

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.009

基于功角偏差反馈的构网型储能暂态功角稳定增强方法

孙压宁¹, 任永峰¹, 王欢², 李超², 郭筱², 陈磊²

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;
2. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司建设管理分公司, 北京 101100)

摘要:针对构网型储能接入以新能源为主体的新型电力系统中, 由于新能源发电的不稳定导致电网电压跌落, 进而引起构网型储能在暂态过程中出现功角失稳和过电流的问题, 文中提出了基于功角偏差反馈的暂态功角稳定控制策略。首先, 构网型储能采用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制, 并基于 VSG 控制建立构网型储能模型。其次, 通过 VSG 功角特性分析有功功率、功角稳定及输出电流之间的关系, 并结合相图理论深入分析功角失稳的原因。在此基础上, 以功角稳定范围和有功功率偏差为依据, 设计了功角偏差反馈系数自适应调节策略。该策略通过功角偏差反馈来控制有功功率偏差, 进而抑制功角增大, 保持功角稳定, 并有效抑制过电流。最后, 通过时域仿真验证了理论分析的正确性及文中所提控制方法的有效性。

关键词: 构网型储能; 虚拟同步发电机(VSG); 暂态功角稳定; 功角偏差反馈; 电压跌落; 功角失稳

中图分类号: TM46; TP273

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)02-0090-10

0 引言

近年来, 随着“碳中和、碳达峰”战略的提出, 可再生能源(renewable energy sources, RES)如光伏和风电得到了迅速发展。电力电子器件在 RES 发电中的广泛应用, 推动传统电力系统向新型电力系统转变^[1-2]。在这一转变过程中, 电力系统的“双高”特性将更加显著。高比例的新能源和电力电子设备接入电网导致系统转动惯量减少, 抗干扰能力下降, 进而影响电网的安全稳定性^[3-4]。这一趋势凸显了新型电力系统面临的挑战, 亟须通过有效的技术和管理手段来应对系统运行中的新问题。

在新型电力系统中, 新能源发电具有不稳定性, 为了应对新能源发电功率波动、增强电网调峰能力以及提升电网对新能源的接纳水平, 储能技术在电力系统中至关重要^[5]。传统储能采用跟网型控制, 即利用锁相环实现设备与电网频率和相位同步。然而随着电力电子器件在新型电力系统中的广泛应用, 系统可能面临“低惯量”和“弱阻尼”等问题, 并且不具备提供电压支撑、孤岛运行等能力^[6]。因此, 构网型储能随即被提出。构网型储能是指在新能源设备附近增加储能装置, 通过构网型控制技术进行接入。而构网型控制本质为电压源控制模式(voltage control mode, VCM), 能够自主产生端口电压和相位, 与电网同步运行, 并且能够提供电压支撑, 提高系统转动惯量, 从而增强新能源系统的稳定性^[7]。当前学术界提出的构网型控制方法有下

垂控制、虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制、匹配控制、虚拟振荡器控制等。相对于 VSG 控制, 下垂控制不具备同步发电机的惯性和阻尼特征, 而虚拟振荡器控制缺乏兼容的二次调节或电网同步技术, 其采用受到限制^[8]。匹配控制则是在 VSG 控制基础上加以改进, 因此当前构网型控制的主流研究方向是 VSG 控制。VSG 不仅继承了同步发电机的外在特征, 还具备调节惯性和阻尼参数的灵活性。然而, VSG 在电网电压跌落、断线等大扰动情况下, 可能会发生暂态功角稳定问题, 并产生较大的过电流^[9]。如果未能及时采取措施, 电力电子器件可能会受损, 甚至引发系统脱网的危险^[10]。在极端情况下, 这可能会导致连锁反应, 对新型电力系统的安全性造成严重威胁^[11]。在新型电力系统中, 由于高比例新能源发电的不稳定性, 电压跌落不容忽视。因此, 为了确保电网的安全稳定运行, VSG 的暂态功角稳定性尤为重要。

当前, 对 VSG 稳定性的研究主要集中在其正常稳定运行情况下。研究内容涵盖了 VSG 的建模和简化、小信号分析、参数设计与优化、控制方法以及策略改进等方面^[12]。然而, 对于大扰动状态下 VSG 稳定性的研究相对较少。在实际运行中, 电网产生大扰动引起电网电压跌落, 会导致 VSG 功角发散, 使系统无法稳定运行, 并引起过电流现象, 由于变流器的过流能力远不如同步发电机, 可能会损坏电力电子器件, 严重影响新型电力系统的稳定运行^[13]。因此, 研究大扰动下 VSG 暂态功角稳定性具有非常重要的意义。目前针对大扰动状态下 VSG 功角稳定性问题主要有 2 个研究方向:

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52367022)

(1) 减少扰动状态下有功功率指令值和有功功率输出的偏差; (2) 降低暂态期间功角的增长速度, 增加临界切除时间^[14]。文献[15]分析了不同方法进行电流限幅对VSG暂态功角稳定的影响, 但未提出解决方案。文献[16]通过对虚拟电阻和相量限流共同作用的方法, 实现VSG电流限幅, 并减小临界切除点的时间。文献[17]提出了通过控制无功功率指令对VSG电流进行限幅, 却忽略了VSG暂态功角稳定的问题。文献[18]提出了同时对有功功率指令和无功功率指令进行调节, 以控制VSG暂态功角稳定和抑制过电流, 但其无功环对应的无功调节指令响应困难。文献[19]通过调整VSG的惯性和阻尼提高其暂态功角稳定性。文献[20]分析了几种无功电压控制下的暂态电压支撑机理, 提出一种改进的故障穿越控制策略, 提高了VSG暂态功角稳定性。文献[21-22]通过在VSG中加入附加控制回路改变功角特性曲线, 利用等面积法则改变加速面积和减速面积, 进而提升VSG暂态稳定性。文献[23]验证了在暂态期间动态控制VSG的惯性时间常数和下垂系数能够抑制其功角振荡。上述文献较好地解决了VSG暂态功角稳定和故障过流问题, 但忽略了功角稳定与过电流之间的联系, 无法同时解决暂态功角稳定和过电流问题。

针对以上问题, 文中以构网型储能为研究对象, 阐述了基于VSG控制的构网型储能, 分析了大扰动情况下VSG的功角特性和电流特性, 以及功角稳定与过电流之间的联系。通过相图理论分析了2种不同故障下基于VSG控制的构网型储能暂态功角特性, 提出一种基于功角偏差反馈的构网型储能暂态功角稳定控制策略。该策略根据不同电

网电压跌落程度进行自适应功角偏差反馈, 减小有功功率偏差, 保持暂态功角稳定, 抑制过电流。该策略能够有效抑制电压跌落过程中产生的功角失稳和过电流问题, 并通过仿真验证了文中理论分析与改进方法的正确性。

1 构网型储能系统模型

储能设备通常被安置在新能源发电系统的直流侧, 并通过网侧变流器的拓扑控制来模拟传统同步发电机的运行方式。然而, 在实际工程应用中, 随着光伏和风电装置的接入电网并采用电网馈电方式运行, 直流侧引入储能设备虽然能够提升电能交换能力, 但需要增加网侧变流器容量, 导致成本上升。相比之下, 将构网型储能设备纳入交流侧设计中, 无须增设网侧变流器^[24]。在此拓扑中, 储能系统能够与新能源发电系统实现电能交换, 提供电压支撑并增强系统惯性, 从而提高新能源发电系统的稳定性, 同时不改变原有系统结构。这对于以新能源和电力电子设备为主导的新型电力系统具有重要意义。然而, 由于新能源发电的不稳定性, 电压跌落问题不可忽视。因此, 在电压跌落时, 构网型储能设备能够稳定并网且保持新型电力系统的稳定运行至关重要。

目前, 单机无穷大系统已经成为研究暂态稳定工作的基础^[25]。文中采用构网型控制中的VSG控制策略。该策略模拟同步发电机的机械特性和电磁特性, 分别由有功环、无功环以及电压-电流双闭环构成^[26]。图1展示了基于VSG控制的构网型储能系统的主电路拓扑。

图1中, C_{dc} 为储能侧直流电容; R_f 、 L_f 、 C_f 分别

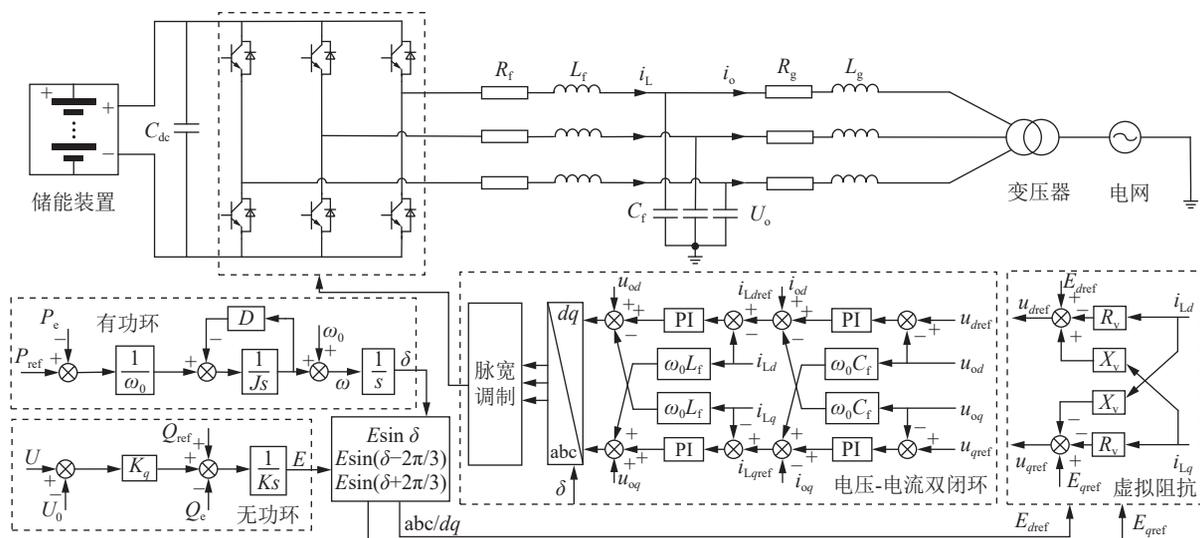


图1 基于VSG控制的构网型储能系统的主电路拓扑

Fig.1 Grid-forming energy storage system main circuit topology based on VSG control

为储能变流器滤波电阻、滤波电感、滤波电容; R_g 、 L_g 分别为电网线路电阻、电感; E_{dref} 、 E_{qref} 为 VSG 参考电压的 dq 轴分量; i_{Ldref} 、 i_{Lqref} 为 VSG 参考电流的 dq 轴分量; u_{dref} 、 u_{qref} 为虚拟阻抗输出电压的 dq 轴分量; u_{od} 、 u_{oq} 为 VSG 输出电压的 dq 轴分量; i_{od} 、 i_{oq} 为 VSG 输出电流 dq 轴分量; i_L 、 i_o 分别为滤波电容前的电流和滤波电容后的电流; i_{Ld} 、 i_{Lq} 为 i_L 的 dq 轴分量; R_v 、 X_v 分别为虚拟电阻、虚拟电感; PI 为比例积分控制。

VSG 有功-频率下垂控制方程为:

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

式中: P_{ref} 、 P_e 分别为有功功率指令值、有功功率实际值; ω 、 ω_0 分别为 VSG 的角频率、额定角频率; J 、 D 分别为 VSG 虚拟惯量系数、阻尼系数; δ 为 VSG 功角。

VSG 无功-电压下垂控制方程为:

$$Q_{ref} - Q_e + K_q(U_0 - U) = K \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

式中: Q_{ref} 、 Q_e 分别为无功功率指令值、无功功率实际值; K_q 、 K 分别为无功下垂系数、无功调节系数; U_0 、 U 分别为输出电压额定值、输出电压实际值; E 为 VSG 内部生成电势幅值。

2 构网型储能系统暂态特性分析

2.1 构网型储能暂态功角特性

构网型储能并网输出有功功率和无功功率的表达式为:

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2} \times \frac{UU_g}{X_g} \sin \delta \\ Q_e = \frac{3}{2} \times \frac{U(U - U_g \cos \delta)}{X_g} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_g 为电网电压值; X_g 为线路等效阻抗。

根据无功环的影响, 可将式(3)代入式(2)得到关于 U 的方程为:

$$1.5U^2 + (K_q X_g - 1.5U_g \cos \delta)U - \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right) X_g = 0 \quad (4)$$

解方程得:

$$U = \frac{1.5U_g \cos \delta - K_q X_g}{3} + \frac{\sqrt{(1.5U_g \cos \delta - K_q X_g)^2 + 6X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right)}}{3} \quad (5)$$

把式(5)、式(3)代入式(1)得到无功环作用下

关于 δ 的二阶微分方程为:

$$J\omega_0 \frac{d^2\delta}{dt^2} + D\omega_0 \frac{d\delta}{dt} = P_{ref} - \frac{3U_g^2}{8X_g} \sin 2\delta + \frac{K_q U_g \sin \delta}{2} - \frac{U_g \sin \delta}{2X_g} \times \frac{\sqrt{(1.5U_g \cos \delta - K_q X_g)^2 + 6X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right)}}{2X_g} \quad (6)$$

令状态方程 $\mathbf{y} = [\dot{y}_1 \ \dot{y}_2]^T = [\delta \ \Delta\omega]^T$, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 为角频率偏差, 由于 VSG 电压电流内环带宽通常远大于功率外环, 所以在此忽略电压电流内环动态特性影响^[27], 并得到 VSG 的大信号模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 \\ \frac{P_{ref}}{J\omega_0} - \frac{3UU_g}{2J\omega_0 X_g} \sin \delta - \frac{Dy_2}{J\omega_0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在无功环的作用下, 根据式(4)、式(7)绘制出 P - δ 曲线, 如图 2 所示, 图中 I 型故障功角曲线与 P_{ref} 有交点, II 型故障功角曲线与 P_{ref} 没有交点。可将 c 称为稳定平衡点 (table equilibrium point, TEP), e 称为不稳定平衡点 (unstable equilibrium point, UEP)。在 I 型故障下系统越过 UEP, 则系统会暂态失稳, 因此将 UEP 所对应的功角作为临界功角。由此可见暂态期间分为 2 种情况, 根据 P - δ 曲线分析 I 型故障和 II 型故障 2 种不同状态下 VSG 暂态期间功角变化。

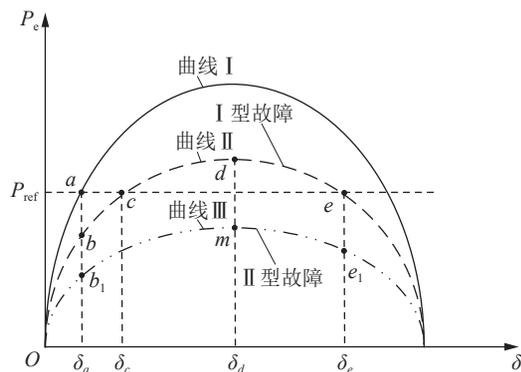


图 2 不同故障下功率和功角特性曲线
Fig.2 Power and power angle characteristic curves under different fault conditions

(1) 暂态期间平衡点存在。

由图 2 可知, 当电网电压跌落时 VSG 功角特性曲线会由曲线 I 变成曲线 II, 这时由于 VSG 输出功率偏差, VSG 运行点由 a 点变至 b 点。此时有功功率指令值大于输出有功功率实际值, 根据式(1)可知 $d(\omega - \omega_0)/dt > 0$, 则 VSG 输出角频率增大, 功角增大, b 点运行至 c 点, 当越过点 c 时, VSG 有功功率指令值小于输出有功功率实际值, $d(\omega - \omega_0)/$

$dt < 0$, VSG 输出频率会降低, 但这时角频率 ω 仍旧大于 ω_0 。根据等面积准则, 此时加速面积大于减速面积, 所以 VSG 的功角继续增加, 如果能够在到达 UEP 之前, 使角频率 ω 小于 ω_0 , 加速面积小于减速面积, 运行稳定点将向 TEP 移动, 经过一段时间的波动之后, VSG 将运行至 TEP 保持稳定。相反, 如果运行稳定点在到达 UEP 之前, 角频率 ω 仍然大于 ω_0 , 运行稳定点将越过 UEP, 这时 VSG 有功功率指令值将会大于输出有功功率实际值, 功角将继续增大, 系统失去稳定。

(2) 暂态期间平衡点不存在。

由图 2 可知, II 型故障功角曲线的电网电压跌落不存在 TEP 的情况。电网电压跌落是由于有功功率指令值始终大于有功功率实际值, 这时加速面积始终大于减速面积, 导致 VSG 角频率和功角会一直增大, 若在此过程中不及时采取措施或切除故障, 系统最终将失去稳定性。为了在此期间保持一定时间的稳定运行, 必须恢复平衡点。因此, 减少有功功率的参考值、减小有功功率偏差、增加输出有功功率, 均可增加加速面积, 使 $P-\delta$ 曲线上移, 降低暂态稳定功角, 使系统能够恢复到稳定状态。

2.2 构网型储能暂态电流特性分析

为了便于分析大扰动下 VSG 电流特性, 建立构网型储能的简化并网等效模型, 如图 3 所示。其中, Z_q 为 VSG 内部等效阻抗; Z_g 为 VSG 与电网之间等效阻抗。

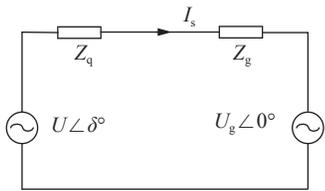


图 3 构网型储能简化并网等效模型

Fig.3 Simplified grid-forming energy storage equivalent model for integration

根据图 3, VSG 输出电流 I_s 可以表示为:

$$I_s = \frac{U - U_g}{Z_q + Z_g} \quad (8)$$

通过式(8)可以得知, 在大扰动导致电网电压跌落时, 会引起 VSG 输出电压和电网电压之间出现较大偏差。由于线路阻抗较小, VSG 输出电流会过大, 进而导致电力电子器件损坏。

为了在大扰动情况下消除 VSG 输出的过大电流, 需要消除 VSG 输出电压和电网电压之间的较大偏差, 根据式(2)可知, 输出电压会受到无功下垂系数的影响。由式(6)可以得到输出电压与功角之间的关系, 对其进一步简化:

$$x = \frac{1.5U_g \cos \delta - K_q X_g}{3} \quad \delta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (9)$$

$$U = x + \sqrt{x^2 + \frac{2X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right)}{3}} \quad (10)$$

U 对 x 求导得到:

$$\frac{dU}{dx} = 1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 2X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right) / 3}} \quad (11)$$

由式(2)可知:

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + \frac{2X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right)}{3}}} < \frac{x}{\sqrt{x^2}} = \frac{x}{|x|} \quad (12)$$

得到:

$$-1 < \frac{x}{\sqrt{x^2 + \frac{2X_g \left(K_q U_0 - K \frac{dE}{dt} + Q_{ref} \right)}{3}}} < 1 \quad (13)$$

因此式(5)恒大于 0, U 是 x 的单调递增函数。

对式(9)进行 x 对 δ 的求导得到:

$$\frac{dx}{d\delta} = -\frac{1}{2} U_g \sin \delta < 0 \quad \delta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (14)$$

则 x 是 δ 的单调递减函数。

根据上述分析可知, 在功角正常范围内, 输出电压 U 是关于功角 δ 的单调递减函数。当电网电压下降时, 会导致 VSG 控制的输出角频率升高, 功角增加。在无功下垂特性和功角特性的影响下, 输出电压会下降。根据式(8)得知, 当输出电压 U 降至低于电网电压 U_g 时, 将引发较大的反电流。仅有在功角减小的情况下, 输出电压才会上升, 反电流才会减弱。因此, 功角的变化不仅会导致过电流, 还会削弱无功特性。因此, 在暂态期间确保功角的稳定性至关重要。

3 构网型储能暂态功角稳定控制

根据 2.1 节的分析, 电网电压下降导致有功功率和输出功率存在偏差, 进而引发暂态期间功角不稳定。这种有功功率偏差会导致功角增大, 因此消除有功功率偏差有助于维持暂态功角的稳定性。文中对有功-频率环进行改进, 提出将功角偏差反馈到有功-频率环中, 以降低有功功率指令值, 减小有功功率不平衡。基于功角偏差反馈的有功-频率环控制策略如图 4 所示。

根据式(1)加入功角偏差反馈的有功-频率环为:

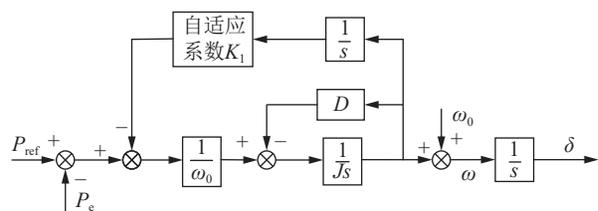


图4 基于功角偏差反馈的有功-频率环控制

Fig.4 Active power-frequency loop control based on power angle deviation feedback

$$\frac{P_{\text{ref}} - P_e - K_1 \Delta \delta}{\omega_0} = \frac{J d(\omega - \omega_0)}{dt} + D(\omega - \omega_0) \quad (15)$$

K_1 作为自适应系数,其值的大小会影响系统的稳定性,增加 K_1 虽然有利于增强暂态功角稳定性,但过大的 K_1 会减小输出的有功功率,导致系统不稳定,加剧功角振荡。为了更深入地分析 K_1 对 VSG 暂态功角稳定性的影响,将式(15)代入式(7),可得到基于功角偏差反馈的 VSG 大扰动模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 \\ \frac{P_{\text{ref}}}{J\omega_0} - \frac{3UU_g}{2J\omega_0 X_g} \sin \delta - \frac{Dy_2}{J\omega_0} - \frac{K_1 y_1}{J\omega_0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知,在故障期间, K_1 增大时,经反馈后的有功功率偏差会减小,即有功功率指令值减小或输出有功功率增大,都能减小有功功率偏差。根据图2可知,这些变化会导致暂态稳定功角 δ_{TEP} 向左移动并随之减小,从而增强系统的暂态功角稳定性。因此,选择合适的 K_1 取值对系统至关重要。由式(15)简化得:

$$K_1 = \frac{1}{\Delta \delta} \Delta P - \frac{J\omega_0 d\Delta \omega}{dt + D\omega_0 \Delta \omega} \Delta \omega \quad (17)$$

式中: $\Delta P = P_{\text{ref}} - P_e$ 为有功功率偏差。在实际工程应用中,为了确保系统具备较好的动态响应,通常会选择合适的阻尼系数和转动惯量。为了突出所提控制策略的有效性,忽略阻尼系数影响^[25],将式(17)简化可得:

$$K_1 = \left(\frac{1}{\Delta \delta} - \frac{J\omega_0 d\Delta \omega}{\Delta P \Delta \delta dt} \right) \Delta P \quad (18)$$

K_1 会随着功角偏差变化而改变,进而反馈到有功功率偏差上;同时有功功率的变化又会影响 K_1 ,最终使系统到达稳定状态。因此,在不同电压跌落情况下, K_1 的取值会有所不同。由此可见, K_1 的取值与当前的有功功率偏差密切相关,应与当时有功功率偏差的量级保持一致,由于式(17)中变量过多,为简化计算,令 $\left(\frac{1}{\Delta \delta} - \frac{J\omega_0 d\Delta \omega}{\Delta P \Delta \delta dt} \right) = u$,将式(3)、式(5)、式(18)代入式(15),得:

$$J\omega_0 \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D\omega_0 \frac{d\delta}{dt} = P_{\text{ref}} - u \Delta P \Delta \delta - \frac{3U_g^2}{8X_g} \sin 2\delta + \frac{U_g \sin \delta}{2} - \frac{U_g \sin \delta}{2X_g} \times \sqrt{(X_g - 1.5U_g \cos \delta)^2 + 6K_q X_g \left(K_q U_0 + K \frac{dE}{dt} + Q_{\text{ref}} \right)} \quad (19)$$

由2.1节可知,当暂态功角越过临界功角时,系统会发生失稳。为了使系统在2种状态下都能保持稳定,考虑到 K_1 会随着 u 的变化而改变,因此通过功角范围作为功角稳定裕度,来对 u 在不同状态下进行最优取值,如图5所示。其中, δ_0 为无扰动下的稳定功角。

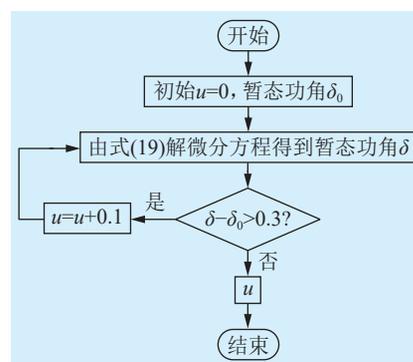


图5 考虑功角稳定裕度的 u 迭代计算流程

Fig.5 Calculation process of u iteration considering power angle stability margin

由于系统在稳定状态下功角的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,因此暂态稳定时 δ 应该符合功角范围。经过综合权衡和大量仿真测试,文中暂态功角裕度取 0.3 rad 。通过该暂态功角裕度来确定 u 的取值,进而确定 K_1 的值,以确保系统在暂态稳定时功角符合标准范围。

4 仿真实验

为了验证理论分析与所提控制策略的有效性,利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建构网型储能模型进行时域仿真。储能侧采用容量为 $2.5 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 的磷酸铁锂电池,对传统 VSG 控制和基于功角偏差反馈的 VSG 控制进行仿真。仿真参数如表1所示。

表1 构网型储能模型仿真参数
Table 1 Simulation parameters of grid-forming energy storage model

参数	数值	参数	数值
储能单元容量/(MW·h)	2.5	额定有功功率/MW	1
额定电压 U_0 /V	380	直流侧电压 U_{dc} /V	1 280
额定频率/Hz	50	线路电感 L_g /mH	0.12
滤波电感 L_f /mH	0.8	线路电阻 R_g /Ω	0.05
滤波电容 C_f /μF	50	阻尼系数 D /(N·m·s·rad ⁻¹)	400
滤波电阻 R_f /Ω	0.05	虚拟惯量系数 J /(kg·m ²)	0.5

设置不同扰动的仿真工况:

(1) 构网型储能在正常稳定并网后, 系统在 1 s 时发生大扰动, 并在 4 s 时切除大扰动。分别对电网电压跌落 30% 和电网电压跌落 80% 两种情况进行构网型储能系统时域仿真并分析结果。

(2) 构网型储能正常稳定并网后, 对系统连续扰动, 在 1 s 时电网电压跌落 30%, 在 4 s 时电网电压从 30% 连续跌落至 80%, 在 8 s 时切除扰动, 电网电压恢复正常, 对构网型储能系统进行时域仿真并分析结果。

4.1 电网电压三相对称跌落 30%

电网电压三相对称跌落 30% 时, 构网型储能系统电网电压、输出电流、有功功率、无功功率、功角的仿真结果, 如图 6 所示。

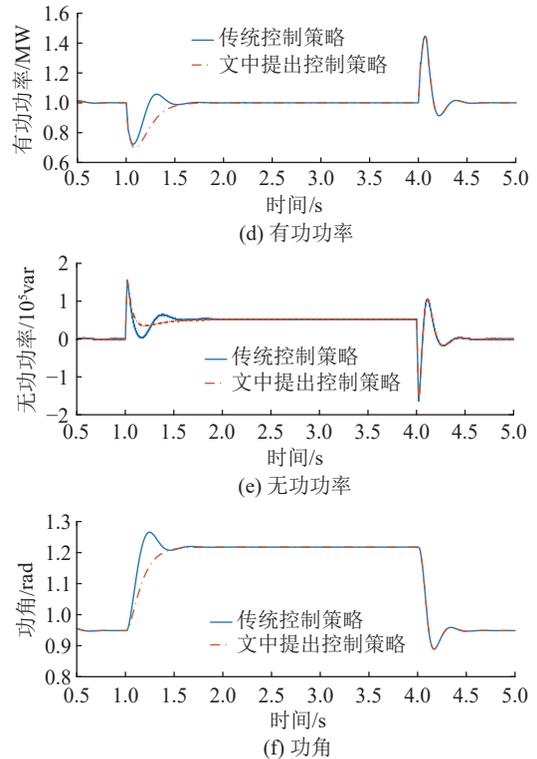
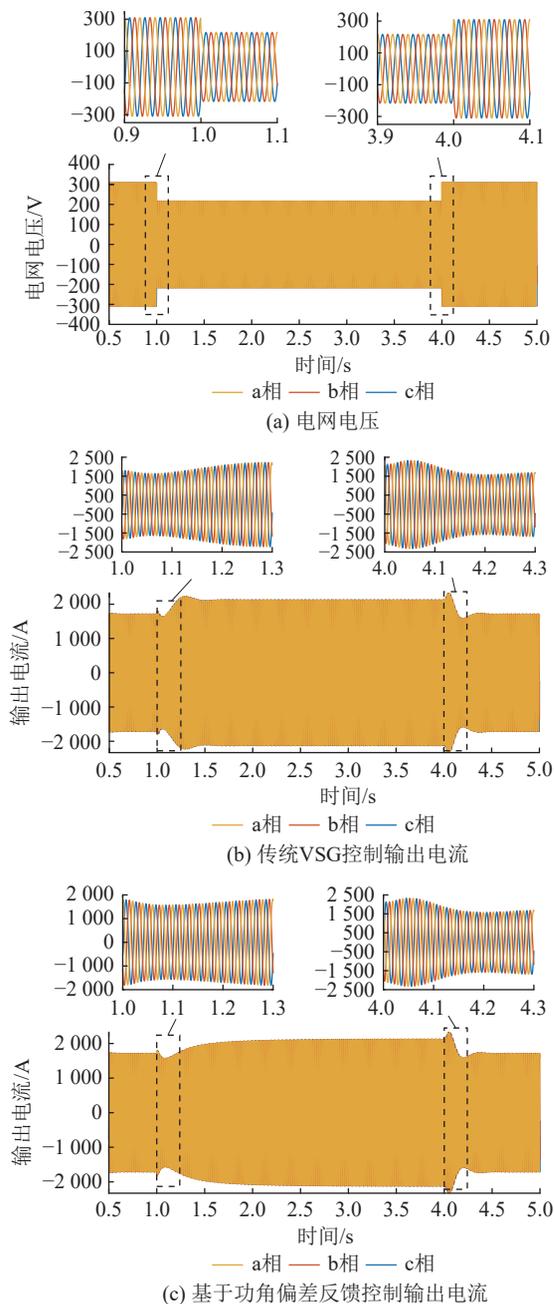


图6 电网电压跌落30%时, 构网型储能系统各参数的仿真结果

Fig.6 Grid-forming energy storage simulation results of various parameters with 30% voltage drop in the grid

由图 6(b)、(d)、(e)、(f)可以看出, 暂态期间存在稳定点, 跟 I 型故障的特征相符。在暂态期间, 功角会先增大, 随后达到稳定状态, 由于无功调节系数的作用, 无功功率提供支撑, 输出有功功率在短暂跌落后逐渐恢复到有功输入值, 仿真结果跟理论分析一致。

由图 6(c)、(d)、(e)、(f)可以看出, 引入功角偏差反馈策略后, 仿真结果相较于与传统控制有所改善, 功率和功角波动幅度较小, 且达到稳定的过程更为缓和。在暂态期间, 有功功率和功角的峰值分别降低了 10% 和 5%, 输出电流得到有效抑制, 这与上述 I 型故障的理论分析一致。

4.2 电网电压三相对称跌落 80%

电网电压三相对称跌落 80% 时, 构网型储能系统电网电压、输出电流、有功功率、无功功率、功角的仿真结果, 如图 7 所示。

由图 7(b)、(d)、(e)、(f)可以看出, 暂态期间不存在稳定点, 功角在暂态期间失稳, 并引起过电流现象, 符合上述 II 型故障的特征。这是由于有功功率偏差过大, 导致功角开始逐渐增大, 达到一定值后, 无法保持稳定, 最终引发功角失稳, 导致功角发生振荡, 进而输出有功功率也出现振荡, 系统失稳。此时, 传统 VSG 控制的输出电流峰值为额

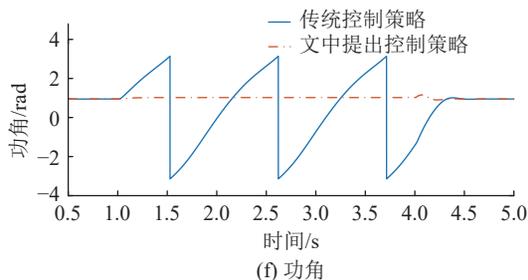
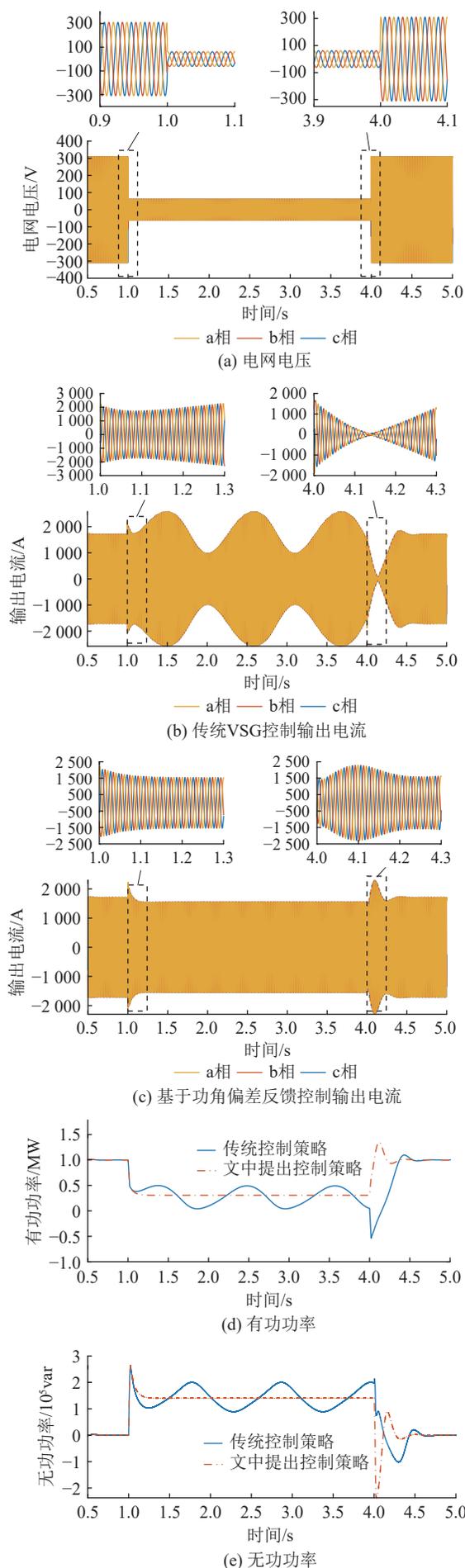


图7 电网电压跌落80%时, 构网型储能系统各参数的仿真结果

Fig.7 Grid-forming energy storage simulation results of various parameters with 80% voltage drop in the grid

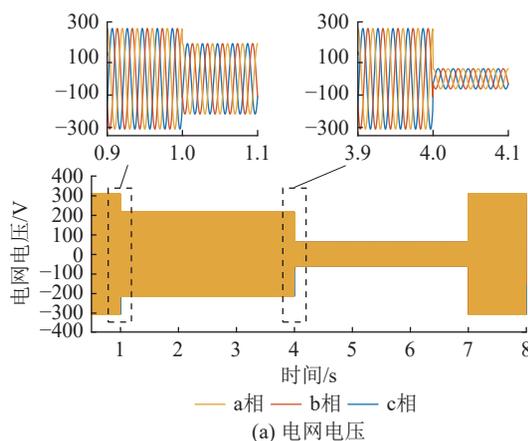
定电流的1.66倍, 可能导致线路触发保护机制, 影响系统的稳定运行, 并且当系统在4s时切除故障后, 输出有功功率会急剧下降至0以下, 可能引发脱网现象, 对新型电力系统的稳定运行产生较大的影响。

从图7(c)、(d)、(e)、(f)可以看出, 引入功角偏差反馈策略后, 相较于传统控制, 即使在暂态期间没有平衡点, 功角也不会发生振荡, 功角在暂态期间保持稳定, 扰动切除后, 输出有功功率波动后恢复正常, 输出电流得到了明显抑制并在暂态期间保持稳定。此时, 系统没有失稳, 故障切除后, 有功功率恢复到有功功率参考值, 系统恢复到稳定运行状态, 与上述II型故障理论分析一致。

4.3 电网电压三相对称的从30%连续跌落到80%

当构网型储能发生连续故障穿越时, 系统达到稳定后, 在1s时发生故障, 电网电压三相对称跌落30%。随后, 系统在4s时电网电压连续跌落至80%, 构网型储能系统电网电压、输出电流、有功功率、无功功率、功角的仿真结果, 如图8所示。

根据图8可知, 基于功角偏差反馈控制在构网型储能连续电压扰动下能够很好的保持功角稳定, 并且抑制过电流, 保证构网型储能并网稳定运行。故障切除后, 构网型储能恢复稳定运行, 与第3章理论分析一致, 验证了文中提出控制策略的有效性。



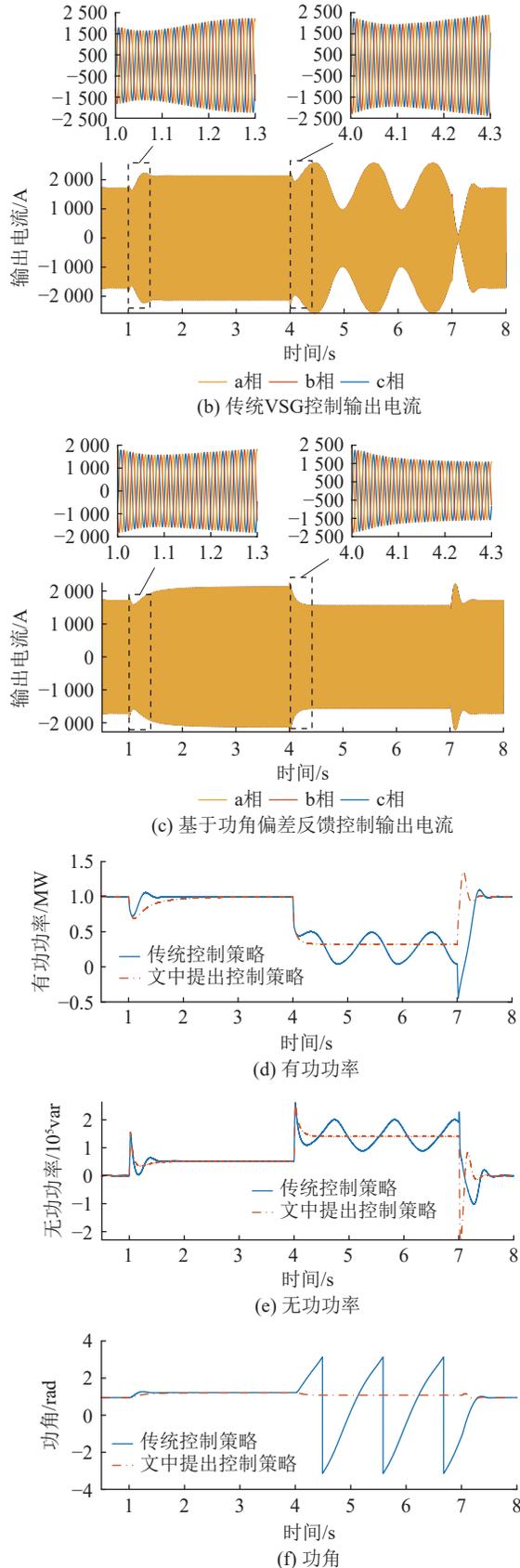


图8 电网电压从30%连续跌落到80%时, 构网型储能系统各参数的仿真结果

Fig.8 Grid-forming energy storage simulation results of various parameters with continuous voltage drop in the grid from 80% to 30%

5 结论

文中针对以新能源为主体的新型电力系统中, 因构网型储能在电网发生大扰动时暂态功角难以稳定问题, 提出了基于功角偏差反馈的暂态功角稳定策略, 并通过理论分析和仿真验证得出以下结论:

(1) 通过对构网型储能在交流侧并网的 $P-\delta$ 曲线分析可知, 输出有功功率偏差是导致功角失稳的根本原因。因此, 在暂态期间缩小有功功率偏差能够有效控制 VSG 的暂态功角稳定。

(2) 基于功角失稳的根本原因, 文中在 VSG 有功环中引入了功角偏差反馈的控制策略。该策略在暂态期间有效维持了功角稳定, 成功解决了传统 VSG 在暂态期间功角失稳的问题, 从而增强了构网型储能系统在复杂工况下的适应能力。

(3) 在电网电压发生大扰动而引起的电网电压跌落情况下, 构网型储能系统均能保持暂态功角稳定, 显著提升了其抗干扰能力和暂态功角稳定性。这使得构网型储能在暂态期间能够稳定并网运行, 符合 GB/T 36547—2024《电化学储能电站接入电网技术规定》的国家标准。文中研究成果对构网型储能在新能源场景下的工程建设具有重要的参考意义, 并为构网型储能变流器的稳定与控制提供了理论依据。

致谢

本文得到中国三峡新能源(集团)股份有限公司项目(15031399)和内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2023YFHH0077)资助, 谨此致谢!

参考文献

- [1] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [2] 翟绘景, 高梓淳, 李文静, 等. 计及网损和相关性的新型电力系统概率碳排放流计算[J]. 供用电, 2024, 41(7): 84-91.
ZHAI Huijing, GAO Zichun, LI Wenjing, et al. Calculation of probabilistic carbon emission flow in a new power system considering network losses and correlation[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 84-91.
- [3] 何鑫, 刘翠, 李芸. 不同运行方式的大规模新能源接入电网后的调频特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 168-176, 186.
HE Xin, LIU Cui, LI Yun. Study on frequency regulation characteristics of power grids after large-scale new energy integra-

- tion under different operation modes[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 168-176, 186.
- [4] 贾文杰,唐早,曾平良,等.基于鲁棒模型预测控制的火电储联合系统调频优化策略[J].*电测与仪表*, 2023, 60(12): 27-35.
JIA Wenjie, TANG Zao, ZENG Pingliang, et al. Frequency regulation optimization strategy for wind-thermal-storage joint system based on robust model predictive control[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 27-35.
- [5] 李建林,卢冠铭,游洪灏,等.基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略研究[J].*电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 142-154.
LI Jianlin, LU Guanming, YOU Honghao, et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 142-154.
- [6] 阮亮,王杨,肖先勇,等.跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J].*智慧电力*, 2024, 52(7): 103-110.
RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. *Smart Power*, 2024, 52(7): 103-110.
- [7] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].*中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [8] 许洁翊,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].*电网技术*, 2022, 46(9): 3586-3595.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [9] 吴家杰,陈新,张东辉,等.构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J].*中国电机工程学报*, 2024, 44(23): 9341-9354.
WU Jiajie, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. Grid-connected stability analysis and improvement strategy for grid-forming energy storage system in new energy access scene[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(23): 9341-9354.
- [10] 方正,黄云辉,严文博,等.构网型变流器功率同步控制稳定性机理分析[J].*电力系统自动化*, 2024, 48(19): 101-108.
FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Stability mechanism analysis of power synchronization control for grid-forming converters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(19): 101-108.
- [11] 杨松浩,李秉芳,赵天骐,等.新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J].*电力系统自动化*, 2023, 47(3): 12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(3): 12-18.
- [12] XIONG X L, WU C, BLAABJERG F. An improved synchronization stability method of virtual synchronous generators based on frequency feedforward on reactive power control loop[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 9136-9148.
- [13] 涂春鸣,杨万里,肖凡,等.考虑故障限流的 VSG 暂态功角稳定控制方法[J].*电力自动化设备*, 2023, 43(9): 55-62, 94.
TU Chunming, YANG Wanli, XIAO Fan, et al. Transient power angle stability control method of VSG considering fault current limitation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 55-62, 94.
- [14] 王盼宝,王鹏,李坤光,等.电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J].*高压技术*, 2022, 48(10): 3829-3837.
WANG Panbao, WANG Peng, LI Shenguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 3829-3837.
- [15] XIONG L S, LIU X K, ZHAO C Y, et al. A fast and robust real-time detection algorithm of decaying DC transient and harmonic components in three-phase systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 3332-3336.
- [16] YU Y, CHAUDHARY S K, TINAJERO G D A, et al. A reference-feedforward-based damping method for virtual synchronous generator control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(7): 7566-7571.
- [17] 张余余,赵晋斌,李芬,等.基于功角动态补偿的 VSG 故障穿越方法研究[J].*电网技术*, 2021, 45(9): 3667-3673.
ZHANG Yuyu, ZHAO Jinbin, LI Fen, et al. VSG fault crossing method based on dynamic compensation of power angle[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3667-3673.
- [18] 李清辉,葛平娟,肖凡,等.基于功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法研究[J].*中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Study on fault ride-through method of VSG based on power angle and current flexible regulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.
- [19] CHENG H J, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [20] 张宇,张琛,蔡旭,等.虚拟同步机电流受限暂态电压支撑机理与改进故障穿越控制研究[J].*中国电机工程学报*, 2024, 44(15): 5996-6010.
ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Current-constrained transient voltage response analysis and an improved fault-ride through control of the virtual synchronous generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(15): 5996-6010.
- [21] DENG H, QI Y, FANG J Y, et al. A robust low-voltage-ride-through strategy for grid-forming converters based on reactive power synchronization[J]. *IEEE Transactions on Power Elec-*

- tronics, 2023, 38(1): 346-357.
- [22] LIU T, WANG X F, LIU F C, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(4): 4751-4763.
- [23] QORIA T, GRUSON F, COLAS F, et al. Critical clearing time determination and enhancement of grid-forming converters embedding virtual impedance as current limitation algorithm[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1050-1061.
- [24] 贺彬, 任永峰, 孟庆天, 等. 基于构网型储能双虚拟电机控制的风电制氢系统[J/OL]. *高电压技术*: 1-13[2024-08-10]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240212>.
HE Bin, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Hydrogen production system by wind power based on dual virtual motor control for grid-forming energy storage[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1-13[2024-08-10]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240212>.
- [25] 杜毅, 郑超, 孙华东. 构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3753-3766.
DU Yi, ZHENG Chao, SUN Huadong. Transient stability mechanism analysis of the grid forming voltage source converter and the improved limiting method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3753-3766.
- [26] 陈建, 任永峰, 孟庆天, 等. 含 UDE 附加阻尼支路的构网型直驱永磁同步风电机组次同步振荡抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(7): 1985-2000.
CHEN Jian, REN Yongfeng, MENG Qingtian, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for grid-forming direct-drive permanent magnet synchronous generator with uncertainty and disturbance estimator supplementary damping branch[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 1985-2000.
- [27] 张赞宁, 谢永辉, 张磊, 等. 自适应调节有功功率偏差的虚拟同步发电机暂态控制策略[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(8): 104-114.
ZHANG Yunning, XIE Yonghui, ZHANG Lei, et al. Transient control strategy of virtual synchronous generator with adaptive regulation of active power deviation[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(8): 104-114.

作者简介:



孙压宁

孙压宁(2000), 男, 硕士, 研究方向为新型电力系统、先进储能技术(E-mail: 821353243@qq.com);

任永峰(1971), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为新型电力系统运行与控制、新能源发电、氢能与储能技术;

王欢(1982), 男, 学士, 工程师, 从事新能源工程建设管理工作。

Improvement method for grid-forming energy storage power angle stabilization in transient state based on power angle deviation feedback

SUN Yaning¹, REN Yongfeng¹, WANG Huan², LI Chao², GUO Xiao², CHEN Lei²

(1. School of Energy and Power Engineering Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. China Three Gorges New Energy (Group) Co., Ltd. Construction Management Branch, Beijing 101100, China)

Abstract: For grid-forming energy storage integrated into power systems dominated by new energy, voltage drops in the grid are caused by the instability of new energy generation. Leading to transient power angle instability and overcurrent issues in grid-forming energy storage. A transient power angle stability control strategy based on power angle deviation feedback is proposed in the article. Firstly, grid-forming energy storage adopts virtual synchronous generator (VSG) control, and a corresponding model is established based on VSG control. Secondly, the relationship between active power, power angle stability, and output current is analyzed based on VSG power angle characteristics, and the causes of power angle instability are further analyzed using phase portrait theory. Based on this, an adaptive adjustment strategy for the power angle deviation feedback coefficient is designed, considering the power angle stability range and active power deviation. The active power deviation is controlled through power angle deviation feedback, thereby suppressing power angle amplification, maintaining power angle stability, and effectively mitigating overcurrent. Finally, time-domain simulations verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: grid-forming energy storage; virtual synchronous generator (VSG); transient power angle stability; power angle deviation feedback; voltage dips; power angle instability

(编辑 吴昊)