

基于 Lyapunov 能量函数的单电压环幅值控制构网型 储能虚拟阻抗参数整定方法

熊亮雳¹, 游力¹, 韩刚¹, 熊昊哲¹, 田梦如², 徐晨²

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 集中式构网型储能电站是高比例新能源电力系统中的重要装备, 能够主动为系统提供电压、惯量支撑以及阻尼。常用的构网型控制方案包括电压电流双环与单电压环幅值控制, 后者具备更强的暂态电压支撑能力, 但面临着更为严峻的暂态过电流风险。在单电压环幅值控制的基础上, 叠加虚拟阻抗控制抑制暂态过流, 同时将有功环节的相角与无功环节的电压动态过程综合考虑, 构建了系统的 Lyapunov 能量函数, 分析系统的暂态稳定性, 进行虚拟阻抗参数整定。与传统的仅考虑有功环节相角动态过程的相平面法相比, 采用 Lyapunov 能量函数得到的参数范围更加准确。仿真结果验证了添加虚拟阻抗控制后, 构网型储能电站能够应对上级电网电压暂降及相位跳变, 并将暂态电流限制在合理范围内。同时, 验证了 Lyapunov 能量函数法进行虚拟阻抗参数整定的有效性。

关键词: 构网型储能电站; 单电压环幅值控制; 虚拟阻抗; Lyapunov 能量函数

A Lyapunov energy function-based virtual impedance parameter tuning method for grid-forming energy storage under single loop voltage magnitude control

XIONG Liangli¹, YOU Li¹, HAN Gang¹, XIONG Haozhe¹, TIAN Mengru², XU Chen²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Centralized grid-forming energy storage stations are critical pieces of equipment in high-proportion of new energy power systems. They can actively provide voltage support, inertia support, and damping. Common grid-forming control schemes include voltage and current dual-loop control and single-loop voltage magnitude control. The latter has stronger transient voltage support ability, but faces more severe transient overcurrent risks. To mitigate transient overcurrent, virtual impedance control is introduced on top of single voltage-loop amplitude control. Additionally, the dynamic processes of the active power / phase angle and reactive power / voltage are comprehensively considered to construct the system's Lyapunov energy function. This function is used to analyze transient stability and determine virtual impedance parameters. Compared to the traditional phase plane method, which only considers the active power / phase angle dynamics, the Lyapunov energy function provides a more accurate parameter range. Simulation results verify that, with the virtual impedance control, the grid-forming energy storage power station can effectively respond to voltage dips and phase jumps while keeping the transient current within a reasonable range. Also, the effectiveness of the Lyapunov energy function method for virtual impedance parameter tuning is confirmed.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5108-202218280A-2-311-XG).

Key words: grid-forming; single-loop voltage magnitude control; virtual impedance; Lyapunov energy function

0 引言

高比例新能源背景下的电力系统呈现出低惯量

和弱阻尼的特点, 对系统稳定性带来了巨大的挑战^[1-4]。传统集中式跟网型储能电站主动支撑能力不足, 在面对电压暂降、相位跳变等突发性暂态情况下无法提供快速响应。构网型控制下的储能电站对外表现出电压源特性, 利用有功功率同步方式直接控制相位信号, 无功环路获得电压参考值, 并且可以

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助 (5108-202218280A-2-311-XG)

调节环路虚拟转动惯量及阻尼参数, 为系统提供灵活的电压、惯量支撑及阻尼, 调节电网频率及电压变化, 增强系统稳定性^[5-6]。集中式构网型储能电站主动支撑能力的探索及控制优化逐渐成为研究热点^[7-9]。

构网型控制包括有功、无功功率外环和内环控制。内环广泛采用电压电流双环或单电压环幅值控制两种控制构架^[10-12]。电压电流双环控制依据系统电路的 KVL、KCL 方程进行推演, 电压环嵌套在电流环外侧, 电压反馈控制环路生成电流环指令, 电流环进行并网点电流的反馈控制最终形成内电势参考信号; 单电压环幅值控制由并网点电压反馈控制, 直接生成内电势参考信号。英国国家电网标准 GC0137 指出^[13], 在构网储能电站面对大扰动如电压暂降时, 应具备主动支撑能力。单电压环幅值控制相较电压电流双环控制, 控制带宽较低, 输出阻抗较大, 在强电网下能够提高系统的稳定性, 在电压暂降时的支撑能力更强, 但因缺少对并网电流的直接控制, 暂态过流问题更加突出^[11,14], 会危害储能变流器中电力电子开关器件安全。

对于暂态故障电流限制问题, 添加虚拟阻抗控制是行之有效的办法。现有研究基本以电压电流双环控制为基础。文献[15]对比了采用电流限幅器、电压限幅器、虚拟阻抗方式限流的差别, 指出添加电流限幅控制会降低系统暂态稳定性, 添加电压限幅控制会降低系统故障恢复能力。文献[16]提出了虚拟阻抗参数随系统状态变换的自适应虚拟阻抗方法。在单电压环幅值控制下, 文献[17]通过有功环路优化, 加快逆变器内电势跟随电网电压变化, 抑制过电流。以上方法仅强调虚拟阻抗控制性能, 未考虑计及系统暂态稳定性的虚拟阻抗参数整定方法。

对于电力系统暂态稳定性分析, 常用的理论方法有等面积法则、相图分析法、Lyapunov 能量函数法等。等面积法则是将电机转子的动能转换为势能形成的加速面积与减速面积进行比较, 但在构网型控制中应用时, 无法描述控制环路对电压的动态调节过程, 并且在触发限流控制后, 加速面积和减速面积难以准确绘制^[18]。相图分析法一般是用来判断二阶常系数微分方程的收敛解问题, 应用于构网型控制的暂态稳定性分析时, 通常通过有功环路建立功角的二阶常系数微分方程, 而将无功环路产生的电压幅值信号作为恒定值, 但在电压暂降过程中忽略了电压动态过程, 不能对系统进行准确描述^[19-20]。

Lyapunov 能量函数法是一种用于分析高阶非线性系统稳定性的方法, 它利用力学能量概念构建能够描述系统能量变化的函数, 并通过此函数对时间的变化来判断系统的稳定性。文献[21]首次提出

将此方法应用于电力系统的暂态稳定性分析。文献[22]建立了适用于单机无穷大系统及双机电力系统的通用 Lyapunov 方程。在构网型控制系统稳定性应用方面, 文献[23]建立了二阶 Lyapunov 能量函数, 分析了电压电流双环控制下的构网型系统暂态稳定性问题。然而, 针对单电压环幅值控制的暂态稳定性问题, Lyapunov 能量函数的构建方法及相关应用尚属空白。

本文以集中式构网型储能电站为研究对象, 在上级电网发生电压暂降及相位跳变的暂态故障场景下, 以单电压环幅值控制叠加虚拟阻抗控制抑制暂态故障电流。并通过建立 Lyapunov 能量函数, 绘制系统势能等势面, 利用故障前后吸引域范围进行虚拟阻抗参数的整定。与传统的相平面法相比, 本文所采用的 Lyapunov 能量函数法整定出的参数范围更加准确。

1 单电压环幅值控制策略

1.1 系统描述

集中式构网型储能主动控制策略示意图如图 1 所示。储能电站简化为直流电压源, 变流器将直流电转换为三相交流电, 经过 LC 滤波环节接入电网。图 1 中: e 为内电势电压; R 为寄生电阻; L 、 C 分别为滤波电感和电容; R_g 、 L_g 分别为电网线路阻抗和电感; u_{pcc} 为并网点电压; u_g 为电网电压; P 、 Q 分别为并网点实际输出的有功、无功功率; P_{ref} 、 Q_{ref} 为指令值; U_{gref} 为电网电压指令值; J 为虚拟惯量; D 为阻尼系数; ω_0 、 ω 分别为额定角频率与实际角频率; k_q 为无功电压下垂系数。

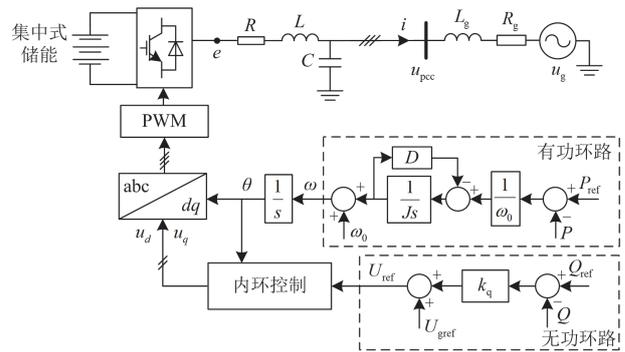


图 1 集中式构网型储能主动控制策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram for active control strategy of grid-forming energy storage

构网型控制的功率外环通过有功功率同步方式获得相位信号 θ , 无功环路获得电压幅值参考信号

U_{ref} ，作为内环电压指令。功率外环实现了对于频率和电压的调节^[5]。有功回路和无功回路的方程可以写为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref} - P}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ U_{ref} = k_q(Q_{ref} - Q) + U_{gref} \end{cases} \quad (1)$$

构网型控制的内环有两种常见的控制架构，图 2 为电压电流双闭环控制，图 3 为单电压环幅值控制。其中： Mag 表示幅值运算； U_{pccmag} 为并网点电压幅值； k_v 为电压调节系数；PWM 环节简化为增益为 1 的比例环节。与双环结构不同，单电压环幅值控制中不包含对并网电流的直接控制，通过对并网点电压的幅值进行反馈调节^[1]，直接生成内电势电压幅值 E ，如式(2)所示。

$$E = k_v \int [k_q(Q_{ref} - Q) + U_{gref} - U_{pccmag}] \quad (2)$$

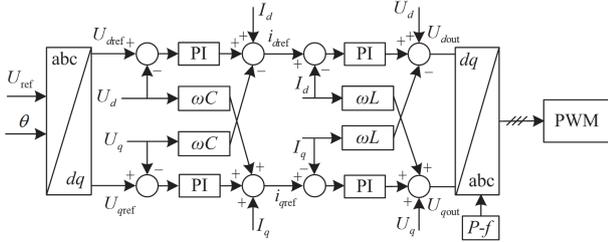


图 2 电压电流双闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram of voltage and current dual-loop control

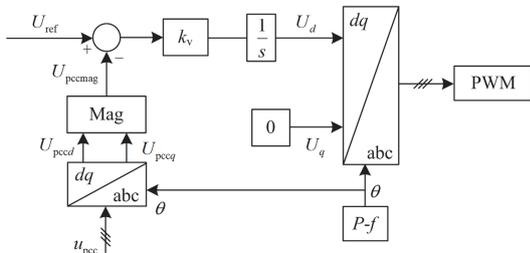


图 3 单电压环幅值控制框图

Fig. 3 Block diagram of single-loop voltage-magnitude control

1.2 虚拟阻抗控制

目前国内外对电压暂降还没有统一的定义，国际电气与电子工程师协会将电压暂降定义为电压下降到额定值的 10%~90%^[24]。电压暂降已成为以高端制造业为代表的现代工业用户面临的主要电能质量问题。同时，当系统发生相位跳变时，构网型储能会在短短 5 ms 内，瞬时注入或吸收有功功率，以稳定整个系统^[17]。本文主要以电压暂降与相位跳变作为系统面临的两种大扰动情况进行暂态分析。

单电压环幅值控制相比于同为构网型的电压电流双环控制，其控制带宽更低，响应速度更慢，在

面对大扰动如电压暂降时，逆变器内电势的维持能力更强^[11]，因此对并网点电压的支撑能力更强，但是会带来更严重的暂态过电流问题。通过系统相量图可以进行相应的理论分析。

图 4(a)为未发生电压暂降时的系统相量示意图。图中， i 为输出电流，下标 f 代表电压暂降期间系统响应，下标 fv 代表电压暂降后添加虚拟阻抗后的系统响应。

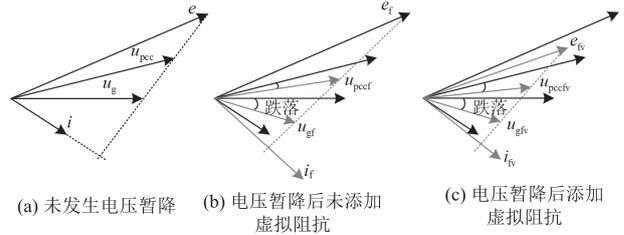


图 4 构网型储能系统电压暂降相量图

Fig. 4 Phasor diagram of grid-forming energy storage system under voltage dips

如果电网电压 u_g 发生跌落后变为 u_{gf} ，此时单电压环幅值控制使暂态情况下的逆变器内电势 e_f 保持不变，伴随着并网点电压 u_{pccf} 跟随电网电压的跌落，系统电流 i_f 会显著增大(图 4(b))。图 5(a)为未发生相位跳变时的系统相量示意图。电网电压发生相位跳变，电网电压 u_g 变化为 u_{gf} ，逆变器内部相位在单电压环幅值控制下保持稳定，系统电流也随着逆变器内电势与电网电压之间的相位差增加而显著增加(图 5(b))。

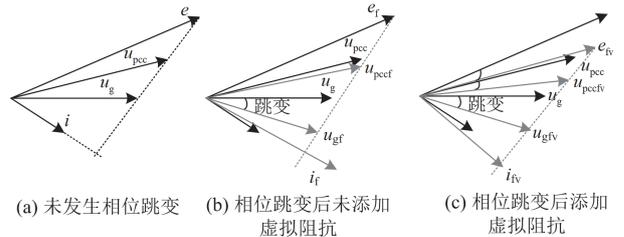


图 5 构网型储能系统相位跳变相量图

Fig. 5 Phasor diagram of grid-forming energy storage system under phase jump

添加虚拟阻抗后的控制环路如图 6 所示^[15,17]，添加的虚拟电阻为 R_v ，虚拟电抗为 X_v 。稳态下，输出电流在限制范围内，不触发虚拟阻抗限流控制环节；暂态下，输出电流超过设置范围，则触发虚拟阻抗限流环节。图 4(c)为添加虚拟阻抗后应对电压跌落的系统相量图。添加虚拟阻抗控制后，逆变器内电势变为 e_{fv} ，一定程度上跟随了电网电压跌

首先建立能量函数 V 关于各变量的偏导函数, 再利用函数与梯度的数学关系, 积分构建能量函数。能量函数有效的前提条件是, 函数对各变量的偏导函数是连续的, 同时函数本身是正定的, 函数对于时间的导数是半负定的^[25]。

能量函数 V 对于时间的导数可以写为

$$\frac{dV(\delta, \omega, E)}{dt} = \frac{\partial V}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} + \frac{\partial V}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial V}{\partial E} \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

考虑有功环节的相角动态过程, 式(1)中的有功环路方程两边同时乘以 $d\delta/dt$ 后可以变换为

$$(P - P_{\text{ref}}) \frac{d\delta}{dt} + J\omega_0(\omega - \omega_0) \frac{d\omega}{dt} = -D\omega_0(\omega - \omega_0)^2 \quad (6)$$

定义能量函数 V 对于 δ 、 ω 的偏导函数为

$$\frac{\partial V}{\partial \delta} = P - P_{\text{ref}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \omega} = J\omega_0(\omega - \omega_0) \quad (8)$$

考虑无功环节的电压动态过程, 并将式(2)中 U_{pccmag} 等值为内电势电压幅值 E ^[11], 可得

$$\frac{Q - Q_{\text{ref}}}{E} - \frac{U_{\text{gref}}}{k_q E} + \frac{1}{k_q} = -\frac{1}{k_v k_q} \left(\frac{dE}{dt} \right) \quad (9)$$

将式(9)中等式左边部分定义为能量函数 V 对于 E 的偏导函数, 如式(10)所示。

$$\frac{\partial V}{\partial E} = \frac{Q - Q_{\text{ref}}}{E} - \frac{U_{\text{gref}}}{k_q E} + \frac{1}{k_q} \quad (10)$$

将式(7)、式(8)、式(10)代入式(5)中, 并通过式(6)、式(9)的换算可以得到

$$\frac{dV(\delta, \omega, E)}{dt} = -D\omega_0(\omega - \omega_0)^2 - \frac{1}{Ek_v k_q} \left(\frac{dE}{dt} \right)^2 \leq 0 \quad (11)$$

式(11)表明, 所构建的能量函数关于时间的导数小于等于零, 且所有偏导函数连续, 满足能量函数有效的约束条件, 能量函数 $V(\delta, \omega, E)$ 可以看作系统的能量耗散, 系统具有局部渐进稳定点。

将图 7 中的滤波器阻抗、虚拟阻抗与线路阻抗统一表示, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} X_f = X_v + X + X_g \\ R_f = R_v + R + R_g \end{cases} \quad (12)$$

忽略 $R_f/(R_f^2 + X_f^2)$ 项^[27], 依据内电势电压幅值 E 、电网电压幅值 U_g 以及两者间的参数可以计算逆变器的实际输出有功与无功功率, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} P = \frac{X_f E U_g \sin \delta}{R_f^2 + X_f^2} \\ Q = \frac{X_f E (E - U \cos \delta)}{R_f^2 + X_f^2} \end{cases} \quad (13)$$

$\partial V/\partial \delta$ 、 $\partial V/\partial \omega$ 、 $\partial V/\partial E$ 为能量函数的梯度, 根据函数与梯度数学关系, 可得

$$V(x) = \int_0^x \nabla V dx \quad (14)$$

分别对式(7)、式(8)、式(10)进行积分计算, 并将式(13)的有功、无功功率表达式代入, 可得

$$\int \frac{\partial V}{\partial \delta} d\delta = -P_{\text{ref}} \delta - \frac{X_f E U_g \cos \delta}{R_f^2 + X_f^2} \quad (15)$$

$$\int \frac{\partial V}{\partial \omega} d\omega = J\omega_0 \omega \left(\frac{\omega}{2} - \omega_0 \right) \quad (16)$$

$$\int \frac{\partial V}{\partial E} dE = - \left(Q_{\text{ref}} + \frac{U_{\text{gref}}}{k_q} \right) \ln E - \frac{X_f E U_g \cos \delta}{R_f^2 + X_f^2} + \frac{X_f E^2}{2(R_f^2 + X_f^2)} + \frac{E}{k_q} \quad (17)$$

考虑式(15)与式(17)第二项的等效关系, 最终所构建的 Lyapunov 能量函数表达式为

$$\begin{aligned} V(\delta, \omega, E) = & J\omega_0 \omega \left(\frac{\omega}{2} - \omega_0 \right) - P_{\text{ref}} \delta + \\ & \frac{X_f E (E - 2U_g \cos \delta)}{2(R_f^2 + X_f^2)} - \\ & \left(Q_{\text{ref}} + \frac{U_{\text{gref}}}{k_q} \right) \ln E + \frac{E}{k_q} \end{aligned} \quad (18)$$

3.2 系统稳定性判定

依据 Lyapunov 能量函数进行的暂态稳性分析过程, 通常采用拉塞尔原理^[23], 以 $dV/dt = 0$ 形成的有界区域作为封闭等势面, 进行最大吸引域估计。吸引域是系统趋向平衡状态的区域, Lyapunov 等势面用于确定系统吸引域的大小和形状, 一般而言, 系统在受到扰动后, 如果系统状态仍然在吸引域范围内, 则系统状态将逐渐趋于稳定。通过 Lyapunov 等势面即可以确定吸引域的分布和变化趋势, 从而评估系统的暂态响应。

以表 2 系统参数为例, 在未考虑虚拟阻抗控制, 即 X_v 、 R_v 为零时, 依据式(18)所构建的 Lyapunov 能量函数, 绘制该函数的势能 V 、相位差 δ 、内电势电压幅值 E 三维图, 如图 8 所示, 可见 V 均大于零, 满足能量函数正定的约束条件。图 9 给出了在有功功率指令变化时的势能等势面, 可以看出有功功率指令增大, 红色闭合线范围内吸引域减小, 系统稳定性降低。图 10 给出了在线路阻抗变化时的势能等势面, 可以看出线路阻抗增大, 系统稳定性降低。

表 2 系统相关参数

Table 2 System relevant parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
储能直流侧电压	1200 V	电网电压幅值 U_g	514 V
滤波电感 L	2 mH	滤波电容 C	223 μ F
寄生电阻 R	0.5 Ω	线路电感 L_g	20 mH
线路电阻 R_g	0.5 Ω	有功功率基准值	10 kW
无功功率基准值	0 kvar	转动惯量 J	0.02 kg/m ²
阻尼系数 D	10 N·m·s/rad	额定角频率 ω_n	314 rad/s
电压调节系数 k_v	20	无功下垂系数 k_q	0.035

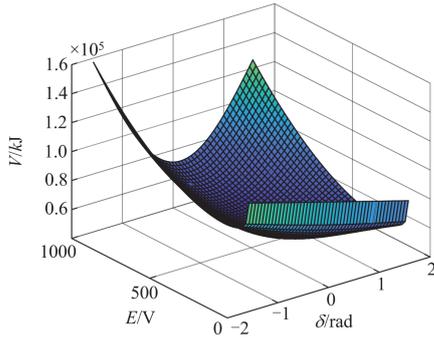
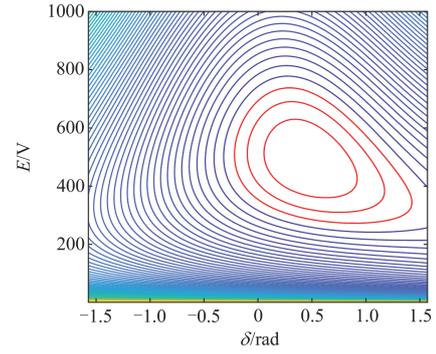
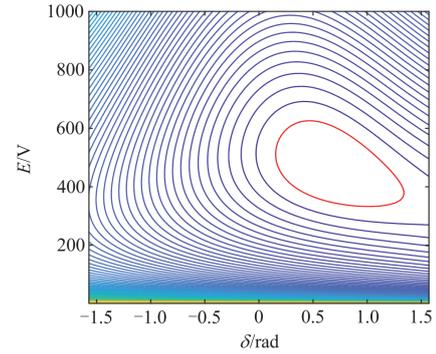


图 8 Lyapunov 三维能量函数

Fig. 8 Lyapunov three-dimensional energy function



(a) 线路阻抗1.5 p.u.



(b) 线路阻抗2 p.u.

图 10 线路阻抗变化时势能等势面

Fig. 10 Potential equipotential surfaces with different line impedances

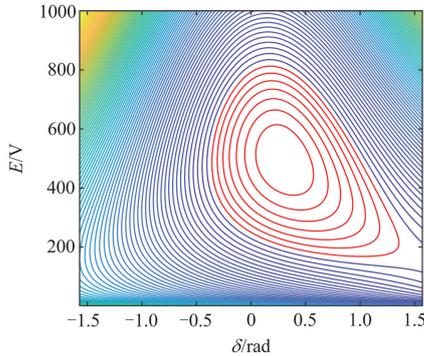
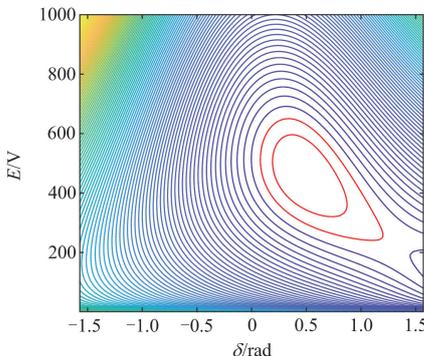
(a) $P_{ref} = 1$ p.u.(b) $P_{ref} = 1.5$ p.u.

图 9 有功功率指令变化时势能等势面

Fig. 9 Potential equipotential surfaces with different active power commands

4 虚拟阻抗参数整定结果对比

在表 2 系统参数下, 电网电压暂跌落落到 0.2 p.u., 分别用传统的相平面法及 Lyapunov 能量函数法进行虚拟阻抗参数的整定。虚拟电抗与虚拟电阻的比值 X_v/R_v 统一设定为 3^[28]。

4.1 相平面法整定结果

基于 2.1 节所述的相平面法, 绘制单电压环幅值控制下电网电压暂降时添加虚拟阻抗 Z_v 分别为 5.27 Ω , 10.54 Ω , 15.81 Ω , 21.08 Ω , 21.4 Ω 的系统相平面图, 如图 11 所示。

当虚拟电抗值较小时, 曲线呈现出向内收敛的类似抛物线形式, 表明系统处于过阻尼状态, 系统受到扰动仍然存在稳定平衡点^[25]。

伴随虚拟电抗值逐渐增大, 系统暂态稳定性逐渐降低, 超过临界值 20.3 Ω 时, 所绘制曲线发散, 表明系统稳定性受到影响。实际工程中除添加虚拟电抗 X_v 外, 也添加虚拟电阻 R_v , 如图 7 所示, 结合文献[28]中指出 $X_v/R_v \leq 5$ 时, 系统虽然具有相对有限的瞬时稳定裕度, 但具有更良好的电流阻尼响应, 本文选择 $X_v/R_v = 3$ 作为预设条件, 利用相平

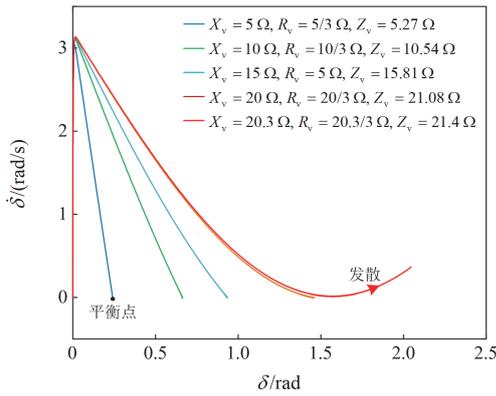


图 11 电压暂降时系统添加不同虚拟阻抗值的相平面图
Fig. 11 Phase planes with different virtual impedances under voltage dip

面法整定出的虚拟阻抗 $Z_v = \sqrt{X_v^2 + R_v^2}$ 上限值为 21.4Ω 。

在相位跳变的场景下，根据第 1.2 节中关于相位跳变相量图的理论分析，添加虚拟阻抗控制也会使逆变器内电势与电网电压之间的相位差减小，从而抑制故障电流。

在相位跳变的场景下，同样也可以采用传统的相平面法来判断系统稳定性并进行虚拟阻抗参数整定。图 12 即为利用相平面法对于虚拟电抗参数的整定结果，可以看出，当虚拟电抗值较小时，曲线呈现出向内收敛的类似抛物线形式，表明系统处于过阻尼状态，系统受到扰动仍然存在稳定平衡点，与电压暂降情况相同，伴随着虚拟电抗值逐渐增大，系统暂态稳定性逐渐降低，超过临界值 19.65Ω 时，所绘制曲线发散，表明系统稳定性受到影响，电能质量降低。结合 $X_v/R_v = 3$ 的预设条件，利用相平面法整定出的虚拟阻抗上限值为 20.71Ω 。

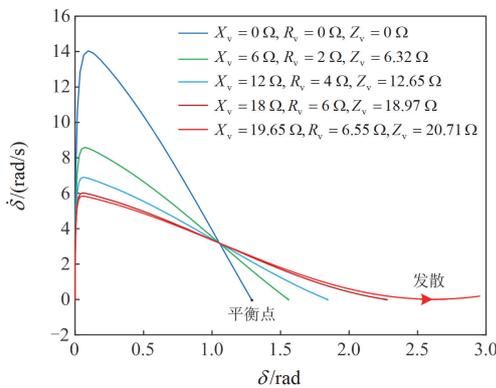


图 12 相位跳变后系统添加不同虚拟阻抗值的相平面图
Fig. 12 Phase planes with different virtual impedances under phase jump

4.2 Lyapunov 能量函数法整定结果

基于 3.2 节所描述的 Lyapunov 能量函数及系统稳定性判定方法，绘制虚拟阻抗 Z_v 分别为 0 、 11.7Ω 时的系统势能等势面，如图 13 所示。添加虚拟阻抗后，吸引域范围逐渐减小，系统稳定性降低。超过临界值 11.7Ω 时，吸引域消失即系统失稳。

绘制 -60° 相位跳变情况下不同虚拟阻抗值时的势能等势面，如图 14 所示。对比图中的吸引域范围可以发现，当 Z_v 大于 9.5Ω 时，系统将处于不稳定状态。

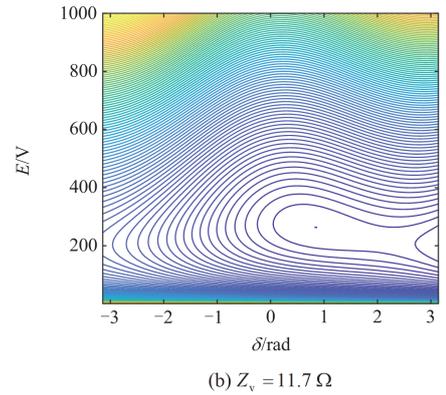
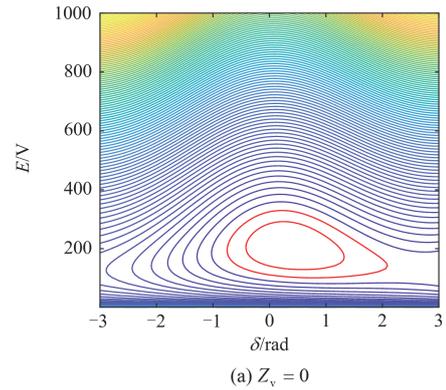
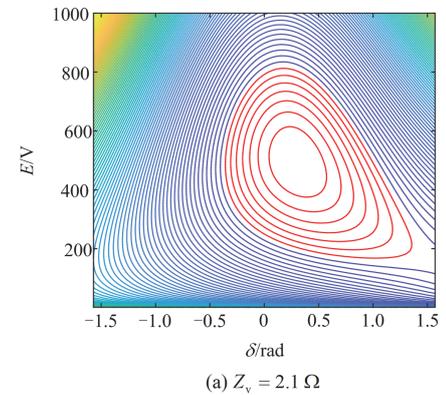


图 13 不同虚拟阻抗值势能等势面
Fig. 13 Potential equipotential surfaces with different virtual impedances



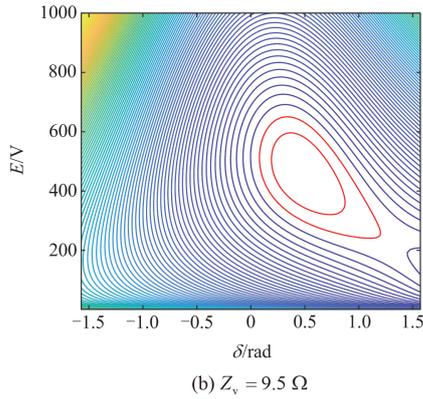


图 14 -60° 相位跳变时, 不同虚拟阻抗势能等势面
Fig. 14 Potential equipotential surfaces with different virtual impedances during -60° phase jump

在电压暂降与相位跳变情况下, 对比以上两种方法的虚拟阻抗整定结果, 如表 3 所示。可以看出, 利用本文所构造的 Lyapunov 能量函数及暂态稳定性判定方法, 虚拟阻抗值上限的整定结果远小于传统的相平面法, 结果更加精确。

表 3 Lyapunov 函数与相平面法的虚拟阻抗整定范围对比
Table 3 Comparison of the virtual impedance tuning range under the Lyapunov function and phase plane portrait

	虚拟阻抗 Ω	
	电压暂降	相位跳变
相平面法	21.4	20.7
Lyapunov	11.7	9.5

虚拟阻抗下限值 $|Z_{f_{\min}}|$ 可由电压暂降故障穿越时的稳态故障电流限值值得出^[28], 如式(19)所示。

$$|Z_{f_{\min}}| = \frac{\sqrt{E_f^2 + U_{gf}^2 - 2E_f U_{gf} \cos \delta_f}}{I_{f_{\max}}} \quad (19)$$

式中: E_f 、 U_{gf} 分别为故障情况下的内电势电压与电网电压有效值; δ_f 为暂态情况下的相位差; $I_{f_{\max}}$ 为暂态情况下故障电流最大值。

以表 2 系统参数为例, 故障前逆变器内电势电压与电网电压幅值基本相等, 均为 514 V, 相位差 δ 约为 0.15 rad, 电流幅值为 11.8 A, 当上级电网电压跌落到 102 V 时, 相位差 δ_f 增大到 1.3 rad, 如果允许稳态故障穿越电流为额定电流的 3.2 倍, 即 37.76 A, 可以计算出虚拟阻抗下限值为 5.98 Ω 。

5 系统仿真验证

基于表 2 的系统参数, 在 Matlab/Simulink 中搭建构网型储能系统进行仿真验证。在电网电压暂降

过程中, 通过观察并网点电压跌落深度判断构网型控制的主动支撑能力及暂态并网电流大小, 验证虚拟阻抗控制的表现。

5.1 单电压环幅值控制并网点电压支撑验证

第一种大扰动情况为: 在 $t = 0.3$ s 时电网电压跌落至 0.2 p.u.。对构网型储能分别采用电压电流双环及单电压环幅值控制, 观察并网点电压的支撑效果及暂态并网电流的大小。图 15 为电压电流双环控制下的系统响应波形图。此时并网点电压幅值由 514 V 跌落至 225.2 V, 最大暂态并网电流幅值为 86.65 A。图 16 为单电压环幅值控制下的系统响应波形图。可以看到此时并网点电压仅跌落至 490 V, 电压支撑效果明显好于电压电流双闭环控制, 但最大暂态并网电流幅值达 98.6 A。同时, 在电压暂降过程中, 单电压环幅值控制下的有功与无功功率存在幅值更明显的暂态响应过程。

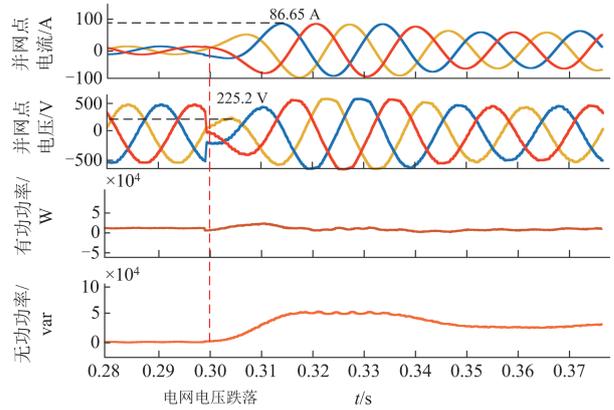


图 15 电网电压跌落电压电流双环控制系统响应

Fig. 15 System response with voltage and current dual-loop control during grid voltage dip

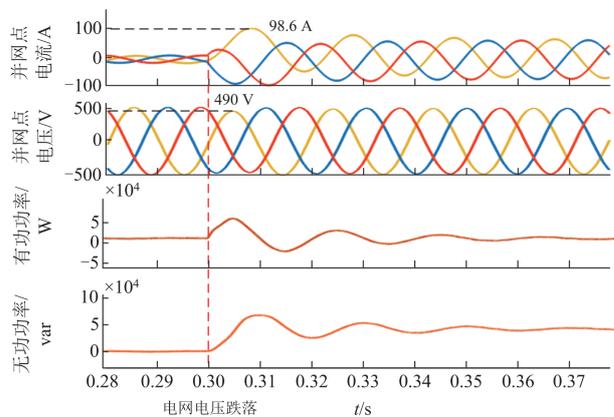


图 16 电网电压跌落单电压环幅值控制系统响应

Fig. 16 System response with single-loop voltage-magnitude control during grid voltage dip

5.2 电压暂降时，叠加虚拟阻抗验证

为减小单电压环幅值控制应对电压暂降时的暂态并网电流幅值，叠加了虚拟阻抗控制。在第4节利用 Lyapunov 能量函数法对系统暂态稳定性分析时，虚拟阻抗 Z_v 上限值为 11.7Ω 。

图 17—图 19 分别是 Z_v 等于 2Ω 、 4Ω 、 6Ω 时的系统响应波形图。 $Z_v = 2 \Omega$ 时，并网点电压由 511 V 跌落至 358.6 V ，支撑效果比没有虚拟阻抗控制时要差，但暂态并网电流幅值仅为 65 A ，相较于 98.6 A 大幅下降。当 $Z_v = 4 \Omega$ 时，并网点电压跌落至 298.6 V ，暂态并网电流幅值下降为 48.7 A 。当 $Z_v = 6 \Omega$ 时，并网点电压跌落最深，达 251.6 V ，暂态并网电流幅值最小，为 38.7 A 。

将虚拟阻抗值设置为 12Ω ，其在相平面法整定结果的范围内，但超过了 Lyapunov 能量函数法整定出的上限值 11.7Ω 。从图 20 的仿真结果可以看出，控制系统无法应对电网电压跌落，系统失稳。印证

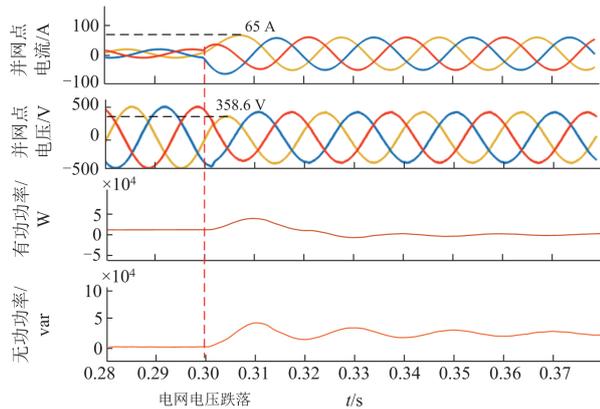


图 17 单电压环幅值控制叠加 2Ω 虚拟阻抗控制系统响应
Fig. 17 System response with single-loop voltage-magnitude control and 2Ω virtual impedance

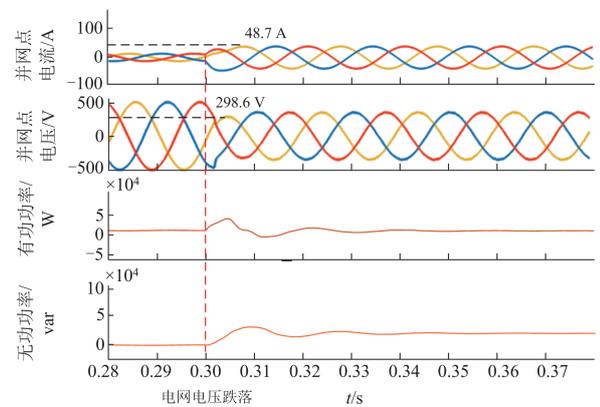


图 18 单电压环幅值控制叠加 4Ω 虚拟阻抗控制系统响应
Fig. 18 System response with single-loop voltage-magnitude control and 4Ω virtual impedance

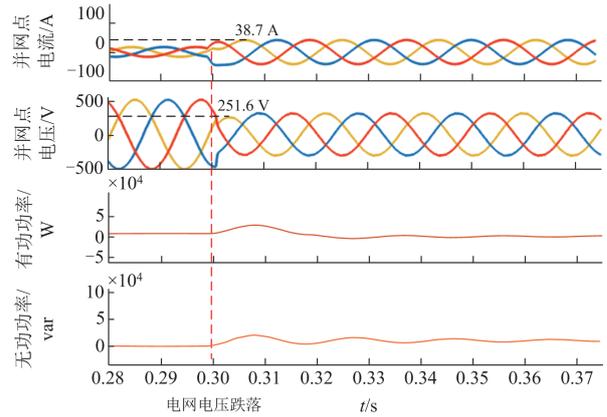


图 19 单电压环幅值控制叠加 6Ω 虚拟阻抗控制系统响应
Fig. 19 System response with single-loop voltage-magnitude control and 6Ω virtual impedance

了采用 Lyapunov 能量函数法相较传统相平面法，对系统暂态稳定性进行分析及虚拟阻抗参数整定更加准确。表 4 中，将电压暂降情况下采用不同控制时并网点电压跌落情况与电流幅值进行对比，单环电压支撑能力最强，通过合理调节虚拟阻抗参数，可实现对电压支撑、对电流抑制进行调整。

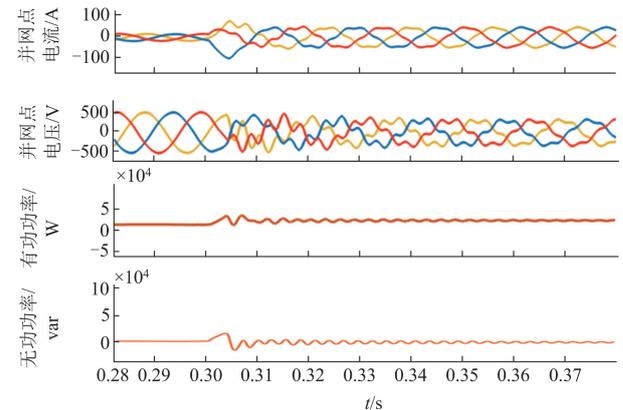


图 20 单电压环幅值控制叠加 12Ω 虚拟阻抗控制系统响应
Fig. 20 System response with single-loop voltage-magnitude control and 12Ω virtual impedance

表 4 电压暂降时不同控制下仿真结果对比

Table 4 Comparison of simulation result with different control under voltage dip

	双环	单环	单环+虚拟阻抗/ Ω			
			2	4	6	12
并网点电压跌落/V	225.2	490	358.6	298.6	251.6	失稳
并网点电流幅值/A	86.65	98.6	65	48.7	38.7	失稳

5.3 相位跳变时，叠加虚拟阻抗验证

第二种大扰动情况为：在 $t = 0.3 \text{ s}$ ，发生 -60° 相位跳变时，采用虚拟阻抗限制暂态并网电流，验证

添加虚拟阻抗的可行性与参数整定范围的准确性。图 21 为单电压环幅值控制下系统发生相位跳变的响应波形图, 最大暂态并网电流幅值为 112.1 A。

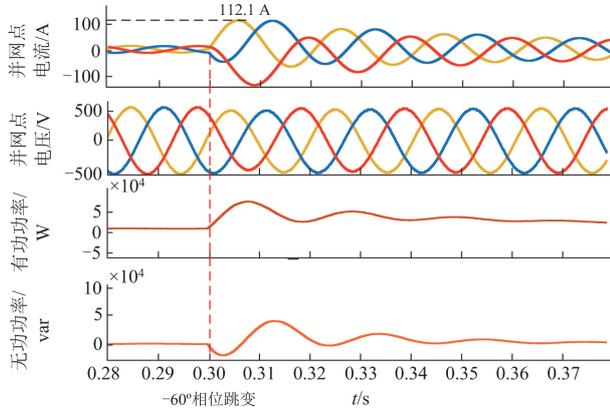


图 21 在 -60° 相位跳变情况下, 单电压环幅值控制未叠加虚拟阻抗时系统响应

Fig. 21 System response with single-loop voltage-magnitude control during -60° phase jump

在 0.3 s 时, 系统发生 -60° 相位跳变情况下, 瞬间对整个系统注入有功功率, 将有较大的瞬态电流。为了将并网点瞬态电流限制在合理范围内, 叠加了虚拟阻抗控制, 利用 Lyapunov 能量函数分析系统瞬态稳定性, 虚拟阻抗参数 Z_v 的上限为 9.5Ω 。

图 22 与图 23 分别是 Z_v 等于 3Ω 和 11Ω 时的系统响应波形。当 $Z_v = 3 \Omega$ 时, 并网点瞬态电流为 70.4 A , 明显低于 112.1 A 。当 $Z_v = 11 \Omega$ 时, 并网点瞬态电流为 31.5 A 。在相平面法整定结果的范围内, 但超过了 Lyapunov 能量函数法整定出的上限值 9.5Ω , 并网点电压发生畸变, 系统失稳。表 5 给出

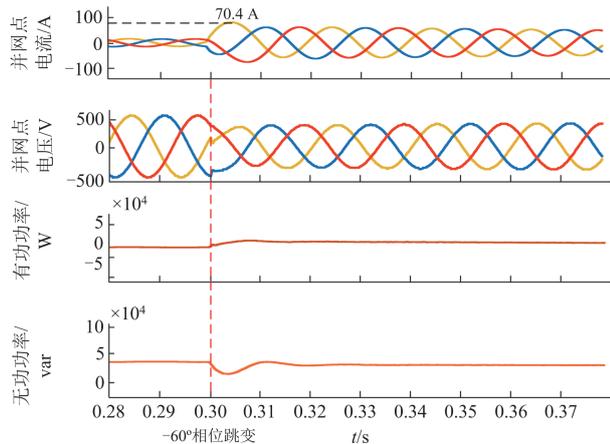


图 22 在 -60° 相位跳变情况下, 单电压环幅值控制叠加 3Ω 虚拟阻抗时系统响应

Fig. 22 System response with single-loop voltage-magnitude control and 3Ω virtual impedance during -60° phase jump

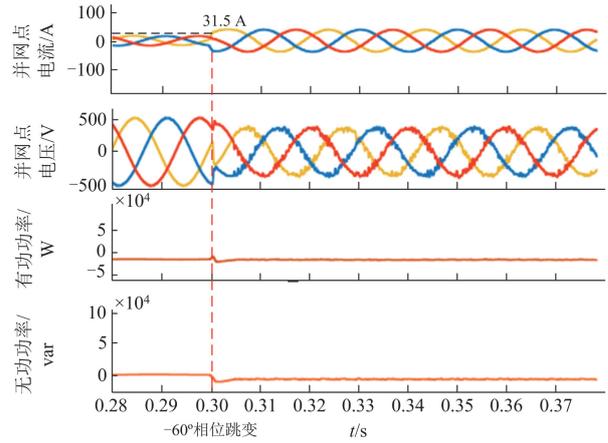


图 23 在 -60° 相位跳变情况下, 单电压环幅值控制叠加 11Ω 虚拟阻抗时系统响应

Fig. 23 System response with single-loop voltage-magnitude control and 11Ω virtual impedance during -60° phase jump

表 5 相位跳变时不同虚拟阻抗下参数仿真结果对比

Table 5 Simulation result comparison of parameters with different virtual impedances during phase jump

	虚拟阻抗/ Ω		
	0	3	11
注入有功功率/kW	91.5	30.7	失稳
并网点电流幅值/A	65	48.7	失稳

了相位跳变时不同虚拟阻抗下的参数仿真结果, 通过暂态稳定性分析设计虚拟阻抗参数的上限为 11Ω 。

6 结论

本文以集中式构网型储能电站为研究对象, 设计了基于 Lyapunov 能量函数的虚拟阻抗参数整定方法, 得出相关结论如下。

1) 单电压环幅值控制相比于电压电流双环控制, 在面对大扰动如电压暂降时, 逆变器内电势的维持能力更强, 因此对并网点电压的支撑能力更强, 但是会带来更严重的暂态过电流问题。

2) 单电压环幅值控制叠加虚拟阻抗能够抑制暂态故障电流, 但也在一定程度上牺牲了构网型储能的并网点电压主动支撑能力。

3) 为分析单电压环幅值控制下系统的暂态行为及稳定性, 本文同时考虑了系统有功环节的相角与无功环节的电压动态过程, 构建了系统整体的 Lyapunov 能量函数, 绘制系统势能等势面, 在电网电压暂降与相位跳变情况下, 通过故障前后吸引域范围进行虚拟阻抗参数的整定。与传统相平面法相比, 本文所提方法提升了整定精度。

4) 仿真结果验证了本文所提方法的正确性。

本文内容主要针对单机系统进行了暂态分析, 未来将关注多机系统中同样以构网型单电压环幅值控制作为研究基础, 进行多机系统能量函数方程构建及暂态稳定性判定方法的相关研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 江世明, 唐杰. 基于暂态阻尼增强的改进 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 144-154.
JIANG Shiming, TANG Jie. Improved VSG control strategy based on transient damping enhancement[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 144-154.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [5] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [6] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [7] 杨欢红, 焦伟, 黄文焘, 等. 考虑暂态功角稳定和故障限流的并网逆变器下垂暂态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 59-70.
YANG Huanhong, JIAO Wei, HUANG Wentao, et al. Droop transient control strategy considering transient power angle stability and fault current limitation of a grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 59-70.
- [8] 杨欢红, 严灵杰, 黄文焘, 等. 考虑功率最大输出与储能协调的光储 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 64-73.
YANG Huanhong, YAN Lingjie, HUANG Wentao, et al. VSG control strategy for a photovoltaic system with storage considering maximum power output and energy storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 64-73.
- [9] 袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904-1916.
YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1916.
- [10] ROKROK E, QORIA T, BRUYERE A, et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1519-1531.
- [11] LIU Jia, BEVRANI H, ISE T. A design-oriented Q-V response modeling approach for grid-forming distributed generators considering different operation modes[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 387-401.
- [12] DU Wei, CHEN Zhe, SCHNEIDER K P, et al. A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 963-975.
- [13] National Grid ESO. Minimum specification required for provision of GB grid forming (GBGF) capability (formerly virtual synchronous machine/VSM capability) [R]. 2021.
- [14] ZHAO Mingquan, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [15] FAN Bo, LIU Teng, ZHAO Fangzhou, 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.
- [16] TAUL M, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020,

- 8(2): 1062-1073.
- [17] WU Heng, WANG Xiongfei. Control of grid-forming VSCs: a perspective of adaptive fast/slow internal voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 10151-10169.
- [18] CHEN Junru, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitations in grid-forming converters[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 259-269.
- [19] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, 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): 3377-3395.
- [20] LIU Teng, WANG Xiongfei. Transient stability of single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6158-6162.
- [21] AYLETT P D. The energy-integral criterion of transient stability limits of power systems[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1958, 105: 527-536.
- [22] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, 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.
- [23] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2825.
- FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815-2825.
- [24] 电能质量—电压暂降与短时中断: GB/T 30137—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Power quality—voltage dips and short interruptions: GB/T 30137—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [25] SLOTTINE J E, LI Weiping. 应用非线性控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [26] LI Yitong, GU Yunjie, ZHU Yue, et al. Impedance circuit model of grid-forming inverter: visualizing control algorithms as circuit elements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3377-3395.
- [27] 张林, 张海波, 蒋维勇, 等. 基于自适应动态虚拟同步阻抗的虚拟同步机功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6010-6022.
- ZHANG Lin, ZHANG Haibo, JIANG Weiyong, et al. Power decoupling strategy for virtual synchronous generator based on adaptive dynamic virtual synchronous impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6010-6022.
- [28] QORIA T, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. Variable virtual impedance-based overcurrent protection for grid-forming inverters: small-signal, large-signal analysis and improvement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3324-3336.

收稿日期: 2024-06-19; 修回日期: 2024-09-04

作者简介:

熊亮雳(1993—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源及储能控制、性能评价技术等; E-mail: xliangli@foxmail.com

田梦如(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为构网型储能控制; E-mail: 13453709804@shu.edu.cn

徐晨(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源并网系统、构网型储能控制。E-mail: xu_chen@shu.edu.cn

(编辑 周金梅)