

并网变换器的暂态同步稳定性研究综述

张宇¹, 蔡旭^{1*}, 张琛¹, 吕敬¹, 李岩²

(1. 上海交通大学电气系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海市 闵行区 200240;
2. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东省 广州市 510080)

Transient Synchronization Stability Analysis of Voltage Source Converters: A Review

ZHANG Yu¹, CAI Xu^{1*}, ZHANG Chen¹, LYU Jing¹, LI Yan²

(1. Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute (China Southern Power Grid), Guangzhou 510080, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: With the increase of the penetration of renewable energy, the influence of grid connected converter on the dynamic and stability of the power grid is becoming severe, such as low inertia and wide-band oscillation. This paper discussed the problem of transient synchronization stability (TSS) which is closely related to the nonlinear dynamics of the synchronization unit of the converters. Firstly, the inherent relationship between the TSS of the VSC and angle stability of synchronous generator (SG) had been revealed by investigating the similarity of synchronization mechanism between VSC and SG. Secondly, the instability mechanism, analysis method and stabilization control regarding the TSS issue had been comprehensively reviewed. Thirdly, the challenge of TSS studying was summarized, the generally application-oriented stabilization method was proposed, and further synchronization issue for future research was prospected. The general method of TSS is concluded in this paper, which provides reference to applications and future research.

KEY WORDS: voltage source converter (VSC); large disturbance; transient stability; synchronization stability; synchronization mechanism; phase-locked loop; loss of synchronization

摘要:随着可再生能源渗透率的提高,并网变换器对系统动态及稳定性的影响逐渐突显出来,如目前广泛讨论的低惯性和宽频振荡问题等。该文探讨与并网变换器同步环节非线性动态紧密相关的暂态同步稳定问题。首先分析并网变换器与同步机在同步机制方面的相似性,揭示了变换器的暂态同步

稳定性与同步机的功角稳定性在研究方法上的内在联系;其次针对当前变换器的暂态同步稳定性研究,从失稳机理、研究方法、镇定方法3个方面展开全面的综述;接着总结了暂态同步稳定性研究所面临的难点,探讨了暂态同步的致稳方法,展望了未来的研究方向。该文全面地梳理和总结了并网变换器暂态同步稳定性问题的研究成果和一般性方法,为解决工程问题和未来更深入的研究提供了借鉴和思考。

关键词:电压源型变换器;大扰动;暂态稳定性;同步稳定性;同步机制;锁相环;失步

0 引言

大力发展可再生能源已成为当今世界各国的基本共识。截至2019年底,风光电源装机容量总计达4.15亿kW,占比20.6%,预计2030年该占比将达56.1%^[1]。与此同时,以并网变换器为接口的风光电源并网、柔性直流输电、电力系统储能等技术也在快速发展,对于推动我国能源转型起到了重要支撑作用。未来,风电和光伏将成为我国电力供应的主要来源,以变换器为接口的非同步机电源将占据较高比例^[2]。电力系统日益电力电子化。

在这一进程中,许多与变换器有关的稳定性问题凸显出来^[3-4]。人们开始注意到对并网变换器的研究不能像分析小功率电力电子装备那样将电网理想化,而应充分考虑其与电网之间的交互。随着研究的深入,并网变换器的多时间尺度耦合、非线性动态、电网交互等特性被更深入地理解^[5],形成了以线性理论为基础的变换器小扰动稳定性研究方法^[6]。非同步机电源的稳态运行问题基本具备系统化的解决思路。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51837007);南网电科院直流输电技术国家重点实验室开放基金项目(SKLVDC-2019-KF-02)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51837007); State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid (SKLVDC-2019-KF-02).

另一方面,对于并网变换器暂态问题的研究尚处于不断探索的阶段。初期,系统中非同步机电源较少,由于变换器的耐受能力较弱,在故障后通常闭锁保护,引发风光电源脱网。随着风光电源数量的和功率等级的增加,为了保证电网的安全可靠性,防止发生大规模脱网事故,出台了相关国家标准对风光电源的故障穿越特性进行了明确规定,要求变换器具备电网故障耐受能力,在一定故障条件下维持功率连续性,不能任意闭锁。这样一来,变换器能否在电网故障发生后保持稳定运行,成为接下来重点关注的问题,属于大扰动暂态稳定性探讨的范畴。在实际工程中,变换器的暂态稳定性问题还没有充分显现,失稳现象较难被发现,主要有以下原因:

- 1) 曾经的非同步机电源故障穿越能力弱,一般在故障发生后直接闭锁变换器;
- 2) 现有国标要求风光电源在故障期间提供无功电流,虽然目的在于支撑电网电压恢复,但在一定程度上避免了变换器发生暂态失稳^[7-8];
- 3) 变换器控制的时间尺度很快,即使发生了暂态失稳,也会在很短时间内发散,接着由于过压或过流而触发闭锁保护,难以识别判断。

尽管如此,许多学者对变换器的暂态稳定性问题展开了预见性研究^[9]。相比于小扰动稳定性,变换器的暂态稳定性呈现出更为复杂的形态,线性化的方法已经不能够完全解决此类问题。开始尝试利用分岔^[10-11]、李雅普诺夫直接法^[12]、混合势理论^[13]等方法来研究变换器的暂态稳定问题。但由于变换器的多时间尺度耦合、非线性动态、控制方式切换等特性,以上探讨还处于初步阶段,对变换器暂态失稳机理还未能深入揭示,且不同研究之间缺乏联系,没有形成完整的体系。

在变换器暂态稳定性的研究中,有一类专门探讨变换器在经历大扰动后与电网保持同步的能力,本文称为“暂态同步稳定性”。这类研究彼此之间具有较强的相关性和继承性,取得了较多的研究成果。本文拟对这些成果进行系统的梳理和评述,尝试为暂态同步稳定性问题构建研究体系,为进一步的研究提供借鉴和参考。

1 暂态同步稳定性问题的提出

变换器的暂态同步失稳现象最早见于对风电机组的低电压穿越研究,发现如果网侧变换器在故

障期间的输出电流不满足稳定性边界,那么锁相环将发生失锁现象^[7]。在电网故障期间,能够观测到变换器并网点电压的功角经历发散^[7]、锁相环频率完全偏离电网频率^[8]。这种失稳与传统同步机的功角失稳具有相似特征,体现为变换器与所连交流电网之间失去同步。后来的研究发现即使故障后电压恢复,这种失稳现象依然可能持续^[14-17]。除此之外,相关研究还扩展到无锁相环的变换器中,发现同样存在类似问题^[18-20]。

通过仿真展示暂态同步失稳现象。仿真模型的主电路拓扑如图1所示,变换器外环采用直流电压控制,内环在dq轴下进行电流控制,利用锁相环获得并网点电压相角;直流侧始终保持0.5pu的有功输出,卸荷电路最大功率为1.5pu,交流系统短路比为2,仿真结果如图2所示。图2中变量均为标么值。其中 $|U_s|$ 为交流电网电压幅值, $U_{s,a}$ 为并

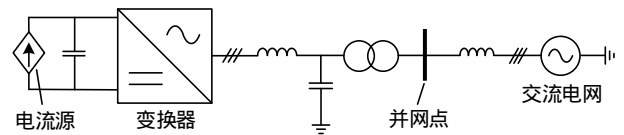


图1 变换器暂态同步失稳验证的主电路模型
Fig. 1 Main circuit for the verification of the transient synchronization instability of VSC

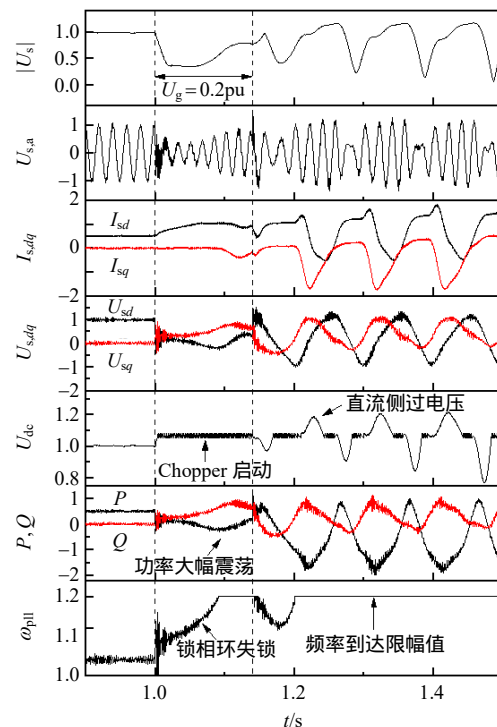


图2 风电机组网侧变换器暂态同步失稳波形
Fig. 2 Loss of synchronization of the grid-side converter of a wind turbine

网点 a 相电压 $U_{s,dq}$ 为变换器交流侧 dq 轴电压, $U_{s,dq}$ 为并网点 dq 轴电压, U_{dc} 为直流侧电压, P 、 Q 分别为交流侧有功和无功功率, ω_{pll} 为锁相环频率。从仿真波形中可以观察到, 在电网低电压故障期间, 直流侧的卸荷电路启动, 锁相环频率迅速上升, 变换器无法与电网保持同步, 但此时电流依然能够控制得住; 当电网电压恢复后, 锁相环的频率没有恢复, 导致变换器依然处于失步状态, 变换器的功角仍然失稳, 引发功率的大幅振荡, 且功率振荡会进一步传递到变换器的直流侧, 造成直流侧的电压上升。一旦注入直流侧的功率超过最大卸荷功率, 直流侧的电压将超过限幅, 触发保护装置动作, 造成变换器闭锁甚至停机。

仿真中展示的失稳现象与常见的并网变换器小扰动失稳有较大区别, 体现为:

- 1) 电压和电流既不发散, 也不似宽频振荡那样出现严重畸变, 而体现为大幅度低频振荡;
- 2) 变换器的外环控制器失效, 功率出现大幅度摇摆, 发生功率倒灌现象;
- 3) 当故障清除后, 尽管与发生故障前的工况完全一致, 失稳现象依然可能持续下去。

这表明暂态同步稳定性问题与小扰动稳定性问题在机理上不同, 不像是由于缺乏阻尼而导致的振荡现象。从失稳后锁相环的频率来看, 该问题与同步机的功角失稳更加类似, 即需要关注的是变换器与交流系统之间能否保持“同步性”。由于这种失稳会导致变换器外环控制失效, 并造成功率的大幅震荡, 危害变换器及其直流侧设备的安全, 因此有必要对其进行深入分析。

2 暂态同步失稳类型与机理分析

2.1 并网变换器的同步机制

在介绍暂态同步稳定性之前, 需要理解变换器的同步机制。变换器在并网运行时需要与所接的交流电网保持同步(除非单独向孤立负荷供电)。同步电源中产生角度、且能够使之与所连电网保持同步的结构被称为“同步单元”。比如同步机通过转子运动实现与电网之间的自然同步, 同步机转子就是其同步单元。并网变换器是静止电源, 为了与交流电网保持同步, 其同步单元由控制实现, 目前存在以下两种同步机制^[21-23]:

- 1) 电压型同步: 通过直接计算或闭环控制得到并网点电压的角度, 作为变换器控制的参考角

度, 典型的同步单元为锁相环, 如图 3(a)所示;

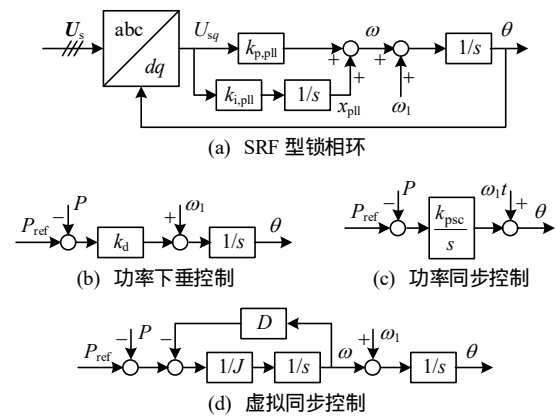


图 3 并网变换器的同步单元

Fig. 3 Synchronizing units of grid-connected VSCs

- 2) 功率型同步: 计算并网点功率, 作为功率控制的输入, 经过控制环节生成参考角度, 典型的同步单元为功率下垂控制、功率同步控制、虚拟同步控制, 如图 3(b)—(d)所示。

新能源接口变换器和柔性直流换流器普遍采用电压源拓扑的变换器, 其控制方式可分为电流控制型和电压控制型两种。对于基于电压型同步的变换器, 其控制坐标系参考角度与并网点电压的矢量角重合, 通过控制电流的分量可以实现有功和无功的解耦控制, 此时变换器对于电网体现为受控电流源性质, 故被称为电流控制型变换器。对于基于功率型同步的变换器, 其有功控制建立在功角反馈上, 无功控制通常建立在电压反馈上, 与同步机十分相似, 此时变换器对于电网体现为受控电压源性质, 故被称为电压控制型变换器。目前在电网中实际使用的风电变换器、光伏逆变器、柔直变换器(除孤岛送端站)均是电流控制型的电压源拓扑变换器。

同步机制建立在反馈上。电流控制型变换器利用锁相环内部反馈, 通过控制 q 轴电压为零, 实现与电网同步; 电压控制型变换器以交流功角方程作为反馈, 利用功率控制矫正功率输出的偏差, 同时完成同步过程。两种同步机制的尽管原理不同, 但均与同步机的同步机制之间存在内在联系。如图 4 所示, 以锁相环和虚拟同步控制为例, 分别展示两种同步机制的闭环回路^[24]。不难看出, 两种同步机制的闭环回路的前向通道均为线性控制器, 反馈回路均为非线性的正弦函数, 可以统一由图 5 中的闭环回路表示。由于虚拟同步控制本质上模拟了同步机的转子运动方程, 因此该统一闭环回路描述了现有同步电源与电网同步的一般模型。其中 m 为同步

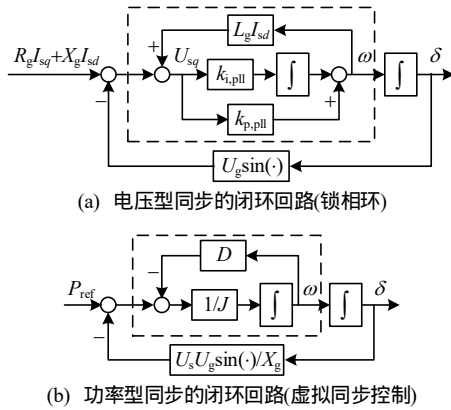


图4 电压型和功率型同步的闭环回路

Fig. 4 Close loop diagram of voltage-based and power-based synchronization

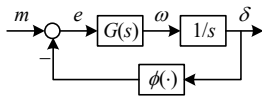


图5 同步机制的统一闭环回路

Fig. 5 Unified close-loop control diagrams of synchronization mechanism

机械转矩， $G(s)/s$ 为频域转子运动传函， $\phi(\delta)$ 为交流系统功角方程， δ 为功角， e 为偏差量。现有同步机制均是通过将偏差量控制至零而到达稳态，进而得到恒定的功角，实现同步过程。

2.2 暂态同步失稳类型

基于变换器与同步机在同步机制方面的内在一致性，可以将当前同步电源的同步稳定性问题，囊括在“广义同步稳定性”的框架内分析^[2,22]，把传统电力系统中功角稳定性的分类方法和研究成果，推广至并网变换器领域。在这个框架下，能较为清晰地对不同控制方式下的变换器的暂态同步失稳的机理进行分析，并通过借鉴传统分析方法直接具备一定的研究基础。

根据传统单机系统的功角稳定性理论，失稳原因包括3个方面：缺乏同步转矩、缺乏阻尼转矩、故障后的加速面积超过减速面积。根据同步机制的内在一致性，在并网变换器中也存在3种对应的暂态同步失稳类型：

- 1) 静态失稳：故障后，由于电压下降导致同步单元缺乏静态工作点，引发功角单调发散，对应功角失稳中缺乏同步转矩的情况；
- 2) 小扰动失稳：故障后，系统参数发生变化，导致静态工作点阻尼不足，引发功角周期性振荡，对应功角失稳中缺乏阻尼转矩的情况；
- 3) 暂态失稳：故障后，系统中存在稳定的静

态工作点，但由于初始状态不在其吸引域的范围，引发非周期性振荡，对应功角失稳中加速面积超过减速面积的情况。

利用图5中的统一闭环回路进一步解释3种暂态同步失稳类型的原理。当故障期间电压跌落较深时，反馈进来的电压或功率会非常小，如果在任何角度下反馈都不能与输入相等，即：

$$|m| > \sup |\phi(\delta)| \tag{1}$$

此时没有静态工作点，判定同步单元发生静态失稳。当电压跌落不是很大，存在 δ_0 满足：

$$\delta_0 = \phi^{-1}(m) \tag{2}$$

说明存在静态工作点。然而如果该工作点的阻尼不足，使闭环回路的特征方程：

$$s + KG(s) = 0, \quad K = \phi'(\delta_0) \tag{3}$$

的特征根实部并不全都小于零，此时判定同步单元发生小扰动失稳。即使静态工作点是小扰动稳定的，由于同步回路的非线性特性，其稳定性往往不是全局的，能够最终收敛到该工作点的区域被称为“吸引域”。当变换器经历暂态后，如果由于扰动过大，导致故障后的状态不在静态工作点的吸引域内，则同步单元会发生暂态失稳。

2.3 暂态同步失稳机理研究现状

为了叙述方便，本文斜体变量表示标量，正体加粗变量表示矢量。同步单元输出的参考角度均为 θ ，电网电压角度为 $\theta_g = \omega_1 t + \varphi_g$ ，两者夹角为 $\delta = \theta - \theta_g$ ， $X_g = \omega_1 L_g$ 为线路工频感抗。根据图3、4，锁相环的动态方程^[14,24]为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{x}_{pll} = k_{i,pll} U_{sq} \\ \omega = k_{p,pll} U_{sq} + x_{pll} \\ U_{sq} = -U_g \sin \delta + \omega L_g I_{sd} + (R_g I_{sq} + X_g I_{sd}) \end{cases} \tag{4}$$

虚拟同步控制的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ J\dot{\omega} = P_{ref} - \frac{U_s U_g \sin \delta}{X_g} - D\omega \end{cases} \tag{5}$$

功率下垂控制的动态方程为

$$\dot{\delta} = k_d \left(P_{ref} - \frac{U_s U_g \sin \delta}{X_g} \right) \tag{6}$$

综上，基于锁相环和虚拟同步控制的同步机制均为二阶动态方程，功率下垂控制为一阶动态方程

(功率同步控制与功率下垂控制在数学模型上是等价的^[25])。接下来，将基于以上动态模型，对目前的暂态同步失稳机理进行详细总结。

2.3.1 静态失稳机理

电流控制型变换器的输出电流与并网点电压必须满足如下的矢量关系^[7-8,26-27]：

$$U_s = U_g + I_s Z_g \tag{7}$$

如图 6(a)所示，在正常电压下，满足：

$$U_g \geq |I_s Z_g \sin(\varphi + \varphi_Z)| = |R_g I_{sq} + X_g I_{sd}| \tag{8}$$

式中 φ 、 φ_Z 分别为功率因数角和阻抗角，此时存在静态工作点，使锁相环的 d 轴与并网点电压矢量方向一致，因而能够锁住并网点电压。当电网电压跌落较多，如果不能满足(8)，那么结果如图 6(b)所示，锁相环的 d 轴与并网点的电压矢量一定存在不可消除的夹角，导致锁相环内部的控制器始终无法达到稳态。通过直接比较图 4(a)中输入与反馈的大小，也能得到相同的结果。

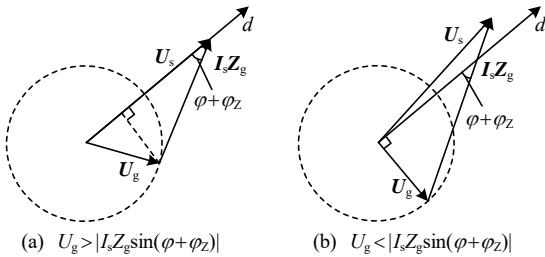


图 6 静态工作点丢失示意图

Fig. 6 Diagram of loss of static operating point

另一方面，对式(8)两端同乘以 U_s/X_g ，并忽略电阻上的有功功率，可以得到等价条件：

$$P_{max} = \frac{U_s U_g}{X_g} \geq |U_s I_{sd}| = |P| \tag{9}$$

即只要变换器的参考电流不超过功率传输极限，就能保证锁相环存在静态工作点。

同样地，电压控制型变换器也存在静态失稳的情况，此时变换器参考功率大于故障后的交流系统最大传输功率^[28]。值得注意的是，当变换器对输出电流限幅后，即使未超出功率传输限制，也可能由于电流限幅而发生静态失稳。变换器考虑电流限幅后，输出功率须满足^[18-19,29]：

$$|P| \leq U_g I_{max} \cos(\delta + \varphi) \tag{10}$$

式中 I_{max} 为变换器最大输出电流。如图 7 所示，故障前后交流系统的功角关系曲线分别由图中的虚线和实线表示，考虑电流限幅的极限输出功率由图

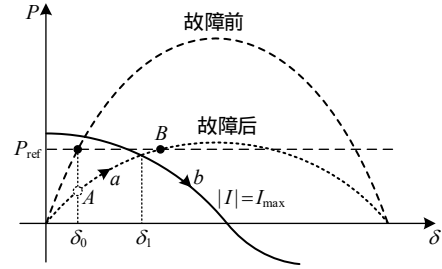


图 7 考虑电流限幅的状态运动示意图

Fig. 7 States trajectory of synchronizing loop in grid-forming converter considering current limitation

中的实线表示。故障发生后，系统状态跳变到 A 点，由于此时输出功率小于参考值，变换器的功率控制会增大功角 δ 以进行调节，沿曲线 a 移动。假如不考虑电流限幅的影响，系统状态能够最终稳定在 B 点；而如果将电流限幅考虑进来。当 δ 超过 δ_1 时，变换器的输出电流达到限幅值，而此时输出功率依然小于参考值，功率控制器使 δ 进一步增加，系统状态将沿曲线 b 运动。由于没有静态工作点，功角 δ 会在控制器的作用下一直增加，即发生失稳。

综上所述，同步单元是否发生静态失稳主要与有功传输有关。在电网故障情况下，如果变换器的有功功率(或有功电流)参考值超过电网的最大传输能力，就会引发静态失稳。

2.3.2 小扰动失稳机理

目前的研究中，由于小扰动不稳定导致暂态同步失稳的研究仅涉及电流控制型变换器^[30-31]。

根据锁相环的动态方程(4)，不难求出该二阶系统在平衡点处的阻尼比为

$$\xi = \frac{K(\delta_0) \cdot k_{p,pll} - k_{i,pll} L_g I_{sd}}{2\sqrt{1 - k_{p,pll} L_g I_{sd}} \cdot \sqrt{K(\delta_0) \cdot k_{i,pll}}} \tag{11}$$

式中 $K(\delta_0) = \phi'(\delta_0) = U_g \cos \delta_0$ 为反馈回路增益。如图 8 所示，当电网电压从 U_g 下降到 U_{g1} 后，功角从 δ_0 变为 δ_1 ，如果不能满足：

$$\frac{k_{p,pll}}{k_{i,pll}} > \frac{L_g I_{sd}}{K(\delta_1)} \tag{12}$$

则有 $\xi \leq 0$ ，表明锁相环在 δ_1 处临界稳定或小扰动不稳定，故障后的功角将产生等幅振荡或发散振荡；如果是发散振荡，则功角在到达图 8 中 δ_2 点之后将经历非周期失稳^[30]。除此之外，电流内环会为锁相环带来负阻尼，文献[32-33]利用复转矩系数法，研究了在低电压情况下的锁相环由于与电流环之间交互而产生的小扰动失稳问题。

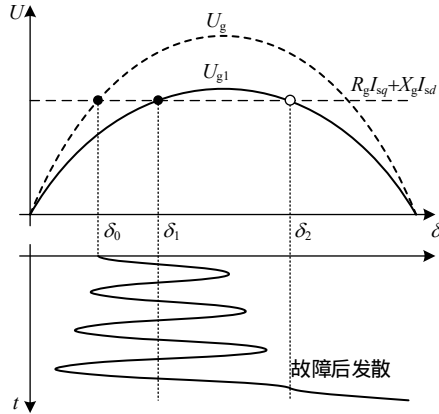


图8 锁相环的小扰动失稳

Fig. 8 Small-signal instability of PLL

2.3.3 暂态失稳机理

变换器的同步单元发生暂态失稳的机理较为复杂。这种失稳不仅需要探讨大扰动后静态工作点的稳定性，还要“估计”扰动后的状态是否在其吸引域内。然而，吸引域的概念是十分抽象的，在揭示机理方面，可以沿用传统的等面积法。

对于采用了虚拟同步控制的变换器，由于本质上模拟了同步机，自然可以通过等面积法揭示其暂态失稳机理^[20]，不做赘述。对于电流控制型变换器，目前多数研究也借助等面积法揭示锁相环的暂态失稳机理^[14,16-17,24,34-35]。将锁相环的动态方程式(4)^[14]化为如下形式：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ H_{pll}\dot{\omega} = T_m - T_e - D_{pll}\omega \end{cases} \quad (13)$$

式中： $H_{pll} = (1 - k_{p,pll}L_gI_{sd})/k_{i,pll}$ 为等效转动惯量； $T_m = R_gI_{sq} + \omega_1L_gI_{sd}$ 为等效机械转矩； $T_e = U_g\sin\delta$ 为等效电磁转矩； $D_{pll} = k_{p,pll}U_g\cos\delta/k_{i,pll} - L_gI_{sd}$ 为等效阻尼。该方程与考虑阻尼的同步机转子运动方程形式相似。当忽略阻尼项 D_{pll} 时，该方程与无阻尼的转子运动方程一致。如图9所示，设故障发生时刻的角度为 δ_0 ，故障切除时为 δ_1 ，如果加速面积 S_I 不大于减速面积 S_{II} ，则判定锁相环大扰动稳定，否则判定

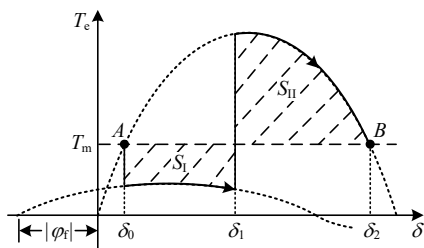


图9 利用等面积法揭示锁相环的暂态失稳机理

Fig. 9 Transient stability analysis of PLL by EAC

大扰动不稳定。

通过等面积法，能够对暂态失稳的机理有一个较为直观的认识：当大扰动发生后，同步单元的状态会经历一定动态过程，控制器在动态过程中积累的“量”会反映为频率的变化，假如在到达稳定边界(B点)之前这些“量”还没有释放完，那么同步单元的角度将会超过稳定边界，接着经历不可逆的加速过程，引发暂态失稳。

然而，等面积法并不适用于暂态同步稳定性的准确定量研究，在3.1.3节会详细阐述。

2.4 暂态同步稳定性的影响因素

关于电流控制型变换器的暂态同步稳定性的影响因素，目前的研究有以下结论：

1) 影响暂态同步稳定性的主要因素是电流注入对并网点电压的“贡献”。从这个角度来看，电压跌落和低短路比都会对暂态同步稳定性造成不利影响^[36]。电压跌落程度越深则对暂态同步稳定性越不利，且容易导致静态工作点丢失^[8]。短路比越低则对暂态同步稳定性越不利^[14]，因为会造成电流注入对并网点电压的影响增加。另外，短路点到变换器的电气距离越近，也对暂态同步稳定性越不利^[14]。

2) 暂态同步稳定性受电流注入方式的影响。影响并网点功角的主要是有功电流，有功电流越小则对暂态同步稳定性越有利^[7]。另一方面，变换器发出无功电流可以抬升并网点电压，增大极限输出功率；且故障期间输出无功电流会占用有功电流的容量，造成后者的下降，因此变换器发无功有利于暂态同步稳定^[7-8]。实际上，当电流的功率因数角与电网阻抗角匹配时，最有利于锁相环的暂态稳定性^[36-37]。

3) 暂态同步稳定性受电压相角突变的影响。暂态时的电压相位突变通常是不确定的^[36]，且其影响结果是非线性的：当相角跳变较小时能够在一定程度提高暂态同步稳定性，而当相角跳变较大时则对稳定性不利^[14]。

4) 暂态同步稳定性受变换器控制参数影响。锁相环带宽越大则对暂态稳定性越不利：一方面，较快的锁相环会造成较高的频率超调^[38]，导致线路感抗增加，恶化了暂态同步稳定性^[39]；另一方面，较快的锁相环使故障极限切除时间变短^[14]，导致锁相环更容易发生暂态失稳。锁相环等效阻尼越大，则对暂态同步稳定性越有利^[39]，这个结论是显而易见的。根据锁相环PI控制参数与锁相环调节时间和

阻尼系数的关系^[39]，不难得到：锁相环的比例增益越大、或积分增益越小，则对其小扰动稳定^[30-31]和暂态稳定^[34,39]都有利。

5) 暂态同步稳定性还受内环和外环控制的影响。有功外环的控制带宽越低则对暂态稳定性越有利，而受无功外环的影响较小^[40]。电流环带宽降低则对暂态稳定性不利^[41]。

关于电压控制型变换器的暂态同步稳定性的影响因素，与同步机基本类似，主要由参考功率大小和故障后的功角方程决定，因此参考功率越大、电压跌落越深、线路阻抗越大则对暂态同步稳定性越不利^[20]；增加虚拟同步控制的阻尼系数则有利于稳定性^[25]。除此之外，电流限幅环节^[19]、无功电压控制^[20]均会造成不利影响。

3 暂态同步稳定性的研究方法

3.1 经典方法

3.1.1 静态方法

静态方法假设所有变量均已到达稳态，只需要求解代数方程，因此只能通过求解方程得到静态工作点。假设稳态时满足的方程为

$$\dot{x} = f(x) = 0 \quad (14)$$

如果该代数方程有合理的解，则表明在当前的参数下，变换器能够保持运行。在 2.3.1 节已经分析，变换器需要满足最大功率传输和最大电流的约束，如果超出了这些物理约束，该方程一般是无解的，此时变换器的同步单元就会发生静态失稳。因此，静态方法能够用来检验并网变换器的工作点能否通过物理系统实现。

另一方面，静态方法只能研究大扰动后的系统是否存在解，而不能评估解的稳定性，更无法判断扰动后的系统能否收敛到解上。

3.1.2 线性化方法

线性化方法是电力系统中的经典方法，包括模态分析法、复转矩系数法、频率阻抗法，等等。线性化方法在分析小扰动稳定性问题已经应用得非常成熟。通过线性化方法，能够判断静态工作点的稳定性，是研究暂态稳定性的必要步骤。然而，最初关于变换器暂态同步稳定性的研究都忽视了这一点，往往默认在电压曲线的左半边，所有的工作点都是小扰动稳定的。文献^[30-31]利用二阶系统阻尼比的线性化分析方法，发现锁相环所需要满足的小扰动稳定性条件。

尽管线性化方法能够很好地判断静态工作点的稳定性，然而由于基本假设建立在“较小扰动”之上，只能分析平衡点邻域稳定性。但同步回路本质上是非线性的，故很难从线性化的分析结果判断大扰动下系统状态的稳定性。

3.1.3 等面积法

等面积法是分析传统单机无穷大系统暂态稳定性的有效方法，由于同步机制的内在相似性，被推广至变换器的暂态同步稳定性研究中，能够较为直观地揭示锁相环或虚拟同步控制发生暂态失稳的机理。忽略阻尼项的转子运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ J\dot{\omega} = T_m - T_e(\delta) \end{cases} \quad (15)$$

参考图 9，对式(15)积分：

$$J\Delta\omega^2 = \int_{\delta_0}^{\delta_2} (T_m - T_e(\delta))d\delta = S_1 - S_{II} \quad (16)$$

表明同步机在暂态过程中转子频率的变化等价于加速面积与减速面积之差，即等面积定则。

根据推导过程，不难发现等面积定则是使用条件的：当且仅当同步单元的频率与其输入偏差满足积分关系时，等面积定则才能够成立，即图 5 中控制器 $G(s)$ 应该为一个积分环节。然而，变换器的同步单元一般不能满足这个条件。对于锁相环，由 PI 控制器的比例环节会引入一个不定阻尼项^[14,35]（即 2.3.3 节中的 D_{pll} ），如果忽略这一项进行分析，会导致一些情况下的稳定性估计过于乐观^[42]；对于虚拟同步控制，如果整定阻尼系数较大，则导致利用等面积法估计的暂态稳定性结果非常保守。

总之，等面积法能够用来直观地揭示变换器同步单元的暂态失稳机理，但很难用于定量估计稳定域的大小或整定极限切除时间。需要强调的是，利用等面积法分析锁相环的暂态稳定性时，存在数学上的不严谨性。

3.2 非线性方法

3.2.1 一阶动态系统

如果变换器的同步机制是一阶的动态方程，那么其大扰动稳定性将很容易分析，且能够得到量化的结论。设同步单元满足一阶动态方程：

$$\dot{x} = f(x) \quad (17)$$

图 10 为一阶系统的相图。如果：

$$f(x_0) = 0, \quad f'(x_0) < 0 \quad (18)$$

则表明 x_0 是稳定的平衡点，且其与相邻两个不稳定

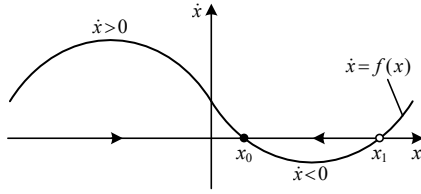


图 10 一阶动态系统的稳定研究方法

Fig. 10 Stability analysis of first-order dynamic system
平衡点之间的区域都是它的吸引域^[42]。例如，在区间 (x_0, x_1) 内， $f(x) < 0$ ，则 x 随时间变化而减小，最终一定会收敛到 x_0 处。

对于一阶的功率下垂控制和功率同步控制，根据其动态方程(6)，只要该方程存在稳态解，则所有稳定平衡点的吸引域覆盖了 x 轴，因此变换器一定不会发生暂态同步失稳^[25,28]。当变换器采用虚拟同步控制时，如果阻尼系数远大于惯性时间常数($D \gg J$)，同样可以近似为一阶系统，此时也能够用一阶系统的方法研究其暂态稳定性。一阶系统的稳定性结论还能用来指导稳定控制设计。例如文献[16,39]在故障期间将锁相环 PI 控制器的积分器闭锁，将锁相环暂时性转化为一阶系统，以保证其不会发生暂态失稳。

3.2.2 二阶动态系统

锁相环和虚拟同步控制都是二阶动态系统，除了采用李雅普诺夫直接法，没有很好的方法能用来研究系统的大扰动稳定性。但相比于高阶系统，研究二阶系统的优势是能够借助相平面分析系统的动态轨迹。考虑二阶动态方程：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (19)$$

该系统的向量场为 $(\dot{x}_1, \dot{x}_2) = (f_1, f_2)$ ，可以据此画出该二阶系统的相图。图 11 展示了一幅二阶系统的相图。根据该相图，可以研究稳定平衡点(stable

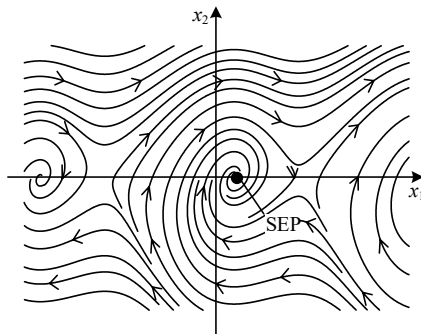


图 11 二阶动态系统的相平面分析法

Fig. 11 Phase portrait method for stability analysis of the second-order dynamic system

equilibrium point, SEP)的吸引域范围，预测系统在经历大扰动后的稳定性情况。此方法称为相平面分析法，本质上是一种数值方法，只能针对特定的参数集进行分析，结论不具有普遍性。

相平面分析法具有工程价值，可以针对特定系统进行面向参数设计的研究，以得到较优参数。文献[39,44]研究了锁相环的 PI 参数对其大扰动稳定性的影响，总结出应对暂态失稳的参数设计方法；文献[25]利用相平面分析法研究了惯量和阻尼系数对虚拟同步控制的暂态稳定性的影响。

3.2.3 高阶动态系统

变换器的同步单元通常为一阶或二阶系统，但如果考虑到变换器其他控制回路的影响，或把研究扩展到多变换器互联的系统，所面临的对象就会变成更复杂的高阶系统。目前而言，除了用线性化理论分析高阶系统的小扰动稳定性以外，还没有其他很好的方法。面对高阶非线性系统，首先想到的方法就是尽量地简化模型，降低阶数。根据变换器的多时间尺度特征，电流内环通常与锁相环和外环控制解耦，因此可以利用奇异摄动的方法将电流的动态变为代数方程，实现降阶。文献[41]把暂态时的电流考虑进来，并利用奇异摄动将其简化，仿真的波形比经典的准静态模型^[26]更接近全阶电磁暂态模型的仿真结果。

外环控制与同步单元的时间常数通常比较接近，如果不进行一定简化，往往很难分析大扰动稳定性。文献[20]在研究无功电压控制对于虚拟同步控制变换器的暂态同步稳定性影响时，依然假设无功电压控制的时间尺度比同步回路快许多，在暂态同步的时间尺度上可以视为准稳态，建立无功电压控制的准静态模型，以此进行简化系统分析。文献[40]先分别单独研究了功率外环的非线性动态和锁相环的极限切除时间，再将功率外环对锁相环暂态稳定性的影响通过仿真呈现，属于一种定量与定性研究相结合的分析方法。

3.3 直接法

直接法即利用李雅普诺夫第二法进行研究。通过构造李雅普诺夫函数，将稳定性问题转化为比较函数值与临界值的大小关系，进而判断系统的大扰动稳定性。电力系统中利用直接法研究暂态稳定性是通过构造同步机转子的能量函数。这种方法被自然地应用在研究并网变换器的暂态同步稳定性中。类比同步机的转子运动方程，文献[24, 34]提出锁相

环的能量函数为

$$V(\delta, \omega) = \frac{H_{\text{pll}}}{2} \omega^2 - (T_m \delta + U_g \cos \delta) \quad (20)$$

故障后的加速面积与减速面积之差为

$$S_1 - S_{\text{II}} = \int_{\delta_0}^{\delta_2} (T_m - T_e(\delta)) d\delta = (T_m \delta + U_g \cos \delta) \Big|_{\delta_0}^{\delta_2} = V(\delta_2, 0) - V_{\text{cr}} \quad (21)$$

式中 $V_{\text{cr}} = V(\delta_2, 0)$ 为临界能量。这表明：利用等面积法判定加速面积与减速面积的大小关系，等价于研究故障时刻的能量值与临界能量的大小关系。考虑到等面积法在研究锁相环暂态稳定性的不严谨性，检验该能量函数的耗散性：

$$\dot{V}(\delta, \omega) = H_{\text{pll}} \cdot \omega \dot{\omega} - (T_m - T_e) \dot{\delta} = -D_{\text{pll}} \cdot \omega^2 \quad (22)$$

由于阻尼项 D_{pll} 的符号是不定的，该能量函数并不永远随时间减小，因此它事实上并不是一个“真正”的能量函数，通过该能量函数所估计出的稳定域会在某些区域超过真实的稳定域边界，造成稳定性估计结果过于乐观，这一点也与等面积法的结论一致。因此，能量函数在分析锁相环的暂态稳定性时，同样存在数学上的不严谨性。

除了能量函数，可以通过其他方法得到锁相环的李雅普诺夫函数。文献[36]假设变换器在故障期间采用一种电流注入策略，即保持电流的功率因数角与电网阻抗角之和为零，此时能够构造出锁相环的李雅普诺夫函数，并且还证明在这种情况下，锁相环是全局稳定的。但该李雅普诺夫函数只针对一种特殊情况，不具有推广性。除此之外，有研究开始转向通过数值方法构造李雅普诺夫函数。文献[42]利用 sum-of-square programming 法得到了一种锁相环的李雅普诺夫函数，该方法是一种基于最优化理论的数值方法，能够估计出较为准确的吸引域。尽管通过数值法得到的李雅普诺夫函数通常比构造法得到的大，但前者较难分析参数对稳定域大小的影响。

对于采用虚拟同步控制的变换器，目前采用的直接法也基本是对于传统方法的扩展。文献[20]考虑了虚拟同步控制的阻尼项的影响，构造了计及阻尼的能量型李雅普诺夫函数^[45]，相比于利用首次积分方法构造的传统形式能量函数，这种方法能够估计出更大的稳定域范围；文献[46]利用波波夫频域判据，设计出一种鲁里叶型李雅普诺夫函数，这种构造方法不受非线性系统动态方程的具体形式影

响，只要系统能够满足波波夫频域条件，就一定能找到满足要求的李雅普诺夫函数。但是由于这种方法涉及复数运算，不仅计算复杂，而且对于一般动态系统很难得到解析形式的解。除此之外，文献[47]利用 Takagi-Sugeno 方法对虚拟同步控制变换器与同步机的互联系统求解李雅普诺夫函数，这种方法也是一种数值方法，需要求解线性矩阵不等式，并且复杂程度随着系统中非线性环节的增加而呈指数级增加。

到目前为止，利用直接法分析锁相环的大扰动稳定性仍在进一步探索中。数值构造的李雅普诺夫函数在估计吸引域方面一般具有更高的准确性，但在分析参数对同步单元暂态稳定性的影响、以及构建多变换器的李雅普诺夫函数等方面，解析构造法显然更具潜力。尽管得到合适的李雅普诺夫函数具有巨大的挑战性，但直接法仍是研究暂态同步稳定性最具有前景的方法^[48]。

4 暂态同步失稳的镇定方法

提高暂态稳定性可以从参数优化和控制设计两方面入手。针对参数优化，对于锁相环，增大 PI 控制器的比例增益、降低积分增益^[30,34,39,49]，或降低锁相环的带宽^[14,35]，都能够提高其暂态稳定性；对于虚拟同步控制，增大阻尼、减小惯性时间常数^[25]，都有利于提高其暂态稳定性。

更多的研究聚焦于控制设计，以期望改善同步单元的暂态特性。对于电流控制型变换器的稳定控制，目前主要有以下 4 种方法：

1) 减少有功电流：由于电网的感性阻抗远大于阻性，故电流的有功分量对并网点角度影响较大。此类控制方法实现简单，但目前缺乏严格的理论证明。文献[7]根据电压跌落程度，降低有功电流的参考值；文献[8,17]通过频率的偏差量，利用 PI 控制器动态调整有功电流/功率大小；文献[15]提出在故障后先减小有功注入，延时一定时间后注入无功电流的策略。

2) 补偿电流耦合：此类方法的理论依据是补偿电流在阻抗上的压降，使变换器所连接的系统等价为无穷大电网。此类控制方法理论上可以实现锁相环的全局稳定，但由于依赖线路阻抗的真实值，因此鲁棒性和实用性并不高。在实现方法上，既可以通过注入功率因数角与线路阻抗角互为相反数的电流^[36]，也可以在锁相环的输入电压中加入该补

偿项^[50-51]。

3) 闭锁锁相环 PI 控制器：此类方法主要将锁相环变为一阶系统或开环系统，以提高其暂态稳定性。此类控制方法在工程上较为实用，能够防止由于过量超调而发生的暂态同步失稳；但如果系统不存在静态工作点，此类方法将束手无策。文献[37]提出当并网点电压低于某阈值时，把锁相环的 PI 控制闭锁，以开环的方式输出参考角度但这种方法使故障期间的变换器与电网之间不再同步；文献[16, 39]提出在故障期间闭锁锁相环 PI 控制的积分器的方法，将其变成一阶系统，使锁相环在保留同步性的同时提高暂态稳定性。

4) 自适应方法：根据研究者的经验设计控制方法。文献[52]利用锁相环坐标系下的 dq 轴电压大小作为电网故障的判定依据，当满足判定条件后，将锁相环的 PI 控制器切换为模糊控制器，使其能够更加迅速地经历暂态过程；文献[53]根据 U_{sq}/U_{sd} 的大小降低暂态时锁相环的积分增益，以提高其暂态稳定性；文献[38]离线计算了不同故障情况下锁相环的最优 PI 控制参数，在故障发生后通过查表动态改变 PI 控制参数，使每种故障情况下的锁相环参数都最优。

对于电压控制型变换器的稳定控制，目前主要有以下 3 种控制方法：

1) 减少有功的参考值：借鉴减少原动机出力的思想。此类方法实现简单，且由于变换器的控制速度更快，理论上能取得更好的稳定效果。文献[20, 46]的稳定控制方法都属于此类方法。

2) 提高功角关系曲线：提升功角关系曲线，则可以使静态工作点出现的可能性增大，并且还能减小加速面积。此类方法可以尽可能地减少有功损失。文献[29]在功率下垂控制器中附加 U_{sq} 的比例项，抬升了变换器的极限功率曲线，提高了变换器的暂态同步稳定性。

3) 非线性设计：文献[54]利用李雅普诺夫方法构造了一种虚拟同步控制的镇定器。

5 暂态同步稳定性问题的思考与展望

5.1 暂态同步稳定性问题的研究难点

近十年来，关于变换器暂态同步稳定性的研究方兴未艾。尽管已经得到了许多理论成果，但也明显能够看出，目前的研究尚不充分，因此在指导实际工程方面尚有较远距离。总体来说，学界对该问

题有了一定的认识，但解决思路上遇到了较大的困难，其原因主要在于：

1) 电网级变换器控制回路众多，且在时间尺度上存在耦合，彼此间容易相互影响；直流侧通常不是理想电源，也有复杂的动态过程，且与直流侧其余变换器存在功率交互；尤其应用于柔性直流输电的模块化多电平变换器，存在复杂的内部动态。如何将同步单元之外的动态过程考虑进来？怎样建立数学模型才能较为准确地反映变换器在大扰动下的动态？现有模型不能反映的部分如何做出修正？这些都是亟待探讨的问题。

2) 电网中故障类型众多，且由于风光电源都是集群式发电，故障特性复杂；变换器在故障期间需要采取一定的故障穿越策略，并根据并网标准提供相应的短路电流；变换器只能提供有限耐受能力，需要对输出电流进行饱和限幅；另外故障期间还可能出现调制限幅等问题。目前研究对故障严重程度^[14]、故障穿越策略^[7-8]、饱和限幅^[18-19]均有探讨，但尚未形成针对暂态同步稳定性的标准化分析场景。

3) 变换器本质上是一个高阶时变非线性动力系统，针对这样的系统在大扰动下的稳定性问题，目前还缺乏相应的数学方法。尽管暂态同步稳定性问题已经将问题大大简化，但传统的等面积法或能量函数法在应用于锁相环的暂态稳定性分析时，不能很好地处理不定阻尼项；当前的非线性的方法太依赖于数值求解；直接法应用在锁相环上还很难找到解析的李雅普诺夫函数。因此目前依然缺乏机理的、定量的分析方法。

5.2 暂态同步的致稳方法探讨

从研究中面临的问题来看，暂态同步稳定性问题在未来的分析中一定会更加困难，但为了满足工程应用，需要探讨如何利用现有理论指导工程实践。并网变换器本身是一个定制系统，即所有的特性在遵守物理系统的规则下，均可以通过控制的方式定制，控制系统的参数、结构、状态均由软件实现，能够实现离线或在线调整。那么自然地，可以通过对控制器的设计和改造，能够使变换器具备一定应对暂态失稳的能力。目前主要存在 3 种稳定化设计思路：

1) 参数调整法：改变控制参数或设定值，例如修改 PI 控制参数、改变功率的参考值；

2) 状态设定法：直接设定控制器中某积分器

的历史累积值为特定值，例如故障后设定锁相环 PI 控制器的积分器的值为零。

3) 动态构造法：通过附加、改进、替换控制回路来改变控制器的结构，例如增加虚拟电阻控制回路、故障期间闭锁锁相环的 PI 控制、利用功率下垂控制替代虚拟同步控制；

参数调整法不影响变换器的动态建模，但会影响平衡点的位置、个数和稳定性，适合应对暂态期间的静态失稳和小扰动失稳；状态设定法不影响变换器的动态建模，亦不对系统中的平衡点造成任何影响，但能够改变系统状态轨迹的初始位置，使其落入希望到达的区域，能够应对一些暂态失稳的情况；动态构造法会改变变换器的动态模型，直接影响其动态特性，良好的设计能够带来稳定性的整体提升(例如文献[29]通过附加控制环节所设计的稳定控制器)，这种方法对设计者的数学和专业技巧要求较高。

这 3 种思路对于稳定化设计具有指导意义，图 12 展示了稳定化设计流程。首先，针对所需要研究的故障集，以及故障期间变换器可能采取的故障穿越措施，检验能否满足静态稳定和小扰动稳定的要求。如果不能满足，则通过参数调整法确保稳定平衡点的存在。这一步骤存在系统化的分析方法，即通过求解代数方程和线性化理论。其次，利用分析方法或数值方法估计出平衡点的吸引域，得到系统状态存在于吸引域内的条件。这样一来，假如系统发生暂态失稳，能够通过直接设定系统的状态值到吸引域的范围，实现系统的暂态失稳镇定。如果系统吸引域所满足的条件较为苛刻、或一些实际的物理状态不能够被任意改变，接下来可以重新调整参数，或利用动态构造法，通过附加、改进、替换某些控制回路，改变系统的控制结构，调

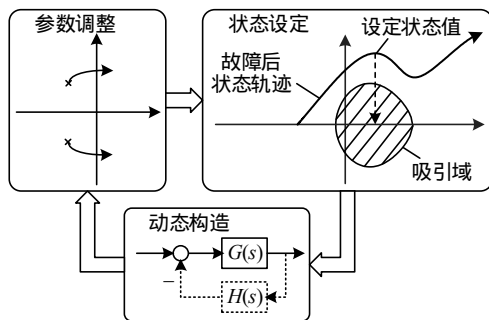


图 12 暂态同步稳定性的稳定化设计流程

Fig. 12 Work flow for the stabilization method design of transient synchronization stability

整系统的动态特性，再返回重新进行大扰动稳定性分析和稳定化设计。最后，通过这样的迭代，尝试找到应对暂态同步失稳的致稳方法。该思路能够使研究者尽量避免复杂的非线性分析，使目前尚不完善的暂态同步稳定性研究具备实用化的可能。

5.3 变换器同步稳定性问题研究展望

当前研究对暂态同步稳定性的失稳机理有了较为明确的认识，但由于变换器本质上是一个高维非线性时变系统，目前基本是将同步单元孤立出来单独分析，很难把其他因素考虑进来。换一种角度，尽管针对暂态失稳这种情况的定量分析还很难，但可以通过状态设定的方法进行稳定控制，而不必要求所估计出来的稳定域有多么准确；对于静态失稳和小扰动失稳，可以通过静态方程和线性化方法尽量避免。这样也许能够通过现有理论解决工程上可能面临的暂态同步失稳问题。尽管如此，提出更加准确的大扰动稳定性分析方法，依然具有较高的学术价值。

值得一提的是，除了当前的同步机制，变换器还可以采用其他同步方式。例如文献[55-58]提出了基于非线性振荡器的新型同步机制，这种同步方式相比于功率下垂控制具有更强的鲁棒性，在同步机制上也与现有的类型完全不同，在暂态同步稳定性方面应该也有所不同。新同步机制的构建和稳定性分析是未来很好的研究方向。

另一方面，目前针对变换器暂态同步稳定性的研究场景大多是单台变换器并网系统。文献[9]指出电力电子化电力系统暂态稳定性的研究分为 3 个层次：装置层次的电力电子化电力系统、构成全局电力系统的子系统、全局电力系统。因此，多变换器互联系统的同步稳定性问题，将会成为接下来关注的热点。与传统交流互联系统相比，多变换器互联系统还存在以下特点：

1) 变换器有电压型和功率型两种同步机制，在每种同步机制下还有几种不同的控制方式，即使采取相同的控制，也可能由于参数设计的不同而具有不同的时间尺度特性。因此，在互联系统中，同步电源具有不同的控制方式、调节时间和阻尼程度，并不像传统电源那样统一。

2) 传统的电力系统理论认为电网中的电源为同步电压源，且电网中的阻抗不随着频率的波动而改变。而电流控制型变换器对外体现为受控电流源特性，锁相环在动态过程中的瞬时频率会与交流工

频产生较大偏差^[53],且该瞬时频率的变化将会通过变换器注入的瞬时电流,反映到网络阻抗上,使网络阻抗体现出时变特性^[26],这点与传统电力系统认为的阻抗保持不变截然不同,会对分析结果造成影响。然而目前仍缺少能够分析存在同步电流源的交流系统的基础理论。

由此看来,研究多变换器互联系统的同步性及其稳定性问题将更具挑战性,其难点在于,一是如何对包含多种同步电源的系统建立适合同步稳定性分析的数学模型,二是如何对这样一套高维非线性的动力学方程进行大扰动稳定性分析。一些研究展开了前瞻性的探索。文献[59]通过潮流方程将不同性质的同步电源建立统一模型;文献[60-61]对含有下垂控制的同步电网进行了多机同步机制研究;文献[62]提出幅相动力学方法分析一次调频时间尺度以下电力电子化电力系统电压功角动态稳定问题的多尺度特征;文献[47,63]分别针对风场柔直系统、虚拟同步与同步机并网系统进行了暂态同步稳定性分析。尽管这些分析还比较初步,但也许能够为未来研究提供参考。

6 结论

并网变换器的暂态同步稳定性问题是当前研究的热点问题,也是未来双高系统亟需应对的关键问题。本文通过文献综述,就该问题得出以下主要结论:

1) 理解变换器的同步机制是理解和研究该问题的关键。目前的变换器存在电压型和功率型两种同步机制,这两种同步机制与同步机的同步机制存在内在的相似性,从控制的角度能够将三者统一,这是传统功角稳定性分析方法能够用于研究变换器暂态同步稳定性的重要依据。

2) 变换器发生暂态同步失稳包括 3 种类型,即静态失稳、小扰动失稳、暂态失稳,分别对应失去工作点、工作点小扰动不稳定、扰动后的系统不在工作点的吸引域范围内 3 种情况。

3) 目前的方法对于研究静态失稳、小扰动失稳的分析是足够的,但对于暂态失稳的定量分析尚不充分,尤其是传统等面积法、能量函数法在应用于锁相环的暂态稳定性研究时,存在难以处理的不定阻尼项;通过构造方法得到李雅普诺夫函数研究暂态同步稳定性依然很有价值。

4) 当前的研究基本对变换器做了大量简化,

基本只关注了同步单元的暂态稳定性,但考虑其他动态环节将为更深入的研究带来巨大挑战;如果转变思路探讨致稳方法,能够将现有研究成果尽快用于指导工程设计中。

5) 除了研究单台变换器的暂态稳定性问题,未来的研究还应该关注变换器的新型同步机制、多变换器互联系统的同步稳定性问题,更深入地探讨电力电子化电力系统的“同步”问题。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Research Institute National Development And Reform Commission. China 2050 high Renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. Beijing: Energy Research Institute National Development And Reform Commission, 2015(in Chinese).
- [2] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 1-9.
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 1-9(in Chinese).
- [3] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042(in Chinese).
- [4] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066(in Chinese).
- [5] 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.
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(in Chinese).
- [6] AMIN M, MOLINAS M. Small-signal stability assessment of power electronics based power systems: a discussion of impedance-and eigenvalue-based methods

- [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5014-5030.
- [7] 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[J]. Proceedings of the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary: IEEE, 2009: 1-8.
- [8] 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.
- [9] 朱蜀, 刘开培, 秦亮, 等. 电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3948-3962.
- ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3948-3962(in Chinese).
- [10] HUANG Meng, PENG Yu, TSE C K, et al. Bifurcation and large-signal stability analysis of three-phase voltage source converter under grid voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8868-8879.
- [11] YANG Ziqian, MA Rui, CHENG Shijie, 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.
- [12] 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.
- [13] JIANG Jianbo, LIU Fei, PAN Shangzhi, et al. A conservatism-free large signal stability analysis method for DC microgrid based on mixed potential theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 11342-11351.
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 韩刚, 张琛, 蔡旭. 电网短路故障引发的全功率风电机组频率失稳机理与控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2167-2175.
- HAN Gang, ZHANG Chen, CAI Xu. Mechanism of frequency instability of full-scale wind turbines caused by grid short circuit fault and its control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2167-2175(in Chinese).
- [16] 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, 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2954555.
- [17] HE Xiuqiang, GENG Hua, LI Ruiqi, 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.
- [18] HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Current limiting leads to virtual power angle synchronous instability of droop-controlled converters[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [19] XIN Huanhai, HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, et al. Synchronous instability mechanism of P-f droop-controlled voltage source converter caused by current saturation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5206-5207.
- [20] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, LIU Xuan, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [21] 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.
- [22] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 3-9.
- XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9(in Chinese).
- [23] 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(in Chinese).
- [24] HU Qi, HU Jiabing, YUAN Hao, et al. Synchronizing stability of DFIG-based wind turbines attached to weak AC grid[C]//Proceedings of the 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou: IEEE, 2014.
- [25] 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.
- [26] DONG DONG, WEN Bo, 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.
- [27] DONG DONG, LI Jin, BOROYEVICH D, et al. Frequency behavior and its stability of grid-interface converter in distributed generation systems[C]// Proceedings of the 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Orlando: IEEE, 2012: 1887-1893.
- [28] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6473-6482.
- [29] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [30] ZHAO Jiantao, HUANG Meng, ZHA Xiaoming. 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] ZHAO Jiantao, HUANG Meng, YAN Han, 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.
- [32] HU Jiabing, HU Qi, WANG Bo, et al. Small signal instability of PLL-synchronized type-4 wind turbines connected to high-impedance AC grid during LVRT[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1676-1687.
- [33] 胡祺, 付立军, 马凡, 等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 98-108.
HU Qi, FU Lijun, Ma Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 98-108(in Chinese).
- [34] 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.
- [35] ZHANG Chen, CAI Xu, 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.
- [36] MA ShaoKang, GENG Hua, LIU Lu, 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.
- [37] 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.
- [38] HADJIDEMETRIOU L, KYRIAKIDES E, BLAABJERG F. An adaptive tuning mechanism for phase-locked loop algorithms for faster time performance of interconnected renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1792-1804.
- [39] WU Heng, WANG Xiongfei. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 24(4): 3573-3589.
- [40] ZHANG Chen, MOLINAS M, CAI Xu, et al. Understanding the nonlinear behavior and frequency stability of a grid-synchronized VSC under grid voltage dips[J]. arXiv preprint arXiv: 1806.11529, 2018.
- [41] CHEN Junru, LIU Muyang, O'DONNELL T, et al. Impact of current transients on the synchronization stability assessment of grid-feeding converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4131-4134.
- [42] ZHANG Chen, MOLINAS M, LI Zheng, 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: 1-12.
- [43] 史蒂芬 H 斯托加茨. 非线性动力学与混沌[M]. 孙梅, 汪小帆, 译. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
STROGATZ S H. Nonlinear dynamics and chaos[M]. SUN Mei, WANG Xiaofan, Trans. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017(in Chinese).
- [44] WU Heng, WANG Xiongfei. Transient stability impact of the phase-locked loop on grid-connected voltage source converters[C]// Proceedings of the 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata-ECCE Asia). Niigata: IEEE, 2018: 2673-2680.
- [45] MOON Y H, CHOI B K, ROH T H. Estimating the domain of attraction for power systems via a group of damping-reflected energy functions[J]. Automatica, 2000, 36(3): 419-425.
- [46] LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Lyapunov-based large signal stability assessment for VSG controlled inverter-interfaced distributed generators[J]. Energies, 2018, 11(9): 2273-2281.
- [47] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8):

- 8751-8765 .
- [48] TAUL M G , WANG Xiongfei , 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 .
- [49] HE Xiuqiang , GENG Hua , MA Shaokang . Transient stability analysis of grid-tied converters considering PLL's nonlinearity[J] . CPSS Transactions on Power Electronics and Applications , 2019 , 4(1) : 40-49 .
- [50] SUUL J A , D'ARCO S , RODRÍGUEZ P , et al . Impedance-compensated grid synchronisation for extending the stability range of weak grids with voltage source converters[J] . IET Generation, Transmission & Distribution , 2016 , 10(6) : 1315-1326 .
- [51] LENTIJO K , OPILA D F . Minimizing inverter self-synchronization due to reactive power injection on weak grids[C]//Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition . Montreal : ECCE , 2015 : 1136-1142 .
- [52] HAMED H A , ABDOU A F , BAYOUMI E H E , et al . A fast recovery technique for grid-connected converters after short dips using a hybrid structure PLL[J] . IEEE Transactions on Industrial Electronics , 2018 , 65(4) : 3056-3068 .
- [53] GHARTEMANI M K , KHAJEHODDIN S A , JAIN P K , et al . Problems of startup and phase jumps in PLL systems[J] . IEEE Transactions on Power Electronics , 2012 , 27(4) : 1830-1838 .
- [54] ASHABANI S M , MOHAMED Y A R I . A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2012 , 3(3) : 1291-1301 .
- [55] COLOMBINO M , GROß D , BROUILLON J S , et al . Global phase and magnitude synchronization of coupled oscillators with application to the control of grid-forming power inverters[J] . IEEE Transactions on Automatic Control , 2019 , 64(11) : 4496-4511 .
- [56] SINHA M , DÖRFLER F , JOHNSON B B , et al . Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of van der pol oscillators[J] . IEEE Transactions on Control of Network Systems , 2017 , 4(2) : 347-358 .
- [57] JOHNSON B B , DHOPLE S V , HAMADEH A O , et al . Synchronization of nonlinear oscillators in an LTI electrical power network[J] . IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers , 2014 , 61(3) : 834-844 .
- [58] JOHNSON B B , DHOPLE S V , CALE J L , et al . Oscillator-based inverter control for islanded three-phase microgrids[J] . IEEE Journal of Photovoltaics , 2014 , 4(1) : 387-395 .
- [59] SCHIFFER J , ZONETTI D , ORTEGA R , et al . A survey on modeling of microgrids : from fundamental physics to phasors and voltage sources[J] . Automatica , 2016 , 74 : 135-150 .
- [60] SCHIFFER J , EFIMOV D , ORTEGA R . Global synchronization analysis of droop-controlled microgrids : a multivariable cell structure approach[J] . Automatica , 2019 , 109 : 108550 .
- [61] SIMPSON-PORCO J W , DÖRFLER F , BULLO F . Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids[J] . Automatica , 2013 , 49(9) : 2603-2611 .
- [62] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154 .
YUAN Xiaoming , CHENG Shijie , HU Jiabing . Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J] . Proceedings of the CSEE , 2016 , 36(19) : 5145-5154(in Chinese) .
- [63] LI Yingbiao , WANG Xiongfei , JIANBO Guo , et al . PLL synchronization stability analysis of mmc-connected wind farms under high-impedance AC faults[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2020 , DOI : 10.1109/TPWRS.2020.3025917 .



张宇

在线出版日期：2021-01-13。

收稿日期：2020-09-04。

作者简介：

张宇(1996),男,博士研究生,研究方向为新能源柔直并网系统的暂态稳定性, zhangyu666@sjtu.edu.cn ;

*通信作者：蔡旭(1964),男,教授,博士生导师,研究方向为可再生能源功率变换与并网技术、大功率电力电子与电力系统控制；

张琛(1989),男,工学博士,研究方向为新能源发电系统时/频域动态建模及稳定性分析；

吕敬(1985),男,工学博士,助理教授,研究方向为新能源柔直并网稳定性分析与控制；

李岩(1973),男,工学博士,南方电网高级技术专家,主要从事高压、特高压、柔性直流输电领域的控制保护研发、系统集成设计和系统调试工作。

(责任编辑 李泽荣)

Transient Synchronization Stability Analysis of Voltage Source Converters: A Review

ZHANG Yu¹, CAI Xu^{1*}, ZHANG Chen¹, LYU Jing¹, LI Yan²

(1. Shanghai Jiao Tong University, 2. China Southern Power Grid)

KEY WORDS: voltage source converter (VSC); large disturbance; transient stability; synchronization stability; synchronization mechanism; phase-locked loop; loss of synchronization

With the increase of the penetration of renewable energy, the influence of grid-connected converters on the dynamic and stability of the power grid is becoming severe, such as low inertia and wide-band oscillation. This paper discusses the problem of transient synchronization stability (TSS), which is closely related to the nonlinear dynamics of the synchronization unit of the converters.

Firstly, the instability phenomenon is simulated through a grid-side converter of a full-capacity wind turbine, as is shown in Fig. 1. The voltage drops at $t = 1$ s and restores to its normal value after 140 ms. It is shown that the instability of the VSC is caused by the LOS of

PLL, which has been found and studied by many previous works. Therefore, this paper reviews the instability mechanism, analysis method and stabilization control regarding the TSS issue.

Secondly, the intrinsic similarity of the synchronization mechanism among VSCs with the state-of-art controlling methods and synchronous generators (SG) is found, which lay the foundation for understanding the GSS of the VSC by introducing the same classification system of the rotor angle stability. The cause of instability is classified into three categories: static instability, small-disturbance instability and transient instability, which are corresponding to lack of synchronous torque, lack of damping torque and laying out of region of attraction, respectively. Each instability mechanism is explained by reviewing the present articles.

Next, analysis methods are summarized. The static and small-disturbance instability can be analyzed well by the traditional linear methods, whereas the transient instability cannot be quantitatively analyzed by classic EAC method. So far, there isn't an appropriate method for this kind of instability, but it is still worth studying due to highly academic value. The stabilization methods are also summarized.

Finally, the challenge of TSS studying is discussed, the generally application-oriented stabilization method is proposed, and further synchronization issue for future research is prospected, which, hopefully, might give inspiration to researchers to continuously study this issue. The general method of TSS are concluded in this paper, which provides reference to future exploration.

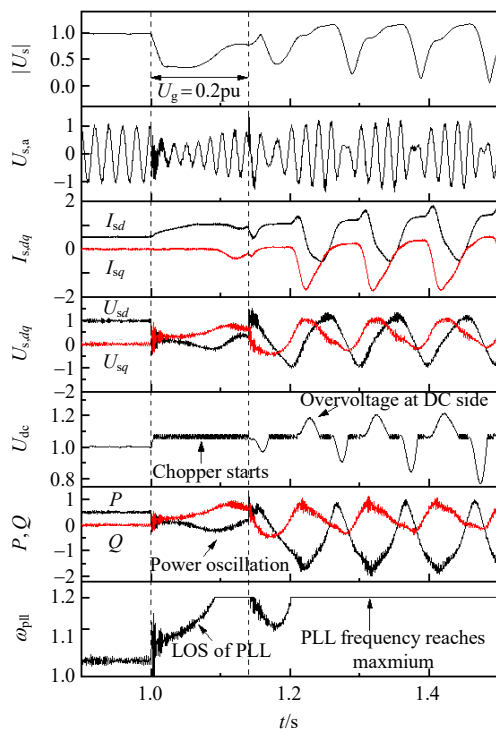


Fig. 1 Loss of synchronization of the grid-side converter of a wind turbine