

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.4.163

中图分类号: TM933

文献标志码: A

采用新型模型预测的光伏虚拟同步机 低电压穿越控制

陈 璐^{1,2}, 张 溪^{1,2}, 党晓圆^{1,2}, 李 洁^{1,2}, 冯铁成^{1,2}

(1.重庆移通学院智能工程学院, 重庆 401520; 2.公共大数据安全技术重庆市
重点实验室, 重庆 401520)

摘要: 在光伏逆变器中采用虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)策略, 可以实现惯性和阻尼支撑, 但传统 VSG 无法对系统提供暂态无功电压支撑, 无法满足低电压穿越 LVRT(low-voltage ride-through)期间对电压调节的需求。通常网侧发生接地故障后将光伏逆变器 VSG 控制切换至模型预测控制 MPC(model predictive control), 接地故障切除后由 MPC 切回至 VSG 控制策略。为了提升 LVRT 期间目标电流跟踪能力, 在 MPC 控制中设置自适应目标函数。MATLAB/Simulink 仿真和实验结果表明, 所提新型模型预测的光伏虚拟同步机具备低电压穿越能力, LVRT 期间 MPC 电流控制精确, MPC 切换至 VSG 控制过程中无暂态电流冲击。

关键词: 虚拟同步机; 光伏并网系统; 低电压穿越; 模型预测; 平滑切换

Low-voltage Ride-through Control of Photovoltaic Virtual Synchronous Generator Using Novel Model Prediction

CHEN Lu^{1,2}, ZHANG Xi^{1,2}, DANG Xiaoyuan^{1,2}, LI Jie^{1,2}, FENG Tiecheng^{1,2}

(1. School of Intelligent Engineering, Chongqing College of Mobile Communication, Chongqing 401520, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Public Big Data Security Technology, Chongqing 401520, China)

Abstract: The use of virtual synchronous generator (VSG) strategy for a photovoltaic (PV) inverter can achieve inertia and damping support. The traditional VSG cannot provide transient reactive voltage support for the system and cannot meet the demand for voltage regulation during the low-voltage ride-through (LVRT) periods. After the occurrence of a grounding fault, the VSG control of the PV inverter is switched to model predictive control (MPC). After the grounding fault is removed, the MPC is switched back to the VSG control strategy. To improve the target current tracking capability during the LVRT periods, an adaptive objective function is set in the MPC. MATLAB/Simulink simulation and experimental results show that the PV VSG under the novel MPC has an LVRT capability. During the LVRT periods, the MPC current control is precise, and there is no transient current surge during the switching from the MPC to VSG control.

Keywords: Virtual synchronous generator (VSG); photovoltaic (PV) grid-connected system; low-voltage ride-through (LVRT); model prediction; smooth switching

为了实现“碳达峰”、“碳中和”的战略目标,

包括光伏发电在内的新能源发电领域得到迅速发展^[1-2]。光伏发电采用电力电子逆变器进行电能变换实现并网发电, 具有低惯性、低阻尼的特性, 随着光伏大面积接入, 势必会引起电力系统中旋转备用、转动惯量的相对减少^[3-4]。在光伏逆变器中采用新型控制策略, 使光伏功率、电压调节更加高效, 为电力系统提供相应支撑, 已成为行业内的研究热

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-04-18, 2023-07-13, 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-27; 网络首发日期: 2024-03-09
基金项目: 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJZD-K202002401)

This work is supported by Chongqing Municipal Education Commission Science and Technology Research Funding Project under the grant KJZD-K202002401

点^[5]。为使光伏系统具备同步发电机特性,为电网提供惯性和阻尼支撑,目前广泛采用虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)控制策略^[6]。VSG 控制通过模拟传统同步发电机的机电暂态特性,使光伏系统可以进行类似同步发电机的频率和电压调节^[7]。

传统 VSG 无法对系统提供暂态电压支撑,因此不具备低电压穿越 LVRT(low-voltage ride-through)能力,当网侧发生接地故障时,将引发系统电压对称或者不对称跌落事故,极易造成光伏系统设备脱网^[8-9]。目前,针对 VSG 提高 LVRT 能力的方法是在发生电压跌落时将 VSG 控制切换至 LVRT 相应控制方式^[10-13]。文献[14]为了提高对 LVRT 期间的电流跟踪能力,将滑模观测器应用于光伏逆变器矢量电流环中来实现电流无差调节;文献[15]采用李雅普诺夫函数分析故障前后功角变化,得到滑模观测器增益对功角稳定性的影响;文献[16]针对不同短路工况,在 VSG 控制环节中引入比例谐振 PR (proportional resonance)控制器,改善 VSG 电压参考值,通过对正、负序电压单独控制,改善 LVRT 期间 VSG 输出电压对称性。

本文以 GB/T 19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》对光伏故障穿越的要求为依据,提出采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制方案。首先,建立光伏 LCL 并网逆变

器数学模型及 VSG 控制数学模型;然后,根据国标分析光伏系统 LVRT 期间控制电流控制方案,提出具有自适应目标函数的 MPC 方案;接着,分析光伏系统 LVRT 期间故障切除前后 VSG 和 MPC 电参量,为了避免 MPC 切换至 VSG 时冲击电流,在 VSG 控制系统中增加电路模拟器并分析参考取值;最后,通过 MATLAB/Simulink 及搭建实验平台分别进行仿真和实验,验证本文所提方法的有效性及可行性。

1 光伏 VSG 及并网控制

1.1 光伏 VSG 控制

本文以 LCL 逆变器拓扑结构为研究对象,在其直流侧配置储能以起到稳定直流母线电压的作用。光伏逆变器的 VSG 控制是模仿同步发电机 SG(synchronous generator)外特性,使光伏系统具备虚拟惯量和虚拟阻尼,具有频率调节及电压调节的功能,实现光伏系统友好型并网。建立光伏 LCL 逆变器拓扑及 VSG 控制模型如图 1 所示,其中储能通过 DC-DC 换流器并联于逆变器直流侧, C_{dc} 为光伏组件直流侧滤波电容, R_f 、 L_f 、 C_f 构成 LCL 滤波电路, u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 LCL 逆变器交流三相桥臂电压和电流, e_a 、 e_b 、 e_c 为逆变器并网点三相电压,即网侧电压。

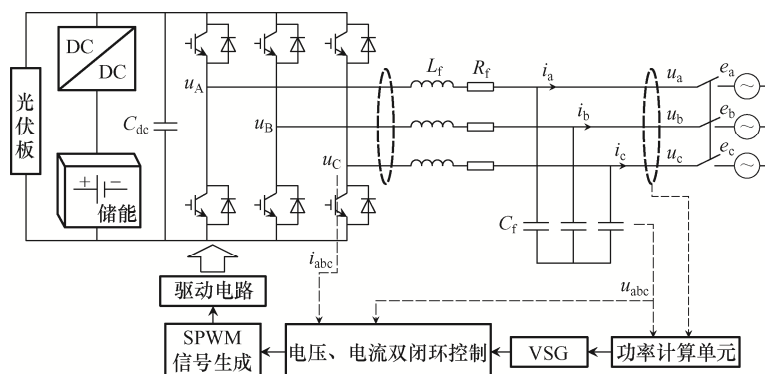


图 1 光伏系统电路拓扑及 VSG 控制模型

Fig. 1 Circuit topology of photovoltaic system and VSG control model

在 VSG 控制系统中,虚拟调速器和转子机械方程构成 VSG 有功功率控制环节。虚拟调速器通过模拟下垂特性,实现有功功率-频率调节,可表示为

$$P_{\text{ref}} - P_e = -m(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中: P_{ref} 为光伏系统有功功率目标值; P_e 为光伏系统有功功率实际输出值; m 为有功下垂系数; ω

为 VSG 虚拟电角速度; ω_0 为额定虚拟角速度。

转子机械方程是在虚拟调速器下垂控制基础上引入虚拟惯量 J 和虚拟阻尼 D , 通过调节功率实现虚拟机械转矩输出控制。引入虚拟惯量使 VSG 在有功率调节中具有惯性, 引入虚拟阻尼来抑制功率调节过程中的功率振荡。转子机械方程为

$$\begin{cases} J \frac{d(\omega - \omega_0)}{dt} = \frac{1}{\omega_0} (P_{\text{ref}} - P_e) - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ 为 VSG 虚拟功率因数角。

VSG 同样可以模拟同步发电机励磁电流控制方式以实现电压幅值调节, 具备励磁调节惯性。类相比于光伏逆变器的 VSG 转子机械方程, 可以得到无功-电压调节方程为

$$U_V - U_0 = K_V (Q_{\text{ref}} - Q_e) \quad (3)$$

式中: U_V 为 VSG 虚拟内电势幅值; U_0 为 VSG 虚拟内电势初始值; K_V 为无功调节系数; Q_{ref} 为光伏系统无功功率目标值; Q_e 为光伏系统无功功率实际输出值。

1.2 光伏并网控制

为了实现光伏逆变器输出 PQ 独立控制, 本文分别对 VSG 输出电压矢量在 dq 轴下进行解耦控制。对 d 轴、 q 轴电流调节采用 PI 控制, 其传递函数可表示为

$$\begin{cases} u_d = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ u_q = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) (i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为 dq 轴坐标系下光伏逆变器桥臂电压; K_p 和 K_I 分别为电流 PI 调节的比例和积分调节系数; i_d^* 和 i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流参考值; i_d 和 i_q 分别为 dq 轴坐标系下光伏逆变器桥臂电流; L 为滤波电路电感; e_d 和 e_q 分别为 dq 轴坐标系逆变器并网点电压; s 为复频域变量。

光伏常年工作于 MPPT 模式, 逆变器工作于功率因数为 1 模式, 有功功率为视在功率, 无功功率即 d 轴电流标么值为 1, q 轴电流标么值为 0。本文设计的光伏并网控制如图 2 所示。

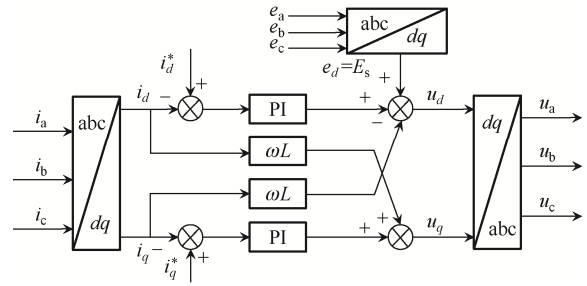


图 2 光伏并网控制框图

Fig. 2 Block diagram of PV grid-connected control

2 新型 MPC 光伏 LVRT 控制方法

2.1 光伏 LVRT 控制要求

根据 GB/T 19964—2012《光伏电站接入电力系统技术规定》对光伏故障穿越的要求, 大、中型光伏电站在电网发生接地故障时要具备低电压穿越能力, 为电网稳定提供支撑, 如图 3 所示。光伏并网点电压轮廓线及以上区域, 光伏控制系统应连续运行不脱网, 在光伏并网点电压轮廓线以下区域, 允许光伏系统脱网运行。

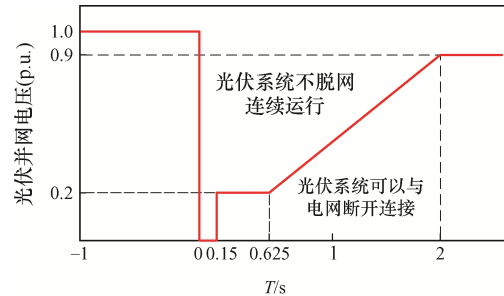


图 3 光伏电站低电压穿越要求曲线

Fig. 3 Low-voltage ride-through requirement curve for photovoltaic power station

在光伏电站 LVRT 期间, 需要对 i_d 和 i_q 进行控制, 光伏逆变器按照 LVRT 标准输出有功、无功功率, i_d 对应的有功功率与视在功率相同, i_q 对应的无功功率为 0。LVRT 期间有功和无功电流参考值即目标电流与额定电流的关系为

$$\sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} \leq \sqrt{2}(1 + K_x) I_N \quad (5)$$

式中: K_x 为光伏逆变器长期耐受过流系数; I_N 为额定电流幅值。

光伏系统输送至网侧的无功功率对应的 i_q 应

具备实时跟踪并网点电压变化的能力,即

$$\begin{cases} i_q \geq 1.5 \times \left(0.9 - \frac{U^+}{U_N} \right) I_N & 0.2 \leq \frac{U^+}{U_N} \leq 0.9 \\ i_q \geq 1.05 I_N & \frac{U^+}{U_N} < 0.2 \\ i_q = 0 & \frac{U^+}{U_N} > 0.9 \end{cases} \quad (6)$$

式中: U^+ 为光伏逆变器输出电压正序分量 u^+ 幅值; U_N 为光伏 VSG 输出额定电压幅值。

2.2 自适应 MPC 控制策略

为了使光伏逆变器具有低电压穿越能力,满足电压跌落情况下电流大幅调节特性,本文在光伏 LVRT 期间采用 MPC 算法。MPC 是一种基于 k 时刻当前采样值对下一时刻 $k+1$ 状态量进行预测控制的方法,具有目标值快速跟踪能力,以目标函数作为约束条件对电压矢量不断优化,将该电压矢量与光伏逆变器开关状态一一对应,最终实现光伏逆变器 PWM 控制。

对式(4)进行离散化处理,将 dq 轴之间的交叉耦合项视为扰动,将光伏逆变器输出电流作为控制状态量,可以得到 $k+1$ 时刻 dq 轴的预测方程为

$$\begin{cases} i_d(k+1) = Ai_d(k) + BE_d(k) \\ i_q(k+1) = Ai_q(k) + BE_q(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A = 1 - \frac{R_f T_s}{L}$, 其中 R_f 为滤波电路电阻, T_s 为时间常数; $B = \frac{T_s}{L}$; $E_d(k)$ 和 $E_q(k)$ 为 k 时刻输出控制量, $\begin{bmatrix} E_d(k) \\ E_q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d(k) - e_d(k) \\ u_q(k) - e_q(k) \end{bmatrix}$ 。

将 $E_d(k)$ 和 $E_q(k)$ 改写为预测方程

$$\begin{cases} E_d(k) = E_d(k-1) + \Delta E_d(k) \\ E_q(k) = E_q(k-1) + \Delta E_q(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\Delta E_d(k)$ 、 $\Delta E_q(k)$ 为 k 时刻 MPC 增量。

将式(8)代入式(7)得

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_{d0}(k+1) + BE_d(k) \\ i_q(k+1) = i_{q0}(k+1) + BE_q(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i_{d0}(k+1) = Ai_d(k) + BE_d(k-1)$; $i_{q0}(k+1) = Ai_q(k) + BE_q(k-1)$ 。

为了使 MPC 系统在光伏低电压穿越期间具备目标电流快速跟踪能力,使 $k+1$ 时刻被控电流的预测值与实际差值尽可能小,在 LVRT 故障穿越时提供更多无功功率,避免光伏并网系统与内部储能系统无功分配误差,本文提出一种自适应目标函数,在 MPC 中实现 LVRT 期间电流快速跟踪,可表示为

$$J(k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_p} \left\| i_{dq}^*(k+1) - i_{dq}(k+1) \right\|_Q^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \left\| \Delta E_{dq}(k) \right\|_R^2 & Q_T \leq Q_{wmax} \\ \sum_{i=1}^{N_p} \left\| i_{dq}^*(k+1) - i_{dq}(k+1) \right\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \Delta E_{dq}(k) - (u_{dq}^* - e_{dq}) \right\|_Q^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \left\| \Delta E_{dq}(k) \right\|_R^2 & Q_T > Q_{wmax} \end{cases} \quad (10)$$

式中: N_p 、 N_c 分别为 MPC 预测域及控制域,通常 $N_p \geq N_c$, 其取值由低电压时长决定; Q 、 R 为对角权值系数矩阵,系数取值范围为 0.60~0.75; u_{dq}^* 为 dq 坐标系下光伏逆变器输出电压参考值; Q_T 为使光伏电站具备 LVRT 能力所需总无功功率; Q_{wmax} 为不含储能系统的光伏逆变器输出最大无功功率。当 $Q_T \leq Q_{wmax}$ 时,无需储能设备进行功率调节,光伏 LVRT 所需无功由光伏逆变元器件调节所得;当 $Q_T > Q_{wmax}$ 时,光伏 LVRT 所需无功除由逆变器自身电感、电容调节所得,还需由储能在直流侧提供直流母线电压支撑。

3 MPC 平滑切换 VSG 策略

光伏系统低电压穿越按照电压跌落前、后可以分为 2 个过程:①发生网侧电压跌落事故,当光伏并网点电压标幺值 $U \leq 0.9$,此时光伏逆变器由 VSG 控制切换至 MPC;②故障切除,电压恢复至额定阶段,当光伏并网点电压标幺值 $U > 0.9$,光伏逆变器由 MPC 切换回 VSG 控制。由 VSG 控制切换至 MPC 无暂态电流冲击,这是由于 MPC 根据

线路电压参考值进行电流控制, 与 VSG 输出电压矢量无关。由 MPC 切换回 VSG 控制则会引起较大暂态冲击电流, 这是由于 VSG 输出电压矢量与网侧电压矢量存在因为输电线路参数不同造成的电压偏差, 且 VSG 控制输出阻抗较小, 而较小的电压偏差也会造成较大的暂态冲击电流。本文针对由 MPC 切换回 VSG 控制引起的暂态冲击电流进行改进, 提出 1 种在 VSG 控制中添加电路模拟器的控制方法来实现平滑切换。

为了实现由 MPC 至 VSG 控制的平滑切换, 在切换时刻需要保证 MPC 和 VSG 的输出电流指令和调制波相位一致。切换瞬间时间极短, 电流变化量可近似为 0, 即 $\Delta i \approx 0$ 。为了避免电流指令跃变,

使输出电流指令保持一致, 在切换时刻, 本文将 MPC 电流环 $k+1$ 时刻输出电流 $i_{dq}(k+1)$ 作为 VSG 控制电路模拟器输出电流的初始值, 可表示为

$$i_{dq0} \approx i_{dq}(k+1) \tag{11}$$

为了避免 2 种控制调制波相位差别过大, 在切换时刻, 将 MPC 控制锁相得到的相位 θ_{k+1} 作为 VSG 控制电路模拟器输出相位初始值, 可表示为

$$\theta_0 \approx \theta_{k+1} \tag{12}$$

在 VSG 控制中添加电路模拟器, 采用 MPC 和 VSG 输出电流、调制波相位一致的算法, 可以实现光伏 LVRT 故障切除后 MPC 平滑切换 VSG 控制。具有电路模拟器的光伏逆变器控制系统, 如图 4 所示。

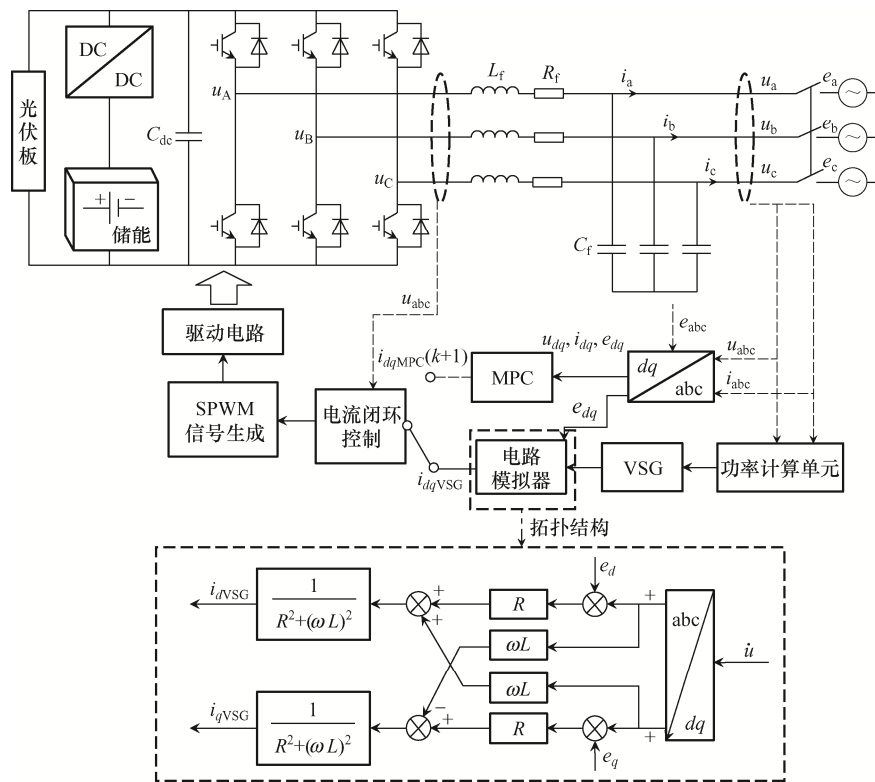


图 4 光伏低电压穿越控制框图

Fig. 4 Block diagram of photovoltaic low-voltage ride-through control

4 仿真分析

为了验证本文所提控制方案的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 5 所示的光伏系统模型, 包括: 1 个容量为 0.5 MW 的光伏板阵列, 光

伏板型号为 SNM-P200; 1 个容量为 1 000 kVA 的双绕组分裂式变压器, 2 个光伏板各自通过逆变器与其相连, 由 0.4 kV 升压至 10 kV 后接入电网; 长度为 10 km 的架空线路, 型号为 LCJ-240/40。

光伏逆变器硬件及外接输电线路仿真参数如表 1 所示, 光伏逆变器控制系统仿真参数如表 2 所示。

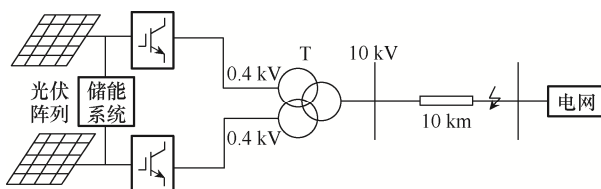


图 5 光伏逆变并网仿真模型

Fig. 5 Simulation model of photovoltaic inverter grid-connection

表 1 光伏逆变器硬件及外接输电线路仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of photovoltaic inverter hardware and external transmission line

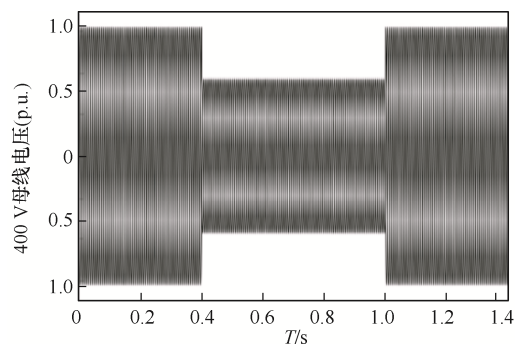
参数	数值
光伏额定容量/MW	0.5
滤波电感/mH	1
线路长度/km	10
单位电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.122
储能额定容量/kW	100
直流母线电压/V	537
额定角频率/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	314
滤波电容/ μF	4 700

表 2 光伏逆变器控制系统仿真参数

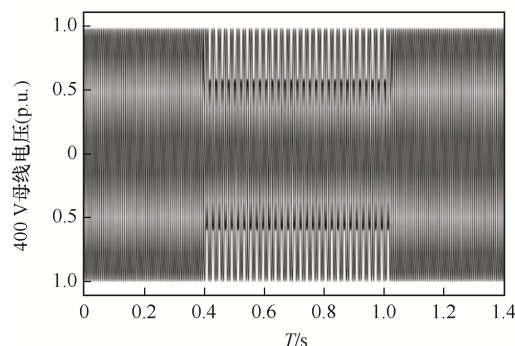
Tab. 2 Simulation parameters of photovoltaic inverter control system

参数	数值
采样周期/ μs	100
有功下垂系数	1.1
虚拟阻尼系数/[$\text{rad} \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$]	1
无功调节系数	0.05
通讯延时常数/s	0.42
虚拟转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.1
无功调节系数	0.21×10^{-3}
比例调节系数	0.3

为了验证本文所提新型模型预测的光伏虚拟同步机在 LVRT 期间的电压支撑能力, 分别在输电线路设置对称接地故障和单相不对称接地故障。仿真工况: 0.4 s 时刻, 输电线路分别发生三相短路接地故障和 A 相短路接地故障, 0.6 s 后故障切除, 预测域及控制域时长取 0.2 s。采用常规控制和本文所提新型 MPC 得到的光伏逆变器输出电压波形如图 6 所示。可以看出, 无论是发生三相短路接地故障还是 A 相短路接地故障, 新型模型预测的光伏虚拟同步机的光伏逆变器输出电压都满足低电压穿越要求, 不会因为电压跌落深度过大, 造成光伏设备脱网, 从而使光伏系统具备电压穿越能力。



(a) 三相短路接地故障

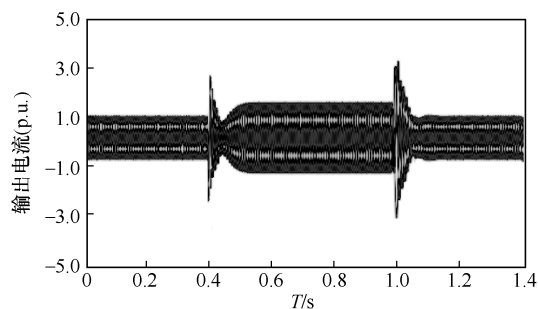


(b) A相短路接地故障

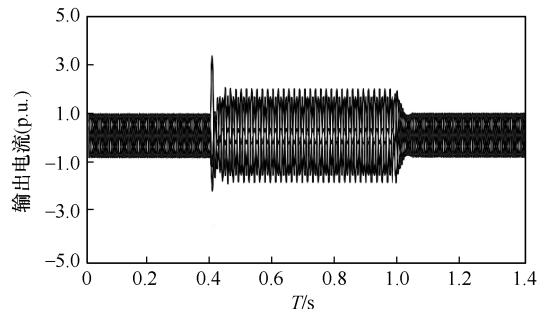
图 6 接地故障前后光伏逆变器输出电压波形

Fig. 6 Waveforms of output voltage from photovoltaic inverter before and after grounding fault

图 7 为线路发生三相短路接地故障和 A 相短



(a) 三相短路接地故障



(b) 单相短路接地故障

图 7 不同接地故障光伏逆变器采用传统 VSG 控制输出电流波形

Fig. 7 Waveforms of output current from photovoltaic inverter under traditional VSG control in the cases of different grounding faults

路接地故障前后, 光伏逆变器采用传统 VSG 控制输出的三相电流波形。可见, 在 0.4 s 时刻线路发生三相短路接地故障和 A 相短路接地故障, 1.0 s 时刻故障切除, 采用传统 VSG 控制的光伏逆变器输出三相电流存在大幅波动情况, 整个 LVRT 期间, 光伏 VSG 输出电流均超过逆变器暂态、稳态耐受最大冲击电流, 极易造成设备损坏。

图 8 为线路发生三相短路接地故障和 A 相短路接地故障前后, 光伏逆变器采用新型控制输出的三相电流波形。可见: 在 0.4 s 时刻线路发生三相短路接地故障和 A 相短路接地故障, 1.0 s 时刻故障切除, 采用新型控制的光伏逆变器输出三相电流幅值变化不大, 没有暂态电流冲击; 故障切除后, 当由 MPC 切换至 SVG 控制, 因为采用平滑切换控制算法, 暂态过程大幅缩减, 电流幅值可以控制在 1.1 p.u. 内, 有效避免了暂态电流冲击, 实现了 2 种控制方法的平滑切换。

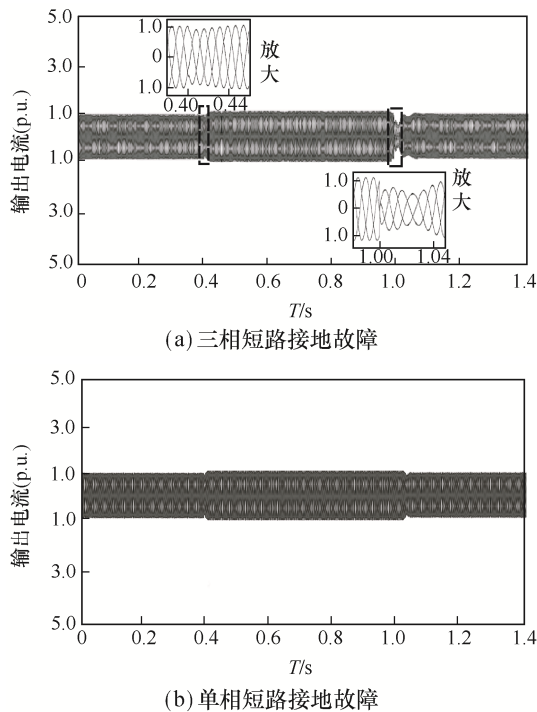


图 8 不同接地故障光伏逆变器采用新型控制输出电流波形
Fig. 8 Waveforms of output current from photovoltaic inverter under novel control in the cases of different grounding faults

5 实验分析

为了验证本文所提新型控制策略可以实现光伏低电压穿越, 稳定提供电压支撑, 搭建了基于 DSP+FPGA 的光伏半实物实验平台, 其中 DSP 选择 TI 公司的 TMS320F28335、FPGA 选择 Xilinx 公司的 Spartan-7 以及相关外围电路、IGBT 选择 Infineon 公司的 K40T120、示波器选择 Tektronix 公司的 MDO4104B-3 型示波器, 实验参数与仿真参数相同。设置实验工况: 在 1.0 s 时刻分别发生 A 相短路接地故障和三相短路接地故障, 1.7 s 故障切除。

图 9 为 A 相短路接地故障发生前、后, 光伏逆变器系统输出三相电压、电流实验波形。可见: 采用本文所提新型模型预测光伏虚拟同步机控制

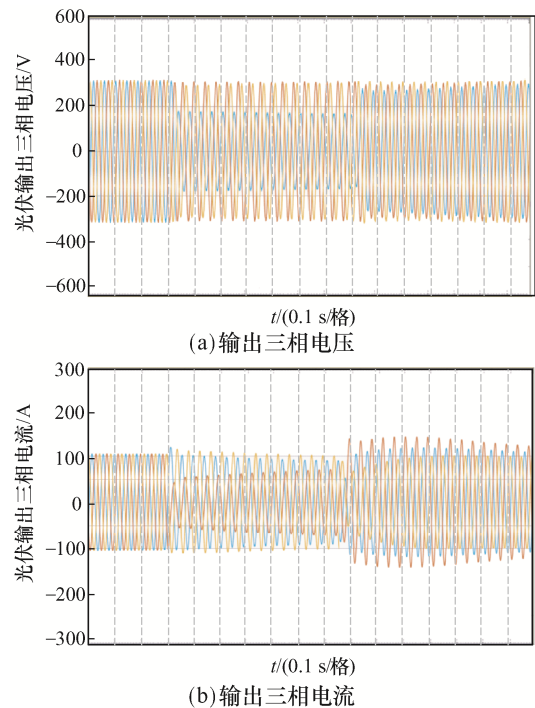


图 9 A 相短路接地故障发生前、后, 光伏逆变器系统输出三相电压、电流实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms of output of three-phase voltage and current from photovoltaic inverter system before and after the occurrence of phase-A short-circuit grounding fault

策略,单相接地后可以协助光伏系统实现低电压穿越, LVRT 期间 B、C 相电压降低,但维持在约 190 V,可以保证光伏设备不脱网;故障切除后,光伏逆变器快速恢复至系统额定输出电流运行,幅值无大范围波动,暂态电流冲击得到了较好地抑制。

图 10 为三相对称接地故障发生前后,光伏逆变器系统输出三相电压、电流实验波形。可见:三相对称短路接地后,采用本文所提新型模型预测光伏虚拟同步机控制策略,可以协助光伏系统实现低电压穿越, LVRT 期间 A、B、C 三相电压保持一致,维持在约 203 V,满足国标低电压穿越要求;故障消除后,三相电流对称调节,快速恢复至额定电流,波形无畸变,电能质量较高。

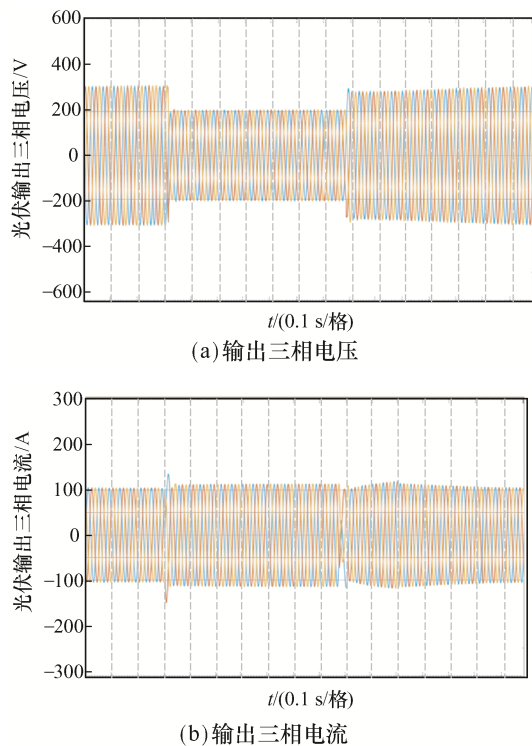


图 10 三相对称接地故障发生前、后,光伏逆变器系统输出三相电压、电流实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of output of three-phase voltage and current from photovoltaic inverter system before and after the occurrence of three-phase symmetrical grounding fault

6 结语

本文提出一种采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制方案,将 MPC 算法与 VSG 算法相结合,实现光伏逆变器 LVRT,利用 MPC 电流快速跟踪性和大幅度调节特性,实现了电压跌落时电流快速跟踪响应;提出新型自适应目标函数来提高光伏系统无功分配精度;在 VSG 控制系统中增加电路模拟器有效避免了 MPC 切换至 VSG 时的暂态冲击电流。仿真和实验结果表明,本文所提采用新型模型预测的光伏虚拟同步机低电压穿越控制系统,可以使光伏系统具备低电压穿越能力;采用自适应目标函数可以使 MPC 控制系统电流跟踪能力提升,无功分配准确;平滑切换算法实现了 MPC 平滑切换至 VSG 控制。

参考文献:

- [1] 鲍建, 杨沛豪, 何昭辉, 等. 新能源混合储能提高高电压穿越能力研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 79-86.
Bao Jian, Yang Peihao, He Zhaohui, et al. Research on improving high voltage ride through capability of new energy hybrid energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 79-86 (in Chinese).
- [2] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.
Sun Ganghu, Wang Ennan, He Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptive transient droop control [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100 (in Chinese).
- [3] 戚振彪, 齐慧. 基于调节函数的含光伏电源配电网电压越限识别研究[J/OL]. 电源学报: 1-8 (2021-12-20) [2023-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/details/12.1420.TM.20211220.1350.002.html>.
Qi Zhenbiao, Qi Hui. Research on identification of voltage exceeding limits in distribution networks with photovoltaic power sources based on regulating functions

- [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-8(2021-12-20) [2023-02-17]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20211220.1350.002.html> (in Chinese).
- [4] 鲍建, 杨沛豪. 采用改进 MPC 提高储能系统电压暂态特性研究[J/OL]. 电源学报: 1-8 (2021-11-26) [2023-02-17]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20211126.1032.002.html>.
- Bao Jian, Yang Peihao. Research on improving the transient voltage characteristics of energy storage systems using improved MPC [J/OL]. Journal of Power Supply: 1-8 (2021-11-26) [2023-02-17]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20211126.1032.002.html> (in Chinese).
- [5] 高鑫, 王斌, 罗云雷, 等. 基于光伏并网逆变器的一种滞环电流控制技术[J]. 电工电气, 2021(12): 1-6.
- Gao Xin, Wang Bin, Luo Yunlei, et al. A hysteresis current control technique of photovoltaic grid-connected inverters [J]. Electrotechnics Electric, 2021(12): 1-6 (in Chinese).
- [6] 米俊毅, 赵兴勇. 基于改进滑模控制的光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(9): 16-23.
- Mi Junyi, Zhao Xingyong. Control strategy for PV grid-connected inverter based on improved sliding mode control [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(9): 16-23 (in Chinese).
- [7] 蒋林, 秦建茹, 韩璐, 等. 基于滑模变功率跟踪的 PV-VSG 控制技术[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 193-199.
- Jiang Lin, Qin Jianru, Han Lu, et al. Control technology of PV-VSG based on sliding mode variable power tracking [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 193-199 (in Chinese).
- [8] 何昭辉, 曹锐, 刘海鹏, 等. 利用虚拟阻抗及无功电流控制提高光伏故障电压支撑能力研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 42-49.
- He Zhaohui, Cao Rui, Liu Haipeng, et al. Research on improving photovoltaic fault voltage support capability by virtual impedance and reactive current control [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 42-49 (in Chinese).
- [9] 邢鹏翔, 贾璇悦, 许长清, 等. VSG 低电压穿越的特性分析及控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 130-137, 143.
- Xing Pengxiang, Jia Xuanyue, Xu Changqing, et al. A study on characteristic analysis and control methods of low voltage ride through for the VSG [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 130-137, 143 (in Chinese).
- [10] 李自成, 张智越. 基于储能 Crowbar 的直驱风电系统低电压穿越控制策略[J]. 自动化仪表, 2019, 40(8): 98-102.
- Li Zicheng, Zhang Zhiyue. Low-voltage ride-through control strategy based on energy storage crowbar for direct-drive wind power generation system [J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(8): 98-102 (in Chinese).
- [11] 王鑫明, 寻志伟, 杨沛豪. 电转气技术的应用及与其它储能方式的比较[J]. 上海电气技术, 2019, 12(1): 18-22.
- Wang Xinming, Xun Zhiwei, Yang Peihao. Application of electric gas conversion technology and comparison with other energy storage schemes [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2019, 12(1): 18-22 (in Chinese).
- [12] 陈天一, 陈来军, 郑天文, 等. 基于模式平滑切换的虚拟同步发电机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- Chen Tianyi, Chen Laijun, Zheng Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140 (in Chinese).
- [13] 戴仲覆, 陈刚, 赵利刚, 等. 一种适用于电网高频问题的风机虚拟惯量控制策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(5): 56-61, 70.
- Dai Zhongfu, Chen Gang, Zhao Ligang, et al. A wind turbine virtual inertia control strategy for high frequency problems in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5): 56-61, 70 (in Chinese).
- [14] 郑峰, 叶韬, 李世春, 等. 基于储能广义控制算法的电网并/离网平滑切换控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2840-2853.
- Zheng Feng, Ye Tao, Li Shichun, et al. Research on grid-connected/islanded smooth transition of microgrid based on generalized control algorithm of energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2840-2853 (in Chinese).
- [15] 刘巨, 姚伟, 侯云鹤, 等. 一种储能改善低电压穿越期间风电场注入电流特性的致稳策略[J]. 电工技术

学报, 2016, 31(14): 93-103.

Liu Ju, Yao Wei, Hou Yunhe, et al. Stability control for improving the characteristic of wind farm injection current during low voltage ride-through using energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 93-103 (in Chinese).

- [16] 朱航, 朱森, 黄阮明, 等. PSS/E 环境下的第二代风机模型解析与低电压穿越功能优化增强[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 191-201.

Zhu Hang, Zhu Miao, Huang Ruanming, et al. Mechanism of 2nd-generation wind turbine model and functional optimization of low voltage ride-through based on PSS/E [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 191-201 (in Chinese).



陈璐

作者简介:

陈璐(1988—), 女, 硕士, 讲师。
研究方向: 电气自动化、通信技术。
E-mail: chenlu12@126.com。

张溪(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 电源控制技术。
E-mail: adrianohl@163.com。

党晓圆(1986—), 女, 硕士, 讲师。
研究方向: 电源电气技术。E-mail: dangxiaoyuan@163.com。

李洁(1983—), 女, 硕士, 副教授。
研究方向: 电源控制及检测。E-mail: lijie111@163.com。

冯铁成(1985—), 男, 硕士, 副教授。研究方向: 电源控制技术。E-mail: fengtiecheng@163.com。



天津市精神文明建设委员会办公室

来源: 天津文明网