

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.006

基于功角保持的 VSG 低电压穿越控制策略

杜燕, 蒋伟, 杨向真, 苏建徽

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制通过模拟同步发电机的运行特性,达到并网逆变器为电网提供惯性支撑的目的。传统 VSG 在电网发生短路故障时容易导致输出电流越幅与功角振荡,无法为电网提供无功支撑,使逆变器不具备低电压穿越能力。文章提出一种 VSG 低电压穿越控制策略,故障期间保持功角稳定,故障恢复期间通过基于虚拟功率的功角保持环节实现预并列,故障恢复后输出功率能够快速恢复至给定值,运行模式之间能够平滑快速切换,实现低电压穿越。仿真验证了该控制策略的正确性与有效性。

关键词:虚拟同步发电机(VSG);低电压穿越;功角保持;动态响应

中图分类号:TM464.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)05-0612-09

VSG low voltage ride through control strategy based on power angle maintenance

DU Yan, JIANG Wei, YANG Xiangzhen, SU Jianhui

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Virtual synchronous generator(VSG) control simulates the operation characteristics of the synchronous generator to achieve the purpose of providing inertia support for the power grid by grid-connected inverter. The traditional VSG is easy to cause the over-amplitude of the output current and the power angle oscillation when a short-circuit fault occurs in the power grid, and it cannot provide reactive power support for the power grid, so that the inverter does not have the ability of low voltage ride through(LVRT). Aiming at this problem, this paper puts forward a kind of LVRT strategy based on VSG control. The power angle keeps stable during the fault, the pre-synchronization is implemented through a link of power angle maintenance based on virtual power during the fault recovery, and after the fault is recovered, the output power can be quickly restored to the given value to realize the smooth and quick switching between operating modes, thus achieving the LVRT. Simulation results show that the control strategy is correct and effective.

Key words: virtual synchronous generator(VSG); low voltage ride through(LVRT); power angle maintenance; dynamic response

随着以电子装置为接口的分布式电源在电力系统中渗透率增大,电网的转动惯量减小。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的基本思想是通过模拟同步发电机的运行特性,为电网提供惯性支撑,能够实现分布式电源友好并网。

然而,当电网发生短路故障后并网点电压降低,基于有功-频率控制的传统 VSG 容易造成网侧过电流,且无法提供无功支撑,从而不具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力。

现有的 VSG 低电压穿越控制策略分为无模式切换(no control mode switching, NCMS)和模

收稿日期:2021-04-19;修回日期:2021-05-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904100)

作者简介:杜燕(1978—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副研究员,硕士生导师;

杨向真(1982—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:greenleafyxz@163.com;

苏建徽(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

式切换(control mode switching,CMS)2 种。

NCMS 的本质是在低电压穿越期间保持 VSG 结构,通过改进 VSG 及电流内环^[1]或者采用功率指令变更策略^[2]实现低电压穿越。通过改进电流内环可以抑制过流,但是存在多回路 PI 参数难整定问题^[3];根据电压跌落深度调整 VSG 功率指令,但功率指令变更后经频率-有功下垂与 VSG 虚拟惯性部分调节需要一定响应时间^[4]。

与 NCMS 相比,CMS 的总体思想是正常运行期间采用 VSG 控制,故障期间切换至电流控制模式^[5-6],实现逆变器低电压穿越。其优点是可以在电网电压跌落后向电网注入满足要求的无功电流,抑制过电流。但由于不同控制模式输出变量的类型、状态之间存在差异,特别是电网短路故障会伴随着电网相角偏移故障^[7],CMS 方法在模式切换过程中易出现较大的暂态电流冲击与功角振荡,因此 CMS 方法需要多模式的平滑切换才能保证实现低电压穿越。文献[8]提出多模式给定参考电流切换的控制策略,根据低电压穿越要求计算出指令电流;文献[9]在此基础上加入模型预测电流控制实现对故障参考电流的快速跟踪,这种方法可以在故障期间有效抑制过电流,提供无

功支撑促进电压恢复,但是模式切换前后未考虑到电流给定值之间的差异,切换过程中存在暂态冲击;文献[5]为避免控制模式切换时产生冲击,在模式切换前后保持电流环的输出不变;文献[10]考虑到电网相位可能会发生变化,提出在控制策略中引入相位调节单元,实现 VSG 输出相位快速跟踪电网电压相位,用于故障后系统的快速恢复。

为了实现 CMS 在多模式下的平滑切换,本文提出一种基于功角保持的 VSG 低电压穿越方法,该方法在故障恢复期间计算并保持功角,故障恢复后实际功率得以快速恢复,保障故障恢复后 VSG 平滑快速切换至正常运行,实现低电压穿越。MATLAB 仿真验证了所提出的 VSG 低电压穿越策略的正确性和有效性。

1 VSG 基本原理

本文采用的拓扑结构及 VSG 控制结构^[11]如图 1 所示。图 1 中: e_k (k 为 a、b、c)为三相桥臂输出电压; L_k 为滤波器的三相等效电感; i_k 为输出三相电感电流; v_k 为逆变器输出三相电压; u_{gk} 为三相电网电压。

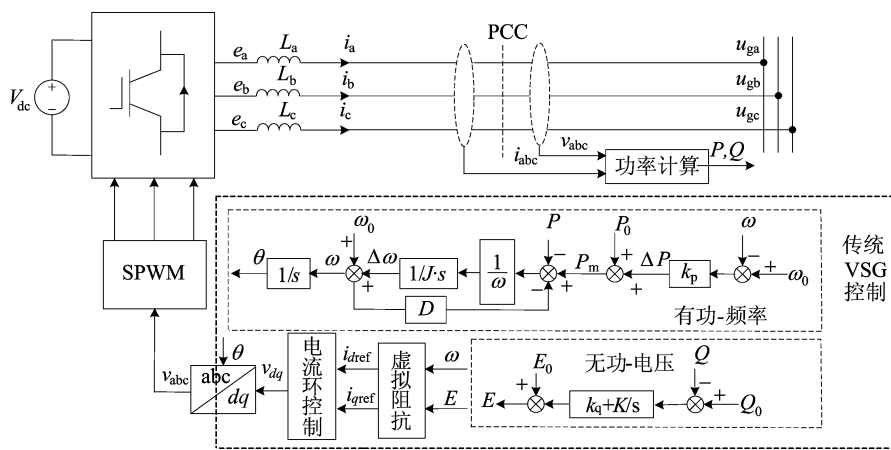


图 1 主电路拓扑及 VSG 控制结构

VSG 的本质是通过控制算法模拟同步发电机本体模型以及调频调压环节,使得逆变器具有同步发电机特征,其包含了有功-频率控制环、无功-电压控制环、虚拟定子电压方程回路。

1) 有功-频率控制环。有功-频率控制环路模拟了同步发电机的一次调频与转子运动方程,一次调频计算公式为:

$$P_m = P_0 + k_p(\omega_0 - \omega) \quad (1)$$

其中: P_m 为 P - ω 下垂控制输出的虚拟机械功率,

作为虚拟惯性环节的有功给定; P_0 为参考有功功率; k_p 为有功环调频系数; ω_0 为参考角频率; ω 为 VSG 有功环输出角频率。

转子运动方程反映同步发电机特有的惯量及阻尼特性,计算公式为:

$$(P_m - P)/\omega - D(\omega - \omega_0) = J(d\omega/dt) \quad (2)$$

其中: P 为 VSG 输出有功功率; D 为阻尼系数; J 为惯性分量。

综合式(1)、式(2)可得有功-频率环计算公

式,即

$$\frac{(\omega_0 - \omega)k_p + P_0 - P}{\omega} - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

2) 无功-电压控制环。模仿同步发电机的电压调节特性,得到 VSG 内电势幅值 E 的计算公式为:

$$(Q_0 - Q)(k_q + K/s) + E_0 = E \quad (4)$$

其中: E_0 为内电势额定值; Q_0 为参考无功功率; Q 为 VSG 输出无功功率; k_q 、 K 分别为无功环的比例与积分系数。

3) 虚拟定子电压方程回路。此环节包含了虚拟阻抗环路和电流控制环路,目的是使 VSG 的输出电流跟踪由定子电压方程确定的指令电流值,从而模拟同步发电机定子电压方程。

同步发电机的定子电压方程为:

$$v = -R_s i - \frac{d\Phi}{dt} = -R_s i - L_s \frac{di}{dt} + e \quad (5)$$

其中: R_s 为定子绕组的电阻; L_s 为同步电抗; e 为同步发电机内电势。

为模拟上述同步发电机的定子电压方程,可在 VSG 加入虚拟阻抗^[12]模拟定子电抗。

指令电流 i_{ref} 对应式(5)中的 i , dq 坐标系下具体表达式为:

$$i_{dref,qref} = \frac{R_v(E_{d,q} - u_{d,q}) + \omega L_v(E_{q,d} - u_{q,d})}{R_v^2 + (\omega L_v)^2} \quad (6)$$

其中: R_v 、 L_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感,对应式(5)中的 R_s 、 L_s ; $E_{d,q}$ 为 VSG 输出内电势 E 的 dq 分量, E 对应式(5)中的 e ; $u_{d,q}$ 为电网电压的 dq 分量, u 对应式(5)中的 v 。

2 VSG 的电网故障低电压穿越特性分析

2.1 电网故障时 VSG 运行特性

当电网电压因短路故障降低至 0.9 pu, 认为发生电网电压跌落故障。为了能准确分析 VSG 在电网电压跌落时的运行特性,建立的 VSG 等效电路如图 2 所示。

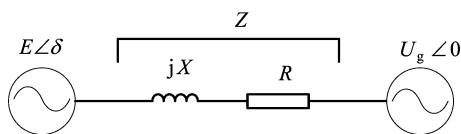


图 2 VSG 等效电路

图 2 中: U_g 为电网电压; E 为 VSG 输出内电

势幅值; Z 为模拟定子电抗与线路阻抗; δ 为功角。当模拟定子阻抗与线路阻抗为纯感性,电网电压为基准电压时,输出功率可以表示为:

$$P = \frac{EU_g \sin \delta}{X} \quad (7)$$

故障发生时, U_g 降低,由式(7)可知逆变器输出功率降低,由式(3)可知功角会逐渐累加增大,故障恢复后, E 由于前馈作用变化较小, U_g 恢复至故障前水平,由式(7)可知此时输出功率增大,形成较大电流,累加的功角越大,故障恢复后越容易出现电流越幅现象。

根据式(7)可以得到电网电压跌落时的 VSG 功角曲线,如图 3 所示。图 3 中: P_1 为故障前功率功角曲线; P_2 为故障恢复后的功率功角曲线; P_3 为故障中的功率功角曲线。为表示电网电压短路故障恢复初期功率未完全恢复的情况,选取 P_2 曲线的峰值恢复至给定有功 P_0 之上,但低于故障前功率峰值的工况进行电网电压短路故障低电压穿越特性分析。

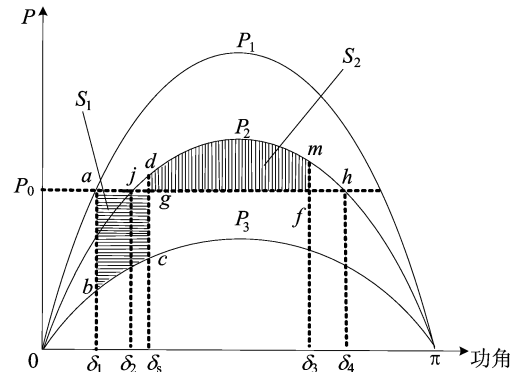


图 3 电网电压跌落时的 VSG 功率功角特性

利用等面积法则^[13]分析图 3 中的 VSG 故障阶段运行特性。从图 3 可以看出:若正常运行时功角为 δ_1 , 对应的工作点为 a ; 发生电网电压短路故障后,功率功角曲线由 P_1 变为 P_3 , 工作点由 a 切换至 b , 此时 $P < P_0$, 由式(3)可知, 当 $\omega - \omega_0 > 0$ 时, 功角增大, 角频率增大; 假设在临界功角 δ_s 处故障恢复, P_0 与 P_3 差值在功角累加期间的积分为加速面积 S_1 , 工作点从 c 变成 d , 此时 $P > P_0$, 当 $\omega - \omega_0 < 0$ 时, 角频率减小; 此时 $\omega \neq \omega_0$, 功角会继续增大, 临界功角 δ_s 使得在 h 点角频率等于电网角频率; 此过程 P_0 与 P_2 差值在功角累加期间的积分为最大减速面积 S_{dgh} , 且 $S_1 = S_{dgh}$, 最终会在 j 点重新稳定。最大减速面积为 S_{dgh} 时存在如下功角稳定判定条件:

$$S_{1\delta} \leq S_{dgh} \quad (8)$$

其中, $S_{1\delta}$ 为一般情况下切换功角为 δ 时的加速面积。

实际应用中,故障恢复的功角 δ 可能小于临界功角 δ_s ,由上述分析可知此时加速面积减小,减速面积也将小于最大减速面积 S_{dgh} ,如图 3 中的 S_2 ,功角最终也将恢复稳定;若恢复功角大于临界功角 δ_s ,加速面积增大,减速面积无法增大,功角最终将失稳。

由上述分析可知,电网电压短路故障会导致过流以及功角的振荡甚至失稳。

2.2 电网电压相角偏移对暂态稳定性的影响

电网电压的跌落往往伴随着相位跳变故障,会带来电网电压相角的偏移。本节基于等面积法则分别分析故障瞬间及恢复时电网电压相角偏移对暂态稳定性的影响。电网电压相角在故障恢复与故障瞬间发生偏移时的功率功角曲线如图 4 所示。

图 4 中: δ_1 为故障瞬间的功角; δ_f 为故障恢复时功角; $\pm\alpha$ ($+\alpha$ 表示电网电压相角反偏, $-\alpha$ 表示电网电压相角正偏)为电网电压相角偏移量; $\delta_1 - \alpha$ 为电网电压相角正偏时故障瞬间功角; $\delta_f - \alpha$ 为故障恢复功角,功角减小,同理电网电压相角反偏时功角增大。

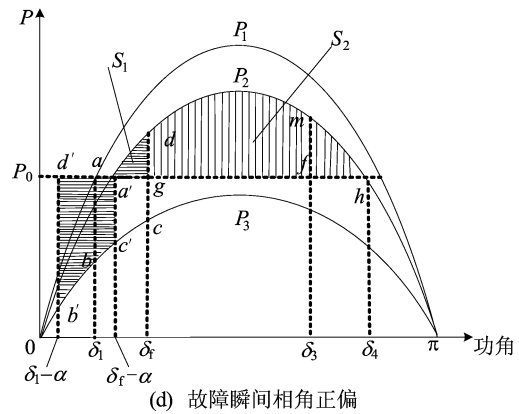
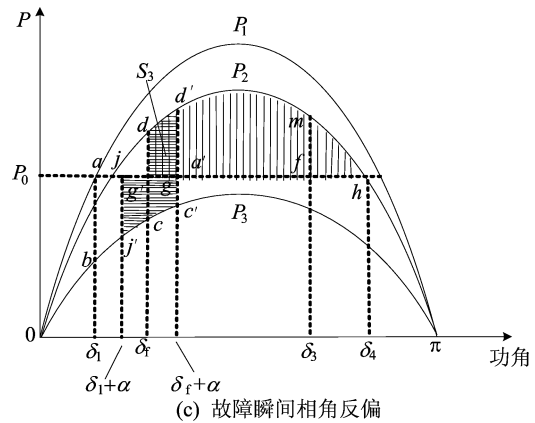
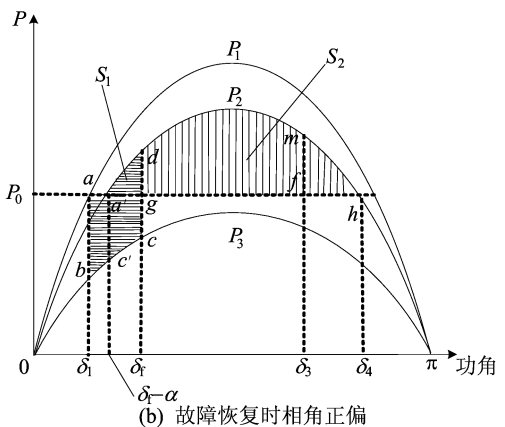
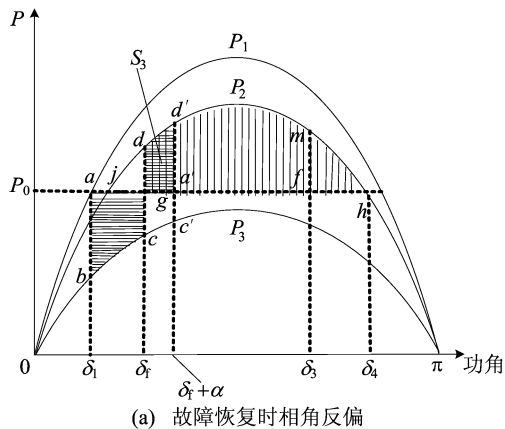


图 4 电网电压相角偏移对功角的影响

以电网电压相角反偏为例,结合图 4a、图 4c 分析故障恢复时与故障瞬间电网电压相角偏移对暂态稳定性的影响,分析中假设电网故障持续时间不变。

从图 4a 可以看出,若电网故障恢复时电网电压相角反偏,故障恢复功角由 δ_f 变为 $\delta_f + \alpha$,加速面积为 S_{abcg} ,最大减速面积为 $S_{a'd'h}$;与电网电压相角未偏移时相比,加速面积不变,最大减速面积减小,功角失稳范围增大。从图 4c 可以看出,若故障瞬间电网电压相角反偏,则故障功角由 δ_1 变为 $\delta_1 + \alpha$,故障恢复功角仍为 $\delta_f + \alpha$,此时加速面积变为 $S_{g'j'c'a'}$,最大减速面积为 $S_{a'd'h}$;与电网电压相角未偏移时相比,加速面积减小,最大减速面积减小,功角失稳范围可能会增大。另外,电网电压反偏时需考虑功角是否超过 $\pi/2$,若超过 $\pi/2$,则功角将直接失稳。综上所述,电网电压相角反偏时功角失稳范围将会增大。

从图 4b 可以看出,当电网电压相角正偏时,若故障恢复时电网电压相角正偏,则加速面积为 S_{abcg} ,保持不变,最大减速面积由 S_2 增大至 $S_2 + S_1$,功角失稳范围减小。从图 4d 可以看出,若故障瞬间电网电压相角正偏,则加速面积由 S_{abcg} 增

大至 $S_{a'c'b'd'}$, 最大减速面积由 S_2 增大至 $S_2 + S_1$, 加速面积与最大减速面积的增加量可能相互抵消。因此, 电网电压相角正偏对暂态稳定性的影响较低。

电网电压相角不同偏移状态下的加减速度面积变化情况以及对暂态稳定性影响见表 1 所列。

表 1 电网电压相角偏移对暂态稳定性的影响

相角变化	加速面积	减速面积	暂态稳定性
反偏(故障恢复时)	S_{abcg}	$S_{a'd'h}$	功角失稳范围增大
反偏(故障瞬间)	$S_{g'j'c'a'}$	$S_{a'd'h}$	功角失稳范围增大
正偏(故障恢复时)	S_{abcg}	$S_2 + S_1$	功角失稳范围减小
正偏(故障瞬间)	$S_{a'c'b'd'}$	$S_2 + S_1$	影响较低

综上所述, 发生电网电压短路故障瞬间与恢复时电网相角偏移均会引起电力系统的暂态稳定性问题, 尤其在电网电压相角反偏时功角失稳范围会增大, 进一步恶化系统暂态稳定性。

3 基于功角保持的 VSG 低电压穿越

3.1 VSG 低电压穿越控制策略

为了解决电网故障期间系统产生的功角振荡以及正常与故障模式之间平滑快速切换问题, 提出一种基于功角保持的 VSG 低电压穿越控制策略, 如图 5 所示。

图 5 中: S_1 为功率环选择开关; S_2 为 $\Delta\omega$ 状态切换开关; S 为参考电流切换开关; P_s 、 Q_s 为虚拟有功、无功功率; ω_s 为虚拟角频率; E_s 为虚拟内电势幅值; i_{ds} 、 i_{qs} 为虚拟电流的 d 、 q 分量; $i_{dref,f}$ 、 $i_{qref,f}$ 为故障参考电流的 d 、 q 分量。

该控制策略包括如下 2 个部分: ① 含功角保持的 VSG 环路, 即在图 1 的 VSG 控制基础上加入基于虚拟功率控制的功角保持环节; ② 加入故障穿越参考电流给定模块, 两者配合实现并网逆变器低电压穿越。

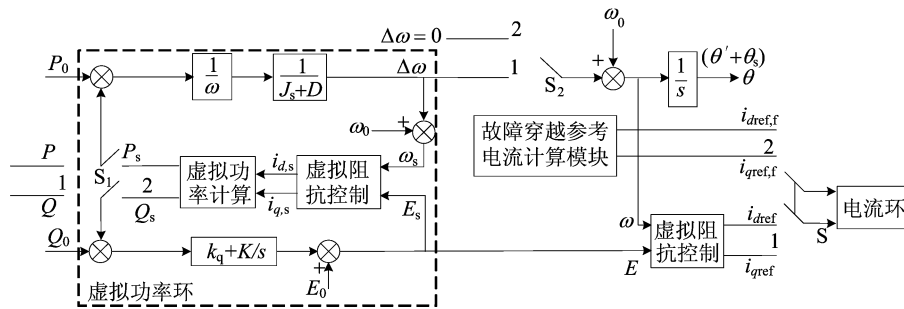


图 5 改进 VSG 与低电压穿越控制策略

改进 VSG 有正常运行模式、故障运行模式、故障恢复模式 3 种工作模式, 下面将分述其控制机理。

1) 正常运行模式。正常运行时采用 VSG 控制实现逆变器输出给定的有功、无功功率, 此时图 5 中 S_1 、 S_2 与 S 均为“1”状态。具体控制策略与图 1 相同。

2) 故障运行模式。故障时, 电网电压降低, 此时采用定电流控制, 进行无功支撑, 图 5 中的 S 切换至“2”状态。根据并网导则^[14]中对低电压穿越的要求, 保持并网运行的同时为电网提供无功支撑, 设计故障穿越参考电流。注入无功电流的大小与电网电压跌落幅度有关, 具体公式如下:

$$\begin{cases} I_{qref,f} \geq 1.5(0.9 - U_g')I_N, & 0.2 \leq U_g' \leq 0.9; \\ I_{qref,f} \geq 1.5I_N, & U_g' < 0.2; \\ I_{qref,f} = 0, & U_g' > 0.9 \end{cases} \quad (9)$$

其中: U_g' 为并网电压标幺值; I_N 为网侧额定电流值。由式(7)可得 d 轴电流可表示为:

$$i_d = \frac{E}{X} \delta \quad (10)$$

故障期间若想进一步保持功角稳定^[8], 可得:

$$\frac{i_{dN}}{E} = \frac{i_{dref,f}}{E_f} \quad (11)$$

其中: i_{dN} 为正常运行时的输出额定电流; E 为正常运行时的 VSG 内电势; E_f 为故障期间的 VSG 内电势。 E 与 U_g 相差较小, 为便于计算, 将 E 用 U_g 代替, E_f 用 U_{gf} 代替, 可得此时 d 轴参考电流为:

$$i_{dref,f} = \frac{i_{dN}}{U_g} U_{gf} \quad (12)$$

其中, U_{gf} 为故障期间的电网电压。

3) 故障恢复模式。电网电压恢复至大于等于 0.9 pu 后进入故障恢复模式。此阶段, 输出功率 P 、 Q 未达到给定值 P_0 、 Q_0 , 若此时强行切换至

正常运行模式,将导致功角振荡问题并延长恢复时间。

正常运行时电流环的参考电流由 VSG 控制给定,故障运行模式下的参考电流根据电网电压跌落幅度给定,因此在判断电网电压发生跌落故障后,将参考电流由 VSG 控制给定变为定参考电流给定即可。

故障清除后,考虑到电网电压相角偏移带来的功角振荡以及功率恢复缓慢问题,故障恢复模式中通过虚拟功率环获取含电网电压偏移角的 VSG 相角初始相位,使得故障清除后实际输出功率快速跟踪给定功率。

故障恢复模式期间保持定电流控制,实现预并列后,切换至 VSG 控制,控制模式平滑切换至正常运行模式。

为实现平滑快速切换,在故障恢复过程中进行功角的跟踪计算,保障切换之后输出功率 P 、 Q 快速跟踪给定功率 P_0 、 Q_0 ,缩短功角振荡时间。

3.2 基于功角保持的多模式平滑切换控制策略

为实现低电压穿越多模式平滑切换,需保证切换至正常运行模式后输出功率 P 、 Q 快速跟踪给定功率 P_0 、 Q_0 ,通过虚拟功率环的运算实现功角跟踪,使输出功率快速跟踪给定功率并缩短功角振荡时间。低电压穿越多模式切换时序图如图 6 所示。

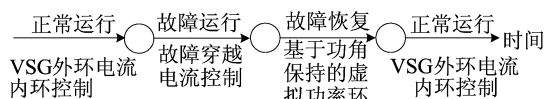


图 6 低电压穿越多模式切换时序图

在故障恢复时,为了模式的平滑切换,需要跟踪电网的相角,使得切换后的 VSG 快速运行至指定功率点。

图 5 的 VSG 相角 θ 包含故障瞬间的 VSG 相角 θ' 和功角保持环节所得相角 θ_v 。 θ' 代表故障前实际功率对给定功率跟踪时的 VSG 相角,在图 6 的正常运行切换至故障运行时保存,作为电网相角的前馈量,如果故障期间电网相位不改变,那么该前馈量可实现切换时 VSG 的输出功率等于给定功率的目标。

考虑到故障恢复过程中电网的相角可能产生偏移,为避免模式切换时产生功角振荡甚至失稳,设计基于虚拟功率环的预并列环节,即功角保持环节,目的是获取电网偏移相角。此环节以 VSG

的虚拟功率环代替锁相环获取电网偏移相角,即将图 5 中的 S_1 切换至“2”状态,使用有功环与无功环分别获取虚拟角频率 ω_s 与虚拟内电势幅值 E_s ,经虚拟阻抗得到虚拟电流 i_{ds} 、 i_{qs} ,为跟踪电网电压相角,采样实时电网电压 U_g ,与虚拟电流 i_{ds} 、 i_{qs} 计算得到虚拟功率 P_s 、 Q_s ,虚拟功率 P_s 、 Q_s 计算的同时,经过 VSG 有功-频率环路,VSG 相角在 θ' 基础上积分累加,累加值为功角保持环节所得相角 θ_v ,即电网偏移角。

虚拟功率 P_s 、 Q_s 达到给定功率 P_0 、 Q_0 ,预并列完成, S_1 切换至“1”状态,此时 VSG 的输出相角 $\theta' + \theta_v$ 使实际功率快速恢复至给定功率,实现故障恢复模式平滑切换至正常运行模式。

图 6 低电压穿越多模式切换时序图对应图 5 中各开关状态,见表 2 所列。

表 2 控制策略对应的各开关状态

模式	S_1	S_2	S
故障运行	1	2	2
故障恢复	2	1	2
正常运行	1	1	1

低电压穿越控制流程如图 7 所示。

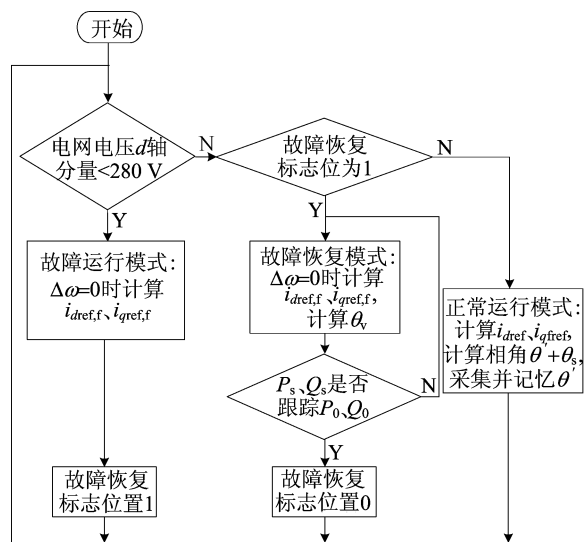


图 7 LVRT 控制流程图

低电压穿越过程中未改变 VSG 控制结构,通过分段设计控制参数,可实现故障恢复期间的虚拟功率的快速恢复,加快功角保持环节的响应速度。

3.3 故障恢复模式参数设计

虚拟阻抗可以有效降低有功环与无功环之间

的耦合作用。

从图 1 可以看出,本文 LVRT 控制中包括了虚拟阻抗部分,因此在进行参数设计时将忽略 VSG 有功环、无功环的耦合作用。逆变器有功功率与给定有功功率为典型的二阶系统^[15],为加快虚拟有功功率的恢复速度,简化控制,此时将 VSG 有功环控制中的虚拟惯量 J 去除,将二阶系统改为一阶系统。

去除 J 之后, P_s 与 P_0 的闭环传递函数变为:

$$\frac{P_s}{P_0} = \frac{K_{\delta P}}{D_f s + K_{\delta P}} \quad (13)$$

其中: $K_{\delta P} = EU_g / (X + X_v)$, X 为线路阻抗, X_v 为虚拟阻抗。

调节时间为:

$$t_f = \frac{3D_f}{K_{\delta P}} \quad (14)$$

为实现虚拟功率恢复时间小于原二阶系统调节时间,则 t_f 应满足条件:

$$t_f = \frac{3D_f}{K_{\delta P}} < t_{pri} \quad (15)$$

其中, t_{pri} 为正常运行模式下原二阶系统的调节时间,其计算方法如下。

由图 1 可得正常运行模式下的 P 与 P_0 的闭环传递函数为:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{K_{\delta P}}{J\omega_0 s^2 + Ds + K_{\delta P}} \quad (16)$$

调节时间为:

$$t_{pri} = \frac{3J\omega_0}{D} \quad (17)$$

并网导则规定电网电压恢复正常后 10 s 内输出功率达到有功功率的 90%,取恢复时间的 1/250,即 0.04 s 作为虚拟功率的恢复时间。则 t_f 应满足条件:

$$t_f = \frac{3D_f}{K_{\delta P}} \leq 0.04 \quad (18)$$

联立式(15)、式(17)、式(18)得到 D_f 的取值,即

$$D_f < \min \left\{ \frac{K_{\delta P} J \omega_0}{D}, \frac{K_{\delta P}}{75} \right\} \quad (19)$$

4 仿真结果分析

为验证所提策略的有效性,搭建如图 1 所示并网逆变器系统,在 MATLAB/Simulink 上仿真对称故障时传统 VSG 控制的工况和改进后 VSG 控制的工况,并对比参数设计前后系统性能的变化情况,以验证所提控制策略可行性及有效性。

仿真参数见表 3 所列。

表 3 仿真主要参数

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	750
给定有功功率 P/kW	30
给定无功功率 $Q/kVar$	0
d 轴输出额定电流 i_{dN}/A	64
开关频率 f_s/kHz	10
电网相电压有效值 U/V	220
滤波电感 L/mH	5
逆变器侧电阻 R/Ω	0.3
惯性分量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.059 7
阻尼系数 D	843
故障恢复阻尼系数 D_f	189.65
比例系数 k_q	0.000 4
积分系数 K	0.005

4.1 传统 VSG 控制下低电压穿越仿真

传统 VSG 控制低电压穿越仿真波形如图 8 所示。从图 8 可以看出,故障前功率 30 kW,电网电压对称跌落,0.30 s 时刻电网电压 A、B、C 三相跌落至 0.64 pu,0.40 s 时刻故障恢复。

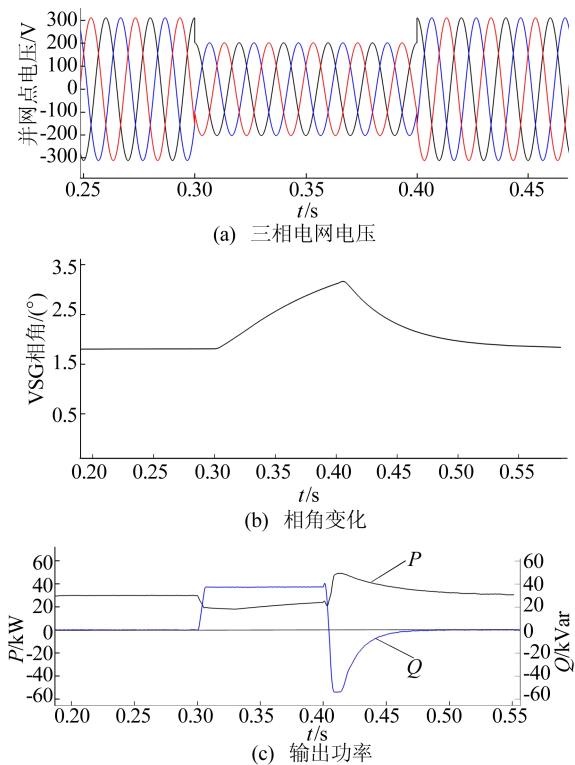


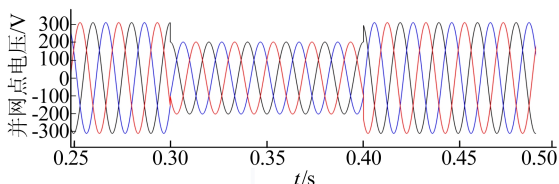
图 8 传统 VSG 控制低电压穿越仿真波形

从图 8 还可以看出,0~0.30 s 期间功角与输出功率均已稳定;0.30~0.40 s 期间电网电压发生短路故障,电网电压跌落;0.30~0.40 s, VSG 输出相角持续累加,即功角持续累加;由有功功率

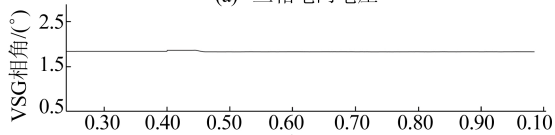
与无功功率的大小可以判断此时出现了电流越幅,0.40 s 之后电网电压故障恢复,功角的累加使故障恢复后的功率恢复速度缓慢,达到 0.15 s。

4.2 改进 VSG 控制下低电压穿越仿真

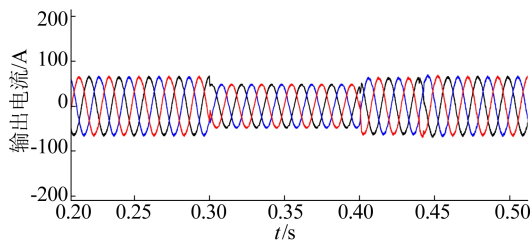
改进 VSG 控制低电压穿越仿真波形如图 9 所示。从图 9a 可以看出,故障前功率 30 kW,电网电压对称跌落,0.30 s 时刻电网电压 A、B、C 三相跌落至 0.64 pu,0.40 s 时刻故障恢复,在 0.40 s 恢复时刻加入电网相角偏移。



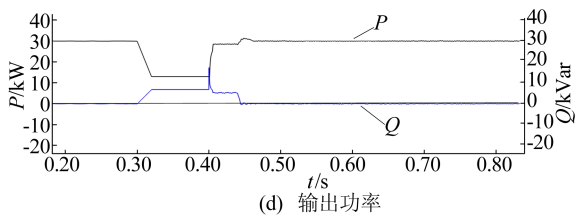
(a) 三相电网电压



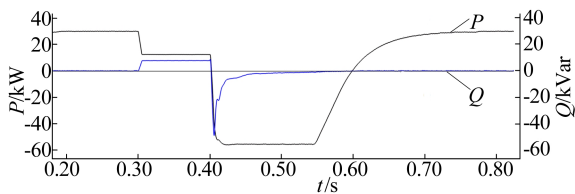
(b) 相角变化



(c) 输出三相电流



(d) 输出功率



(e) 未加功角保持环节的输出功率

图 9 改进 VSG 控制低电压穿越仿真波形

从图 9b 可以看出,0.30~0.40 s 故障期间采用故障参考电流控制并保持 VSG 相角稳定,功角也因此保持稳定。从图 9c 可以看出,故障期间输出电流稳定且未越幅。从图 9d 可以看出,输出功率也因此保持稳定;0.40 s 故障恢复,故障恢复期间的功角保持策略使 VSG 输出相角中包括了电

网相角偏移值,因此 0.40 s 之后 VSG 相角值稳定无变化,输出功率稳定;单独设计的控制参数加快了虚拟功率的恢复,进而加快了故障恢复之后功率恢复的速度,恢复时间为 0.04 s。从图 9e 可以看出,0.40 s 后电网相角偏移带来的功角变化导致输出有功偏移给定值,因为频率被限制变化幅度,所以 0.40~0.60 s 有功偏移值被限制,最终恢复时间长达 0.40 s。优化后恢复速度快了 9 倍,切换过程快速平滑,验证了所提控制策略的有效性。

传统 VSG 与改进 VSG 控制下低电压穿越仿真结果对比见表 4 所列。

表 4 仿真结果对比

控制策略	功角	输出电流	输出功率	故障恢复时间/s
传统 VSG	振荡累加	越幅	不稳定	0.15
改进 VSG	稳定	无越幅	稳定	0.04

注:改进 VSG 控制策略下故障恢复时间未加功角。

从表 4 可以看出,改进的基于功角保持的 VSG 低电压穿越控制策略,使逆变器在故障期间保持功角稳定,输出电流无越幅,输出功率稳定且恢复时间明显缩短。

4.3 参数对故障后功率恢复速度的影响

从图 9d 可以看出,故障恢复后 0.04 s 功率可以平稳恢复至故障前水平。期间虚拟功率恢复速度决定总的恢复时间的大小,虚拟功率恢复速度优化前后的波形如图 10 所示。

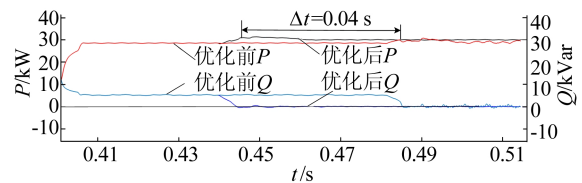


图 10 优化前后功率恢复波形

从图 10 可以看出,优化参数前,虚拟有功功率的恢复时间为 0.08 s,优化参数后,虚拟有功功率的恢复时间为 0.04 s,时间缩短了 0.04 s。满足并网导则要求并验证了本文参数设计的结果。

5 结 论

针对传统虚拟同步发电机控制下 LVRT 存在的问题,本文提出一种基于功角保持的 VSG 低电压穿越控制策略。该策略下故障期间功角稳

(下转第 634 页)

- [9] WANG T, CHEN H C. Optimal model for link failure foresight controller placement in SDN [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology. Chengdu: IEEE, 2021: 727-730.
- [10] SHARMA S, STAESSENS D, COLLE D, et al. Fast failure recovery for in-band OpenFlow networks [C]//2013 9th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). [S. l. : s. n.], 2013: 52-59.
- [11] CANINI M, SALEM I, SCHIFF L, et al. Renaissance: a self-stabilizing distributed SDN control plane [C]//2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Vienna: IEEE, 2018: 233-243.
- [12] WANG N Y, CHEN D, LIU L, et al. An SDN based highly reliable in-band control framework for leo mega-constellations [C]//2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems. Chengdu: IEEE, 2021: 970-975.
- [13] DUAN T, DINAHAH V. Dataplane-based fast failover in SDN-enabled wide area measurement system of smart grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(7): 8148-8158.
- [14] SAVAS S S, TORNATORE M, DIKBIYIK F, et al. RASCAR: recovery-aware switch-controller assignment and routing in S-DN [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 15(4): 1222-1234.
- [15] AMIRI S A, DUDYCZ S, SCHMID S, et al. Congestion-free rerouting of flows on DAGs [C]//45th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming. [S. l. : s. n.], 2018: 2-13.
- [16] KNIGHT S, NGUYEN H X, FALKNER N, et al. The internet topology zoo [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(9): 1765-1775.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 619 页)

定, 电流无越幅且逆变器能够为电网提供无功支撑; 针对故障恢复后的电网相角偏移所带来的功率恢复缓慢问题, 通过提出基于虚拟功率的相角跟踪方法并优化控制参数, 实现逆变器输出功率恢复速度进一步加快, 故障恢复模式平滑快速切换至正常运行模式, 实现了基于 VSG 控制并网逆变器的低电压穿越。

[参 考 文 献]

- [1] 施凯, 叶海涵, 徐培凤, 等. 基于欠励磁状态运行的虚拟同步发电机低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 134-140.
- [2] 胡文强, 吴在军, 窦晓波, 等. 负荷虚拟同步机及其低电压故障穿越控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 100-107.
- [3] D'ARCO S, SUUL A J, FOSSO O B. Automatic tuning of cascaded controllers for power converters using eigenvalue parametric sensitivities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1743-1753.
- [4] 谭骞, 徐永海, 黄浩, 等. 对称电压暂降情况下光伏逆变器输出电流峰值的控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 601-608.
- [5] 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.
- [6] JONGUDOMKARN J, LIU J, ISE T. Virtual synchronous generator control with reliable fault ride-through ability: a solution based on finite-set model predictive control [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3811-3824.
- [7] 赵红雁, 郑琼林, 李艳, 等. 应用于三相并网系统的电网电压快速锁相技术研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 314-320.
- [8] 房志学, 苏建徽, 王华锋, 等. 微网逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 143-155, 161.
- [9] 贾利虎, 朱永强, 孙小燕, 等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 68.
- [10] 高怀正, 李华, 常兴, 等. 电压跌落下虚拟同步发电机故障穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 39-46.
- [11] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- [12] 李旭枫, 陆立民, 成乐祥, 等. 基于自适应虚拟阻抗改进无功环路的虚拟同步功率解耦控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3752-3760.
- [13] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 204-209.
- [14] 施向前, 耿乙文, 黄尊臣, 等. 光伏电站低电压穿越技术研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(8): 61-66.
- [15] 孔祥平, 张哲, 袁宇波. 低电压穿越控制策略下双馈风电机组故障电流特性的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 67-74.

(责任编辑 张 镛)