



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404501

引用格式:邢超,陈乐柯,朱林,等.考虑外环控制的跟网型电压源变流器暂态同步稳定机理分析[J].科学技术与工程,2025,25(12):5013-5022.

Xing Chao, Chen Leke, Zhu Lin, et al. Analysis of transient synchronous stability mechanism of grid-following voltage source converter considering outer loop control[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 5013-5022.

电工技术

考虑外环控制的跟网型电压源变流器 暂态同步稳定机理分析

邢超¹, 陈乐柯², 朱林^{2*}, 刘阳², 李东瑞², 马遵¹

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要 面向新型电力系统转型下,跟网型变流器的并网应用日益增多,受扰后变流器暂态同步稳定问题突出。以往对其暂态同步稳定研究仅聚焦锁相环动态,较少考虑外环控制的影响,存在暂态同步机理方面的认知瓶颈。针对上述问题,对跟网型电压源变流器并网系统进行建模,详细考虑了变流器控制策略、限幅环节;然后,分析不同电压跌落对平衡点稳定区域的影响,探讨外环控制 PI(proportional integral)、限幅环节对暂态同步的作用,系统地揭示了外环控制对变流器暂态同步稳定的影响机理;最后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证所提理论的有效性。

关键词 暂态同步稳定;跟网型变流器;锁相环;外环控制;限幅环节

中图分类号 TM712; **文献标志码** A

Analysis of Transient Synchronous Stability Mechanism of Grid-following Voltage Source Converter Considering Outer Loop Control

XING Chao¹, CHEN Le-ke², ZHU Lin^{2*}, LIU Yang², LI Dong-rui², MA Zun¹

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

[Abstract] With the transformation of the modern power system, the application of grid-connected inverters is increasing, and the transient synchronization stability of inverters after disturbance is becoming prominent. Previous research on transient synchronization stability mainly focuses on the dynamic of the phase-locked loop, with less consideration of the impact of outer loop control, resulting in a cognitive bottleneck in understanding transient synchronization mechanism. To address these issues, the grid-following voltage source inverter system was modelled, taking into account the inverter control strategy and limiting elements in detail. Subsequently, the impact of different voltage drops on the stability region of the equilibrium point was analyzed, and the effects of outer loop control proportional integral (PI) and limiting elements on transient synchronization were discussed. The influence mechanism of outer loop control on the transient synchronization stability of inverters was revealed systematically. Finally, the effectiveness of the proposed theory was verified in PSCAD/EMTDC.

[Keywords] transient synchronous stability; grid-following converter; phase-locked loop; outer loop control; limiter

为响应国家“双碳目标”及推动新型电力系统建设,大量新能源通过电压源型变流器(voltage-source converter, VSC)并网运行,变流器控制将会逐步主导系统特性^[1]。传统的 VSC 多采取跟网型控制,依赖锁相环(phase lock loop, PLL)实现与电网

同步^[2]。一旦无法实现同步,将会对系统带来冲击,引发振荡脱网,严重影响系统的安全稳定运行,如 2020 年美国加利福尼亚州 1 000 MW 新能源场站因受扰后换流器同步失稳而导致电厂发生并网中断^[3]。

收稿日期:2024-06-17; 修订日期:2025-02-12

基金项目:国家自然科学基金(52077080);云南电网有限责任公司科技项目(056200KK52222094)

第一作者:邢超(1986—),男,汉族,河南周口人,硕士,高级工程师。研究方向:直流输电及电力电子技术。E-mail:xingchao_yn@163.com。

*通信作者:朱林(1979—),男,汉族,广西柳州人,博士,副教授。研究方向:电力系统稳定与控制、直流输电技术及新能源并网。E-mail:zhul@scut.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

针对跟网型变流器的暂态同步问题,中外均紧密围绕 PLL 相关的同步机制展开研究,在分析模型、稳定机理、影响因素认知等方面取得了一定成果^[4-17]。在分析模型方面,通常会仅保留核心环节,忽略换流器不同控制环节、换流器-电网之间可能的交互影响^[6-7],建立简化的同步模型。上述工作聚焦于跟网型换流器分析模型的建立与简化,为变流器同步稳定性机理研究提供了模型基础。

在机理认识方面,中外研究均借鉴同步发电机的暂态同步稳定分析思路,依托李雅普诺夫方法^[8-10]、等面积定则^[11-14]或相平面分析法^[15-17]等方法来揭示失稳机理。文献[8-10]构建了李雅普诺夫函数进行变流器暂态同步稳定域的计算,但计算结果较为保守。文献[11]针对基于锁相环的逆变器并网系统,提出了一种基于阻尼项缩放和线性逼近的改进等面积法则,有效提高了暂态稳定域的估计精度。文献[13]基于等面积准则,分别分析了序列控制开关动作、检测延迟以及正负序列 PLL 控制之间的相互作用对 VSC 系统瞬态同步稳定性的影响。文献[12, 14]采用等面积法分析了多变流器并联系统的暂态同步稳定性。文献[15-17]利用相轨迹分析了不同低通滤波环节截止频率的锁相环在各种相角突变下的锁相性能,揭示了低通滤波环节的不同带宽、控制时延、二阶方程阻尼比对锁相环同步稳定性的影响机理。以上研究对 PLL 的同步机理作了深入剖析,为后续提高变流器同步稳定性工作提供了理论基础。

在影响因素认知方面,中外研究聚焦于考察电网条件、PLL 结构及参数对暂态同步特性的影响,从而制定相应的提升措施^[18-21]。文献[18]考虑了低穿条件下 PLL 参数及电网强度对变流器暂态同步稳定性的影响。文献[19]考虑到电网故障导致同步失稳、PLL 频率振荡导致限幅的情况,建立包含 PLL 频率限幅的系统暂态模型,探讨锁相环控制参数对同步稳定性的影响。文献[20]提出了一种针对 PLL 的前馈补偿方法,从而提升整个系统同步稳定水平。文献[21]通过分析 PLL 初始角速度变化对暂态同步稳定性的影响规律,提出在高通滤波器中引入反馈环节,从而增强系统阻尼。

以上研究探讨了并网条件和 PLL 参数对变流器暂态同步的影响,然而,随着变流器间、器网间相互作用的研究进展,研究人员也逐步认识到仅考虑 PLL 而忽略双闭环控制环节动态的低阶模型通常会损失动态特性细节,难以充分挖掘复杂多变场景下的变流器的同步机制,不能充分辨认各类影响因素

的作用途径^[22]。

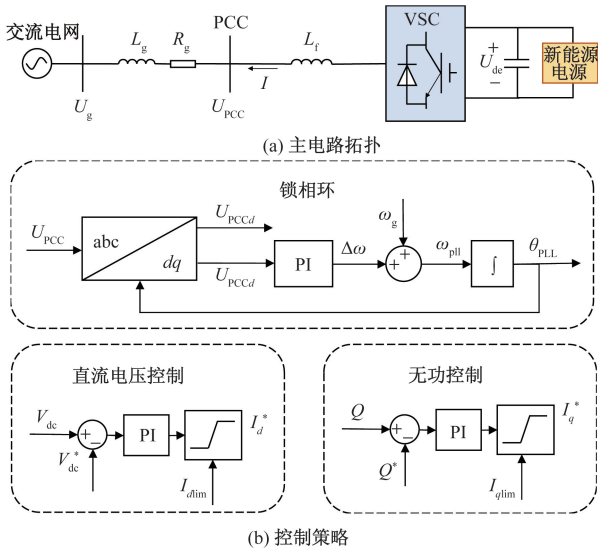
从跟网型变流器的双闭环控制结构及其工作特点上看,外环动态响应速度与 PLL 速度相近,内环的动态响应速度则远快于 PLL 和外环。基于多时间尺度分离解耦理论,在变流器暂态同步稳定分析中,可以忽略快动态的内环,同时保留外环及 PLL 将更为合理。司文佳等^[23]探讨了考虑直流电压外环控制下跟网型变流器的暂态同步稳定性机理,发现在浅度故障下增大直流电压控制的比例系数或减小直流电压控制的积分系数来增大等效阻尼的增量认识,但缺乏全面梳理不同故障程度、不同控制方式对暂态同步稳定性的影响。

为了避免因控制信号超调引发控制风险,在变流器控制中会设置限幅环节。当前限幅策略一般以严苛条件下的安全性为整定依据,并未考虑限幅环节对变流器暂态同步稳定性的影响。在正常运行工况下,此类非线性环节一般不会触发,但在受扰后的暂态过程中可能会频繁触发,甚至引起控制策略的切换,这将带来外环控制影响暂态同步的新作用途径。因此,将限幅环节纳入对跟网型变流器暂态同步稳定性的建模与机理分析中。

基于上述分析,建立考虑 PLL 和外环控制的电压源变流器并网系统模型,全面分析考虑不同程度电网电压跌落下变流器暂态同步的变化情况,提出考虑 PLL 与外环控制共同作用下的变流器暂态同步稳定机理,揭示稳态平衡点变化、外环控制的输出参考电流对于变流器暂态同步机制的影响途径。最后在 PSCAD/EMTDC 环境下验证上述机理认识。深入理解电压源变流器在电网电压跌落时的暂态同步行为及其控制机制,为提升电网稳定性和变流器性能提供理论依据。

1 VSC 暂态同步稳定建模

图 1 所示的 VSC 并网系统中, U_g 为系统电压; U_{PCC} 为并网点 (point of common coupling, PCC) 电压幅值, V_{DC} 为变流器直流侧电压; I 、 Q 分别为变流器注入电网的电流和无功; L_f 为滤波电感; R_g 和 L_g 分别为等效线路电阻、电感; 等效线路电抗 $X_g = \omega L_g$, 其中 ω 为电网工频的角频率, 中国工频为 50 Hz; 等效线路阻抗 $Z_g = R_g + jX_g$ 。变流器采用定直流电压和定无功功率的外环控制策略, 并考虑 PLL 及限幅环节。根据文献[18], 电流内环响应速度远快于外环, 可忽略电流内环的快动态, 且有 $I_d \approx I_d^*$ 和 $I_q \approx I_q^*$, 其中, I_d 、 I_q 分别为电流 I 在变流器控制平面坐标系 (dq 旋转坐标系) d 轴、 q 轴分量; I_d^* 、 I_q^* 分别



U_{PCCd} 、 U_{PCCq} 分别为 U_{PCC} 的 d 轴分量、 q 轴分量； θ_{PLL} 为 PLL 相角； $\Delta\omega$ 为锁相环中间变量； I_{dlim} 和 I_{qlim} 分别为 I_d^* 和 I_q^* 限值； Q^* 为无功功率参考值； V_{dc}^* 为直流电压参考值； ω_g 为电网角频率； ω_{pll} 为 PLL 角频率

图1 变流器主电路拓扑和控制系统

Fig. 1 Main circuit topology and control system of VSC

为 I_d 、 I_q 的参考值。

锁相环是变流器中实现同步的重要单元,可由 PCC 电压的 q 轴分量驱动并实现对电网电压幅值、相角、频率进行跟踪,如图 1(b) 所示。

PLL 动态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{PLL}}{dt} = k_{ppll} U_{PCCq} + x_{int} + \omega_g \\ \frac{dx_{int}}{dt} = k_{ipll} U_{PCCq} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: x_{int} 为锁相环状态量; k_{ppll} 、 k_{ipll} 分别为锁相环比例、积分控制系数。

假设正常运行状态下,经过 PLL 锁相后, PCC 电压矢量 $\dot{U}_{PCC} = U_{PCC} \angle \delta$ 的方向与 d 轴正方向重合,可表示为

$$\delta = \theta_{PLL} - \theta_g \quad (2)$$

式(2)中: δ 为 PCC 电压与电网电压的相角差; θ_g 为电网电压矢量相位。

在静止坐标系下, $U_{PCC} = R_g I + jX_g I + U_g \approx R_g I^* + jX_g I^* + U_g$ 。

在 dq 坐标系下, U_{PCC} 与 U_g 的关系可表示为

$$\begin{cases} U_{PCCd} = R_g I_d^* - X_g I_q^* + U_g \cos\delta \\ U_{PCCq} = R_g I_q^* + X_g I_d^* - U_g \sin\delta \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: U_{PCCd} 为 U_{PCC} 的 d 轴分量; X_g 为电感 L_g 在电网频率下电抗。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = k_{ppll} (U_0 - U_g \sin\delta) + x_{int} \\ \frac{dx_{int}}{dt} = k_{ipll} (U_0 - U_g \sin\delta) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: U_0 为输电线路电压降的 q 轴分量,且 $U_0 = R_g I_q^* + X_g I_d^*$ 。

直流电容可以通过充放电功能来维持变流器输入功率和输出功率的平衡,在忽略线路与变流器损耗的条件下,根据能量守恒原理可有

$$C V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{dc}^* - P_{dc} \quad (5)$$

$$P_{dc} = P = I_d V_{PCCd} + I_q V_{PCCq} \quad (6)$$

式中: P_{dc}^* 、 P_{dc} 和 P 分别为直流侧的输入有功功率、直流侧的输出有功功率、交流侧的输出有功功率,正常运行时, $P = P_{dc}^*$; V_{dc} 为变流器直流电容 C 的电压。

变流器外环采用典型的定直流电压和定无功控制,如图 1(b) 所示,可有

$$\begin{cases} \frac{dI_d^*}{dt} = K_{pd} \frac{d(V_{dc} - V_{dc}^*)}{dt} + K_{id} (V_{dc} - V_{dc}^*) \\ \frac{dI_q^*}{dt} = K_{pq} \frac{d(Q - Q^*)}{dt} + K_{iq} (Q - Q^*) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: K_{pd} 、 K_{id} 、 K_{pq} 、 K_{iq} 为外环比例积分控制系数。

相较于以往的工作^[7],考虑到变流器作为电力电子设备不能承受较大过电流^[24],在外环控制建模中考虑了电流限幅环节。常见的限幅策略有 d 轴优先限幅策略、 q 轴优先限幅策略,如图 2 所示。当采用 q 轴优先限幅策略时,即在变流器电流限幅值 I_{lim} 恒定的情况下,优先为电网提供无功功率,使 q 轴电流参考值 I_q^* 满足控制目标,此时 d 轴电流参考值 I_d^* 则由电流限值计算获得;当采用 d 轴优先限幅策略时,则将优先满足 d 轴电流参考值。采用 q 轴优先限幅策略,即

$$\begin{cases} |I_q^*| \leq I_{qlim} \\ |I_d^*| \leq I_{dlim} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $\begin{cases} I_{qlim} = I_{lim} \\ I_{dlim} = \sqrt{I_{lim}^2 - I_q^{*2}} \end{cases}$, 其中 I_{qlim} 和 I_{dlim} 分别为 I_q^* 、 I_d^* 限幅值, I_{lim} 取 1.2 pu。

2 考虑外环控制的 VSC 同步稳定机理

VSC 通过 PLL 在 dq 旋转坐标系上实施控制。由图 1(b) 可知, VSC 外环的控制量与相应参考值生成偏差量,依次进入 PI 控制、限幅环节,生成所需要的 d 轴、 q 轴参考电流。在暂态过程中,无论是外界工况变化,还是控制策略的改变,包括控制策略切

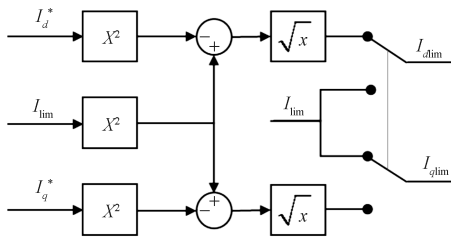


图2 外环控制限幅控制图

Fig. 2 Outer loop control limiting control diagram

换、限幅环节等,均会以外环为载体,影响输出的参考电流,从而使变流器呈现出差异化的暂态特性。将结合1节所建立模型,首先探讨考虑电网电压跌落时PLL同步方程,分析在不同程度电网电压跌落条件下平衡点的变化,然后系统化梳理在受扰后外环控制对VSC的暂态同步的影响作用,定性分析不同阶段中控制引起电气量调节变化。

2.1 PLL同步方程

VSC采用电压定向,即PCC处电压矢量与d轴方向重合,使得 $U_{PCCq} = 0$ 。

VSC向电网输送的无功功率Q可表示为

$$Q = -I_q^* U_{PCCd} + I_d^* U_{PCCq} = -I_q^* U_{PCCd} \quad (9)$$

在正常运行工况,经过PLL锁相后,PCC电压矢量 $\dot{U}_{PCC} = U_{PCC} \angle \delta$ 的方向与d轴正方向重合,此时PLL同步方程为式(4)。

VSC采用定无功控制,正常运行时会要求 $Q > 0$,即VSC向电网输送感性无功功率。 $U_{PCCd} > 0$ 时必然要求 $I_q^* < 0$ 。按照并网运行规范,在系统受严重扰动引起电压快速跌落时会要求变流器输出Q增大,VSC的q轴外环采用定无功控制会使 I_q^* 增大甚至反向,即由负值变化为正值。若受扰后VSC依然能与电网保持同步,则为了保持一定的无功输出,由 I_q^* 的变化特点,结合式(9)可知, U_{PCCd} 会对应由正变负,表明PCC电压将位于d轴负半轴。在电网电压坐标系(XY坐标系,以角频率 ω_g 旋转)和VSC的控制平面坐标系(dq坐标系,以PLL频率 ω_{pll} 旋转)中描述上述过程中的相位变化,如图3所示。

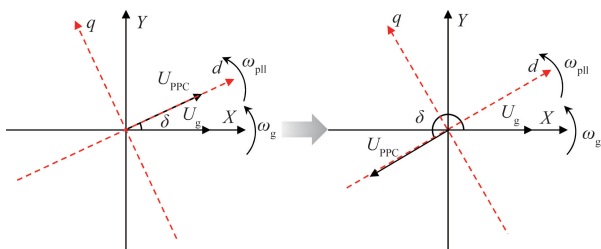


图3 相位变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of phase change

$\delta = \pi + \theta_{PLL} - \theta_g$ 。相应地,式(4)变化为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = k_{pll}(U_0 + U_g \sin\delta) + x_{int} \\ \frac{dx_{int}}{dt} = k_{ipl}(U_0 + U_g \sin\delta) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 平衡点变化分析

VSC通过PLL与电网实现锁相,在平衡点对于状态量有 $\frac{d\delta}{dt} = 0, \frac{dx_{int}}{dt} = 0$ 。在正常运行状态下或

当电网电压出现轻微、中等跌落时,式(4)所示PLL方程与同步发电机的运动方程的数学描述类似,可以将其中的 U_0 和 $U_g \sin\delta$ 类比为同步机转子运动方程中的原动机转矩分量和电磁转矩分量,视为VSC同步方程中的变流器控制分量与电网电气分量。当满足平衡条件时, $U_0 = U_g \sin\delta, x_{int} = 0$ 。不失一般性,假设 δ 的运行范围为 $[-\pi, \pi]$,则VSC存在同步平衡点的判据为

$$-U_g \leq U_0 \leq U_g, \delta \in [-\pi, \pi] \quad (11)$$

与同步发电机的暂态同步分析类似,当式(11)被满足时,VSC也会存在两个平衡点。可采用等效整步转矩系数 S_{Eq} 对平衡点的稳定性情况进一步判别,即

$$S_{Eq} = \frac{d(U_g \sin\delta)}{d\delta} = U_g \cos\delta \quad (12)$$

根据文献[25],平衡点的稳定判据为

$$S_{Eq} > 0 \quad (13)$$

当运行点满足 $\delta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 时,式(13)才成立,处于该区域内的平衡点为稳定平衡点,且 S_{Eq} 越大则维持稳定的能力越强。

当电网电压出现严重跌落时,PLL方程可见于式(10)。此时,可有

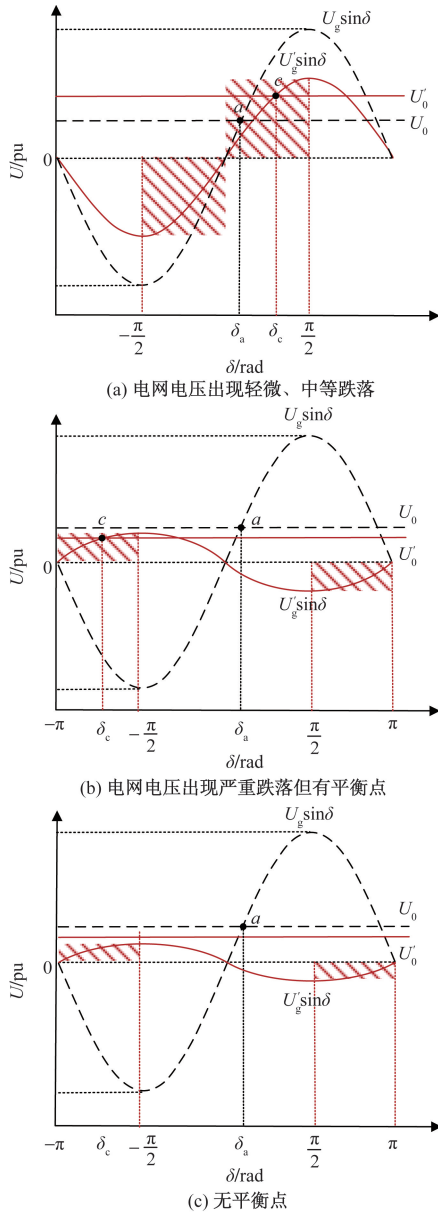
$$S_{Eq} = \frac{d(-U_g \sin\delta)}{d\delta} = -U_g \cos\delta \quad (14)$$

则当运行点满足 $\delta \in [-\pi, -\frac{\pi}{2}] \cup [\frac{\pi}{2}, \pi]$,式(10)才成立,处于该区域内的平衡点才是稳定平衡点。

VSC受扰后,根据电压跌落情况,稳定平衡点的变化如图4所示。假设VSC受扰后, U_g 跌落为 U'_g, U_0 变化为 U'_0 。

2.3 暂态同步稳定机理

由于 $U_0 = R_g I_q^* + X_g I_d^*$ 且变流器外环控制的输出为 I_d^* 和 I_q^* ,这表明 U_0 与变流器控制密切相关,受外环控制中的各控制环节及对应参数的影响大。不同工况下变流器外环控制的动作响应存在差异性,既有通过PI环节改变参考电流来影响 U_0 ,也可



a 点、c 点分别为受扰前、受扰后的稳定平衡点; δ_a 、 δ_c 分别为 VSC 稳定在 a 点、c 点这两种情况下 PCC 电压与电网电压的相角差

图 4 VSC 受扰前后稳定平衡点的变化情况

Fig. 4 Changes of VSC stability equilibrium point before and after disturbance

能受限于限幅环节,从而使变流器呈现出复杂的暂态同步过程。将结合等效电路相量图,进一步说明考虑外环控制的 PI 环节或限幅环节后,VSC 的暂态同步机理。

设在 XY 坐标系中,点 A 为 PCC 电压矢量 \dot{U}_{PCC} 与电网电压矢量 \dot{U}_g 的始端点,点 B、点 C 分别为 \dot{U}_g 、 \dot{U}_{PCC} 的末端点。PCC 电压矢量 \dot{U}_{PCC} 末端 C 点坐标为 (x_U, y_U) , 则 PCC 电压幅值 U_{PCC} 表达式为 $U_{PCC} = \sqrt{x_U^2 + y_U^2}$, 其等值线为以 A 为圆心,以 U_{PCC} 为半径的圆。

2.3.1 电网电压轻微跌落

当电网电压出现轻微跌落时,VSC 的外环控制一般不会触发电流限幅,d 轴外环采用定直流电压控制,q 轴外环采用定无功功率控制,则有

$$U_0 = X_g I_d^* + R_g I_q^* = X_g [K_{pd}(V_{dc} - V_{dc}^*) + K_{id} \int (V_{dc} - V_{dc}^*) dt] + R_g [K_{pq}(Q - Q^*) + K_{iq} \int (Q - Q^*) dt] \quad (15)$$

可见, U_0 随着 V_{dc} 和 Q 的变化而变化,而 V_{dc} 又受到 P 的影响,故需要进一步对有功和无功特性展开分析。

VSC 的输出有功功率可表示为

$$P = \frac{U_{PCC}}{X_g} U_g \sin \delta = \frac{U_g}{X_g} y_U \quad (16)$$

当 d 轴外环控制使得 V_{dc} 恒定时, $P = P_{dc}^*$, 对式(16)进一步化简为

$$y_U = \frac{P_{dc}^* X_g}{U_g} \quad (17)$$

可见,当 VSC 的 d 轴外环采用定直流电压控制且 U_g 和 X_g 一定时, C 点的纵坐标恒定。

同理,VSC 输出无功功率可表示为

$$Q = \frac{U_{PCC}^2}{X_g} - \frac{U_{PCC} U_g \cos \delta}{X_g} = \frac{x_U^2 + y_U^2}{X_g} - \frac{U_g x_U}{X_g} \quad (18)$$

进一步化简为

$$\left(x_U - \frac{U_g}{2}\right)^2 + y_U^2 = X_g Q + \frac{U_g^2}{4} \quad (19)$$

可见,当 VSC 的 q 轴外环采用定无功控制且 U_g 和 X_g 一定时,无功的等值线 $Q-U$ 曲线是以

$\left(\frac{U_g}{2}, 0\right)$ 为圆心,以 $\sqrt{X_g Q + \frac{U_g^2}{4}}$ 为半径的圆,如图 5 所示。

经历扰动后,VSC 会不断调整 δ 的大小,使 C 点最终稳定在 $Q-U$ 曲线与水平线 $y = \frac{P_{dc}^* X_g}{U_g}$ 的交点。

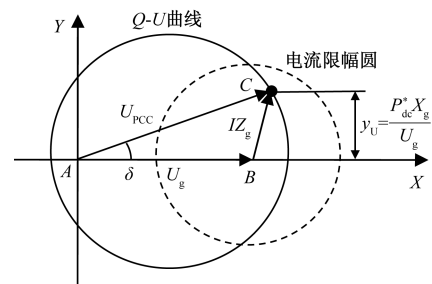


图 5 电网电压轻微跌落时 VSC 的相量图
Fig. 5 Phasor diagram of VSC when the grid voltage drops slightly

2.3.2 电网电压中等跌落

当电网电压出现中等跌落时,由于采用 q 轴电流优先的限幅策略,VSC 的 d 轴外环控制一般会达到电流限幅,VSC 的 q 轴外环保持定无功控制。若电网电压跌落的情况相对较浅,则 VSC 的外环很有可能最后会恢复为 PI 控制,这种情况与上述电网电压轻微跌落情况的 VSC 暂态同步稳定特性一致。在电网电压跌落的情况相对较深时,VSC 的 d 轴外环控制会保持电流限幅控制,此时可有

$$\begin{aligned} U_0 &= X_g I_d^* + R_g I_q^* \\ &= X_g \sqrt{I_{\text{lim}}^2 - [K_{pq}(Q - Q^*) + K_{iq} \int (Q - Q^*) dt]^2} + \\ &\quad R_g [K_{pq}(Q - Q^*) + K_{iq} \int (Q - Q^*) dt] \end{aligned} \quad (20)$$

可见 U_0 会随着 Q 的变化而变化。同时,电流限幅环节动作也会改变 VSC 的同步特性。当电流限幅环节动作时, C 点会保持在以点 B 为圆心,以 $|Z_g| I_{\text{lim}}$ 为半径的电流限幅圆上。由于 d 轴外环为电流限幅控制,将会由直流电容所并联的卸荷电路辅助实现有功功率的平衡, C 点不受有功功率约束。如图 6 所示,经历扰动后,VSC 会不断调整 δ 的大小,使 C 点最终稳定在 Q - U 曲线与电流限幅圆的交点。

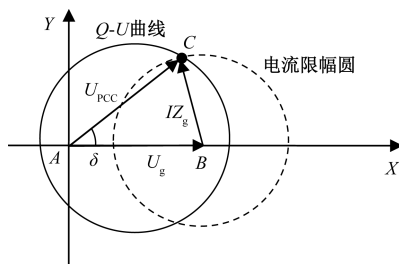


图 6 电网电压中等跌落时 VSC 的相量图

Fig. 6 Phasor diagram of VSC with medium voltage drop

2.3.3 电网电压严重跌落

当电网电压出现严重跌落时,VSC 的 d 轴外环控制和 q 轴外环控制均采用电流限幅控制。此时,可有

$$U_0 = X_g I_d^* + R_g I_q^* = I_{\text{lim}} R_g \quad (21)$$

此时, U_0 为一定值,只与电流限幅值 I_{lim} 和电网阻抗有关,因此, C 点不受有功功率、无功功率约束,其位置由电流限幅圆和 U_0 决定。由 2.1 节分析可知,此时 PCC 电压将位于 d 轴负半轴, $\delta = \pi + \theta_{\text{PLL}} - \theta_g$ 。如图 7 所示,经历扰动后,若 $U_g > U_0$,则 VSC 会不断增大 δ ,使 C 点最终稳定在电流限幅圆的交点,此时 $U_g \sin \delta = -U_0$;若 $U_g \leq U_0$,由于无法使得 $U_g \sin \delta = -U_0$,则 VSC 会不断增大 δ ,进而使得 C 点沿着电流限幅圆做圆周运动,导致同步失稳。

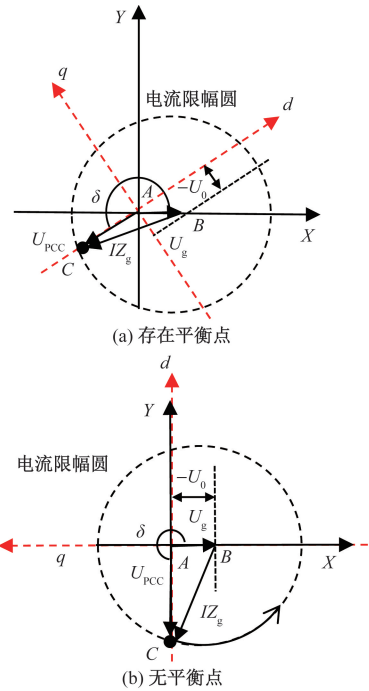


图 7 电网电压严重跌落时 VSC 的相量图

Fig. 7 Phasor diagram of VSC with severe voltage drop

3 时域仿真验证

为验证所述 VSC 的暂态同步稳定过程的正确性,在 EMTDC/PSCAD 中搭建 VSC 并网系统的电磁暂态模型,对上述同步稳定机理进行时域仿真验证,相关参数如表 1 所示。

初始系统电网电压稳定在 1 pu,VSC 与电网保持同步, $\delta = 0.37$ rad。分别设置以下 3 种仿真场景。

表 1 系统与控制参数

Table 1 System and control parameters

参数	数值
额定功率 P_n /MW	2
基准交流电压 U_n /kV	230
基准频率 f_n /Hz	50
额定直流电压 V_{dc} /kV	1.45
直流电容 C_{dc} /F	0.015
滤波电感 L_f /H	0.000 335
电网电感 L_g /H	30
电网电阻 R_g /Ω	2 000
直流电压控制系数	$K_{pdc} = 1, K_{idc} = 50$
无功功率控制系数	$K_{pq} = 1, K_{iq} = 50$
电流控制系数	$K_{pi} = 1, K_{ii} = 20$
PLL 系数	$K_{ppll} = 50, K_{ipll} = 100$

注: K_{pdc} 、 K_{idc} 分别为 d 轴直流电压外环控制的比例系数、积分系数; K_{pq} 、 K_{iq} 分别为 q 轴无功功率外环控制的比例系数、积分系数; K_{pi} 、 K_{ii} 分别为电流内环控制的比例系数、积分系数; K_{ppll} 、 K_{ipll} 分别为 PLL 的比例系数、积分系数。

场景 1 电网电压轻微跌落,外环控制均通过 PI 控制发挥作用。

场景 2 电网电压中等跌落,外环控制仅通过 PI 控制发挥作用无法使 VSC 恢复同步,导致 d 轴外环控制的电流限幅环节启用。

场景 3 电网电压严重跌落,外环控制仅通过 PI 控制控制发挥作用无法使 VSC 恢复同步,最终 d 轴、 q 轴外环控制的电流限幅环节均启用。

3.1 场景 1

当 $t=2$ s 时,设置电网电压突变至 0.9 pu。仿真结果如图 8 所示。

由图 8(a)可知,当电网电压跌落到 0.9 pu 后,PCC 电压的相角经过加减速后重新稳定,稳定平衡点发生了偏移,并同步在 $\delta = 0.49$ rad。在 VSC 与电网重新恢复同步的过程中,由图 8(b)、图 8(c)可知, $|I_d^*|$ 小于 d 轴电流限幅值, d 轴外环通过直流电压 PI 控制发挥作用, I_d^* 随着直流电压的变化而变化。从图 8(d)、图 8(e)可知, $|I_q^*|$ 小于 q 轴电流限幅值, q 轴外环控制通过无功功率 PI 控制发挥作用, I_q^* 随着输出无功功率的变化而变化。暂态过程中参考电流的变化导致了 U_0 的变化,由图 8(f)可知, U_0 经过波动后稳定在一个相对于初始值更大的值。最终,由于 $I_q^* < 0$,PLL 的同步方程没有改变,所以稳定平衡点的存在区域为 $\delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,且满足有功功率和无功功率的约束。

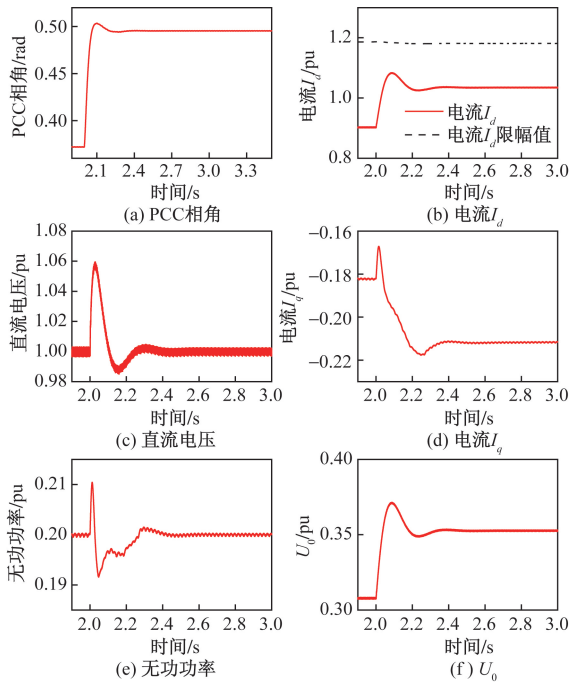


图 8 电网电压突变至 0.9 pu 的 VSC 仿真波形

Fig. 8 VSC simulation results of grid voltage drop to 0.9 pu

3.2 场景 2

(1) 当 $t=2$ s 时,设置电网电压突变至 0.85 pu。仿真结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,当电网电压跌落到 0.85 pu 后,PCC 电压的相角经过加减速后重新稳定,稳定平衡点发生了偏移,同步在 $\delta = 0.57$ rad。VSC 与电网重新恢复同步的过程中,由图 9(b)、图 9(c)可知, $|I_d^*|$ 达到 d 轴电流限幅值, d 轴外环通过电流限幅环节发挥作用。由于直流电压的下降,直流电压控制的输出能够再次低于 d 轴电流限幅值,相应的 d 轴外环再次通过 PI 控制发挥作用。结合图 9(d)、图 9(e)可知, $|I_q^*|$ 始终小于 q 轴电流限幅值, q 轴外环控制通过 PI 控制发挥作用, I_q^* 随着输出无功功率的变化而变化,故最终的暂态同步情况和场景 1 类似。 I_d^* 和 I_q^* 的变化导致 U_0 变化,由图 9(f)可知, U_0 经过波动后稳定在一个相对于初始值更大的值,且由于 $I_q^* < 0$,PLL 的同步方程没有改变,所以稳定平衡点的存在区域为 $\delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,且满足有功功率和无功功率的约束,与场景 1 类似。

(2) 当 $t=2$ s 时,设置电网电压突变至 0.6 pu。仿真结果如图 10 所示。根据图 10(a),当电网电压跌落到 0.6 pu 后,PCC 电压的相角经过加减速后重新稳定,稳定平衡点发生了偏移,同步在 $\delta = 0.89$ rad。VSC 与电网重新恢复同步的过程中,由图 10(b)、图 10(c)可知,直流电压被直流卸荷电路控制在 1.1 pu 附近,由于直流电压始终高于直流电

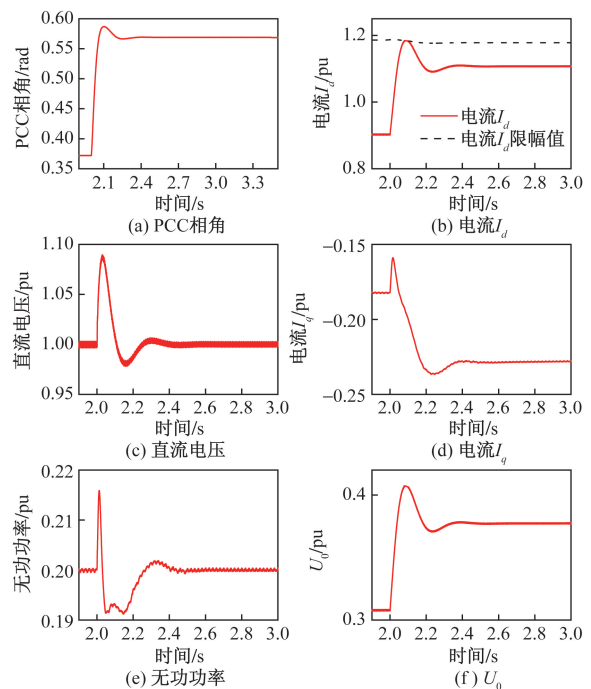


图 9 电网电压突变至 0.85 pu 的 VSC 仿真波形

Fig. 9 VSC simulation results of grid voltage drop to 0.85 pu

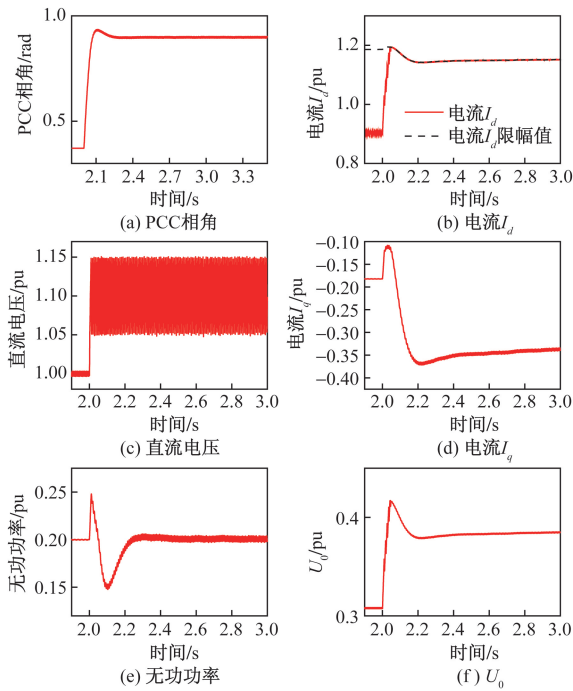


图 10 电网电压突变至 0.6 pu 的 VSC 仿真波形

Fig. 10 VSC simulation results of grid voltage drop to 0.6 pu

压参考值,使得 I_d^* 持续增大直到 $|I_d^*|$ 达到 d 轴电流限幅值, d 轴外环通过电流限幅环节发挥作用并持续下去。由图 10(d)、图 10(e) 可知, $|I_q^*|$ 始终小于 q 轴电流限幅值, q 轴外环控制通过 PI 控制发挥作用, I_q^* 随着输出无功功率的变化而变化。 I_d^* 和 I_q^* 的变化导致了 U_0 的变化, 结合图 10(f) 可知, U_0 经过波动后稳定在一个相对于初始值更大的值, 且由于 $I_q^* < 0$, PLL 的同步方程没有改变, 所以稳定平衡点的存在区域为 $\delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, 且满足无功功率和电流限幅的约束。

3.3 场景 3

(1) 当 $t=2$ s 时, 设置电网电压突变至 0.3 pu。仿真结果如图 11 所示。由图 11(a) 可知, 当电网电压跌落到 0.3 pu 后, 稳定平衡点发生了较大的偏移, 最后同步在 $\delta = -2.90$ rad。在 VSC 与电网重新恢复同步的过程中, 由图 11(b)、图 11(c) 可知, 直流电压被直流卸荷电路控制在 1.1 pu 附近, 由于直流电压始终高于直流电压参考值, 使得 I_d^* 持续增大直到 $|I_d^*|$ 达到 d 轴电流限幅值, d 轴外环通过电流限幅环节发挥作用并持续下去, 且 d 轴电流参考值为 0。从图 11(d)、图 11(e) 可以看出, VSC 输出无功功率在 2.0 ~ 2.2 s 的持续增大也使得 I_q^* 持续增大, 当 $|I_q^*|$ 达到 q 轴电流限幅值后, q 轴外环通过电流限幅环节发挥作用并将 q 轴电流参考值持续控制为 I_{lim} 。 I_d^* 和 I_q^* 的变化导致了 U_0 的变化, 当

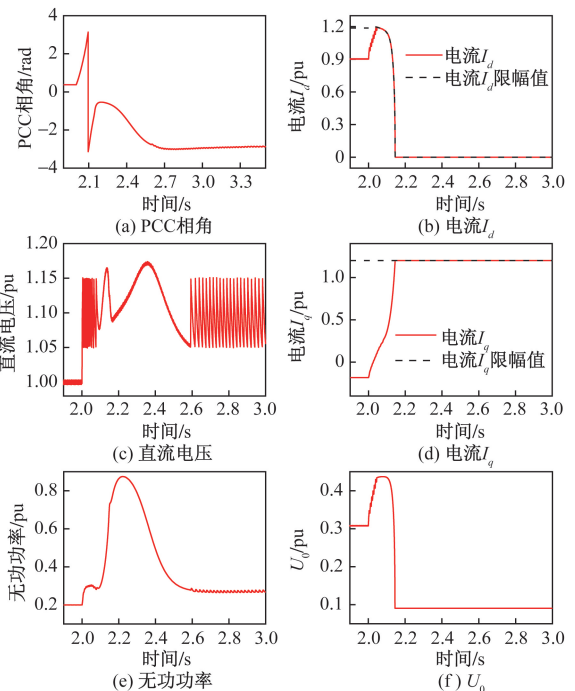


图 11 电网电压突变至 0.3 pu 的 VSC 仿真波形

Fig. 11 VSC simulation results of grid voltage drop to 0.3 pu

I_d^* 和 I_q^* 都稳定在限幅值之后, U_0 不再改变, 稳定在 0.1 pu, 如图 11(f) 所示。由于 $I_q^* > 0$, 为了维持一定的无功功率输出, PLL 的同步方程改变为式 (10) 的形式, 所以稳定平衡点的存在区域为 $\delta \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ 。

(2) 当 $t=2$ s 时, 设置电网电压突变至 0.1 pu。仿真结果如图 12 所示。由图 12(a) 可知, 当电网电压跌落到 0.1 pu 后, PCC 电压的相角最终无法恢复同步稳定。由图 12(b)、图 12(c) 可知, 直流电压被直流卸荷电路控制在 1.1 pu 附近, 由于直流电压始终高于直流电压参考值, 使得 I_d^* 持续增大直到 $|I_d^*|$ 达到 d 轴电流限幅值, d 轴外环通过电流限幅环节发挥作用并持续下去, d 轴电流参考值为 0。结合图 12(d)、图 12(e), VSC 输出无功功率在 2.0 ~ 2.2 s 的持续增大也使得 I_q^* 持续增大直到 $|I_q^*|$ 达到 q 轴电流限幅值, q 轴外环通过电流限幅环节发挥作用并持续下去, q 轴电流参考值为 I_{lim} 。 I_d^* 和 I_q^* 的变化导致了 U_0 的变化, 当 I_d^* 和 I_q^* 都稳定在限幅值之后, U_0 不再改变, 如图 12(f) 所示。但由于此时 $U_g \leq U_0$, 系统不存在平衡点, 系统出现同步失稳。

在上述 3 种场景中分别考虑了电网电压轻微跌落、电网电压中等跌落、电网电压严重跌落 3 种情况, 通过时域仿真考察了 VSC 稳定平衡点变化情况, 并对考虑外环控制后的 VSC 暂态同步机理进行

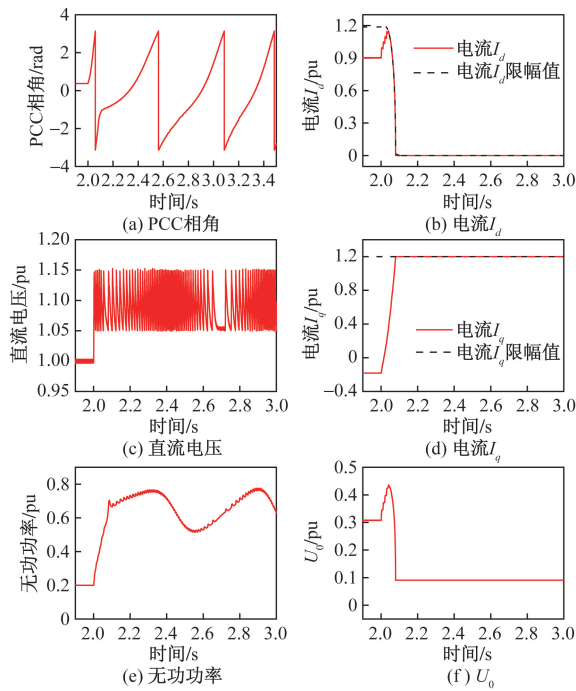


图12 电网电压突变至0.1 pu的VSC仿真波形

Fig. 12 VSC simulation results of grid voltage drop to 0.1 pu

验证,仿真结果与理论分析一致。

4 结论

考虑VSC的PLL和外环控制中的PI控制和电流限幅环节,建立VSC的暂态同步稳定分析模型,给出不同电网电压跌落程度下VSC同步稳定平衡点的可能存在区域,揭示考虑外环控制后VSC的暂态同步稳定机理。得出以下主要结论。

(1) q 轴外环采用无功功率控制的VSC,在电网电压严重跌落时,PCC电压将移动到 d 轴负半轴,导致PLL同步方程发生改变,VSC的稳定平衡点的存在区域从 $\delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 变为 $\delta \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ 。

(2) 当采用 q 轴电流优先的控制策略时,外环控制有直流电压控制配合无功功率控制、 d 轴电流限幅控制配合无功功率控制、 d 轴电流限幅控制配合 q 轴电流限幅控制3种组合方式,从而使VSC呈现不同的暂态同步性能。

(3) 外环控制通过影响暂态过程的参考电流来影响VSC的暂态同步稳定性,具体表现为无功约束、有功约束和电流限幅约束,在不同的电网电压跌落深度有不同的约束组合。

参考文献

[1] 孙玉峰,崔双喜,郑子杰. 针对隐性故障的新型电力系统连锁

故障模型[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 5006-5013.

Sun Yufeng, Cui Shuangxi, Zheng Zijie. A new cascading failure model of powersystem for hidden faults[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5006-5013.

[2] 李从善, 张晓伟, 和萍, 等. 改进的多端柔性直流系统多点直流电压无差协调控制策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12549-12555.

Li Congshan, Zhang Xiaowei, He Ping, et al. Improved multi-point direct current voltage non-differential coordination control strategy for multi-terminal direct current system [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12549-12555.

[3] Fan L, Miao Z. Root cause analysis of AC overcurrent in July 2020 San Fernando disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4892-4895.

[4] 满九方, 谢小荣, 陈垒, 等. 柔性直流输电系统高频振荡建模分析与抑制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3308-3322.

Man Jiufang, Xie Xiaorong, Chen Lei, et al. Overview of modeling analysis and mitigation strategies of high-frequency resonance in MMC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3308-3322.

[5] 李玲芳, 陈占鹏, 胡炎, 等. 基于灵活性和经济性的可再生能源电力系统扩展规划[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(7): 791-801.

Li Lingfang, Chen Zhanpeng, Hu Yan, et al. Expansion planning of renewable energy power system considering flexibility and economy[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(7): 791-801.

[6] Xiong L S, Liu X K, Liu Y H, et al. Modeling and stability issues of voltage-source converter dominated power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 18: DOI: 10.17775/CSEEJPES. 2020.03590.

[7] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.

Xie Xiaorong, Ma Ningjia, Liu Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.

[8] 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.

[9] Cheng H, Shuai Z, Shen C, et al. Transient angle stability of parallel synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.

[10] Zhang Z, 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.

[11] 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.

[12] Fu X, Huang M, Pan S, et al. Cascading synchronization instabil-

- ity in multi-VSC grid-connected system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7572-7576.
- [13] Luo Y, Yao J, Chen Z, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement control strategy of a PLL-based VSC system during asymmetric grid faults[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): DOI: 10.1109/TEC.2020.3011203.
- [14] 易相彤, 黄文, 沈超, 等. 锁相环同步型变流器并联系统暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6338-6347.
Yi Xiangtong, Huang Wen, Shen Chao, et al. Transient synchronization stability analysis of paralleled converter systems with phase-locked loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6338-6347.
- [15] 吕雅诗, 邹赵悦, 吴超, 等. 基于低通滤波器的标么化锁相环同步稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3848-3858.
Lü Yashi, Zou Zhao Yue, Wu Chao, et al. Analysis of synchronization stability of the normalization PLL based on low-pass filter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3848-3858.
- [16] 张艳霞, 刘凯祥, 成雅超, 等. 控制时延对非同步机电源同步稳定性的影响[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2414-2424.
Zhang Yanxia, Liu Kaixiang, Cheng Yachao, et al. Influence of control delay on synchronization stability of non-synchronous generator sources[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2414-2424.
- [17] Pan D, Wang X, Liu F, 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.
- [18] 薛翼程, 张哲任, 徐政. 含跟网型 VSC 的交流系统暂态稳定解析模型及协调控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 63-70, 111.
Xue Yicheng, Zhang Zheren, Xu Zheng. Transient stability analytical model and coordination control of AC system with GFL-VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 63-70, 111.
- [19] 项中明, 倪秋龙, 李振华, 等. 跟网型 MMC-HVDC 并网暂态同步稳定机理分析[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 250-259.
Xiang Zhongming, Ni Qiulong, Li Zhenhua, et al. Transient stability mechanism analysis of grid-following MMC-HVDC[J]. Journal of Electrical Engineering[J]. 2023, 18(3): 250-259.
- [20] He X, Geng H. PLL synchronization stability of grid-connected multiconverter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 830-842.
- [21] 潘莉, 李霞林, 王智, 等. 弱连接 VSC 的锁相环同步暂态稳定综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 138-151.
Pan Li, Li Xialin, Wang Zhi, et al. Overview of transient stability analysis of phase-locked loop synchronization in weak-grid connected VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 138-151.
- [22] 许津铭, 凌子涵, 程成, 等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 370-385.
Xu Jinming, Ling Zihan, Cheng Cheng, et al. Overview on nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied inverters[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 370-385.
- [23] 司文佳, 陈俊儒, 张成林, 等. 直流电压控制对跟网型并网变换器的影响机理[J/OL]. (2023-10-25) [2024-05-10]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.321>.
Si Wenjia, Chen Junru, Zhang Chenglin, et al. Influence mechanism of DC-bus voltage on synchronization stability of grid-following converter[J/OL]. (2023-10-25) [2024-05-10]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.321>.
- [24] 白晨曦, 何汰航, 李夏岩, 等. 基于稳定流形法的构网型逆变器暂态稳定性分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3705-3714.
Bai Chenxi, He Taihang, Li Xiayan, et al. Analysis of the transient stability of the grid-forming inverters based on stable manifold method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3705-3714.
- [25] 裴金鑫, 姚骏, 黄森, 等. 电网短路故障下新能源并网变换器的暂态同步机制及其自适应稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5922-5934, 6167.
Pei Jinxin, Yao Jun, Huang Sen, et al. Transient synchronization mechanism and adaptive stability control strategy for renewable energy grid-connected converter under grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5922-5934, 6167.