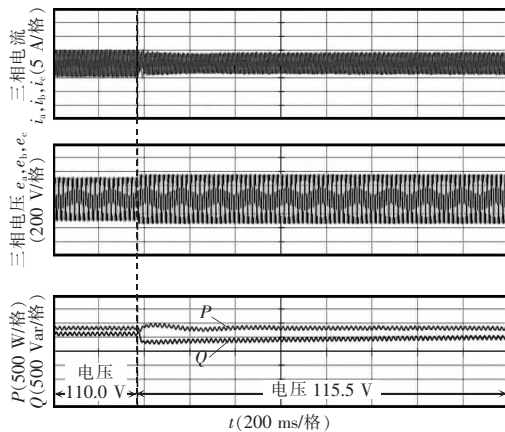


图 15 电压从 110.0 V 上升到 115.5 V 时功率与电流波形

Fig. 15 Power and current waveforms when voltage rises from 110.0 to 115.5 V

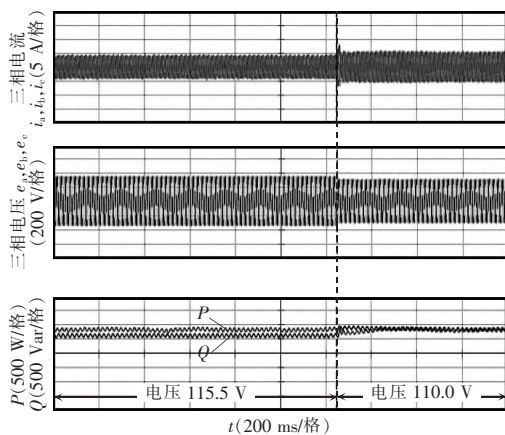


图 16 电压从 115.5 V 下降到 110.0 V 时功率和电流波形

Fig. 16 Power and current waveforms when voltage drops from 115.5 to 110.0 V

当电网电压为 110 V,频率为 50 Hz 时,电网电流稳态波形如图 17 所示。在容错状态下,三相电网电流工作稳定,THD 为 3.6%,有功功率和无功功率均稳定,直流侧电容电压差值在 1 V 附近波动,最大波动 5 V,为直流电压源的 0.83%。

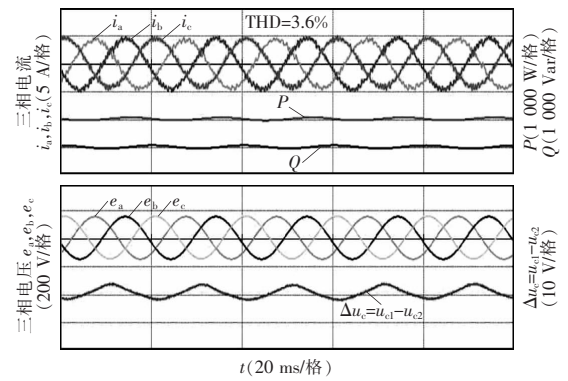


图 17 电压 110 V,频率 50 Hz 时电流和功率波形

Fig. 17 Current and power waveforms at 110 V and 50 Hz

4 结论

VSG 为新能源并网系统提供惯性和阻尼,然而 VSG 桥臂故障会导致常规并网控制策略失效,造成输出电流波形严重畸变,影响并网系统正常运行。为使 VSG 桥臂故障后容错连续运行,针对 NPC 三电平 VSG 桥臂故障问题提出一种容错模型预测控制方法,得出以下结论。

(1)在 VSG 出现开关器件故障后,所提控制策略将 NPC 三电平 VSG 重构为 VSG 桥臂故障容错结构,建立 VSG 桥臂故障容错模型,分析 VSG 桥臂故障容错结构的电压矢量和工作原理。

(2)基于模型预测控制理论,提出一种 NPC 三电平 VSG 桥臂故障容错模型预测控制策略,使 VSG 在桥臂故障后稳定运行。与常规 SVPWM 控制策略相比,所提控制策略在有功-频率调节环节用时缩短,动态响应速度快。

(3)提出一种直流侧电容电压均衡策略,在代价函数中加入直流侧电容电压预测项。当 VSG 发生桥臂故障并进行有功-频率和无功-电压调节时,常规控制策略下的直流侧电容电压不均衡,所提

控制策略可以将直流侧电容电压波动稳定在 10 V 以内。

(4)实验结果表明,所提控制策略能在 VSG 桥臂故障后进行有功-频率和无功-电压调节,抑制直流侧电容电压波动,有效提高 VSG 运行可靠性。

参考文献:

- [1] Liu Jia, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [2] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169.
Wang Yawei, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169 (in Chinese).
- [3] 马铨林, 杨欢, 何绍民. 基于虚拟同步机运行模式的平滑算法[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 1-10.
Ma Yilin, Yang Huan, He Shaomin, et al. Smoothing algorithm based on operating mode of virtual synchronous generator [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 1-10 (in Chinese).
- [4] 李明, 张兴, 张行, 等. 基于虚拟稳态同步阻抗的 VSG 输出阻抗与小信号建模分析[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 11-17.
Li Ming, Zhang Xing, Zhang Hang, et al. Modeling and analysis of VSG output impedance and small-signal based on virtual steady-state synchronous impedance [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 11-17 (in Chinese).
- [5] 王皓靖, 刘舒, 包海龙, 等. 运用虚拟同步机技术的新型兆瓦级光-储并网结构[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 446-452.
Wang Haojing, Liu Shu, Bao Hailong, et al. A new megawatt structure of PV and energy storages with virtual synchronous generator [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 446-452 (in Chinese).
- [6] 程慧婕, 帅智康, 彭也伦, 等. 含异步机负荷的虚拟同步机并联系统暂态电压稳定性分析及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4787-4798.
Cheng Huijie, Shuai Zhikang, Peng Yelun, et al. A new megawatt structure of PV and energy storages with virtual synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4787-4798 (in Chinese).
- [7] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [8] Huang Linbin, Xin Huanhai, Yuan Hui. Damping effect of virtual synchronous machines provided by a dynamical virtual impedance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 570-573.
- [9] 阳建, 刘勇, 盘宏斌, 等. 基于虚拟同步机的微网逆变器无频差控制[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2001-2008.
Yang Jian, Liu Yong, Pan Hongbin, et al. Method of frequent deviation-free control of microgrid inverter based on virtual synchronous generator control [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2001-2008 (in Chinese).
- [10] 万晓凤, 胡海林, 聂晓艺, 等. 电网电压不平衡时的改进虚拟同步机控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3573-3581.
Wan Xiaofeng, Hu Hailin, Nie Xiaoyi, et al. An improved control strategy for virtual synchronous generator under unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3573-3581 (in Chinese).
- [11] 孙军, 蒋天龙, 王仰铭, 等. 不平衡电网下双馈感应发电机的虚拟同步机控制优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 135-144.
Sun Jun, Jiang Tianlong, Wang Yangming, et al. Optimization strategy of virtual synchronous generator control for doubly-fed induction generator in unbalanced power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 135-144 (in Chinese).
- [12] 王仰铭, 孙丹, 年珩, 等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3368-3375.
Wang Yangming, Sun Dan, Nian Heng, et al. Extended power control strategy of self-synchronized virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3368-3375 (in Chinese).
- [13] 张贞艳. 弱电网情况下基于改进型有限集模型预测控制新型三相电平整流器的研究[J]. 电源学报, 2021,

- 19(1): 59-68.
- Zhang Zhenyan. Research on novel three-phase three-level rectifier based on improved finite set model predictive control under weak grid conditions [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 59-68 (in Chinese).
- [14] 毛峥, 夏鲲, 叶艳红. 基于有限集模型预测控制的无刷直流电机转矩波动抑制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 39-45.
- Mao Zheng, Xia Kun, Ye Yanhong. Finite control set model predictive control of torque ripple reduction for BLDCM [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7): 39-45(in Chinese).
- [15] 陈经国, 刘怡. 基于 AFE 变换器的改进模型预测控制策略[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 123-128.
- Chen Jingguo, Liu Yi. Improved model predictive control strategy based on AFE converter [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 123-128 (in Chinese).
- [16] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 改善独立微网频率动态特性的虚拟同步发电机模型预测控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 40-47.
- Chen Laijun, Wang Ren, Zheng Tianwen, et al. Model predictive control of virtual synchronous generator to improve dynamic characteristic of frequency for isolated microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 40-47(in Chinese).
- [17] 李琰琰, 赵亚谦, 郭磊磊, 等. 虚拟同步发电机电流模型预测控制策略[J/OL]. 电源学报: 1-13.
- Li Yanyan, Zhao Yaqian, Guo Leilei, et al. Current model predictive control strategy for virtual synchronous generator [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-13 (in Chinese).
- [18] 张斌, 杨来宝, 刘鑫, 等. 三相八开关容错逆变器驱动 PMSM 系统模型预测直接转矩控制[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1076-1084.
- Zhang Bin, Yang Laibao, Liu Xin, et al. Model predictive torque control of PMSM system driven by three phase eight switch fault-tolerant inverter [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2019, 40(4): 1076-1084 (in Chinese).
- [19] 许伟奇, 张斌, 汶雪. 基于分数阶滑模观测器的三相八开关容错逆变器驱动永磁同步电机系统无传感器 FCS-MPC [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(7): 1037-1049.
- Xu Weiqi, Zhang Bin, Wen Xue, et al. Sensorless FCS-MPC using fractional-order sliding-mode observer for permanent magnet synchronous motor fed by three-phase eight-switch fault-tolerant inverter [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(7): 1037-1049 (in Chinese).
- [20] Jin Nan, Pan Chao, Li Yanyan, et al. Model predictive control for virtual synchronous generator with improved vector selection and reconstructed current [J]. Energies, 2020, 13(20): 5435.



金楠

作者简介:

金楠(1982-),男,中国电源学会高级会员,通信作者,教授。研究方向:电力电子与电能变换、模型预测控制。E-mail:jinnan@zzuli.edu.cn。

肖晗(1996-),男,硕士研究生。研究方向:电力电子变换器模型预测控制。E-mail:1287229125@qq.com。

谢欢(1997-),男,硕士研究生。研究方向:电力电子变换器模型预测控制。E-mail:xh1780195656@163.com。

武洁(1979-),男,中国电源学会高级会员,博士。研究方向:电力电子变换器模型预测控制。E-mail:wujie@zzuli.edu.cn。