

提升对称故障下LVRT期间暂态同步稳定性的电流内环协同控制策略

孙黎, 智天阳, 刘洪波, 马成廉

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012)

摘要:【目的】跟网型换流器(grid-following converter, GFL)被广泛应用于新能源并网系统。电网发生故障引起电压跌落时,系统进入低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)过程。传统锁相环(phase-locked loop, PLL)的二阶模型因忽略电流暂态过程,难以准确描述LVRT期间系统的动态特性,导致暂态同步稳定性的提升效果受限。为此,针对对称故障场景,提出一种适用于LVRT过程的电流内环协同控制策略,以增强系统暂态同步稳定性。【方法】基于PLL四阶动态方程,结合暂态能量函数法,分析PLL输出频率突变以及电流内环与PLL耦合作用对系统暂态同步稳定性的影响,并设计相应的控制策略:根据最优阻抗比动态调整电流参考值,以抑制故障期间暂态能量累积;通过在电流内环前馈解耦项中引入频率偏差补偿机制,加速暂态能量耗散过程。两者协同作用,提升系统在LVRT期间的暂态同步稳定性。【结果】PSCAD/EMTDC对称故障时域仿真结果表明:故障瞬间PLL输出频率突变量与电网电压跌落幅值成正比,增大系统失稳风险;所提控制策略能够有效抑制故障期间PLL输出频率偏差,显著降低虚拟功角首摆幅度,缩短故障清除后系统恢复时间,在不同电网参数下均表现出良好的适应性。【结论】所提电流内环协同控制策略,能够在对称故障期间有效抑制暂态能量累积,在故障清除后加速暂态能量耗散,有效提升了GFL并网系统在此类LVRT过程中的暂态同步稳定性。

关键词:跟网型换流器(GFL);锁相环(PLL);电流内环;暂态同步稳定性;低电压穿越(LVRT)

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)02-0028-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.02.003

Coordinated Control Strategy for Current Inner Loops to Enhance Transient Synchronization Stability During LVRT Under Symmetrical Faults

SUN Li, ZHI Tianyang, LIU Hongbo, MA Chenglian

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: [Objective] Grid-following converters (GFL) are widely employed in renewable energy grid integration systems. When grid faults cause voltage sags, the system enters a low voltage ride-through (LVRT) process. The conventional second-order model of the phase-locked loop (PLL) fails to accurately capture the dynamic characteristics of the system during LVRT due to its neglect of the transient current response, thereby limiting the improvement of transient synchronization stability. To address this issue, a current inner-loop collaborative control strategy suitable for the LVRT process is proposed to enhance the transient synchronization stability of the system in the event of symmetrical faults. [Methods] Based on the fourth-order dynamic model of the PLL and combined with the transient energy function method, this paper analyzes the impact of abrupt frequency variations at the PLL output and the coupling effect between the current inner loop and the PLL on the transient synchronization stability of the system. A corresponding control strategy is designed: the current reference value is dynamically adjusted according to the optimal impedance ratio to suppress the accumulation of transient energy during faults; meanwhile, a frequency deviation compensation mechanism is introduced into the feedforward decoupling term of the current inner loop to accelerate the dissipation of transient energy. The synergistic action of these two

measures enhances the transient synchronization stability of the system during LVRT. [Results] PSCAD/EMTDC time-domain simulation results in the event of symmetrical faults demonstrate that the abrupt change in PLL output frequency at the instant of fault is proportional to the magnitude of the grid voltage sag, leading to increased risk of system instability. The proposed control strategy effectively suppresses the PLL output frequency deviation during the fault, significantly reduces the first-swing amplitude of the virtual power angle, and shortens the system recovery time after fault clearance. It demonstrates satisfactory adaptability under various grid parameters. [Conclusions] The collaborative current inner-loop control strategy proposed in this paper effectively suppresses transient energy accumulation during grid faults and accelerates transient energy dissipation after fault clearance, thereby significantly enhancing the transient synchronization stability of GFL grid integration systems during LVRT under symmetrical faults.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52477178).

KEYWORDS: grid-following converter (GFL); phase-locked loop (PLL); current inner loop; transient synchronization stability; low-voltage ride-through (LVRT)

0 引言

在“双碳”目标的驱动下,以新能源为主体的新型电力系统^[1-2]正在加速构建。风能、光伏等可再生能源主要通过并网换流器接入电网,其中,跟网型换流器(grid-following converter, GFL)凭借其在较高电网短路比条件下的良好稳定性,被广泛应用于强电网系统^[3]。GFL 依赖于锁相环(phase-locked loop, PLL)实现并网同步,当电网发生故障导致电压跌落时,系统进入低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)过程,存在暂态同步失稳风险。

目前,针对 GFL 并网系统暂态同步稳定性的研究主要基于 2 类动态模型。第一类研究采用二阶模型,该模型忽略了电流内环的动态响应过程,将 GFL 并网系统的动态特性类比为单机-无穷大系统的转子同步动态特性。在此框架下,发展了多种经典分析方法。应用等面积法则及其改进方法揭示 GFL 并网系统的暂态失稳机理并评估其稳定域^[4-9];应用相轨迹法进行稳定性分析和自适应控制设计^[10-12];应用平方和规划法^[13]、李雅普诺夫稳定性理论^[14-15]和线性矩阵不等式^[16-17]构建估计吸引域。这些研究深化了对 PLL 主导的暂态同步稳定性的理解,但核心局限在于假设电流内环始终处于稳态,即电流实际值能瞬时精确跟踪电流参考值,未能考虑实际系统中电流暂态过程及其与 PLL 的相互作用。

第二类研究致力于构建更精确的模型,通过建立包含电流环动态的 GFL 模型,揭示了 PLL 与电流内环之间的复杂耦合机制。文献[18]应用规范形方法保留了系统的非线性阻尼特性。文献[19-23]指出 PLL 输出频率突变会显著影响电流的动态响应,而电流的动态变化又通过电网阻抗反馈至 PLL 输入,形成交叉耦合回路。这种耦合作用一方面在系统首摆过程中引入额外的加速效应,加剧了失稳风险^[19-22];另

一方面,在特定条件下能够加速暂态能量的耗散^[23]。这些研究指出准静态二阶模型难以准确描述 GFL 并网系统在故障中的复杂动态过程,在控制策略设计方面存在不足,需要采用更完备的四阶模型以准确刻画系统动态过程并设计有效的控制策略。

尽管上述研究深化了对耦合机理的理解,但针对 LVRT 过程的控制策略研究较少。具体而言,文献[18]侧重于强非线性系统的精确解析与稳定边界计算,其核心贡献在于提供了一种分析方法,而在协同控制策略方面的研究并非其重点。文献[19]通过类比同步发电机转子运动揭示了控制环节的交互影响,但其模型本质上仍是忽略电流暂态的二阶模型,因而难以准确描述 LVRT 期间的动态过程。文献[20]提出的等效 PLL 模型为小扰动稳定性及低频动态分析提供了框架,然而对于 LVRT 期间大扰动引发的暂态同步稳定问题,其适用性尚需进一步探讨。文献[21-22]明确指出电流暂态过程不可忽略,然而,文献[21]主要贡献在于量化电流暂态对稳定性评估的影响,并未延伸出系统性的 LVRT 控制策略;文献[22]则聚焦于通过有源阻尼实现 PLL 与电流环的解耦,其控制目标在于抑制小信号振荡,提升小扰动稳定性。文献[23]虽引入了暂态能量函数法来分析耦合作用的耗散特性,但其控制策略设计主要侧重于加速能量耗散,对于抑制故障期间暂态能量积累以及协同控制策略考虑不足。文献[24]重点阐述了电网阻抗比对暂态同步稳定性的影响规律,并指出了在特定稳态工作点下存在一个最优阻抗比,尚未将该原理发展为适用于 LVRT 过程的电流参考值动态调整策略。

综上所述,目前关于 GFL 并网系统暂态同步稳定性的研究主要关注 2 个方面:一是构建 PLL 二阶模型,通过类比同步发电机转子动态特性,阐述 PLL 主导的同步失稳机理;二是构建更精确的四阶模型,揭

示 PLL 与电流内环之间的耦合机制。而在 LVRT 过程中,针对影响暂态同步稳定性的 2 个关键因素:PLL 输出频率突变及 PLL 与电流内环耦合作用,系统性研究仍不充分,有效的协同控制策略较为欠缺。

为此,本文基于 GFL 并网系统四阶模型,分析 LVRT 过程中影响暂态同步稳定性的 2 个关键因素:电网故障瞬间 PLL 输出频率突变现象以及电流内环与 PLL 之间的耦合作用机制。在理论分析基础上,提出一种电流内环协同控制策略。该策略包括 2 个核心部分:一是依据电网最优阻抗比实时调整 LVRT 期间的电流参考值,优化系统工作点,以抑制频率突变引入的初始动能;二是在电流内环前馈解耦项中引入频率偏差补偿,以增强电流环与 PLL 耦合作用中的负反馈效果,加速暂态能量的耗散过程。两者协同作用,在 LVRT 全过程(故障发生、持续及清除)中提升系统的暂态同步稳定性。最后,基于 PSCAD/EMTDC 的时域仿真验证所提控制策略的有效性。

本文基于 PLL 四阶模型与暂态能量函数法进行理论分析,并据此设计协同控制策略。研究的增量贡献主要体现在对现有研究的深化与整合:首先,将文献[24]提出的稳态最优阻抗比关系推广为适用于 LVRT 动态过程的实时控制策略。具体而言,将原最优阻抗比关系中固定的电网参数修正为故障期间的动态等效阻抗,并结合 LVRT 无功支撑要求,构建电流参考值的动态调整机制。该机制能够在故障期间优化系统运行点,促使电网电感与电阻分别引入的正、负反馈效应相互抵消,从而有效抑制暂态能量积累。进而,引入并改进文献[23]中利用电流内环前馈以增强能量耗散的思想,通过引入频率偏差补偿,加速故障清除后暂态能量耗散过程。最终,通过整合上述 2 种机制,构建协同控制框架,实现在故障期间抑制暂态能量积累,在故障清除后加速暂态能量耗散,从而提升系统在 LVRT 过程中的暂态同步稳定性。

鉴于对称故障是分析暂态同步稳定性机理的典型且关键场景,为聚焦核心问题,本文主要针对三相接地短路导致的对称电压跌落展开研究,所提控制策略在不对称故障下的适应性将是未来重要的研究方向。

1 对称故障下基于四阶模型的 GFL 暂态同步失稳机理分析

1.1 计及电流暂态的 GFL 四阶模型构建

GFL 并网系统如图 1 所示。图 1 中: i_{dc} 、 C_{dc} 分别为直流侧输入电流、直流侧电容; i_{abc} 为 GFL 输出电流瞬

时值; R_f 、 L_f 分别为滤波电阻、滤波电感; $Z_1 = R_1 + j\omega_{pll}L_1$, $Z_2 = R_2 + j\omega_n L_2$, Z_1 、 R_1 、 L_1 分别为从并网点到故障点的阻抗、电阻、电感, Z_2 、 R_2 、 L_2 分别为从故障点到电网端的阻抗、电阻、电感, ω_{pll} 为 PLL 输出角频率, ω_n 为电网角频率; $Z_g = Z_1 + Z_2$ 为电网阻抗; Z_k 为 F 点发生三相接地短路故障时故障点接地阻抗, $Z_k = R_k + j\omega_{pll}L_k$, R_k 、 L_k 分别为接地电阻、接地电感; $\dot{U}_g = U_g \angle \delta_g$ 为电网电压相量, U_g 、 δ_g 分别为其幅值和相角; E_{vscd} 、 E_{vscq} 分别为电压源换流器(voltage source converter, VSC)端电压的 d 、 q 轴分量; u_{fd} 、 u_{fq} 分别为 PCC 处电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 GFL 输出电流的 d 、 q 轴分量; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 、 q 轴电流参考值; $\dot{U}_t = U_t \angle \delta_{pll}$ 为 PCC 处的电压相量; U_t 、 δ_{pll} 分别为其幅值和相角; U_{dc} 为直流电压幅值; U_{tref} 、 U_{dref} 分别为 PCC 处电压参考值、直流电压参考值; u_t 为 PCC 处电压瞬时值。

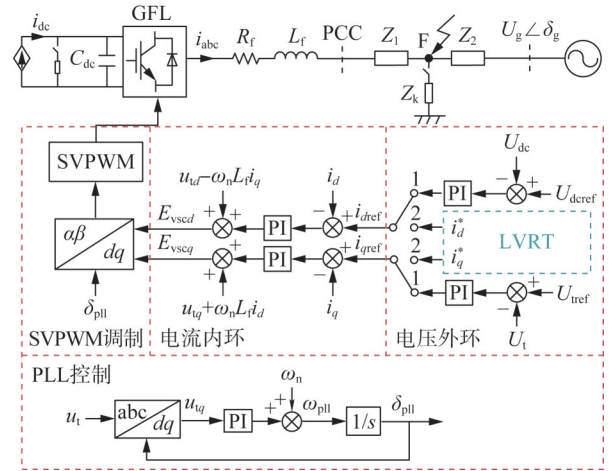


图 1 GFL 并网系统主电路拓扑和控制系统

Fig. 1 Main circuit topology and control system of GFL grid-connected system

定义虚拟功角 $\delta = \delta_{pll} - \delta_f$ (δ_f 为 F 点电压相角), 则有:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_{pll} - \omega_n \quad (1)$$

PLL 动态方程为:

$$\omega_{pll} = K_{pll} u_{vq} + K_{ipll} \int u_{vq} dt + \omega_n \quad (2)$$

式中: K_{pll} 、 K_{ipll} 分别为 PLL 中 PI 调节器比例、积分增益系数。

为了降低模型阶数,忽略线路电感动态。由图 1 可得, PCC 处电压的 q 轴分量和 GFL 电流为:

$$u_{vq} = R_1 i_q + \omega_{pll} L_1 i_d - U_f \sin \delta \quad (3)$$

$$i_d + j i_q = \frac{\dot{E}_{vsc} - \dot{U}_f}{R_f + R_1 + j\omega_{pll}(L_g + L_f)} \quad (4)$$

式中: \dot{E}_{vsc} 为 VSC 端电压相量; $\dot{U}_f = U_f \angle \delta_f$ 为 F 点电压相量; U_f 为 F 点电压幅值。

由式(4)实、虚部分离可得:

$$\begin{cases} i_d = \frac{(R_f + R_1)(E_{vscd} - U_f \cos \delta)}{(R_f + R_1)^2 + \omega_{pll}^2 (L_1 + L_f)^2} + \\ \frac{\omega_{pll} (L_1 + L_f)(E_{vscq} + U_f \sin \delta)}{(R_f + R_1)^2 + \omega_{pll}^2 (L_1 + L_f)^2} \\ i_q = \frac{(R_f + R_1)(E_{vscq} + U_f \sin \delta)}{(R_f + R_1)^2 + \omega_{pll}^2 (L_1 + L_f)^2} - \\ \frac{\omega_{pll} (L_1 + L_f)(E_{vscd} - U_f \cos \delta)}{(R_f + R_1)^2 + \omega_{pll}^2 (L_1 + L_f)^2} \end{cases} \quad (5)$$

在 GFL 电流内环控制的作用下, VSC 端电压将发生相应改变以实现 VSC 输出电流实际值等于参考值。为了研究电流暂态对 GFL 暂态同步稳定性的影响, 考虑不含电压前馈的 PI 控制策略, 得到 VSC 端电压变化量 ΔE_{vscd} 、 ΔE_{vscq} 为:

$$\begin{cases} \Delta E_{vscd} = K_{p1} \Delta i_d + \int K_{i1} \Delta i_d dt + \omega_n L_f \Delta i_q \\ \Delta E_{vscq} = K_{p2} \Delta i_q + \int K_{i2} \Delta i_q dt - \omega_n L_f \Delta i_d \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta i_d = i_{dref} - i_d \\ \Delta i_q = i_{qref} - i_q \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_{p1} 、 K_{p2} 分别为 d 、 q 轴电流内环 PI 控制器的比例系数; K_{i1} 、 K_{i2} 分别为 d 、 q 轴电流内环 PI 控制器的积分系数。

VSC 端电压为:

$$\begin{cases} E_{vscd} = E_{vscd0} + \Delta E_{vscd} \\ E_{vscq} = E_{vscq0} + \Delta E_{vscq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_{vscd0} 、 E_{vscq0} 为不考虑电流暂态, 即认为 $i_d = i_{dref}$ 、 $i_q = i_{qref}$ 时 VSC 的端电压值。

由式(1)~(8)可得计及电流暂态的 GFL 四阶模型, 如图 2 所示^[24]。

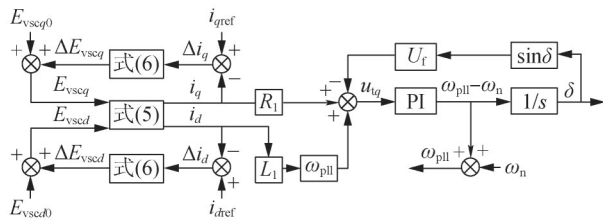


图 2 计及电流暂态的 GFL 四阶模型

Fig. 2 GFL fourth-order model accounting for current transients

1.2 暂态失稳关键因素分析

1.2.1 故障瞬间 PLL 频率突变机理与影响

基于二阶模型的暂态分析方法, 如等面积法则、相轨迹法、能量函数法等, 将 PLL 二阶动态模型与同步发电机转子的运动方程进行类比, 进一步考虑等效机械功率、等效电磁功率、阻尼的变化得到暂态同步稳定性的相关结论。然而, 在实际应用

中, 同步发电机转子具有惯性, GFL 并网变换器不具备物理意义上的惯性, PLL 输出频率不是连续变化的。在故障发生瞬间, 电压骤降, u_{uq} 发生突变, 在 PI 控制环节中比例增益的作用下, PLL 输出频率发生突变^[25-26]。

F 点发生故障瞬间电压骤降, 将式(3)、式(7)代入式(2)。考虑到 PLL 积分器状态量的连续性, 其输出在故障瞬间无法突变, 因此可假设在分析故障瞬间 PLL 输出频率突变时, PLL 的积分累积量为 0, 即 $K_{ipll} \int u_{uq} dt = 0$, 此时, 频率突变主要由 PI 调节器的比例增益环节对电压误差的瞬时响应产生。基于此, 可得故障瞬间频率突变量为:

$$\frac{d\delta}{dt} = K_{ppll} \frac{\Delta U_f \sin \delta_0 - R_1 \Delta i_q - \omega_n L_1 \Delta i_d}{1 - K_{ppll} L_1 i_{dref} + K_{ppll} L_1 \Delta i_d} \quad (9)$$

式中: δ_0 为稳态时的虚拟功角; ΔU_f 为故障引起的电压骤降幅值。

由图 2 可知, 频率突变会在系统中引入正反馈。从能量角度来看, 频率突变在系统中引入初始动能, 初始动能叠加到系统暂态能量中, 需要通过阻尼作用和 PLL 与电流环交叉耦合作用进行耗散。因此, 频率突变恶化 GFL 并网系统暂态同步稳定性。

PLL 动态过程与电流暂态过程存在耦合。由式(5)可知, 电网故障发生瞬间, PLL 输出的频率突变量会直接影响故障瞬间电流变化量, 进而对电流暂态产生直接影响; 由式(3)可知, 电流暂态经过电网阻抗反馈至 PLL 输入, 进而对系统的暂态同步稳定性产生影响。

1.2.2 电流内环-PLL 耦合作用及其耗散特性分析

为量化电流环与 PLL 耦合作用对系统暂态同步稳定性的影响, 在暂态能量函数中引入电流暂态。基于首次积分法的暂态能量函数表达式^[27]为:

$$V(x, \delta) = \frac{x^2}{2} - U_f K_{ipll} (\delta \sin \delta_s + \cos \delta) \quad (10)$$

$$\begin{cases} x = K_{ipll} \int u_{uq} dt \\ \sin \delta_s = \frac{R_1 i_q + \omega_n L_1 i_d}{U_f} \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{dV}{dt} = x \frac{dx}{dt} + U_f K_{ipll} (\sin \delta - \sin \delta_s) \frac{d\delta}{dt} \quad (12)$$

考虑电感动态, 将式(2)代入式(3)中, 可得:

$$u_{uq} = \frac{1}{1 - K_{ppll} L_1 i_d} (x L_1 i_d + L_1 \frac{di_q}{dt} + U_f \sin \delta_s - U_f \sin \delta) \quad (13)$$

联立式(10)~(13)可得:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{1 - K_{\text{pll}}L_1i_d} \left[x^2 K_{\text{ipll}}L_1i_d + xK_{\text{ipll}}L_1 \frac{di_q}{dt} - U_f^2 K_{\text{ipll}}K_{\text{pll}}(\sin\delta - \sin\delta_s)^2 + U_f K_{\text{ipll}}K_{\text{pll}}L_1 \frac{di_q}{dt}(\sin\delta - \sin\delta_s) \right] \quad (14)$$

由图 1 可得:

$$E_{\text{vscq}} = u_{vq} + i_d \omega_{\text{pll}}L_f + R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} = u_{vq} + i_d \omega_n L_f + K_{p2} \Delta i_q + K_{i2} \int \Delta i_q dt \quad (15)$$

求解式(15)得:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{K_{p2} \Delta i_q + K_{i2} \int \Delta i_q dt}{L_f} - \frac{d\delta}{dt} i_d - \frac{R_f}{L_f} i_q \quad (16)$$

将式(1)、式(2)、式(13)代入式(16),得:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1 - K_{\text{pll}}L_1i_d}{L_f} (K_{p2} \Delta i_q + K_{i2} \int \Delta i_q dt) - Y \quad (17)$$

式中: Y 是由 PLL 与电流环耦合作用引起的,其表达式为:

$$Y = xi_d + K_{\text{pll}}i_d U_f (\sin\delta_s - \sin\delta) - (1 - K_{\text{pll}}L_1i_d) \frac{R_f}{L_f} i_q \quad (18)$$

为研究耦合作用的耗散性,只考虑式(17)中含 Y 项,将式(17)代入式(14)可得:

$$\frac{dV}{dt} = -U_f^2 K_{\text{ipll}}K_{\text{pll}}(\sin\delta - \sin\delta_s)^2 + K_{\text{ipll}}L_1 \frac{R_f}{L_f} i_q [U_f K_{\text{ipll}}(\sin\delta - \sin\delta_s) + x] \quad (19)$$

若 $R_f \ll L_f$,则有:

$$\frac{dV}{dt} \approx -U_f^2 K_{\text{ipll}}K_{\text{pll}}(\sin\delta - \sin\delta_s)^2 < 0 \quad (20)$$

能量函数导数为负,因此,电流内环与 PLL 耦合作用在一定条件下有利于暂态能量耗散。

通过以上阐述,主要影响 GFL 暂态同步稳定性的 2 个关键因素为:电网故障瞬间 PLL 输出频率突变现象和电流内环与 PLL 之间耦合作用机制。针对以上因素,下文将对相应的控制策略进行设计。

2 对称故障下面向 LVRT 的电流内环协同控制策略设计

基于前文对暂态同步失稳机理的分析,本章提出一种适用于 LVRT 过程的电流内环协同控制策略。该策略目标在于抑制暂态能量积累并加速暂态能量耗散过程,包含 2 个核心组成部分:一为基于最优阻抗比的电流参考值动态调整策略;二为在电流内环前馈解耦项中引入频率偏差补偿机制。

2.1 基于最优阻抗比的电流参考值动态调整策略

考虑到电网电感和滤波电感对电流变化的阻碍作用,而 PLL 输出的频率突变量由 PI 调节器的比例增益直接产生,因此,可以在计算频率突变量时忽略故障瞬间电流变化量的影响。则式(9)可化为:

$$\frac{d\delta}{dt} = K_{\text{pll}} \frac{\Delta U_f \sin\delta_0}{1 - K_{\text{pll}}L_1i_{d\text{ref}}} \quad (21)$$

由式(3)可求得稳态时虚拟功角为:

$$\delta_0 = \arcsin\left(\frac{R_1 i_{q\text{ref}} + \omega_n L_1 i_{d\text{ref}}}{U_f}\right) \quad (22)$$

当 $i_{d\text{ref}}/i_{q\text{ref}} = -R_1/\omega_n L_1$ 时,故障瞬间频率突变量为 0, $R_1/\omega_n L_1 = -i_{d\text{ref}}/i_{q\text{ref}}$ 为最优阻抗比^[23]。

根据《光伏电站接入电力系统技术规定》^[28]要求,当 GFL 并网系统发生对称短路故障导致并网点电压跌落时,GFL 需要向电网注入相应的无功电流以支撑并网点电压并维持系统的同步稳定性。

当并网点电压跌落至 0.9 p. u. 以下时,系统进入 LVRT。传统 LVRT 期间电流参考值^[29-32]为:

$$\begin{cases} i_d^* = \min\left\{\sqrt{i_{\text{max}}^2 - i_{q\text{ref}}^2}, i_{d\text{ref}0}\right\} \\ i_q^* = \min\left\{K\left(0.9 - \frac{U_t}{U_{\text{ref}}}\right)I_N + i_{q\text{ref}0}, i_{\text{max}}\right\} \end{cases} \quad (23)$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 分别为 LVRT 期间 d 、 q 轴电流参考值; i_{max} 为电流内环 PI 环节限幅值; K 为动态无功电流比例系数; $i_{d\text{ref}0}$ 、 $i_{q\text{ref}0}$ 分别为稳态时 d 、 q 轴电流参考值; I_N 为 GFL 输出电流额定值。

从抑制频率突变角度出发,考虑使 d 、 q 轴电流参考值满足最优阻抗比以提升系统的暂态同步稳定性。

LVRT 期间,由于故障点存在接地阻抗,电网侧等效阻抗发生改变,为在 LVRT 过程中持续抑制暂态能量积累,需将最优阻抗比关系中的电网参数替换为故障下的等效值,将最优阻抗比修正为:

$$R'/\omega_n L' = -i_d^*/i_q^* \quad (24)$$

式中: R' 、 L' 分别为故障时刻电网等效电阻和电感。

$$\begin{cases} R' = \text{Re}(Z_1 + Z_2 // Z_k) \\ \omega_n L' = \text{Im}(Z_1 + Z_2 // Z_k) \end{cases} \quad (25)$$

LVRT 期间,协同控制策略中电流内环参考值为:

$$\begin{cases} i_d^* = \min\left\{-\frac{R'}{\omega_n L'} i_q^*, i_{d\text{ref}0}\right\} \\ i_q^* = \min\left\{K(0.9 - U_t)I_N + i_{q\text{ref}0}, i_{\text{max}}\right\} \end{cases} \quad (26)$$

2.2 引用频率偏差补偿的电流内环增强控制

2.2.1 频率偏差补偿机制的应用

由图2可知,2.1节中提出的暂态同步稳定性改善措施,能够在电流内环稳态条件下使电网电感对暂态同步稳定性产生的正反馈效果与电阻产生的负反馈效果相互抵消,一定程度上减少暂态能量的初始值。在暂态过程中,暂态能量需要依赖阻尼和PLL与电流环耦合作用进行耗散。在调节电流参考值的基础上,同时引入附加频率补偿^[23]的电流内环增强耦合作用的负反馈效果,进一步提升系统的暂态同步稳定性。

q 轴电流内环控制方程为:

$$E_{vscq} = u_{iq} + i_d \left(\omega_n + \lambda \frac{d\delta}{dt} \right) L_f + K_{p2} \Delta i_q + K_{i2} \int \Delta i_q dt \quad (27)$$

式中: λ 为频率补偿系数。

求解无功电流微增率得:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{(1 - K_{pll} i_d)(K_{p2} \Delta i_q + K_{i2} \int \Delta i_q dt)}{L_f(1 - \lambda K_{pll} i_d L_1)} - Y' \quad (28)$$

式中: Y' 是由PLL与电流环耦合作用引起,其表达式为:

$$Y' = \frac{K_{pll} i_d (1 - \lambda) U_f}{1 - \lambda K_{pll} i_d L_1} (\sin \delta_s - \sin \delta) + \left[\frac{i_d x (1 - \lambda)}{1 - \lambda K_{pll} i_d L_1} + \frac{(1 - K_{pll} L_1 i_d) R_f i_q}{L_f (1 - \lambda K_{pll} i_d L_1)} \right] \quad (29)$$

为研究耦合作用的耗散性,只考虑式(28)中含 Y' 项,将式(28)代入式(14)可得:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{1 - \lambda K_{pll} i_d L_1} \cdot \left\{ \lambda x^2 K_{ip1} L_1 i_d - K_{ip1} K_{pll} U_f^2 (\sin \delta - \sin \delta_s)^2 \cdot \frac{R_f}{L_f} K_{ip1} L_1 i_q \left[x - U_f K_{pll} (\sin \delta - \sin \delta_s) \right] \right\} \quad (30)$$

若 $R_f \ll L_f$,则在 $\lambda < 0$ 情况下,有:

$$\frac{dV}{dt} \approx \frac{1}{1 - \lambda K_{pll} i_d L_1} \left[\lambda x^2 K_{ip1} L_1 i_d - U_f^2 K_{ip1} K_{pll} (\sin \delta - \sin \delta_s)^2 \right] < 0 \quad (31)$$

由式(31)可知,在角频率较大时,暂态能量耗散速率要快于传统电流内环。

2.2.2 补偿系数 λ 的动态调整策略

补偿系数 λ 的取值需依据系统扰动程度进行动态调整。在小扰动工况下,为确保系统固有的阻尼作用能够充分抑制系统振荡,系数 λ 需满足式(32)的约束条件^[28]:

$$0.85 \leq \frac{1}{1 - \lambda K_{pll} i_d L_1} < 1 \quad (32)$$

因此, λ 的取值应满足:

$$\frac{-0.176}{K_{pll} L_1 i_d} \leq \lambda < 0, i_d > 0 \quad (33)$$

为分析 λ 对暂态能量耗散速率的影响,对式(31)关于 λ 求偏导数,得:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{dV}{dt} \right) = \frac{K_{ip1} L_1}{(1 - \lambda K_{pll} i_d L_1)^2} \left[x^2 i_d - K_{ip1} i_d U_f^2 (\sin \delta - \sin \delta_s)^2 \right] \quad (34)$$

由式(34)可得:当 $x^2 i_d > K_{ip1}^2 i_d U_f^2 (\sin \delta - \sin \delta_s)^2$ 时, dV/dt 随 λ 增大呈现单调递增特性;当 $x^2 i_d < K_{ip1}^2 i_d U_f^2 (\sin \delta - \sin \delta_s)^2$ 时, dV/dt 随 λ 增大而呈现单调递减特性。

为最大化暂态能量耗散速率, λ 取值策略为:

若满足:

$$\begin{cases} i_d > 0 \\ x^2 i_d > K_{ip1}^2 i_d U_f^2 (\sin \delta - \sin \delta_s)^2 \end{cases} \quad (35)$$

则取 $\lambda = -0.176/K_{pll} L_1 i_d$;在其余情况下,取 $\lambda = 0$ 。

2.1节提出的电流参考值动态调整与2.2节引入的频率偏差前馈补偿,共同构成本文所提的协同控制策略。前者通过在线辨识电网等效阻抗来实时修正电流参考值,使系统在故障期间的运行点满足最优阻抗比关系,促使电网电感与电阻分别引入的正、负反馈效应相互抵消,从而抑制暂态能量积累;后者则在电流内环中引入动态自适应的频率补偿,以增强耦合作用的负反馈效果,加速故障清除后的暂态能量耗散。该策略的有效性与适应性将在3.2节进行仿真验证。

2.3 关于控制策略工程实现可行性的讨论

2.3.1 电网等效阻抗的在线辨识方法

为支撑所提“最优阻抗比”策略在实际工程中的应用,需要获取准确的电网等效阻抗信息。现有研究中,电网等效阻抗的在线辨识方法主要包括以下5类:

功率扰动注入法是一种常见的阻抗测量技术^[33]。该方法通过控制并网换流器,注入幅值可控的有功或无功功率扰动信号,同时监测并网点处的电压和电流响应。通过建立系统输出阻抗与扰动频率之间的关系,并采用频域响应分析或导纳模型进行计算,可得到电网在特定频段的等效阻抗特性。该方法能够实现从次同步到高频段的宽频带阻抗扫描,但在实际应用中需权衡扰动幅值的选取,过大的扰动可能影响电网电能质量与暂态稳定,而过小则易被背景噪声淹没。

谐波注入法通过控制分布式电源的换流器或专用谐波注入装置,向电网注入一个或多个幅值、频率可控的谐波或间谐波电流信号进行阻抗辨识^[34-38]。

依据欧姆定律的基本原理,通过精确测量并网点在注入频率处的谐波电压响应,可直接计算出该频率下的系统谐波阻抗。该方法具有较强的抗背景谐波干扰能力,但在多换流器并联运行时,需解决谐波信号的相位同步问题,同时需确保注入信号符合电能质量标准限值。

基于波动量/回归分析的方法利用电网中固有的负荷波动、分布式电源出力随机变化等运行数据进行阻抗辨识^[39-40]。其理论基础是戴维南等效电路模型,将并网点处测量的电压与电流波动量视为样本,通过统计分析方法建立电压与电流波动量之间的线性关系。为提高在复杂电网环境下的估计精度,可采用稳健回归技术和数据预筛选流程来增强算法的鲁棒性。

基于参数识别/模型匹配的方法将阻抗辨识问题转化为一个模型参数优化问题^[41-42]。预先设定一个能够表征电网阻抗特性的参数化模型,通过分析系统在正常运行或故障期间的电压、电流波形,采用优化算法寻找使模型输出与实测数据最佳匹配的参数组合。此方法的优势在于其物理意义明确,能够提取反映系统特定动态行为的等效参数。

基于人工智能与数据驱动的方法是阻抗辨识的新兴研究方向。该方法利用机器学习或深度学习等人工智能算法,从历史运行数据中自主学习系统等效阻抗的复杂非线性映射关系。经过充分训练的模型能够实现阻抗的快速预测,在处理高度非线性系统方面展现出显著优势。

2.3.2 控制策略对阻抗辨识误差的鲁棒性分析

所提协同控制策略在实际工程应用中需考虑等效阻抗的辨识误差,这些误差主要来源于故障点位置的不确定、在线辨识算法的精度限制以及系统运行方式的动态变化,分析控制策略在阻抗辨识误差下的鲁棒性对其工程应用具有重要意义。

基于最优阻抗比的电流参考值动态调整策略的核心思路是通过调整 d 、 q 轴电流参考值的比值,使其尽可能接近电网等效阻抗比,从而在理想情况下使电网电感引入的正反馈效应与电阻引入的负反馈效应相抵消。当存在阻抗辨识误差时,这种精确的抵消关系难以完全实现,但若误差处于合理范围内,控制作用仍可实现正、负反馈效应的部分抵消,从而改善系统动态性能,即使阻抗匹配不完美,这一机制仍可在一定程度上抑制频率偏差与暂态能量累积。因此,控制策略性能随误差增大而逐渐下降,并非突变失稳。

下文第 3 章中场景 2 下的仿真结果间接支持了上述分析。在场景 2 中,因电流环 PI 参数调整及电网阻抗变化,系统实际运行点偏离方案①的理想设计

条件。仿真结果显示,单独采用方案①未能实现完全稳定,但与完全失稳的传统策略相比,其仍有效抑制了故障期间的频率偏差,延缓了功角的加速增大过程。这一现象表明,即使在参数存在偏差的非理想条件下,方案①仍然为维持系统暂态同步稳定作出了积极贡献。

另一方面,频率偏差补偿机制对抗参数的依赖性较低,其主要依据频率偏差进行前馈补偿,增强电流内环的动态响应,提供附加阻尼以加速能量耗散。在本文的协同控制框架中,方案②作为方案①的重要补充,当方案①因阻抗辨识误差而未能充分抑制暂态能量积累时,方案②能够有效地促进剩余能量的耗散,二者协同工作,共同提升了系统在不确定条件下的稳定能力。

需要指出,较大的阻抗辨识误差将削弱方案①的优化效果,可能增加暂态能量积累,进而对方案②的耗散能力提出更高要求。对此,未来可进一步研究补偿系数的自适应调整策略。

理论分析与仿真验证表明,所提协同控制策略对电网阻抗辨识误差具备一定鲁棒性,在合理误差范围内仍能保持基本控制效果。后续将重点研究鲁棒性边界量化及自适应机制设计。

3 对称故障算例验证

为验证前文理论分析结论及所提改进控制策略在对称故障下的有效性,本章在 PSCAD 仿真平台中搭建图 3 所示的 GFL 并网系统全阶模型,在 F 点设置三相接地短路故障以模拟 LVRT 过程^[43-45],具体参数见表 1。模型中新能源额定输出功率为 60 kW,直流侧注入功率为 60 kW,由于卸荷电路存在,假设故障期间,直流电压保持不变。

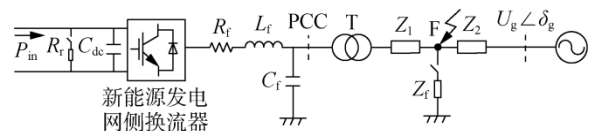


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

3.1 频率突变过程及其对稳定性的影响

将频率突变量计算公式与时域仿真结果进行对比,验证频率突变量计算公式的准确性。对比不同频率突变量下时域仿真结果,验证频率突变量对暂态同步稳定性的恶化效果。时域仿真模型参数按照场景 1 进行配置,电流内环采用传统控制策略,在 2 s 时,电网端电压 U_g 幅值发生显著跌落,不考虑故障清除,仿真结果如图 4—6 所示。

表 1 仿真模型主要参数

Table 1 Simulation model main parameters

参数	数值	
	场景 1	场景 2
电网电感 L_g/H	2.4	2.4
电网电阻 R_g/Ω	70	7
d 轴电流环 PI 参数 K_{p1}/K_{i1}	26.9/7 246.4	3/1000
q 轴电流环 PI 参数 K_{p2}/K_{i2}	26.9/7 246.4	3/1000
d 轴电压环 PI 参数 K_{p3}/K_{i3}	0.5/20	0.5/20
q 轴电压环 PI 参数 K_{p4}/K_{i4}	1.1/0.009	1.1/0.009
锁相环 PI 参数 K_{pll}/K_{ipll}	30/750	30/750
滤波电感 L_f/mH	5	5
滤波电阻 R_f/Ω	0	0
滤波电容 $C_f/\mu F$	10	10
电网电压 U_g/kV	13.8	13.8
电网频率 ω_n/Hz	50	50

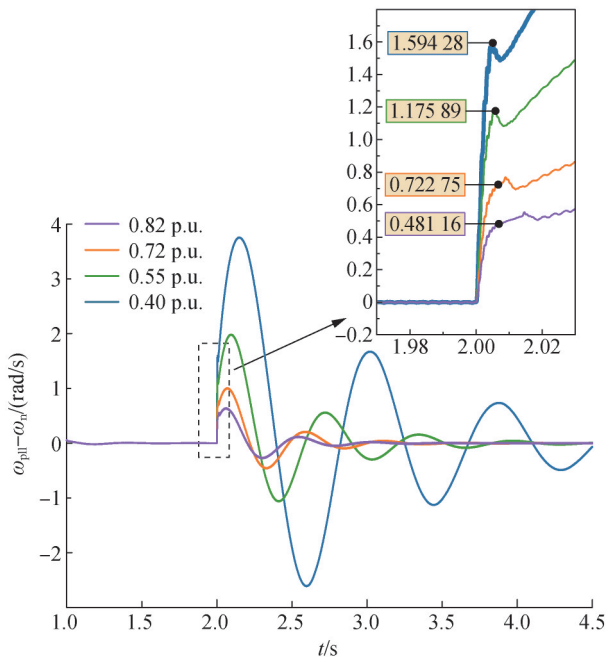


图 4 不同电网电压跌落幅值下的频率偏差曲线

Fig. 4 Frequency deviation curves under different grid voltage sag magnitudes

图 4 中时域仿真结果表明,在故障发生时刻,电网电压幅值下降会引发 PLL 输出频率突变。为进一步验证理论模型的正确性,表 2 列出了根据式(21)计算得到不同电压跌落值下的频率突变量。对比结果显示,理论计算与仿真数据之间的误差均小于 5%,从而验证了频率突变量计算公式的准确性与适用性。

如图 5 所示,随着频率突变量增大,虚拟功角首摆幅值变大,系统进入新稳态需要的时间变长,失稳风险增大。图 6 为系统电流状态量曲线,在电网电压

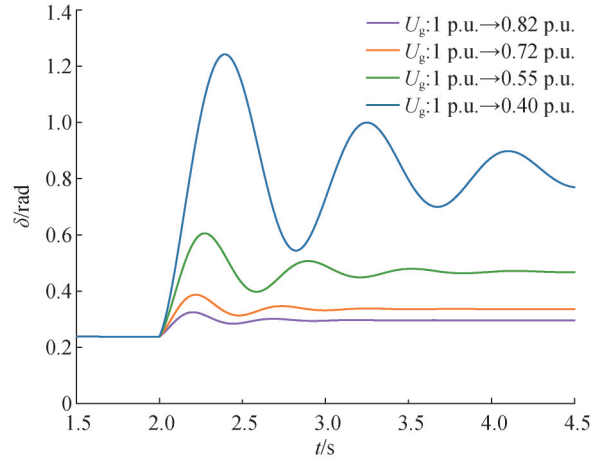


图 5 不同电网电压跌落幅值下的虚拟功角曲线

Fig. 5 Virtual power angle curves under different grid voltage sag magnitudes

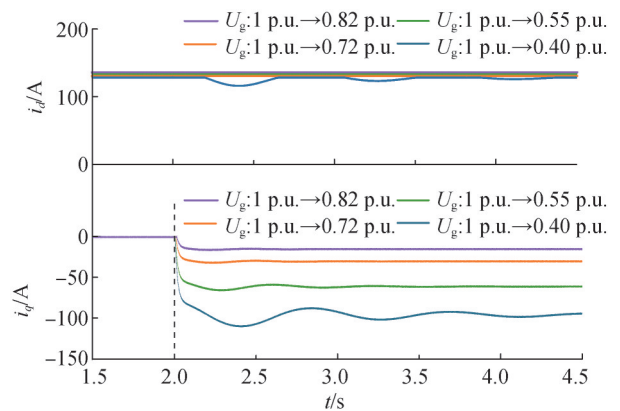


图 6 不同电网电压跌落幅值下的电流状态量

Fig. 6 State variables of current under different grid voltage sag magnitudes

表 2 故障瞬间 PLL 输出频率的突变量

Table 2 Abrupt change in PLL output frequency at the instant of fault

电压跌落值/p.u.	突变量/(rad/s)		误差/%
	公式推导	仿真结果	
0.18	0.487	0.481	1.25
0.28	0.758	0.723	4.84
0.45	1.218	1.176	3.57
0.60	1.624	1.594	1.88

跌落瞬间,由于受到电网电感与滤波电感的阻碍作用,电流的突变特征并不明显。当系统满足 LVRT 要求时,电流参考值按照式(23)变化,电流实际值趋势与参考值相符。

3.2 协同控制策略在不同参数下的有效性分析

改进策略包含方案①和方案②。方案①是基于最优阻抗比对 LVRT 期间的电流参考值进行调整,通过优化系统工作点提升系统的暂态同步稳定性;方

案②是在电流内环附加频率补偿,通过增强电流内环与PLL的耦合作用加快暂态能量耗散,缩短故障清除后的系统稳定恢复时间。为进一步验证所提策略的有效性,本文将其与现有控制策略进行横向对比,包括文献[22]提出的基于有源阻尼解耦控制策略、文献[23]提出的附加转速补偿项控制策略以及文献[30]提出的基于轨迹灵敏度的暂态增强控制。图7为GFL并网系统控制框图,将不同控制策略施加于图3所示模型进行时域仿真。

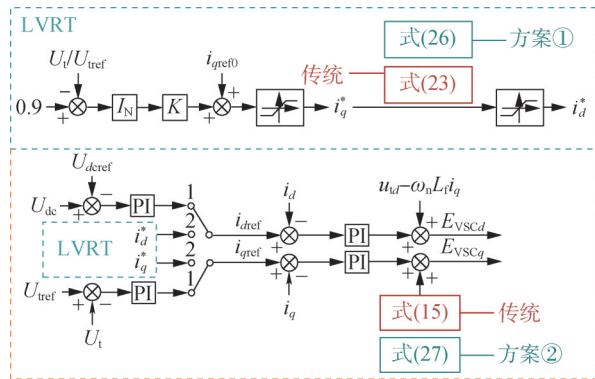


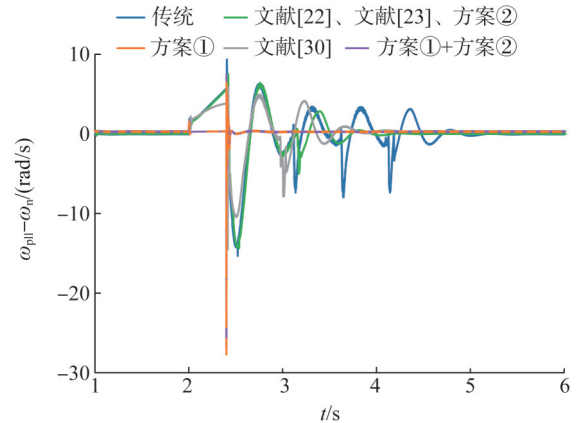
图7 GFL并网系统控制框图

Fig. 7 Control block diagram of GFL grid-connected system

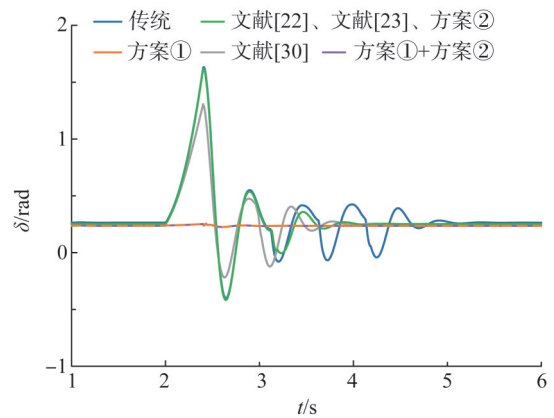
当模型参数参照场景1配置时,仿真结果如图8所示;参数参照场景2配置时,仿真结果如图9所示。所有仿真场景均在2s时于F点发生三相接地短路故障,接地电阻为0.01Ω。其中,图8对应的故障持续时间为0.4s,图9对应的故障持续时间为0.6s。

与参考文献[22]、[23]、[30]所提策略的仿真对比结果表明:在场景1下,有源阻尼解耦控制与附加转速补偿控制均能有效提升系统稳定性,其控制效果与方案②相近;基于轨迹灵敏度的暂态增强控制则呈现出更优的暂态稳定提升能力。在此条件下,所提组合策略在频率偏差抑制与系统稳定恢复时间方面,呈现出相对更优的综合性能。

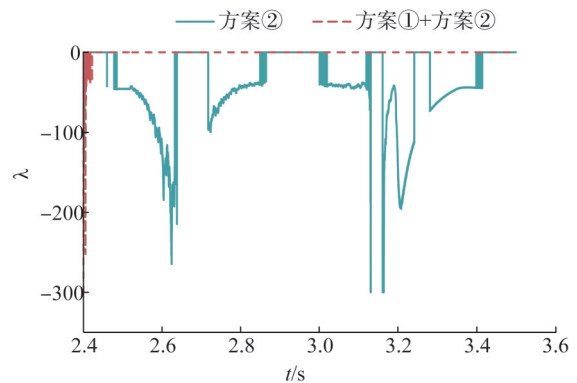
在场景1下,方案①通过优化LVRT期间系统的稳态工作点,能够显著降低故障持续阶段的频率偏差,有效抑制功角首摆幅度,同时加速系统向新稳态的过渡;相较于传统控制策略,方案②在故障清除后,能够显著缩短系统稳定恢复时间,实现功角的快速平滑恢复;在采用组合策略(方案①+方案②)的情况下,由于方案①已显著降低了暂态能量初始值,在频率偏差量较小时,方案②中的频率补偿系数加速暂态能量耗散的作用有限,因此组合策略下的系统稳定效果与方案①相近。图8(c)展示了方案②及组合策略中频率补偿系数 λ 的动态变化过程。 λ 的取



(a) 频率偏差曲线



(b) 虚拟功角曲线



(c) 频率补偿系数

图8 不同控制策略在场景1下的仿真结果

Fig. 8 Frequency compensation coefficient under scenario 1

值遵循2.2.2节所述方法,当频率偏差量较大时, λ 的取值能够有效加速暂态能量耗散;当频率偏差量较小时, λ 值为0,对暂态能量耗散过程无显著作用。

为进一步量化评估不同控制策略的性能,基于图8(a)与图8(b)的仿真结果,对关键暂态阶段动态响应进行了量化分析。在故障持续阶段(2.0~2.4s),传统控制策略下频率偏差持续增大至5.73 rad/s,而方案①与组合策略通过优化系统工作点,将频率偏差有效抑制在0.1 rad/s以内。同时,虚拟功角的首摆峰值由传统策略下的1.61 rad显著降至0.26 rad,

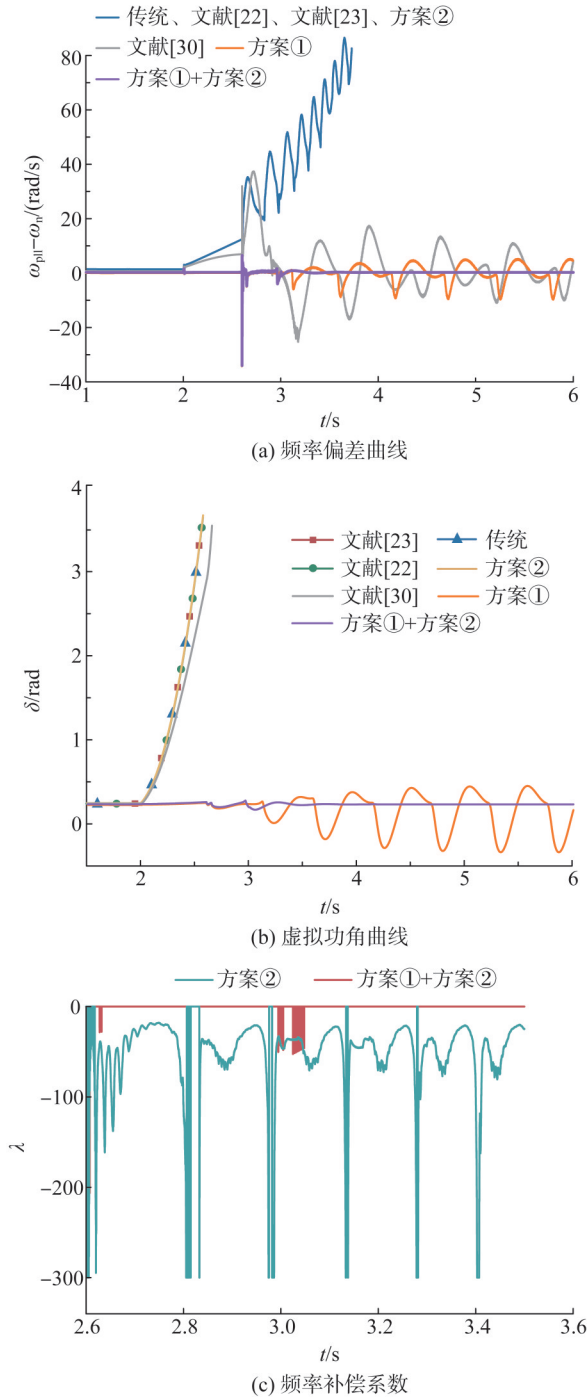


图 9 不同控制策略在场景 2 下的仿真结果
 Fig. 9 Frequency compensation coefficient under scenario 2

定量验证了方案①在抑制故障期间暂态能量累积方面的主导作用。

在故障清除后的恢复阶段,组合策略表现出最优的动态恢复性能,系统稳定恢复时间仅为 0.35 s,远低于传统策略的 2.7 s。为单独评估方案②的作用,进一步分析其单独作用时的响应特性:在故障持续阶段,方案②的频率偏差曲线与传统策略基本重合,表明其对初始暂态能量积累的抑制能力有限;而

在故障清除后,方案②控制下系统稳定恢复时间为 1.7 s,较传统控制策略缩短 1 s,说明其通过增强电流内环与 PLL 耦合作用的负反馈效果,有效加速了暂态能量的耗散过程。

上述量化结果清晰表明所提控制策略在不同阶段具有明确的分工与协同机制:方案①主要作用于故障期间,通过动态调整电流参考值抑制暂态能量积累,方案②则主导故障清除后的动态过程,加速暂态能量耗散过程。二者协同作用,提升了系统在 LVRT 全过程的暂态同步稳定性。

与参考文献[22]、[23]、[30]所提策略在场景 2 下的仿真对比结果表明:有源阻尼解耦控制与附加转速补偿控制在场景 2 下对系统暂态同步稳定性的提升效果较为有限,其响应曲线与传统控制策略接近,系统发生失稳;基于轨迹灵敏度的暂态增强控制在一定程度上延缓了系统失稳,但由于故障期间累积的暂态能量过多,系统最终仍失稳。与此相比,本文所提协同控制策略在场景 2 下仍能有效阻断正反馈路径,将系统功角与频率偏差控制在稳定范围内。

相较于场景 1,场景 2 对电流内环 PI 调节器参数及电网电阻值进行了调整,具体表现为电流内环 PI 调节器比例增益与积分增益降低,导致其动态响应速度下降。根据图 2 所示的四阶模型分析,方案①通过优化故障期间系统稳态工作点,能够在电流实际值完全跟踪参考值的稳态条件下,实现电阻产生的负反馈效应与电感产生的正反馈效应相互抵消。然而,在场景 2 下,电流内环响应速度下降使电流实际值无法快速跟踪参考值,正、负反馈效应在动态过程中无法实现抵消。同时,电网阻抗比降低进一步削弱了电阻的阻尼作用,导致正反馈分量持续累积。二者共同作用加剧了虚拟功角偏移,引发其增幅振荡并最终导致系统失稳。

针对上述失稳机理,在方案①基础上引入方案②,通过在电流内环附加频率补偿,在虚拟功角偏移量较大时加速暂态能量耗散,从而有效阻断增幅振荡的正反馈路径,如图 9(a)与图 9(b)所示。图 9(c)展示了在场景 2 下方方案②及组合策略中频率补偿系数 λ 的动态变化过程, λ 的取值遵循 2.2.2 节所述方法。单独采用方案②虽然能够加速暂态能量耗散,但由于故障期间暂态能量积累过多,故障清除后系统难以快速恢复稳定。方案①主要作用于降低暂态能量的初始值,而方案②则通过增强暂态能量耗散能力,有效避免增幅振荡发生。2 种方案协同作用,显著提升了系统的暂态同步稳定性。

为量化评估场景 2 下各控制策略的性能,对图 9

(a)与图9(b)的仿真结果进行量化分析。在传统控制策略下,系统表现出显著的失稳特征:虚拟功角在故障发生后0.5 s内迅速增大至超过3.5 rad,故障清除后仍无法恢复同步,系统最终失稳。单独采用方案①虽在故障期间将频率偏差有效抑制在0.1 rad/s以内,但由于电流内环动态响应迟缓,正、负反馈效应在暂态过程中无法完全抵消,导致故障清除后虚拟功角出现增幅振荡,系统仍无法恢复稳定。单独采用方案②在故障清除后的响应曲线与传统策略基本重合,频率偏差持续振荡且幅值未能有效抑制,表明该方案虽具备一定的暂态能量耗散能力,但在故障期间积累的过多暂态能量下,其耗散作用仍显不足。相比之下,组合策略展现出显著的协同控制优势。方案①在故障期间将频率偏差控制在0.1 rad/s以内,从源头抑制暂态能量的积累;方案②则在故障清除阶段通过增强阻尼作用,有效阻断了增幅振荡路径,将虚拟功角的最大摆幅限制在0.3 rad以内,系统在故障清除后0.8 s内恢复稳定。

上述量化结果表明,在电流内环响应缓慢、电网阻尼较弱的恶劣工况下,单一控制策略存在局限性,所提协同控制策略通过“故障期间抑制能量积累,故障清除后加速能量耗散”的分阶段协作机制,有效提升了系统的暂态同步稳定性。

综上,通过对比理论计算结果与时域仿真数据,验证了故障瞬间频率突变公式的准确性。在此基础上,通过对比评估传统控制策略与所提协同控制策略在不同仿真场景下的控制效果,重点分析各控制策略对故障期间系统频率偏差及虚拟功角动态响应特性的改善作用,表明了所提协同控制策略在不同电网参数下均具有良好的适应性。

4 结 论

1)提出了基于最优阻抗比动态调整LVRT期间电流参考值的方法。该方法通过优化故障期间系统的稳态工作点,促使电网电感与电阻对暂态能量的正、负反馈效应相互抵消,有效降低了注入系统的初始动能。

2)在电流内环前馈解耦项中引入频率偏差补偿机制,该机制增强了耦合作用对暂态能量的耗散效果,缩短了系统稳定恢复时间。

3)所提协同控制策略通过整合上述2种方法,能够在故障期间有效抑制暂态能量注入,并在故障清除后加速暂态能量耗散。该策略在不同电网参数下均表现出良好的适应性,显著提升了GFL并网系统在LVRT过程中的暂态同步稳定性。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions):

孙黎、刘洪波提出研究方向,设计论文框架,对研究方案可行性进行调查分析;智天阳设计研究思路,实施研究过程;马成廉参与论文写作和修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 国家发展改革委 国家能源局 国家数据局关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》的通知[EB/OL]. (2024-08-06) [2025-05-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202408/t20240806_1392258_ext.html.
- [2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 龚凯,肖晃庆,张展,等. 新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 3-14.
GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 3-14.
- [4] HU Q, FU L J, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [5] MA R, LI J X, KURTHS J, et al. Generalized swing equation and transient synchronous stability with PLL-based VSC [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 1428-1441.
- [6] 李锡林,唐英杰,田震,等. 基于改进等面积法则的并网逆变器同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 208-215.
LI Xilin, TANG Yingjie, TIAN Zhen, et al. Synchronization stability analysis of grid-connected inverter based on improved equal area criterion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 208-215.
- [7] 曾平,张琛,李征. 电网故障期间全功率风电机组的暂态同步稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5935-5947, 6168.
ZENG Ping, ZHANG Chen, LI Zheng. Control strategy of transient synchronization stability of full-scale wind turbines during grid faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5935-5947, 6168.
- [8] 刘菁锐,屠增泽,张宇飞,等. 考虑限流的基于直流电压同步的构网型换流器稳定判据[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 3-12.
LIU Jingrui, TU Zengze, ZHANG Yufei, et al. Transient stability criterion of grid-forming converter based on DC voltage

- synchronization control considering current limit [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(2): 3-12.
- [9] 裴金鑫, 姚骏, 黄森, 等. 电网短路故障下新能源并网变换器的暂态同步机制及其自适应稳定控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 5922-5934, 6167.
- PEI Jinxin, YAO Jun, HUANG Sen, et al. Transient synchronization mechanism and adaptive stability control strategy for renewable energy grid-connected converter under grid faults [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 5922-5934, 6167.
- [10] 范新凯, 杨松浩, 赵一铭, 等. 基于相轨迹凹凸性的暂态失稳判据准确性验证[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(1): 159-165, 171.
- FAN Xinkai, YANG Songhao, ZHAO Yiming, et al. Accuracy verification of transient instability criterion based on concavity and convexity of phase trajectory [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(1): 159-165, 171.
- [11] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 3573-3589.
- [12] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(9): 3367-3383.
- GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [13] ZHANG Z Q, SCHUERHUBER R, FICKERT L, et al. Domain of attraction's estimation for grid connected converters with phase-locked loop [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(2): 1351-1362.
- [14] ZARIF MANSOUR M, ME S P, HADAVI S, et al. Nonlinear transient stability analysis of phased-locked loop-based grid-following voltage-source converters using Lyapunov's direct method [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(3): 2699-2709.
- [15] WANG T, JI T P, JIAO D, et al. Transient synchronization stability analysis of PLL-based VSC using Lyapunov's direct method [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 141: 108135.
- [16] 李霞林, 王智, 郭力, 等. 基于最大估计吸引域的 VSC 接入弱网下的锁相环同步暂态稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(20): 7485-7497.
- LI Xialin, WANG Zhi, GUO Li, et al. Transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs based on the largest estimated domain of attraction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(20): 7485-7497.
- [17] 潘莉, 李霞林, 王智, 等. 弱连接 VSC 的锁相环同步暂态稳定综述[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 138-151.
- PAN Li, LI Xialin, WANG Zhi, et al. Overview of transient stability analysis of phase locked loop synchronization in weak-grid connected VSC [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 138-151.
- [18] 刘其辉, 李开心, 蔡希鹏, 等. 基于规范形方法的并网变换器系统暂态同步稳定分析[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(6): 116-123.
- LIU Qihui, LI Kaixin, CAI Xipeng, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-connected converter system based on normal form method [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(6): 116-123.
- [19] HU Q, FU L J, MA F, et al. Analogized synchronous-generator model of PLL-based VSC and transient synchronizing stability of converter dominated power system [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(2): 1174-1185.
- [20] 李霞林, 张晨, 郭力, 等. 锁相环同步 VSC 接入弱网下的低频动态稳定性分析模型与机理研究[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(8): 29-38, 54.
- LI Xialin, ZHANG Chen, GUO Li, et al. Low frequency dynamic stability analysis model and mechanism research for PLL-synchronized VSC connected to weak grid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(8): 29-38, 54.
- [21] CHEN J R, LIU M Y, O'DONNELL T, et al. Impact of current transients on the synchronization stability assessment of grid-feeding converters [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 4131-4134.
- [22] 刘星琪, 邹志翔, 姚屹洋, 等. 基于锁相环与电流环解耦的并网变换器稳定性控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(19): 109-119.
- LIU Xingqi, ZOU Zhixiang, YAO Yiyang, et al. Stability control strategy for grid-connected converter based on decoupling of phase-locked loop and current loop [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(19): 109-119.
- [23] 杨元熙, 徐式蕴, 兰天楷, 等. 基于暂态能量的 VSC 锁相环-电流环暂态失稳机理分析与优化控制[J]. *电网技术*, 2025, 49(5): 2067-2075.
- YANG Yuanxi, XU Shiyun, LAN Tiankai, et al. Analysis and optimization control of transient instability mechanism of VSC's phase-locked loop and current loop based on transient energy [J]. *Power System Technology*, 2025, 49(5): 2067-2075.
- [24] 陈俊儒, 李冠群, 刘牧阳, 等. 电网阻抗比对跟网变换器同步稳定性的影响机理[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2331-2339.
- CHEN Junru, LI Guanqun, LIU Muyang, et al. Influence mechanism of R/X ratio on synchronization stability of grid-following converter [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2331-2339.
- [25] 占领, 胡彬, 王垚鑫, 等. 计及阻尼和角速度的锁相环暂态同步稳定性分析与提升方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(13): 130-137.
- ZHAN Ling, HU Bin, WANG Yaixin, et al. Analysis and enhancement method for transient synchronization stability of phase-locked loop considering damping and angular velocity [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(13): 130-137.

- [26] 高兴隆, 陈俊儒, 郭金龙, 等. 考虑锁相环频率突变与阻尼效应的暂态分析方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(6): 110-120, 128.
GAO Xinglong, CHEN Junru, GUO Jinlong, et al. Transient analysis method considering phase-locked loop frequency mutation and damping effect[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(6): 110-120, 128.
- [27] 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.
- [28] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [29] 原帅, 肖嘉安, 陶军, 等. 全功率型风电机组故障穿越全过程的短路电流解析方法[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 85-94.
YUAN Shuai, XIAO Jiaan, TAO Jun, et al. An analytical short-circuit current calculation method for full-power wind turbines under complete fault ride-through processes[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 85-94.
- [30] 路焱, 宋晓辉, 盛万兴, 等. 计及低电压穿越过程电流动态的新能源并网系统暂态同步稳定分析方法和控制策略[J]. 电网技术, 2025, 49(11): 4556-4567.
LU Yan, SONG Xiaohui, SHENG Wanxing, et al. Analysis method and control strategy for transient synchronous stability of grid-connected new energy resources system considering current dynamics during LVRT[J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4556-4567.
- [31] 叶希, 徐韵扬, 朱童, 等. 计及新能源低穿影响的系统频率响应模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(11): 120-128.
YE Xi, XU Yunyang, ZHU Tong, et al. A system frequency response model considering impacts of new energy's LVRT[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(11): 120-128.
- [32] 陈智勇, 董新伟, 李传辉, 等. 基于相位与幅值补偿的虚拟同步发电机低电压穿越控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 42-51.
CHEN Zhiyong, DONG Xinwei, LI Chuanhui, et al. Low voltage ride-through control of virtual synchronous generator based on phase and amplitude compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 42-51.
- [33] 郝晓宇, 郭春义, 蒋雯, 等. 基于无功功率注入的 MMC-HVDC 交流电网等值阻抗识别方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 184-192.
HAO Xiaoyu, GUO Chunyi, JIANG Wen, et al. Identification method for equivalent impedance of AC power grid connected to MMC-HVDC system based on reactive power injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 184-192.
- [34] 李志军, 王雅欣. 基于双谐波注入识别电网阻抗的并网逆变器阻抗重塑策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 222-232.
LI Zhijun, WANG Yaxin. Impedance reshaping strategy for grid-connected inverter based on grid impedance identification via dual harmonic injection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 222-232.
- [35] 叶杰, 汤广福, 赵成勇. 基于电网阻抗识别的谐波控制器调度策略[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 26-31.
YE Jie, TANG Guangfu, ZHAO Chengyong. Harmonic controller scheduling strategy based on power network impedance identification[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 26-31.
- [36] 涂春鸣, 高家元, 赵晋斌, 等. 弱电网下具有定稳定裕度的并网逆变器阻抗重塑分析与设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1327-1335.
TU Chunming, GAO Jiayuan, ZHAO Jinbin, et al. Analysis and design of grid-connected inverter impedance remodeling with fixed stability margin in weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1327-1335.
- [37] 李国进, 龚豪, 陈延明. 基于阻抗识别的单相并网逆变器自适应电压前馈控制[J]. 现代电子技术, 2022, 45(11): 153-160.
LI Guojin, GONG Hao, CHEN Yanming. Single-phase grid-connected inverter's adaptive voltage feedforward control based on impedance recognition[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(11): 153-160.
- [38] 靳俊豪, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于谐波阻抗特性识别的主动式孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 128-135.
JIN Junhao, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Active islanding detection method based on harmonic impedance characteristic identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 128-135.
- [39] 刘青松, 苗虹, 曾成碧, 等. 基于贝叶斯突变检测与非凸惩罚回归的系统谐波阻抗估计[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 107-117.
LIU Qingsong, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. System harmonic impedance estimation based on Bayesian change-point detection and non-convex penalized regression[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 107-117.
- [40] 殷涵, 宣晔, 黄怡, 等. 基于虚拟阻抗的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 83-93.
YIN Han, XUAN Yi, HUANG Yi, et al. Virtual impedance-based low-voltage distribution network topology identification method[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 83-93.
- [41] 叶平峰, 韩学山, 于一潇, 等. 电网 PQ 扰动分解的戴维南等值[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3239-3250.
YE Pingfeng, HAN Xueshan, YU Yixiao, et al. P-Q disturbance

- decoupled thevenin equivalent for power grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3239-3250.
- [42] 牛伟民, 樊艳芳, 张鑫宇, 等. 基于阻抗幅值波动差异的新型参数识别方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 117-125.
- NIU Weimin, FAN Yanfang, ZHANG Xinyu, et al. Novel parameter identification directional element based on impedance amplitude fluctuation difference [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 117-125.
- [43] 张小奇, 葛鹏江, 吕金历, 等. 基于半实物仿真的双馈风机低电压穿越短路电流计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(10): 150-156.
- ZHANG Xiaoqi, GE Pengjiang, LÜ Jinli, et al. A calculation method based on hardware-in-the-loop simulation for short circuit current in LVRT of DFIG [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(10): 150-156.
- [44] 曹勋哲, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 基于电池储能的陆上风电全直流系统低电压穿越策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 150-159.
- CAO Xunzhe, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Low voltage crossing strategy for all-DC power generation system of onshore wind power based on battery energy storage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 150-159.
- [45] 刘金峻, 唐晓骏, 霍启迪, 等. 考虑换流器型电网支撑需求与经济性的储能容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4): 43-51, 57.
- LIU Jinjun, TANG Xiaojun, HUO Qidi, et al. Energy storage capacity configuration considering converter-based grid support needs and economic viability [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4): 43-51, 57.

收稿日期: 2025-09-08 修回日期: 2025-11-25



孙黎

作者简介:

孙黎(1983),女,博士,副教授,主要研究方向为交直流混联系统稳定与控制;

智天阳(2001),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;

刘洪波(1973),女,博士,教授,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制,电力系统动态频率分析,电力市场;

马成廉(1983),男,博士,副教授,通信作者,主要研究方向为含直流输电的电力系统稳定与控制、能源互联网与柔性电网络、电力装备智能运行与控制, E-mail: machenglian@neepu.edu.cn。

(编辑 景贺峰)

广告目录

封二 常设栏目及热点专题

封三 2026年《电力建设》期刊征订通知

封底 使用新能源公益广告

前插1 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司