

引用格式:刘瑞平,袁亮,胡铭欣,等.含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):152-161.

Citation: LIU Ruiping, YUAN Liang, HU Mingxin, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 152-161.

含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态 稳定性提升策略

刘瑞平,袁亮,胡铭欣,韩华,刘绪斌

(中南大学自动化学院,湖南长沙 410083)

摘要: 构网型新能源发电单元能为孤立电网提供惯量支撑,但在故障时存在暂态稳定性问题。为解决此问题,研究了构网型新能源发电单元无功外环对孤立电网暂态稳定性的影响机理并提出相应的致稳策略。首先,采用李雅普诺夫直接法探究构网型新能源发电单元输出端电压的稳定边界;其次,提出一种基于输出端电压稳定边界的自适应下垂系数的综合控制策略,该策略不仅能够维持系统功角稳定,还能限制故障电流,而且在保证逆变器安全的同时,可提升系统的暂态稳定性;最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建电磁暂态仿真,仿真结果验证了理论分析的正确性以及所提暂态稳定性提升策略的有效性。

关键词: 孤立电网;构网型;暂态稳定性;李雅普诺夫直接法;下垂系数

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.016 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2024)06-0152-10

A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units

LIU Ruiping, YUAN Liang, HU Mingxin, HAN Hua, LIU Xubin

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The grid-forming-based renewable energy power generation units can provide inertial support to isolated power grids, but they face transient stability issues when faults occur. To address this issue, the impact mechanism of the reactive power outer loop of the grid-forming-based renewable energy power generation units on the transient stability of isolated power grids is studied, and corresponding stability improvement strategies are proposed. Firstly, the Lyapunov direct method is employed to explore the stability boundaries of the output-end voltage of the grid-forming-based renewable energy power generation units. Secondly, a comprehensive control strategy with an adaptive droop coefficient based on the stability boundaries of the output-end voltage is proposed. This strategy not only maintains system power angle stability but also limits fault currents. It enhances the transient stability of the system while ensuring the safety of inverters. Finally, electromagnetic transient simulations are conducted by using MATLAB/Simulink, which validate the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed transient stability improvement strategy.

Key words: isolated power grid; grid-forming; transient stability; Lyapunov direct method; droop coefficient

随着新能源发电、半导体材料以及控制技术的快速发展^[1],新一轮能源革命正在进行。电力系统逐步呈现出高比例新能源的特性。高比例新能源具有强间歇性、波动性、不确定性等,其并网接入需

要电源侧和负荷侧的双向调整,对新型电力系统提出了电力电量平衡、高灵活性的新要求^[2]。另一方面,随着对环境保护的重视和新能源发电技术的广泛应用,利用新能源发电单元作为电源构建孤立电

收稿日期:2023-09-30;修回日期:2023-11-14

基金项目:国家自然科学基金(52307156);长沙市自然科学基金(kq2208279)

通信作者:袁亮(1994—),男,博士,讲师,主要从事新能源并网控制、负荷/新能源预测等研究;E-mail:liang.yuan@csu.edu.cn

网是解决这些地区供电问题的有效途径^[3-4]。

目前,针对构网型新能源发电单元,已经有学者从小信号分析^[5-9]、并网系统控制策略^[10-16]、故障限流^[17-20]等方面进行了大量理论研究。在暂态稳定性方面,研究内容主要分为功角稳定和频率稳定,集中研究外环特性,通过优化外环的动态响应,提高系统暂态稳定性。针对有功控制环,现有研究从保证平衡点的存在性、控制切换和改变控制结构参数等方面提高系统的暂态稳定性。文献[21-22]考虑降低变换器在故障下失去平衡点的风险,采用降低有功功率基准、增加有功环路前馈和限流模式下改变同步策略等方法提高系统的暂态稳定性。文献[23]进行了面向设计的分析,研究了下垂控制对变换器暂态稳定性的影响,以提高构网型变换器在严重电网故障期间的暂态稳定性。无功控制环的设计同样会对系统暂态稳定性存在影响^[21],文献[24]以虚拟同步发电机为研究对象,揭示了无功环路中使用低通滤波器(low pass filter, LPF)提高同步稳定性的潜在机制,并提出了一种将虚拟同步发电机和电网之间的频率差前馈到无功环路中的改进同步稳定性方法。文献[25]研究了构网型变换器的 4 种典型并网控制方案,引入了一个考虑有功、无功回路间交叉耦合的通用大信号模型,通过相平面法揭示了不稳定机制,并提出了下垂系增益和 LPF 中虚拟惯量的设计准则,以提高系统阻尼和暂态稳定性。然而,上述文献的研究对象均为单机接入无穷大系统,难以直接应用于含构网型新能源发电单元的孤立电网中。

在现有的面向高渗透率大规模新能源发电接入孤立电网研究中,文献[3]提出一种包含上层广域功率平衡控制和下层储能设备 V/f 控制的风电-储能系统孤立电网控制策略。文献[26]根据海水

淡化的负荷特性及风电的运行特性,提出风电、储能与海水淡化装置的容量配置方案以及孤立微电网协调运行的控制策略。文献[27]提出了考虑稳态频率约束的系统最大可调用容量的概念,建立了考虑稳态频率约束的机组组合优化模型。上述研究均涉及含高比例新能源的孤立电网的控制策略,考虑了在诸多约束下的协调控制稳态,但是对孤立电网中发生大扰动后的失稳机理和暂态致稳策略研究较少,鲜有文章涉及在孤立电网中构网型新能源发电单元交流侧的底层控制策略。

针对上述问题,本文着重分析无功-电压外环控制对孤立电网暂态稳定性的恶化机理,并用李雅普诺夫函数探究构网型新能源发电单元输出端电压的稳定边界,提出一种基于输出端电压稳定边界的自适应下垂系数的含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升综合控制策略。仿真结果证明了所提控制策略能够使系统在孤立电网发生严重电压跌落故障时,依然能够维持暂态稳定和频率稳定,提高了孤立电网整体的暂态稳定性。

1 孤立微电网系统拓扑结构

1.1 含构网型新能源发电单元的孤立微电网拓扑

构网型新能源发电单元直流侧可以由风电、光伏等新能源设备提供。在实际生产中,一般在直流侧添加一个由前端转换器控制的大电容器或者由储能转换器调节的储能器件,因此分析其在孤立电网中的暂态稳定性时,直流侧电压 u_{dc} 可以被假设为恒定值,并设置滤波器实现滤波,于公共耦合点(point of common coupling, PCC)处接入孤立微电网汇流母线。

构网型新能源发电单元的控制结构如图 1 所示,主要分为以下部分:采样环节、功率控制外环、

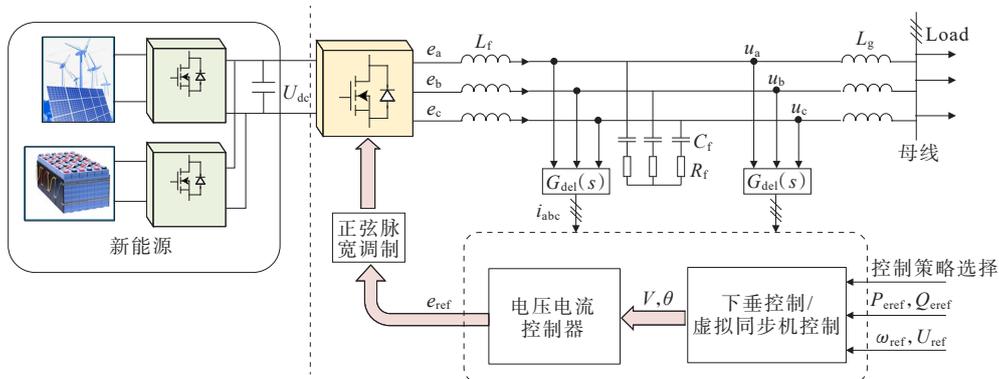


图 1 系统拓扑结构框图

Figure 1 Block diagram of system topology

电压电流双闭环及脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)发生器。其中,采样环节的数据以开关周期为基准实时更新,以获取变换器输出功率、电压、电流及相位数据。

直流信号经过三相全桥DC-AC变换器转换成交流信号,并经LC滤波后向交流侧输出的PCC处接入孤立电网汇流母线 L_f 、 C_f 分别为滤波电感和滤波电容, L_g 为接入电网的等值线路电感。功率外环控制通过对功率进行调节,输出电压幅值给定信号和电压相位给定值,即变换器的励磁电势,也称为输出内电势。进一步,经过变换器的滤波电感和寄生电阻,得到作为电压电流内环控制的电压输出给定值。最后,电压电流双闭环输出的调制信号经PWM发生器生成触发信号输入到三相全桥变换器中,从而实现一个完整的构网型新能源发电单元控制环节。

1.2 孤立电网的数学模型

构网型新能源发电单元常采用虚拟同步机控制和无功-电压下垂控制作为功率外环控制,有功控制环通过模拟同步发电机的外特性,为系统提供虚拟惯量并实现同步,无功控制环通过下垂控制进行电压的调整。本节将构建其适用于暂态同步稳定分析的暂态数学模型。

1.2.1 机械部分与有功-频率控制部分

构网型新能源发电单元模拟同步发电机转子运动方程的阻尼和惯量特性,其数学模型为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中, J 、 D_p 分别为虚拟转动惯量和有功控制环阻尼系数; θ 为构网型新能源发电单元同步角; ω 为同步角速度; ω_0 为参考角速度; T_e 为变换器输出电磁转矩,可由 $T_e = P_e/\omega$ 求得, P_e 为输出有功功率; T_m 为机械转矩,也称为参考转矩,由 $T_m = P_m/\omega$ 求得。其中 P_m 为机械功率,也称为调速环(有功-频率控制环)输出的参考有功功率,为实现有功负荷均分,有功-频率控制一般采用下垂控制的形式,可得 P_m 如下:

$$P_m = P_0 - K_p(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式中, P_0 为有功功率参考值; K_p 为有功环下垂系数。

结合式(1)、(2),可得变换器有功环数学模型:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_0 - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

式中, $T_0 = P_0/\omega_0$,且 $D = D_p + K_p/\omega_0$, D 为等值阻尼系数。其机械与有功-频率部分控制框图如图2所示。

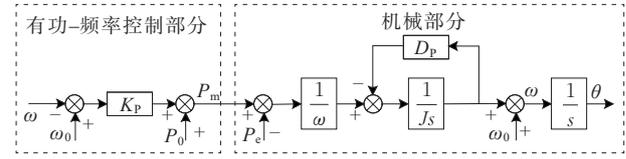


图2 机械与有功-频率控制部分框图

Figure 2 Active power-frequency control and mechanical section

1.2.2 电磁部分与无功-电压控制部分

构网型新能源发电单元中虚拟同步发电机控制策略的电磁部分主要模拟同步发电机定子电路的电压电流关系,其具体实现方式如下:

$$L_f \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - R_f i_{abc} \quad (4)$$

式中, $e_{abc} = [e_a, e_b, e_c]$ 为三相定子感应电动势; $u_{abc} = [u_a, u_b, u_c]$ 为发电机端口三相电压; $i_{abc} = [i_a, i_b, i_c]$ 为三相定子电流; L_f 、 R_f 分别为定子电阻和电感值,对应变换器的滤波电感和寄生电阻。

为模拟同步发电机的励磁调压功能并实现无功均分,无功-电压调压器采取以下控制形式:

$$K \frac{dE}{dt} = Q_0 - Q - D_q(U - U_N) \quad (5)$$

式中, K 为积分系数; E 为输出内电势幅值; D_q 为无功环下垂系数; Q_0 、 U_N 分别为无功功率参考值和电压参考值; Q 、 U 分别为无功功率和电压输出值。其无功-电压控制部分与电磁部分控制框图如图3。

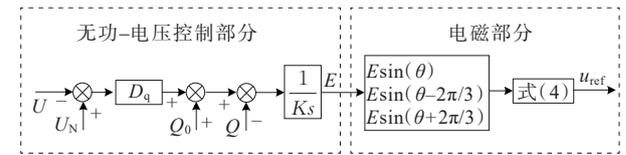


图3 无功-电压控制部分与电磁部分框图

Figure 3 Reactive power-voltage control and electromagnetic section

根据系统拓扑,可得构网型新能源发电单元的输出有功、无功功率如下:

$$P = 3 \cdot \frac{RU^2 - RU_p U \cos \delta + XU_p U \sin \delta}{R^2 + X^2} \quad (6)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{XU^2 - RU_p U \sin \delta - XU_p U \cos \delta}{R^2 + X^2} \quad (7)$$

式中, U_p 为母线电压; δ 为功角,即构网型新能源发电单元与电网之间的相角差; R 、 x 分别为发电单元与母线之间的等值电抗和等值电阻值。

为简化分析,本文忽略线路电阻 $R=0$,整个线路阻抗呈感性,结合式(3)、(5)、(6)可得简化后的数学模型为

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_0 - \frac{UU_p \sin \delta}{X} - D(\omega - \omega_0) \quad (8)$$

$$0 = Q_0 - \frac{U^2 - U_p U \cos \delta}{X} - D_q(U - U_N) \quad (9)$$

2 暂态失稳机理分析

输出电压为恒定值 U 情况下构网型新能源发电单元的失稳机理如下。当不考虑无功-电压环动态时,等值电压源的幅值 U 为恒定值,功角曲线如图4(a)所示。当微电网母线出现电压跌落时,若存在稳定平衡点 A 和不稳定平衡点 B ,构网型新能源发电单元功角曲线由 P_0 变为 P_1 ,其输出有功功率与给定的参考有功功率存在不平衡,加速功率 $P_{ref} - P_e$ 大于零,导致功角增加。在 C 点处孤立微电网清除故障,此时的功角不超过 D 处的最大故障切除角,母线电压恢复,功角曲线由 P_1 变回到 P_0 。此时,参考有功功率小于输出有功功率,角速度减小,但此时变换器角速度仍会大于额定角速度,导致功角仍会增加。若减速面积 S_2 足够, δ 不会越过平衡点 B ,系统稳定;若加速面积 S_1 过小,系统不稳定。

如图4(b)所示,若不存在稳定平衡点,构网型新能源发电单元输出有功-功角曲线由 P_0 变为 P_{II} ,此时其输出有功功率与给定的参考有功功率存在不平衡,加速功率 $P_{ref} - P_e$ 大于零,导致功角增加。在 C 点处电网清除故障,此时的功角为 δ_c ,电网电压恢复,构网型新能源发电单元功角曲线由 P_{II} 变为 P_0 。此时,参考有功功率小于输出有功功率,角速度减小,但此时变换器角速度仍会大于额定角速度,导致功角仍会增加。当额定角速度与角速度相等时,功角达到最大值 δ_{max} ,满足 $S_1 = S_2$ 。此时需要判定最大功角与不稳定平衡点的大小关系,若 $\delta_{max} < \delta_c$,系统能够达到稳定状态;反之,则系统失稳。

根据式(9)可知,当母线电压跌落时,功角 δ 增加将导致输出无功功率增加。根据式(5)可知无功环的下垂特性,即输出无功功率增加,无功环输出给内环的指令电压幅值减小,导致变换器输出端电压减小,从而减小了输出有功功率,使得故障期间参考有功功率和变换器输出有功功率差值更大,功率不平衡加剧,在功角曲线对应的加速面积 S_1 增加。当孤立微电网清除故障后,母线电压不能立刻恢复至额定值,导致故障清除后变换器的功角曲线

下降,使得参考有功功率和变换器输出有功功率差值减小,在功角曲线对应的减速面积 S_2 减小。

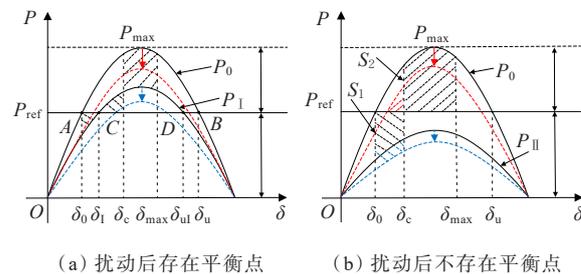


图4 功角曲线

Figure 4 Power angle curve

因此,针对相同的初始稳定平衡点,考虑无功-电压下垂控制后,暂态过程中加速面积的增加和故障切除后减速面积的减小,将会导致在故障切除时间相同的情况下,孤立微电网清除故障后的最大功角 δ_{max} 增加,其值更容易超过不稳定平衡点 δ_u 的值,从而减小了构网型新能源发电单元在暂态过程中的稳定裕度,恶化了含构网型新能源发电单元的孤立微电网系统的暂态稳定性。

3 控制策略

3.1 输出端电压稳定边界

由于已经建立了在孤立微电网中构网型新能源发电单元适用于暂态同步稳定分析的暂态数学模型,因此,根据式(8),此时二阶转子方程可写为

$$J \frac{d(\omega - \omega_g)}{dt} = P_0 - \frac{3UU_p}{|Z|} \sin \delta - D(\omega - \omega_g) \quad (10)$$

通过对式(10)进行首次积分,不考虑阻尼,构建的能量函数可写为

$$V = \int_0^{\Delta\omega} (J\Delta\omega) d\Delta\omega - \int_{\delta_s}^{\delta} \left(P_0 - \frac{3UU_p}{X} \sin \delta \right) d\delta = \frac{1}{2} J\Delta\omega^2 - P_0(\delta - \delta_s) - \frac{3UU_p}{X} (\cos \delta - \cos \delta_s) \quad (11)$$

为了进一步分析无功-电压功率外环下垂控制对系统暂态稳定性的影响。在上述定性分析的基础上,对该无功环进行定量分析。无功-电压下垂环输出的是变换器的输出内电势 E ,由式(4)可知其与输出端电压指令值 U_{ref} 相关。由于电压电流双闭环具有良好的动态响应,可以认为输出电压 $U \approx U_{ref}$ 。因此,从输出端电压 U 入手,对系统的机电暂态进行分析,界定在暂态过程中输出端电压 U 的最佳变化范围,逆向求解无功-电压下垂环中各状态

变量和参数变量对系统的影响,从而满足整个系统对暂态稳定性的要求。特别需要强调的是,此处讨论的情况是大扰动后存在稳定平衡点的情况。

由图4可知,当孤立微电网母线电压跌落,构网型新能源发电单元的输出端电压指令值下降,其功角曲线从 P_0 变为 P_1 。在电压跌落前,系统的平衡点为 $(\delta_0, 0)$,临界点为 δ_c ,即 $(\pi - \delta_0, 0)$ 。电压跌落,系统仍存在新的平衡点 $(\delta_1, 0)$ 和临界点 δ_{c1} ,即 $(\pi - \delta_1, 0)$ 。其中,功角曲线峰值左侧的平衡点为稳定平衡点,右侧的平衡点为最大临界点。

基于式(8),稳定平衡点处的功角为

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{P_0 X}{3UU_p}\right) \quad (12)$$

为了确保平衡点的存在性,稳定平衡点处的功角必须满足:

$$0 < \delta_0 < \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

结合式(12)、(13),考虑在电压跌落时对变换器输出端电压指令值的影响,可以得到大扰动期间平衡点存在时输出端电压的边界为

$$\frac{P_0 X}{3U_{\text{sag}}} < U \quad (14)$$

式中, U_{sag} 为发生大扰动后的母线跌落电压。

基于李雅普诺夫法,系统在平衡点处的渐近稳定满足以下条件^[14]:

$$V(x_0) < V_{\text{cr}} \quad (15)$$

式中, V_{cr} 为临界能量。

因此,在大扰动情况下,将故障前的初始平衡点 $(\delta_0, 0)$ 代入式,可以获得初始能量 $V(x_0)$:

$$V(\delta_0, 0) = -P_0(\delta_0 - \delta_1) - \frac{3UU_{\text{sag}}}{X}(\cos \delta_0 - \cos \delta_1) \quad (16)$$

需要强调的是,大扰动发生后,系统状态变量发生改变,李雅普诺夫能量函数随之改变,此时系统中存在的平衡点为 $(\delta_1, 0)$,此时的 $(\delta_0, 0)$ 只是当前系统运行状态下的起始点。同样地,将临界点 $(\pi - \delta_1, 0)$ 代入式(15),可以得出临界能量 V_{cr} :

$$V_{\text{cr}} = V(\pi - \delta_1, 0) = -P_0(\pi - 2\delta_1) + \frac{6UU_{\text{sag}}}{X} \cos \delta_1 \quad (17)$$

根据式(15)描述的李雅普诺夫稳定性准则,构网型新能源发电单元输出端电压的边界为

$$P_0 X(-\pi + \delta_0 + \delta_1) + 3UU_{\text{sag}}(\cos \delta_1 + \cos \delta_0) > 0 \quad (18)$$

式中, δ_0, δ_1 可以通过式(12)计算得出。

同时,需要考虑在故障清除后系统是否能稳定运行。换句话说,当母线电压恢复到正常水平时,平衡点应该依然存在。类似式(14),扰动清除后,根据平衡点的存在性条件,可得出输出端电压指令值如下:

$$\frac{P_0 X}{3U_p} < U \quad (19)$$

综上所述,结合式(14)、(18)、(19)可得基于李雅普诺夫法对输出端电压稳定边界的定量分析。

3.2 综合策略

构网型新能源发电单元采用虚拟同步机控制策略,其暂态同步失稳的本质是输出有功功率与参考有功功率的不平衡。因此,本节在调节参考有功功率的基础上进一步调节无功外环,实现输出有功功率与参考有功功率的平衡从而提高系统的暂态稳定性。

在孤立微电网母线电压发生跌落前后,母线电压分别为 U_{p0} 和 U_{pF} ,构网型新能源发电单元输出端电压分别为 U_0 和 U_F ,功角分别为 δ_0 和 δ_F 。故障前后变换器输出有功功率比值为

$$M = \frac{P_{eF}}{P_{e0}} = \frac{3U_F U_{pF} \frac{\sin \delta_F}{X_g}}{3U_0 U_{p0} \frac{\sin \delta_0}{X_g}} \quad (20)$$

式中, P_{e0} 和 P_{eF} 分别为构网型新能源发电单元故障前后输出的有功功率。

从功角稳定的视角来看,为实现功角暂态稳定,以故障前后功角不发生变化为控制目标^[17,28],即保证 $\delta_F = \delta_0$ 。此时式(20)可表示为

$$M = \frac{P_{eF}}{P_{e0}} = \frac{3U_F U_{pF} \frac{\sin \delta_F}{X_g}}{3U_0 U_{p0} \frac{\sin \delta_0}{X_g}} = \frac{U_F U_{pF}}{U_0 U_{p0}} \quad (21)$$

暂态功角控制可以通过调整参考有功功率实现。可得调整后的参考有功功率如下:

$$P_{\text{ref}} = MP_{e0} = \frac{U_F U_{pF}}{U_0 U_{p0}} P_{e0} \quad (22)$$

该方法可以有效保证故障期间构网型变换器功角的稳定,在电压跌落,功角能够迅速恢复到稳定值。因此,结合式(9)可以确定在功角稳定的情况下 U 是 D_q 的唯一映射。可以通过无功-电压外环下垂系数自适应调整的方法来控制变换器输出端电压在期望范围内,从而提高系统的暂态稳定性。

虽然本文在第一类扰动期间未给出确切的解析表达式来计算 U 的数值,但在实际情况中往往可

以通过上述 D_q 的设计参考标准提前制表,采取查表法来简单快速确认 D_q 的值,这样也能保证更快响应工程需求。因此,在实际情况下,当发生大扰动时,变换器可以通过查找预制的参数表来自动选择所需的 D_q 参数。

本文所提出的综合控制策略流程如图5所示。在正常运行状态下,设置常规的 D_q 和 P_{ref} 。运行过程中,由监测系统对电网电压进行监测,若发生大扰动(孤立微电网母线电压跌落),且电压跌落达到阈值时,进入暂态功角控制环节,通过在有功功率外环中调整参考有功功率进而保证功角稳定性。同时,为进一步保证系统的稳定,在输出电压控制中,控制器查表改变 D_q 的值,通过无功-电压环路的优化设计,让输出电压满足约束条件,保证系统的安全稳定运行。

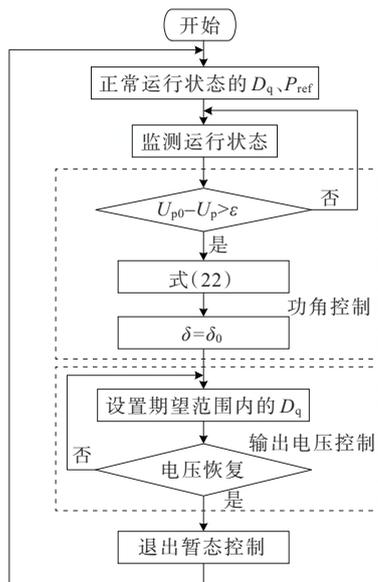


图5 综合控制策略流程

Figure 5 Flow chart of comprehensive control strategy

综上所述,与传统控制策略相比,本控制策略在发生大扰动期间,通过调整参考有功功率和自适应调整无功下垂系数,在保证功率外环发挥作用,实现输出电压指令幅值和相角实时调整的同时,能够进一步提高系统的暂态稳定性。

4 仿真分析

以图1所示系统为研究对象,在 Simulink 中搭建含构网型新能源发电单元的孤立微电网电磁暂态仿真模型,系统参数如表1所示。

以母线电压跌落和相位跳变2种典型工况对上述控制策略进行仿真验证。

表1 系统仿真参数

U_{dc}/V	U_{p0}/V	$C_f/\mu F$	L_f/mH	L_g/mH
1 500	380	10	4	1.2
P_0/kW	J	D_p	D_q	K
100	2	64	1 000	25

1) 仿真工况1:并网点母线电压跌落至0.8 p.u.,故障持续2 s后清除。当母线电压跌落至0.8 p.u.时,构网型新能源发电单元输出波形如图6所示,从上至下,分别对应变换器的功角、输出电压、输出电流。图6(a)为在传统虚拟同步机控制策略下的波形,图6(b)为采取无功外环下垂系数自适应综合控制策略下的波形,系统在电压跌落后均能够保持暂态稳定,且故障期电流均在允许范围内。

2) 仿真工况2:并网点母线电压跌落至0.5 p.u.,故障持续2 s后清除。当母线电压跌落至0.5 p.u.时,构网型新能源发电单元输出波形如图7所示。图7(a)为传统虚拟同步机控制策略下的输出波形,系统在电压跌落后暂态稳定,但是故障期电流增加至380 A。图7(b)为采取无功外环下垂系数自适应综合控制策略的输出波形,与传统控制策略相比,在故障期间不仅能保持功角和系统稳定,还能保证输出电流在允许范围内,在稳态时故障电流为180 A。

3) 仿真工况3:并网点母线电压跌落至0.3 p.u.,故障持续2 s后清除。当母线电压跌落至0.3 p.u.时,构网型新能源发电单元的输出波形如图8所示。图8(a)为传统虚拟同步机控制策略下的输出波形。在故障期间,功角持续增加,越过了不稳定平衡点,故在故障清除后,依然不能恢复稳态,最终导致系统失稳。图8(b)为综合控制策略下的输出波形,可以看出,功角能在故障发生后迅速稳定,故障电流始终在控制范围之内,稳定后故障电流为190 A。

4) 仿真工况4:并网点母线电压跌落至0.1 p.u.,故障持续1 s后清除。当母线电压在1 s时刻跌落至0.1 p.u.,故障持续时间为1 s,构网型新能源发电单元的输出波形如图9所示。图9(a)为传统虚拟同步机控制策略下的输出波形。故障发生后,功角迅速增加,在故障清除前越过了不稳定平衡点,导致故障清除后变换器输出电压和电流发生畸变,系统失稳。图9(b)为采取无功外环下垂系数自适应综合控制策略的输出波形,由于母线电压跌落幅值较大,功角迅速增大,但在功角控制策略下能够减少功角偏差,从而有效防止功角越过不稳定平衡点。虽然故障期间功角发生波动,但是在所提策略的控制下,依然能维持系统的暂态稳定性。此时的故障电流接近400 A,

因此面对类似的极端工况,需要额外增加电流限幅措施。

5) 仿真工况 5: 并网点母线电压相位跳变 35°,故障持续 2 s 后清除。当母线电压相位在 1 s 时

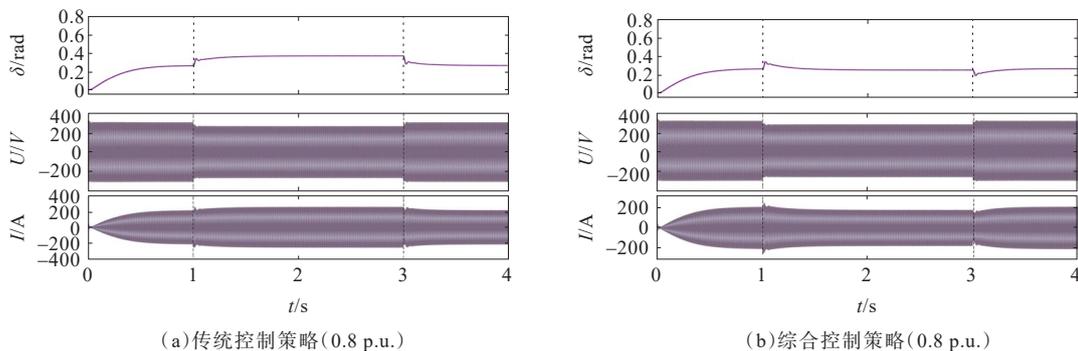


图 6 仿真工况 1

Figure 6 Simulation condition 1

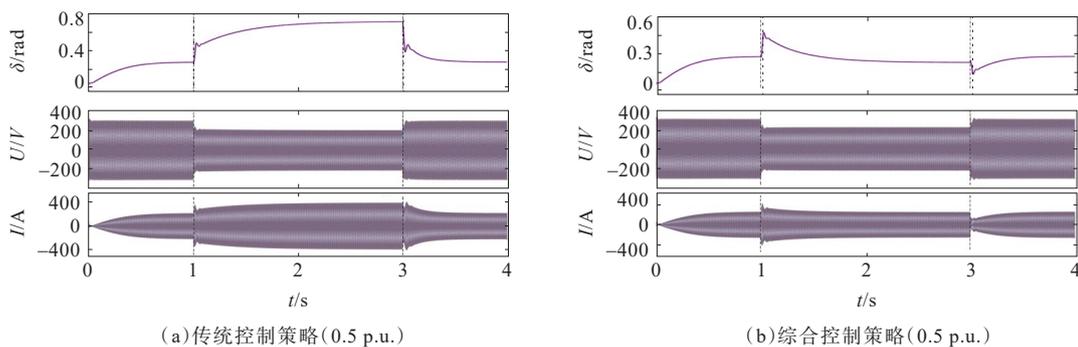


图 7 仿真工况 2

Figure 7 Simulation condition 2

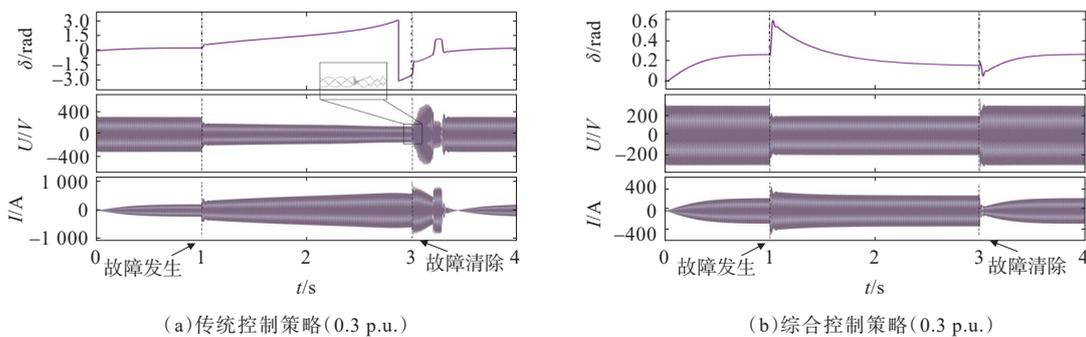


图 8 仿真工况 3

Figure 8 Simulation condition 3

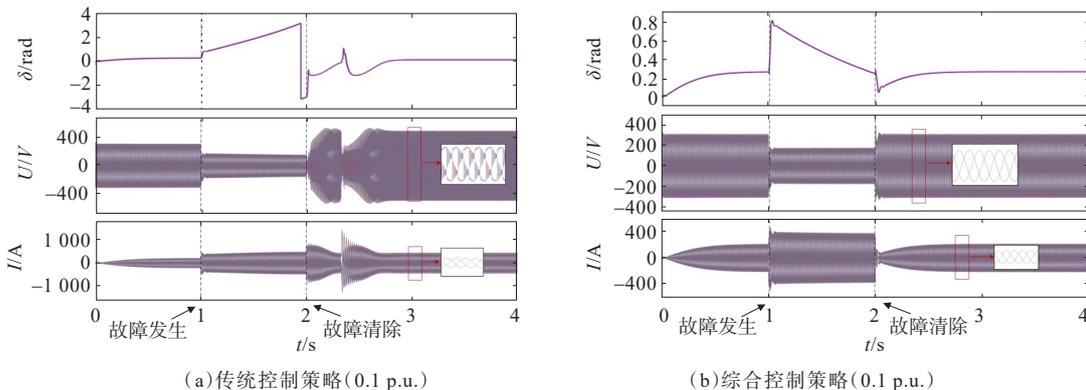


图 9 仿真工况 4

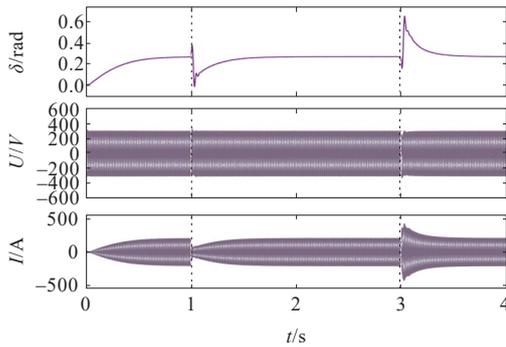
Figure 9 Simulation condition 4

发生 35°跳变,构网型新能源发电单元的输出波形如图 10 所示。图 10(a)为传统虚拟同步机控制策略下的输出波形。故障发生和清除时,功角发生大幅摆动,由于虚拟同步机的惯性,在 35°跳变的情况下,系统依然能保持稳定。图 10(b)为采取无功外环下垂系数自适应综合控制策略的输出波形,故障期间功角基本稳定,所提策略能够保证系统的暂态稳定性。

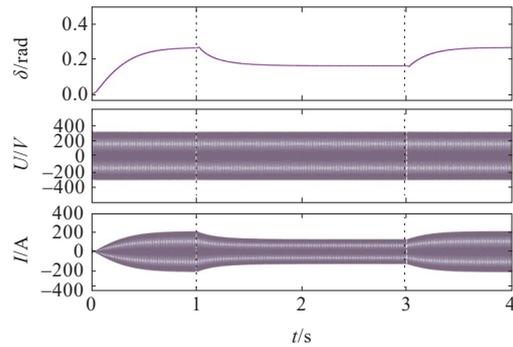
6) 仿真工况 6:并网点母线电压相位跳变 85°,故障持续 2 s 后清除。当母线电压相位在 1 s 时发生 85°跳变,构网型新能源发电单元的输出波形如

图 11 所示。图 11(a)为传统虚拟同步机控制策略下的输出波形。故障清除后,功角增大越过不稳定平衡点,传统控制策略下系统发生振荡,最终系统失稳。如图 11(b)所示,在所提综合控制策略下,基本保持功角稳定,所提策略能够保证系统的暂态稳定性。

图 12 为传统虚拟同步机控制策略下在最大切除角处切除故障的输出波形。此时在工况 3、4 中,传统虚拟同步机控制策略下的系统均能在故障切除后维持稳定。因此能进一步证明,所提控制策略在功角控制和维持系统暂态稳定性方面的优越性。



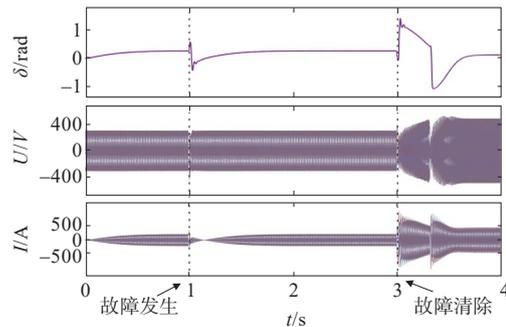
(a) 传统控制策略(35°)



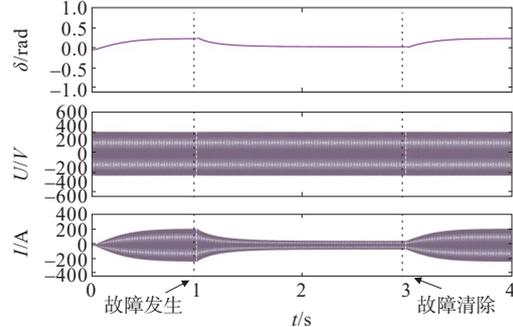
(b) 综合控制策略(35°)

图 10 仿真工况 5

Figure 10 Simulation conditon 5



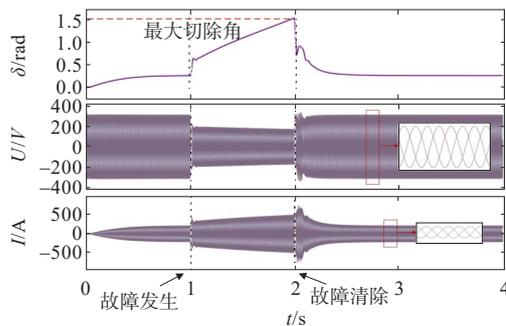
(a) 传统控制策略(85°)



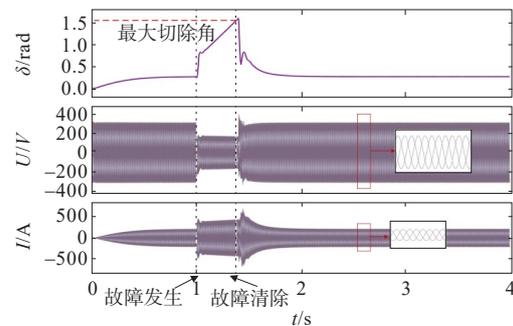
(b) 综合控制策略(85°)

图 11 仿真工况 6

Figure 11 Simulation conditon 6



(a) 传统控制策略(0.3 p.u.)



(b) 传统控制策略(0.1 p.u.)

图 12 构网型新能源发电单元仿真输出波形(母线电压跌落,最大切除角切除故障)

Figure 12 Simulated output waveforms of grid-forming-based renewable energy power generation units (bus voltage dip and clearing fault of maximum clearing angle)

综上所述,通过仿真可以验证,本文所提出的综合参考有功功率调整和无功外环下垂系数自适应调整的控制方法在电压跌落和相位跳变期间,不仅能维持系统功角稳定和暂态稳定,还能限制故障电流,在保证逆变器安全的同时,提升了系统的暂态稳定性。

5 结语

针对含有构网型新能源发电单元的孤立微电网的暂态同步稳定性问题,本文着重分析无功-电压功率外环对孤立电网暂态稳定性的影响,并采用李雅普诺夫直接法进一步探究构网型新能源发电单元输出端电压的稳定边界,由此提出孤立电网暂态稳定性提升综合控制策略,得出以下结论。

1) 在构网型新能源发电单元中,无功-电压功率外环对系统的暂态稳定性有恶化影响。

2) 通过李雅普诺夫能量函数得到的构网型新能源发电单元输出端电压的稳定边界,可以为提高系统暂态稳定性提供量的设计准则。

3) 与传统控制策略进行仿真对比,本文所提综合策略不仅能够提高系统的暂态稳定性,同时也能减小故障电流,保证系统具有更大安全稳定运行裕度。

参考文献:

- [1] 朱蜀,刘开培,秦亮,等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):3948-3962+4273.
ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system:an overview[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):3948-3962+4273.
- [2] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报,2022,42(2):515-524.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2):515-524.
- [3] 施琳,罗毅,施念,等. 高渗透率风电-储能孤立电网控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):78-85+15.
SHI Lin, LUO Yi, SHI Nian, et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):78-85+15.
- [4] 李群,张宁宇,王新宝,等. 电力潮流灵活控制技术应用综述[J]. 电力工程技术,2023,42(1):50-60.
LI Qun, ZHANG Ningyu, WANG Xinbao, et al. Review on application of flexible power flow control technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(1):50-60.
- [5] 刘巨,姚伟,文劲宇. 考虑PLL和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3162-3173+3371.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(11):3162-3173+3371.
- [6] 刘威,谢小荣,王衡,等. 基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(22):7212-7221.
LIU Wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7212-7221.
- [7] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Small-disturbance stability limit of a grid-connected wind farm with PMSGs in the timescale of DC voltage dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(3):2366-2379.
- [8] 曹芸凯,赵涛,朱爱华,等. 计及电网和线路阻抗的并联逆变器谐振抑制方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):188-196.
CAO Yunkai, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Resonance suppression method for parallel inverters considering the grid and line impedance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):188-196.
- [9] 钟九牧,袁旭峰,熊炜,等. 含嵌入式直流系统的柔性互联配电网小信号建模[J]. 电网与清洁能源,2023,39(4):63-75.
ZHONG Jiumu, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Small signal modeling of the flexible interconnected distribution network with embedded DC system[J]. Power System and Clean Energy,2023,39(4):63-75.
- [10] 姜卫同,胡鹏飞,尹瑞,等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):124-133.
JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(22):124-133.
- [11] LI J P, LI Y J, DU Z C, et al. Damping turning rule of virtual synchronous generator for global stability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(4):2650-2660.
- [12] LI M X, SHU S R, WANG Y, et al. Analysis and improvement of large-disturbance stability for grid-connected VSG based on output impedance optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(8): 9807-9826.
- [13] 王亚维,刘邦银,段善旭,等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(20):

- 5885-5893+6169.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(20):5885-5893+6169.
- [14] 张宇,张琛,蔡旭,等.并网变换器的暂态同步稳定性分析:稳定域估计与镇定控制[J].中国电机工程学报,2022,42(21):7871-7884.
ZHANG Yu,ZHANG Chen,CAI Xu,et al.Transient grid-synchronization stability analysis of grid-tied voltage source converters: stability region estimation and stabilization control[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(21):7871-7884.
- [15] 毕悦,方思瑞,于舒祺.含光伏并网的弱交流系统低频振荡协调控制策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):59-65.
BI Yue, FANG Sirui, YU Shuqi. Coordinated control strategy for low frequency oscillations of weak AC grid connected PV systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):59-65.
- [16] 杨本星,王伟,杨明轩,等.辅助风电并网的构网型储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):56-64.
YANG Benxing, WANG Wei, YANG Mingxuan, et al. Research on grid-forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid-connection[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(7):56-64.
- [17] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics,2022,3:955-969.
- [18] 赵峰,帅智康,彭也伦,等.含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2245-2255.
ZHAO Feng, SHUAI Zhikang, PENG Yelun, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(6):2245-2255.
- [19] 王一鸣,孙华东,徐式蕴,等.外环限幅对VSC并网系统大扰动稳定性的影响研究[J].中国电机工程学报,2023,43(23):9114-9127.
WANG Yiming, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Research on the large disturbance stability of grid-connected VSC system considering the limiter strategy of outer loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(23):9114-9127.
- [20] 葛平娟,肖凡,涂春鸣,等.考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J].电工技术学报,2022,37(14):3676-3687.
GE Pingjuan, XIAO Fan, TU Chunming, et al. Transient control strategy of droop-controlled inverter considering fault current limitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(14):3676-3687.
- [21] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):4648-4661.
- [22] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(1):578-591.
- [23] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(8):6473-6482.
- [24] 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.
- [25] PAN D H, WANG X F, LIU F C, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2020,8(2):1019-1033.
- [26] 张祥宇,王慧,樊世通,等.风电海水淡化孤立微电网的运行与控制[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):25-31.
ZHANG Xiangyu, WANG Hui, FAN Shitong, et al. Operation and control of isolated microgrid with wind turbines and seawater desalination equipments[J]. Power System Protection and Control,2015,43(4):25-31.
- [27] 叶婧,林涛,徐遐龄,等.考虑稳态频率约束的含高渗透率风电的孤立电网机组组合[J].高电压技术,2018,44(4):1311-1318.
YE Jing, LIN Tao, XU Xialing, et al. Research on unit commitment considering steady state frequency constraints of isolated grids with high permeability wind power[J]. High Voltage Engineering,2018,44(4):1311-1318.
- [28] 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.