

弱连接VSC的锁相环同步暂态稳定综述

潘莉¹,李霞林¹,王智¹,唐王倩云²,郭力¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司 直流输电技术国家重点实验室,广东 广州 510663)

摘要:聚焦于单个弱连接电压源变流器(WG-VSC)系统在对称故障等大扰动下的锁相环同步暂态稳定性问题,梳理总结了其研究现状,包括暂态失稳现象、稳定机理、量化分析方法、稳定性提升控制措施等。实际运行控制中,从参数空间的角度分析以VSC注入有功/无功电流为参数空间的暂态稳定域更为直观,因此定义该暂态稳定域为电流可行域,并综述了相关研究工作。最后从多WG-VSC并联系统、不对称故障下、电压源虚拟同步型或构网控制下、不同锁相环的影响分析等方面展望了锁相环同步暂态稳定性问题的发展与应用前景。

关键词:弱连接VSC;锁相环同步;机理分析;量化分析方法;电流可行域;暂态稳定性提升方法

中图分类号:TM46;TM712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308007

0 引言

随着电力系统中新能源机组所占比例的不断提高,以传统同步机为主导的电力系统将逐渐演变为以电力电子变流器为主导的新型电力系统^[1-2]。电压源变流器(voltage source converter, VSC)以其能够实现功率双向流动、具有四象限运行的特点和运行控制方式灵活多样等优势在可再生能源并网、柔性直流输电等领域均得到广泛应用。基于dq旋转坐标系和锁相环同步(phase locked loop synchronization, PLL-Syn)的双闭环矢量控制技术因具有控制系统成熟可靠、有功和无功功率解耦控制的优势,被广泛应用于VSC并网控制^[3-4]。高渗透率可再生能源接入及大容量、远距离电能输送可能会导致VSC运行于弱交流电网条件。弱连接VSC(weak-grid connected VSC, WG-VSC)系统在电网故障等大扰动下易出现3类PLL-Syn暂态失稳现象:①失去平衡点;②平衡点存在但小扰动不稳定;③无法过渡至新的可行平衡点^[5-6]。本文重点关注第3类暂态失稳现象。

当WG-VSC系统出现PLL-Syn暂态失稳现象时,会引起闭锁保护动作,导致大规模新能源机组脱网,进而影响整个电网的安全运行^[7-8]。如2011年甘

肃酒泉风电基地出现短路故障,进而引发大规模风电脱网事故,导致西北地区电网频率由50.034 Hz跌落至49.854 Hz,严重威胁电网频率安全;在新能源发电比例高达50%的南澳大利亚,2016年某日极端天气(台风暴雨)引起电压跌落导致大量风机脱网,进而使得与维多利亚州相连的275 kV联络线上的潮流瞬间增大至900 MW,联络线上的断路器跳开,系统崩溃,导致南澳大利亚州大停电超过50 h,上述现象均与低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)期间VSC和弱交流电网之间的动态耦合密不可分。可以预见,在越来越多新能源接入电力系统的发展趋势下,交流电网将越来越弱,电力电子装备的锁相环动态与弱交流电网之间的交互作用将愈发复杂^[9-10]。

在理论研究方面,自2009年文献[11]首次揭示了电力电子装备接入弱交流电网发生PLL-Syn暂态失稳现象以来,近十几年来国内外学者在WG-VSC系统的PLL-Syn暂态失稳机理、量化分析方法、稳定性提升控制措施等方面做出了大量研究,并重点围绕单个WG-VSC系统在对称故障等大扰动下的PLL-Syn暂态稳定性进行研究。文献[12]从WG-VSC系统的同步控制策略、静态失稳与动态失稳机理、致稳方法等角度进行综述,并指出现有稳定性研究中存在的不足。文献[13]从WG-VSC失稳机理、研究方法、镇定方法3个角度对现有研究进行综述,梳理与总结了现阶段并网变换器暂态同步稳定性问题的研究成果与一般性方法。文献[14]从建模、失稳机理、分析方法等角度进行综述,阐述了此类问题构建的基本系统模型,并简要罗列了几种适用的分析方法,如等面积法与相轨迹法。

现有研究综述点多面广、方法描述偏简略,本文聚焦于单个WG-VSC系统在对称故障等大扰动下的

收稿日期:2023-02-13;修回日期:2023-07-29

在线出版日期:2023-08-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1506804);国家自然科学基金资助项目(51977142);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2021A1515110875)

Project supported by the National Key Research & Development Program of China(2020YFB1506804), the National Natural Science Foundation of China(51977142) and the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province(2021A1515110875)

PLL-Syn 暂态稳定性问题。介绍典型的 WG-VSC 系统及其双环控制结构,通过详细电磁暂态仿真直观地展示 2 类典型的 PLL-Syn 暂态失稳现象,并推导了相应的简化数学模型。然后分别从 PLL-Syn 暂态失稳机理、基于数值积分和基于直接法的 PLL-Syn 暂态稳定分析方法这 3 个方面,给出了相应的基本原理及其研究综述,并进行对比分析。在综述以 VSC 注入有功/无功电流为参数空间的暂态稳定域基础上,提出电流可行域(feasible region of current, FRC)定义与构建方法;并进一步总结归纳提升 PLL-Syn 暂态稳定性的两大类控制策略。最后提出结论并进行展望。

1 WG-VSC 系统发生 PLL-Syn 暂态失稳现象及适用于该问题分析的简化数学模型

1.1 WG-VSC 系统及基于 PLL-Syn 的双环控制

本文考虑的 WG-VSC 系统主电路拓扑及控制结构如图 1 所示。图 1(a)中: P_{in} 为 VSC 直流侧输入功率; C 为直流母线电容; U_{dc} 为直流母线电压;VSC 经 LC 滤波器并网, L_f 和 C_f 分别为滤波电感和电容; E 、 V_1 、 V_F 、 V_s 和 I_1 分别为 VSC 出口电压、并网点电压、故障点 F 电压、无穷大电源电压和 VSC 经并网点注入电流; Z_F 和 Z_g 分别为并网点至故障点和故障点至无穷大电源之间的等效阻抗。

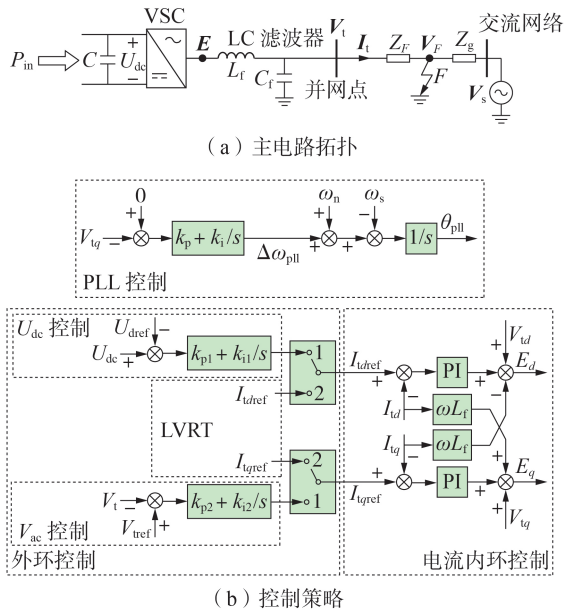


图1 WG-VSC 系统主电路拓扑和控制系统

Fig.1 Main circuit topology and control system of WG-VSC system

VSC 采用基于 PLL-Syn 的双闭环矢量控制策略,其控制系统包括锁相环控制、外环控制和电流内环控制。其中,锁相环控制主要通过比例积分(proportional integral, PI)控制器将并网点电压 q 轴分量

V_{iq} 调整为 0,实现 d 轴与并网点电压之间的同步。图 1(b)中: k_p 和 k_i 分别为锁相环控制器的比例和积分系数; θ_{pll} 和 $\Delta\omega_{pll}$ 分别为锁相环控制器输出相角和角频率变化量; ω_s 和 ω_n 分别为无穷大电网角频率与额定角频率。

VSC 外环控制包含有功控制环路和无功控制环路,根据不同的应用需求和控制功能,有功控制环路可以选择直流电压控制或有功功率控制,无功控制环路可以选择交流电压控制或无功功率控制。在 WG-VSC 系统中通常采用直流电压和交流电压控制模式,在正常运行工况下,通过直流电压控制和交流电压控制经 PI 控制器生成 d 、 q 轴电流参考值 I_{dref} 、 I_{qref} , k_{p1} 、 k_{i1} 和 k_{p2} 、 k_{i2} 分别为对应 PI 控制器的比例和积分系数。需要指出的是,本文所综述的分析方法也可应用于其他外环控制策略。当电网发生故障时,尤其在 LVRT 期间, I_{dref} 和 I_{qref} 由具体的故障穿越控制策略直接给定。图 1(b)中: U_{dref} 、 V_{tref} 分别为直流母线电压和并网点电压幅值 V_1 的参考值。

VSC 电流内环控制中, d 、 q 轴电流采用常规 PI 控制策略,实现 VSC 输出电流 dq 轴分量 I_d 、 I_q 对电流参考值的追踪,并生成 VSC 出口电压信号 d 、 q 轴分量 E_d 、 E_q 。图 1(b)中: V_{td} 、 V_{tq} 分别为 V_1 的 d 、 q 轴分量。

1.2 PLL-Syn 暂态失稳现象

对于 WG-VSC 系统而言,直流侧功率大幅阶跃、网侧发生严重故障等都可能引发 PLL-Syn 的暂态失稳现象。为了直观展示上述 2 类大扰动下 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态失稳现象^[8,15],基于图 1 所示 WG-VSC 系统主电路拓扑,在 PSCAD / EMTDC 中搭建 WG-VSC 系统的详细开关模型,模型参数见文献[3,5]。

1.2.1 直流侧功率大幅阶跃

为展示 WG-VSC 系统因直流侧功率大幅阶跃引起的 PLL-Syn 暂态失稳现象,考虑如下 2 组仿真工况。工况 1: $t_1=1$ s 时 P_{in} 由 1 p.u. 阶跃至 1.15 p.u.; $t_2=3$ s 时 P_{in} 由 1.15 p.u. 阶跃至 1.2 p.u.; $t_3=6$ s 时 P_{in} 由 1.2 p.u. 阶跃至 1.25 p.u.。工况 2: $t_1=1$ s 时 P_{in} 由 1 p.u. 直接阶跃至 1.25 p.u.。相应的仿真结果如图 2 所示。图中: θ_1 为并网点电压相角; U_{dc} 、 V_1 、 $x_{pll}=\int V_{iq} dt$ 均为标么值。

由图 2(a)可知:当 P_{in} 由 1 p.u. 经过 3 次小幅阶跃至 1.25 p.u. 时, WG-VSC 系统 PLL-Syn 暂态稳定,这表明工况 1 下 $P_{in}=1.25$ p.u. 时 WG-VSC 系统存在小扰动稳定平衡点。由图 2(b)可知:当 P_{in} 直接由 1 p.u. 大幅阶跃至 1.25 p.u. 时, WG-VSC 系统 PLL-Syn 发生暂态失稳现象。当直流侧功率大幅阶跃时,即使扰动后的系统存在新的小扰动稳定平衡点,系统仍有可能失稳。在 WG-VSC 系统中,当源侧发生功率波

动时,可能发生 PLL-Syn 暂态失稳现象,因此有必要探究此类暂态稳定机理与关键影响因素,为大规模新能源稳定运行控制提供理论与技术支撑。

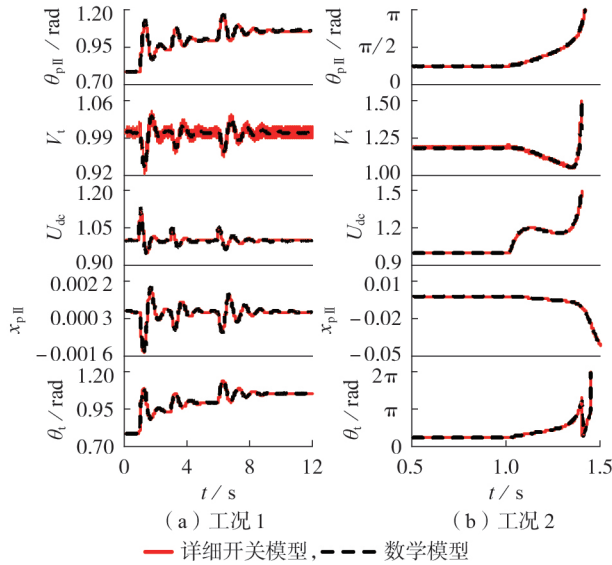


图2 直流侧功率阶跃下暂态仿真结果

Fig.2 Transient simulative results under DC-side power step

1.2.2 网侧发生严重故障

网侧发生严重故障也可能引发 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态失稳现象。考虑如下 2 组仿真工况。工况 3: $t_1=1$ s 时,故障点电压对称跌落至 0.1 p.u.; $t_2=3$ s 时,故障点电压进一步对称跌落至 0.075 p.u.。工况 4: $t_1=1$ s 时,故障点电压对称跌落至 0.075 p.u.。相应的仿真结果如图 3 所示,图中: ω_{pll} 为锁相环角频率; V_{tq} 为标幺值。上述 2 种工况下,在故障初始时刻 $t_1=1$ s 时,电流设定值 I_{dref} 、 I_{qref} 均从故障前的 0.7 p.u.、0 分别调整至 0 和 1 p.u.,以进行故障限流和无功支撑模拟。

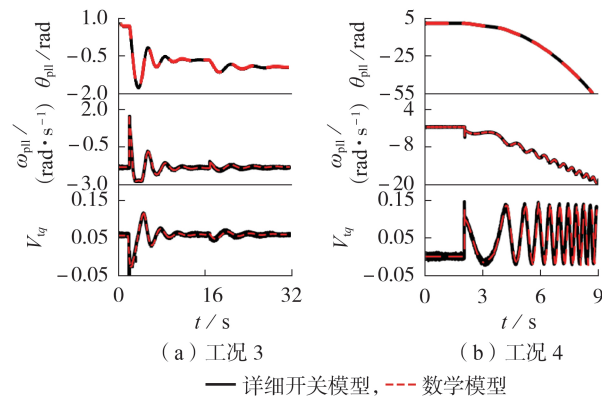


图3 网侧发生严重故障下暂态仿真结果

Fig.3 Transient simulative results under grid-side serious fault

由图 3(a)可知,故障点电压通过 2 次跌落至 0.075 p.u. 时,系统 PLL-Syn 稳定;由图 3(b)可知,当

故障点电压直接跌落至 0.075 p.u. 时,系统 PLL-Syn 发生暂态失稳现象。对比图 3(a)、(b) 的仿真结果可知,在网侧发生严重故障的大扰动下, WG-VSC 系统亦存在 PLL-Syn 暂态失稳现象。

由图 2、3 所示仿真结果可知, WG-VSC 系统在受到直流侧大幅功率波动、网侧严重故障等大扰动后,即使存在满足小扰动稳定的可行平衡点,由于 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 输出无法稳定跟踪电网频率,失去与电网同步的能力,导致 WG-VSC 系统无法从扰动前的平衡点稳定过渡至新的可行平衡点。该现象即为 PLL-Syn 暂态失稳现象。此问题将严重威胁到高比例新能源和电力电子化电力系统的安全稳定运行,有必要进行深入分析。

1.3 适用于 PLL-Syn 暂态稳定分析的简化数学模型

本节将在图 1 所示主电路和控制结构的基础上,给出分别适用于不同类型 PLL-Syn 暂态稳定现象分析的简化数学模型,为后续 PLL-Syn 暂态稳定分析方法综述提供模型基础。

由于讨论的是 PLL-Syn 时间尺度暂态特性,在简化分析过程中,考虑以下假设^[16-21]:

- 1) 电流内环动态通常远高于外环控制和锁相环控制动态,故忽略电流内环动态,即认为 VSC 注入电流 I_{td} 、 I_{tq} 可近似实时跟踪参考值 I_{dref} 、 I_{qref} ;
- 2) 忽略 LC 滤波器和交流电网电磁暂态影响;
- 3) 忽略变流器损耗,不考虑调制过程延时和采样延时。

基于上述简化条件,可得 WG-VSC 系统的简化等值模型,如图 4 所示。

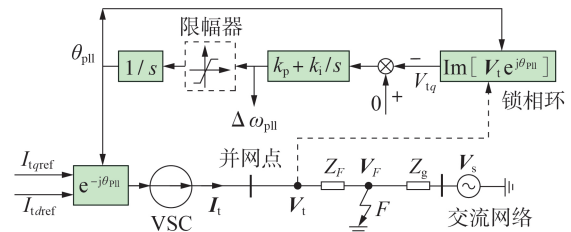


图4 WG-VSC 系统的等值模型

Fig.4 Equivalent model of WG-VSC system

基于图 4 所示 WG-VSC 系统等值模型,可进一步推导适用于 PLL-Syn 暂态稳定分析的简化数学模型。WG-VSC 系统在直流侧功率大幅阶跃下与网侧发生严重故障时发生暂态失稳现象的简化数学模型具体表达式分别如附录 A 式(A1)、(A2)所示,详细推导过程可参考文献[6,22]。

需要说明的是,已有的研究表明,虽然限幅环节可以将频率限制在合理范围内,但会对 WG-VSC 系统的暂态同步稳定特性产生一定的影响^[23-25]。文献[23]从系统故障期间是否存在静态平衡点两方面,考虑了限幅器对故障期间系统同步动态响应的影

响。文献[24-25]则采用 Lyapunov 函数(Lyapunov function, LF)描述了系统的暂态稳定边界,定量分析了限幅器对 WG-VSC 系统暂态稳定性的影响。是否考虑输出限幅,对于暂态稳定分析而言主要在于数学模型上的区别,后文中 PLL-Syn 暂态稳定分析及稳定提升的方法在考虑输出限幅的条件下分析。

2 PLL-Syn 暂态稳定分析方法

基于平衡点线性化的小扰动稳定分析方法无法解释 WG-VSC 系统在直流侧功率大幅阶跃、网侧发生严重故障等大扰动下的 PLL-Syn 暂态失稳现象,下面基于现有研究,总结分析 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态稳定分析方法。PLL-Syn 暂态稳定分析方法综述如图5所示。

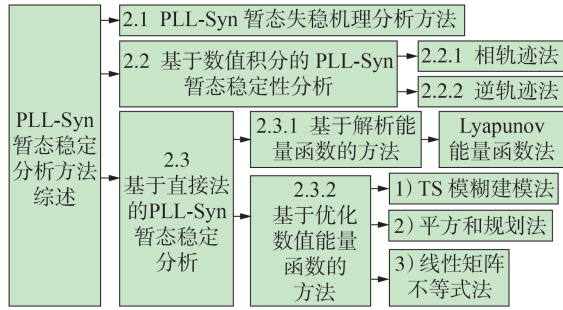


图5 PLL-Syn 暂态稳定分析方法综述

Fig.5 Review of PLL-Syn transient stability analysis methods

2.1 PLL-Syn 暂态失稳机理分析方法

有不少学者研究发现 WG-VSC 系统的 PLL 动态特性可类比为单机-无穷大系统(single machine-infinite bus, SM-IB)的转子同步动态特性。因此,可将等面积法则^[26-31]推广应用至揭示 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态稳定机理。

文献[13, 32-35]基于传统等面积法则,通过比较加速面积与最大减速面积的大小关系来判断系统

暂态稳定性。但分析的前提是忽略了系统阻尼,难免会遇到保守性较高且稳定判断不准确的问题。为弥补忽略负阻尼带来的不准确稳定估计,文献[31, 36-37]忽略了负阻尼区间,对正阻尼区间进行了有效暂态稳定分析,提高了分析的保守性,且构建了有效的暂态稳定估计域,可以作为系统暂态稳定的充分判据。在正阻尼区间内,文献[30]分析了不同短路比下锁相环动态对 PLL-Syn 系统暂态稳定的影响,并提出了相应的锁相环参数设计措施,以保持系统同步以及故障穿越的能力。短路比越小,交流电网越弱, VSC 并网暂态稳定能力越弱。当明确系统其他影响参数时,可确定 VSC 运行的短路比极限值。综合以上传统等面积法则与限定正负阻尼区间的改进等面积法则的思路,为了达到准确估计的基础上且缩小保守性的目的,文献[38]提出了考虑负阻尼情况的改进等面积法则,通过选定角频率最大值 $\omega_{\max}$ 修正类比阻尼 D_{eq} , 对负阻尼进行合理缩放,重新划定了最大减速面积 $S_{\text{dec.max}}$ 的区域,确定了 $S_{\text{dec.max}}$ 积分的上、下限区间,达到合理判断系统暂态稳定情况的效果。考虑 D_{eq} 的正负性及其处理方式,梳理总结了3种不同等面积法则及其改进法则,具体如表1所示。表中: S_{acc} 为等效加速面积; $\theta_{\text{pll},0} - \theta_{\text{pll},5}$ 为不同等面积法则分类下计算等效加速、减速面积的积分起始与终止锁相环相角,具体见附录B图B1; P_{m2} 、 P_{e2} 分别为类比机械功率与电磁功率。

由于作用影响效果的不同主要体现在最大减速面积上,因此图B1中分别对3种等面积法则的最大减速面积区域进行标注。

2.2 基于数值积分的 PLL-Syn 暂态稳定分析

相轨迹法与逆轨迹法均基于数值积分,对 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态稳定进行分析,能准确刻画非线性系统方程状态变量的轨迹和构造平衡点处的吸引域边界。

表1 等面积法则及其改进方法

Table 1 Equal area criterion and its improvement method

等面积法则分类影响指标	传统等面积法则	限定正负阻尼区间的改进等面积法则	考虑负阻尼情况的改进等面积法则
系统阻尼的处理	忽略阻尼	限定阻尼的正负区间,并忽略正阻尼	限定正阻尼区间后,并对负阻尼进行合理缩放,重新选定等效功角的适用区间
加速、最大减速面积表达式	$S_{\text{acc}} = \int_{\theta_{\text{pll},0}}^{\theta_{\text{pll},1}} (P_{m2} - P_{e2}) d\theta_{\text{pll}}$ $S_{\text{dec.max}} = \int_{\theta_{\text{pll},1}}^{\theta_{\text{pll},3}} (P_{e2} - P_{m2}) d\theta_{\text{pll}}$	$S_{\text{acc}} = \int_{\theta_{\text{pll},0}}^{\theta_{\text{pll},1}} (P_{m2} - P_{e2}) d\theta_{\text{pll}}$ $S_{\text{dec.max}} = \int_{\theta_{\text{pll},1}}^{\theta_{\text{pll},2}} (P_{e2} - P_{m2}) d\theta_{\text{pll}}$	$S_{\text{acc}} = \int_{\theta_{\text{pll},0}}^{\theta_{\text{pll},1}} (P_{m2} - P_{e2}) d\theta_{\text{pll}}$ $S_{\text{dec.max}} = \int_{\theta_{\text{pll},1}}^{\theta_{\text{pll},2}} (P_{e2} - P_{m2}) d\theta_{\text{pll}} + \int_{\theta_{\text{pll},2}}^{\theta_{\text{pll},5}} (P_{e2} - P_{m2} + D_{\text{eq}} \omega_{\max}) d\theta_{\text{pll}}$
作用效果	不考虑阻尼的正负性,但负阻尼会对系统的暂态稳定性产生不利影响,导致平衡点处吸引域计算误差较大,造成暂态稳定性结果的偏差	仅指出负阻尼区间的存在,未定量分析负阻尼区间对稳定域的作用效果,增强了吸引域的保守性	在吸引域不产生误差的基础上,改善了限定正负阻尼区间改进等面积法则的保守性

2.2.1 相轨迹法

相轨迹法^[14,18-20,25,39-42]是一种基于数值积分的方法,用于分析非线性动力系统的图像轨迹。文献[14,18-19,39-40]介绍了相轨迹法的基本原理与实现方法,能较直观地描述 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态失稳现象。针对网侧严重故障情形,整理 2 阶非线性方程,如附录 C 式(C1)所示。

对于非线性系统方程 $\dot{x}=f(x)$,在 $f(x)$ 连续可微的条件下,当给定初值 $\Phi(t_0)$ 后,基于数值积分逐点刻画系统轨迹后即可得到上述方程的解。

进一步地,为探讨主电路参数、控制参数等对 PLL-Syn 暂态稳定的影响,文献[19]探讨了并网点电压幅值(V_i)、并网点至故障点线路阻抗(R_F, X_F)、锁相环控制参数(k_p, k_i)等系统参数对平面相轨迹的动态作用。短路比作为影响系统暂态稳定性的因素之一,反映了系统的弱连接特性,文献[25]基于相轨迹法展开了不同短路比下系统暂态稳定性的影响分析。同时文献[20,41]基于相轨迹法直观展示了系统阻尼与调节时间对系统暂态同步过程的动态作用,并提出通过降低系统动态响应速度与增大等效阻尼对于提升 WG-VSC 系统在严重故障下的 PLL-Syn 暂态稳定性具有显著效果。

考虑功率外环控制与锁相环的交互动态,分析 WG-VSC 系统在正常运行情况下面临源侧大功率扰动时的暂态稳定性,整理 4 阶非线性方程,如附录 C 式(C2)所示。

基于此,文献[42]通过相轨迹法直观展现了当外环控制参数改变时对 WG-VSC 系统同步稳定过程的影响,表明忽略直流电压控制时会影响暂态稳定评估的准确性,并分析了不同短路比下对系统暂态稳定性的影响因素,相应地提出了参数优化策略。该方法基于时域积分能够直接对系统暂态同步稳定与否做出判断,但本质上属于数值积分方法,无法给定系统稳定裕度指标且难以评价系统的整体运行状态。

2.2.2 逆轨迹法

文献[43]指出,一般电力系统的小扰动稳定平衡点的吸引域边界 $\partial\Omega$ 是由位于该边界上的不稳定平衡点的稳定流形 $W^s(x_c)$ 组成的。基于逆轨迹法刻画非线性系统 $\dot{x}=f(x)$ 吸引域的本质则是刻画位于吸引域边界上的不稳定平衡点的稳定流形^[44]。

具体步骤是:①将非线性系统右边取负号得到原系统的逆轨迹系统,具体表达式如附录 D 式(D1)所示;②在不稳定平衡点的稳定流形上取点作为初值,对其积分求得一系列轨迹,并以逆轨迹的集合来估计穿过不稳定平衡点的吸引域边界^[45]。

逆轨迹法可刻画出系统真实的吸引域边界,可实现对简单电力系统吸引域的准确刻画和可视化研

究。文献[46]探讨了锁相环的 PI 控制参数对 WG-VSC 系统吸引域的影响,指出增大比例系数或减小积分系数可增强系统的暂态同步稳定性。这种方法的应用同样存在如下问题:①无法给出所刻画吸引域边界的解析表达式,因此在利用该吸引域进行进一步理论分析或拓展应用时存在局限性;②对于高阶系统,刻画其不稳定平衡点的稳定流形变得十分困难,因而这种方法只适用于低阶系统,不具有—般性。

2.3 基于直接法的 PLL-Syn 暂态稳定分析

对于非线性系统 $\dot{x}=f(x)$,当系统阶数过高时,利用逆轨迹法构建其系统真实吸引域通常较为困难,计算量大且过程复杂。为此,可基于直接法,通过构造合适的 LF,刻画扰动后平衡点的估计吸引域,进行 WG-VSC 系统 PLL-Syn 暂态稳定分析。直接法通常从构建相对保守性较低的最大估计吸引域(largest estimated domain of attraction, LEDA)的角度出发,来对故障后的系统状态进行判断。基于能量函数的构建,主要是选取合适的 LF,基于 LF 构建对应的 LEDA,通过判断故障前的平衡点是否位于故障后平衡点的 LEDA 内从而判断系统是否可以过渡或保持暂态稳定状态^[47-49]。

针对 WG-VSC 系统 PLL-Syn 暂态稳定分析,2.3.1、2.3.2 节分别从解析能量函数与数值能量函数出发,对 LF 的构造方法进行总结分析。

2.3.1 基于解析能量函数的方法

针对 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态失稳现象,本节将以文献[50]中所述方法为例,介绍如何构建 Lyapunov 能量函数,实现 Lyapunov 能量函数的构建以及对动态过程中动、势能相互转化过程的机理解释^[51-59]。

值得注意的是, Lyapunov 能量函数中的阻尼项是非线性且不定的。许多研究会选择忽略阻尼项对系统稳定分析的影响,如基于势能界面法(potential energy boundary surface, PEBS)的能量函数法^[50-52]。也有一些研究会适当地对阻尼项进行处理,如固定阻尼的正向区间,如基于 LaSalle 不变集的能量函数法^[53-55]。基于此,对现有相关研究进行分类,如表 2 所示。

由表 2 可知,文献[50-52]所提出的 Lyapunov 能量函数忽略了系统阻尼,即忽略了负阻尼对系统暂态稳定域的影响,导致系统刻画了不准确的吸引域。为解决该问题,文献[53-55]限定了系统的正阻尼区间,并通过将 PLL-Syn 型 WG-VSC 系统与 SM-IB 系统相类比,提出了 Lyapunov 能量函数的构建方式以及系统等效动能与势能的表达式。但为了避免负阻尼效应造成的不准确稳定域,文献[53-55]构建了相对保守的稳定域,确保估计的有效性。

表2 Lyapunov能量函数法的实现形式

Table 2 Realizing forms of Lyapunov energy function method

Lyapunov能量函数法处理指标	基于PEBS的Lyapunov能量函数法	基于LaSalle不变集的Lyapunov能量函数法
临界能量是否固定	不固定临界能量	固定临界能量
对阻尼的处理方式及其实现形式	忽略不定阻尼项,虽然能量函数构造形式简单,但可能导致构建的LEDA不准确,在部分区域会超出真实吸引域边界	限定阻尼区间,会导致刻画的LEDA保守性增大,但保证了有效性

综合文献[50-55],当借助Lyapunov能量函数法构建系统估计吸引域时,存在非线性阻尼项与保守性的矛盾、难以找到合适的能量函数这两大问题。为此,文献[56]提出结合奇异摄动理论与Lyapunov稳定性理论的暂态稳定分析方法,从快子系统与慢子系统出发,分别构建正定能量函数LF,仅当2个子系统均呈暂态同步稳定时,可判定系统处于稳定状态。文献[56]在一定程度上很好地解决了忽略非线性阻尼项以及难以构建合适的LF这一难题。文献[57-58]基于Hamiltonian模型及其耗散准则,构建了非线性系统遭遇大扰动故障后系统平衡点处的有效LEDA,达到了保守性较低的效果。但其本质上与限定阻尼为正区间时的能量函数法相同,此处不再赘述。文献[59]基于WG-VSC系统简化模型,提出了一种特殊的构建形式,通过LaSalle不变集定理构建其耗散区域,当构建的LF的1阶导数小于0时即 $\dot{V} \leq 0$ 时,刻画此方法下针对具体工况的估计吸引域。可以发现,在一定程度上Lyapunov能量函数法的构建思路可以为构建保守性较低的LF提供一些理论依据与思路。

2.3.2 基于优化数值能量函数的方法

2.3.2.1 TS模糊建模法

由Takagi和Sugeno首次提出的TS模糊建模法^[60-62],主要是通过局部的线性特性来表征原非线性系统。当构建的局部线性函数数量足够多时,可将构建的一系列TS模糊线性模型与原非线性系统模型等效。文献[60]通过TS模糊建模法建立了局部电力系统控制模型,并指出随着电力系统中的极值不确定性和复杂性增加,传统的数学建模方法已经显得不够灵活和高效。文献[61]对TS模糊建模方法进行了深入研究,并将其应用于直流供电系统的大信号稳定性分析,提出基于TS模糊建模方法的直流供电系统稳定性分析,具有较强的鲁棒性和适用性,并为电力系统的稳定性分析和控制提供了一种新的思路和方法。文献[62]则基于TS模糊建模法构建了系统的LF,为准确判断系统扰动后的暂态稳定性提供了分析工具。

TS模糊建模法是一种高效的非线性系统分析和控制方法,计算简单,模型结构清晰。当TS模糊建模法考虑非线性项数量较多时,其复杂性使得TS模糊建模法无法拓展至更高阶非线性系统。

2.3.2.2 平方和规划法

为克服不确定阻尼项构建的不准确吸引域的问题,文献[63]提出了平方和规划(sum of square,SOS)法,并在文献[64-66]中得到应用。SOS法是一种将非线性多项式方程的正定性问题转化为平方和形式多项式函数问题的方法。文献[64]提出可以将非线性方程问题转化为等价的凸问题,并基于SOS法约束最优化条件来构建系统的LF以判断稳定性。文献[65]针对风机接入的系统中故障穿越等复杂暂态问题,通过SOS法实现了非线性问题的有效处理。另外文献[66]构建了LF,基于SOS法分析了不同参数对系统暂态稳定的影响。

SOS法常用于构建较为保守且有效的吸引域,但受多项式次数增多、变量数目多等问题的限制,需不断寻求新的优化求解思路以拓展其在高阶系统中的应用。

2.3.2.3 线性矩阵不等式优化法

线性矩阵不等式(linear matrix inequality,LMI)优化法^[5-6,67-68]是基于Lyapunov稳定性定理,针对非线性多项式动力系统模型构建LEDA的方法。文献[5-6]中应用了LMI优化法,构建了系统的PLL-Syn暂态同步稳定域,并应用于构建参数空间下的电流可行域,分析了不同参数对系统暂态稳定的影响。文献[67-68]提出可以将非多项式系统的吸引域估计问题转化为优化问题,从而具有良好的鲁棒性和可扩展性。由于LMI优化法刻画的LEDA具有较低的保守性,因此可以帮助设计和优化电力系统的控制策略,从而提高系统的稳定性和可靠性。

2.3.3 直接法的工况应用及其对比分析

综合上述直接法的介绍,以工况4为例,对直接法的应用与案例进行说明,如图6所示。图6(a)、(b)分别给出了解析能量函数构建的吸引域和优化数值能量函数构建的吸引域对比结果。为了更加直观对比不同直接法应用效果,图6(c)给出了解析能量函数和优化数值能量函数构建的吸引域对比结果。图中: $x_1 = \theta_{pu}$, $x_2 = \int V_{iq} dt$, x_1 、 x_2 均为标幺值。根据图6,可得到以下结论。

1)由图6(a)比较3种解析能量函数构建的LEDA,基于PEBS的能量函数法在部分轨迹区域将超出真实吸引域边界,从而造成系统故障后状态的不准确估计;基于LaSalle不变集的Lyapunov能量函数法进

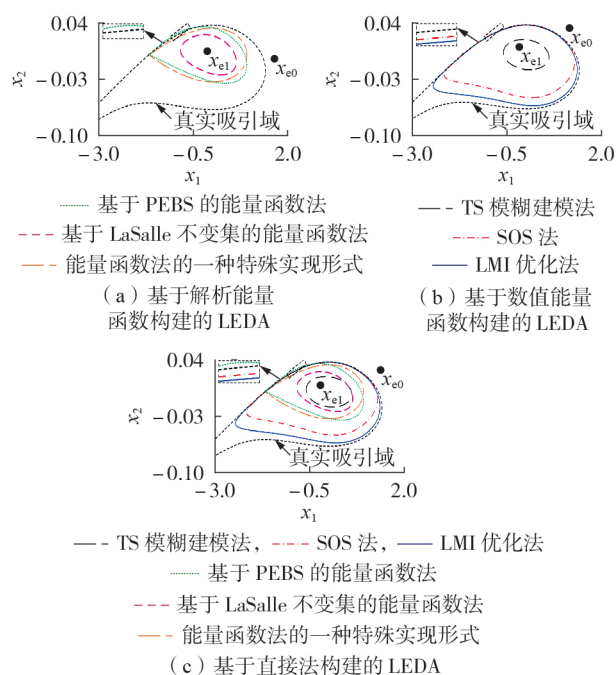


图6 直接法的应用与案例说明

Fig.6 Application and case introduction of direct method

一步固定了临界能量函数值,避免了这一情况,但会造成 LEDA 区域面积的缩小,提高了保守性。为了提升 LEDA 的高准确性与低保守性,文献[59]提出的能量函数的一种特殊实现形式在一定程度上有效扩大了 LEDA。

2)由图6(b)对比3类数值能量函数构建的吸引域,TS模糊建模法构建的 LEDA 较 SOS 法、LMI 优化法小,LMI 优化法构建的 LEDA 则更接近故障后平衡点处的真实吸引域,具有较低的保守性与有效性。并且值得注意的是,基于数值能量函数的 TS 模糊建模法、SOS 法、LMI 优化法构建的 LEDA 不会造成真实稳定域估计的不准确。

3)将图6(a)、(b)所构建的 LEDA 合并为图6(c),从整体上来看,解析能量函数法构建的估计稳定域边界距离真实吸引域边界较远,保守性相对较高;数值能量函数法构建的 LEDA 会更接近真实吸引域,保守性相对较低。

但以上结论并非一概而论之,数值能量函数如 TS 模糊建模法,其构建的 LEDA 亦会呈现较高的保守性。因此可以根据不同情形下的系统模型以及不同方法适用时存在的优点、局限性,选取合理且适用的分析方法。

3 以 VSC 注入有功 / 无功电流为参数空间的暂态稳定域

针对 WG-VSC 系统的 PLL-Syn 暂态失稳现象,现有研究大多刻画平衡点的 LEDA,以判断系统是

否满足暂态同步稳定的要求,并且从状态空间角度出发,通常也只能反映具体的一个运行点的暂态同步稳定信息。但是在实际的运行控制中,更直观或更关心的是从参数空间的角度去分析以 VSC 注入有功 / 无功电流为参数空间的暂态稳定域,以保证系统 PLL-Syn 暂态稳定,本文定义其为 FRC^[5-6]。例如,网侧发生严重故障时,如果故障限流控制中有功和无功电流超出有功和无功注入 FRC,则并网点电压动态与 PLL 动态的相互耦合会导致 WG-VSC 系统在 LVRT 期间出现 PLL-Syn 暂态失稳现象,因此获得该可行域可以作为系统是否出现 PLL-Syn 暂态失稳问题的一项重要判据。在此基础上,分析探究故障点电压大小、并网点到故障点的等效阻抗值(即系统等效短路比)、锁相环控制参数等参数对该注入 FRC 的影响,可以进一步为系统稳定提升提供参数设计支持。因此,如何定义与构建电流可行域对保证 WG-VSC 系统在大扰动下的 PLL-Syn 暂态稳定至关重要。

文献[46,65]根据平衡点是否存在的条件,建立了注入电流、网侧阻抗与电压的不等式关系,构建了静态稳定条件下的有功和无功注入 FRC。然而以上研究都局限于平衡点是否存在,无法作为暂态情形下电流注入稳定边界的判断依据。进而文献[35]基于等面积法则确定了有功和无功注入 FRC,从而在可行域范围内可以根据实际情况动态调整系统注入电流以满足电网导则与 LVRT 的要求^[31-38],但此研究并未对 FRC 给出明确的概念及清晰的数学定义。文献[5-6]对于以 VSC 注入有功 / 无功电流为参数空间的暂态稳定域展开分析,包括 FRC 的概念以及以 LMI 优化法构建的 LEDA 为基础刻画 FRC 的技术方法。因此,接下来将基于 LMI 优化法构建的 LEDA,综述 FRC 的定义及其构建方式^[5]。

3.1 FRC 的定义

有功 / 无功 FRC^[6]定义为:保证故障后 WG-VSC 系统 PLL-Syn 暂态稳定的 d, q 轴电流设定值 I_{d1}, I_{q1} 的可行范围。进一步解释为,若系统能从故障前稳定运行的平衡点 x_{e0} 稳定过渡至平衡点 x_{e1} ,则此时满足 PLL-Syn 暂态稳定时系统对应的有功 / 无功电流设定值 I_{d1} / I_{q1} 的可行范围即为 FRC Ω_f ,如式(1)所示。

$$\Omega_f = \left\{ (I_{d1}, I_{q1}) \mid x_{e0} \in \Omega_v \right\} \quad (1)$$

$$(I_{d1}, I_{q1}) = \sqrt{I_{d1}^2 + I_{q1}^2} \leq I_m$$

式中: Ω_v 为状态空间可行域,即 LEDA; I_{d1}, I_{q1} 与 I_m 分别为故障后的 d, q 轴电流设定值与 WG-VSC 系统的最大允许电流(下标 1 表示故障后的系统参数)。

3.2 FRC 的构建

由前所述,故障后平衡点处的小扰动稳定是分析大扰动稳定的前提。现假定存在平衡点 x_{e1} ,故障后系统参数应满足:

$$X_F I_{d1} - R_F I_{q1} = V_{F1} \sin \theta_{\text{plle},1} \quad (2)$$

由式(2)可知,在给定系统故障后具体参数(X_F 、 R_F 、 V_{F1})后,欲构建FRC,需首先确定 $\theta_{\text{plle},1}$ 的可行范围。基于LMI优化法构建的LEDA与LF $v(x)$ 可知,若满足式(3)所示约束条件,则系统处于暂态稳定状态,即 x_{e0} 位于 x_{e1} 的LEDA内。

$$0 \leq v(x_{e0} - x_{e1}) \leq 1 \quad (3)$$

$\theta_{\text{plle},1}$ 可行区间与FRC的构建示意图如图7所示,图中 $S = v(x_{e0} - x_{e1})$ 。由图7(a)可知, x_{e1} 远离 x_{e0} 的程度越大, $v(x_{e0} - x_{e1})$ 值越大。因此,当 $v(x_{e0} - x_{e1}) = 1$ 时,系统呈临界稳定状态,此时 $\theta_{\text{plle},1}$ 的可行范围边界可被计算确定为 $\theta_{\text{plle},1} \in [\theta_{\text{plle},1\min}, \theta_{\text{plle},1\max}]$ [$\theta_{\text{plle},1\min}$ 、 $\theta_{\text{plle},1\max}$ 分别为 $\theta_{\text{plle},1}$ 设定的可行范围最小值与最大值)。

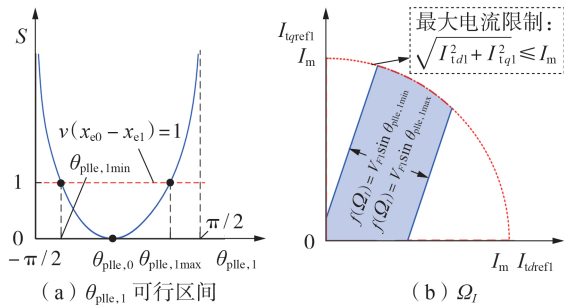


图7 $\theta_{\text{plle},1}$ 可行区间与FRC的构建

Fig.7 Feasible region of $\theta_{\text{plle},1}$ and construction of FRC

对式(2)进行修正得到式(4),FRC的示意图如图7(b)所示。

$$V_{F1} \sin \theta_{\text{plle},1\min} \leq X_{F1} I_{d1} - R_{F1} I_{q1} \leq V_{F1} \sin \theta_{\text{plle},1\max} \quad (4)$$

基于以上构建思路与流程,将FRC的构建流程总结为如下步骤:①输入初始LF $v_0(x)$ 、故障前PLL相角($\theta_{\text{plle},0}$)、故障后电压(V_{F1})、电网阻抗(X_{F1} 和 R_{F1})、PLL控制参数(k_p 和 k_i);②构建故障后平衡点 x_{e1} 处的LEDA与迭代后的 $v(x)$ [$^{[5-6]}$];③令 $v(x) = 1$,计算当系统处于临界稳定状态时,PLL相角的最大值 $\theta_{\text{plle},1\max}$ 和最小值 $\theta_{\text{plle},1\min}$ 。

通过以上步骤,即可得到FRC如式(4)所示,从而可基于参数空间的角度判定系统的暂态同步稳定性,根据系统大扰动后设定的电流值是否位于构建的FRC稳定边界内来判断系统是否保持暂态同步稳定。以工况4为例,刻画FRC与其对应的仿真结果如附录E图E1所示。

另外,文献[5-6]也详细分析了故障点电压大小、并网点到故障点的等效阻抗值(即系统等效短路比)、PLL控制参数等参数对该注入FRC的影响,在此不再赘述。

4 PLL-Syn 暂态稳定提升方法

为提升电流控制型变换器接入的交流电网系统

尤其是故障后的暂态稳定性,现有的PLL-Syn暂态稳定提升方法主要有动态调整故障后有功/无功注入电流 I_{d1}/I_{q1} 与调整PLL控制特性2类措施,如图8所示。接下来,下面将从上述2个方面梳理现有研究中所提出的PLL-Syn暂态稳定性提升方法。

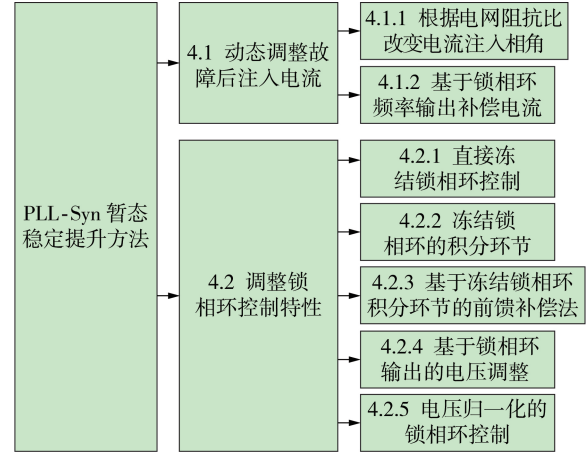


图8 暂态稳定提升方法分类

Fig.8 Classification methods for transient stability enhancement

4.1 动态调整故障后有功/无功注入电流 I_{d1}/I_{q1}

4.1.1 根据电网阻抗比改变电流注入相角

为消除锁相环输入电压 V_{iq} 中偏移项对系统暂态同步稳定的影响,文献[69]提出,注入与电网阻抗比(R_{Σ}/L_{Σ})互为相反数的有功/无功电流注入比($-L_{\Sigma}/R_{\Sigma}$)的电流,抵消线路阻抗压降对并网点电压的影响,从而达到恢复静态工作点的效果。该方法基本流程如附录F图F1所示。该方法有助于避免系统失步,但需快速测量电网阻抗比,在实际运行过程中实现起来较为困难,同时由于阻抗比恒为定值,使得系统缺乏动态调整能力。

4.1.2 基于锁相环频率输出补偿有功电流 I_{d1}

为消除等效不平衡功率的影响,文献[55,70]提出基于锁相环频率输出补偿有功电流的方法,具体结构如附录F图F2所示。基于锁相环输出,将动态过程中的频率变化量反馈至故障后给定的有功电流,即利用PI环节动态调整有功电流的大小,以恢复系统暂态同步稳定。虽然此方法的实现过程简单、有效,但附加的1阶PI环节使得系统控制更为复杂,如何定量选取比例增益系数亦会影响系统的稳定性。

除上述方法外,我们还可以根据3.1节FRC的概念来提升PLL-Syn暂态稳定。即只要保证故障后WG-VSC系统有功和无功控制电流参考值位于保证暂态稳定的FRC内即可。但实际应用中可能会面临如下难点:由于FRC的求解需要获得WG-VSC系统并网点至故障点电压的等效阻抗值,而实际发生

故障时该阻抗参数比较难获取。一种可行的思路是基于并网等效阻抗的实时估计来获取该参数,提出WG-VSC系统在故障下的LEDA和FRC实时估计方法,这也是未来值得深入研究的工作之一。

4.2 调整锁相环控制特性

4.2.1 直接冻结锁相环控制

为提升WG-VSC系统的暂态稳定性,在系统故障期间,文献[71]提出冻结锁相环,并直接给定电压定向和电流参考相角,基本结构如附录F图F3所示。该方法使得锁相环变为开环系统,虽能提升暂态稳定性,但在故障期间无法跟踪系统相角,且无法确定输出电流的有功及无功分量。

4.2.2 冻结锁相环的积分环节

不同于文献[71]中提出的直接冻结锁相环的策略,为避免在故障期间直接给定电压定向与电流参考相角所带来的不准确问题,文献[31]提出保留锁相环的比例环节,但闭锁锁相环的积分环节的方法,基本结构如附录F图F4所示。该方法保留了故障期间的锁相环相角跟踪能力,并避免了2阶锁相环带来的不利超调。但若故障后不存在静态工作点或电网频率有偏差,则该方法将无法使得系统恢复同步暂态稳定。

4.2.3 基于冻结锁相环积分环节的前馈补偿法

文献[72]在文献[31]所提方法基础上,提出基于冻结锁相环积分环节的前馈补偿法,基本结构如附录F图F5所示。

若在故障期间不存在平衡点,则冻结积分环节后的1阶锁相环将会产生持续振荡的行为。在此情况下,为避免振荡周期时间太长,加入前馈补偿环节并加入补偿量 $a_k = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} V_{iq} dt$ (t_0 、 t_1 分别为测量周期的起始和终止时刻),即修正锁相环输入电压 V_{iq} 为 V'_{iq} ,弥补锁相环输入电压 V_{iq} 发生的大幅阶跃,如式(5)所示。

$$V'_{iq} = V_{iq} - \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} V_{iq} dt \quad (5)$$

系统静态工作点是否存在受 V_{iq} 中的偏移项影响,因此合适的补偿前馈量 a_k 有利于消除偏移量的影响,从而恢复系统的静态工作点,保证系统的同步暂态稳定。

4.2.4 基于锁相环输出的电压调整

文献[37, 73-76]提出基于锁相环输出的电压调整措施,如附录F图F6所示。该方法基于锁相环输出的频率变化补偿反馈 V_{iq} 中的偏移项,经额外PI环节,动态调整电压反馈值,以恢复系统暂态同步稳定。该方法可使该系统在大扰动后自动找到平衡点,并具有自适应等效不平衡功率的能力,显著提高了VSC的暂态同步稳定性。

4.2.5 电压归一化的锁相环控制

为补偿故障电压大幅阶跃,不同于补偿 V_{iq} ,文献[77]经积分环节消除了动态过程中并网点电压的 d 轴分量 V_d 与基准电压值的不平衡量,如附录F图F7所示。该方法提升了系统的暂态同步稳定效果,解决了2阶回路相角超调的问题。但若系统在故障期间不存在平衡点,则仍无法恢复稳定状态。

5 总结与展望

5.1 总结

本文针对单个WG-VSC系统在对称故障等大扰动下的PLL-Syn暂态失稳现象,从数学模型、常用PLL-Syn暂态稳定分析方法、以VSC注入有功/无功电流为参数空间的暂态稳定域及PLL-Syn暂态稳定性提升4个方面,对现有主要研究工作进行了全面综述。通过分析和对比,可得到如下主要结论。

1)在弱连接环境下,直流侧功率大幅阶跃与网侧发生严重短路故障均可能会导致并网变流器的PLL-Syn暂态失稳,而基于线性化的小扰动稳定分析模型与方法无法对其进行分析和解释。

2)针对PLL-Syn暂态失稳现象的量化分析,现有研究主要可分为基于数值积分的方法与基于能量函数的方法。基于数值积分的方法分析系统PLL暂态稳定的结果将较为直观,但存在无法判定系统运行状态与稳定边界的距离、无法解析表达系统运行状态等问题。针对能量函数法的范畴,数值能量函数法构建的LEDA一般比解析能量函数法具有更低的保守性,但在揭示系统参数对暂态同步稳定性的影响机理时,解析能量函数法将更具有优势。

3)基于LMI优化法构建的LEDA具有较低的保守性。在此基础上,本文首次提出面向PLL-Syn暂态稳定的FRC概念和求解方法,理论分析和仿真结果表明了所提方法的有效性,为WG-VSC系统在受到大扰动后的关键控制参数的选择提供了指导依据。

4)提升PLL-Syn暂态稳定的方法大致可分为动态调整电流注入与动态调整PLL动态2类,其中前者的本质是将注入电流调整至本文所提出的FRC,后者是通过改变WG-VSC系统故障下的暂态特性实现稳定性提升。

5.2 展望

在高比例新能源和高比例电力电子装备以及新型电力系统发展的趋势下,相比于单个WG-VSC系统在对称故障等大扰动下的PLL-Syn暂态失稳现象,未来新型电力系统中高比例电力电子装备所面临的PLL-Syn暂态失稳现象甚至其他类型的暂态失稳现象会更加复杂。针对该方向,未来可值得深入研究的工作包括但不限于如下方面。

1)多WG-VSC并联系统的PLL-Syn暂态稳定性

研究。

现有文献大多集中于设备层面的暂态稳定性研究,仅有少量文献探讨了多WG-VSC并联系统的PLL-Syn稳定性,且集中于静态稳定分析^[78]、小扰动稳定分析^[79-81]和机理揭示^[71,82-83]方面。考虑多变流器之间的动态交互作用,通常使得非线性程度大幅增加,从而存在对多WG-VSC并联系统在对称故障下的暂态同步稳定特性的定量分析研究不足。另外,若考虑非对称故障下的正序控制动态耦合等因素,文献[81]指出多WG-VSC并联系统的暂态同步稳定问题会更为复杂。因而未来的研究应更多关注多WG-VSC并联系统的PLL-Syn暂态稳定问题,更深入地探讨电力电子化电力系统的暂态同步稳定问题。

2)WG-VSC系统在不对称故障下的PLL-Syn暂态稳定性研究。

不对称故障下,正序锁相环、正序网络、负序锁相环、负序网络及序耦合之间相互影响,WG-VSC系统的PLL-Syn动态更加复杂。现有文献大多忽略序耦合的影响,并在此基础上探讨了系统静态稳定^[33,84]和PLL-Syn暂态稳定^[20,85-86]的条件。而现有文献考虑序耦合的研究也主要聚焦于系统小扰动稳定分析^[87-88],平衡点附近线性化的方法无法解决系统在大扰动问题下的全局暂态同步问题。进而在计及不对称故障下的情形以及大扰动稳定问题的研究中,正负序耦合对系统PLL-Syn暂态稳定性的影响知之甚少,计及序耦合影响的PLL-Syn暂态稳定量化评估手段匮乏。因而未来的研究亦应进一步深入关注WG-VSC系统在非对称故障期间的暂态稳定机理分析与量化评估问题。

3)WG-VSC系统在电压源虚拟同步或构网控制下的暂态同步稳定性研究。

故障穿越期间,由于构网型变流器的电压源特性可能引发的过流问题,构网型变流器常需要限流或切换至PLL-Syn模式下运行^[89-90],这为其暂态稳定分析带来了新的挑战^[10,91]。基于此,现有的研究从考虑限流与无功外环控制动态的角度,从机理解释与量化分析2个角度,研究了限流控制措施与不同形式的无功外环控制对系统同步特性的影响^[92-97]。然而仍缺乏同时考虑故障穿越期间两者对系统同步稳定性影响的研究,优化构网变流器的故障穿越策略以获得更好的暂态同步稳定性仍待深入探讨。另外现有研究基于机理与分析方法的角度探讨了“跟网-构网”混联系统的暂态同步稳定性^[98-100],但缺乏考虑了计及变流器间的动态交互确定构网变流器的合理占比的有关理论与技术研究。因此未来的研究应更为深入,包括且不限于以上含虚拟同步或构网控制下的暂态同步稳定性研究。

4)不同锁相环对WG-VSC系统的PLL-Syn暂态同步稳定影响研究。

现有研究中,本文所综述的锁相环作为主流同步方法接入WG-VSC系统。随着高比例新能源的不断渗透,为不断提升锁相环的动态特性,近些年不少学者在此基础上额外附加控制环节,衍生了一系列改进锁相环^[101-103],包括基于滑动平均滤波器的锁相环(moving average filter-based PLL,MAF-PLL)、基于二阶广义积分的锁相环(second-order generalized integrator-based PLL,SOGI-PLL)、基于比例与校正环节的锁相环等。文献[101]基于MAF-PLL,提出了改进锁相环控制结构,将PI控制环节替换为比例-积分-微分(proportional integral derivative,PID)控制环节,维持了锁相环的滤波能力,提升了动态响应能力。文献[102]提出了SOGI-PLL的控制结构,较好地跟踪了电网电压相角信息,提升了系统暂态稳定裕度。文献[103]提出了基于比例与校正环节的锁相环,将锁相环中的PI控制环节替换为比例环节与滞后/超前控制环节,缩短了系统动态响应时间并增强了系统暂态稳定裕度。然而,基于不同类型的PLL-Syn控制方式接入WG-VSC系统后的暂态同步稳定问题尚未得到广泛关注。因此本文综述的系统暂态失稳机理、暂态稳定分析方法、状态空间与参数空间可行域及暂态稳定提升方法对于基于不同PLL-Syn方式的WG-VSC系统是否可以拓展应用,未来值得进一步探讨和研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LI Xialin, GUO Li, HONG Chao, et al. Hierarchical control of multiterminal DC grids for large-scale renewable energy integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1448-1457.
- [2] WANG X F, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(3): 2858-2870.
- [3] 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.
- [4] ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng, et al. Properties and physical interpretation of the dynamic interactions between voltage source converters and grid: electrical oscillation and its stability control[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(8): 894-902.
- [5] 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): 7485-7496.
LI Xialin, WANG Zhi, GUO Li, et al. Transient stability analy-

- sis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs based on the largest estimated domain of attraction[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7485-7496.
- [6] LI Xialin, WANG Zhi, LIU Yixin, et al. The largest estimated domain of attraction and its applications for transient stability analysis of PLL synchronization in weak-grid-connected VSCs[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2022-07-06) [2023-08-07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9816121>.
 - [7] LI Yin, FAN Lingling, MIAO Zhixin. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
 - [8] 刘璐, 耿华, 马少康, 等. 低电压穿越过程中DFIG型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4399-4407.
LIU Lu, GENG Hua, MA Shaokang, et al. Synchronization stability and reactive current control method of DFIG wind farm during low voltage ride through[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4399-4407.
 - [9] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
 - [10] WANG Xiongfei, TAUL M G, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
 - [11] ERLICH I, SHEWAREGA F, ENGELHARDT S, et al. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
 - [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] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1701.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1701.
 - [14] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9655-9670.
 - [15] DONG D, WEN B, BOROEYEVICH 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.
 - [16] HE X Q, GENG H, MA S K. Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(1): 40-49.
 - [17] SHAIR J, LI H Z, HU J B, et al. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 145: 111111.
 - [18] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. An efficient reduced-order model for studying synchronization stability of grid-following converters during grid faults[C]//2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2019: 1-7.
 - [19] TAUL M G, WANG X F, DAVARI P, et al. Systematic approach for transient stability evaluation of grid-tied converters during power system faults[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 5191-5198.
 - [20] WU H, WANG X F. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(4): 3573-3589.
 - [21] CHIANG H D. Direct methods for stability analysis of electric power systems[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010: 19-21.
 - [22] TAUL M G, WU C, CHOU S F, et al. Optimal controller design for transient stability enhancement of grid-following converters under weak-grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10251-10264.
 - [23] CHEN Junru, LIU Muyang, GENG Hua, et al. Impact of PLL frequency limiter on synchronization stability of grid feeding converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2487-2490.
 - [24] TANG Yingyi, LI Yujun. Common Lyapunov function based stability analysis of VSC with limits of phase locked loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1759-1762.
 - [25] LI Yujun, TANG Yingyi, LU Yiyuan, et al. Synchronization stability of grid-connected VSC with limits of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3965-3976.
 - [26] ZHANG C, MOLINAS M, CAI X, et al. Understanding the nonlinear behavior and frequency stability of a grid-synchronized VSC under grid voltage dips[EB/OL]. (2018-06-29) [2023-02-13]. <https://arxiv.org/abs/1806.11529>.
 - [27] YANG Z Q, MA R, CHENG S J, et al. Nonlinear modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters under voltage dips[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3281-3292.
 - [28] PAN D H, WANG X F, LIU F C, 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.
 - [29] ZHAO J T, HUANG M, YAN H, et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1018-1029.
 - [30] ZHAO J T, HUANG M, ZHA X M. Nonlinear analysis of PLL damping characteristics in weak-grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11): 2752-2756.
 - [31] 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.
 - [32] 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.
 - [33] TAUL M G, GOLESTAN S, WANG X F, et al. Modeling of converter synchronization stability under grid faults: the general case[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics

- in *Power Electronics*, 2022, 10(3):2790-2804.
- [34] 张琛,蔡旭,李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14):4018-4026.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14):4018-4026.
- [35] 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.
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.
- [36] PEI J X, YAO J, LIU Y, et al. Modeling and transient synchronization stability analysis for PLL-based renewable energy generator considering sequential switching schemes[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(2):2165-2179.
- [37] HUANG S, YAO J, PEI J X, et al. Transient synchronization stability improvement control strategy for grid-connected VSC under symmetrical grid fault[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5):4957-4961.
- [38] 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.
- [39] WU H, WANG X F. Transient stability impact of the phase-locked loop on grid-connected voltage source converters[C]//2018 International Power Electronics Conference. Niigata, Japan: IEEE, 2018:2673-2680.
- [40] XIONG X L, WU C, HU B, et al. Transient damping method for improving the synchronization stability of virtual synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7):7820-7831.
- [41] LI Y B, WANG X F, GUO J B, et al. PLL synchronization stability analysis of MMC-connected wind farms under high-impedance AC faults[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3):2251-2261.
- [42] LIU T, WANG X F, LIU F C. Impact of DC-link voltage control on transient stability of PLL-synchronized voltage-source converters[C]//2022 International Power Electronics Conference. Himeji, Japan: IEEE, 2022:435-439.
- [43] CHIANG H D, HIRSCH M W, WU F F. Stability regions of nonlinear autonomous dynamical systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(1):16-27.
- [44] CHIANG H, ALBERTO L F C. Stability regions of nonlinear dynamical systems: theory, estimation, and applications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.
- [45] MA R, ZHAN M. Transient stability assessment and dynamic security region in power electronics dominated power systems[C]//2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 1-6.
- [46] 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.
- [47] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5):2287-2295.
- [48] HU Q, HU J B, YUAN H, et al. Synchronizing stability of DFIG-based wind turbines attached to weak AC grid[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems. Hangzhou, China: IEEE, 2015:2618-2624.
- [49] 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.
- [50] FU X K, SUN J J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7):7832-7840.
- [51] 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.
- [52] ZHANG C, CAI X, RYGG A, et al. Modeling and analysis of grid-synchronizing stability of a Type-IV wind turbine under grid faults[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 117:105544.
- [53] 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.
- [54] DAI Z Y, LI G Q, FAN M D, et al. Global stability analysis for synchronous reference frame phase-locked loops[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(10):10182-10191.
- [55] 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):7871-7883.
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):7871-7883.
- [56] 张梓钦,朱东海,马玉梅,等. 弱电网故障下新能源并网变换器的奇异扰动模型与暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2):454-465.
ZHANG Ziqing, ZHU Donghai, MA Yumei, et al. Singular perturbation model and transient stability analysis of grid-connected converter under weak grid faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2):454-465.
- [57] BRAVO M, GARCÉS A, MONTOYA O D, et al. Nonlinear analysis for the three-phase PLL: a new look for a classical problem[C]//2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Padua, Italy: IEEE, 2018:1-6.
- [58] TIAN Z, TANG Y J, ZHA X M, 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):413-423.
- [59] ZHANG Y, ZHANG C, CAI X. Large-signal grid-synchronization stability analysis of PLL-based VSCs using Lyapunov's direct method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1):788-791.
- [60] MARX D, PIERFEDERICI S, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Contribution to determination of domain of attraction in power systems: application to drives with input filter[C]//2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Houston, TX, USA: IEEE, 2009:1-8.
- [61] MARX D, MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—a review[J].

- IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1773-1787.
- [62] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Nonlinear Lyapunov stability analysis of seven models of a DC/AC droop controlled inverter connected to an infinite bus[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 772-781.
- [63] TOPCU U, PACKARD A, SEILER P, et al. Help on SOS[ask the experts][J]. IEEE Control Systems Magazine, 2010, 30(4): 18-23.
- [64] ZHANG C, MOLINAS M, LI Z, et al. Synchronizing stability analysis and region of attraction estimation of grid-feeding VSCs using sum-of-squares programming[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 56.
- [65] HU Q, JI F, MA F, et al. Matching analysis of LVRT grid code and injection current dependent voltage response of WTC connected to high impedance AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 2236-2239.
- [66] 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.
- [67] CHESI G. LMI-based estimation of the domain of attraction of equilibrium points for nonlinear non-polynomial dynamical systems[C]//2009 European Control Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2015: 67-72.
- [68] CHESI G. Estimating the domain of attraction for non-polynomial systems via LMI optimizations[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1536-1541.
- [69] GÖKSU Ö, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.
- [70] 王烨, 宁琳如, 赵成勇, 等. VSC-HVDC联接弱交流系统下的新型附加频率阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2989-2998, 3149.
WANG Ye, NING Linru, ZHAO Chengyong, et al. A novel supplementary frequency-based damping control for VSC-HVDC station connected to a weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2989-2998, 3149.
- [71] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [72] HE X Q, GENG H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [73] LIU X B, GAO Z, BIAN Y W. Large signal stability analysis of AC microgrids considering the storage system[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. Jeju, South Korea: IEEE, 2018: 2023-2027.
- [74] HE X Q, GENG H, LI R Q, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1612-1623.
- [75] 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.
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.
- [76] XIA Y H, LV Z Y, WEI W, et al. Large-signal stability analysis and control for small-scale AC microgrids with single storage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4809-4820.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] ROSSO R, ANDRESEN M, ENGELKEN S, et al. Analysis of the interaction among power converters through their synchronization mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12321-12332.
- [80] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Analysis of the parallel operation between synchronverters and PLL-based converters[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 2583-2590.
- [81] ZOU Z X, BESHELI B D, ROSSO R, et al. Interactions between two phase-locked loop synchronized grid converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3935-3947.
- [82] ZHAO J T, HUANG M, ZHA X M. Transient stability analysis of grid-connected VSIs via PLL interaction[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition. Shenzhen, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [83] HE X Q, GENG H. Synchronization stability analysis and enhancement of grid-tied multi-converter systems[C]//2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2021: 1-8.
- [84] HE X Q, HE C J, PAN S S, et al. Synchronization instability of inverter-based generation during asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1018-1031.
- [85] LI Y B, LIN C S, HU J B, et al. PLL synchronization stability of grid-connected VSCs under asymmetric AC faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2438-2448.
- [86] LI X L, WANG Z, ZHU L, et al. Analytical dual-sequence current injections feasible region of weak-grid connected VSC under asymmetric grid faults[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2022-12-05)[2023-08-07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9969926>.
- [87] GUAN L, YAO J, LIU R K, et al. Small-signal stability analysis and enhanced control strategy for VSC system during weak-grid asymmetric faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2074-2085.
- [88] FANG X, YAO J, LIU R K, et al. Small-signal stability analysis and current control reference optimization algorithm of DFIG-based WT during asymmetric grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7750-7768.
- [89] CHEN M, ZHOU D, BLAABJERG F. Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [90] WU H, WANG X F. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.

- [91] 黄林彬,辛焕海,鞠平,等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):10-25.
HUANG Linbin,XIN Huanhai,JU Ping,et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):10-25.
- [92] ROKROK E,QORIA T,BRUYERE A,et al. Transient stability assessment and enhancement of grid-forming converters embedding current reference saturation as current limiting strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2022,37(2):1519-1531.
- [93] SUN K,YAO W,WEN J Y,et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSC considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2022,37(3):2137-2150.
- [94] SAFFAR K G,DRISS S,AJAEI F B. Impacts of current limiting on the transient stability of the virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2023,38(2):1509-1521.
- [95] QORIA T,GRUSON F,COLAS F,et al. Current limiting algorithms and transient stability analysis of grid-forming VSCs[J]. Electric Power Systems Research,2020,189:106726.
- [96] XIONG X L,WU C,BLAABJERG F. Effects of virtual resistance on transient stability of virtual synchronous generators under grid voltage sag[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(5):4754-4764.
- [97] 高振,雷为民,赵峰,等. 基于Lyapunov直接法的虚拟同步发电机并网暂态稳定性分析[J]. 浙江电力,2019,38(10):52-60.
GAO Zhen,LEI Weimin,ZHAO Feng,et al. Transient stability analysis on virtual synchronous generators integration based on Lyapunov's direct method[J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(10):52-60.
- [98] LI M F,QUAN X J,WU Z J,et al. Modeling and transient stability analysis of mixed-GFM-GFL-based power system[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Nanjing, China:IEEE,2022:2755-2759.
- [99] SHEN C,SHUAI Z K,SHEN Y,et al. Transient stability and current injection design of paralleled current-controlled VSCs and virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(2):1118-1134.
- [100] SUN H Q,LIN X C,CHEN S B,et al. Transient stability analysis of the standalone solar-storage AC supply system based on grid-forming and grid-following converters during sudden load variation[J]. IET Renewable Power Generation,2023,17(5):1286-1302.
- [101] GOLESTAN S,RAMEZANI M,GUERRERO J M,et al. Moving average filter based phase-locked loops: performance analysis and design guidelines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(6):2750-2763.
- [102] ZHANG C,FØYEN S,SUUL J A,et al. Modeling and analysis of SOGI-PLL/FLL-based synchronization units: stability impacts of different frequency-feedback paths[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2021,36(3):2047-2058.
- [103] ZHAN C J, RAMACHANDARAMURTHY V K, ARULAMPALAM A, et al. Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(6):1855-1863.

作者简介:

潘莉(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力电子化电力系统的建模与稳定性分析(E-mail:2022234036@tju.edu.cn);

李霞林(1986—),男,副教授,博士,主要研究方向为变流器控制、分布式电源及微电网控制等(E-mail:xialinlee@tju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Overview of transient stability analysis of phase locked loop synchronization in weak-grid connected VSC

PAN Li¹, LI Xialin¹, WANG Zhi¹, TANG Wangqianyun², GUO Li¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: It is focused on the phase locked loop synchronization transient stability problem of a single weak-grid connected voltage source converter (WG-VSC) system under the large disturbance such as symmetric fault, and its current research work is reviewed, including the transient instability phenomenon, stability mechanism, quantitative analysis method and stability enhancement control methods. In the actual operation control, it is more intuitive to analyze the transient stability region with VSC active/reactive current injection as the parameter space, which is defined as the feasible region of current, and the related research work is also summarized. Finally, the development and application prospects of phase locked loop synchronization transient stability problem are prospected from the aspects of multi-WG-VSC paralleled system, asymmetric faults, voltage source generator virtual synchronized control or grid-forming control, and influence analysis of different phase locked loops.

Key words: weak-grid connected VSC; phase locked loop synchronous; mechanism analysis; quantitative analysis method; feasible region of current; transient stability enhancement method

附录 A

WG-VSC 在直流侧功率大幅阶跃下的暂态失稳现象的简化数学模型，具体表达式如下：

$$\begin{cases} \dot{V}_t = \dot{V}_{td} \cos(\theta_t - \theta_{pll}) - \dot{V}_{tq} \sin(\theta_t - \theta_{pll}) \\ \dot{\theta}_t = -(\dot{V}_{tq} V_{td} - V_{tq} \dot{V}_{td}) / V_t^2 - k_p V_t \sin(\theta_t - \theta_{pll}) - k_i x_{pll} \\ \dot{\theta}_{pll} = -k_p V_t \sin(\theta_t - \theta_{pll}) - k_i x_{pll} \\ \dot{x}_{pll} = V_t \sin(\theta_t - \theta_{pll}) \\ \dot{U}_{dc} = \{P_{in} - (V_t^2 \sin \alpha + V_t V_g \sin(\theta_t - \alpha)) / |Z|\} / U_{dc} C \end{cases} \quad (A1)$$

式中：状态变量 V_t 、 θ_t 为并网点电压的幅值和相角； θ_{pll} 为 PLL 的输出相角； $x_{pll} = \int V_{tq} dt$ 为积分电压； U_{dc} 为直流电压。系统参数 $Z = |Z| \angle \varphi$ 为并网点至故障点和故障点至无穷大电源之间的等效阻抗之和， V_{td} 和 V_{tq} 分别为并网点电压的 d 、 q 轴分量， k_p 、 k_i 分别为直流电压控制和交流电压控制 PI 控制器的比例、积分系数， $\alpha = 90^\circ - \varphi$ 。

若分析的是 WG-VSC 系统在网侧发生严重故障时的 PLL-Syn 暂态失稳现象，考虑电流参考直接给定，因此可忽略外环控制，仅计及 PLL 动态，最后得到如下简化数学模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_p (R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1) - k_i x_2 \\ \dot{x}_2 = R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1 \end{cases} \quad (A2)$$

式中： x_1 和 x_2 为状态变量，分别表示 θ_{pll} 和 $\int V_{tq} dt$ 。

需要指出的是，在式(A1)、(A2)中，均以无穷大电源电压相角为参考相角。

附录 B

为便于应用 EAC，需要将 WG-VSC 在严重故障下的二阶等效模型(A2)类比转换为如下等效转子运动方程：

$$\frac{1}{k_i} \frac{d\theta_{pll}}{dt} + \left(\frac{k_p V_F \cos \theta_{pll}}{k_i} \right) \frac{d\theta_{pll}}{dt} = \frac{X_F I_{tdref} - R_F I_{tqref} - V_F \sin \theta_{pll}}{P_m} \quad (B1)$$

式中： J_{eq} 为类比惯量； D_{eq} 为类比阻尼； P_m 为类比机械功率； P_e 为类比电磁功率。

由于故障前后 P_m 与 P_e 会发生突变，在图 B1 中分别标注为故障前的机械功率 P_{m1} 、电磁功率 P_{e1} 和故障后的机械功率 P_{m2} 、电磁功率 P_{e2} 。A 点设定为故障前稳定运行点，故障后阶跃至 B 点。此时， P_{m2} 与 P_{e2} 的交点分别为 C、H 点。

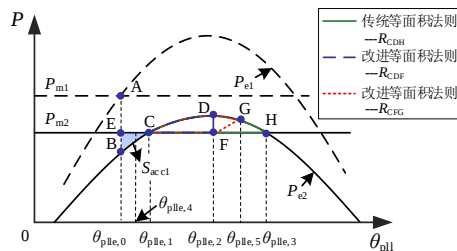


图 B1 基于 EAC 分析 WG-VSC 系统暂态失稳

Fig. B1 Transient instability analysis of WG-VSC system based on EAC

对(B1)积分，进一步将等效功角运动过程转化为暂态能量转化过程：

$$\int_{\theta_{pll,0}}^{\theta_{pll,k}} (P_{m2} - P_{e2}) d\theta_{pll} = \frac{J_{eq}}{2} (\Delta\omega)^2 \Big|_{\theta_{pll,0}}^{\theta_{pll,k}} + \int_{\theta_{pll,0}}^{\theta_{pll,k}} D_{eq} d\theta_{pll} \quad (B2)$$

式中： $\theta_{pll,0}$ 为等效初始功角； $\theta_{pll,k}$ 为等效任意时刻下功角； ΔE_p 为等效势能变化量； ΔE_k 为等效动能变化量； ΔE_D 为等效阻尼的耗能量。

ΔE_p 与 ΔE_k 在系统动态过程中相互转化， ΔE_D 主要是消耗动态过程中过剩的不平衡能量，即势能或动能。但由(B2)可知， D_{eq} 的正负性会随着 δ 发生变化，而 D_{eq} 的正负性未知时对系统暂态稳定性的判断亦有待商榷。

附录 C

针对式(A2)模型，将其整理为如下 2 阶非线性方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2) \\ f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_p (R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1) - k_i x_2 \\ R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1 \end{bmatrix} \quad (C1)$$

式中： $x_1 = \theta_{pll}$ ； $x_2 = \int V_{tq} dt$ 。

当考虑功率外环控制与 PLL 的交互动态时，考虑简化式(A2)模型，即分析 WG-VSC 系统在正常运行情况下面临源侧大功率扰动时的暂态稳定性，将(A1)重新整理为如下 4 阶非线性数学模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2) \\ f_2(x_1, x_2) \\ f_3(x_1, x_2) \\ f_4(x_1, x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{k_i}{1 - k_p i_{dref} X_F} (i_{dref} X_F + i_{qref} R_F - V_F \sin \theta_{pll}) \\ -\frac{k_p}{1 - k_p i_{dref} X_F} x_2 \cos x_1 + \frac{k_p}{1 - k_p i_{dref} X_g} i_{dref} X_g \\ k_{v1} (V_{dc}^2 - V_{dcref}^2) + k_{p1} \left(\frac{d(V_{dc}^2)}{dt} \right) \\ \frac{2}{C_{dc}} (V_{dc} I_{dc} - V_{Fd} i_{dref} - V_{Eq} i_{qref}) \end{bmatrix} \quad (C2)$$

式中： $x_1 = \theta_{pll}$ ； $x_2 = \Delta\omega_{pll}$ ； $x_3 = i_{dref}$ ； $x_4 = V_{dc}$ 。

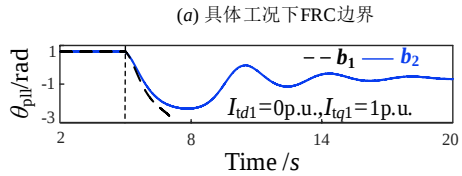
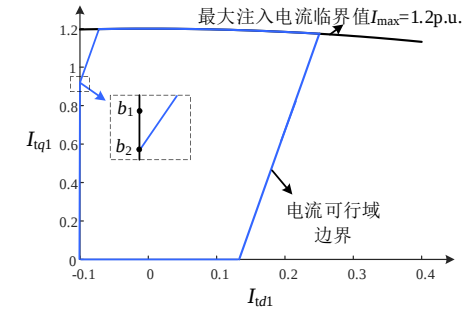
附录 D

将非线性系统右边取负号得到原系统的逆轨迹系统：

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = -f(x) = \begin{bmatrix} -f_1(x_1, x_2) \\ -f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p (R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1) + k_i x_2 \\ -(R_F I_{tqref} - X_F I_{tdref} + V_F \sin x_1) \end{bmatrix} \quad (D1)$$

附录 E

以工况 4 为例，刻画 FRC 及其对应的仿真结果如图 E1 所示。运行点 b_1 位于 FRC 外，系统将发生暂态失稳；运行点 b_2 位于 FRC 内，系统在受到大扰动后则仍可恢复至稳定状态，其中， I_{td1} 、 I_{tq1} 为标么值。



(a) 具体工况下FRC边界
(b) 具体工况 b_1 、 b_2 下的PLL仿真结果
图 E1 FRC 边界与仿真结果
Fig.E1 FRC Region and Simulation results

附录 F

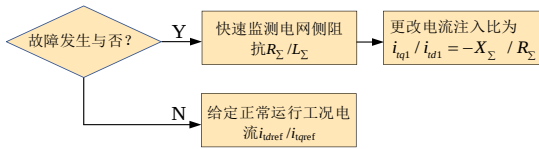


图 F1 基于电网阻抗比改变有功/无功电流注入比
Fig. F1 Adaptive current injecting method

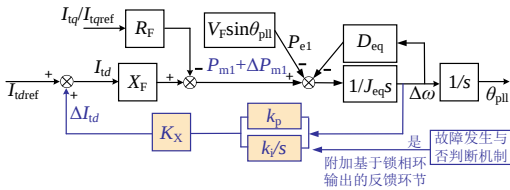


图 F2 基于锁相环输出动态调整注入电流
Fig. F2 current adjustment based on the output of PLL

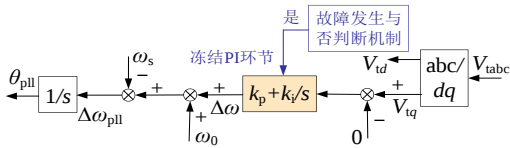


图 F3 冻结 PLL
Fig.F3 Frozen PLL

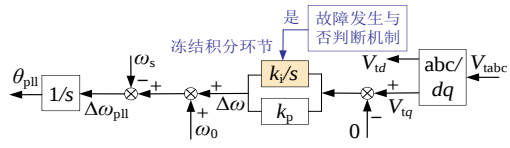


图 F4 冻结锁相环的积分环节
Fig.F4 Frozen integral regulator of PLL

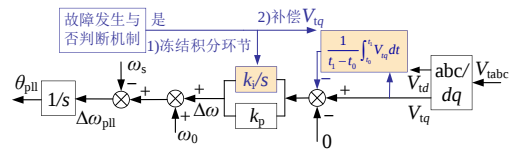


图 F5 基于冻结锁相环积分环节的前馈补偿法
Fig.F5 Voltage adjustment based on output of PLL

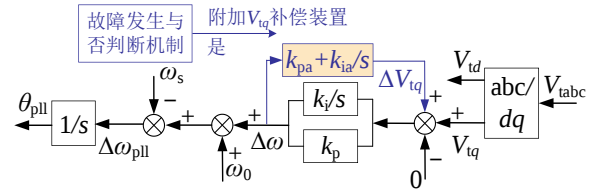


图 F6 基于锁相环输出的电压调整
Fig.F6 Voltage adjustment based on output of PLL

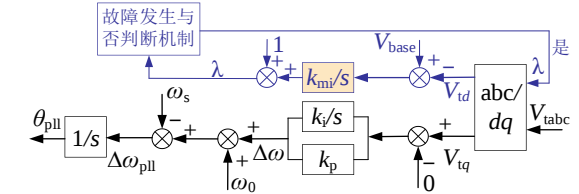


图 F7 电压归一化的锁相环控制
Fig.F7 Improved PLL with voltage normalization control