

引用格式:陈波,张权旺,刘柳,等.计及 LVRT 的光伏并网系统暂态稳定性分析与参数优化研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):162-173.

Citation: CHEN Bo, ZHANG Quanwang, LIU Liu, et al. Transient stability analysis and parameter optimization of PV grid-connected systems considering LVRT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 162-173.

# 计及 LVRT 的光伏并网系统暂态稳定性分析与 参数优化研究

陈波<sup>1</sup>, 张权旺<sup>2</sup>, 刘柳<sup>1</sup>, 周宁<sup>1</sup>, 叶钟海<sup>3</sup>,  
苏永春<sup>1</sup>, 戈田平<sup>1</sup>, 朱晓娟<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;  
3. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 光伏并网系统在低电压穿越 (low voltage ride-through, LVRT) 期间若控制参数设置不当易造成自身脱网, 尤其是在大规模光伏并网加剧电力系统电力电子化程度的情况下, 会显著降低系统暂态稳定性水平。为提升系统暂态稳定性, 首先, 基于光伏并网系统电压跌落期间的运行方式, 采用矢量图分析故障持续期间的系统暂态稳定特征; 然后, 采用单目标线性规划求解方法刻画有功电流指令在暂态稳定约束下的绝对稳定区间, 并基于该区间采用几何分析法确定光伏并网系统控制参数的最优区间; 最后, 对江西某区域实际电网结构进行仿真分析, 验证所提参数优化方法对系统暂态稳定性的提升效果。

**关键词:** 光伏并网; 暂态稳定; 低电压穿越; 有功电流; 参数优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.017 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)06-0162-12

## Transient stability analysis and parameter optimization of PV grid-connected systems considering LVRT

CHEN Bo<sup>1</sup>, ZHANG Quanwang<sup>2</sup>, LIU Liu<sup>1</sup>, ZHOU Ning<sup>1</sup>, YE Zhonghai<sup>3</sup>,  
SU Yongchun<sup>1</sup>, GE Tianping<sup>1</sup>, ZHU Xiaojuan<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract:** Improper setting of control parameters during low voltage ride-through (LVRT) in photovoltaic (PV) grid-connected systems can easily cause their own disconnection, especially when large-scale PV grid connection exacerbates the degree of power electronics in the power system, which can significantly reduce the transient stability of the system. To improve the transient stability of the system, firstly, based on the operating mode of the PV grid-connected system during voltage drop, vector plots are used to analyze the transient stability characteristics of the system during the duration of the fault. Secondly, the single objective linear programming method is used to describe the absolute stability interval of active current command under transient stability constraints, and based on this interval, the geometric analysis method is used to determine the optimal interval of control parameters of the PV grid-connected system. Finally, simulation analysis is conducted on the actual power grid structure of a certain region in Jiangxi Province to verify the effectiveness of the proposed parameter optimization method in improving the transient stability of the system.

**Key words:** PV grid connection; transient stability; low voltage ride-through; active current; parameter optimization

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国网江西省电力有限公司科技项目 (521820220006)

通信作者: 张权旺 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源电力系统暂态稳定性分析等方面的研究; E-mail: zhangquanwang\_wt@163.com

当电网发生短路故障时,光伏并网系统将从常规发电控制模式进入低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)模式,此过程中,光伏并网系统极易因控制参数设置不当造成自身脱网,更有甚者,会引发其他光伏并网系统大面积连锁脱网,最终导致系统出现暂态失稳。更为严峻的是,随着光伏渗透率的不断提高,光伏并网系统低电压穿越期间控制参数不当将进一步恶化电力系统的暂态同步稳定性<sup>[1-6]</sup>。

现有研究表明,在故障持续期间电压跌落程度、线路阻抗和光伏电源输出电流对光伏并网系统暂态稳定性有显著影响<sup>[7-11]</sup>,其中电压跌落程度及线路阻抗由电网故障行为和系统结构决定,光伏电源输出电流可由调整LVRT控制策略来控制。传统的光伏并网系统LVRT控制主要聚焦于无功电流控制,通过调节自身无功输出以支撑电网电压<sup>[12-13]</sup>。但这种控制策略忽视了有功电流对光伏并网系统自身同步特性的影响,同样可能会导致LVRT控制策略不当从而引发系统暂态同步失稳。

目前,针对提升光伏并网系统暂态稳定性的方法主要有闭锁锁相环、附加阻尼、设计前馈补偿项和参数优化。通过在低电压状况下闭锁锁相环<sup>[14]</sup>,可降低电流角度不稳定性,从而保证暂态稳定,例如,在故障瞬态期间闭锁锁相环积分环节从而避免发生超调以实现暂态稳定<sup>[15]</sup>,在故障瞬态期间加入逻辑判断机制实现一阶和二阶锁相环平滑过渡来提高相位跟踪精度从而保证暂态稳定<sup>[16]</sup>;此外,在故障期间附加阻尼环节增强并网逆变器暂态稳定性,例如,附加有功功率控制保证系统位于正阻尼区从而提高暂态稳定性<sup>[17]</sup>,附加自适应阻尼系数从而增大系统阻尼比以减小频率振荡和超调从而实现暂态稳定<sup>[18]</sup>;进一步地,通过设计前馈补偿项使锁相环零偏置以准确注入电流,也可提升含多变频器系统的暂态稳定性<sup>[19]</sup>。附加阻尼、闭锁锁相环或锁相环积分以及设计前馈补偿项的方法均改变了光伏系统的控制结构,控制方法较为复杂,更为关键的是其无法避免系统在LVRT期间因为平衡点缺失而造成的暂态失稳问题。相较而言,参数优化只需要在每种故障情况下调整功率穿越参数以调整故障期限系统平衡点,可便捷地为系统稳定提供保障。当前研究已经表明,有功电流系数会影响光伏系统故障期间的有功电流,通过优化光伏的有功输出可改善系统暂态稳定性,例如,可基于时域仿

真法分析LVRT控制参数对系统暂态电压稳定性的影响规律,从而得出优化参数<sup>[20-22]</sup>。然而,上述时域仿真法无法从机理层面准确刻画控制参数的最优区间,难以为实际光伏系统并网运行提供理论指导,因此有必要从理论上研究LVRT控制参数对系统暂态稳定的影响,从而为系统故障期间暂态稳定提供理论保障。

为此,本文从光伏并网系统暂态期间的系统电压动态特征建模出发,结合LVRT期间光伏系统的运行控制目标,分析了故障持续期间系统暂态稳定特性,通过单目标线性规划求解方法明确了保障系统暂态稳定的光伏电源运行可行域边界。基于此可行域边界,提出了基于几何分析法的光伏并网系统控制参数优化方法,该方法相较典型控制参数方案可提高系统暂态稳定性。最后通过仿真分析验证了该方法的有效性。

## 1 光伏并网系统模型及暂态稳定机理

### 1.1 光伏并网系统结构

由于单极式光伏并网系统具有硬件结构简单、可靠性高及损耗小等优点,大型光伏并网系统通常采用单极式光伏并网结构。以图1所示典型单极式光伏并网系统为例进行理论分析,该系统主要由光伏阵列、光伏并网逆变器及其控制系统组成。

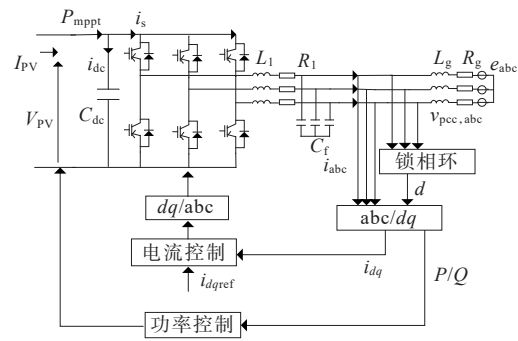


图1 光伏并网结构示意图

Figure 1 PV grid connection structure

其中,并网逆变器控制系统中的功率电流控制要求输出的波形具有稳态精度高、动态响应快的特性。为便于实施光伏并网系统有功和无功的解耦控制,系统使用电网电压定向矢量控制。锁相环通过实时检测并网点电压相位,并将并网点电压相位与追踪的电网电压相位之差反馈到比例积分(proportional integral, PI)控制器,对并网点 \$q\$ 轴电压 \$U\_{sq}\$ 进行无静差消除,实现并网同步控制。

图1中, \$I\_{PV}\$、\$V\_{PV}\$ 分别为光伏电池阵列输出的电

流和电压,  $P_{m\text{ppt}}$  为经过最大功率点跟踪控制技术调整后输出的最大功率,  $C_{\text{dc}}$  为直流母线电容,  $L_1$ 、 $C_1$  构成了滤波器,  $R_1$  为电阻,  $i_{\text{abc}}$  为并网点电流,  $V_{\text{pec,abc}}$  为并网点电压,  $L_g$ 、 $R_g$  为等效传输线路阻抗,  $e_{\text{abc}}$  为电网电压,  $\delta$  为锁相环输出的相角差,  $i_{dq}$  为经过  $dq$  正变换后的  $dq$  轴电流,  $i_{dq\text{ref}}$  为检测的参考电流,  $P$ 、 $Q$  分别为并网逆变器正常运行状态下输出的有功功率和无功功率。

## 1.2 LVRT 控制模型

图2为中国规定的新能源LVRT并网导则中电压响应曲线。

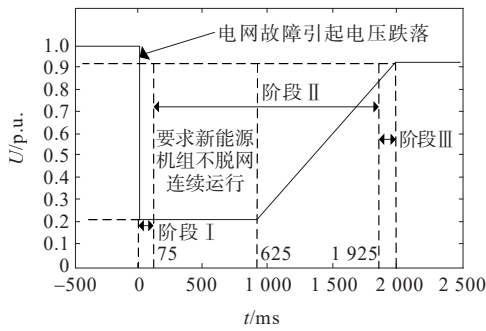


图2 新能源LVRT并网导则中电压响应曲线

Figure 2 Voltage response curve in grid connection guidelines for new energy LVRT

由图2可知, LVRT一共分为3个阶段: 阶段I为故障检测阶段, 持续时间短, 主要涉及并网逆变器设备的保护, LVRT控制策略难以在此阶段切入; 阶段II为故障持续阶段, 光伏并网系统检测到电网故障, 切换至LVRT控制模式; 阶段III为故障清除阶段, 持续时间短, 此过程无控制模式切换, 仍然沿用LVRT控制模式。

在故障持续期间采取的LVRT控制策略为指定电流控制策略, 功率控制环被闭锁, 光伏并网系统不需要经过功率控制环导出电流, 可直接由并网逆变器控制系统发出电流指令。其中, 有功电流应设置为

$$i_{dt}^* = K_{1,\text{lp,LV}} U_g + K_{2,\text{lp,LV}} I_{p0} \quad (1)$$

式中,  $i_{dt}^*$  为有功电流指令;  $K_{1,\text{lp,LV}}$  为与电网电压幅值正相关的有功电流计算系数;  $K_{2,\text{lp,LV}}$  为与光伏并网系统初始有功电流幅值正相关的有功电流计算系数;  $I_{p0}$  为初始有功电流幅值;  $U_g$  为故障点电压幅值。

无功电流根据并网导则应设置为

$$i_{qt}^* = -1.5 \times (0.9 - U_g) \quad (2)$$

式中,  $i_{qt}^*$  为无功电流指令;  $U_g$  为故障点电压幅值。

## 1.3 故障持续期间系统暂态稳定机理分析

故障持续期间, 暂态冲击分量可认为已衰减完毕<sup>[23]</sup>, 光伏并网系统需进入长达上千毫秒的电流稳定注入环节, 此时光伏并网系统不仅在暂态调节过程面临大扰动同步稳定问题, 同时必须在低电压状态下快速过渡到新的稳态, 此时不同类型的光伏电源均可视为满足并网导则要求的受控电流源<sup>[24]</sup>, 即输出电流可快速跟踪电流指令。此外, 即使所有并网控制器的动态性能都比较理想, 但是光伏并网系统还是会因为自身不存在稳定平衡点而发生失步<sup>[25]</sup>。因此, 在合理忽略并网控制器动态特性的前提下, 可建立统一的大信号等效电路模型, 以此表征不同类型光伏并网系统在故障持续期间的外特性。因此可作以下假设<sup>[26]</sup>:

- 1) 忽略电流环的动态特性, 即输出电流能立即跟踪其电流指令值;
- 2) 忽略锁相环动态特性, 即锁相环能准确快速地定位并网点电压的相位信息并实现准确跟踪;
- 3) 直流母线能被控制在稳定范围内。

基于上述假设, 简化图1可建立光伏并网系统的大信号等效电路模型如图3所示。图3中,  $U_s$  为并网点电压幅值,  $I$  为光伏并网系统交流侧总输出电流幅值,  $Z_g$  为并网点到故障位置的等效传输线路阻抗幅值,  $\theta_i$ 、 $\theta_{Z_g}$  分别为输出电流相位角和阻抗角,  $\delta$  为并网点电压矢量  $U_s$  和故障点电压矢量  $U_g$  之间的相角差。

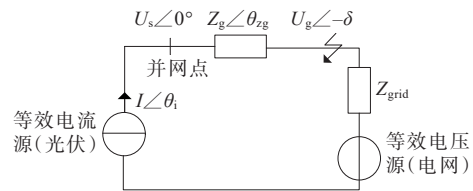


图3 光伏并网系统大信号等效电路模型

Figure 3 A large signal equivalent circuit model for PV grid connection system

根据图3及假设条件可知, 其输出总电流矢量  $I$  关系如下:

$$\begin{cases} I = i_{dt}^* + j i_{qt}^* \\ i_d = i_d^* = i_{dt}^* \\ i_q = i_q^* = i_{qt}^* \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $i_{dt}^*$ 、 $i_{qt}^*$  分别为故障持续期间光伏并网系统输出的有功电流分量和无功电流分量;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为电流环输出有功电流和无功电流分量;  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别为电流环跟踪的有功电流指令和无功电流指令。

并网点电压矢量  $U_s$ 、故障点电压矢量  $U_g$ 、线路

阻抗压降矢量  $U_{\Delta}=IZ_g$  必须始终满足基尔霍夫电压定律,即在任意时刻形成闭合回路。光伏并网系统在  $dq$  坐标系下不同阶段的锁相同步过程分别如图4~6所示。

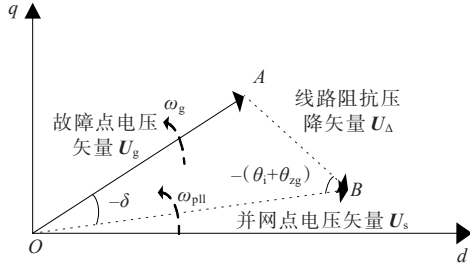


图4 短路故障后系统初始状态

Figure 4 Initial system state after short circuit fault

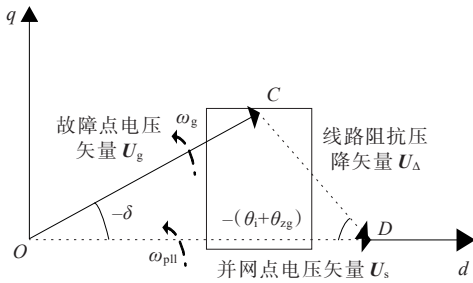


图5 经系统调节后同步稳定状态

Figure 5 Synchronized stable state after system adjustment

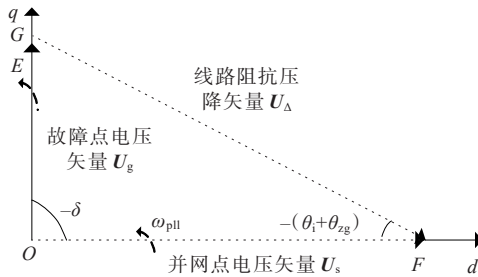


图6 系统不平衡稳定状态

Figure 6 Unbalanced stable state of system

经过短路故障后系统初始状态如图4所示,图4中  $\omega_{pll}$ 、 $\omega_g$  分别为锁相环输出角频率和电网角频率,此时并网电压矢量  $U_s(\overrightarrow{OB})$  没有定在  $d$  轴,  $U_s$  的无功分量不为0,没有达到同步要求,经过系统调节之后,系统同步稳定状态如图5所示,实现了锁相同步( $\overrightarrow{OD}$ )。如图6所示,当线路阻抗压降矢量  $U_{\Delta}(\overrightarrow{GF})$  的无功分量  $\overrightarrow{OG}$  大于故障点电压  $\overrightarrow{OE}$  时,要使并网电压矢量  $U_s(\overrightarrow{OF})$  始终稳定在  $d$  轴,则  $U_s(\overrightarrow{OF})$ 、 $U_g(\overrightarrow{OE})$ 、 $U_{\Delta}(\overrightarrow{GF})$  不能形成闭合三角形,不满足基尔霍夫定律,此时系统不存在稳定平衡点,系统发生失步失稳。

根据图5可得并网点电压矢量  $U_s$  在  $dq$  轴坐标系下与电网电压矢量  $U_g$ 、线路阻抗压降矢量  $U_{\Delta}=IZ_g$  的交互数学关系如下:

$$IZ_g \angle (\theta_i + \theta_{zg}) = R_g i_{dt}^* - X_g i_{qt}^* + j(R_g i_{qt}^* + X_g i_{dt}^*) \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{sd} = U_g \cos \delta + R_g i_{dt}^* - X_g i_{qt}^* \\ U_{sq} = -U_g \sin \delta + R_g i_{qt}^* + X_g i_{dt}^* \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R_g$ 、 $X_g$  分别为并网点到故障点的等效传输线路电阻和电抗。

以上基于典型光伏并网结构以及LVRT控制模型,采用矢量图分析了短路故障后系统初始状态、经系统调节后同步稳定状态和系统不平衡稳定状态,当线路阻抗压降无功分量大于故障点电压幅值时系统不存在稳定平衡点。

## 2 系统暂态稳定运行区域及参数优化

基于上述系统暂态稳定机理分析,可知系统稳定平衡点存在与否主要与跌落电压幅值和注入电流有关,考虑跌落电压幅值的所有情况,将采用单目标线性规划求解方法和几何分析法具体刻画系统暂态稳定运行区域,求解有功电流指令和有功电流系数的优化区间。

### 2.1 有功电流指令稳定可行域区间

由图6和式(5)可知,  $U_{sq}$  作为锁相环同步过程的扰动信号,在故障持续期间,必须被无静差消除,即调节至0,才能确保系统存在可维持同步的稳定平衡点。因此根据式(5)可知,  $\sin \delta$  小于1,要使  $U_{sq}$  能被调节至0,存在平衡点,则有:

$$|R_g i_{qt}^* + X_g i_{dt}^*| < U_g \quad (6)$$

进一步有:

$$i_{dt, \min}^* = \frac{-U_g - R_g i_{qt}^*}{X_g} < i_{dt}^* < \frac{U_g - R_g i_{qt}^*}{X_g} = i_{dt, \max}^* \quad (7)$$

式中,  $i_{dt, \min}^*$ 、 $i_{dt, \max}^*$  分别为电网故障期间系统平衡点存在情况下光伏并网系统输出有功电流的下限和上限。

进一步考虑光伏并网系统工作在发电运行状态以及电力电子器件输出电流限制,  $i_{dt}^*$  应满足如下关系:

$$0 \leq i_{dt}^* \leq \sqrt{I_m^2 - (i_{qt}^*)^2} = i_{dt, m}^* \quad (8)$$

式中,  $I_m$  为并网逆变器短时最大输出电流,一般取1.2 p.u.;  $i_{dt, m}^*$  为考虑并网逆变器输出电流限制下的最大有功电流。

根据存在平衡点电流限制和电力电子器件自身输出电流限制条件,且考虑当 $0.2 \text{ p.u.} < U_g < 0.9 \text{ p.u.}$ 时系统才采取LVRT控制策略以及 $i_{df}^*$ 为正的性质的,取其共同围成的区域,可得在故障持续期间系统有功电流指令 $i_{df}^*$ 的可行域区间如图7阴影部分所示。

由图7,式(6)、(7)可知,当 $i_{df}^* < i_{df\_min}^*$ 即在平衡点电流下限下方虚线区域时, $U_{sq}$ 恒小于0,当 $i_{df}^* > i_{df\_max}^*$ 即在平衡点电流上限下方虚线区域时, $U_{sq}$ 恒大于0,这2种情况下系统一定不存在平衡点而发生失步现象。当 $i_{df}^*$ 位于图中阴影区域内时, $U_{sq}$ 可被系统调节至0,系统存在平衡点。

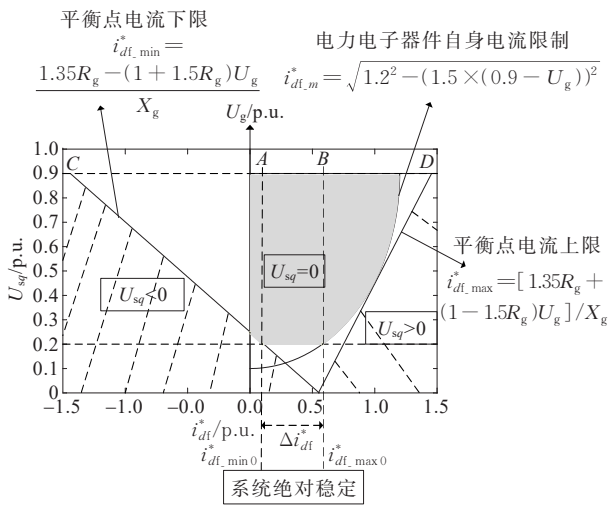


图7 故障持续期间系统 $i_{df}^*$ 的稳定可行域区间

Figure 7 Stable feasible region interval of system  $i_{df}^*$  during fault duration

在阴影区域中, $\Delta i_{df}^*$ 为有功电流裕度,随着故障电压跌落程度加深, $\Delta i_{df}^*$ 逐渐减小,当故障电压跌落至最深电压 $0.2 \text{ p.u.}$ 时, $\Delta i_{df}^*$ 最小,此时满足系统在所有电压跌落深度的情况下都存在稳定平衡点的条件,可定义该有功电流裕度为绝对稳定区间,系统有功电流指令绝对稳定区间为

$$i_{df\_min0}^* \leq i_{df}^* \leq i_{df\_max0}^* \quad (9)$$

式中, $i_{df\_min0}^*$ 是直线 $i_{df\_min}^*$ 与直线 $U_g=0.2$ 的交点的横坐标,为系统绝对稳定区间下限电流,即虚线A; $i_{df\_max0}^*$ 是直线 $i_{df\_max}^*$ 与直线 $U_g=0.2$ 交点的横坐标,为系统绝对稳定区间上限电流,即虚线B。

$$\begin{cases} A: i_{df\_min}^* = \frac{-U_g - R_g i_{qf}^*}{X_g} < i_{df}^* < \frac{U_g - R_g i_{qf}^*}{X_g} = i_{df\_max}^* \\ B: 0 \leq i_{df}^* \leq \sqrt{I_m^2 - (i_{qf}^*)^2} = i_{df\_m}^* \\ C: 0.2 \text{ p.u.} < U_g < 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (10)$$

$$D: \min \{ \Delta i_{df}^* \} \quad (11)$$

式(10)、(11)中,A、B、C分别为平衡点电流限制、电力电子器件自身电流限制和LVRT电压要求,构成了约束模型;D为有功电流裕度最小目标,构成了目标模型。2个模型共同构成了单目标线性规划模型。

单目标线性规划的约束方程主要包含LVRT电压水平约束、系统存在稳定平衡点时电流限制和电力电子器件自身输出电流限制三大约束条件,主要包含有功电流裕度最小目标,根据此方法一步步刻画了在不同电压跌落深度下有功电流指令的暂态稳定运行区域,并确定了系统有功电流系数绝对稳定区间。对应的单目标线性规划流程如图8所示。

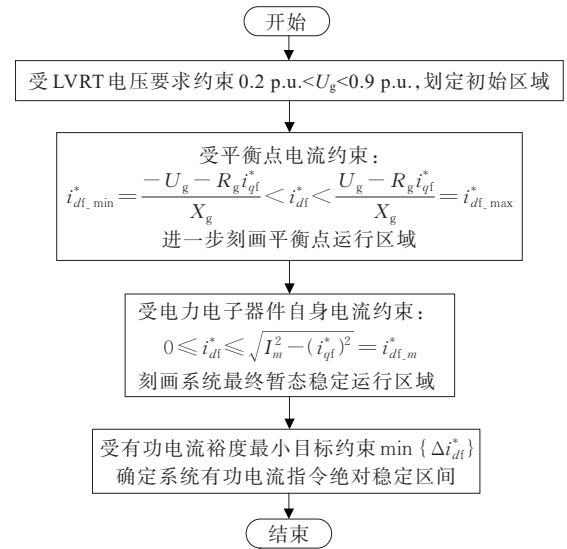


图8 单目标线性规划流程

Figure 8 Single objective linear programming process

## 2.2 有功电流系数优化

由文2.1可知,有功电流指令作为影响系统暂态稳定性的关键因素,当系统满足具有绝对稳定区间的条件时,结合式(1),进一步考虑初始有功电流幅值的范围,对有功电流系数最优区间进行分析。

有功电流指令 $i_{df}^*$ 主要与故障点电压幅值 $U_g$ 、初始有功电流幅值 $I_{p0}$ 、有功电流系数 $K_{1,lp,LV}$ 、 $K_{2,lp,LV}$ 有关。由并网网则可知, $U_g$ 的范围为 $0.2 \sim 0.9 \text{ p.u.}$ , $I_{p0}$ 的范围为 $0 \sim 1.0 \text{ p.u.}$ ,要确定有功电流系数取值集合,使经过该取值范围的有功电流指令都能运行在绝对稳定区间内,则其约束关系如图9所示。

图9中,阴影部分为 $U_g$ 、 $I_{p0}$ 的公共范围,虚线A为绝对稳定区间下限有功电流 $i_{df\_min0}^*$ ,虚线B为绝对

稳定区间上限有功电流  $i_{df,max0}^*$ , 改变  $K_{1,lp,LV}$  和  $K_{2,lp,LV}$  大小会改变直线的斜率和截距, 要使经过阴影部分内任意一点的直线都能在绝对稳定区间上限和下限之间, 可将阴影部分的边界点  $(0.2, 0)$  和  $(0.9, 1)$  分别代入  $i_{df,min0}^*$  和  $i_{df,max0}^*$  求解出最优有功电流系数, 则约束关系如下:

$$\begin{cases} 0.2K_{1,lp,LV} \geq i_{df,min0}^* \\ 0.9K_{1,lp,LV} + K_{2,lp,LV} \leq i_{df,max0}^* \\ K_{1,lp,LV} > 0 \\ K_{2,lp,LV} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解结果如图 10 所示。图 10 中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的大小根据绝对稳定区间上、下限  $i_{df,min0}^*$  和  $i_{df,max0}^*$  确定。

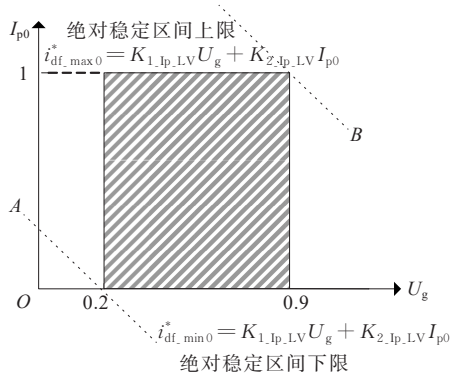


图 9 有功电流系数约束

Figure 9 Active current coefficient constraint

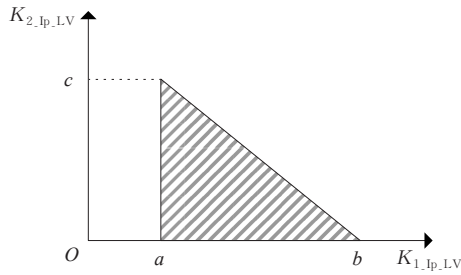


图 10 有功电流系数最优区间

Figure 10 Optimal interval of active current coefficient

在已知光伏机组容量的前提下, 要使发生三相短路故障的系统维持全局暂态稳定, 需调整有功电流指令使其位于绝对稳定区间, 即满足图 7 中单目标线性规划得到的有功电流指令绝对稳定区间。根据有功电流指令公式, 采用几何分析法计算有功电流系数的取值集合, 具体流程如图 11 所示。首先, 刻画故障初始运行公共范围; 其次, 刻画故障边界曲线; 再次, 确定边界点, 初步划定有功电流系数的取值区间; 最后, 考虑有功电流系数为正, 最终划定了有功电流系数的最优区间。

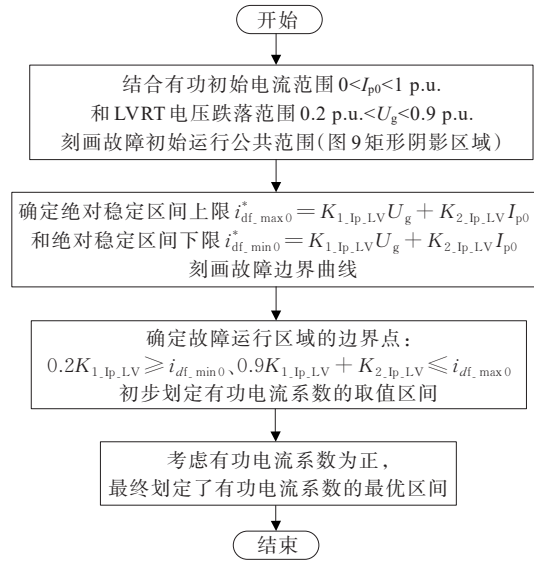


图 11 用以改善系统暂态稳定性的有功电流系数优化流程

Figure 11 Active current coefficient optimization process for improving transient stability of system

基于故障持续期间有功电流指令的暂态稳定运行区域的理论模型, 采用几何分析法所得的优化有功电流系数能保证光伏并网系统与电网保持全局同步稳定运行。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例概况

基于电力系统分析综合程序 (power system analysis software package, PSASP), 以江西某区域实际电网为例对所提方法进行仿真验证, 该区域电网的简化示意图如图 12 所示。

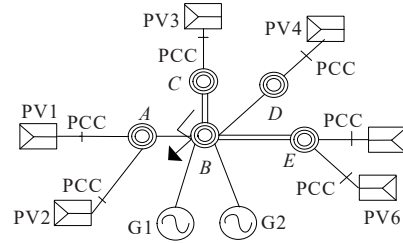


图 12 光伏接入某地区电网简化示意图

Figure 12 Simplified schematic diagram of PV connection to a regional power grid

图 12 中,  $B$  点为该地区 500 kV 中心枢纽电站,  $A$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  点为 220 kV 光伏汇集站, PV 表示光伏并网系统, PCC 表示光伏并网点, 总出力为 900 MW,  $G1$ 、 $G2$  为 220 kV 火电厂, 总出力为 800 MW。

光伏电源容量如表 1 所示。

表1 光伏电源容量

Table 1 PV power capacity

光伏并网系统	所含光伏电源容量/MW
PV1	88,88
PV2	86,86
PV3	67,20,16
PV4	66,66
PV5	62,62,62
PV6	51,16,16,16,16,16

3.2 光伏电源有功电流指令响应

本文的光伏模型采用PSASP中2型光伏模型,其中的厂站级控制参数、本地级控制参数和LVRT恢复参数均采用典型参数,2型光伏模型通用典型控制参数如表2所示。

表2 2型光伏模型通用典型控制参数

Table 2 Typical control parameters for type 2 PV models

控制环节	具体参数内容	参数名	数值
厂站级控制	调频PI控制比例系数	$K_{P\_PP}$	0.1
	调频PI控制积分系数	$K_{i\_PP}$	0.5
本地级控制	有功PI控制比例系数	$K_{p\_lp}$	0.1
	有功PI控制积分系数	$K_{i\_lp}$	2
穿越恢复控制	有功电流恢复	有功电流恢复斜率	3 p.u./s

为了更充分地证明参数优化方法的有效性,本文为模拟故障最严重的场景做了以下研究。图12为500 kV线路,相较220 kV线路电压等级最高,其覆盖的光伏并网系统最多,线路传输能力最强,影响面最广<sup>[27]</sup>。经PSASP短路电流计算后各点发生故障后故障点短路电流计算值对比如表3所示,可知故障B处的短路电流值最大,对电网的冲击最大。

表3 短路电流计算值对比

Table 3 Comparison of short-circuit current calculation values

故障点	故障点短路电流/kA
B	42.933
A	39.093
C	22.204
D	40.851
E	35.689

其次,A、B、C、D、E各点的故障类型、故障持续时间和控制方式都相同,发生故障后PV1并网点电

压和发电机相对功角仿真结果对比分别如图13、14所示,可看出B点发生三相短路故障后并网点电压跌落最低,提升速度最慢,发电机相对功角恢复速度最慢。

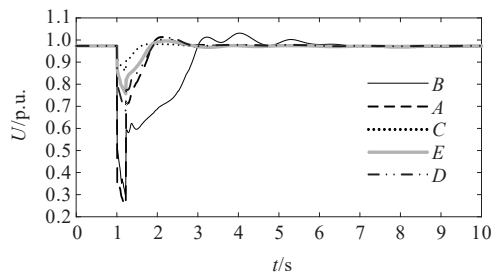


图13 各点故障对并网点电压的影响对比

Figure 13 Comparison of effects of various faults on voltage of grid connection point

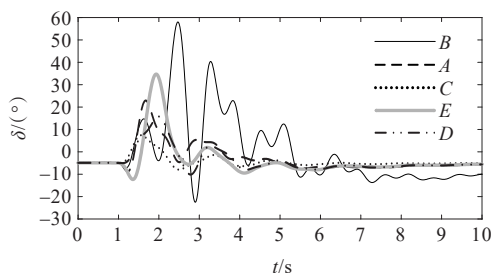


图14 各点故障对发电机相对功角的影响对比

Figure 14 Comparison of effects of various faults on relative power angle of generators

因此,本文在1 s时在B处设置三相短路故障,故障持续时间为0.22 s。由于不同光伏并网系统的接入位置不同,其并网点到故障点的等效阻抗不同,由文2所提参数优化方法可知,参数优化结果与等效传输线路阻抗有关,不同光伏并网系统的有功电流系数如表4所示,优化参数1和优化参数2位于有功电流系数最优区间内,典型参数为PSASP软件中光伏并网系统有功电流系数的默认值,边界参数和对照参数为文2有功电流系数最优区间外的一组参数。

当检测电压低于0.9 p.u.时,实施相应的有功电流指令,当电压恢复至0.9 p.u.以上时,有功电流立即恢复至初始有功电流,虽然不同光伏并网系统设置的优化参数不同,实施的有功电流指令不同,但如图15所示,优化参数1下的有功电流指令都位于绝对稳定区间内,系统暂态稳定性较好。

图16展示了优化参数2条件下光伏电源机侧电压与有功电流指令,可以看出,优化参数2对应的有功电流指令位于绝对稳定区间内,系统内所有光

伏电源均能稳定运行,在优化参数 2 条件下系统保持全局暂态稳定。

表 4 有功电流系数

Table 4 Active Current coefficient

光伏并网系统	参数内容	参数名	优化参数 1	优化参数 2	边界参数	典型参数	对照参数
PV1	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.54	0.48	0.11	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.13	0.15	0.50	0.5	1.0
PV2	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.44	0.52	0.12	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.22	0.13	0.48	0.5	1.0
PV3	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.58	0.55	0.09	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.09	0.10	0.52	0.5	1.0
PV4	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.60	0.62	0.14	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.05	0.02	0.48	0.5	1.0
PV5	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.58	0.54	0.10	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.07	0.10	0.50	0.5	1.0
PV6	有功电流系数 1	$K_{1,lp,1V}$	0.54	0.46	0.15	0	0.9
	有功电流系数 2	$K_{2,lp,1V}$	0.10	0.13	0.45	0.5	1.0

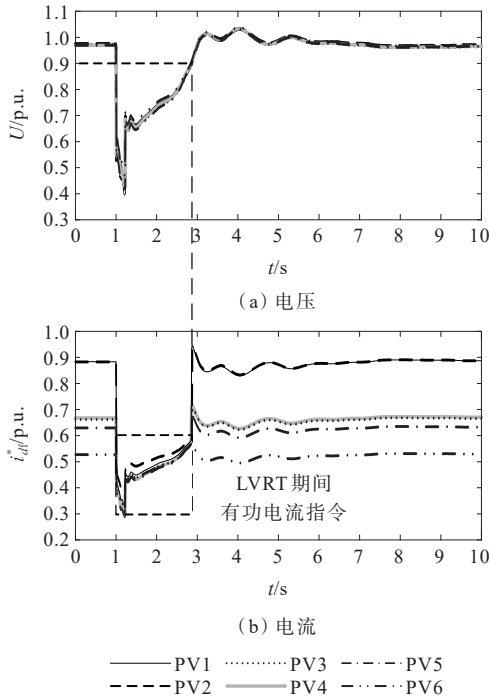


图 15 优化参数 1 下不同光伏电源机侧电压与有功电流指令  
Figure 15 Voltage and active current commands of different PV power supply unit side under optimized parameters 1

边界参数下光伏电源机侧电压与有功电流指令如图 17 所示,可以看出,边界参数对应的有功电流指令位于绝对稳定区间边界,系统内所有光伏电源仍能保持稳定运行,在绝对稳定区间边界参数条件下系统也能保持全局暂态稳定。

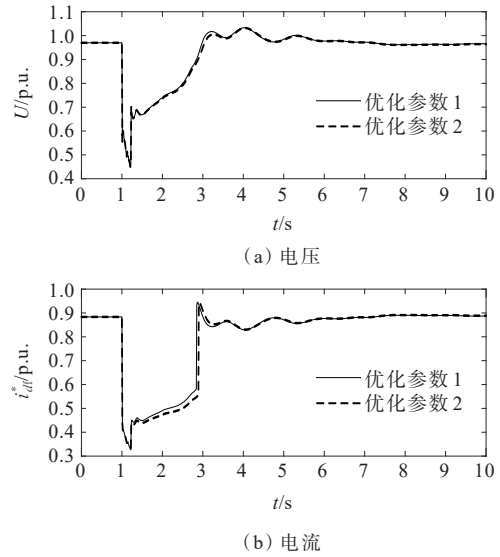


图 16 优化参数 2 下光伏电源机侧电压和有功电流指令  
Figure 16 Voltage and active current commands of PV power supply unit side under optimized parameter 2

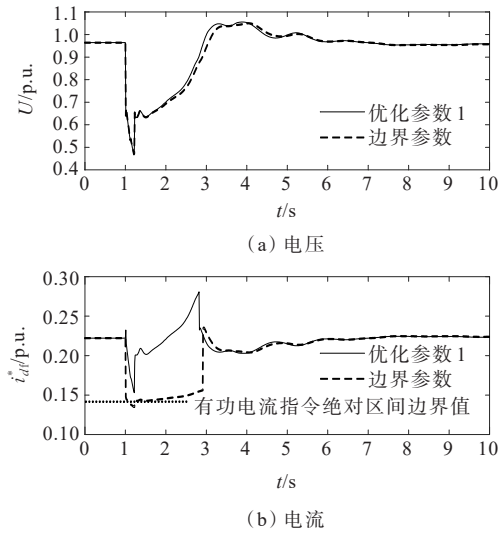


图 17 边界参数下光伏电源机侧电压和有功电流指令  
Figure 17 Voltage and active current commands of PV power supply unit side under boundary parameters

图 18 为优化参数与典型参数下光伏电源机侧电压与有功电流指令对比结果。从图 18 可以看出,在优化参数下,系统有功电流指令位于绝对稳定区间内,光伏电源机侧暂态稳定;系统采用的典型参数不位于系数最优区间内,当小容量机组初始有功电流为 0.16 p.u. 时,此时有功电流指令为 0.08 p.u.,小部分小容量机组初始有功电流较小,有功电流指令不足,不在图 7 的可行域内,此时系统的  $U_{sq}$  小于 0,不存在平衡点,光伏电源机侧失稳脱网。



对照参数下光伏电源机侧电压与有功电流指令如图19所示,当系统切除故障后电压恢复至0.6 p.u.,系统采用对照参数时,大部分机组有功电流指令较大,大于0.98 p.u.,超出了图7的可行域,此时系统的  $U_{sq}$  大于0,不存在平衡点,光伏电源机侧暂态失稳脱网。

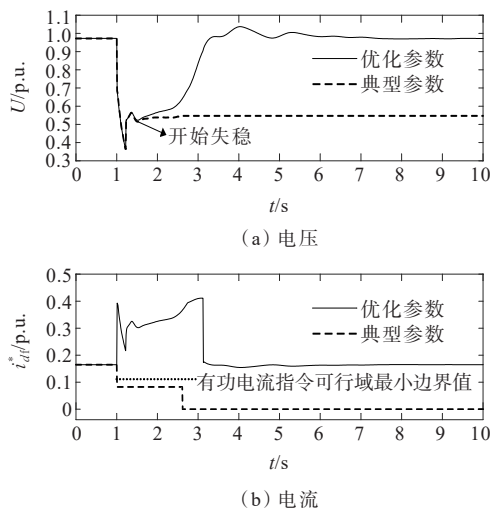


图18 优化参数与典型参数下光伏电源机侧电压与有功电流指令

Figure 18 Voltage and active current commands of PV power supply unit side under typical and optimized parameters

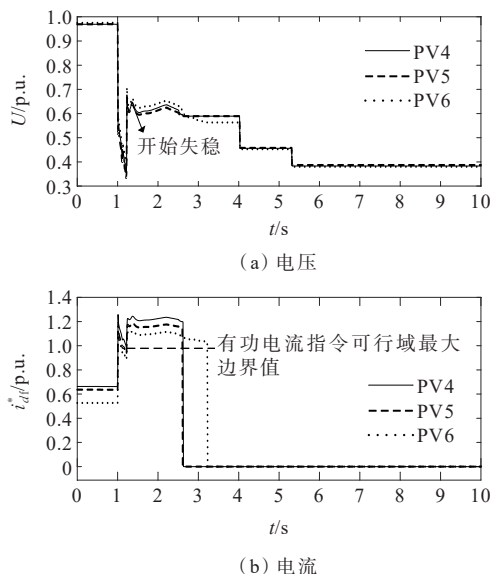


图19 对照参数下光伏机侧电压与有功电流指令

Figure 19 Voltage and active current commands of PV power supply unit side under contrast parameter

### 3.3 电网暂态稳定性仿真验证

在含大规模光伏电源的系统里,电网处发生三相短路故障引起电压跌落,也会引起光伏并网系统

并网点电压以及光伏机侧电压跌落,因此光伏电源机侧的暂态稳定性将极大地影响电网侧的暂态稳定性。

3组绝对稳定区间参数对并网点电压的影响对比如图20所示,可以看出,在处于绝对稳定区间内的参数条件下的系统暂态电压水平提升速度比处于绝对稳定区间边界的参数条件下高0.04 p.u.,差距很小,处于绝对稳定区间内及边界的参数条件下并网点暂态电压提升速度都很快。

图21展示了3组参数对并网点电压影响对比结果,可以看出,在理论分析所得的优化参数条件下光伏电源机侧暂态电压水平提升最快。又因光伏并网系统由多台光伏电源集成等效而成,并网点电压直接受光伏电源机侧电压影响,因此优化参数下系统暂态稳定性最好,而在对照参数下大部分光伏电源失稳脱网,并网点电压会发生暂态电压失稳。

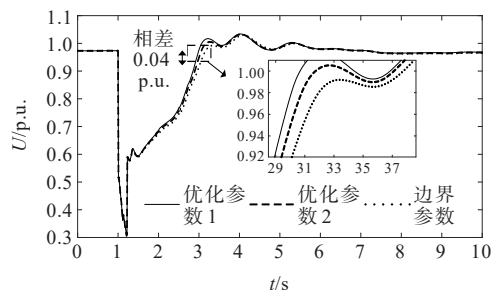


图20 3组绝对稳定区间参数对并网点电压的影响对比

Figure 20 Comparison of effects of three sets of absolute stability interval parameters on voltage of grid connection point

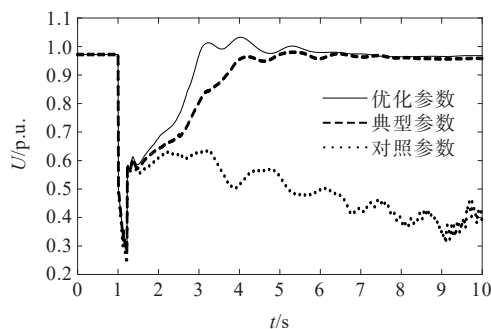


图21 3组参数对并网点电压的影响对比

Figure 21 Comparison of effects of three sets of parameters on voltage of grid connection point

图22展示了3组参数对电网电压影响对比结果。从图22可以看出,在优化参数下,电网暂态稳定性较好;当系统采用典型参数时,少部分小容量光伏电源脱网,电网系统源荷平衡出现较小波动,

也因缺乏部分光伏电源用来提供无功电流支撑电网电压,暂态电压水平提升较慢;当系统采用对照参数时,大多数光伏电源发生脱网,电网系统源荷出现不平衡,电网系统发生暂态电压失稳。

图 23 展示了 3 组参数对相对功角影响对比结果。图 23(a)为优化参数与典型参数对电网相对功角影响对比结果,可以看出在典型参数下小部分光伏电源与同步机失联运行,电网相对功角恢复稳定较慢。图 23(b)为当系统采用对照参数时电网相对功角曲线,在对照参数条件下大量光伏并网系统脱网后,同步机与光伏电源之间失步运行,电网发生暂态功角失稳。

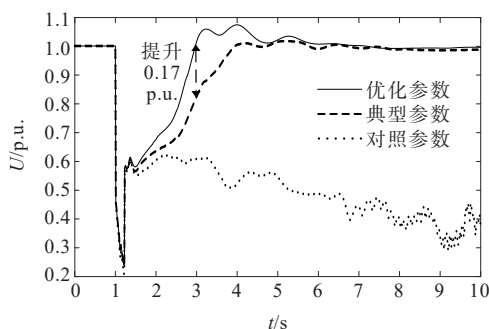
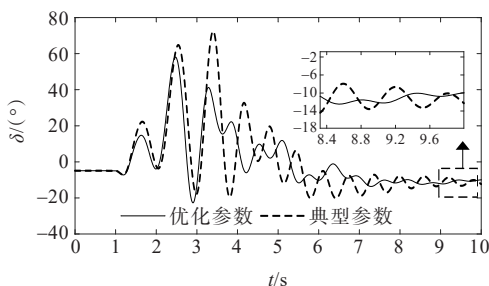
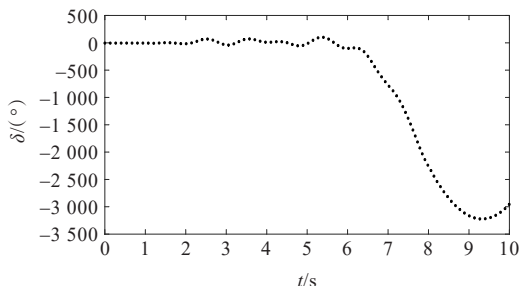


图 22 3 组参数对电网电压影响对比结果

Figure 22 Comparison of effects of three sets of parameters on voltage of power grid



(a) 优化参数与典型参数对相对功角影响对比结果



(b) 对照参数对相对功角影响

图 23 3 组参数对相对功角影响对比结果

Figure 23 Comparison of effects of three sets of parameters on relative power angle

## 4 结语

针对光伏并网系统在故障持续阶段由于 LVRT 控制参数设置不当导致失去稳定平衡点的问题,本文通过分析故障持续期间系统暂态稳定特征,刻画了有功电流指令的稳定可行域和有功电流系数的最优区间,提出了基于几何分析法的参数优化方法,得出以下结论。

1) 故障期间的光伏有功电流对系统暂态稳定有显著影响。在故障持续期间,有功电流指令具有绝对稳定区间,超过此区间,系统可能会由于不存在平衡点而发生暂态失稳。

2) 典型的 LVRT 控制参数可能会导致光伏系统有功电流偏离可行域区间。采用典型参数组的少部分小容量光伏电源由于故障持续期间有功电流指令过小,系统不存在平衡点而发生失稳。

3) 基于单目标线性规划求解的系统有功电流指令绝对稳定区间,本文提出了一种基于几何分析法的光伏并网系统控制参数优化方法。该方法可适应不同光伏并网系统接入电网位置的差异性,给出不同光伏并网系统有功电流系数的最优区间,显著提升系统暂态稳定性。

### 参考文献:

[1] HOSSAIN M J, SAHA T K, MITHULANANTHAN N, et al. Control strategies for augmenting LVRT capability of DFIGs in interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2510-2522.

[2] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9655-9670.

[3] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414.

YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large disturbance stability of “double high” power system: problems, challenges and prospects[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.

[4] 谢小荣, 贺静波, 毛航锐, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.

- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):461-475.
- [5] 王瑞,商飞,王良全.基于LabVIEW的光伏逆变器低电压穿越检测方法研究[J].电测与仪表,2023,60(3):178-182.
- WANG Rui,SHANG Fei,WANG Liangquan.Research on low voltage ride through detection method of photovoltaic inverter based on LabVIEW[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(3):178-182.
- [6] 乔志杰,马临超.适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J].高压电器,2022,58(12):75-84+91.
- QIAO Zhijie, MA Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):75-84+91.
- [7] 田新首,王伟胜,迟永宁,等.双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响[J].电力系统自动化,2015,39(10):16-21.
- TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Performances of DFIG-based wind turbines during system fault and its impacts on transient stability of power systems[J].Automation of Electric Power Systems, 2015,39(10):16-21.
- [8] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二):影响因素分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4043-4051.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems: part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(16):4043-4051.
- [9] 王士元,郑超,刘涛,等.计及LVRT的光伏高渗透电网动态频率特性及优化措施[J].电网技术,2020,44(6):2151-2159.
- WANG Shiyuan,ZHENG Chao,LIU Tao,et al.Dynamic frequency characteristics and optimizing measures of photovoltaic high-penetration power grid considering LVRT[J].Power System Technology, 2020, 44(6): 2151-2159.
- [10] PEI J X,YAO J,LIU R K,et al.Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2020,67(7):5515-5530.
- [11] 黄云辉,王凌云,喻恒凝,等.弱电网下双馈风力发电系统的稳定性极限研究[J].电力工程技术,2022,41(4):9-17.
- HUANG Yunhui, WANG Lingyun, YU Hengning, et al. Stability limit of double-fed induction generator system connected to weak grid[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(4):9-17.
- [12] 刘辉,王阔.新能源低电压穿越无功电流对暂态电压安全约束的影响[J].中国电力,2022,55(2):152-158.
- LIU Hui, WANG Kuo. LVRT reactive current index of renewable units based on the constraints of transient voltage[J].Electric Power,2022,55(2):152-158.
- [13] WANG X W,YAO J,PEI J X,et al.Analysis and damping control of small-signal oscillations for VSC connected to weak AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2019,34(3):1667-1676.
- [14] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected *via* voltage-sourced converters on power system stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2015,9(1):25-36.
- [15] HE X Q, GENG H, XI J B, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2021,9(1):438-450.
- [16] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(4):3573-3589.
- [17] HE X Q, GENG H, LI R Q, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM).Montreal, QC,Canada.IEEE,2020:1.
- [18] LIU Y, YAO J, PEI J X, et al. Transient stability enhancement control strategy based on improved PLL for grid connected VSC during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 218-229.
- [19] HE X Q,GENG H.Synchronization stability analysis and enhancement of grid-tied multi-converter systems[C]// 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.Detroit,MI,USA.IEEE,2020:1-8.
- [20] 林伟芳,任晓钰,张桂红,等.考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J].电网技术,2023,47(4):1323-1331.
- LIN Weifang, REN Xiaoyu, ZHANG Guihong, et al. Optimization of voltage ride-through control parameters of renewable energy considering power angle stability

- and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2023,47(4):1323-1331.
- [21] 周莹坤,谢恒,孙华东,等. 新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J]. 电网技术,2022,46(5):1907-1916.  
ZHOU Yingkun, XIE Heng, SUN Huadong, et al. Influence of renewable energy low voltage ride-through control parameters on overvoltage[J]. Power System Technology,2022,46(5):1907-1916.
- [22] 屠竞哲,张健,刘明松,等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):197-205.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(11):197-205.
- [23] GARNICA LÓPEZ M A, GARCÍA DE VICUÑA J L, MIRET J, et al. Control strategy for grid-connected three-phase inverters during voltage sags to meet grid codes and to maximize power delivery capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9360-9374.
- [24] YUAN H, XIN H H, HUANG L B, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,34(2):838-848.
- [25] 裴金鑫. 电网短路故障下风电并网系统的暂态稳定性分析及控制技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.  
PEI Jinxin. Transient stability analysis and enhanced control strategy research of grid-connected wind power generation under grid faults[D]. Chongqing: Chongqing University,2021.
- [26] TANG W, HU J B, CHANG Y Z, et al. Modeling of DFIG-based wind turbine for power system transient response analysis in rotor speed control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6795-6805.
- [27] 刘洋,王聪颖,夏德明,等. 电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J]. 电网技术, 2021,45(9):3505-3514.  
LIU Yang, WANG Congying, XIA Deming, et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3505-3514.
- 
- (上接第112页 Continued from page 112)
- [38] 张立石,梁得亮,刘桦,等. 基于小波变换与逻辑斯蒂回归的混合式配电变压器故障辨识[J]. 电工技术学报, 2021,36(增刊2):467-476.  
ZHANG Lishi, LIANG Deliang, LIU Hua, et al. Fault identification of hybrid distribution transformer based on wavelet transform and logistic regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(Sup 2):467-476.
- [39] 陈彬,于继来. 强台风环境下配电线路故障概率评估方法[J]. 中国电力,2019,52(5):89-95.  
CHEN Bin, YU Jilai. Outage probability evaluation of the distribution corridors under strong typhoon environment [J]. Electric Power,2019,52(5):89-95.
- [40] 谢敬东,陆池鑫,鲁思薇,等. 基于序关系-熵权法的电力市场风险评估[J]. 中国电力,2021,54(6):71-78.  
XIE Jingdong, LU Chixin, LU Siwei, et al. Electricity market risk evaluation based on order relation-entropy weight method[J]. Electric Power,2021,54(6):71-78.
- [41] 王孟雅,陈震,潘尔顺. 基于马尔科夫决策的冷贮备串联系统状态维修与备件联合优化[J]. 工业工程与管理, 2022,27(6):14-23.  
WANG Mengya, CHEN Zhen, PAN Ershun. Joint optimization of condition-based maintenance and spare parts for cold standby series system considering Markov decision[J]. Industrial Engineering and Management, 2022,27(6):14-23.
- [42] 徐涛,李明贞,刘毅刚,等. 基于韦布尔分布的无失效数据参数估计的高压电缆寿命评估[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(2):233-238.  
XU Tao, LI Mingzhen, LIU Yigang, et al. High-voltage cable life assessment based on zero-failure data parameter estimation of Weibull distribution[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(2): 233-238.