

多逆变器并联系统暂态稳定性分析及其暂态 电流注入策略

王继磊, 张 兴

(合肥工业大学可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室, 合肥 230009)

摘 要: 在电网故障期间, 逆变器之间以及逆变器与电网之间的交互作用易引发多逆变器并联系统暂态稳定性问题。此外, 以往的逆变器暂态稳定性分析与改进策略的研究对象大多为单逆变器并网系统, 可能并不适用于多逆变器并联系统。针对这一问题, 首先建立了多逆变器并联系统暂态同步模型, 指出多机交互作用会改变系统平衡点存在性和暂态特征参数。然后, 在不同电网故障初始状态和逆变器输出特性下, 采用等面积准则和相平面图分析了多机交互作用对系统暂态稳定性的影响规律。基于此, 提出了一种实现电网故障前后平衡点近似恒定的暂态电流注入策略, 以确保各逆变器暂态稳定运行, 为电网故障期间暂态电流的设置提供参考。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真软件和实验平台进行了仿真和实验验证, 结果表明所提暂态同步模型能够准确反映系统暂态响应特性, 所提策略能够最大化系统暂态稳定裕度。

关键词: 多逆变器并联系统; 暂态稳定性; 多机交互作用; 暂态电流注入策略; 电网故障; 平衡点存在性

Transient Stability Analysis and Transient Current Injection Strategy of Multi-inverter Parallel System

WANG Jilei, ZHANG Xing

(National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: During grid faults, the interaction between inverters and between inverters and the grid can easily lead to transient stability problems in the multi-inverter parallel system. In addition, most of the research objects of previous inverter transient stability analysis results and improvement strategies are single-inverter grid-connected systems, which may not be applicable to the multi-inverter parallel system. Aiming at this problem, we first established a transient synchronization model of the multi-inverter parallel system, and pointed out that multi-inverter interaction would change the equilibrium point existence and transient characteristic parameters. Then, under different grid fault initial states and inverter output characteristics, the influence of multi-inverter interaction on system transient stability was analyzed by using the equal-area criterion and the phase portrait. Based on this, a transient current injection strategy was proposed to realize the approximately constant equilibrium point before and after the grid fault to ensure the transient stable operation of each inverter and provide a reference for the setting of the transient current during the grid fault. Finally, simulation and experimental verification were conducted based on Matlab/Simulink simulation software and experimental platform. The results show that the proposed transient synchronization model can accurately reflect the system's transient response characteristics, and the proposed strategy can maximize the system's transient stability margin.

Key words: multi-inverter parallel system; transient stability; multi-inverter interaction; transient current injection strategy; grid faults; equilibrium point existence

0 引言

为了提高新能源发电的传输功率和可靠性, 光

伏、风电通常采用多逆变器并联的形式将电能输送至电网^[1]。在弱电网下, 多逆变器并联系统与电网的交互作用和逆变器之间的多机交互作用都显著增强^[2-3], 易导致系统暂态失稳, 进而威胁电力系统的安全稳定运行^[4]。

在电网故障期间, 电网导则要求逆变器具备低

基金资助项目: 国家重点研发计划(2022YFB4202301)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB4202301).

电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力, 为电网提供无功支撑, 而逆变器暂态稳定运行是其实实现 LVRT 的基础。因此, 逆变器暂态稳定性研究引起了学者们的关注。文献[5-6]指出逆变器平衡点存在性是其暂态稳定运行的前提, 并基于准静态模型讨论了平衡点存在性的主要影响因素。文献[7-9]分析了有功电流和无功电流对逆变器暂态稳定性的影响, 并发现合适的电流参考值不仅能够确保平衡点存在, 还可提高逆变器暂态稳定裕度。文献[10-11]发现分别增大和降低锁相环(phase-locked loop, PLL)的比例系数和积分系数可以优化逆变器的暂态响应特性, 提高逆变器暂态稳定性。然而, 上述研究大多以单逆变器并网系统为研究对象, 未考虑多逆变器并联系统中的多机交互作用, 难以准确评估多逆变器并联系统的暂态稳定性。

为弥补多逆变器并联系统暂态稳定性研究的不足, 文献[12-14]从平衡点存在性角度提出了多逆变器并联系统暂态稳定性评估方法, 以评估系统暂态失稳风险。文献[15]将各逆变器划分为临界集群和剩余集群, 并讨论了剩余集群输出电流对临界集群暂态稳定性的影响。综上所述, 多逆变器并联系统暂态稳定性研究已取得一些研究成果, 但多机交互作用对各逆变器暂态稳定裕度的影响规律尚未阐明。

针对电网故障期间逆变器暂态失稳问题, 一些暂态稳定性增强策略被提出, 其大多可以分为 2 类: 改进 PLL 和输出电流优化。文献[16-17]提出了面向工程应用的 PLL 暂态参数优化准则, 即基于电网故障状态调节 PLL 的积分系数, 增大 PLL 的阻尼比。文献[18-19]改变了 PLL 控制结构, 提高了逆变器的暂态稳定裕度以及其对不同电网故障程度的适应性。文献[7,14,20]提出在电网故障期间考虑电网阻抗感比, 基于电网频率闭环自适应设置有功电流参考值, 从而降低逆变器暂态失稳风险。值得注意的是, 现有的逆变器暂态稳定性增强策略大多基于单逆变器并网系统进行设计, 能否适用于多逆变器并联系统还有待进一步的研究和验证。

本文聚焦于多逆变器并联系统暂态稳定性的影响因素及变化规律分析, 首先将单逆变器并网系统与多逆变器并联系统进行对比等效, 建立了多逆变器并联系统暂态同步模型, 以准确刻画系统暂态同步机制。然后, 在不同电网故障状态和逆变器输出特性下, 从多机交互作用角度研究了系统暂态失稳机理。基于此, 提出了一种暂态电流注入策略,

以实现系统中各逆变器暂态稳定裕度最高。最后, 搭建了仿真模型和实验平台, 验证了理论分析的可靠性。

1 多逆变器并联系统模型

电网发生短路故障时, 并网逆变器通过 PLL 的反馈机制调节端电压 q 轴分量至 0, 使逆变器和电网保持同步。不同于单逆变器并网系统, 多逆变器并联系统中端电压不仅受到自身输出特性和电网参数的影响, 还受到其余逆变器运行状态的影响。因此, 在多逆变器系统中, 不仅逆变器与电网之间存在交互作用, 逆变器之间也同样存在交互作用。

1.1 多逆变器并联系统描述

图 1 为多逆变器并联系统的拓扑结构。各逆变器通过线路阻抗 R_k+jX_k 连接至公共耦合点(point of common coupling, PCC), 其中 $k=1, 2, \dots, n$ 。 X_f 和 R_g+jX_g 分别表示滤波电抗和电网阻抗。 U_k 、 I_k 和 U_g 分别为逆变器的端电压、输出电流和电网电压。 U_{PCC} 和 I_g 分别为 PCC 电压和并网电流。

以第 k 台逆变器为例, 图 2 为单逆变器并网系统主电路及典型 LVRT 控制框图。 $I_{dref,k}$ 、 $I_{qref,k}$ 和 $I_{d,k}$ 、 $I_{q,k}$ 分别为 d 轴、 q 轴的电流参考值和输出电流。 F_f 为故障标志位, 当 $F_f=0$ 时, 正常电网下 $I_{dref,k}=I_{dnom,k}$, $I_{qref,k}=I_{qnom,k}$ 。当 $F_f=1$ 时, 电网故障期间 $I_{dref,k}=I_{dfault,k}$, $I_{qref,k}=I_{qfault,k}$ 。 $I_{qfault,k}$ 需按照电网导则来设置, 而 $I_{dfault,k}$ 通常无明确要求。

考虑到电流环响应速度通常远高于 PLL, 在暂态稳定性研究中, 逆变器一般被简化成准静态电流源[7-9], 即 $I_{d,k}=I_{dref,k}$, $I_{q,k}=I_{qref,k}$ 。

1.2 系统暂态同步方程

PLL 控制结构如图 2 所示, 输出角频率 ω_k 和输出相角 θ_k 可以表示为:

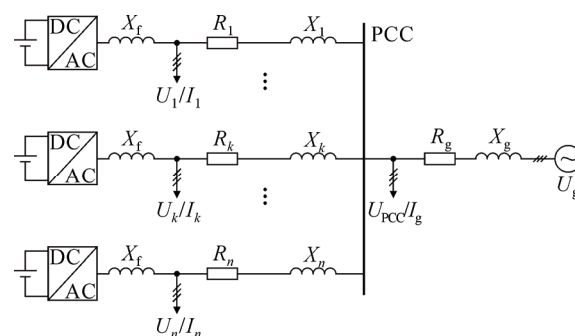


图 1 多逆变器并联系统的拓扑结构

Fig.1 Topology of the multi-inverter parallel system

$$\begin{cases} \omega_k = K_p U_{q,k} + \int K_i U_{q,k} dt + \omega_g \\ \theta_k = \int \omega_k dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_p 和 K_i 分别为 PLL 中 PI 控制器的比例系数和积分系数。

图 3 展示了电网坐标系和 PLL 坐标系的关系, 其中 $d_g q_g$ 坐标系和 $d_k q_k$ 坐标系分别表示电网坐标系和 PLL 坐标系。定义 $d_g q_g$ 坐标系和 $d_k q_k$ 坐标系的相角差为等效功角 δ_k 。 δ_k 可表示为:

$$\begin{cases} \delta_k = \theta_k - \theta_g \\ \frac{d\delta_k}{dt} = \omega_k - \omega_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_g 和 ω_g 分别表示电网相角和电网角频率。

各逆变器通常以自身 PLL 坐标系作为参考坐标系, 采用基于电压定向的电流矢量控制。为区分逆变器输出电流在不同 PLL 坐标系下的表达式, 记第 j 个逆变器的输出电流 I_j 在 $d_k q_k$ 坐标系中为:

$$I_{jk} = I_j e^{j(\delta_j - \delta_k)} = I_j e^{j\delta_{jk}} \quad (3)$$

U_k 可以表示为:

$$U_k = U_g \angle(-\delta_k) + (R_k + jX_k) I_k + (R_g + jX_g) \sum_{j=1}^n I_{jk} \quad (4)$$

然后, U_k 的 d 轴、 q 轴分量可以表示为:

$$U_{d,k} = U_g \cos \delta_k + I_k Z_k \cos(\theta_{lk} + \theta_{Zk}) + Z_g \sum_{j=1}^n I_{jk} \cos(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk}) \quad (5)$$

$$U_{q,k} = -U_g \sin \delta_k + I_k Z_k \sin(\theta_{lk} + \theta_{Zk}) + Z_g \sum_{j=1}^n I_{jk} \sin(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk}) \quad (6)$$

式中: $R_k + jX_k = Z_k \angle \theta_{Zk}$; $R_g + jX_g = Z_g \angle \theta_{Zg}$; θ_{lk} 和 θ_{lj} 分别表示 I_k 和 I_j 的相位。

对式(1)和式(6)进行微分运算, 式(1)和式(6)可以改写为:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = K_i U_{q,k} + K_p \frac{dU_{q,k}}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dU_{q,k}}{dt} = (I_{d,k} L_k + L_g \sum_{j=1}^n I_{jk} \cos(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk})) \frac{d\omega_k}{dt} + \sum_{j=1}^n I_{jk} Z_g \cos(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk}) \frac{d\delta_{jk}}{dt} - U_g \cos \delta_k \frac{d\delta_k}{dt} \quad (8)$$

将式(2)和式(8)代入式(7)中, 系统的暂态同步方程可以表示为:

$$J_k \frac{d\omega_k}{dt} = U_{q,k} - D_k (\omega_k - \omega_g) - \sum_{j=1}^n D_{jk} (\omega_k - \omega_j) \quad (9)$$

其中:

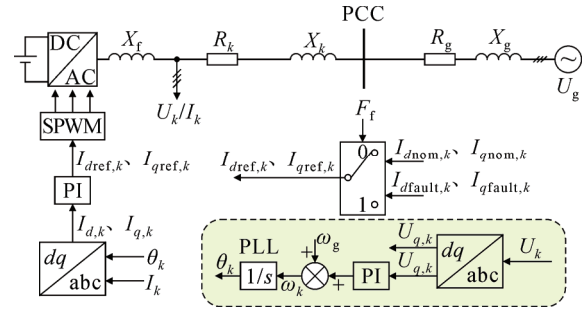


图 2 单逆变器并网系统主电路及典型 LVRT 控制框图

Fig.2 Main circuit and typical LVRT control block diagram of a single-inverter grid-connected system

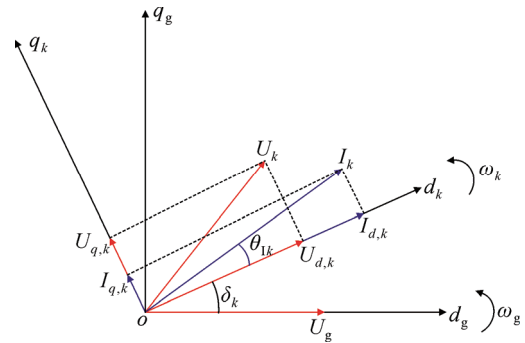


图 3 电网坐标系与 PLL 坐标系的关系

Fig.3 Relationship between the grid coordinate system and the PLL coordinate system

$$J_k = \frac{1 - K_p I_{d,k} L_k - K_p L_g \sum_{j=1}^n I_{jk} \cos(\theta_{lj} + \delta_{jk})}{K_i} \quad (10)$$

$$D_k = \frac{K_p U_g \cos \delta_k}{K_i} \quad (11)$$

$$D_{jk} = \frac{K_p Z_g I_{jk} \cos(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk})}{K_i} \quad (12)$$

式中: J_k 为等效惯性系数, 表征了逆变器的频率支撑能力; D_k 和 D_{jk} 分别表示第 k 台逆变器的自身阻尼系数和其余逆变器的接入在第 k 台逆变器暂态同步方程中产生的耦合阻尼系数, 反映了系统对 ω_k 波动的抑制能力。

图 4 为多逆变器并联系统中第 k 台逆变器模型, a_{kk} 、 a_{ck} 和 a_{gk} 分别为自同步项、耦合同步项和电网同步项, 其表达式分别为:

$$a_{kk} = Z_k I_k \sin(\theta_{lk} + \theta_{Zk}) + Z_g I_k \sin(\theta_{lk} + \theta_{Zg}) \quad (13)$$

$$a_{ck} = Z_g \sum_{j=1, j \neq k}^n I_{jk} \sin(\theta_{lj} + \theta_{Zg} + \delta_{jk}) \quad (14)$$

$$a_{gk} = -U_g \sin \delta_k \quad (15)$$

相较于单逆变器并网系统, 多逆变器并联系统

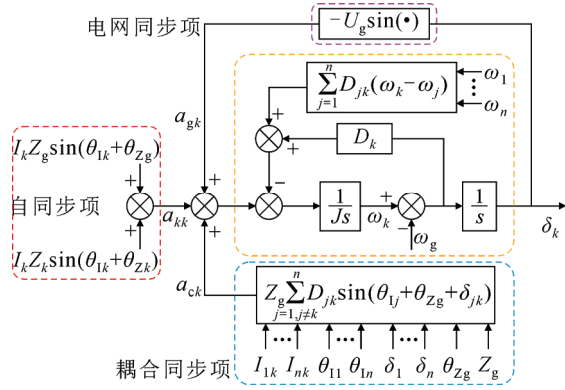


图4 多逆变器并联系统中第k台逆变器暂态同步模型

Fig.4 Transient synchronization model for the kth inverter in a multi-inverter parallel system

中多机交互作用引入了耦合同步项和耦合阻尼系数, 并改变了等效惯性参数, 进而影响了系统的暂态同步特性。

2 系统暂态稳定性分析

系统暂态稳定性不仅要求系统在遭受电网故障后存在平衡点, 还要求系统能够运行至平衡点。因此, 本章基于系统平衡点存在性和暂态同步过程讨论了多机交互作用对系统暂态稳定性的影响。

2.1 平衡点存在性

对于单逆变器并网系统, 需要存在 δ_k 满足 $U_{q,k}=0$ 才能保证逆变器有平衡点。单台逆变器平衡点存在条件可以表示为:

$$|a_{kk}| \leq U_g \quad (16)$$

在多逆变器(n 台)并联系统中, 需要存在 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 满足 $U_{q,1}=0, U_{q,2}=0, \dots, U_{q,n}=0$ 才能保证每台逆变器都有平衡点, 如式(17)所示。

$$\begin{cases} a_{11} + a_{c1} + a_{g1} = 0 \\ a_{22} + a_{c2} + a_{g2} = 0 \\ \vdots \\ a_{nn} + a_{cn} + a_{gn} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

可以发现, 由于多机交互作用, 每台逆变器平衡点存在性受到其余逆变器的影响。与式(16)类似, 系统存在平衡点需要满足 $|a_{kk} + a_{ck}| \leq U_g$ 。此外, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 可以通过求解式(17)来获取, 从而判断系统平衡点的存在性^[14]。然而, 求解非线性方程组需要较大的计算量, 且较为复杂。

对于多逆变器并联系统中的第 k 台逆变器, 假设电网故障期间无论 $\delta_j (j=1, 2, \dots, n \text{ 且 } j \neq k)$ 如何变化, 第 k 台逆变器都存在平衡点, 这意味着 $|a_{kk} + a_{ck}|$ 的最大值不超过 U_g , 如式(18)所示。

$$|a_{kk} + a_{ck}|_{\max} = |a_{kk}| + Z_g \sum_{j=1, j \neq k}^n I_{jk} \leq U_g \quad (18)$$

此时, 系统平衡点存在的条件可以表示为:

$$\begin{cases} |a_{11}| + Z_g \sum_{j=2}^n I_{j1} \leq U_g \\ |a_{22}| + Z_g \sum_{j=1, j \neq 2}^n I_{j2} \leq U_g \\ \vdots \\ |a_{nn}| + Z_g \sum_{j=1, j \neq n}^n I_{jn} \leq U_g \end{cases} \quad (19)$$

观察式(16)和式(19)发现, 随着 U_g 减小、 Z_k 增大和 Z_g 增大, 单逆变器并网系统和多逆变器并联系统平衡点不存在的风险都会增加。与单逆变器并网系统不同的是, 为保证多逆变器并联系统平衡点的存在性, 每台逆变器输出电流均应存在上限值, 且受到线路阻抗、电网阻抗和其余逆变器输出电流的限制。

2.2 暂态同步机制

附录 A 中图 A1 为电网故障期间第 k 台逆变器的 $U_g \sin \delta_k - \delta_k$ 曲线。其中, $\delta_{k,0}$ 表示正常电网下逆变器的稳态功角; 下标 s 和 u 分别表示电网故障期间逆变器稳定平衡点和不稳定平衡点。在多逆变器并联系统中, $a_{kk} + a_{ck}$ 和 $U_g \sin \delta_k$ 之间的不平衡电压驱使 ω_k 和 δ_k 运动, 各台逆变器暂态稳定需要满足 $a_{kk} + a_{ck} + a_{gk} = 0$ 和 $\omega_k = \omega_g$ 。本节将分析不同工况下多机交互作用对各逆变器暂态同步机制的影响。

2.2.1 工况 1: $U_g \sin \delta_{k,0} < a_{kk} \leq U_g$

当电网发生短路故障时, U_g 减小, 电网导则要求逆变器输出无功电流, a_{kk} 、 a_{ck} 和 a_{gk} 发生变化。若不考虑多机交互作用, 则电网故障期间逆变器存在平衡点, 其先进入加速阶段后进入减速阶段。为了避免逆变器暂态失稳, δ_k 不能超过电网故障期间逆变器的不稳定功角 $\delta_{k,u1}$ 。根据等面积准则, 逆变器暂态稳定条件为:

$$\begin{cases} S_+ = \int_{\delta_{k,0}}^{\delta_{k,s1}} (a_{kk} - U_g \sin \delta) d\delta \\ S_{-\max} = \int_{\delta_{k,s1}}^{\delta_{k,u1}} (U_g \sin \delta - a_{kk}) d\delta \\ S_+ \leq S_{-\max} \end{cases} \quad (20)$$

考虑多机交互作用, 多逆变器并联系统暂态稳定条件可以改写为:

$$\begin{cases} S_+ = \int_{\delta_{k,0}}^{\delta_{k,s1}} (a_{kk} + a_{ck} - U_g \sin \delta) d\delta \\ S_{-\max} = \int_{\delta_{k,s1}}^{\delta_{k,u1}} (U_g \sin \delta - a_{kk} - a_{ck}) d\delta \\ S_+ \leq S_{-\max} \end{cases} \quad (21)$$

对比式(20)和式(21)发现, 当 $0 < a_{ck}$ 时, 随着 a_{ck} 增加, S_+ 增加且 $S_{\max}$ 减小。相较于单逆变器并网系统, 多逆变器并联系统中第 k 台逆变器暂态稳定性降低。当 $U_g \sin \delta_{k,0} - a_{kk} < a_{ck} < 0$ 时, 随着 a_{ck} 降低, S_+ 减小且 $S_{\max}$ 增加, 逆变器暂态稳定性增强。当 $a_{ck} = U_g \sin \delta_{k,0} - a_{kk}$ 时, $S_+ = 0$, 第 k 台逆变器一定满足式(21), 其暂态稳定裕度最大。随着 a_{ck} 进一步减小, 逆变器先进入减速阶段后进入加速阶段, 其暂态稳定条件可以表示为:

$$\begin{cases} S_- = \int_{\delta_{k,s2}}^{\delta_{k,0}} (U_g \sin \delta - a_{kk} - a_{ck}) d\delta \\ S_{+\max} = \int_{\delta_{k,s2}}^{\delta_{k,s2}} (a_{kk} + a_{ck} - U_g \sin \delta) d\delta \\ S_- \leq S_{+\max} \end{cases} \quad (22)$$

当 $a_{ck} < U_g \sin \delta_{k,0} - a_{kk}$ 时, 随着 a_{ck} 减小, S_- 增加且 $S_{+\max}$ 减小, 逆变器暂态稳定性降低。

2.2.2 工况 2: $-U_g \leq a_{kk} < U_g \sin \delta_{k,0}$

类似地, 当 $a_{ck} < 0$ 时, 随着 a_{ck} 降低, 逆变器暂态稳定性下降。当 $0 < a_{ck} < U_g \sin \delta_{k,0} - a_{kk}$ 时, 随着 a_{ck} 的增加, 逆变器暂态稳定性增强。当 $a_{ck} = U_g \sin \delta_{k,0} - a_{kk}$ 时, $S_- = 0$, 逆变器暂态稳定裕度最大。随着 a_{ck} 的进一步增加, 逆变器先进入加速阶段后进入减速阶段, 其暂态稳定性反而会降低。

2.2.3 工况 3: $U_g < a_{kk}$ 或者 $a_{kk} < -U_g$

若 $U_g < a_{kk}$, 则逆变器不满足平衡点存在条件。当 $U_g - a_{kk} < a_{ck} < 0$ 时, 随着 a_{ck} 减小, 逆变器存在平衡点的概率增加, 其暂态稳定性增强。当 a_{ck} 减小至 $U_g - a_{kk}$ 时, 逆变器存在平衡点。随着 a_{ck} 的进一步减小, a_{ck} 对逆变器暂态稳定性的影响在工况 1 中已经进行了分析, 即逆变器暂态稳定性先增加后减小。

如果 $a_{kk} < -U_g$, 那么当 $0 < a_{ck} < -U_g - a_{kk}$ 时, 随着 a_{ck} 增加, 逆变器暂态稳定性增强。当 a_{ck} 增加至 $-U_g - a_{kk}$ 时, 逆变器存在平衡点。随着 a_{ck} 的进一步增大, a_{ck} 对逆变器暂态稳定性的影响在工况 2 中已经进行了分析, 即逆变器暂态稳定性先增加后减小。

2.3 参数变化对暂态稳定性的影响

本节基于 3 台逆变器构成的多逆变器并联系统, 设置了 4 种不同运行情景, 并以第 1 台逆变器为例, 定量分析了参数变化对暂态稳定性的影响。正常电网下 $I_{dnom,k}$ 和 $I_{qnom,k}$ 分别为 1(标么值)和 0。不同运行情景下 U_g 跌落至 0.2(标么值), $I_{dfault,k}$ 和 $I_{qfault,k}$ 如附录 A 中表 A1 所示。

基于式(9), 不同运行情景下多逆变器并联系统

的相平面图如图 5 所示, 其中 $-U_g \leq a_{11} < U_g \sin \delta_{1,0}$ 。图 5(a)中, $a_{c1} = 0$, 第 1 台逆变器不受多机交互作用的影响, 相当于单逆变器并网, 故障期间 δ_1 的稳态值为 -0.104 rad。图 5(b)中第 2、3 台逆变器输出较大无功电流, a_{c1} 的稳态值减小至 -0.033 (标么值)。相较于图 5(a), 由于第 1 台逆变器运行在工况 2 且 $a_{c1} < 0$, 因此逆变器暂态稳定裕度下降, δ_1 的稳态值减小至 -0.272 rad。图 5(c)中, 降低第 2、3 台逆变器的无功电流输出, 并增加有功电流输出, a_{c1} 的稳态值增加至 0.131(标么值), $a_{11} + a_{c1}$ 略微高于 $U_g \sin \delta_{1,0}$ 。因此, 可以近似认为第 1 台逆变器可以具有最大的暂态稳定裕度, δ_1 的稳态值为 0.581 rad, 略高于 $\delta_{1,0}$ 。与图 5(c)相比, 图 5(d)中进一步增加第 2、3 台逆变器的有功电流输出, a_{c1} 增加, 且故障期间 $a_{11} + a_{c1}$ 超过了 U_g ; 第 1 台逆变器发生暂态失稳, δ_1 持续增加。

运行情景 3 下不同 PLL 参数对应的第 1 台逆变器相平面图如图 6 所示。图 6(a)中, $K_i = 20$, 随着 K_p 的增加, 故障期间 δ_1 的超调量降低, 逆变器越不过不稳定平衡点, 导致暂态失稳的风险减小。图 6(b)中, $K_p = 0.2$, 随着 K_i 的增加, δ_1 的超调量增加, 逆变器暂态稳定性降低。因此, 更大的 K_p 和更小的 K_i 会使得 J_1 减小, 同时 D_1 和 D_{j1} 增加, 从而提高逆变器的暂态稳定裕度。单逆变器并网系统和多逆变器并联系统的暂态稳定性受 PLL 参数影响的变化规律是相同的[16,19]。

需要指出的是, 当系统中含有较多逆变器时, 应基于聚类降阶算法将暂态特性相似的逆变器划分为不同的集群, 在保证分析精度的同时降低相平面图的运算量, 进而量化评估系统暂态稳定性[15]。

3 多逆变器并联系统暂态电流注入策略

当 $a_{kk} + a_{ck} = U_g \sin \delta_{k,0}$ 时, 逆变器满足暂态稳定条件, 暂态稳定裕度最大, 且 δ_k 在故障前后保持不变。基于此, 本章提出一种考虑多机交互作用的多逆变器并联系统暂态电流注入策略, 以提高系统暂态稳定性。

假设系统中各逆变器都满足 $a_{kk} + a_{ck} = U_g \sin \delta_{k,0}$, 则式(6)可以改写为:

$$\mathbf{R}_{n \times n} \mathbf{I}_{q,n \times 1} + \mathbf{X}_{n \times n} \mathbf{I}_{d,n \times 1} = \mathbf{U}_{g,n \times 1} \quad (23)$$

$$\mathbf{R}_{n \times n} = \begin{bmatrix} R_1 + R_{eq,11} & R_{eq,12} & \cdots & R_{eq,1n} \\ R_{eq,21} & R_2 + R_{eq,22} & \cdots & R_{eq,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{eq,n1} & R_{eq,n2} & \cdots & R_n + R_{eq,nn} \end{bmatrix} \quad (24)$$

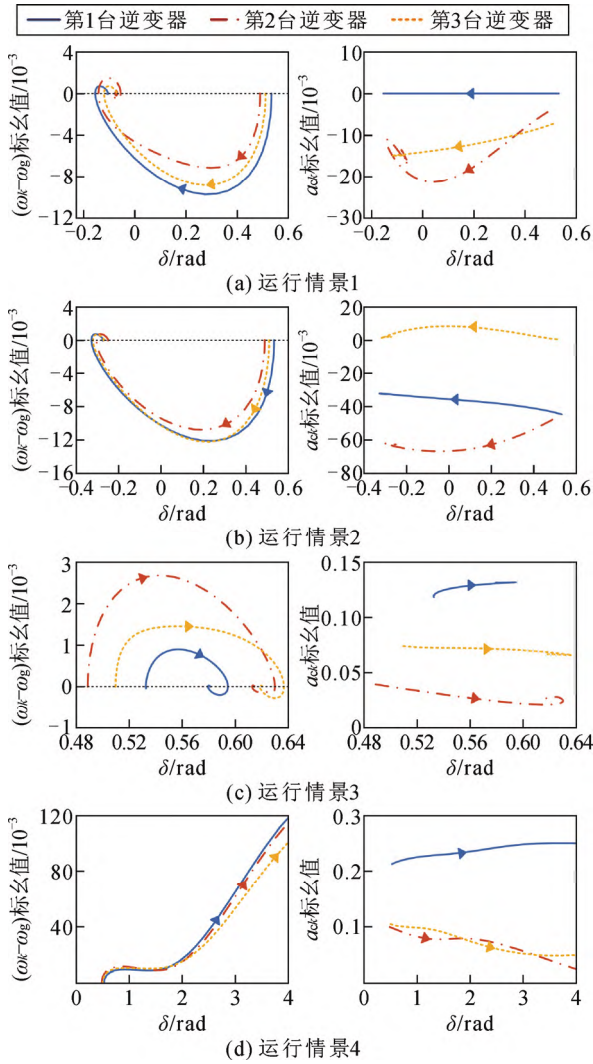


图5 不同运行情景下多逆变器并联系统的相平面图

Fig.5 Phase portrait of the multi-inverter parallel system under different operating scenarios

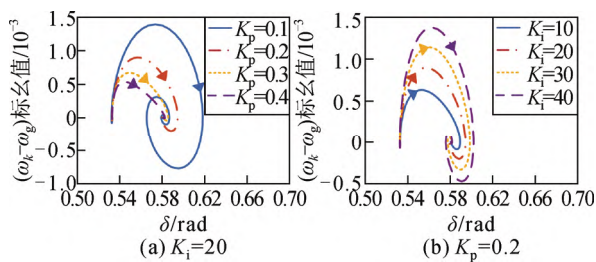


图6 不同PLL参数对应的第1台逆变器相平面图

Fig.6 Phase portrait of the first inverter corresponding to different PLL parameters

$$X_{n \times n} = \begin{bmatrix} X_1 + X_{eq,11} & X_{eq,12} & \cdots & X_{eq,1n} \\ X_{eq,21} & X_2 + X_{eq,22} & \cdots & X_{eq,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{eq,n1} & X_{eq,n2} & \cdots & X_n + X_{eq,nn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$R_{eq,jk} = R_g \cos \delta_{jk} - X_g \sin \delta_{jk} \quad (26)$$

$$X_{eq,jk} = R_g \sin \delta_{jk} + X_g \cos \delta_{jk} \quad (27)$$

式中: $I_{d,n \times 1} = [I_{d,1}, I_{d,2}, \dots, I_{d,n}]^T$; $I_{q,n \times 1} = [I_{q,1}, I_{q,2}, \dots, I_{q,n}]^T$; $U_{g,n \times 1} = [U_g \sin \delta_{1,0}, U_g \sin \delta_{2,0}, \dots, U_g \sin \delta_{n,0}]^T$ 。

在新能源场站中, $R_1 \sim R_n$ 、 $X_1 \sim X_n$ 和 $\delta_{1,0} \sim \delta_{n,0}$ 可以通过集中控制中心获取^[12,14]。此外, 可以采用电网故障检测方法测量 U_g 、 R_g 和 X_g 等电网参数^[21]。

根据电网导则, 电网故障期间各逆变器需要根据电网故障程度输出相应的无功电流, 且 $I_{q,fault,k}$ 和 U_g 的关系可表示为:

$$\begin{cases} I_{q,fault,k} = -K(0.9 - U_g), K(0.9 - U_g) \leq 1.0 \\ I_{q,fault,k} = -1.0, K(0.9 - U_g) > 1.0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: K 为无功电流补偿系数, 通常取 1.5。

在各逆变器暂态同步过程中, 电流环被认为具有理想跟踪特性。将式(28)代入式(23)中, $I_{dfault,k}$ 可以表示为:

$$I_{dfault,n \times 1} = X_{n \times n}^{-1} (U_{g,n \times 1} - R_{n \times n} I_{q,fault,n \times 1}) \quad (29)$$

式中: $I_{dfault,n \times 1}$ 和 $I_{q,fault,n \times 1}$ 分别为 $[I_{dfault,1}, I_{dfault,2}, \dots, I_{dfault,n}]^T$ 和 $[I_{q,fault,1}, I_{q,fault,2}, \dots, I_{q,fault,n}]^T$ 。

基于上述分析, 多逆变器并联系统根据式(28)和式(29)设置 $I_{dfault,k}$ 和 $I_{q,fault,k}$, 既可以满足电网导则, 又能最大化系统暂态稳定裕度。然而, 考虑到根据式(29)计算得到的 $I_{dfault,n \times 1}$ 可能会导致逆变器的输出电流超过其所能承受的最大电流。为避免损坏设备, 需要对 $I_{dfault,k}$ 进行限幅, 如式(30)和式(31)所示。

$$I_k = \sqrt{\left(X_{n \times n}^{-1} (U_{g,n \times 1} - R_{n \times n} I_{q,fault,n \times 1}) \right)_{k,1}^2 + I_{q,fault,k}^2} \quad (30)$$

$$I_{dfault,k} = \begin{cases} \left(X_{n \times n}^{-1} (U_{g,n \times 1} - R_{n \times n} I_{q,fault,n \times 1}) \right)_{k,1}, & I_k \leq I_{max,k} \\ \sqrt{I_{max,k}^2 - I_{q,fault,k}^2}, & I_k > I_{max,k} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $I_{max,k}$ 和 I_k 分别表示第 k 台逆变器所能承受的最大输出电流和暂态稳定裕度最大时的输出电流。综合考虑系统暂态稳定性、设备安全和无功支撑能力, 多逆变器并联系统暂态电流注入策略由式(28)、式(30)和式(31)组成, 其控制框图如图 7 所示。当 $U_g \leq U_{th}$ 时, $F_r = 1$ 。 U_{th} 通常取 0.9(标么值)。系统首先根据式(28)和式(29)计算得到 $I_{dfault,n \times 1}$ 和 $I_{q,fault,n \times 1}$, 然后根据式(30)判断 I_k 是否超过 $I_{max,k}$ 。当 $I_k \leq I_{max,k}$ 时, $C_r = 1$, 采用所提暂态电流注入策略的各逆变器不仅能够满足电网导则, 还能最大化其暂态稳定裕度。否则, $C_r = 0$, 所提暂态电流注入策略为保证设备安全, 需根据各逆变器的 $I_{max,k}$ 和 $I_{q,fault,k}$ 选取相应的 $I_{dfault,k}$ 。

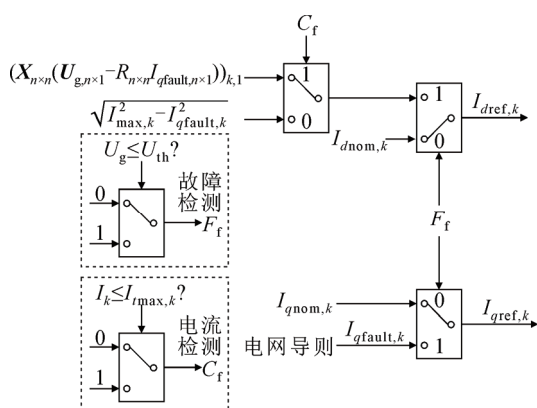


图7 多逆变器并联系统暂态电流注入策略控制框图

Fig.7 Control block diagram of transient current injection strategy for multi-inverter parallel system

4 仿真验证

为验证理论分析的正确性和所提暂态电流注入策略的有效性,建立了由3台20 kW并网逆变器组成的多逆变器并联系统仿真模型,其拓扑结构如图1所示。附录A中表A2为各逆变器的主电路参数和控制参数,且 $I_{max,k}$ 标么值取1.3。

4.1 各逆变器输出特性对系统暂态稳定性的影响

不同运行情景下 U_g 标么值都在 $t=1$ s时跌落至0.2,且持续1.5 s。运行情景1下多逆变器并联系统的暂态仿真结果如图8所示。 $\delta_{1,0}$ 为0.533 rad,电网故障发生后第1台逆变器的输出电流快速被调节至参考值, a_{11} 标么值从0.212减小至-0.022,第1台逆变器运行在工况2。故障期间第2、3台逆变器输出电流都为0, $a_{c1}=0$ 。因此,第1台逆变器满足式(19),存在平衡点,其暂态稳定性不受多机交互作

用的影响。考虑到暂态序贯切换控制动作和输出电流调节时间等固有延时,故障瞬间 ω_1 会短暂超过 ω_g , δ_1 略有增加。此后, δ_1 先减小后增加,故障期间 δ_1 的最小值和稳态值分别为-0.246 rad和-0.103 rad。值得注意的是,故障期间 U_1 、 U_2 和 U_3 标么值分别为0.387、0.336和0.334,都高于0.2,这是因为第1台逆变器输出了无功电流,而第2、3台逆变器受到了多机交互作用的影响。

在运行情景2下,多逆变器并联系统的暂态仿真结果如图9所示。相较于运行情景1,故障期间 a_{c1} 的稳态值从0减小至-0.035(标么值),而 a_{11} 保持不变,第1台逆变器仍然存在平衡点。根据(22)可知,第1台逆变器的 S_+ 增加, S_{+max} 减小。因此,多机交互作用降低了第1台逆变器的暂态稳定裕度,电网故障期间 δ_1 的最小值和稳态值分别减小至-0.475 rad和-0.278 rad。此外,由于第2、3台逆变器输出无功电流和多机交互作用的影响,故障期间 U_1 、 U_2 和 U_3 标么值分别增加至0.652、0.613和0.636,系统的电压支撑能力有所提升。

图10展示了运行情景3下多逆变器并联系统的暂态仿真结果。电网故障期间 a_{c1} 为0.132(标么值), $a_{11}+a_{c1}$ 略微高于 $U_g \sin \delta_{1,0}$,电网故障期间 δ_1 的稳态值为0.584 rad,相较于 $\delta_{1,0}$ 略有增加。这是因为多机交互作用增强了第1台逆变器的暂态稳定性, S_+ 约为0,第1台逆变器一定满足暂态稳定条件,即 $S_+ < S_{+max}$ 。与第1台逆变器类似,故障期间第2、3台逆变器的功角也仅是略微增加,而暂态稳定裕度显著提升。因此,合理设置暂态电流参考值,可以利用多机交互作用来降低整个系统暂态失稳的风险。

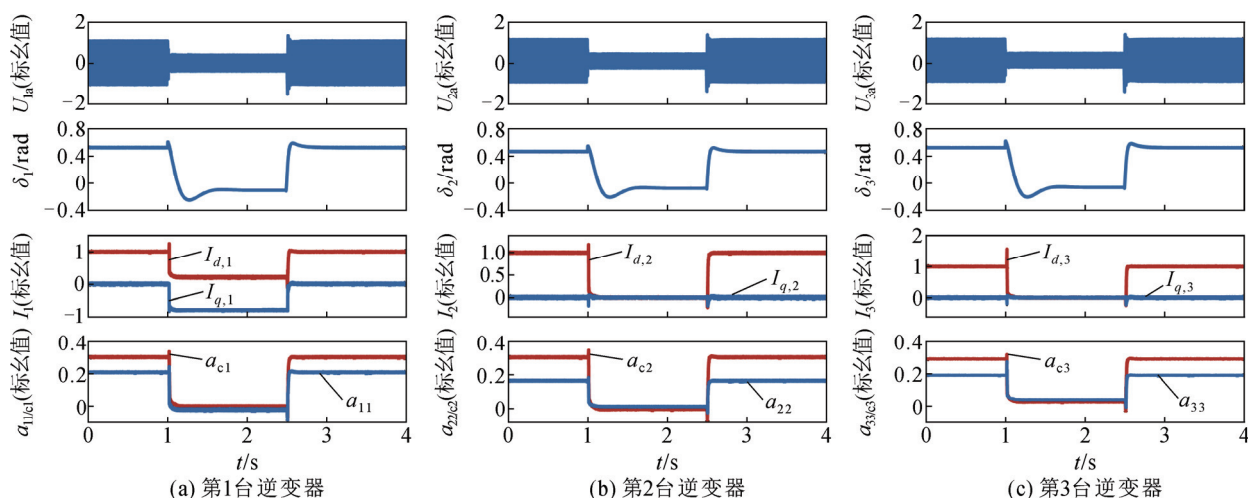


图8 运行情景1下系统的暂态仿真结果

Fig.8 Transient simulation results of the system under operating scenario 1

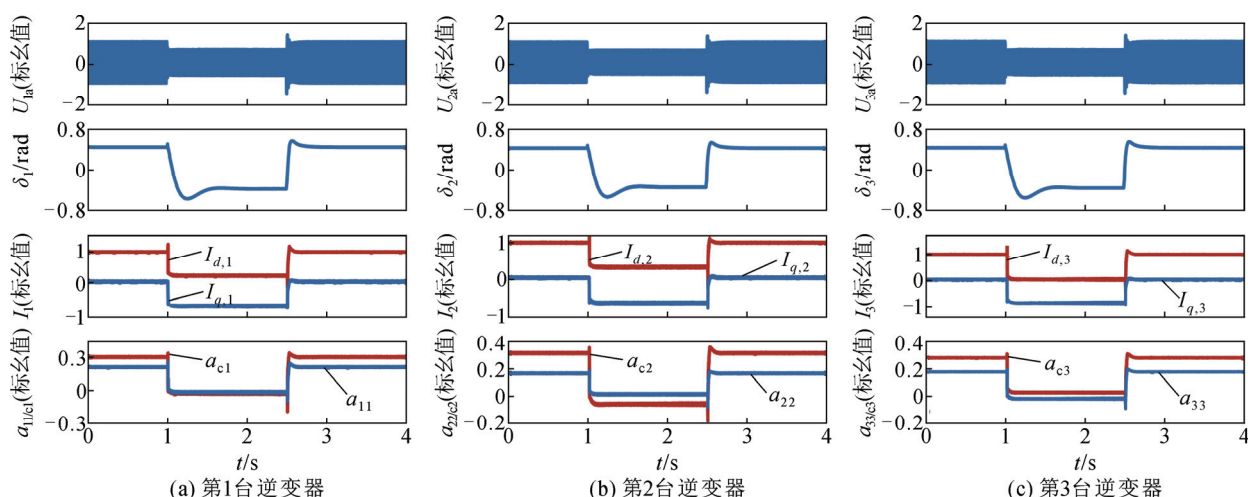


图9 运行情景2下系统的暂态仿真结果

Fig.9 Transient simulation results of the system under operating scenario 2

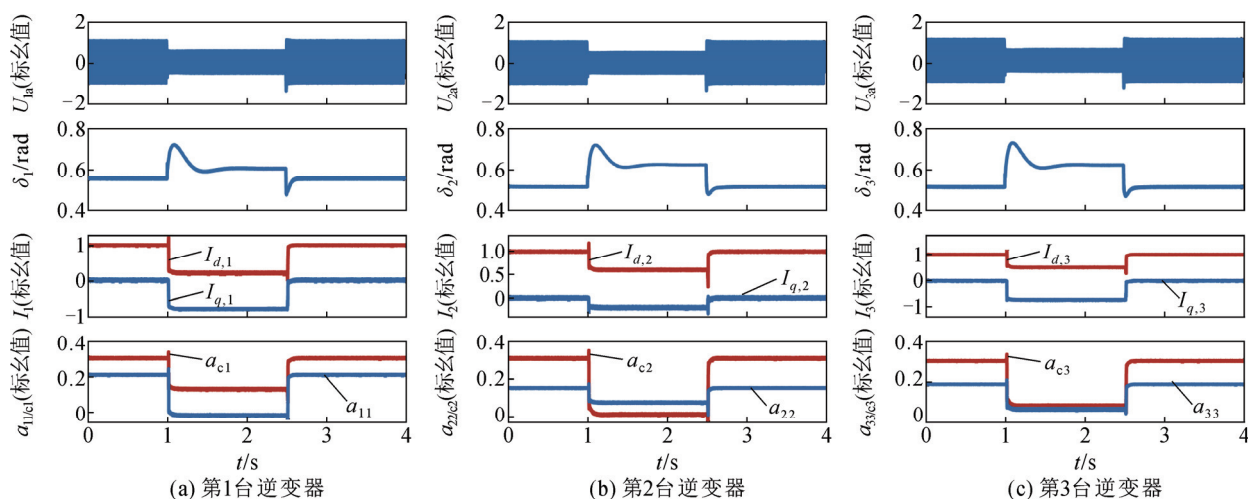


图10 运行情景3下系统的暂态仿真结果

Fig.10 Transient simulation results of the system under operating scenario 3

图11为运行情景4下多逆变器并联系统的暂态仿真结果。电网故障期间随着第2、3台逆变器输出较大的有功电流, $a_{11}+a_{c1}$ 、 $a_{22}+a_{c2}$ 和 $a_{33}+a_{c3}$ 超过了0.2(标么值),这意味着3台逆变器都不存在平衡点,继而发生暂态失稳。各逆变器的功角持续增加,电压、电流、自同步项和耦合同步项都发生振荡。系统不仅难以为电网提供无功支撑,还存在设备损坏和脱网的风险。

值得注意的是,虽然第1台逆变器的输出电流始终保持不变,但考虑到 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 也会影响多机交互作用。因此,第1台逆变器对第2台和第3台逆变器暂态稳定性的影响在不同运行情景下并不相同。类似地,基于系统暂态同步模型和暂态稳定性分析方法,可以准确评估多机交互作用对第2台和

第3台逆变器暂态稳定性的影响,此处不再赘述。

4.2 所提策略与现有暂态稳定性增强策略的对比

为了提高逆变器暂态稳定裕度,提出了一些暂态稳定性增强策略,其控制框图如附录A中图A2所示。附录A中表A3展示了不同暂态稳定性增强策略的优缺点。

当 U_g 标么值跌落至0.2并持续1.5s时,采用单机暂态稳定性最强的电流控制策略和典型LVRT策略的系统暂态仿真结果如图12所示。采用典型LVRT策略的各逆变器的 $I_{dfault,k}$ 和 $I_{qfault,k}$ 标么值分别为0和-1,电网故障期间各逆变器存在平衡点。然而,各逆变器不满足暂态稳定条件,进而会发生暂态失稳。单机暂态稳定性最强的电流控制策略未考虑多机交互作用对逆变器暂态稳定性的影响,导致

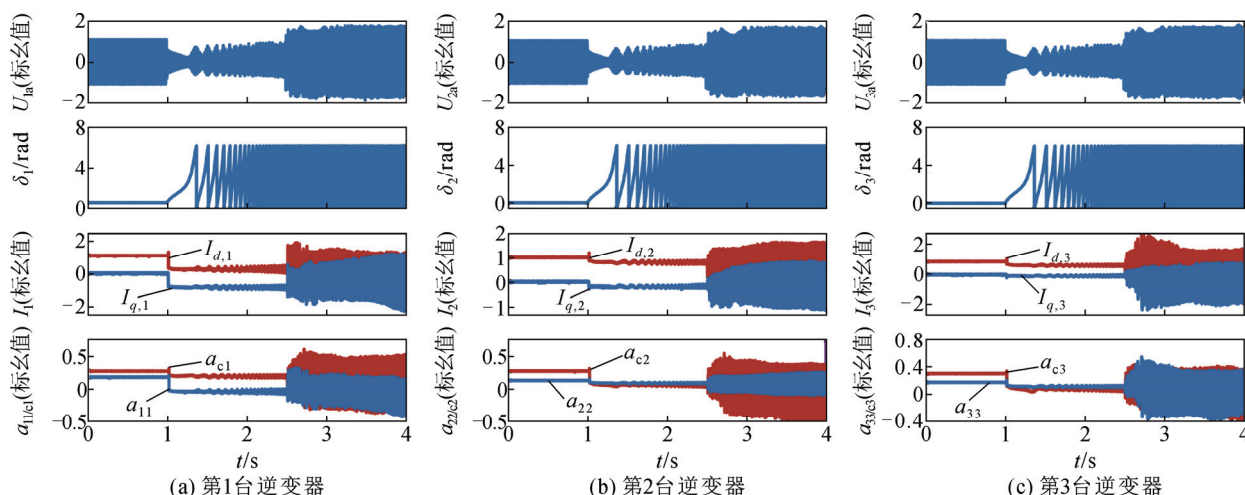


图 11 运行情景 4 下系统的暂态仿真结果

Fig.11 Transient simulation results of the system under operating scenario 4

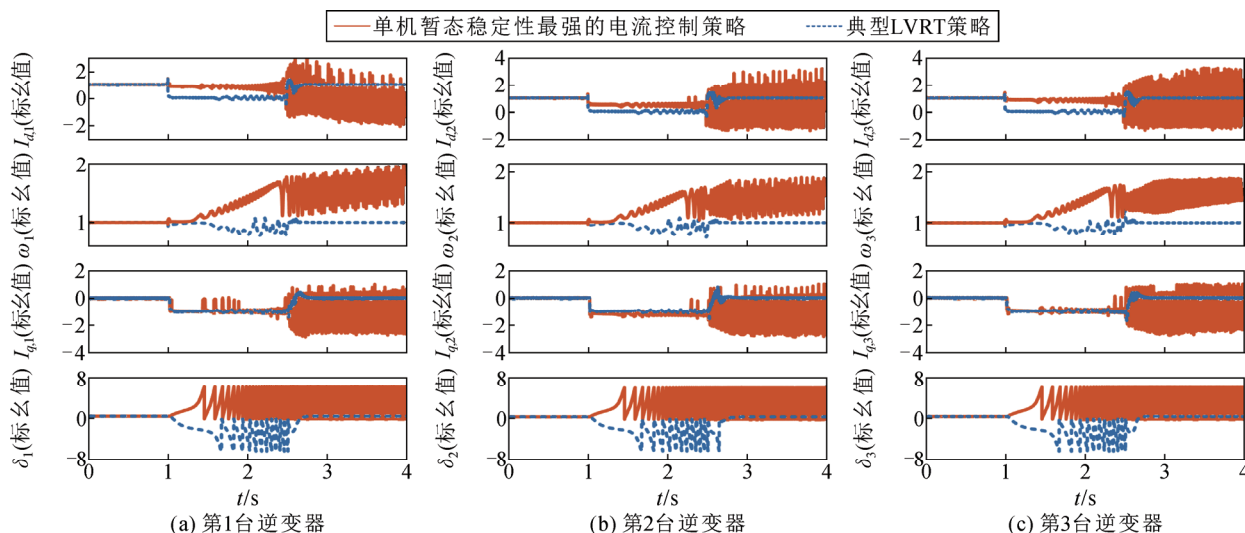


图 12 采用典型 LVRT 策略和单机暂态稳定性最强的电流控制策略的系统暂态仿真结果

Fig.12 Transient simulation results of the system using a typical LVRT strategy and a current control strategy with the strongest transient stability of a single machine

电网故障期间各逆变器不存在平衡点, 难以实现系统暂态稳定裕度最大。相较于典型 LVRT 策略, 单机暂态稳定性最强的电流控制策略反而会进一步使得系统暂态稳定性降低。

图 13 为采用多机暂态电流自适应优化策略、所提暂态电流注入策略和变结构 PLL 策略的系统暂态仿真结果, 其中 U_g 标幺值跌落至 0.2 并持续 1.5 s。电网故障期间变结构 PLL 策略改善了逆变器的暂态响应特性, 使得各逆变器能够暂态稳定运行至平衡点。多机暂态电流自适应优化策略和所提优化策略都基于电网导则选择 $I_{q\text{fault},k}$, 但在 $I_{d\text{fault},k}$ 的设置上存在差异。例如, 多机暂态电流自适应优化策

略将 $I_{d\text{fault},1}$ 、 $I_{d\text{fault},2}$ 和 $I_{d\text{fault},3}$ 标幺值分别设置为 0.52、0.11 和 0.37, 而所提策略将 $I_{d\text{fault},1}$ 、 $I_{d\text{fault},2}$ 和 $I_{d\text{fault},3}$ 标幺值分别设置为 0.68、0.35 和 0.55。这主要是由于这 2 种策略的优化角度不同, 前者本质上是为了消除 a_{kk} 和 a_{ck} 对 $U_{q,k}$ 的影响, 从而降低逆变器之间和逆变器与电网之间的交互作用; 而後者的目的则是使电网故障前后的平衡点不发生变化, 利用多机交互作用的最优化来实现各逆变器的暂态稳定裕度最高。因此, 相较于本文所提策略, 多机暂态电流自适应优化策略不仅会带来更大的功角变化量, 还会降低逆变器的有功功率传输能力。

不同电网故障程度下采用所提暂态电流注入

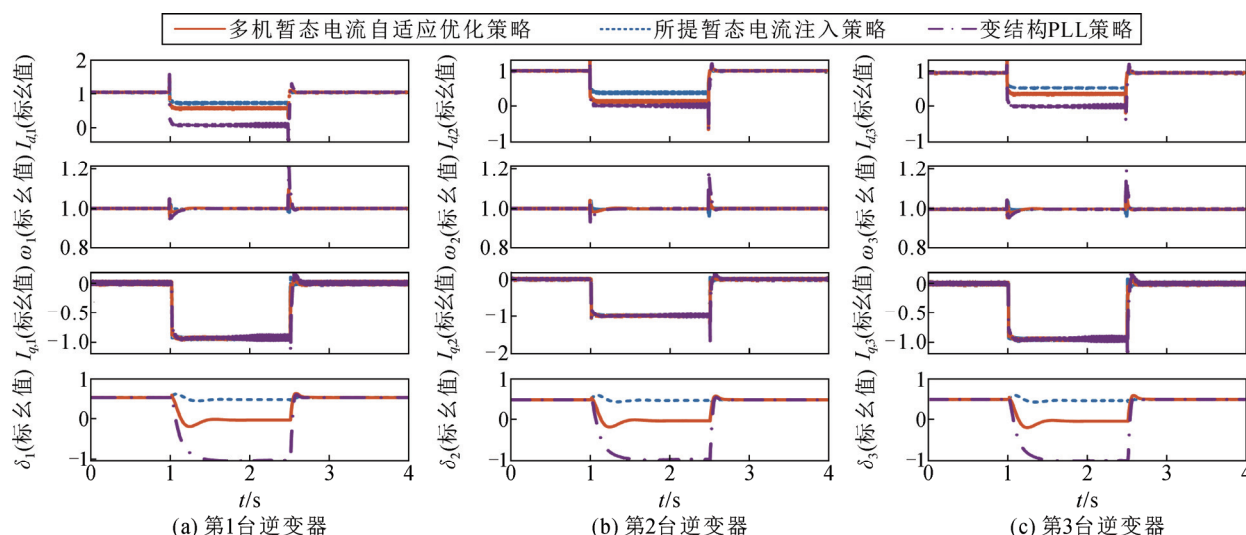


图 13 采用多机暂态电流自适应优化策略、所提暂态电流注入策略和变结构 PLL 策略的系统暂态仿真结果

Fig.13 Transient simulation results of the system using the multi-machine transient current adaptive optimization strategy, the proposed transient current injection strategy and the variable structure PLL strategy

策略的系统暂态仿真结果如附录 A 中图 A3 所示。很明显, 采用所提暂态电流注入策略可以使系统避免暂态失稳。但随着电网故障电压的降低, 故障期间 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 的稳态值会有所减小, 且略低于 $\delta_{1,0}$ 、 $\delta_{2,0}$ 和 $\delta_{3,0}$ 。这是由于各逆变器为避免造成设备损坏, 对 $I_{dfault,k}$ 进行了限幅。因此, 所提暂态电流注入策略对不同电网故障程度具有较好的适应性。

不可否认的是, 所提暂态电流注入策略依赖于电网参数的测量, 因此可能会影响系统的暂态稳定性。当电网发生故障时, 现有电网故障诊断方法基于故障暂态特征数据可以在 10 ms 内检测到电网故障程度^[21], 且新能源场站中通信延时一般不超过 5 ms^[22]。附录 B 中图 B4 为考虑电网故障诊断延时的系统暂态仿真结果, 其中 U_g 标么值跌落至 0.2, 电网故障诊断延时设置为 15 ms。电网故障发生后, 典型 LVRT 策略生效, 逆变器此时只输出无功电流, 功角迅速减小。当系统获取到电网故障参数后, 所提暂态电流注入策略取代典型 LVRT 策略, 通过合理设置有功电流, 促使功角的稳态值在电网故障前后近似不发生改变。可以发现, 电网故障诊断延时会导致采用所提暂态电流注入策略的系统暂态稳定性有所下降, 但仍能显著提高暂态稳定裕度。

5 实验验证

基于 3 台逆变器搭建了多逆变器并联系统, 实验平台如附录 A 中图 A5 所示。实验参数与仿真参数保持一致, 如附录 A 中表 A2 所示, 且 U_g 标么值

跌落至 0.2 并持续 1.5 s。附录 A 中图 A6 为采用典型 LVRT 策略的系统实验结果。电网故障期间系统暂态失稳, U_{PCCA} 和 I_{ga} 发生振荡。此外, 由于 $\omega_1 - \omega_g$ 始终小于 0, 且 δ_1 持续减小, 因此为了便于观察, 将 δ_1 的显示范围设定为 $[-2\pi, 2\pi]$ 。由此, 电网故障期间 δ_1 在 $-2\pi \sim 0$ 间持续振荡。

采用所提暂态电流注入策略的系统实验结果如附录 A 中图 A7 所示。可以观察到, 故障前 δ_1 为 0.534 rad, 电网故障诊断延时会导致故障发生后 δ_1 稍有变化, 且 $\omega_1 - \omega_g$ 很快恢复至 0。上述结果说明, 所提暂态电流注入策略能够提高系统的暂态稳定裕度, 保证系统暂态稳定运行, 并为暂态电流的设置提供参考。

6 结论

针对多逆变器并联系统暂态稳定性问题, 本文研究了多机交互作用对系统暂态稳定性的影响规律, 提出了最大化系统暂态稳定裕度的各逆变器暂态电流注入策略。所得结论如下:

1) 多机交互作用导致多逆变器并联系统中每台逆变器平衡点的存在性不仅受到自身输出电流、线路阻抗和电网阻抗的影响, 还与其他逆变器的输出电流有关。

2) 多机交互作用对系统暂态稳定裕度的影响取决于各逆变器的运行特性和电网故障状态。具体来说, 电网故障瞬间自同步项与耦合同步项之和等于电网同步项, 系统暂态稳定裕度最大。

3) 所提出的暂态电流注入策略能够最大化系统暂态稳定裕度, 在不同电网故障程度下均能保证电网故障期间系统与电网能够恢复同步, 避免了传统 LVRT 策略失稳的问题。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 刘芳, 刘威, 汪浩东, 等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.
- [2] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.
XU Zheng. Reasonable Definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.
- [3] 李梦杰, 谢震, 高翔, 等. 弱电网下双馈风电机组混合功率同步控制策略及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8388-8400.
LI Mengjie, XIE Zhen, GAO Xiang, et al. Hybrid power synchronization control strategy of DFIG-based wind turbines and its stability analysis under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8388-8400.
- [4] KOUDELKA J, MACEJKO S, TOMAN P, et al. Simplified dynamic model for continental Europe synchronous area separation[C]//Proceedings of the 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering. Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 2022: 1-5.
- [5] YUAN H, XIN H H, HUANG L B, et al. Stability analysis and enhancement of type-4 wind turbines connected to very weak grids under severe voltage sags[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 838-848.
- [6] DONG D, WEN B, BOROYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.
- [7] 蔡旭, 秦垚, 王晗, 等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2478-2490.
CAI Xu, QIN Yao, WANG Han, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2478-2490.
- [8] PEI J X, YAO J, LIU R K, et al. Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5515-5530.
- [9] MA S K, GENG H, LIU L, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 216-226.
- [10] LIU Y, YAO J, PEI J X, et al. Transient stability enhancement control strategy based on improved PLL for grid connected VSC during severe grid fault[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 218-229.
- [11] 吕雅诗, 邹赵悦, 吴超, 等. 基于低通滤波器的标么化锁相环同步稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3848-3858.
LYU Yashi, ZOU Zhao Yue, WU Chao, et al. Analysis of synchronization stability of the normalization PLL based on low-pass filter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3848-3858.
- [12] HE X Q, GENG H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [13] HE X Q, GENG H. Synchronization stability analysis and enhancement of grid-tied multi-converter systems[C]//Proceedings of 2020

IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2020: 1-8.

- [14] CHEN S Y, YAO J, LIU Y, et al. Coupling mechanism analysis and transient stability assessment for multiparalleled wind farms during LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2132-2145.
- [15] YI X T, PENG Y L, ZHOU Q, et al. Transient synchronization stability analysis and enhancement of paralleled converters considering different current injection strategies[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 1957-1968.
- [16] WU H, WANG X F. An adaptive phase-locked loop for the transient stability enhancement of grid-connected voltage source converters[C]//Proceedings of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Portland, USA: IEEE, 2018: 5892-5898.
- [17] HE X Q, GENG H, XI J B, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 438-450.
- [18] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Robust fault ride through of converter-based generation during severe faults with phase jumps[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 570-583.
- [19] WU C, XIONG X L, TAUL M G, et al. Enhancing transient stability of PLL-synchronized converters by introducing voltage normalization control[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 69-78.
- [20] 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.
- [21] 詹惠瑜, 刘科研, 盛万兴, 等. 有源配电网故障诊断与定位方法综述及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 660-671.
ZHAN Huiyu, LIU Keyan, SHENG Wanxing, et al. Review and prospects of fault diagnosis and location method in active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 660-671.
- [22] 钮厚敏, 贾科, 刘鑫, 等. 光伏直流升压场站并网整体协同低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 1-12.
NIU Houmin, JIA Ke, LIU Xin, et al. Overall coordinated low voltage ride-through control strategy for grid connection of a photovoltaic DC booster station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 1-12.



WANG Jilei

Ph.D. candidate

Corresponding author



ZHANG Xing

Ph.D., Professor

王继磊(通信作者)

1997—, 男, 博士生

主要研究方向为新能源并网系统的暂态稳定性

E-mail: 1392420343@qq.com

张兴

1963—, 男, 博士, 教授

研究方向为电力电子变换控制、可再生能源发电与并网控制

E-mail: honglf@ustc.edu.cn

收稿日期 2023-07-02 修回日期 2023-11-17 编辑 何秋萍