

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.5.182

中图分类号: TM464

文献标志码: A

考虑非线性阻尼效应的孤岛微电网暂态稳定性分析及提升策略研究

唐英杰, 查晓明, 田震(中国电源学会会员), 李翼翔, 胡宇飞, 万子镜
(武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 随着可再生能源发电及并网技术的快速发展, 以电力电子变流设备为主导的微电网受到了越来越多的关注。由于电力电子变流器的低惯量和强非线性特征, 孤岛微电网在大扰动下易发生暂态失稳。考虑微电网中构网逆变器与跟网逆变器的交互作用, 提出1种基于等面积法则的暂态稳定性判据和暂态稳定提升控制策略。首先, 建立了孤岛微电网的简化二阶动态模型, 包含依赖于功角的非线性阻尼项。然后, 从能量角度分析了非线性阻尼对加速减速面积的影响规律。考虑非线性阻尼的分布特性, 推导出正阻尼区域内的暂态稳定性判据。根据稳定边界条件, 提出1种基于电压前馈的暂态稳定性提升控制策略。最后, 利用 MATLAB/Simulink 仿真对所提稳定性判据和改进控制策略的有效性进行了验证。结果表明, 所提微电网暂态稳定性判据和改进控制策略可为电力电子变流器的参数优化设计和提高微电网稳定运行能力提供理论依据。

关键词: 孤岛微电网; 构网变流器; 跟网变流器; 等面积法则; 暂态稳定性

Transient Stability Analysis and Improved Control Strategy for Islanded Microgrid Considering Nonlinear Damping Effect

TANG Yingjie, ZHA Xiaoming, TIAN Zhen, *Member, CPSS*, LI Yixiang, HU Yufei, WAN Zijing
(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the rapid development of power generation by renewable energy and the grid-connection technology, the microgrid dominated by power electronic converters has attracted more and more attention in recent years. Owing to the low inertia and high nonlinearity of power electronic converters, an islanded microgrid under large disturbances is more likely to lose its transient stability. Considering the interactions between grid-forming and grid-following converters in the microgrid, a transient stability criterion based on the equal area criterion (EAC) and an improved control strategy for transient stability are proposed. First, the simplified second-order dynamic model of the islanded microgrid is established, which contains a nonlinear damping term relying on the power angle. Then, the impact of the nonlinear damping term on the acceleration and deceleration areas is revealed from the energy perspective. Considering the distribution characteristics of nonlinear damping, a transient stability criterion is formulated for the positive damping region. In addition, according to the stable boundary conditions, an improved control strategy for transient stability based on voltage

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-01-18, 2022-03-01;
录用日期: 2022-03-02; 网络首发日期: 2022-04-12
基金项目: 国家自然科学基金(青年科学基金)资助项目(52007134); 国家自然科学基金(联合基金)资助项目(U1866601); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2042021kf0014)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China—Youth Science Fund under the grant 52007134; Joint Funds of National Natural Science Foundation of China under the grant U1866601; Fundamental Research Funds for the Central Universities under the grant 2042021kf0014

feedforward is also put forward. Finally, simulations are carried out with MATLAB/Simulink to verify the effectiveness of the proposed stability criteria and the improved control strategy. The results show that the microgrid transient stability criterion and the improved control strategy proposed can provide a theoretical basis for the parameter optimization design of power electronic converters and the improvement of the stable operation capability of microgrid.

Keywords: Islanded microgrid; grid-forming converter; grid-following converter; equal area criterion (EAC); transient stability

以电力电子变流器为主导的微电网作为一种有效、可靠的分布式集成方式,近年来越来越受到人们的关注^[1]。微电网可以在并网模式或孤岛模式下运行,具有灵活可控的优点^[2],但由于缺少大电网强大的频率和电压支撑,微电网在孤岛模式下易发生暂态失稳^[3]。电力电子变流器作为可再生能源发电和并网的关键接口设备,根据其动态特性的不同,主要分为构网变流器和跟网变流器^[4,5]这2种类型。构网变流器表现为电压源,其电压幅值和频率可直接调节,可为微电网提供电压和频率支撑,典型的控制策略有下垂控制和虚拟同步控制^[6,8];跟网变流器一般表现为电流源,由电流控制器调节其电流的幅值和相角,能够为微电网提供功率,一般利用锁相环PLL(phase-locked loop)实现同步,然而在电网故障和扰动下,跟网变流器容易失去同步稳定性。考虑到2种类型变流器具有不同的特点且优势互补,微电网一般会同时配置这2种类型的变流器^[9]。

由于电力电子变流器的强非线性和不同类型变流器之间存在交互作用,微电网的暂态稳定性分析面临新的挑战^[3]。文献[10-12]研究了弱电网条件下单个变流器接入电网的稳定性问题;文献[13]利用相图法研究了严重电网故障下电压源型逆变器的同步稳定性;文献[14]应用李雅普诺夫方法分析了PLL的稳定性;文献[15]针对跟网变流器提出了1种基于端口哈密顿理论的暂态稳定性判据,并给出了稳定域的定量估计。上述文献所研究的弱电网条件仅考虑了电网阻抗对变流器暂态稳定性的影响,弱电网的频率一般假设为恒定值,仍可为变流器运行提供稳定的频率支撑。然而,孤岛微电网不再存在稳定的电压和频率支撑。因此,目前关于弱电网条件下变流器稳定性的研究成果不能应用于孤岛微电网^[16]。

等面积法则EAC(equal area criterion)已广泛应用于以同步机为主导的传统电力系统的暂态稳定性分析^[17]。从能量角度分析,EAC方法通过比较加速区域和最大减速区域来评估系统的稳定性,对于二阶系统简单有效。文献[2,17]将PLL模型与同步机的摇摆方程类比,并用EAC方法评估了弱电

网条件下PLL的暂态稳定性。然而,其完全忽略了非线性阻尼项的影响,导致所计算的稳定域误差较大。与具有正阻尼的同步机不同,基于PLL变流器系统的等效阻尼高度依赖于系统状态,负阻尼效应会使系统稳定域变小。因此,本文通过分析阻尼的分布特性,考虑非线性阻尼对暂态稳定性的影响,借鉴同步机分析方法提出了1种有效的暂态稳定性判据,所计算的暂态稳定域更加准确。

1 孤岛微电网非线性动态建模

图1为简化孤岛微电网系统拓扑,其由构网变流器、跟网变流器和负载 R_{load} 组成。 L_{f1} 和 L_{f2} 为变流器的滤波电感, L_l 为传输线路的电感。图2给出了构网与跟网这2种变流器的具体控制策略,其中构网变流器采用经典的下垂控制,而跟网变流器则采用基于PLL的比例积分PI(proportional integral)电流控制。典型PLL的控制框图如图2(b)所示,公共耦合点PCC(point of common coupling)处的电压 v_{PCC} 作为PLL输入,PLL跟踪特性主要由比例系数 K_p 和积分系数 K_i 决定。

1.1 跟网变流器动态建模

对于跟网变流器,一般认为电流控制回路的响应比PLL的响应快得多^[18]。为简化分析,本文忽略电流环和线路电感的快尺度动态。因此跟网变流器的电流可表示为 $i_1 = I_1 \angle \theta_{PLL}$ 。忽略线路电阻,根据基尔霍夫定律可得PCC电压 v_{PCC} 的动态方程为

$$v_{PCC} = v_g + L_l \frac{di_1}{dt} \quad (1)$$

式中, v_g 为构网变流器形成的微电网相电压。

通过 $d-q$ 变换,式(1)可改写为

$$\begin{cases} v_{PCCd} = V_g \cos(\theta_g - \theta_{PLL}) \\ v_{PCCq} = V_g \sin(\theta_g - \theta_{PLL}) + \dot{\theta}_{PLL} L_l I_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{PCCd} 和 v_{PCCq} 分别为 v_{PCC} 的 d 轴和 q 轴分量; V_g 和 I_1 分别为 v_g 和 i_1 的幅值; θ_g 和 θ_{PLL} 分别为微电网电压的相角和PLL输出的相角。

由于忽略了电流控制回路的快尺度动态,并且假定跟网变流器在单位功率因数下运行,因此可认

为线路电流 i_l 的幅值 I_l 等于其参考值 I_{dref} , 即

$$\begin{cases} i_{ld} = I_l = I_{dref} \\ i_{lq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, i_{ld} 和 i_{lq} 分别为线路电流 i_l 的 d 轴和 q 轴分量。根据图 2, PLL 的动态方程为

$$\dot{\theta}_{PLL} = \int [\omega_n + (K_p + K_i) v_{PCCq}] \quad (4)$$

式中: ω_n 为标称角频率。根据式(2)和式(4), 可推导出 PLL 频率 ω_{PLL} 的动力学方程为

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{PLL} = & \frac{K_p V_g (\omega_g - \omega_{PLL}) \cos(\theta_g - \theta_{PLL})}{1 - K_p I_{dref} L_1} + \\ & \frac{K_i V_g \sin(\theta_g - \theta_{PLL}) + \omega_{PLL} L_1 I_{dref} K_i}{1 - K_p I_{dref} L_1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ω_g 为微电网角频率。

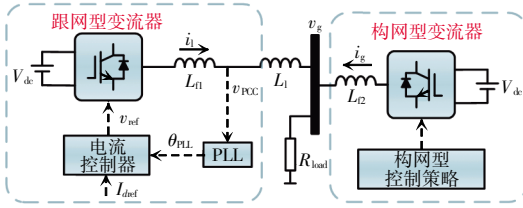
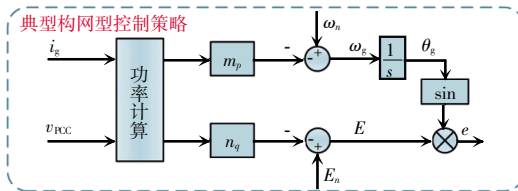
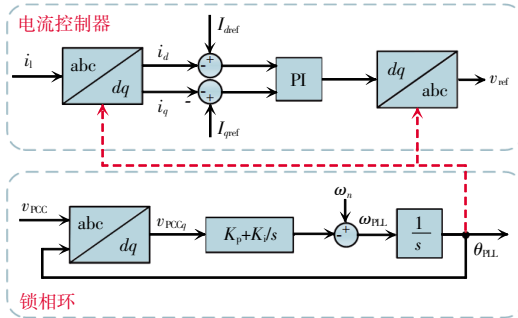


图 1 微电网拓扑

Fig. 1 Topological structure of microgrid



(a) 构网控制器



(b) 跟网控制器

图 2 控制策略

Fig. 2 Control strategies

1.2 构网变流器动态建模

对于下垂控制的构网变换器, 输出相电压的幅值 V_g 主要由无功功率决定。由于本文主要研究基

于微电网的频率稳定性, 负载设定为阻性负载, 因此系统无功功率波动较小, 此时 V_g 可视为常数, 负载功率可表示为

$$P_{load} = 1.5 \frac{V_g^2}{R_{load}} \quad (6)$$

忽略跟网变流器电流控制回路的快尺度动态, 可得到如图 3 所示的等效电路。跟网变换器输出的有功功率为

$$P_{GFW} = 1.5 I_l V_{PCC} = 1.5 V_g I_{dref} \cos(\theta_g - \theta_{PLL}) \quad (7)$$

构网变流器的有功功率为

$$P_{GFM} = P_{load} - P_{GFW} \quad (8)$$

根据图 2(a)所示的下垂控制策略, 则有

$$\omega_g = \omega_n - m_p P_{GFM} \quad (9)$$

式中, m_p 为有功-频率下垂系数。

结合式(6)~式(9), 可得构网变流器的频率方程为

$$\omega_g = \omega_n - m_p \left[1.5 \frac{V_g^2}{R_{load}} - 1.5 V_g I_{dref} \cos(\theta_g - \theta_{PLL}) \right] \quad (10)$$

由式(10)可知, 构网变流器与跟网变流器的频率之间存在交互作用, 使得频率稳定性分析更加复杂。

定义此微电网的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \theta_{PLL} - \theta_g \\ x_2 = \omega_{PLL} - \omega_g \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_1 可视为微电网的功角; x_2 为锁相环角频率与电网角频率之差。根据式(5)和式(10), 可得孤岛微电网的非线性状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = k_1 - (k_2 \sin x_1 - k_5 \cos x_1) - \\ \quad (k_3 + k_4 \cos x_1 - k_6 \sin x_1) x_2 \end{cases} \quad (12)$$

其具体表达式为

$$\begin{cases} M = 1 - K_p I_{dref} L_1 \\ k_1 = I_{dref} K_i L_1 (\omega_n - m_p P_{load}) / M \\ k_2 = K_i V_g / M \\ k_3 = -K_i I_{dref} L_1 / M \\ k_4 = K_p V_g / M \\ k_5 = 1.5 m_p I_{dref}^2 K_i L_1 V_g / M \\ k_6 = 1.5 m_p I_{dref} V_g \end{cases} \quad (13)$$

式中, M 和 $k_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 为与系统参数相关的常数。

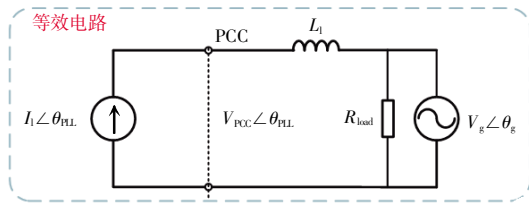


图 3 忽略电流环动态后的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit after ignoring dynamic characteristics of current loop

2 非线性阻尼对暂态稳定性的影响

对于式(12)所示的二阶非线性系统,通过推导其解析解来评估暂态稳定性非常困难。但将其与同步机转子的摇摆方程进行比较,发现两者之间存在结构相似性。因此考虑借鉴同步机的EAC分析方法,推导孤岛微电网系统的稳定性判据。

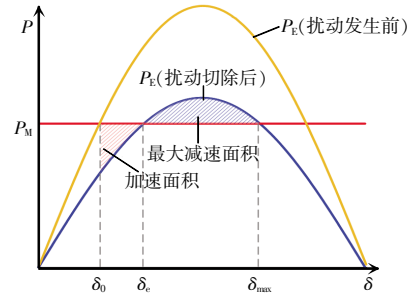
2.1 同步机的稳定条件分析

同步机的摇摆方程为

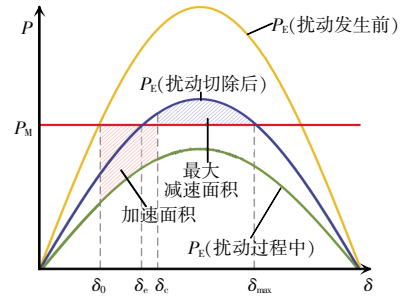
$$T_J \dot{\omega} = P_M - P_{Emax} \sin \delta - D_{SC}(\omega - \omega_g) \quad (14)$$

式中: T_J 为惯性常数; P_M 为机械功率; P_{Emax} 为最大电磁功率; δ 为功角; D_{SC} 为阻尼转矩。

根据所遭受扰动的不同, EAC 的应用方式也有区别。电力系统运行中的扰动根据最终是否被切除可分为 2 类: 无需切除的持续性扰动, 如负载波动、运行方式改变等; 最终切除的短暂性扰动, 如短路故障等。如图 4(a) 所示, 对于持续性扰动, 运用 EAC 时需分别得到扰动前、后 2 条功角特性曲线; 如图 4(b) 所示, 对于短暂性扰动(故障在 $\delta = \delta_c$ 时切除, δ_c 为故障切除时的功角), 运用 EAC 时需要得到故障前、故障期间、故障后这 3 条功角曲线。根据 EAC, 如果加速面积小于最大减速面积, 则表明系统在故障扰动后仍保持稳定运行。但无论系统遭遇上述何种扰动, 扰动前的功角曲线仅提供了 1 个系统进入暂态过程前的初始功角。为了简化表达, 下文假设初始功角已知, 不再给出扰动前的功角曲线。



(a) 持续扰动



(b) 暂态扰动

图 4 不同扰动下的 EAC 示意

Fig. 4 Schematic of EAC under different disturbances

以持续扰动为例, 说明系统暂态过程中的功角变化和能量转化。已有文献^[11]表明, 当忽略阻尼转矩时, 同步机在暂态过程中总能量保持不变, 此时同步机转子受扰后的加减速过程类似于小球从光滑曲面释放, 存在势能和动能的转换。在不考虑阻尼项 D_{SC} 时, 通过对摇摆方程的积分, 可以得到同步机的等效势能 E_p 和动能 E_k

$$\begin{cases} E_p = -P_M \delta - P_{Emax} \cos \delta + E_0 \\ E_k = \frac{1}{2} T_J |\omega_{20}^2 - \omega_{10}^2| \end{cases} \quad (15)$$

式中: E_0 为系统在初始功角 δ_0 下的势能; ω_{20} 和 ω_{10} 分别为同步机末态和初态的角速度。作出 E_p 关于 δ 的曲线, 如图 5 所示, 可知功角边界 δ_{max} 对应势能的局部最高点, 而平衡点 δ_c 对应势能的局部最低点。若同步机功角在暂态过程中越过 δ_{max} , 转子将会加速失稳, 与图 5 小球越过最高点 δ_{max} 后加速下落类似。

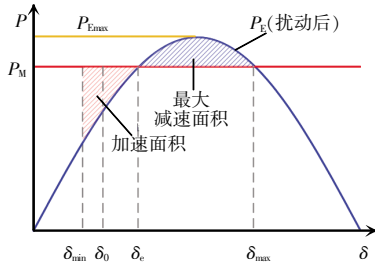
根据上述分析, 可得同步机在扰动后能达到稳态 δ_c , 需要满足的条件:

(1) 扰动发生后, 机械功率与电磁功率仍存在 1 个稳定的平衡点, 即 $P_M < P_{Emax}$;

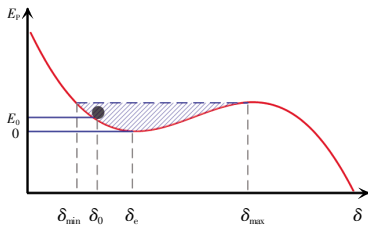
(2)在暂态过程中,功角 δ 不能超过其稳定边界 δ_{\max} 和 δ_{\min} ,即加速面积小于最大减速面积。

功角边界 δ_{\max} 和 δ_{\min} 的具体计算式为

$$\begin{cases} P_{E_{\max}} \sin \delta_e = P_M \\ \delta_{\max} = \pi - \delta_e \\ \int_{\delta_{\min}}^{\delta_e} (P_M - P_{E_{\max}} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_e}^{\delta_{\max}} (P_{E_{\max}} \sin \delta - P_M) d\delta \end{cases} \quad (16)$$



(a)EAC 示意



(b)类比小球下落示意

图 5 能量转化示意

Fig. 5 Schematic of energy conversion

2.2 微电网系统稳定条件推导

微电网动态特性与同步机的类比如图 6 所示,假设其等效机械功率、等效电磁功率和等效阻尼转矩分别为 P_m 、 P_e 和 D_p ,由式(12)和式(13)可得

$$\begin{cases} P_m = k_1 \\ P_e = k_2 \sin x_1 - k_5 \cos x_1 = P_{\max} \sin(x_1 + \varphi_1) \\ D_p = k_3 + k_4 \cos x_1 - k_6 \sin x_1 = \\ \quad k_3 + \sqrt{k_4^2 + k_6^2} \sin(x_1 + \varphi_2) \\ P_{\max} = \sqrt{k_2^2 + k_5^2} \\ \varphi_1 = -\arctan(k_5/k_2) \\ \varphi_2 = -\arctan(k_4/k_6) \end{cases} \quad (17)$$

此时式(12)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = P_m - P_e - D_p x_2 \end{cases} \quad (18)$$

由于同步机的阻尼恒为正,有利于系统的暂态稳定性,因此在上述基于 EAC 分析同步机的暂态稳定性忽略了阻尼的影响,所计算出的稳定域仍然有效。但通过对比,式(18)所建立的模型中 P_m 、 P_e 与系统参数(L_i 、 R_{load} 、 K_p 、 K_i)有关, D_p 与状态变量 x_1 有关,这使得孤岛微电网的动态特性与同步机转子的动力学之间存在明显差异。

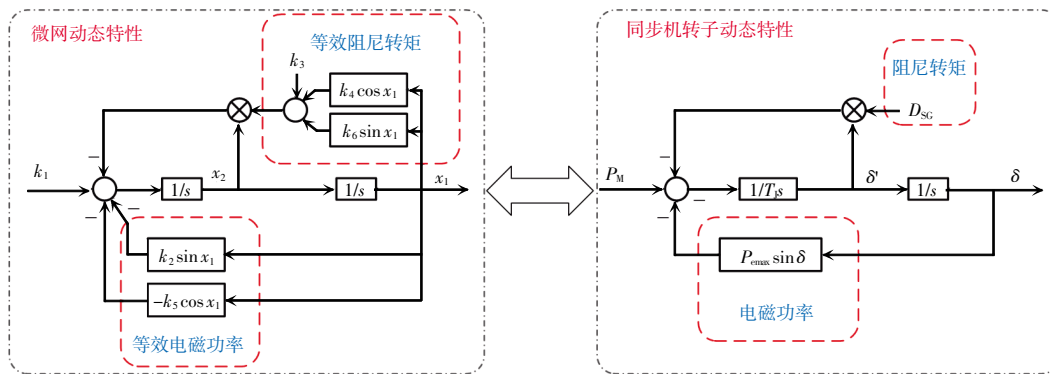


图 6 微电网动态与同步机转子动态的对比

Fig. 6 Comparison of dynamics between microgrid and SG rotor

式(18)中的等效机械功率 P_m 不再是实际的机械功率,不能保证为正值;等效阻尼 D_p 不再是常数,而是随功角 x_1 的变化而变化。如图 7 所示,在功角振荡过程中,系统可能进入负阻尼区域,不利于系统稳定。这给 EAC 的直接应用带来了困难。借鉴同步机的分析思路,此时可在正阻尼区域内运用

EAC,并根据加速面积小于最大减速面积这一原则,计算功角边界。此时系统需要满足的稳定条件:①等效机械功率应为正,即 $P_m > 0$;②等效机械功率与电磁功率存在平衡点,即 $P_m < P_{\max}$;③平衡点需要在正阻尼区域内,否则系统会振荡发散;④在暂态过程中,功角 x_1 不能超过边界 $x_{1\max}$ 和 $x_{1\min}$ 。条

件②和④与同步机的暂态稳定条件相同,同步机的机械功率由原动机提供,且阻尼恒为正,因此附加的条件①和③在同步机中自然满足。

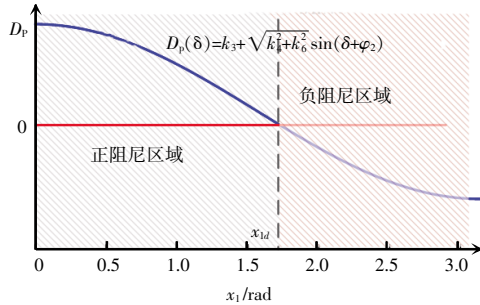


图7 阻尼非线性分布

Fig. 7 Distribution of nonlinear damping term

3 微电网稳定性分析及提升策略

3.1 基于EAC的微电网暂态稳定性判据

对于孤岛微电网系统,考虑非线性阻尼项 D_p 对系统稳定性的影响,使得功角稳定边界的计算更加复杂。考虑到 P_m 、 P_e 、 D_p 与系统参数(L_1 、 R_{load} 、 K_p 、 K_i)有关,需求取稳定条件对应的数学约束,之后分析失稳机理,优化变流器的参数设计。

3.1.1 等效机械功率为正

此条件是运用EAC分析的前提,其对应的数学约束为

$$P_m > k_1 = I_g K_i L_1 (\omega_n - m_p P_{load}) / M > 0 \quad (19)$$

对于一个实际的下垂控制变换器,一般满足 $m_p P_{load} \ll \omega_n$,因此此约束条件可转化为

$$M = 1 - K_p I_{def} L_1 > 0 \quad (20)$$

由式(20)可知,过大的PLL比例系数 K_p 、电流参考值 I_{def} 及线路电感 L_1 ,可能破坏此稳定条件,导致系统失稳,这也符合相关文献的结论。

3.1.2 存在等效机械功率与等效电磁功率的平衡点

此条件要求系统的最大电磁功率 P_{Emax} 大于扰动后的机械功率 P_m ,可得

$$k_1 \leq \sqrt{k_2^2 + k_3^2} \quad (21)$$

满足此条件时,平衡点 x_{1e} 的计算式为

$$x_{1e} = \arcsin\left(\frac{k_1}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}\right) - \varphi_1 \quad (22)$$

分析式(13)和式(21)可知,线路电感 L_1 的增

加和电压 V_g 的降低不利于微电网系统的稳定。

3.1.3 平衡点在正阻尼区域内

如果平衡点位于负阻尼区,则平衡点不是稳定点,功角会发散。因此,平衡点应位于正阻尼区域内,即满足约束

$$\begin{cases} x_{1d} = \arcsin\left(\frac{-k_3}{\sqrt{k_4^2 + k_6^2}}\right) - \varphi_2 \\ x_{1e} < x_{1d} \end{cases} \quad (23)$$

式中, x_{1d} 为阻尼转矩过零时对应的功角。如图7所示,可知阻尼的分布与PLL参数 K_p 、 K_i 、下垂控制器参数 m_p 密切相关。由式(13)可知, K_p 的降低及 K_i 、 m_p 的增加会扩大负阻尼区,不利于微电网系统稳定。

3.1.4 在瞬态过程中,等效功角 x_1 不超过稳定性边界

非线性阻尼随功角变化的特性使得功角边界的计算更加复杂。从能量角度来看,正阻尼的作用增加了减速区域,有利于系统稳定性,然而负阻尼的影响是增加加速面积,而加速区域将影响系统稳定性分析,但其做功与状态变量的实际路径有关,难以精确地定量计算。因此,EAC方法不适用于负阻尼部分的稳定性分析。如图8所示,当 $x_1 < x_{1e}$ 时,正阻尼区域依然满足运用EAC的基本条件。此时根据EAC加速面积小于最大减速面积(横线填充区域)的要求,功角边界计算式为

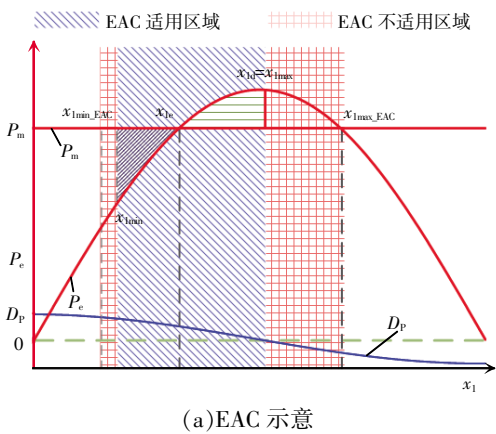
$$\begin{cases} \int_{x_{1min}}^{x_{1e}} (P_m - P_e) d\delta = \int_{x_{1e}}^{x_{1max}} (P_e - P_m) d\delta \\ x_{1max} = x_{1e} \end{cases} \quad (24)$$

依然类比小球从曲面释放的能量转换过程,当小球从图8(b)斜线填充区域落下时,由于阻尼为正(相当于摩擦力 f 为正),小球最终会稳定在势能0点处。因此,所计算的功角边界 x_{1min} 、 x_{1max} 绝对安全。

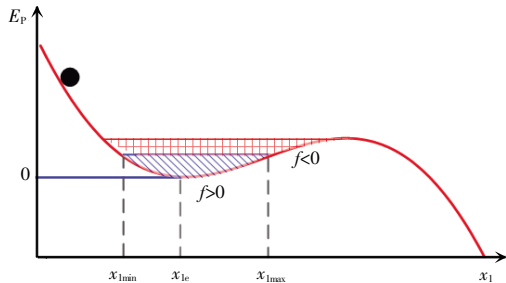
3.2 系统参数对暂态稳定性的影响

基于上述分析,揭示了简单孤岛微电网的4个稳定条件,对应数学约束分别为式(20)、式(21)、式(23)和式(24)。根据所提出的稳定条件,发现与系统稳定性关系密切的参数有:跟网变流器的参考电流 I_{def} 、线路电感 L_1 、微电网电压 V_g 和PLL参数 K_p 、 K_i 。跟网变流器的参考电流 I_{def} 和线路电感 L_1 的增

增加对 4 个稳定条件均不利, 因此减小 I_{dref} 可提高孤岛微电网系统在大扰动下的同步稳定性。同样, 电压 V_g 的降低也容易导致失稳。对于控制器参数, K_p 的增加一方面使阻尼过 0 点 x_{1d} 右移, 正阻尼区域增加, 有利于稳定条件④, 但另一方面又不利于稳定条件①, 故应当通过权衡选择 K_p 的合理区间。 K_i 的降低有利于系统的稳定性, 但值得注意的是 K_i 与 PLL 的动态响应速度密切相关, 过小的 K_i 会延长扰动后系统重新同步所需的时间, 因此 K_i 既要考虑稳定性, 又要考虑动态性能。过大的下垂系数 m_p 不利于系统的稳定性, 这也说明了构网变流器的频率支持能力对稳定性有影响。



(a) EAC 示意



(b) 类比小球下落示意

图 8 适用于微电网的 EAC

Fig. 8 EAC applied for microgrid

3.3 基于电压前馈的暂态稳定提升控制策略

与同步机类似, 微电网系统的等效输入机械功率和输出电磁功率之间的持续不平衡是功角失稳的主要原因, 其中输入的机械功率与 I_{dref} 正相关, 而输出的电磁功率与 V_g 正相关。当系统受到扰动使得等效机械功率增大时, 为了避免功率不平衡, 需要增大变流器的输出功率; 另一方面, 出于电力电子设备安全运行的考虑, 需要降低变流器的输出电

流, 二者之间存在矛盾。即保护控制会限制变流器的输出功率, 从而导致功率不平衡增加, 进一步增加加速面积, 降低稳定裕度。

根据上述系统参数对暂态稳定性的影响分析, 可知故障扰动下适当减小跟网变流器的输出电流可提高微电网的暂态稳定性。因此, 可通过设计电流补偿控制策略, 实时调整跟网变流器的输出电流。图 9 为本文提出的 1 种基于电压前馈的跟网改进控制策略。通过检测微电网电压与设定值的偏差 ΔV 来表征微电网故障的严重程度, 当微电网电压低于给定值 V_{ref} 时, 电压前馈控制将根据电压偏差 ΔV 计算出电流补偿量 ΔI , 以减小跟网变流器的电流参考值。当故障被清除, 电压恢复到额定值时, ΔI 恢复为 0, 以确保跟网变流器能够在稳态下提供额定功率。电压偏差和附加电流补偿之间的关系为

$$\Delta I = K \Delta V = K (V_g - V_{ref}) \quad (25)$$

式中: K 为虚拟导纳, A/V ; V_g 为微电网电压的幅值; V_{ref} 为额定电压幅值。可根据实际情况选定合适的 K , 兼顾变流器的同步稳定性与负载的功率需求。

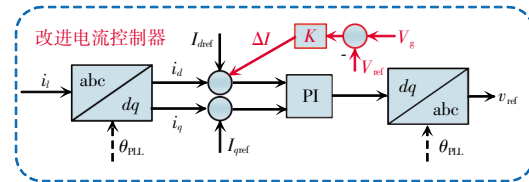


图 9 改进的电流控制策略

Fig. 9 Improved current control strategy

4 仿真实验

4.1 暂态稳定域的仿真验证

为验证分析方法的有效性, 在 Simulink 中进行了仿真验证, 电路拓扑如图 1 所示, 系统参数如表 1 所示。稳定域可表征系统的稳定运行能力, 系统失稳的本质是系统状态受扰后从稳定区域中逃逸。不同的故障(短路故障、负载切换)反映在二阶系统的相平面上, 均表现为状态变量 x_1 和 x_2 的扰动。因此, 本文在验证稳定域时, 所施加的是电网相

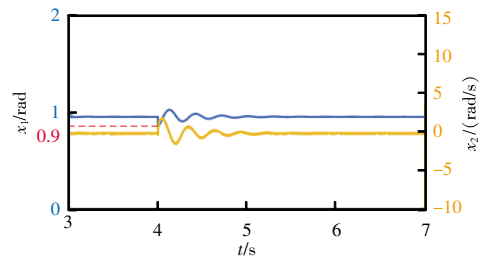
位扰动,以便定量控制 x_1 进入暂态过程前的初始值。电网相位跳变的扰动方法已经在多篇文献中应用,如文献[19]解释了交流输电线路短路、断路或线路切换会引起电网相位跳变;文献[20]解释了即使 PLL 工作正常,电压相位跳变也会破坏控制回路的 dq 轴解耦性能,并导致并网变流器失稳;文献[21]给出了电网故障导致变流器电压相位跳变的具体计算方法。

在表 1 参数下, x_1 初始功角为 1.01。通过仿真实验发现, x_1 的实际稳定边界为(0.478 5,1.638 7),不考虑阻尼分布的传统 EAC 计算的边界为(0.430 9, 2.131 9),超过了实际边界。而本文得到的边界为(0.521 2,1.518 3),虽有一定保守性,但可保证系统稳定。具体验证如下:首先微电网在表 1 所示参数下稳定运行一段时间,在 4 s 时施加微电网相位扰动,如图 10(a)所示,当系统遭遇小扰动后, x_1 以初态 0.9 进入暂态过程,系统将很快恢复稳定;当系统遭遇临界扰动时,如图 10(b)所示, x_1 以 0.5 为初态进入暂态过程后, x_1 振荡衰减,逐渐趋于稳定;当系统遭遇大扰动时,使 x_1 以较小的初态(如 0.45)进入暂态过程,此时加速面积较大,功角最终越过右边界,进入负阻尼区域,系统加速失稳,如图 10(c)所示。

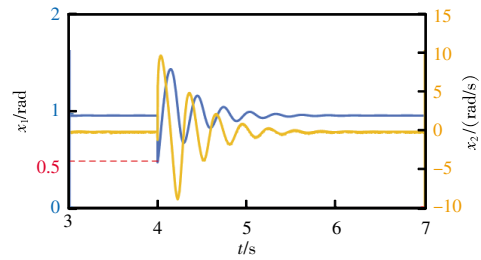
表 1 微电网系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of microgrid system

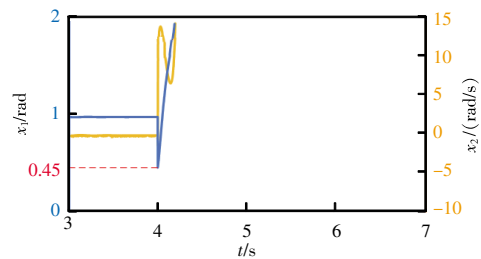
参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	80
PLL 控制参数 K_p, K_i	1, 10
线路电感 L_l/mH	3
构网变流器滤波电感 L_{f1}/mH	0.45
跟网变流器滤波电感 L_{f2}/mH	0.45
本地负载 R_{load}/Ω	1
参考电压幅值 E_n/V	20
标称角频率 $\omega_n/(rad/s)$	100 π
有功-频率下垂系数 m_p	0.001
无功-电压下垂系数 n_p	0.005
跟网变流器电流参考值 I_{ref}/A	18
改进电流环比例系数 K	0.5
改进电流环电压给定值 V_{ref}/V	20



(a)小扰动下稳定运行(x_1 扰动至 0.9 rad)



(b)临界扰动下稳定运行(x_1 扰动至 0.5 rad)



(c)大扰动下不稳定运行(x_1 扰动至 0.45 rad)

图 10 微电网系统在不同扰动下的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of microgrid system under different disturbances

4.2 暂态稳定提升控制策略的仿真验证

为验证改进控制策略的有效性,选择对系统施加电压暂降扰动,输入功率与输出功率将会不平衡。微电网电压首先设定为 20 V,在 4 s 时施加电压扰动,如图 11(a)和(b)所示,当微电网电压暂降值设置为 18 V 时,原控制策略与改进控制策略均能达到新的稳态。但观察发现,改进控制策略由于减小了功率的不平衡,其暂态过程振荡较小,系统快速到达新的平衡点。当电压由 20 V 降低为 17 V 时,如图 11(c)和(d)所示,原控制策略下,跟网变流器失去了与构网变流器的同步,而改进控制策略下系统仍然可以达到新的稳态,证明改进的控制策略有效。

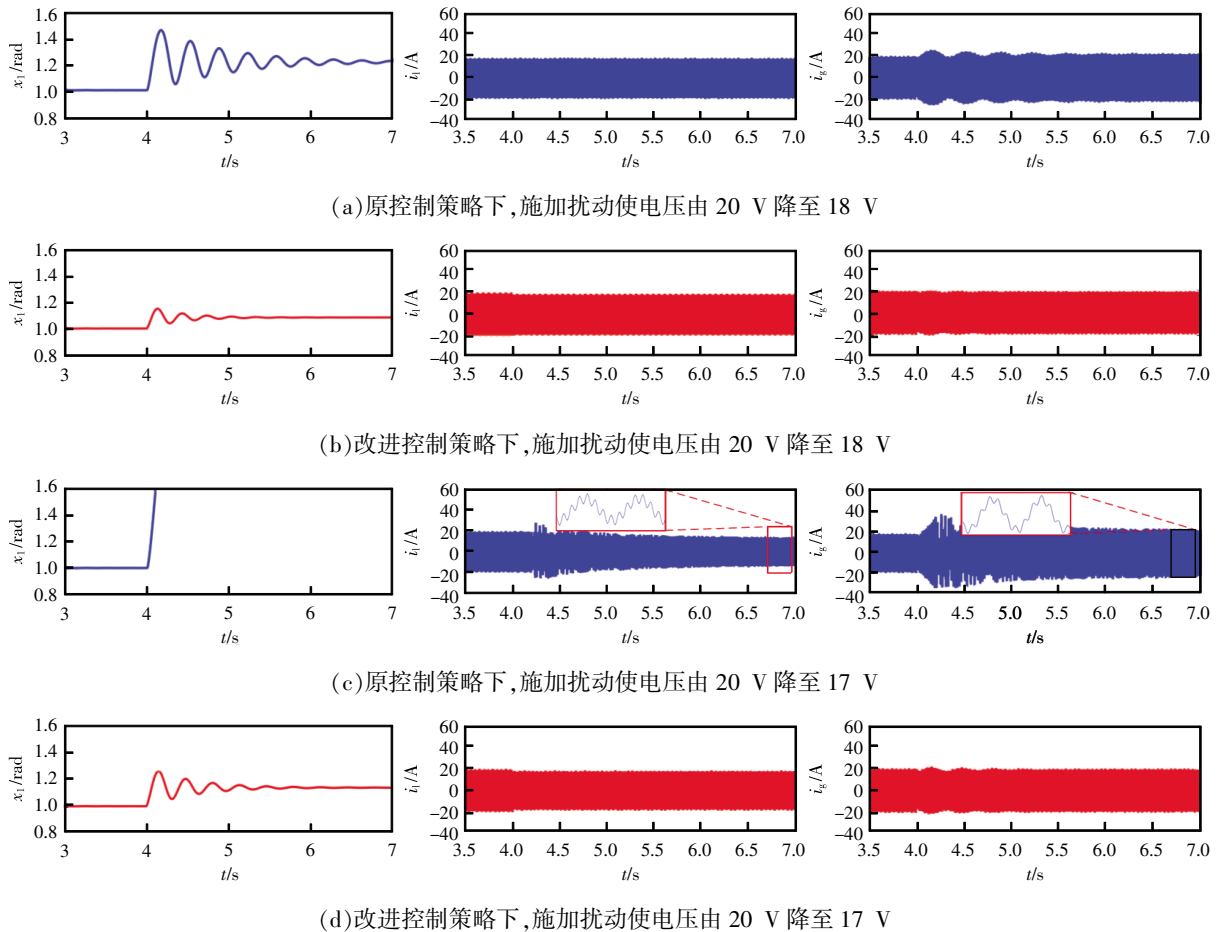


图 11 微电网系统在不同扰动、不同控制策略下的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of microgrid system under different disturbances and different control strategies

5 结论与展望

本文考虑构网和跟网 2 种类型变流器之间的交互作用,研究了孤岛微电网系统的暂态稳定性。通过分析阻尼的分布特性,考虑非线性阻尼对暂态稳定性的影响,在传统 EAC 方法基础上提出了 1 种有效的暂态稳定性判据,所计算的暂态稳定域更加准确。在此基础上,揭示了系统参数对暂态稳定性的影响,并提出了面向暂态稳定性提升的改进控制策略,得出如下结论。

(1)简化微电网系统的非线性模型与同步机转子动力学模型相似,但其阻尼不确定性使其失稳现象比同步机更为复杂。

(2)孤岛微电网系统的 4 个稳定条件均具有明确的物理意义。不同于同步机的稳定性要求,孤岛

微电网系统不仅要求平衡点存在,且需要位于正阻尼区域内。

(3)揭示了系统参数对孤岛微电网暂态稳定性的影响规律,通过参数优化与控制策略改进可有效提高系统的暂态稳定性裕度,如减小跟网变流器的电流参考值、降低线路阻抗、提高系统电压等。

本文研究的微电网系统较为简单,更多复杂控制策略下的变流器(如电压电流双闭环)组成的微电网及多机微电网的稳定性,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Farrokhhabadi M, Cañizares C A, Simpson-Porco J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 13-29.
- [2] Geng Hua, Liu Lu, Li Ruiqi. Synchronization and reactive current support of PMSG-based wind farm during severe grid

- fault [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1596-1604.
- [3] 徐德鸿, 陈文杰, 何国锋, 等. 新能源对电力电子提出的新课题[J]. *电源学报*, 2014, 12(6): 4-9.
Xu Dehong, Chen Wenjie, He Guofeng, et al. New power electronics topics brought by the development of renewable energy [J]. *Journal of Power Supply*, 2014, 12(6): 4-9 (in Chinese).
- [4] Tayyebi A, Groß D, Anta A, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1004-1018.
- [5] Song Yue, Hill D J, Liu Tao, et al. A distributed framework for stability evaluation and enhancement of inverter-based microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 3020-3034.
- [6] Rosso R, Wang Xiongfei, Liserre M, et al. Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review [J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2021, 2: 93-109.
- [7] 许傲然, 谷彩连, 高兢, 等. 基于下垂控制模式的独立微电网小干扰稳定分析[J]. *电源学报*, 2021, 19(2): 100-111.
Xu Aoran, Gu Cailian, Gao Jing, et al. Small disturbance stability analysis of independent microgrid in droop control mode [J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(2): 100-111 (in Chinese).
- [8] Ebrahimi M, Khajehoddin S A, Karimi-Ghartemani M. An improved damping method for virtual synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1491-1500.
- [9] Yang Chaoran, Huang Linbin, Xin Huanhai, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3563-3573.
- [10] 朱蜀, 刘开培, 秦亮. 虚拟同步发电机的暂态稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 51-58.
Zhu Shu, Liu Kaipai, Qin Liang. Transient stability analysis of virtual synchronous generator [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 51-58 (in Chinese).
- [11] Hu Qi, Fu Lijun, Ma Fan, 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.
- [12] 程雪坤, 刘辉, 田云峰, 等. 基于虚拟同步控制的双馈风电并网系统暂态功角稳定研究综述与展望[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 518-525.
Cheng Xuekun, Liu Hui, Tian Yunfeng, et al. Review of transient power angle stability of doubly-fed induction generator with virtual synchronous generator technology integration system [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 518-525 (in Chinese).
- [13] Pan Donghua, Wang Xiongfei, Liu Fangcheng, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: A design-oriented study [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [14] Rantzer A. Almost global stability of phase-locked loops [C]// *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, FL, USA, 2001: 899-900.
- [15] Tian Zhen, Tang Yingjie, Zha Xiaoming, et al. Hamilton-based stability criterion and attraction region estimation for grid-tied inverters under large-signal disturbances [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(1): 419-423.
- [16] Kroposki B, Johnson B, Zhang Yingchen, et al. Achieving a 100% renewable grid: Operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2017, 15(2): 61-73.
- [17] He Xiuqiang, Geng Hua, Xi Jiangbei, 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] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
Hu Jiabing, Yuan Xiaoming, Cheng Shijie. Multi-time scale

transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594 (in Chinese).

- [19] Liu Yushuang, Huang Meng, Tse C K, et al. Stability and multiconstraint operating region of grid-connected modular multilevel converter under grid phase disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12551-12564.
- [20] Tian Xinshou, Wang Weisheng, Li Xiang, et al. Fault ride through strategy of DFIG using rotor voltage direct compensation control under voltage phase angle jump [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 515-523.
- [21] Taul M G, Wang Xiongfei, 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.



唐英杰

作者简介:

唐英杰(1997—),男,硕士研究生。研究方向:微电网系统的暂态稳定性分析。E-mail: eetyj@whu.edu.cn。

查晓明(1967—),男,博士,二级教授。研究方向:电力电子功率变换及系统、智能电网及新能源发电中的电力电子技术应用。E-mail: xmzha@whu.edu.cn。

田震(1991—),男,中国电源学会会员,通信作者,博士后。研究方向:电力电子化电力系统的建模、控制和稳定性分析。E-mail: ztian.ee@whu.edu.cn。

李翼翔(1998—),男,硕士研究生。研究方向:新能源机组动态建模与分析。E-mail: 2020202070061@whu.edu.cn。

胡宇飞(1999—),男,硕士研究生。研究方向:电力电子化电力系统的建模、控制和稳定性分析。E-mail: hyf_keeprunning@163.com

万子镜(1998—),男,硕士研究生。研究方向:直驱风机仿真建模与控制策略。E-mail: wanzij@whu.edu.cn。

好 邻 居

好邻居
有挫折相互鼓励

中国精神文明网 中国广告协会

2023
新文明E+公益广告