

锁相环失步对同步发电机暂态功角稳定性的影响机理分析

黎 晓¹, 李剑泽¹, 苏晨博¹, 王洁聪², 刘崇茹¹, 郑 乐¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192)

摘要: 未来将有大量新能源经功率变换器馈入电网, 形成新能源机组和同步发电机共存的新型电力系统, 这使得电力系统的暂态功角稳定问题更加复杂。文中分析了变流器锁相环平衡点的存在性与同步发电机暂态功角稳定性的联系。基于几何奇异摄动理论, 针对含变流器和同步发电机的系统, 分析了变流器失去平衡点导致锁相环输出角与同步发电机功角耦合的原因; 揭示了高比例变流器接入的电网中更容易发生这种耦合的机理。详细分析了变流器失去平衡点后, 锁相环对发电机同步稳定性的两种影响机理: 锁相环失稳短暂地增加同步发电机的减速面积导致发电机功角减速; 锁相环失稳增加同步发电机加速面积导致发电机功角快速失稳。文中从理论上刻画了发电机功角稳定受锁相环制约的条件, 对新型电力系统中功角稳定域的研究具有参考意义。

关键词: 电压源型变流器; 锁相环; 暂态功角稳定; 同步发电机

0 引言

为实现中国“双碳”目标, 据估计到2060年新能源将逐渐成为电力供应主体, 但传统的同步电源依然占有一定比例, 电网仍通过交流同步机制实现功率传输^[1]。新型电力系统中, 多种设备的多时间尺度特性给同步发电机暂态功角稳定性问题带来新的挑战。目前, 电压源型变流器(voltage source converter, VSC)是一种常见的电源并网设备, 其中已被广泛使用的跟网型变流器(grid-following converter)依靠锁相环(phase-locked loop, PLL)与电网保持同步^[2]。因此, 研究变流器的锁相环和传统同步发电机互联的暂态稳定性具有重要意义。

在小扰动方面, 已有较多文献研究了锁相环与同步发电机功角稳定的关系, 相关的研究结论已比较成熟。例如, 弱电网情况下锁相环与同步发电机转子轴承的耦合作用可能引发次同步振荡^[3-4]。锁相环参数不合理时可能引起同步发电机低频振荡^[5-8], 优化锁相环参数可以为同步发电机提供正阻尼^[9]。

在大扰动方面, 基于不同的模型和方法得到的结论并不完全一致。已有的针对锁相环与同步发电机功角的相互影响的研究认为: 1) 当锁相环稳定时, 变流器对电网主要表现为变流器外环控制的特征,

可以近似等值为恒功率或恒阻抗^[10]。较多文献讨论了这种情况下新能源电源经变流器接入电网的渗透率^[10-12]、接入点位置^[13-15]及功率控制方式^[16-17]等对同步发电机功角稳定性的影响。2) 大扰动下锁相环失步时, 认为锁相环动态过程的时间尺度明显小于发电机的转子时间尺度, 因此, 将锁相环简化为代数方程来讨论同步发电机的功角稳定性问题^[18]。文献^[18]指出, 含变流器电网的同步发电机暂态功角失稳机理与传统电网相比, 存在新的失稳约束。

然而, 当变流器公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压跌落^[19-21], 或者电网强度较弱^[22-23]、故障后PCC处相位跳变^[24]等情况发生时, 锁相环可能失去与电网保持同步的能力^[18-19]。此时, 将换流器简化为恒功率源或恒阻抗无法反映出锁相环失步情况下对同步发电机的影响。当锁相环在大扰动后的暂态过程中失去平衡点时, 将锁相环简化为代数方程的条件不再成立。现有的研究结论, 即变流器失去平衡点后导致同步发电机失去同步的条件值得进一步研究。

本文针对上述问题, 深入研究锁相环动态与同步发电机的交互影响机理, 重点考虑故障后系统恢复过程中两者交互引起的同步稳定问题, 而非故障直接引起的失稳情况。本文的主要贡献为:

1) 建立了锁相环与同步发电机功角的动力学方程, 分析了锁相环与同步发电机功角耦合的条件, 揭示了大量变流器接入电网时, 同步发电机功角稳定

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-06-19。

上网日期: 2022-09-01。

国家电网有限公司科技项目(5105-202018129A-0-0-00)。

边界由不稳定平衡点约束转为锁相环约束的机理。基于几何奇异摄动理论,从理论层面解释了锁相环失去平衡点时,系统轨迹从同步发电机动态主导过渡到锁相环动态主导的动力学特征。

2)通过发电机转速的解析,分析了锁相环简化为代数方程在功角稳定性分析中的局限性,探讨了同步发电机功角稳定受锁相环制约的条件,为大规模新能源馈入电网的暂态稳定域分析提供了理论支撑。

1 锁相环与发电机功角动态交互场景描述

系统中的电力电子接口控制环节与同步发电机的转子运动具有明显的时间尺度差异。如图1所示,内环电流控制的带宽在100 Hz及以上,锁相环控制的带宽一般在10~70 Hz,而发电机转子的惯性时间常数通常在秒级。因此,按照不同时间尺度对系统的动态过程进行划分,能够简化分析过程。图中: I_{dq}^* 为变流器的电流指令值,在文中用 I_d 和 I_q 表示; θ_{pll} 为锁相环的输出角; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为网络阻抗; Z_L 为PCC处并联阻抗; $\dot{U}_1$ 为大系统母线的电压相量; E_g 和 δ_g 分别为发电机内电势幅值和功角。当研究锁相环的同步稳定性时,认为同步发电机转子的相位不发生变化;当研究同步发电机的功角稳定性时,假设锁相环在合理的控制参数下能够始终保持同步,此时,变流器表现出外环功率控制或低压穿越控制的特性。

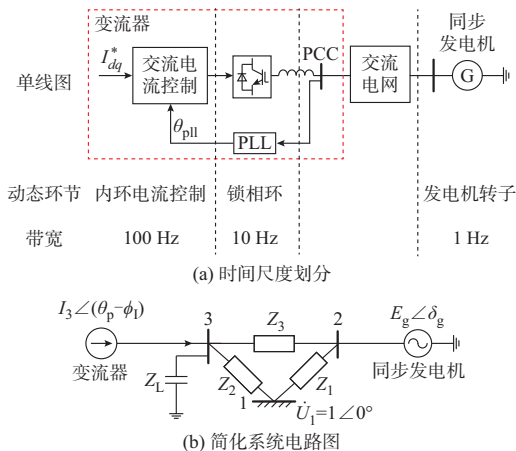


图1 变流器接入交流系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of converter connected to AC system

然而,当故障持续时间较长导致发电机的功角摆动较大时,振荡中心区域的母线电压大幅下降,进一步,可能会导致其所连接的变流器的锁相环因失去平衡点而失去同步。此时,锁相环失稳主要受发

电机功角而不是锁相环控制参数的影响。同时,锁相环失去稳定之后,变流器输出的功率出现振荡,也会影响同步发电机功角的恢复过程。因此,在含电压源型变流器的电网中,同步发电机的功角稳定性可能受到锁相环的制约^[18]。

锁相环对发电机功角稳定域的约束条件与传统电力系统中恒功率性质的负荷对同步发电机的功角稳定域的约束条件,具有一定的相似性,因为两者都是通过影响交流网络的功率传输能力,间接地改变了发电机的功角稳定性^[25-26]。但由于存在前文所描述的时间尺度差异,两者表现出不同的现象。

简而言之,变流器平衡点存在的条件,影响了同步发电机功角稳定域的边界条件。这既是锁相环动态与发电机功角之间多时间尺度特性的表现,也是锁相环通过交流网络与同步发电机耦合的特征。

2 变流器-同步发电机系统的动力学行为

2.1 锁相环与发电机功角的双时间尺度建模

发电机的简化二阶方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\delta_g}{dt} = \omega_0(\omega_g - 1) \\ T_J \frac{d\omega_g}{dt} = P_m - P_g - D(\omega_g - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega_0 = (100\pi)\text{rad/s}$ 为工频50 Hz下的角速度; T_J 为标么化的发电机惯性时间常数; P_m 、 P_g 和 D 分别为发电机的机械功率、电磁功率和阻尼系数; ω_g 为 δ_g 的角频率标么值,稳态下等于1 p.u.。

对于变流器和同步发电机,本文为突出机理描述,有以下假设:1)忽略电流内环控制,假设电流内环控制的带宽足够大,使得内环控制与锁相环近似解耦^[27];2)忽略外环控制和直流电压控制,假设故障及故障后恢复期间外环控制达到限幅或者故障穿越控制启动^[18,20-23,28-30],变流器表现出电流源的特性;3)同步发电机暂态电抗后的内电势恒定。

根据三相同步坐标系的锁相环(synchronous reference frame phase-locked loop, SRF-PLL)的控制框图(见附录A图A1),建立锁相环状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_p}{dt} = k_p V_q + k_i x_p = \omega_0(\omega_p - 1) \\ \frac{dx_p}{dt} = V_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_p 为锁相环的直接输出角度 θ_{pll} 与平衡节点的相角差,是一个相对角,假设平衡节点相角的转速等于 ω_0 , ω_0 和 θ_p 均为有名值; x_p 为锁相环比例-积分

(PI)控制器中积分的输出值; V_q 为 PCC 处电压相量在 q 轴上的分量; ω_p 为角频率标么值, 稳态下等于 1 p.u.; k_p 为锁相环 PI 环节的比例系数; k_i 为锁相环 PI 环节的积分增益。

将图 1(a) 中的交流电网用一个含等值大系统的三节点网络代替, 本文通过如图 1(b) 所示的简化系统来进行机理研究。其中, 等值大系统的端电压相角为 0° , 同步发电机和变流器分别代表发电机的一个集合和变流器的一个集合^[11,31]。在风机的稳定性研究中, 也常常使用单台等值风机代替整个风电场以简化研究^[32]。 P_g 和 V_q 可以写成 θ_p 和 δ_g 的函数, 见附录 B, 组合式 (1) 和式 (2) 即可得到系统的状态方程。假设锁相环的响应速度远快于发电机转子的响应速度, 系统具有双时间尺度特性。通过引入无量纲参数 $\epsilon = 1/(k_p T_J)$ 和坐标变换, 可以将系统的状态方程改写成如式 (3) 所示的奇异摄动的形式。

$$\begin{cases} \frac{d\delta_g}{d\lambda} = \omega_0(\omega_g - 1)T_J \\ \frac{d\omega_g}{d\lambda} = P_m - P_g(\theta_p, \delta_g) - D(\omega_g - 1) \\ \epsilon \frac{d\theta_p}{d\lambda} = V_q(\theta_p, \delta_g) + \frac{k_i}{k_p^2} y_p \\ \epsilon \frac{dy_p}{d\lambda} = V_q(\theta_p, \delta_g) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y_p = x_p k_p$, 为锁相环 PI 控制器中积分的输出值 x_p 与 k_p 的乘积; $\lambda = t/T_J$ 为时间变量。式 (3) 忽略了频率变化对线路阻抗参数的影响。

基于奇异摄动理论^[33], 原模型解耦为一个关于发电机转子动态的慢系统 (式 (4)) 与一个关于锁相环动态的快系统 (式 (5))。

$$\begin{cases} \frac{d\delta_g}{dt} = \omega_0(\omega_g - 1) \\ T_J \frac{d\omega_g}{dt} = P_m - P_g(\theta_p, \delta_g) - D(\omega_g - 1) \\ 0 = V_q(\theta_p, \delta_g) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{d\delta_g}{d\lambda} = 0 \\ \frac{d\omega_g}{d\lambda} = 0 \\ \frac{d\theta_p}{d\lambda} = V_q(\theta_p, \delta_g) + \frac{k_i}{k_p^2} y_p \\ \frac{dy_p}{d\lambda} = V_q(\theta_p, \delta_g) \end{cases} \quad (5)$$

针对图 1(b) 所示简化网络得到式 (3)、式 (4) 和式 (5) 的推导过程, 详见附录 B。

注意到快系统 (式 (5)) 的平衡点也是慢系统 (式 (4)) 中代数方程 $V_q = 0$ 的解。因此, 在快系统 (式 (5)) 稳定的情况下, 系统方程 (式 (3)) 的轨迹会很快趋近 $V_q = 0$ 的解, 如附录 C 图 C1 所示。此时, 慢系统与快系统可以近似解耦, 慢系统能够描述同步发电机的暂态功角稳定性, 与传统交流电网的功角稳定性没有本质上的区别。

2.2 锁相环与发电机功角耦合条件的分析

2.2.1 快系统稳定的条件

快系统在扰动后能够恢复稳定需要两个条件: 1) 快系统存在稳定的平衡点; 2) 故障切除后轨迹位于快系统的稳定域内。

对于快系统第 2 个稳定条件, 已有文献分析锁相环的稳定域^[34]。因为功角的变化速度显著慢于锁相环的调节速度, 且功角较小时锁相环平衡点距离稳定边界有一定的稳定裕度, 功角增大造成的锁相环收敛域减小难以造成锁相环失稳。也就是说, 在合适的锁相环参数下, 如果故障切除后锁相环能够很快恢复稳定, 那么锁相环可以跟踪上发电机的功角变化。

对于快系统的第 1 个稳定条件, 虽然已有文献分析锁相环平衡点的存在性条件, 但本文着重推导锁相环平衡点存在性与同步发电机功角的关系。

忽略线路电导和并联电导, 基于附录 B 中 V_q 表达式 (B4), $V_q = 0$ 等价于式 (6)。

$$I_3 \cos \phi_1 = B_3 E_g \sin(\delta_g - \theta_p) - B_2 \sin \theta_p = a_\delta(\delta_g) \sin(\theta_p - \varphi_\delta(\delta_g)) \quad (6)$$

其中:

$$a_\delta(\delta_g) = \sqrt{B_2^2 + B_3^2 E_g^2 + 2B_2 B_3 E_g \cos \delta_g} \quad (7)$$

$$\varphi_\delta(\delta_g) = \arctan\left(\frac{B_3 E_g \sin \delta_g}{B_3 E_g \cos \delta_g + B_2}\right) \quad (8)$$

式中: B_2 和 B_3 分别为阻抗 Z_2 和 Z_3 支路的电纳。已将同步发电机等值内电抗通过电路星形-三角形变换归算到网络支路中; $\phi_1 = \arctan(-I_q/I_d)$, I_d 和 I_q 分别为变流器的 d 、 q 轴电流; I_3 为变流器输出电流的幅值。

由于 $a_\delta(\delta_g)$ 最小值在 $\delta_g = \pi$ 处取得, 当 $a_\delta(\pi) < I_3 \cos \phi_1$ 时, 发电机功角增大到 π 的过程中就会使得代数方程 $V_q = 0$ 失去平衡点。此时, 发电机功角增大会使得快系统的第 1 个稳定条件不能满足。从网络结构上表现为, B_2 与 $B_3 E_g$ 越接近, 锁相环越容易失去平衡点; 从变流器容量上表现为, 变流器输出电流越大, 锁相环越容易失去平衡点。

当发电机功角增大, 代数方程 $V_q = 0$ 刚好失去

平衡点时,将这一点记作折点 $F^{[35]}$,也称为鞍结型分岔点和奇异点^[25]。此时,子系统(式(4))无法描述交直流电网的同步稳定性,锁相环与同步发电机的动态过程耦合,锁相环的动态过程就不能完全被忽略。本文2.3节详细分析了这种条件下两者的交互过程。

2.2.2 慢系统的稳定边界由折点决定的条件

功角稳定边界的评估大多基于不稳定平衡点处的减速面积、暂态能量或者其稳定流形。当同步发电机功角在扰动后首先经过不稳定平衡点而不是折点时,基于不稳定平衡点的功角稳定性评估方法仍然适用。但是,当同步发电机功角增大过程中先经过折点时,折点将会影响功角稳定域的边界。

本节基于发电机电磁功率 P_g 的解析表达式,分析了同步发电机不稳定平衡点与折点的位置关系,以及同步发电机机械功率 P_m 和变流器电流大小 I_3 对这种位置关系的影响,揭示了折点影响功角稳定边界的一些运行条件。

基于附录B的推导得到消去 θ_p 的发电机电磁功率 P_g 的表达式如式(9)所示。

$$P_g = b_1 \sin \delta_g + P_{g2}(\delta_g) \quad (9)$$

其中:

$$b_1 = \frac{(B_1 B_2 + B_1 B_3 + B_2 B_3 + B_1 B_L) E_g}{-B_2 - B_3 - B_L} \quad (10)$$

式中: b_1 为功率表达式中正弦分量的系数; B_1 为阻抗 Z_1 支路的电纳; B_L 为PCC处的并联电纳; $P_{g2}(\delta_g)$ 的表达式详见附录B。在 δ_g 取值范围内, $P_{g2}(\delta_g)$ 变化较小,可以简化为常数。

因此,锁相环保持在其稳定平衡点的情况下, P_g 关于 δ_g 变化的曲线可以更简洁地表示为:

$$P_g \approx b_1 \sin \delta_g + P_{g2}(0) \quad (11)$$

其中:

$$P_{g2}(0) = \frac{B_3 E_g I_3 \cos \phi_1 \left(\sqrt{a_\delta^2(0) - I_3^2 \cos^2 \phi_1} \right)}{(B_2 + B_3 + B_L)(B_2 + B_3 E_g)} \quad (12)$$

δ_g 取值范围分以下两种情况:

情况1:当 $a_\delta(\pi) \geq I_3 \cos \phi_1$ 时, δ_g 的取值范围为实数域,这种情况不存在折点。

情况2:当 $a_\delta(\pi) < I_3 \cos \phi_1$ 时, δ_g 的取值范围为 $[-\delta_{g,m}, \delta_{g,m}]$,取值范围的两端为折点的位置。 $\delta_{g,m}$ 的表达式如下:

$$\delta_{g,m} = \arccos \left(\frac{I_3^2 \cos^2 \phi_1 - B_2^2 - B_3^2 E_g^2}{2 B_2 B_3 E_g} \right) \quad (13)$$

在 δ_g 取值范围的情况2下,折点和不稳定平衡点的相对位置受变流器输出电流 I_3 与同步发电机机

械功率 P_m 的影响。由式(11)可知, P_g - δ_g 曲线接近正弦函数。 $P_g = P_m > 0$ 的解中,功角较小的解称为稳定平衡点,其他解称为不稳定平衡点。由 δ_g 的取值范围可知, I_3 越大则 δ_g 取值范围越小。因此, I_3 增大可以使得在 δ_g 的取值范围之内只存在稳定平衡点,不稳定平衡点在功角 δ_g 的取值范围之外。同时,较小的 P_m 也会使得不稳定平衡点在 δ_g 的取值范围之外。

以附录D表D1的网络参数1为例验证上述分析。同步发电机等值内阻抗为0.05 p.u.,内电势 $E_g = 1.1$ p.u.,电磁功率曲线如图2所示。结果表明,式(11)能够很好地近似式(9),验证了利用式(11)研究 P_g 性质的正确性。比较图2中不同 I_3 条件下的 P_g 曲线,以及 $P_g = P_m$ 的解的情况。当 $I_3 = 1$ p.u.或3 p.u.时, $P_g = 4$ p.u.有两个解:稳定平衡点和不稳定平衡点。而当 I_3 增加到5 p.u.时, $P_g = 4$ p.u.仅有一个稳定平衡点的解,不存在不稳定平衡点,说明较大的 I_3 使得不稳定平衡点消失。比较不同 P_m 条件下的解。对于 $P_g = 2$ p.u.的解,当 $I_3 = 3$ p.u.或5 p.u.时, δ_g 都只有一个稳定平衡点。与 $P_g = 4$ p.u.相比,较小的 P_m 也会使得不稳定平衡点消失。

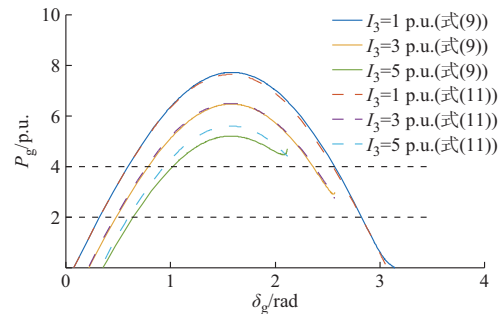


图2 同步发电机电磁功率 P_g -功角 δ_g 曲线
Fig. 2 Curves of electromagnetic power P_g versus power angle δ_g of synchronous generators

因此,较大的变流器输出电流 I_3 与较小的同步发电机机械功率 P_m 会使得慢系统的稳定边界由折点决定而不是不稳定平衡点。这也是后文分析的锁相环与同步发电机动态交互的一个条件,这个条件也正是大规模新能源接入电网的特点。

2.3 慢动态到快动态过程的定性分析

针对前文所描述的锁相环与发电机功角动态交互的场景,基于几何奇异摄动理论^[36],附录C中的定理C1对锁相环与同步发电机动态耦合的过程进行了理论解释。

由该定理可知,如果发电机功角 δ_g 在逼近折点 F 之前速度未减为0,那么系统轨迹将越过折点 F ,

且在 F 点足够小的领域内,系统的动态过程将从式(4)所描述的慢动态过程跳跃到式(5)所描述的快动态过程。也即,系统轨迹 $S_{a,\epsilon}$ 沿着 $V_q=0$ 的稳定分支 S_a 越过折点 F 之后,锁相环输出角度 θ_p 几乎总是以远快于发电机功角变化的速度增大,而发电机功角 δ_g 变化较小。下一章将进一步通过分析折点 F 处的一些性质,得到锁相环对发电机功角稳定的影响。

3 锁相环失步对同步发电机动态的影响机理

3.1 折点附近同步发电机转速的解析分析

在折点处进行泰勒展开,以折点领域内的一点作为 $t=0$ 时刻,得到发电机转速在折点的一个很小领域内的表达式如式(14)所示。

$$\omega_g \approx 1 + \omega_g^F + \frac{7d_1}{16} \frac{t}{T_J} - \frac{3d_2}{16} \frac{t^2}{\epsilon T_J^2} \quad (14)$$

式中:系数 d_1 等于 $t=0$ 时刻 $2T_J d\omega_g/dt$ 的值; d_2 等于 $t=0$ 时刻 $2\epsilon T_J (\partial P_g/\partial \theta_p)(d\theta_p/dt)$ 的值; ω_g^F 等于 $t=0$ 时刻的发电机转速偏差。推导过程与 d_1 和 d_2 的系数表达式见附录E。

根据式(14),轨迹穿过附录C图C2(a)所示的折点 F 附近区域之后进入折点 F 的右侧区域时,有以下两种情况:

情况1:当折点附近区域内 $d_2>0$ 时,越过折点后同步发电机转速减小。若 $d_1>0$,发电机转速先增大后减小;若 $d_1<0$,发电机转速单调减小。

情况2:当折点附近区域内 $d_2<0$ 时,轨迹越过折点后发电机转速增大。若 $d_1>0$,发电机转速单调增大;若 $d_1<0$,发电机转速先减小后增大。

基于2.3节的分析,轨迹越过折点后锁相环输出角增加,故 $d\theta_p/dt>0$ 。折点附近区域内 $d\omega_g/dt$ 的符号与 $\partial P_g/\partial \theta_p$ 的符号确定了 d_1 和 d_2 的符号,决定了轨迹越过折点后发电机转速的变化趋势。

忽略线路电导和PCC处并联负荷,得到 $\partial P_g/\partial \theta_p$ 的表达式(15)。由于函数的连续性, $\partial P_g/\partial \theta_p$ 的符号在折点的小领域内与折点处同号,则可以用折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p$ 的符号来近似表征其领域内的性质。而且基于式(15), $\partial P_g/\partial \theta_p=0$ 得到 $\theta_p - \delta_g - \phi_1 = 2k\pi$, k 取整数。那么在 $\theta_p - \delta_g$ 平面上,折点右上侧的区域与折点处的 $\partial P_g/\partial \theta_p$ 保持同号。因此,可以用折点处的灵敏度 $\partial P_g/\partial \theta_p$ 估计其右侧轨迹的性质。

$$\frac{\partial P_g(\theta_p, \delta_g)}{\partial \theta_p} = \frac{B_3 I_3 E_g \sin(\theta_p - \delta_g - \phi_1)}{B_2 + B_3 + B_L} \quad (15)$$

当折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p > 0$ 时,折点领域内 $d_2 > 0$,那么对应于上述情况1,轨迹越过折点后发电机转速减小,

有助于发电机恢复功角稳定。当折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p < 0$ 时,折点领域内 $d_2 < 0$,那么对应于上述第2种情况,轨迹越过折点后发电机转速增加,功角更容易失稳。

两种情况的示例分别如图3(b)和(d)所示,其中比较了近似解式(14)与数值解,也验证了近似解和基于近似解分析的正确性。图3(b)和(d)的转速曲线分别对应于图3(a)和(c)中折点右侧领域的绿色加粗实线轨迹。图3(a)和(c)中蓝色线表示轨迹,蓝色点表示平衡点,红色点表示折点,紫色虚线表示 $V_q=0$ 的解。本文后续图中的蓝色点和红色点表示相同的含义。

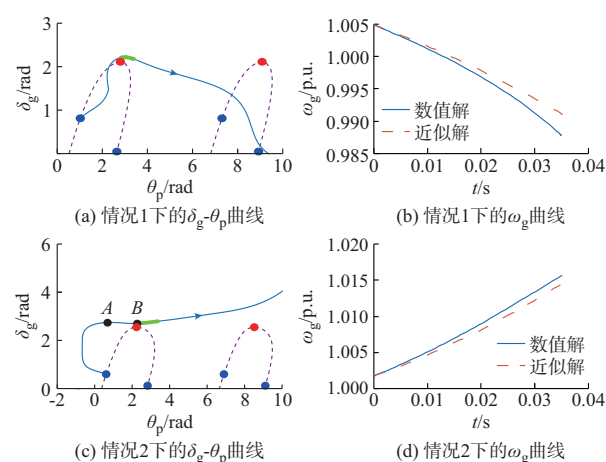


图3 越过折点 F 之后的轨迹
Fig. 3 Trajectory after crossing fold point F

在图3(b)的示例中, $d_2>0$, $d_1<0$,根据式(14),转速为单调减小。转速减小到小于1.0 p.u.之后功角也减小,故发电机功角恢复稳定。在图3(d)的示例中,折点右侧领域 $d_2<0$, $d_1>0$,根据式(14),转速为单调增加。在折点左侧领域, $d_2<0$, $d_1<0$,根据式(14),转速为先减小再增加。因此,轨迹从折点左侧到折点右侧领域时,转速经历先减小再增加的过程。折点左侧领域的转速轨迹未在图3中画出,可以从后文更加完整的转速曲线中得到验证。

3.2 锁相环简化为代数方程的局限性

根据3.1节对折点右侧领域内同步发电机转速的分析,变流器失去平衡点并非单一地恶化同步发电机功角稳定。简单将锁相环简化为代数方程,难以解释如图3(a)和(b)所示的情况1的机理。

以附录D表D1中的网络参数1为例,通过对数值解物理意义的分析,说明情况1下轨迹越过折点后较长一段时间的物理过程。发电机的惯性时间常数为3.4 s,发电机等值内阻抗为0.05 p.u.,等值内电势为1.1 p.u., $D=10$ p.u., $P_m=3$ p.u.。锁相环参数

$k_p=80$ p.u./s, $k_i=1\ 800$ p.u./s², $\epsilon=0.003\ 68$, $I_3=5$ p.u., $\phi_3=0$ 。故障切除后,系统轨迹在 θ_p - δ_g 平面上的投影如图3(a)中蓝色线所示。发电机的电磁功率 P_g 先增大再减少,如图4(a)所示,其中红色虚线表示附录C图C2(a)中折点 F 左边部分 $V_q=0$ 的解 S_a ,斜线阴影部分表示 θ_p 增大过程中所“额外”增加的减速面积。此时,折点 F 的坐标 $(\theta_p^F, \theta_g^F)=(2.801\ 76, 2.111\ 98)$,在折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p=1.944\ 44>0$,其灵敏度变化曲线如图4(b)所示。因此,轨迹越过折点 F 时发电机的电磁功率 P_g 也短时增加,形成了图4(a)中的阴影区域。其物理意义可以解释为锁相环输出角度的快速增加对发电机电磁功率的影响,改变了同步发电机功角的减速面积。

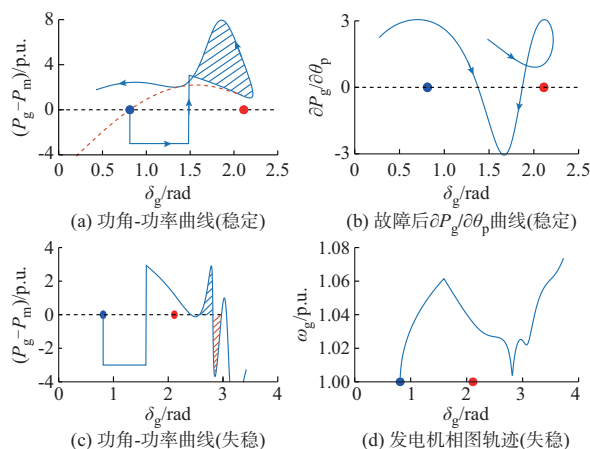


图4 动态相互作用对发电机功角稳定的影响:类型1
Fig. 4 Influence of dynamic interaction on power angle stability of generators: type 1

当故障更加严重时,锁相环输出角度 θ_p 增大过程中所“额外”增加的减速面积也不足以使发电机功角减速,发电机才可能失去功角稳定。在图4(a)示例的基础上,增加故障持续时间得到图4(c)所示曲线,其中 θ_p 增大过程中对应的发电机减速面积为蓝色阴影部分,对应的加速面积为红色阴影部分。虽然轨迹越过折点 F 之后,减速面积增大,发电机转速 ω_g 迅速降低(对应于图4(d)中 $\delta_g=2.8$ rad),但 ω_g 并未恢复到同步转速1 p.u.。随后电磁功率减小,加速面积进一步增大,发电机很快失去同步。但是,此时失稳的临界状态却没有对应的“不稳定平衡点”或者“主导不稳定平衡点”。

3.3 同步发电机功角稳定受锁相环制约的条件

3.1节分析中的情况2的失稳现象体现了锁相环对同步发电机功角稳定性的制约,因为锁相环动态过程恶化了发电机功角稳定,锁相环失稳与同步发电机功角失稳几乎同时发生。因此,在折点 F 处

$\partial P_g/\partial \theta_p < 0$ 成为同步发电机功角稳定受锁相环制约的条件。

将网络参数 Z_2 减小到1/6 p.u.,见附录D表D1中的网络参数2。在折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p = -0.653\ 846 < 0$ 。系统轨迹在 θ_p - δ_g 平面上的投影如图3(c)中蓝色线所示,在其他平面上的投影如图5所示。图3(c)中A点到B点之间的轨迹段对应于图5中红色方框里的部分。

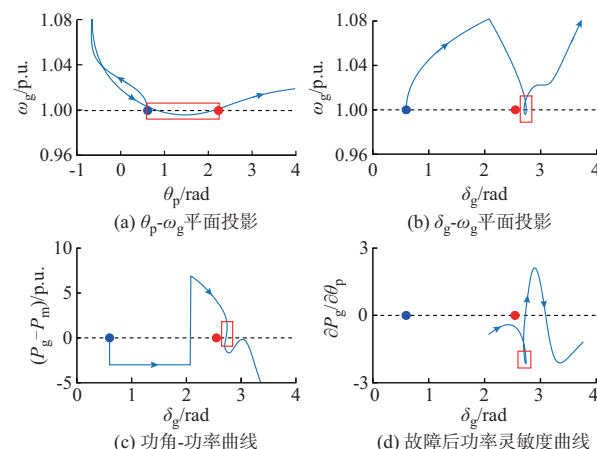


图5 动态相互作用对发电机功角稳定的影响:类型2
Fig. 5 Influence of dynamic interaction on power angle stability of generators: type 2

故障期间,发电机功角 δ_g 增大。故障切除后,轨迹经过A点之后功角 δ_g 开始减速并回摆,如图5(a)和(b)所示。但在轨迹经过B点之后,功角又开始加速增大,并且发电机功角失稳。在从A点到B点这一过程中,注意到两点特征:1)发电机功角轨迹在AB段之间有恢复稳定的趋势,如图5(b)和(c)所示, $\omega_g < 1.0$ p.u.满足发电机稳定判据;2)功角 δ_g 的变化很小,而锁相环输出角度 θ_p 变化范围较大。图5(c)表明,尽管功角在AB段中回摆,但功率却仍然往下跌落,与传统交流系统中发电机的功角-功率曲线不同。图5(d)说明,这个现象的原因是锁相环输出角度快速增大,且发电机的电磁功率对锁相环输出角度的灵敏度是负数,导致发电机电磁功率快速减小,功角从减速变成加速。因此,折点处 $\partial P_g/\partial \theta_p < 0$ 时,越过折点 F 之后,锁相环输出角度增大的动态过程成为功角失稳的一个主要原因。

4 算例分析与验证

在PSCAD/EMTDC上搭建如附录F图F1所示的电路对上述分析进行仿真验证。逆变侧变流器外环采用定交流电压控制和定直流电压控制,整流侧采用有功功率控制和无功功率控制。假设故障期

间直流回路的卸荷耗能电路维持直流电压的稳定。在故障期间,逆变站PCC处电压跌落,触发低电压穿越控制模块。此时,根据电网导则要求,为了支撑交流电压,有功电流指令值 i_d^* 等于零,无功电流指令值 i_q^* 等于逆变站允许的最大电流 $-i_{\max}$ 。锁相环PI环节的比例系数 k_p 和积分增益 k_i 分别为80 p.u./s和1 800 p.u./s²,带宽约等于16.16 Hz,阻尼比 ξ 约等于0.94^[28,37]。发电机惯性时间常数换算到100 MW的基准值下为17 s,式(3)中的 $\epsilon=0.000\ 74$,其他参数见附录D。

4.1 算例1:锁相环简化为代数方程的局限性验证

稳态时, $P_m=2.0$ p.u., $I_3=5.39$ p.u., $\phi_3=0.38$ rad,网络参数为附录D表D1中网络参数1。该条件属于图3中的情况1。在0.01 s时刻,发电机出口处母线发生三相接地短路瞬时故障。故障持续时间0.245 s时,折点附近的轨迹见附录F图F2阴影部分。在这段时间内,PCC处电压跌落严重,锁相环因此失去平衡点。角速度 ω_p 快速增大,迅速达到了上限值1.2 p.u.,导致锁相环输出角 θ_p 快速增大,而发电机的转速逐渐减小。发电机功角 δ_g 变化较小,但发电机电磁功率快速增大,它与 θ_p 快速增大同时发生,验证了本文3.2节的分析: $\partial P_g/\partial \theta_p > 0$ 时, θ_p 增大初期提供的发电机 P - δ 平面上的“减速面积”有利于发电机保持功角稳定。

当故障持续时间增加至0.37 s时,同步发电机才出现功角失稳,见附录F图F3。 θ_p 快速增大导致的减速面积增加效应仍然不足以使发电机功角回摆。

4.2 算例2:同步发电机功角稳定受锁相环约束条件的验证

减小变流器与无穷大系统之间的等值线路阻抗至1/6 p.u.。稳态时, $P_m=2.0$ p.u., $I_3=5.15$ p.u., $\phi_3=0.3$ rad。该条件属于图3中的第2种情况。0.01 s时刻发生三相短路瞬时故障,故障持续时间0.385 s,锁相环和同步发电机都发生了失稳,折点附近轨迹见附录F图F4阴影部分。但是,系统轨迹越过折点之后表现出了与算例1不同的特征。同步发电机电磁功率 P_g 在越过折点后继续下降,然后才有小幅度的回升。锁相环的快速动态没有立刻给发电机的转子运动起到减速的作用。如果故障持续时间从0.385 s减少到0.384 s,发电机和锁相环都能保持稳定,没有算例1中变流器失去平衡点而发电机功角恢复稳定的状态。

折点附近 $\partial P_g/\partial \theta_p < 0$,可以在接近折点F时给锁

相环输出角 θ_p 施加-1 rad的扰动来观察。0.58 s在锁相环输出施加扰动-1 rad,持续时间0.02 s。如图6中红色线所示,施加-1 rad的扰动后,发电机电磁功率短时上升,说明 $\partial P_g/\partial \theta_p < 0$ 。而且,扰动之后发电机功角从折点位置开始回摆, θ_p 也恢复了稳定,验证了本文3.3节的分析: $\partial P_g/\partial \theta_p < 0$ 时,变流器失去平衡点对发电机功角稳定有恶化的作用。

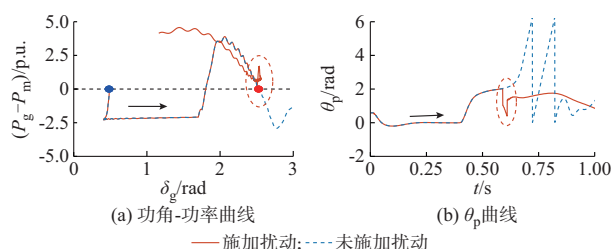


图6 锁相环扰动对发电机功角稳定的影响

Fig. 6 Influence of PLL disturbance on generator power angle stability

5 结语

本文分析了锁相环与同步发电机交互的条件,揭示了变流器失去平衡点对同步发电机暂态功角稳定性的影响机理。本文的结论如下:

1)在故障后系统恢复阶段,发电机功角摆开过大可能使得变流器失去平衡点,导致锁相环与同步发电机的动态过程耦合。尤其在含有高比例电力电子设备和较小容量同步发电机的系统中,这种耦合更容易主导功角稳定域的边界。因此,研究高比例新能源电力系统的暂态功角稳定需要考虑锁相环的影响。

2)根据折点附近锁相环输出角度变化对发电机电磁功率的灵敏度符号,锁相环与发电机的交互作用可分为两种类型:(1)锁相环输出角的快速变化为发电机提供了额外的减速面积,在一定程度上改善了发电机的暂态功角稳定性;(2)锁相环输出角的快速变化恶化了发电机的暂态功角稳定。锁相环对同步发电机功角稳定的制约体现在第2种类型,因此,对于功角稳定性分析需要着重考虑第2种类型。该结论对研究含电压源型变流器和同步发电机的电力系统的功角稳定边界条件、在线稳定评估等具有参考意义。

3)本文探讨了锁相环与同步发电机之间的非线性现象。由于在解析分析时截断了三阶及以上的高阶项,然后结合数值计算现象对解析结果进行了推广,本文分析结论适用于锁相环失稳后的短暂时间。同时,如果锁相环失稳时间较长也会触发继电保护动作导致变流器闭锁。此外,本文的研究基于

单个变流器聚合模型和单个发电机模型。对于更复杂的多变流器和多机系统,本文的结论是否需要修正仍需要进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 郭剑波. 构建新型电力系统是实现能源转型、达成“双碳”目标的有效途径[N]. 国家电网报, 2021-09-07(5).
GUO Jianbo. Building a new power system is an effective way to realize energy transformation and achieve the goal of double carbon[N]. State Grid News, 2021-09-07(5).
- [2] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [3] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 考虑锁相环动态的直驱风电机组虚拟惯性控制对电力系统小干扰稳定性影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2239-2252.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small-signal stability of power systems as affected by D-PMSG virtual inertia control considering PLL dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2239-2252.
- [4] LI Y, FAN L L, MIAO Z X. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
- [5] 薛翼程, 王国腾, 张哲任, 等. MMC-HVDC 接入对同步发电机阻尼转矩的影响机理分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 99-108.
XUE Yicheng, WANG Guoteng, ZHANG Zheren, et al. Mechanism analysis of influence of MMC-HVDC integration on damping torque of synchronous generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 99-108.
- [6] XUE Y C, WANG G T, ZHANG Z R, et al. Mechanism analysis and mitigation strategies for oscillatory instability of synchronous generators affected by voltage source converters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(4): 750-765.
- [7] 毕天姝, 王清, 薛安成, 等. 基于状态矩阵和摄动理论的双馈风力发电机与同步机小扰动相互作用机理[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 126-135.
BI Tianshu, WANG Qing, XUE Ancheng, et al. The mechanism of small signal dynamic interaction between DFIG and synchronous generator based on state matrix and perturbation theories [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 126-135.
- [8] MA J, QIU Y, LI Y N, et al. Research on the impact of DFIG virtual inertia control on power system small-signal stability considering the phase-locked loop [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2094-2105.
- [9] 何维. 双馈型风电机组机电时间尺度特性分析及对电力系统机电动态影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
HE Wei. Study of electromechanical-time scale characteristics of doubly fed induction generator type wind turbine and its impact on power system electromechanical dynamics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [10] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 875-881.
WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 875-881.
- [11] 喻哲扬, 张君黎, 徐政. 非同步机电源渗透率对同步机之间功角稳定性影响的简化模型分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 88-97.
YU Zheyang, ZHANG Junli, XU Zheng. Simplified model analysis of influence of penetration rate of non-synchronous generator source on angle stability of synchronous generators [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 88-97.
- [12] 王杨. 大规模直驱风机接入对系统暂态功角稳定性的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
WANG Yang. Influence of large-scale direct drive fan connection on system transient power angle stability [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [13] 熊焱. 非同步机电源对暂态稳定性影响机理分析[D]. 济南: 山东大学, 2021.
XIONG Yi. Power system transient stability mechanism analysis with unconventional generators [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [14] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832-3842.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—Part I: theoretical foundation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842.
- [15] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043-4051.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—Part II: factors affecting transient angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051.
- [16] VITAL E, O' MALLEY M, KEANE A. Rotor angle stability with high penetrations of wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 353-362.
- [17] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999-1005.
JIANG Huilan, WU Yuzhang, ZHOU Zhaoqing, et al. A

- method to analyze the transient angle stability of multi-machine system with DFIG-based wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 999-1005.
- [18] HE X Q, GENG H. Transient stability of power systems integrated with inverter-based generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 553-556.
- [19] LIU Y S, HUANG M, ZHA X M, et al. Stability analysis of PLL influenced by control loops in grid-connected converters under fault disturbance [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 239-248.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 黎晓,刘崇茹,辛蜀骏,等.暂态功角稳定与暂态电压稳定的耦合机理分析与耦合强度评估指标[J].中国电机工程学报, 2021,41(15):5091-5107.
- LI Xiao, LIU Chongru, XIN Shujun, et al. Coupling mechanism analysis and coupling strength evaluation index of transient power angle stability and transient voltage stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5091-5107.
- [26] 屠竞哲,何俊,王超,等.考虑光伏动态特性的功角电压交互失稳机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(13):157-165.
- TU Jingzhe, YI Jun, WANG Chao, et al. Analysis on instability mechanism of power angle and voltage interaction considering dynamic characteristics of photovoltaic generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 157-165.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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):1687-1702.
- 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): 1687-1702.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] BROCHU J, LAROSE C, GAGNON R. Validation of single- and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 532-541.
- [33] 周明儒,林武忠,倪明康,等.奇异摄动导论[M].北京:科学出版社,2014.
- ZHOU Mingru, LIN Wuzhong, NI Mingkang, et al. Introduction to singular perturbation [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [34] 王洁聪.含MMC的交直流系统建模与稳定性分析[D].北京:华北电力大学,2021.
- WANG Jiecong. Modeling and stability analysis of AC/DC system with MMC [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [35] KRUPA M, SZMOLYAN P. Geometric analysis of the singularly perturbed planar fold [M]// MILLER W, JONES C K R T, KHIBNIK A I. Multiple-time-scale dynamical systems. New York, USA: Springer, 2001: 89-116.
- [36] KRUPA M, SZMOLYAN P. Extending geometric singular perturbation theory to nonhyperbolic points-fold and canard points in two dimensions [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2001, 33(2): 286-314.
- [37] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3): 431-438.

黎 晓(1993—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定与控制。E-mail:lixiao000@yeah.net

李剑泽(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源并网稳定性分析。E-mail:2291128250@qq.com

苏晨博(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源并网稳定性分析。E-mail:scb2636@foxmail.com

刘崇茹(1977—),女,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:交直流混合系统分析与仿真、运行与控制。E-mail:chongru.liu@ncepu.edu.cn

(编辑 章黎)

Influence Mechanism Analysis of Phase Locked Loop Out-of-synchronization on Transient Power Angle Stability of Synchronous Generators

LI Xiao¹, LI Jianze¹, SU Chenbo¹, WANG Jiecong², LIU Chongru¹, ZHENG Le¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A large number of renewable energy will be integrated into the power grid through power converters in the future, forming a new power system in which renewable energy units and synchronous generators coexist, which makes the problem of transient power angle stability of the power system more complex. The relationship between the existence of the phase-locked loop (PLL) equilibrium point of the converter and the transient power angle stability of the synchronous generator is analyzed. Based on the geometric singular perturbation theory, for the system with converters and synchronous generators, the reasons for the coupling between the output angle of PLL and the power angle of synchronous generator caused by the loss of equilibrium point are analyzed. It reveals the mechanism that this coupling is more likely to occur in the power grid penetrated by high proportion of converters. This paper analyzes in detail the two influence mechanisms of PLL on the synchronous stability of the generator after the converter loses the equilibrium point. The first one is that the instability of PLL briefly increases the deceleration area of the synchronous generator, resulting in the deceleration of the generator power angle. The second one is that the instability of PLL increases the acceleration area of the synchronous generator, resulting in the rapid instability of the generator power angle. The conditions that PLL restricts the power angle stability of the generator are described theoretically, which has the reference significance for the research of power angle stability region in the new power system.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5105-202018129A-0-0-00).

Key words: voltage source converter; phase-locked loop; transient power angle stability; synchronous generator

