

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231505

单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析

王泽昆¹, 程鹏¹, 贾利民^{1,2}

(1. 华北电力大学国家能源交通融合发展研究院, 北京 102206; 2. 先进轨道交通自主运行
全国重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘要: 随着电力电子化电力系统的快速发展, 构网型并网逆变器作为新型电源得到了广泛关注, 其中单电压环构网型并网逆变器因具有更强的小信号稳定性而在新能源并网中具有独特优势。同时, 构网型并网逆变器在大扰动下呈现与同步电机不同的暂态响应, 容易产生暂态失稳。针对这一问题, 以单电压环构网型并网逆变器大扰动模型为基础, 采用相平面图的方法分析了大扰动下功率控制环、电压控制环对逆变器的暂态作用, 给出了关键控制器参数对暂态稳定性的影响, 刻画了功角的暂态响应特性。同时, 揭示了有功控制环、无功控制环和单电压环在暂态期间会改变功角超调量、逆变器输出电压幅值和变化率, 进而影响并网逆变器的暂态稳定性。基于上述分析, 给出了减小有功和无功下垂系数, 增大电压积分系数和低通滤波器截止角频率的控制参数优化方法, 可增强单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真验证了分析的准确性与可行性。

关键词: 构网型并网逆变器; 暂态稳定性; 单电压环; 相平面图; 大扰动

Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter

WANG Zekun¹, CHENG Peng¹, JIA Limin^{1,2}

(1. China Institute for Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the rapid development of electric and electronic power system, grid-forming inverter as a new power source has been widely concerned. The single voltage loop grid-forming inverter has a unique advantage in new energy grid-connected because of its better small signal stability. Meanwhile, the transient response of grid-forming inverter is different from synchronous generator under large disturbance. Grid-forming inverter is prone to transient instability. For this problem, based on the large disturbance model of single voltage loop grid-forming inverter, the transient behavior of power control loop and voltage control loop under large disturbance is analyzed by the phase portrait, the influence of key controller parameters on the transient stability is given, and the transient response of power angle are described. It is revealed that the active power control loop, reactive power control loop and single voltage loop change the power angle overshoot, the output voltage amplitude, and the rate of change of the inverter, respectively. And they will affect the transient stability of the single voltage loop grid-forming inverter. Based on the above analysis, this paper presents a control parameter optimization method to reduce the active and reactive droop coefficients, increase the voltage integral coefficient and low-pass filter cutoff frequency, which can enhance the transient stability of single voltage loop grid-forming inverter. Finally, the accuracy and feasibility of the analysis are verified by the Matlab/Simulink.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2601600).

Key words: grid-forming inverter; transient stability; single voltage loop; phase portrait; large disturbance

0 引言

随着新能源发电和分布式发电的发展, 电力电

子渗透率逐渐增加, 对电网整体协调性和稳定性构成了巨大挑战^[1-3]。构网型并网逆变器由于其电压源特性, 可以不依赖大电网独自构建电压、频率, 为电网运行提供惯性和阻尼支撑, 从而得到了快速的发展, 受到越来越多的关注^[4-5]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2601600)

构网型并网逆变器通过有功控制环和无功控制环分别生成电压参考相位与幅值^[6]。其中, 带有低通滤波器下垂控制作为一种典型的构网型控制方式, 可提供惯量和阻尼, 受到广泛的应用^[7]。在电压控制方面主要有电压-电流双闭环和单电压闭环两种典型控制^[8-9]。其中: 前者以公共耦合点(point of common coupling, PCC)处电压相位作为被控对象, 而后者以逆变器输出电压的相位作为被控对象^[10]。单电压环构网型并网逆变器需考虑滤波器上的电感, 并网具有更大的耦合电抗^[11]。这使得单电压环在并网时具有更大的小信号稳定边界以及更好的动态性能, 因此被广泛应用在微电网中^[12]。然而, 单电压环控制会造成较大的耦合电抗, 同时使逆变器的功角特性更加复杂, 大扰动下易产生功角振荡^[13-14], 这种典型的大扰动功角稳定问题被称为暂态稳定性^[15]。目前针对构网型并网逆变器的暂态稳定性的相关研究仍较为缺乏。

为应对上述问题, 文献[16-18]讨论了电网侧故障构网型并网逆变器的低电压穿越方法, 但未对其暂态稳定性展开研究, 而源网交互加剧可能导致逆变器与电网之间失去同步。文献[19]利用李雅普诺夫稳定判据分析了构网型并网逆变器的大信号稳定边界, 指出在高阻抗电网中构网型控制比跟网型控制具有更强的鲁棒性, 并从能量角度分析了构网型控制器参数对暂态稳定性的影响, 未对控制器参数进行量化分析, 控制器的暂态作用机理仍不清晰。文献[20-21]分析了构网型并网逆变器采用不同功率同步策略的暂态稳定性, 指出故障后系统若存在平衡点, 采用下垂控制的构网型并网逆变器可恢复功角稳定, 而采用虚拟同步机控制的并网逆变器仍可能由于阻尼不足而导致逆变器功角失稳, 但其均未考虑电压控制环的影响, 这使得电压环的暂态作用被忽视。文献[22]采用摄动理论给出了构网型并网逆变器功角的显式解析解, 基于此提出增强暂态稳定性的虚拟同步机控制参数设计方法, 文中将电压控制环视为单位增益, 未对无功控制环和电压环进行讨论。文献[23]采用等面积准则分析了构网型并网逆变器无功-电压下垂控制的电压暂态响应, 指出无功下垂控制对功角的“正反馈”作用会恶化逆变器稳定性, 但未对无功控制环下垂系数的暂态影响量化分析, 且未讨论电压环及控制器参数的作用。而采用单电压闭环控制的构网型并网逆变器由于单电压环的低带宽, 电压环对逆变器的暂态稳定性会产生较大影响, 因此无法忽略单电压环的暂态作用。文献[24]建立了单电压环构网型并网逆变器的大信号模型, 分析了电压控制环对暂态稳定性的影响,

但其缺乏暂态稳定性受电压控制环参数影响的准确描述, 且未对有功控制环和无功控制环及相关控制器参数进行讨论。

针对前述不足, 本文基于单电压环构网型并网逆变器的大信号模型, 给出了逆变器暂态稳定判据, 并结合有功控制环、无功控制环及单电压环对频率和电压的控制作用, 推导了电压、频率与功角的关系。然后采用相平面图描述了单电压环构网型并网逆变器输出电压和功角的暂态响应特性, 分析了各个控制环对暂态稳定性的影响, 并量化了控制器参数的暂态作用效果, 为优化控制器参数、增强逆变器暂态稳定性提供了指导。最后, 通过 Simulink 仿真验证了结论的正确性。

1 构网型并网逆变器数学建模

1.1 系统描述

图 1 为单电压环构网型并网逆变器的单线图。图 1 中: 电感 L_f 和电容 C_f 构成了并网逆变器的 LC 滤波器; L_g 为网侧电感; v 和 e 分别表示逆变器输出电压矢量和电网相电压矢量; ω_0 为额定角频率; V_{pcc} 为 PCC 相电压幅值; I_g 为电网电流。图 1 的功率控制环中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别表示有功功率参考值和无功功率参考值, 有功控制采用带有低通滤波器的下垂控制, 生成参考相位 θ^* , 无功控制环采用下垂控制生成参考电压幅值 V_{ref} , $\Delta\omega$ 和 ΔV 分别为功率控制环生成的角频率偏差和电压偏差。单电压环采用积分控制器生成调制电压值 V^* 。文中变量上的“ \cdot ”表示变量的一阶导, 变量上的“ $\ddot{\cdot}$ ”表示变量的二阶导。此外, 本文重点研究逆变器的暂态稳定性, 直流侧用直流电压源代替分布式电源, 通过附

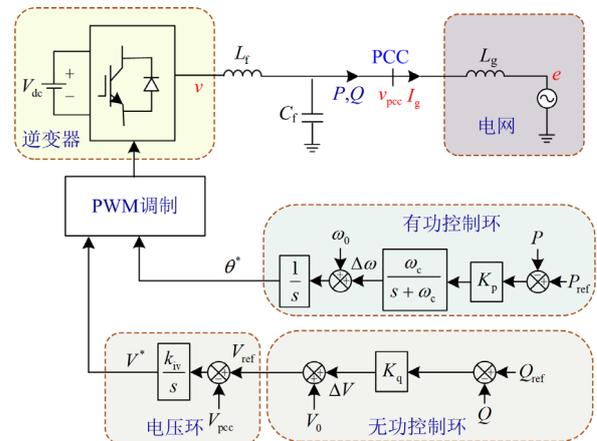


图 1 单电压环构网型并网逆变器并网单线图

Fig. 1 Grid-connected single line diagram of single voltage loop grid-forming inverter

加设备, 如前端 DC-DC 变换器, 稳定调节逆变器的直流侧电压, 因此可认为直流侧电压 V_{dc} 恒定不变。

1.2 大信号模型

在图 1 中, 单电压环构网型并网逆变器的功率控制环生成相位和电压参考值分别为

$$\theta^* = \omega_0 t + \frac{K_p}{s} \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot (P_{ref} - P) \quad (1)$$

$$V_{ref} = V_0 + K_q (Q_{ref} - Q) \quad (2)$$

式中: K_p 和 K_q 分别为有功控制和无功控制的下垂系数; ω_c 为低通滤波器截止角频率; V_0 为额定相电压幅值; P 和 Q 分别为逆变器输出有功功率和无功功率。

图 1 中单电压环生成的调制电压为

$$V^* = \frac{k_{iv}}{s} (V_{ref} - V_{pcc}) \quad (3)$$

式中, k_{iv} 是单电压环积分系数。

结合式(2)和式(3), 得到调制电压为

$$V^* = \frac{k_{iv}}{s} (V_0 + K_q (Q_{ref} - Q) - V_{pcc}) \quad (4)$$

本文定义功角 δ 为逆变器输出电压 v 与电网电压 e 相位差, 即 $\delta = \theta_v - \theta_g$, 其中 θ_v 为电压 v 的相位, θ_g 为电压 e 的相位, 且有 $\theta_v \approx \theta^*$, $\theta_g = \omega_0 t$ 。

进一步结合式(1), 可得功角和功角变化率 $\dot{\delta}$ 分别为

$$\delta = \frac{K_p \omega_c}{s^2 + \omega_c s} (P_{ref} - P) \quad (5)$$

$$\dot{\delta} = \frac{K_p \omega_c}{s + \omega_c} (P_{ref} - P) \quad (6)$$

其中, 逆变器在稳态期间有 $P = P_{ref}$ 、 $\dot{\delta} = 0$ 。以电网电压相位为参考值, 此时可认为 $e = E \angle 0$, $v = V \angle \delta$ 。 E 和 V 分别为电网和逆变器的相电压幅值。因此, P 和 Q 可以推导为

$$P = \frac{3}{2} \cdot \frac{EV}{X_{Lf} + X_g} \cdot \sin \delta \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_{Lf} + X_g} \quad (8)$$

式中, X_{Lf} 和 X_g 分别为滤波器和电网侧电抗值。

由于单电压环构网型并网逆变器控制逆变器输出电压的相位, 因此在式(7)、式(8)中均考虑了 LC 滤波器电抗的影响。为分析大扰动下的暂态稳定性, 本文基于电网侧电压暂降, 建立单电压环构网型并网逆变器大信号模型。将式(7)代入式(5)中求导可得功角二阶导数 $\ddot{\delta}$ 。

$$\ddot{\delta} = \Delta \dot{\omega} = -\omega_c \dot{\delta} + K_p \omega_c \left(P_{ref} - \frac{3}{2} \frac{EV \sin \delta}{X_{Lf} + X_g} \right) \quad (9)$$

在稳态期间, 式(9)中 $\dot{\delta} = 0$, 当电网电压暂降后, 式(9)可以反映功角暂态响应。将式(8)代入式(4)中, 得到电压变化率 \dot{V} 与功角 δ 的关系式。

$$\dot{V} = k_{iv} \left(V_0 + K_q \left(Q_{ref} - \frac{3}{2} \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_{Lf} + X_g} \right) - V_{pcc} \right) \quad (10)$$

其中 $V \neq V_{pcc}$, 因此由图 1 得到电压、电流向量关系如图 2 所示, 用以推导 V 与 V_{pcc} 之间的关系(式(11)), 其中忽略了滤波电容分流的影响, PCC 电压与电网电压之间功角差定义为 δ_{pcc} 。

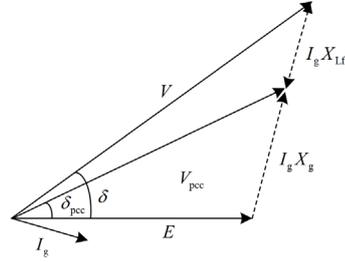


图 2 电压、电流相量图

Fig. 2 Voltage and current phasor diagram

$$V_{pcc} = \frac{\sqrt{E^2 X_{Lf}^2 + V^2 X_g^2 + 2EVX_{Lf}X_g \cos \delta}}{X_{Lf} + X_g} \quad (11)$$

此时定义状态变量 $(x_1, x_2, x_3) = (\delta, \Delta \omega, V)$, 将式(11)代入式(10)中, 建立单电压环构网型并网逆变器的大信号模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\omega_c x_2 + K_p \omega_c \left(P_{ref} - \frac{3}{2} \frac{E \cdot x_3 \cdot \sin x_1}{X_{Lf} + X_g} \right) \\ \dot{x}_3 = k_{iv} \left(V_0 + K_q \left(Q_{ref} - \frac{3}{2} \frac{x_3^2 - E \cdot x_3 \cdot \cos x_1}{X_{Lf} + X_g} \right) \right) - \\ k_{iv} \cdot \frac{\sqrt{E^2 X_{Lf}^2 + V^2 X_g^2 + 2EVX_{Lf}X_g \cos \delta}}{X_{Lf} + X_g} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, 以功角和电压为状态变量建立的大信号模型, 包含了有功控制环、无功控制环的下垂作用及电压环的积分作用, 以此为基础求解暂态期间的功角响应轨迹, 得到各个控制环对逆变器功角的作用, 进而用于分析逆变器暂态稳定性。式(12)是复杂的多元非线性方程组, 因此本文采用 Matlab 中 ode45 算法来求解大信号模型。

2 稳定平衡点分析

电网电压暂降后逆变器的暂态稳定性取决于功角 δ 的暂态响应。大扰动后, 当 δ 可以再次恢复至一个稳定值时, 表示逆变器-电网系统可维持同步; 当大扰动后 δ 趋于无穷大时, 系统不存在稳态平衡点, 逆变器暂态失稳。

图 3 为不同电网电压暂降幅度下的功角曲线, 有功功率 P 与功角 δ 成正弦变化关系, 当 $\delta = \delta_m$ 、 $P = P_{\max 1}$, 根据式(7), 此时最大传输功率 P_{\max} 与电网电压、线路阻抗及逆变器输出电压有关。并网逆变器初始稳定平衡点为 a 点, 蓝色与红色曲线表示故障后功角曲线, 其是否存在稳定平衡点是本文所关注的。例如, 当电网电压暂降至 0.63 p.u. 时, 平衡点由 a 点切换到 f 点, b 点和 b_1 点对应功角分别为 δ_b 和 δ_{b1} 。若发生大扰动后功角越过不稳定平衡点 δ_{b1} 的位置, 有 $P < P_{\text{ref}}$, 功角发散, 与电网失去同步, 因此 δ_{b1} 是此时的临界功角, 允许的最大功角超调范围为 $\Delta\delta_b$ 。当电网电压暂降至 0.6 p.u., 最大传输功率 $P_{\max 3} < P_{\max}$, $\dot{\delta} > 0$, 工作点由 a 点降到 f_1 点后由于不存在稳定平衡点, 功角会趋于无穷大。大扰动后功角曲线若不存在平衡点, 功角必然会失稳。

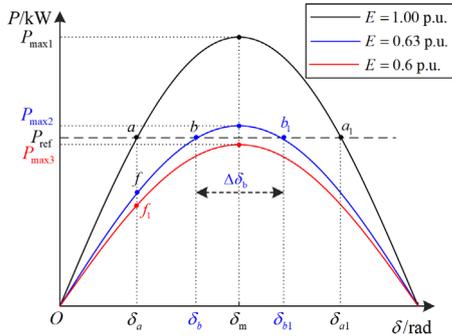


图 3 不同电网电压暂降后的 P - δ 曲线

Fig. 3 P - δ curves in different grid voltage sag

图 4 为不同电网电压暂降幅度下的相平面图, 用以直观量化大扰动后的功角响应, 分析功角的超调量, 判断其是否暂态失稳。系统参数如表 1 所示, 初始控制器仿真参数基于有功-频率、无功-电压下垂关系进行设计, 以保证并网逆变器功率、电压、频率稳定。当电网电压降至 0.63 p.u., 功角由 a 点变化越过 b_1 点对应临界功角 δ_{b1} , 功角发散, 无法稳定至 b 点, 并网逆变器失稳。当电网电压暂降至 0.6 p.u. 时, 不存在平衡点, 功角失稳。

从上述分析可以得到单电压环构网型并网逆变器暂态稳定的两个关键判据: 1) 大扰动后存在平衡

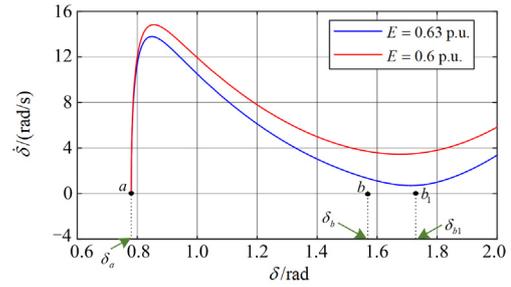


图 4 不同电网电压暂降下的相平面图

Fig. 4 Phase portrait for different grid voltage sag

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

| 参数 | 数值 | 标么值/p.u. |
|---------------------------|---------------------|----------|
| 额定容量 S_N | 60 kW | 1.0 |
| 有功功率参考值 P_{ref} | 30 kW | 0.5 |
| 无功功率参考值 Q_{ref} | 0 kvar | 0 |
| 基准电压 V_0 | 311 V | 1.0 |
| 电网电压 E | 311 V | 1.0 |
| 电网额定角频率 ω_0 | 314 rad/s | 1.0 |
| 网侧电感 L_g | 9.5 mH | 1.23 |
| 滤波电感 L_f | 1.35 mH | 0.18 |
| P - δ 下垂系数 K_p | 0.28 ω_0/S_N | 0.28 |
| 低通滤波器截止角频率 ω_c | 1.5 ω_0 | 1.5 |
| Q - V 下垂系数 K_q | 0.018 V_0/S_N | 0.018 |
| 电压控制环积分系数 k_{iv} | 10 | — |

点, 即要求电网电压暂降后逆变器的最大传输功率大于参考功率值; 2) 要求功角暂态响应不越过临界功角, 即功角超调量在允许的范围内。以上两个判据用于稳定平衡点分析, 本文将基于这两个关键判据对单电压环构网型并网逆变器进行暂态稳定性分析。

3 暂态稳定性分析

3.1 有功控制环

有功控制环控制逆变器与电网之间的相位同步, 因此首先对有功控制环进行讨论。有功控制环结构如图 1, 有功参考值与功角之间呈现二阶传递函数特性, 下垂系数 K_p 和低通滤波器截止角频率 ω_c 均会影响逆变器的暂态行为。文献[8,19]证明了有功控制环阻尼比与功角超调的负相关关系, 在此基础上为量化功角超调分析阻尼比, 简化式(7)可得

$$P = \frac{3}{2} \cdot \frac{EV}{X_{L_f} + X_g} \cdot \sin \delta \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{EV}{X_{L_f} + X_g} \cdot \delta$$

$$\Rightarrow G_1 = \frac{P}{\delta} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{EV}{X_{L_f} + X_g}$$
(13)

式中, G_1 为有功控制环中有功功率和功角之间的比

例系数, 由主电路参数决定。

结合式(5)和式(13), 可得有功控制环的功角暂态特性表达式为

$$\delta = \frac{K_p \omega_c}{s^2 + \omega_c s + K_p \omega_c G_1} \cdot P_{\text{ref}} \quad (14)$$

有功控制环阻尼比 ξ 为

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_c}{K_p G_1}} \quad (15)$$

在式(15)中, 阻尼比由 ω_c 、 K_p 、 G_1 决定, 与 ω_c 成正比, 与 K_p 、 G_1 成反比, 这意味着通过设计较大的 ω_c 、较小的 K_p 可以增大阻尼比, 从而抑制 δ 的暂态响应超调, 有利于逆变器暂态稳定。

为探究功角响应, 图 5 中以电网电压暂降至 0.63 p.u. 为例给出不同下垂系数和低通滤波器截止角频率下的相平面图。图 5 中 a 点为初始平衡点, 对应功角为 δ_a , 故障后存在平衡点 b 和 b_1 , 对应功角为 δ_b 和 δ_{b1} , 满足暂态稳定判据 1)。初始条件下 ($K_p = 0.28$ p.u., $\omega_c = 1.5$ p.u.) 电网电压暂降后的相轨迹如红色虚线所示, δ 越过 δ_{b1} 趋于无穷大, 违反暂态稳定判据 2), 功角发散; 当 K_p 减小至 0.18 p.u., ω_c 不变, 相轨迹如蓝色实线所示, 功角恢复稳定, 功角变化率 $\dot{\delta}$ 减小, 功角超调量减小为 δ_{bm} , 符合暂态稳定判据, 并网逆变器维持暂态稳定; 当 K_p 降为 0.10 p.u. 时, 相轨迹如粉色实线所示, 功角变化率 $\dot{\delta}$ 进一步减小, 功角无超调, 功角稳定。因此随着 K_p 减小, 功角超调减小, 逆变器暂态稳定性增强。令 $K_p = 0.18$ p.u.、 $\omega_c = 1.0$ p.u., 轨迹如粉色虚线所示, 此时功角稳定, 在此基础上 ω_c 减小至 0.5 p.u., 相轨迹如蓝色虚线所示, 功角超调增大。因此减小低通滤波器截止角频率, 功角易产生振荡, 不利于并网逆变器暂态稳定。

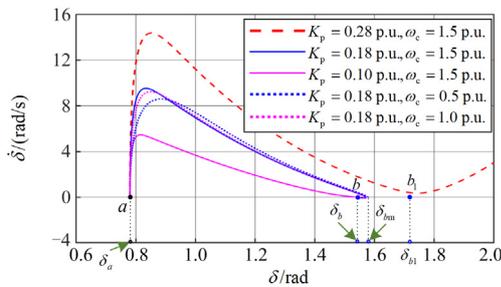


图 5 不同 K_p 和 ω_c 下的相平面图

Fig. 5 Phase portrait for different K_p and ω_c

从上述分析可知, 有功控制环阻尼比会影响逆变器暂态稳定性。故障后若存在稳定平衡点, 通过减小 K_p 、增大 ω_c , 会增大阻尼比, 有效抑制功角振荡。即在满足暂态稳定性判据 1) 的基础上, 有助于单电压环构网型并网逆变器满足暂态稳定判据 2), 使其维持暂态稳定。因此, 较小的 K_p 和较大的 ω_c 有利于提高并网逆变器暂态稳定性, 这一结论可为控制器参数设计提供参考。

3.2 无功控制环

无功控制环用于生成 PCC 处参考电压, 其控制带宽远大于电压环, 因此分析无功控制环时, 可认为无功控制环对功角的作用不受电压环的影响, 有 $V_{\text{ref}} = V_{\text{pcc}}$ 。结合式(2)和式(8), 可得 PCC 处电压为

$$V_{\text{pcc}} = V_{\text{ref}} = V_0 + K_q \left(Q_{\text{ref}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_{\text{Lf}} + X_g} \right) \quad (16)$$

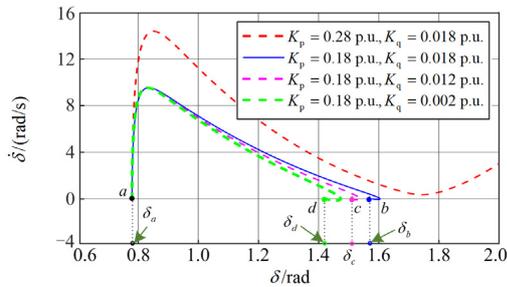
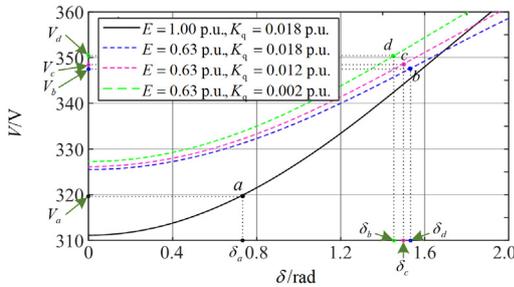
由于滤波器电抗的存在, V_{pcc} 不同于逆变器输出电压幅值 V 。因此将式(11)代入式(16)中可以得到逆变器输出电压与功角的关系式, 如式(17)所示。

$$V_0 + K_q \left(Q_{\text{ref}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X_{\text{Lf}} + X_g} \right) = \frac{\sqrt{E^2 X_{\text{Lf}}^2 + V^2 X_g^2 + 2EV X_{\text{Lf}} X_g \cos \delta}}{X_{\text{Lf}} + X_g} \quad (17)$$

式(17)给出了 V - δ 的隐函数表达式, 可以反映逆变器输出电压与功角的关系, 用于探究无功控制环对逆变器输出电压的暂态影响。

根据式(12)、式(17), 图 6 给出了当电网电压暂降至 0.63 p.u. 时不同 K_q 下的相平面图和 V - δ 曲线。图 6(a)中, 初始条件下电网电压暂降后的相轨迹如红色虚线所示, 逆变器暂态失稳, 减小 K_p , 故障后相轨迹为蓝色实线, 逆变器暂态稳定, b 点为新的稳定平衡点。当 K_q 减小至 0.012 p.u., 相轨迹如粉色虚线所示, 稳定工作点变至 c 点; K_q 减小至 0.002 p.u., 相轨迹如绿色虚线所示, 稳定工作点变至 d 点。故障后不同 K_q 对应的稳态功角分别为 δ_b 、 δ_c 、 δ_d 。不同 K_q 下的 V - δ 曲线如图 6(b)所示, 不同平衡点对应电压分别为 V_b 、 V_c 、 V_d , 正常状态下逆变器输出电压为 V_a 。故障后逆变器输出电压有 $V_a < V_b < V_c < V_d$, K_q 越小, 输出电压越大。因此, 故障后电压的变化及无功控制环参数对电压的暂态作用有: 1) 当电网电压发生暂降时, 逆变器输出电压大幅提高; 2) 随着无功下垂系数 K_q 的减小, 使

得 V - δ 曲线整体抬高。其中, 故障后逆变器输出电压增大, 是因为故障期间产生较大短路电流, PCC 处电压幅值受电压环控制几乎不变, 根据电压电流矢量关系可知逆变器输出电压会增大, 且随着 K_q 减小逆变器输出电压幅值提升, 进而增加最大传输功率, 抬升功角曲线, 可以维持故障后平衡点的存在, 这有助于满足暂态稳定判据 1)。

(a) 不同 K_q 下的相平面图(b) 不同 K_q 下的 V - δ 曲线图 6 不同 K_q 下暂态期间功角响应与电压响应曲线Fig. 6 Curve of power angle response and voltage response with different K_q during transient period

由上述分析得到, 无功控制环改变逆变器输出电压进而影响最大传输功率, 且 K_q 越小, V 越大, 增加最大传输功率, 使得故障后更易产生平衡点, 满足暂态稳定判据 1)。因此, 较小的 K_q 有利于电压支撑, 从而有助于维持逆变器的暂态稳定。同时, 上述分析仅描述故障前后电压幅值的改变, 无法描述电压响应轨迹。

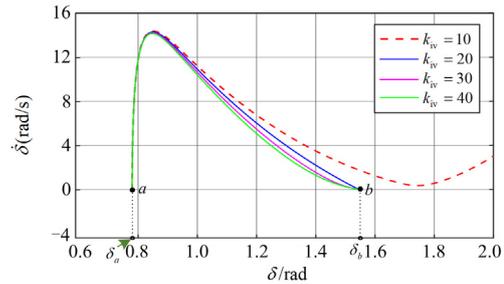
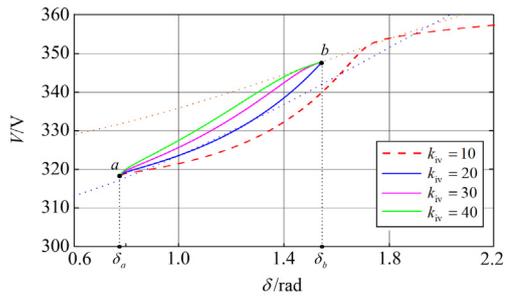
3.3 电压控制环

针对单电压环控制, 通过式(12)的大信号模型来分析积分器系数对电压和功角暂态响应的影响。

当电网电压暂降至 0.63 p.u. 时, 不同 k_{iv} 下的相轨迹和逆变器输出电压变化轨迹如图 7 所示。如图 7(a) 所示, 初始条件 ($k_{iv} = 10$) 下相轨迹如红色虚线所示, 功角越过临界角趋于无穷大, 违反暂态稳定判据 2), 逆变器暂态失稳; 当 k_{iv} 增大至 20 时, 功角变化率减小, 有效抑制了功角超调, 逆变器恢

复功角稳定, b 点为新的稳定平衡点, 对应的功角为 δ_b ; 当 k_{iv} 继续增大到 30、40 时, 电网电压暂降后的稳定平衡点不变, 但 δ 随 k_{iv} 的增大而减小, 不产生功角超调。

图 7(b) 为暂态期间 V 的变化轨迹, 其中蓝色和橙色点划线分别表示故障前后的 V - δ 曲线。由图 7(b) 可知, 初始参数下由于逆变器暂态失稳, 其输出电压同样无法维持稳定。 k_{iv} 增大为 20、30、40, 电压暂态响应轨迹分别如图 7(b) 中的蓝色、粉色和绿色实线所示, 电压变化率增大, 这是由于单电压环积分器作用影响电压的跟踪速度, k_{iv} 越大, 逆变器输出电压响应越快, 故障后逆变器输出电压变化率越大, 实现快速电压支撑。根据式(6), V 的快速响应会加快功率输出, 进而减小 δ , 抑制功角超调, 使其满足暂态稳定判据恢复暂态稳定。同时, 积分器只改变电压的变化率而不影响稳态输出, 改变 k_{iv} 并不会影响电网电压暂降后逆变器输出电压幅值, 不改变故障后稳定功角。

(a) 不同 k_{iv} 下的相平面图(b) 不同 k_{iv} 下的电压响应轨迹图 7 不同 k_{iv} 下暂态期间功角响应与电压响应曲线Fig. 7 Curve of power angle response and voltage response with different k_{iv} during transient period

根据上述分析可知单电压环可以影响电压变化率, 从而抑制功角超调。通过选择较大的 k_{iv} 来增大逆变器输出电压变化率, 可以加快暂态期间功率输出, 抑制暂态期间的功角超调, 使其满足暂态稳定判据, 保证大扰动下的暂态稳定性。

4 仿真分析

本文以图 1 给出的单电压环构网型逆变器并网单线图对象，基于 Matlab/Simulink 电磁暂态平台验证上述对单电压环构网型并网逆变器的暂态分析。系统参数如表 1 所示，给定功率参考值 $P_{ref} = 30 \text{ kW}$ 、 $Q_{ref} = 0 \text{ kvar}$ 。表 2 为多组控制器参数，并网系统在 5 s 时发生电网电压暂降。

表 2 仿真控制器参数

Table 2 Simulink controller parameters

| 参数 | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 | 案例 4 |
|------------------------|-------|-----------|-------|-------|
| $E/\text{p.u.}$ | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.63 |
| $K_p/\text{p.u.}$ | 0.28 | 0.18 | 0.18 | 0.28 |
| $K_q/\text{p.u.}$ | 0.018 | 0.018 | 0.012 | 0.018 |
| $\omega_c/\text{p.u.}$ | 1.5 | 1.5/(0.5) | 1.5 | 1.5 |
| k_{iv} | 10 | 10 | 10 | 20 |

1) 案例 1: 初始参数

以案例 1 中的控制器参数为初始参数，图 8 是初始参数下电网电压跌落至 0.63 p.u. 时的仿真结果，由图 8 可以看出，此时功角振荡发散，电压和电流波形振荡，无法正常输出有功功率和无功率，逆变器与电网失去同步。初始参数下电网电压暂降至 0.63 p.u. 时，逆变器会发生暂态失稳。由图 8 可知，故障前相电压幅值为 310 V，短路电流幅值为 68.3 A，有功功率输出为 30 kW，初始功角为 0.81 rad。

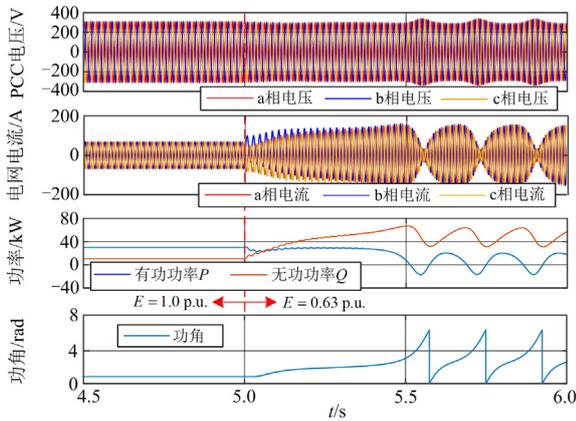


图 8 案例 1 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of Case 1

2) 案例 2: 有功控制环参数优化

优化有功控制环的下垂系数 K_p 和截止角频率 ω_c 得到案例 2 的仿真结果，如图 9、图 10 所示。案例 2 在案例 1 的初始参数下分别减小 K_p ，增大 ω_c 。由图 9、图 10 可知，逆变器在故障后恢复暂态稳定，故障后稳定功角为 1.64 rad。

图 11 为不同 K_p 、 ω_c 下仿真得到的功角响应曲线。由图 11 可以看出，当 K_p 越小， ω_c 越大时，功角响应由欠阻尼状态变为过阻尼状态，功角超调量减小。仿真结果验证了有功控制环在暂态期间对单

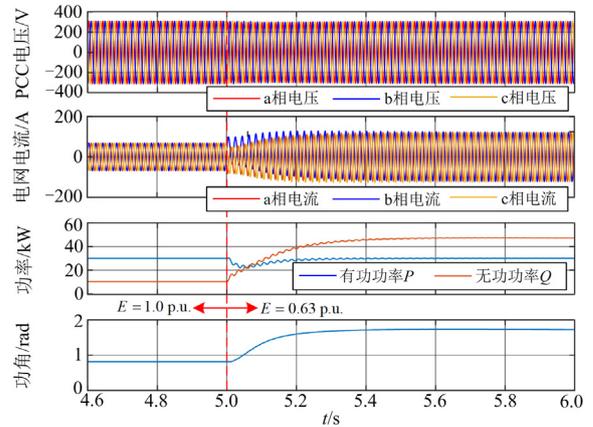


图 9 案例 2 的仿真结果($\omega_c = 1.5 \text{ p.u.}$)

Fig. 9 Simulation results of Case 2 ($\omega_c = 1.5 \text{ p.u.}$)

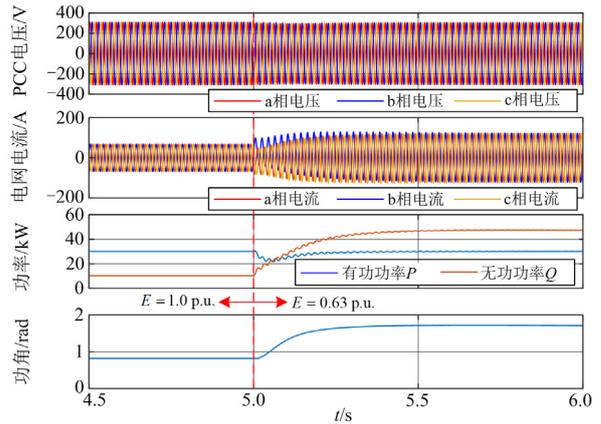


图 10 案例 2 的仿真结果($\omega_c = 0.5 \text{ p.u.}$)

Fig. 10 Simulation results of Case 2 ($\omega_c = 0.5 \text{ p.u.}$)

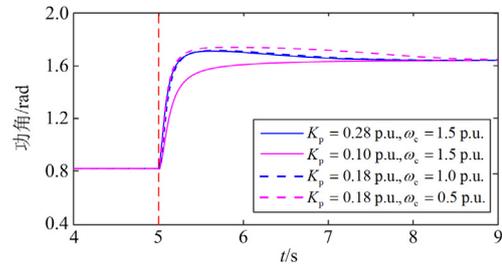


图 11 不同 K_p 、 ω_c 下的功角响应

Fig. 11 Power angle response of inverter with different K_p and ω_c

电压环构网型并网逆变器功角超调量的影响，通过减小 K_p ，增大 ω_c ，可以优化功角阻尼特性，抑制

功角超调, 增强了逆变器的暂态稳定性。

3) 案例 3: 无功控制环参数优化

在初始参数的基础上减小无功控制环下垂系数 K_q , 得到案例 3 的仿真结果, 如图 12 所示。由图 12 电压波形可以看出, PCC 处电压几乎不变, 功角过渡至 1.59 rad, 无功功率输出大幅增加, 有功功率输出恢复稳定, 逆变器与电网保持同步稳定。对比案例 2, 稳定功角值发生变化, 意味着逆变器处于不同的稳定平衡点, 与前面分析一致。

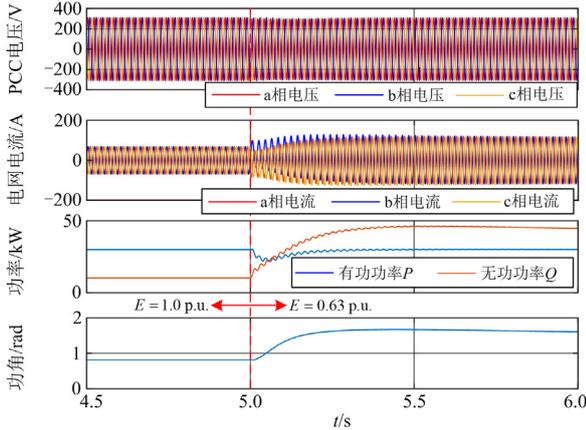


图 12 案例 3 的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of Case 3

图 13 为案例 3 的电流幅值变化曲线, 5 s 时发生电网电压跌落, 图 13 中反映了故障后短路电流的大小。故障前短路电流幅值为 68.3 A, 发生故障后短路电流幅值增大至 114.5 A, PCC 处电压几乎不变, 导致逆变器输出电压幅值增大, 如图 14 所示。

图 14 在案例 3 的基础上给出了不同 K_q 下的逆变器输出相电压幅值变化。由图 14 可以看出, 在 5s 时电网电压暂降, 逆变器输出相电压幅值增加, 且 K_q 越小, 故障后输出电压幅值越高, 暂态稳定性增强, 证明减小 K_q 有利于支撑逆变器输出电压幅值, 增强逆变器的暂态稳定性。

4) 案例 4: 单电压环参数优化

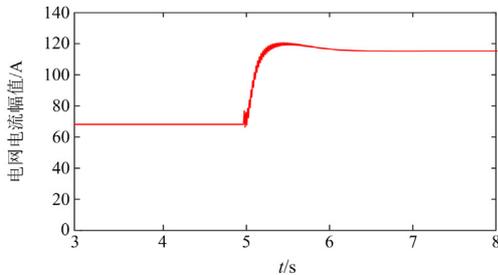


图 13 案例 3 的短路电流幅值变化

Fig. 13 Short-circuit current amplitude changes of Case 3

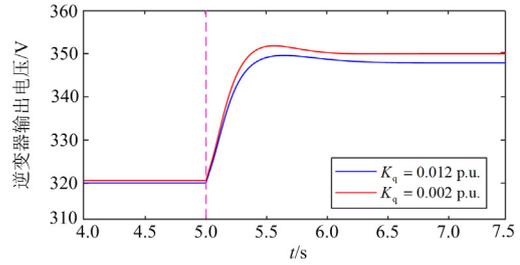


图 14 不同 K_q 下的逆变器输出电压幅值

Fig. 14 Amplitude of inverter output voltage with different K_q

案例 4 增大了单电压环积分器的积分系数, 得到的仿真波形如图 15 所示, 对比案例 1, 当 k_{iv} 由 10 增大到 20, 5 s 功角后增大至 1.64 rad, 此时并网逆变器在电网电压暂降后可以维持暂态稳定。同时, 案例 4 中故障后的功角值与案例 2 一致, 验证了增大单电压环积分系数可以有效增强并网逆变器暂态稳定性, 且不改变稳定后功角值。

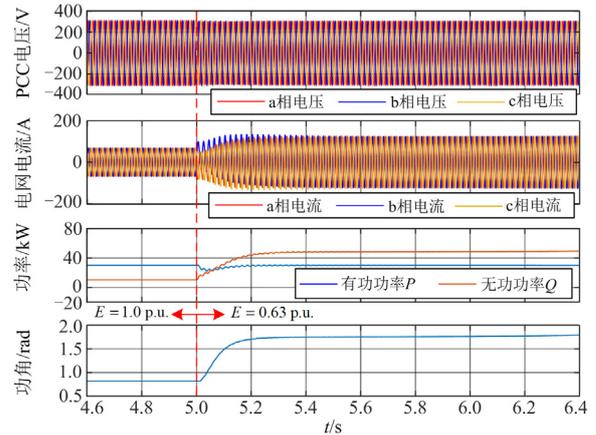


图 15 案例 4 的仿真结果

Fig. 15 Simulation results of Case 4

图 16 为不同 k_{iv} 下的逆变器输出相电压幅值的仿真结果。由图 16 可以看出, 当 $k_{iv} = 10$ 时, 5 s 电网电压跌落后, 逆变器输出电压由于功角失稳导致同步振荡, 当 k_{iv} 增大到 20、30、40 时, 故障后逆变器输出电压均增大到同一稳定值, 并网系统恢复

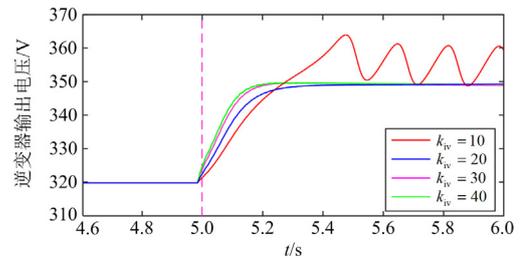


图 16 不同 k_{iv} 下的逆变器相电压幅值

Fig. 16 Amplitude of inverter phase voltage with different k_{iv}

暂态稳定；同时不同 k_{iv} 下， k_{iv} 越大，故障后电压变化率越大，电压得以快速支撑，加快功率输出抑制了功角超调。仿真结果验证了单电压环的暂态影响，且证明了较大的 k_{iv} 有利于逆变器暂态稳定。

上述 4 个案例通过多组仿真参数的仿真结果，验证了通过优化有功控制环、无功控制环和单电压环的控制器参数可有效增强单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性。

5 结论

本文对采用单电压环的构网型并网逆变器的暂态稳定性进行了分析，揭示了电网电压跌落并网逆变器的控制环暂态作用机理和控制器参数的暂态影响，得到的结论如下。

1) 单电压环构网型并网逆变器的暂态稳定性由功角暂态响应决定。采用带有低通滤波器下垂控制的构网型并网逆变器，大扰动后平衡点的存在及功角阻尼特性是判断暂态稳定的关键判据。

2) 有功控制环的阻尼比影响暂态期间功角超调量。通过减小下垂系数，增大低通滤波器截止角频率，可以减小功角超调量，有利于逆变器暂态稳定。

3) 无功控制环在电网电压跌落影响逆变器输出电压幅值，从而影响故障后的功角变化。较小的无功控制环下垂系数在故障后会产生更大的逆变器输出电压，增强逆变器暂态稳定性。

4) 单电压环在暂态期间影响逆变器输出电压变化率。采用较大的积分器增益，会增大电压变化率，加快暂态期间功率输出，从而减小功角变化率，抑制功角超调，增强逆变器暂态稳定性。

本文重点分析了单电压环构网型并网逆变器暂态性，探究了控制结构的暂态影响，并分别对单个控制器参数进行优化。逆变器控制器参数的整体优化策略和逆变器限流措施对暂态稳定的影响也是值得研究的课题，未来仍需进一步研究整体系统动力学特征，在此基础上设计更为可靠的构网型控制方法和整体参数优化策略。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 54-61.
- [3] 徐耀, 朱玲, 吕振宇, 等. 虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 1-11.
XU Yao, ZHU Ling, LÜ Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 1-11.
- [4] 许诤翊, 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.
- [5] ZHAO F, WANG X, ZHU T. Power dynamic decoupling control of grid-forming converter in stiff grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9073-9088.
- [6] 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.
- [7] XIONG X, WU C, HU B, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7820-7831.
- [8] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 76-85.
DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 76-85.
- [9] CHAKRABORTY S, PATEL S, SALAPAKA M V. Robust and optimal single-loop voltage controller for grid-forming voltage source inverters[C] // 2020 IEEE Power and Energy Conference at Illinois, February 27-28, 2020, Champaign, USA: 1-7.
- [10] DU W, CHEN Z, 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.

- [11] ZHOU Z, PUGLIESE S, LISERRE M. Stability enhancement for single-loop voltage controlled voltage-source converters with LC-filter[C] // IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 13-16, 2021, Toronto, Canada: 1-6.
- [12] SINGH A K, SEETHALEKSHMI K. Comparative analysis of primary microgrid control through adaptive VSG based multi-loop and single loop configuration[C] // 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, August 9-12, 2023, Bhubaneswar, India: 1-6.
- [13] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [14] 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.
- [15] LI Y, LU Y, YANG J, et al. Transient stability of power synchronization loop based grid forming converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2843-2859.
- [16] DENG H, QI Y, FANG J, et al. A robust low-voltage-ride-through strategy for grid-forming converters based on reactive power synchronization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 346-357.
- [17] 余墨多, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于光伏电站暂态特性的自适应暂稳控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 512-522.
YU Moduo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Transient stability enhancement with an adaptive control scheme for photovoltaic plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 512-522.
- [18] HUANG S, YAO J, PEI J, et al. Transient synchronization stability improvement control strategy for grid-connected VSC under symmetrical grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 4957-4961.
- [19] FU X, SUN J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.
- [20] PAN D, WANG X, LIU F, 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.
- [21] 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.
- [22] 李明飞, 吴在军, 全相军, 等. 计及阻尼特性的构网型并网逆变器暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 198-207.
LI Mingfei, WU Zaijun, QUAN Xiangjun, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming grid-connected inverter considering damping characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 198-207.
- [23] XIONG X, 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.
- [24] LIU T, WANG X. Transient stability of single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6158-6162.

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-02-05

作者简介:

王泽昆(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网技术; E-mail: zekunwang@ncepu.edu.cn

程鹏(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为新能源电力系统、新能源动力系统。E-mail: p.cheng@ncepu.edu.cn

(编辑 姜新丽)