

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201080

弱电网下电压源型变换器静态稳定性分析

郑超航, 李华

(内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 电压源型变换器(Voltage Source Converter, VSC)作为新能源发电的并网接口广泛地应用于电力系统。以单台VSC经线路阻抗并入无穷大电网为例, 推导弱电网下VSC功率输出特性。基于VSC系统阻尼转矩模型得出阻尼系数直接决定系统静态稳定, 同步系数通过影响阻尼功率相位间接影响系统稳定。根据阻尼功率与同步功率之间的相位关系解释了VSC系统静态失稳机理, 并且利用Bode图研究了系统参数与运行工况对系统稳定性影响。结果表明, 电流环比例增益越低、锁相环带宽越窄或无功功率运行不合理, VSC系统将面临静态失稳风险。同时在Matlab/Simulink中搭建VSC并入弱电网模型, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 电压源型变换器; 静态稳定性; 功率特性方程; 阻尼转矩模型

Static stability analysis of voltage source converters connected to a weak grid

ZHENG Chaohang, LI Hua

(College of Electric Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010010, China)

Abstract: A Voltage Source Converter (VSC), as a grid connection interface for new energy generation, is widely used in power systems. A single VSC connected to an infinite grid via line impedance is built as a typical system. The output active power characteristics of the VSC under a weak grid condition are studied. On this basis, the damping and torque model of VSC system is established, and the damping coefficient directly determines the static stability of the system. The synchronizing coefficient indirectly affects the system stability by affecting the damping power phase. According to the phase relationship between the damping power and the synchronous power, the static stability of the VSC system is explained, and the influence of the parameters and operating conditions on the system stability is studied using the Bode diagram. It is indicated that the lower the current loop proportional gain, the narrower the PLL bandwidth. With unreasonable reactive power operation, the VSC system will face the risk of static instability. The grid-tied VSC system is built on Matlab/Simulink to verify the correctness of the theoretical analysis.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2016BS0508) and Graduate Scientific Research Innovation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. S20191142Z).

Key words: Voltage source converter (VSC); static stability; power characteristics equation; damping and torque model

0 引言

随着化石能源的消耗和人们环保意识的增强, 大规模开发利用可再生能源已经成为了各国的能源发展战略。近年来, 以风能、太阳能为代表的新能源发电得到迅速发展, 并且在电力系统中占有了重要比例^[1-2]。与传统并网方式不同, 风力、光伏发电通常需要经电压源型变流器(VSC)并入电网^[3-4], 同

时基于VSC的柔性直流输电(VSC-HVDC)具有灵活调节有功/无功功率的优点^[5-6]。可以预见, 随着新能源渗透率的增加与电网结构的变革, VSC将广泛应用于电力系统。因此电力电子装置接入的同时保证电网安全稳定运行, 研究和探索VSC接入所引发的电力系统稳定性问题至关重要。

目前随着VSC在电网中增加, 给电力系统带来了许多新的稳定性问题, 如次同步振荡^[7-8], 电压稳定^[9-10]等。与此同时, 弱电网下VSC的静态稳定性问题也得到了关注。文献[11]指出VSC的静态稳定性是指将VSC看成发电设备时, 在有功功率输入、

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目资助(2016BS0508); 内蒙古自治区研究生科研创新项目资助(S20191142Z)

输出不平衡的状况下系统是否存在稳定的工作点问题。文献[12]通过仿真分析得出 VSC 系统输送功率较大或电压跌落能够导致系统发生失稳。文献[13]研究了在短路比低于临界阈值时, VSC 将出现类似于同步发电机的功角失稳现象, 得出影响 VSC 系统静态稳定性的关键因素是 PCC 节点到 VSC 之间的阻抗。然而上述研究仅从仿真层面研究了 VSC 静态失稳现象。文献[14]将 VSC 等效成同步发电机, 分析了 VSC 并网系统的静态稳定性。文献[15-16]建立了 VSC 并入大电网的空间状态方程, 采用特征值分析法研究了不同的电网强度与控制参数对 VSC 输出功率的影响。以上分析将 VSC 等效成同步发电机, 未能分析 VSC 功率输出特性。然而文献[11]指出 VSC 在运行过程中呈现的是电流源特性而非电压源特性, 并建立了 VSC 电流-功率特性方程, 解释了 VSC 的功率输出特性。文献[17]分析了系统侧电压跌落时低电压穿越(LVRT)控制下 VSC 的静态稳定, 得出低电压穿越增益、线路电感与电压跌落程度对静态稳定具有较大影响, 同时根据 $I_d - V_t$ 曲线在相图上是否有交点判断系统静态稳定性。文献[18]得出在 VSC 出现严重故障期间, 如果 VSC 注入的有功与无功电流不合适, 系统将出现失稳现象。上述主要研究了 VSC 系统处于故障运行状态时系统的静态稳定, 与正常运行状态有所不同。文献[19]分析了 VSC 并网系统的功率特性方程, 得出 $\partial P/\partial i_d > 0$, 可以作为判断弱电网下 VSC 功率稳定性的判据。但忽略了锁相环(PLL)对 VSC 系统静态稳定性的影响。

大多数关于静态稳定性研究并未考虑 VSC 的功率特性, 同时忽略控制器参数对静态稳定性的影响。鉴于此, 本文以 VSC 并入大电网为研究对象, 推导了 VSC 功率特性方程及系统各环节数学模型, 建立了 VSC 系统的阻尼转矩模型, 揭示了 VSC 并网系统静态失稳机理, 同时分析了不同参数与运行工况对系统静态稳定性的影响。首先根据 VSC 等效电路与工作原理, 得出 VSC 的功率-电流特性方程, 在此基础上建立 VSC 并网系统的传递函数模型; 然后引入阻尼转矩模型分析 VSC 系统静态失稳机理。并且通过 Matlab/Simulink 仿真平台搭建 VSC 并入电网模型验证理论分析的正确性。

1 VSC 的工作原理及有功功率输出特性

1.1 VSC 工作原理及等效电路

VSC 经线路阻抗并入大电网及其控制结构如图 1 所示。图中: P_{in} 表示注入 VSC 直流侧的有功功率; P_{out} 表示 VSC 交流侧功率输出; u_{abc} 表示逆变器输出电压; i_{abc} 表示逆变器输出电流; V_t 表示 PCC 点处电压; V_g 表示无穷大电源电压; L 表示逆

变器滤波电感; L_g 表示电网等效电感; U_{dcref} 与 U_{dc} 分别表示直流侧电压参考值与实际值; i_{dref} 与 i_{qref} 分别表示 d 轴、 q 轴电流参考值; i_d 与 i_q 分别表示 VSC 输出电流在旋转坐标系下的 d 轴、 q 轴分量。 u_d 与 u_q 分别表示电流环控制器输出的 d 轴、 q 轴电压; V_{td} 与 V_{tq} 分别表示 PCC 点处 d 轴、 q 轴电压; θ_{pll} 为锁相环的输出。

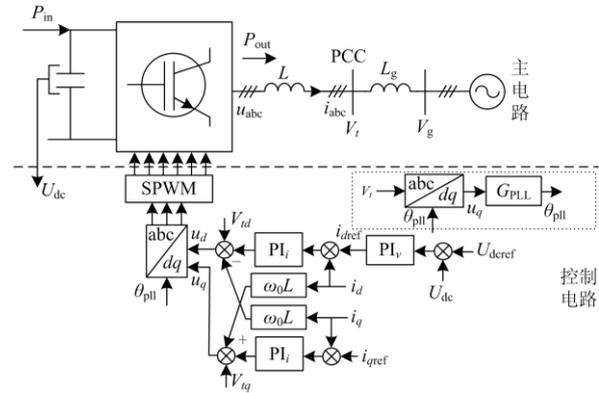


图 1 VSC 并网系统及其控制

Fig. 1 System configuration and its control of VSC

从图 1 可以看出, VSC 并网系统有功功率平衡控制的基本原理为: 当 DC 侧的输入功率 P_{in} 与 VSC 的输出功率 P_{out} 不平衡时, 不平衡的功率 ΔP 将导致 DC 侧电压 U_{dc} 发生变化, 直流侧电压 U_{dc} 将在 PI_v 控制器的作用下维持 U_{dc} 等于 U_{dcref} , 并产生电流内环控制指令 i_{dref} , d 轴电流 i_d 同样在 PI_i 控制器的作用下实现无差跟踪, i_d 的变化将导致 VSC 输出有功功率 P_{out} 变化, P_{out} 变化又将反过来影响 ΔP 大小, PI 控制器作用就是在这不断变化的过程寻找到稳定运行点, 使 VSC 输入稳定的有功功率。

本文重点分析 VSC 并网系统的静态稳定性, 因此对所研究的模型进行如下简化假设。

1) 不考虑 VSC 器件的损耗。认为 VSC 只进行了功率传递, 而没有消耗功率。
2) 不考虑滤波电容的影响。交流侧滤波电容 C 对功率振荡具有较大的阻抗, 因此不考虑滤波电容对系统的影响。

3) 实际电网存在运行方式改变, 潮流变化等工况, 并且 PCC 处多台并网逆变器同时运行。本文主要研究 VSC 与电网之间的功率特性, 因此将多台逆变器等效成以单台逆变器; 且忽略电网阻抗的变化, 仅采用电网等值电抗来描述电网强度, 所以电网将被等效成电感与理想电压源的串联。

基于上述假设, 本文所研究的 VSC 并网系统能够等效成图 2 所示。其中 X_g ($X_g = \omega_0 L_g$, $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$)

为 PCC 点到无穷大电网之间的等值电抗。

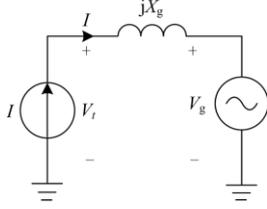


图 2 VSC 单机无穷大系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single-machine infinite system of VSC

1.2 弱电网下 VSC 的电流-功率输出特性

VSC 为了能够利用经典 PI 控制策略达到无差跟踪的目的, 需要将 abc 静止坐标下电气量经 Park 变换转化至 dq 旋转坐标系下进行控制。本文假设无穷大电网处电压相位 $\theta_g=0^\circ$, 其对应的坐标系称为同步旋转坐标系 (Synchronous rotating reference frame, SRF), 设 PCC 点处电压相位为 θ_{pcc} , 其对应的坐标系称为 PCC 旋转坐标系 (PCC rotating reference frame, PCC-RF)。图 3 为两者之间的关系, 其中 x 轴与 y 轴表示 SRF 坐标系、 d 轴与 q 轴表示 PCC-RF 坐标系。

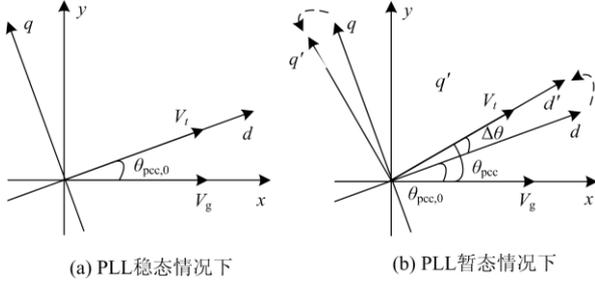


图 3 同步旋转坐标与 PCC 旋转坐标系关系图

Fig. 3 Corresponding diagram of SRF and PCC-RF

根据图 3(a)可知, 稳定状态下 PCC-RF 所示向量可以通过式(1)转换至 SRF 侧。

$$\mathbf{x} = x_{dx} + jx_{qy} = (x_{dpcc} + jx_{qpcc})e^{j\theta_{pcc,0}} \quad (1)$$

式中, \mathbf{x} 可以表达电压向量或者电流向量。在 PCC-RF 坐标系下, VSC 交流侧 d 轴电流 i_{dpcc} 代表有功电流, q 轴电流 i_{qpcc} 代表无功电流。因此 VSC 注入 PCC 处的电流可以表示为 $i_{pcc}=i_{dpcc}+ji_{qpcc}$ 。考虑式(1)可得注入电网的电流为

$$\mathbf{i} = i_{dx} + ji_{qy} = (i_{dpcc} + ji_{qpcc})e^{j\theta_{pcc,0}} \quad (2)$$

以无穷大电源 $V_g \angle 0^\circ$ 为基准, 结合电路原理, 可得 PCC 点处电压在 SRF 坐标系下为

$$V_t = V_t e^{j\theta_t} = V_g + jX_g (i_{dpcc} + ji_{qpcc})e^{j\theta_{pcc}} \quad (3)$$

式中: V_t 为 PCC 点处电压幅值; θ_t 为 PCC 点处电压相角; θ_{pcc} 为锁相环输出的角度。

稳态时, 锁相环输出的角度为 PCC 点处的电压角度, 即满足

$$\theta_t = \theta_{pcc,0} \quad (4)$$

联合考虑式(3)、式(4), 可得 PCC 处电压幅值 V_t 的表达式为

$$V_t = \sqrt{V_g^2 - X_g^2 i_d^2} - X_g i_q \quad (5)$$

从式(5)可以看出, VSC 的输出电压受输出电流影响。因此, 稳态时 VSC 输出功率 P_{out} 可表示为

$$P_{out} = \frac{3}{2} V_t i_d = \frac{3}{2} (\sqrt{V_g^2 - X_g^2 i_d^2} - i_d i_q X_g) \quad (6)$$

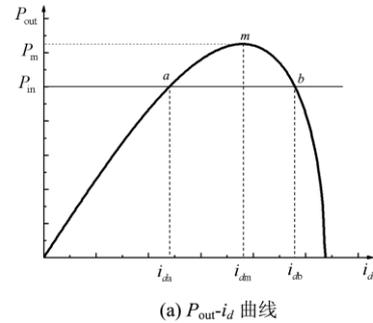
同时根据式(3)、式(4)还可以得到 d 轴电流 i_d 与相角 θ_t 的关系为

$$i_d = \frac{V_g \sin(\theta_t)}{X_g} \quad (7)$$

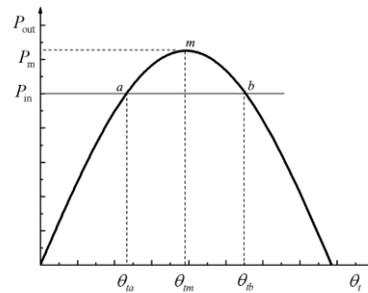
将式(7)代入式(6), 可得 P_{out} 与 θ_t 之间关系为

$$P_{out} = \frac{3V_g^2}{4X_g} \sin(2\theta_t) - \frac{3}{2} V_g i_q \sin(\theta_t) \quad (8)$$

式(6)与式(8)分别代表 VSC 的功率-电流、功率-相角输出特性, 在此基础上可以得到相应的 $P_{out}-i_d$ 与 $P_{out}-\theta_t$ 功率特性曲线, 图 4 为 $i_q=0$ 时所对应的功率特性曲线。



(a) $P_{out}-i_d$ 曲线



(b) $P_{out}-\theta_t$ 曲线

图 4 $i_q=0$ 时 VSC 功率特性曲线

Fig. 4 Power characteristic curve of VSC under $i_q=0$

通常情况下, 新能源发电接入电网薄弱环节处^[20-21]。电网强度常用短路比 SCR 进行衡量^[22], 其表达式为

$$SCR = \frac{S_{ac}}{P_{out}} = \frac{V_t^2}{X_g P_{out}} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得

$$SCR = \frac{V_t^2}{X_g P_{out}} = \frac{4V_t^2}{3V_g^2 \sin(2\theta_t) - 6V_g i_q X_g \sin(\theta_t)} \quad (10)$$

由式(10)可知, 若 VSC 处于单位功率因素运行, 并维持端电压 V_t 恒定, 则短路比越低(即电网越弱), 端电压相角 θ_t 越大。根据图 4(b)可以看出, 随着 θ_t 增大, VSC 趋向于静稳极限。进而得出弱电网运行条件下的 VSC 将面临静态失稳的风险。考虑到 VSC 的运行状态取决于控制系统, 因此 VSC 的静态稳定性不仅受功率特性方程制约, 还受控制器参数及工况等条件影响。

2 VSC 并网系统建模

由图 1 可知, VSC 并网系统模型由主电路与电压控制环、电流控制环、锁相环组成。

考虑到 PLL 的动态过程, 由图 3(b)可得, PCC-RF 与 $d'q'$ 坐标系满足式(11)。

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{d'q'} + \mathbf{j}\mathbf{x}_{q'} = (\mathbf{x}_d + \mathbf{j}\mathbf{x}_q) e^{j\Delta\theta} \quad (11)$$

$\Delta\theta$ 表述了 PLL 的动态过程, 对式(11)线性化可得式(12)。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{x}_{d'q'} = \mathbf{x}_{dq} e^{j\Delta\theta} \approx \\ &(\mathbf{x}_{dq,0} + \Delta\mathbf{x}_{dq})(1 + \mathbf{j}\Delta\theta) \approx \mathbf{x}_{dq,0} + \Delta\mathbf{x}_{dq} + \mathbf{j}\mathbf{x}_{dq,0}\Delta\theta \\ \Rightarrow \Delta\mathbf{x} &= \Delta\mathbf{x}_{dq} + \mathbf{j}\mathbf{x}_{dq,0}\Delta\theta \end{aligned} \quad (12)$$

本文采用的是三相同步锁相环, 其数学模型为

$$V_{tq} = V_{t,0} \sin(\theta_t - \theta_{pcc}) \quad (13)$$

$$\theta_{pcc} = V_{tq} \left(K_{ppll} + \frac{K_{ipll}}{s} \right) \frac{1}{s} \quad (14)$$

式中, K_{ppll} 与 K_{ipll} 分别为锁相环比例增益与积分增益。根据式(13)可得角度扰动与电压关系为

$$\Delta\theta_t \approx \frac{X_g \Delta i_d}{V_{t,0}} \quad (15)$$

根据图 1 主电路可知, 当直流侧输入有功功率 P_{in} 与输出有功功率 P_{out} 不相等时, 将导致 DC 侧电压发生改变, 变化规律符合:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{P_{in} - P_{out}}{U_{dc}} \quad (16)$$

对式(16)进行线性化处理, 其在拉普拉斯域的表达式为

$$\Delta U_{dc}(s) = \frac{\Delta P_{in}(s) - \Delta P_{out}(s)}{sCU_{dc,0}} \quad (17)$$

根据图 1 控制电路可知, 直流电压 U_{dc} 波动在电压环 PI_v 的作用下, 将影响电流环的参考值 i_{dref} , 且满足

$$\Delta i_{dref}(s) = \left(K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \Delta U_{dc}(s) \quad (18)$$

电流环的输入/输出量位于 PCC-RF 坐标系下, 考虑到 PLL 的动态过程。结合式(12), 实际 d 轴输出电流 i_d 满足如下关系。

$$\Delta i_{d'}(s) = \Delta i_d - \Delta\theta i_{q,0} = G_i \Delta i_{dref}(s) - \Delta\theta i_{q,0} \quad (19)$$

式中^[23], $G_i = \frac{PI_i}{PI_i + sL}$ 。

由式(6)可知, d 轴电流 i_d 影响 VSC 的有功功率输出。式(6)线性化处理后, 其在拉普拉斯域上的表达式为

$$\Delta P_{out}(s) = G_p \Delta i_d(s) = \frac{3}{2} \left(\frac{V_g^2 - 2X_g^2 i_{d,0}^2}{\sqrt{V_g^2 - X_g^2 i_{d,0}^2}} - X_g i_{q,0} \right) \Delta i_d(s) \quad (20)$$

基于上述分析, 联合考虑式(14)一式(20), 可得 VSC 并网系统的传递函数框图如图 5 所示。

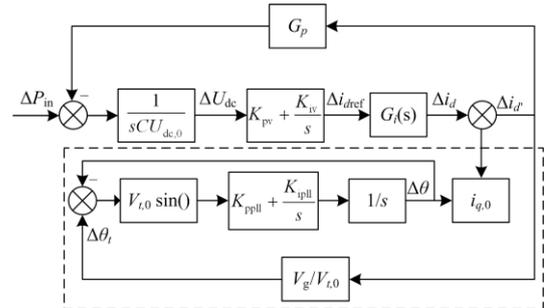


图 5 VSC 的有功功率控制框图

Fig. 5 Active-power control diagram of VSC

3 VSC 系统惯性、阻尼及同步系数

根据 VSC 运行机理及数学模型可知, 当 VSC 输入/输出功率不平衡时, DC 侧电容电压的偏差将改变 AC 侧有功电流(即 d 轴电流 i_d), i_d 的改变将带来 VSC 输出功率的变化, 进而维持系统平衡。由此可以看出, 有功电流 i_d 是实现系统功率平衡的关键变量。

传统发电系统常采用阻尼转矩法分析静态稳定性问题^[24]。结合 VSC 运行原理, 定义 VSC 系统的惯性、阻尼与同步转矩系数, 如图 6 所示。

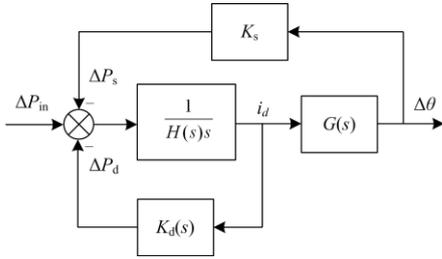


图 6 VSC 系统阻尼转矩模型

Fig. 6 Damping and torque model of VSC system

综合考虑图 5 与图 6 可得

$$\begin{cases} H(s) = \frac{CLU_{dc,0}s^3 + CK_{pi}U_{dc,0}s^2 + CK_{ii}U_{dc,0}s}{K_{pv}K_{pi}s^2 + (K_{iv}K_{pi} + K_{ii}K_{pv})s + K_{iv}K_{ii}} \\ K_d(s) = G_p \\ K_s(s) = sH(s)i_{q,0} \\ G(s) = \frac{X_g}{V_{r,0}} \frac{K_{ppll}s + K_{ipll}}{s^2 + K_{ppll}s + K_{ipll}} \end{cases} \quad (21)$$

惯性系数 $H(s)$ 反映了 VSC 有功功率变化对系统有功电流 i_d 的影响, 阻尼系数 $K_d(s)$ 表示有功电流的变化产生的阻尼功率, 同步转矩系数 $K_s(s)$ 表示由于 PCC 处角度变化产生的同步功率, $G(s)$ 表示 i_d 与 PCC 处电压角度的关系。

4 VSC 系统静态稳定分析

4.1 VSC 系统静态稳定机理分析

由图 6 可知, VSC 受到功率波动后, 系统将产生阻尼功率 ΔP_d 与同步功率 ΔP_s 消除功率波动。由式(17)可知, $K_d(s)$ 是由功率特性方程决定的比例系数, 因此有功电流 Δi_d 与阻尼功率 ΔP_d 保持同相位。由于 PLL 采用的是 PI 控制器, 因此 PCC 处电压相位将滞后电流相位。图 7 为主导极点对应的功率之间的相位关系。其中 θ_i (规定逆时针为负值) 由惯性系数 $H(s)$ 决定, $\Delta\theta$ 由同步系数 $G(s)$ 与 $K_s(s)$ 决定。

由图 7(a)可以看出, VSC 系统有功功率发生正向波动, 当 $\theta_i > -\pi$ 时, 有功电流 i_d 也发生正向波动。

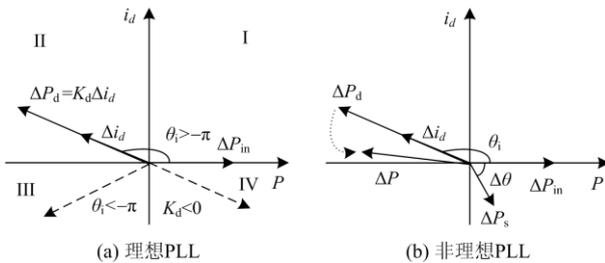


图 7 功率间相位关系

Fig. 7 Phase relationship between powers

若此时 $i_d < i_m$, 所对应的阻尼系数 $K_d(s) > 0$ (第 I、II 象限), VSC 具有正阻尼, 系统稳定运行; 若此时 $i_d > i_m$, 则阻尼系数 $K_d(s) < 0$ (第 IV 象限), 则 ΔP_d 助增 ΔP_{in} 的变化, 系统发生失稳现象。类似地, 当 $\theta_i < -\pi$ 时 (第 III 象限), 系统同样面临不稳定的风险。

由图 5 可知, 除了电压/电流控制器直接影响外, PLL 的动态过程也可能对 VSC 系统产生静态稳定性的问题, 如图 7(b)所示。由于 PLL 输出滞后, 系统受到角度 $\Delta\theta$ 的扰动后, 将产生滞后功率 ΔP_s , 从而导致系统总输出为 ΔP (阻尼功率 ΔP_d 与同步功率之和 ΔP_s)。若 ΔP_s 导致 ΔP 落入第 III 象限, 则系统发生静态失稳现象。综上可得阻尼功率 ΔP_d 的相位决定了系统是否能保持静态稳定, 同步功率 ΔP_s 通过影响 ΔP_d 的相位, 间接增大 VSC 系统静态失稳风险。因此 ΔP_{in} 、 ΔP_d 与 ΔP_s 之间的相位关系构成 VSC 静态失稳的原因。由此可见阻尼系数 $K_d(s)$ 与同步转矩系数 $K_s(s)$ 共同影响 VSC 的静态稳定。

若考虑多台 VSC 工况, 对于每台 VSC 而言, 其模型仍可以用图 5 进行描述。但是每台 VSC 的输出功率将受到其他 VSC 注入电流的影响^[11], 导致式(12)的功率特性方程发生变化。然而由式(20)与式(21)可知, 确定的工况对应的功率特性系数为常量, 由此可见, 多台 VSC 主要影响系统的阻尼系数 $K_d(s)$ 大小。因此基于 ΔP_{in} 、 ΔP_d 与 ΔP_s 之间的相位关系所得结论也适用于多台 VSC 静态稳定性的研究。

4.2 VSC 系统静态稳定影响因素分析

由上述分析可得, 功率之间的相角关系决定了 VSC 静态稳定性。下文依据图 6 所示模型, 利用 Bode 图得到主导极点所对应功率的相位关系, 并分析系统参数与运行工况对 VSC 系统稳定性的影响。

同时, 为了验证分析的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的单机 VSC 并入无穷大弱电网模型, 系统主电路参数如表 1 所示, 控制器参数如表 2 所示。为了避免暂态过程对仿真结果的影响, 在 $t=0.2$ s 时向系统引入扰动。

表 1 VSC 系统主电路参数

Table 1 Main circuit parameters of VSC system	
参数	值
电网电压/V	380
电网频率/Hz	50
额定功率/MW	0.5
电网等效电感/mH	20
滤波电感/mH	2.6
DC 侧电容/ μ F	9 700
直流侧电压/V	780

表 2 VSC 系统控制器参数

Table 2 Controller parameters of VSC system

参数	值
电流环比例系数 K_{pi}	1
电流环时间常数 K_{ti}	50
电压环比例系数 K_{pv}	6
电压环时间常数 K_{tv}	80
锁相环比例系数 K_{ppll}	60
锁相环时间常数 K_{tpll}	500

1) 电流环比例增益

由式(21)可知, 电流环比例增益通过影响 VSC 系统惯性系数 $H(s)$ 与同步系数 $K_s(s)$, 从而决定系统静态稳定特性。图 8 为未考虑 PLL 动态影响下 VSC 系统 Bode 图, 从相角 Bode 图中看出, 随着比例系数 K_{pi} 的减小, 系统相角裕度逐渐减小, 且在 $K_{pi}=0.85$ 时, 系统达到临界稳定状态; 由幅值 Bode 图看出, K_{pi} 的改变几乎不影响系统振荡频率。同时得出 VSC 系统在无锁相环干扰情况下, 系统仍存在静态失稳的风险。

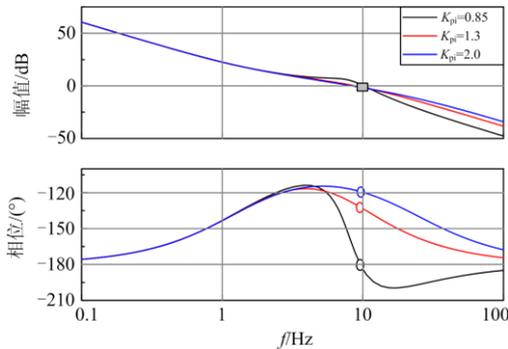


图 8 VSC 系统 Bode 图(未考虑 PLL 的影响)
Fig. 8 Bode diagram of VSC system (ideal PLL)

图 9 考虑 PLL 动态影响下 VSC 系统 Bode 图。从结果可以看出, VSC 在 PLL 影响下, 相角裕度明显下降。特别是 $K_{pi}=1.3$ 时, 在不考虑 PLL 影响下

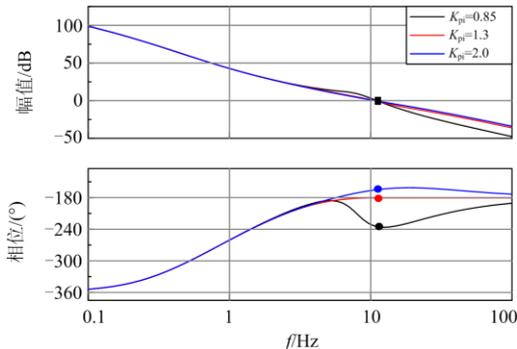


图 9 VSC 系统 Bode 图(考虑 PLL 的影响)
Fig. 9 Bode diagram of VSC system (non-ideal PLL)

处于静态稳定状态(位于第 II 象限), 考虑到 PLL 动态作用后, 此运行点变成临界稳定状态(位于 P 轴); 同样 $K_{pi}=0.85$ 时, 系统由临界稳定变成失稳状态(第 III 象限)。由此得出, PLL 的滞后效应加剧了 VSC 系统静态稳定风险。

图 10 给出了不同电流环比例系数 K_{pi} 对 VSC 系统静态稳定性的时域仿真结果。从结果可以看出, 随着 K_{pi} 减小, 系统由静态稳定进入失稳状态, 然而振荡频率基本不变。仿真结果与图 9 理论分析保持一致。因此适当地增大电流环比例系数 K_{pi} 有助于提高系统静态稳定。

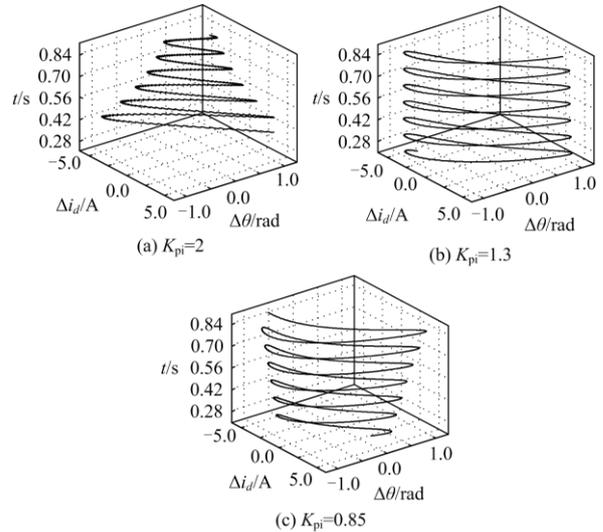


图 10 不同电流环比例系数下 PCC 点电压角度
Fig. 10 PCC point voltage angle under different K_{pi}

2) PLL 带宽

由图 7 可知, 由于 PLL 的动态过程导致了系统功率相位变化, 进而影响系统的运行状态。利用小信号分析法得到系统主导极点 $s = -5.4 \pm j94.24$, 图 11 反映了不同 PLL 带宽 f_{BW} 对主导极点的影响。从结果可以看出, 带宽 f_{BW} 越小, 相位滞后越明显,

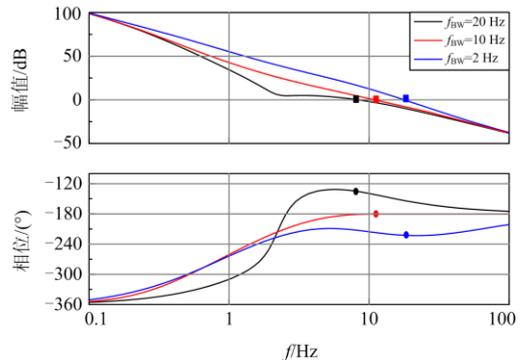


图 11 VSC 系统 Bode 图
Fig. 11 Bode diagram of VSC system

系统越倾向进入第 III 象限。因此适当地增大 PLL 带宽有助于 VSC 系统静态稳定。

图 12 为不同 PLL 带宽 f_{BW} 对 VSC 系统静态稳定性的影响。由结果可得, 随着带宽 f_{BW} 减小, PLL 的动态过程使系统进入第 III 象限运行, 从而导致 VSC 系统发生静态失稳现象。仿真结果与理论分析保持一致。

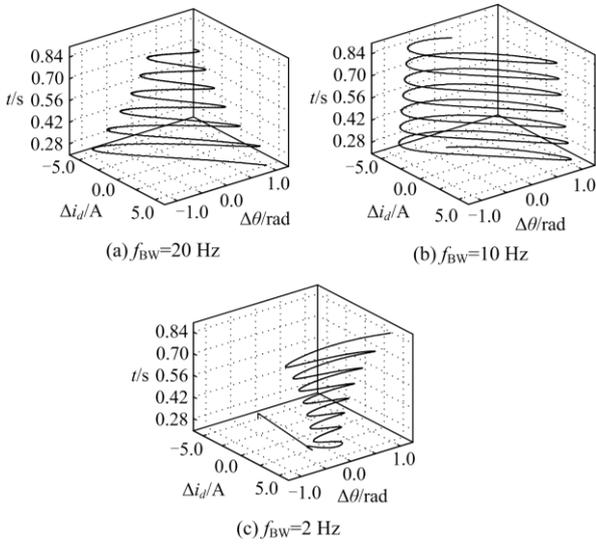


图 12 不同 PLL 带宽下 PCC 点电压角度

Fig. 12 PCC point voltage angle under different f_{BW}

3) 电网强度

由式(10)与式(21)可知, 电网强度主要影响 VSC 系统阻尼系数 $K_d(s)$ 。图 13 给出了不同电网强度下 VSC 系统 Bode 图。从结果可以看出, 随着电网强度变弱, 系统相位裕度逐渐减小; 当 $SCR=2.1$ 时, 对应的阻尼系数 $K_d(s) < 0$, VSC 处于第 IV 象限, 进而系统发生失稳现象。

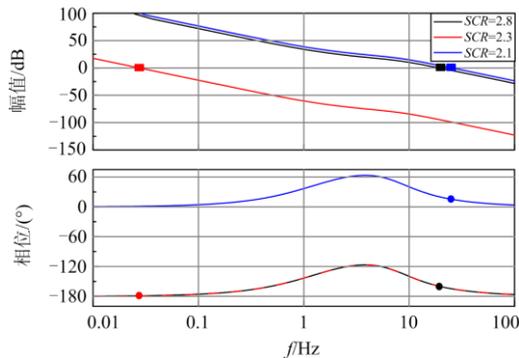


图 13 VSC 系统 Bode 图

Fig. 13 Bode diagram of VSC system

图 14 给出了不同电网强度 SCR 对 VSC 系统静态稳定性影响的时域仿真结果。根据仿真结果可得

出, 当 SCR 由 2.8 减至 2.3 时, 系统有静态稳定变成临界状态, 同时振荡频率明显减小。当 SCR 为 2.1 时, 系统处于静态失稳状态。由此看出, 电网强度对系统阻尼与振荡频率具有较大的影响。仿真结果与图 13 基本吻合。因此得出提高电网强度有利于 VSC 系统静态稳定。

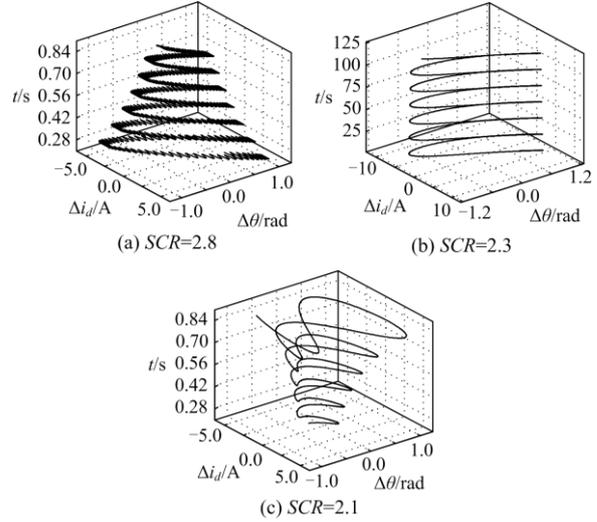


图 14 不同电网强度下 PCC 点电压角度

Fig. 14 PCC point voltage angle under different SCR

4) 不同运行工况

实际运行过程中 VSC 受前端输入功率 P_{in} 或调度假指令影响可能导致 VSC 处于不同的运行点, 下面主要分析不同的输入功率 P_{in} 与无功指令电流 i_{qref} 对 VSC 系统稳定性的影响。

(1) 有功功率 P_{in} 对 VSC 并网系统静态稳定的影响。由式(20)与式(21)可知, 随着有功功率的增加, 阻尼系数 $K_d(s)$ 减小。当 $K_d(s)$ 小于零时, 系统出现负阻尼, 导致 VSC 系统静态失稳。图 15 与图 16 为不同 P_{in} 对 VSC 系统静态稳定的影响。由结果看出, 随着有功功率增大, 系统相角裕度逐渐减小;

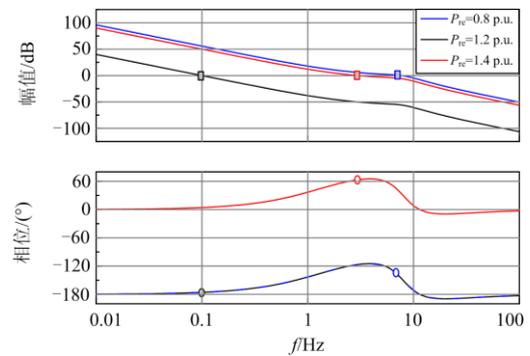


图 15 VSC 系统 Bode 图(未考虑 PLL 的影响)

Fig. 15 Bode diagram of VSC system (ideal PLL)

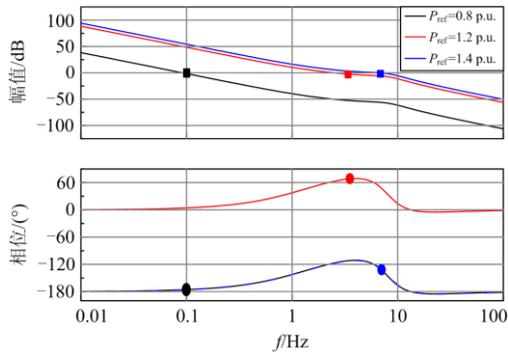


图 16 VSC 系统 Bode 图(考虑 PLL 的影响)

Fig. 16 Bode diagram of VSC system (non-ideal PLL)

当 $P_{ref}=1.4$ p.u.时, 主导极点落入第 IV 象限, 系统发生静态失稳现象。通过比较图 15 与图 16 的结果, 可发现不同有功功率下 PLL 动态过程对系统静态稳定性影响较小。

图 17 给出了不同有功出力对 VSC 系统静态稳定性影响的时域仿真结果。从仿真结果看出, 随着 VSC 有功出力增加, 系统阻尼降低; 当有功出力超过 1.2 p.u.时, VSC 具有负阻尼, 从而导致系统发生静态失稳现象。仿真结果与理论分析相对应。因此 VSC 过载运行将增大系统发生静态失稳风险。

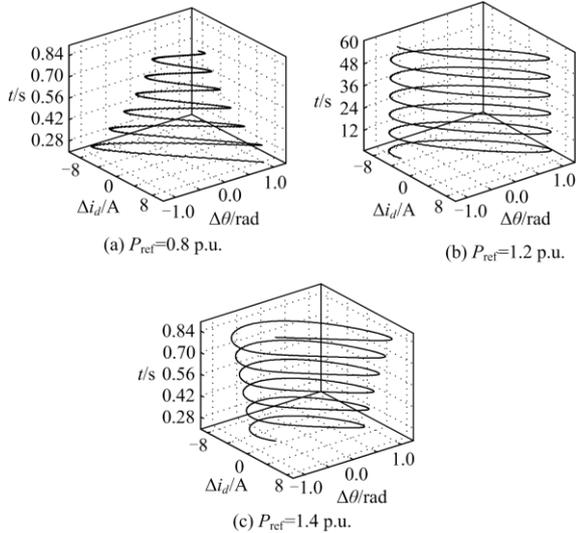


图 17 不同有功功率下 PCC 点电压角度

Fig. 17 PCC point voltage angle under different active power (i_d)

(2) 无功电流 i_q 对 VSC 并网系统静态稳定的影响。由式(21)可知, 无功电流 i_q 主要影响系统阻尼系数 $K_d(s)$ 与同步系数 $K_s(s)$ 。根据式(16)得出: 当无功电流 $i_q < 0$ 时, VSC 向电网输送无功功率, 处于迟相运行(有利于 VSC 端电压的支撑)VSC 系统有功功率稳定域增大; 当 $i_q > 0$ 时, VSC 从电网吸收无功

功率处于进相运行(不利于 VSC 端电压的支撑), VSC 系统有功功率稳定域减小。图 18 与图 19 为不同无功电流下 VSC 系统 Bode 图。从图 18 可以看出, 当 VSC 系统迟相运行($i_{qref} < 0$) 时, 系统位于第 II 象限, 处于稳定运行状态; 但 $i_{qref} = -0.5$ p.u. 所对应的相角裕度小于 -0.2 p.u. 所对应的相角裕度, 由图 5 可知这主要是因为无功电流 i_q 在增大阻尼系数 $K_d(s)$ 的同时加快了电压外环的响应速度, 当电压外环与电流内环响应速度可比时, 系统将趋向失稳现象。当 VSC 系统进相运行($i_{qref} > 0$) 时, 系统位于第 IV 象限, 处于静态失稳现象。从图 19 可以看出, 由于 PLL 滞后效应, 导致 VSC 系统面临不稳定风险, 特别是当 $i_{qref} = -0.2$ p.u. 时, 系统发生静态失稳现象。

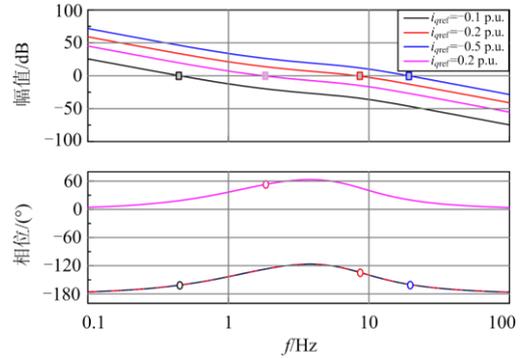


图 18 VSC 系统 Bode 图(不考虑 PLL 的影响)

Fig. 18 Bode diagram of VSC system (ideal PLL)

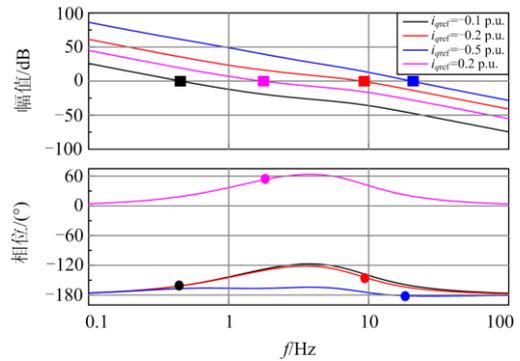


图 19 VSC 系统 Bode 图(考虑 PLL 的影响)

Fig. 19 Bode diagram of VSC system (non-ideal PLL)

图 20 的仿真结果验证了无功功率对 VSC 系统静态稳定性影响。从上述分析可知, VSC 无论吸收还是发出无功功率, 都有可能使得系统面临静态稳定性问题。从仿真结果看出, 当 VSC 从电网吸收无功功率时, 系统发生静态失稳现象。当系统发生 0.2 p.u. 无功功率时, 系统具有正阻尼处于稳定状态;

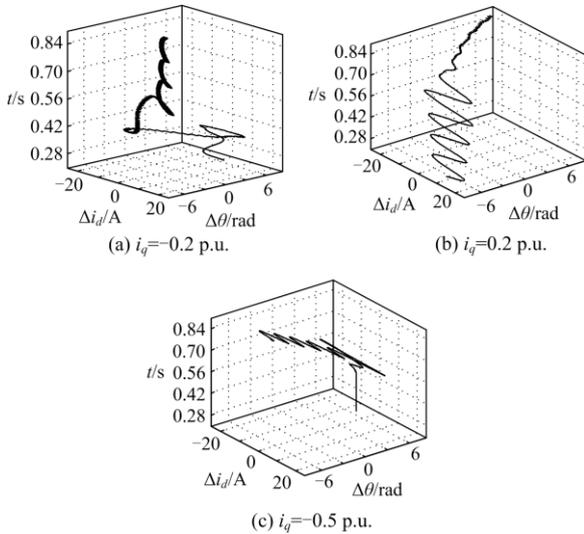


图 20 不同无功功率下 PCC 点电压角度

Fig. 20 PCC point voltage angle under different reactive power (i_q)

当系统增发至 0.5 p.u.无功时, VSC 发生了非周期失稳现象。由此看出适量地增发无功有助于系统稳定性提高。

5 结论

本文基于 VSC 接入弱电网为研究对象, 推导了 VSC 输出功率方程, 建立了 VSC 系统阻尼转矩模型, 分析了导致 VSC 系统发生静态稳定性问题的原因, 及运行参数与工况对系统静态稳定性的影响, 得出如下结论:

1) VSC 系统静态稳定性不仅受功率特性方程的制约, 同时受控制参数的影响, 并且在理想锁相条件下, VSC 系统仍面临静态失稳的风险;

2) 基于 VSC 阻尼转矩模型, 引入了惯性系数、阻尼系数与同步系数概念, 其中阻尼系数与同步系数决定了极点的位置, 当主导极点位于第 I、II 象限时, VSC 系统处于静态稳定状态;

3) 弱电网条件下, 适当提高电流环比例增益、增加 PLL 带宽或增发无功功率, 有利于提高 VSC 系统静态稳定性。

参考文献

- [1] 国家能源局[R/OL]. [2020-07-07]. http://www.nea.gov.cn/2020-07/07/c_139194682.htm. National Energy Administration[R/OL]. [2020-07-07]. http://www.nea.gov.cn/2020-07/07/c_139194682.htm.
- [2] 周强, 马彦宏, 沈琛云, 等. 新时期中国西北地区新能源可持续发展反思与建议[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 78-84.

ZHOU Qiang, MA Yanhong, SHEN Chenyun, et al. Reflection and suggestions on sustainable development of new energy in Northwest China in new era[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 78-84.

- [3] 徐殿国, 张书鑫, 李彬彬. 电力系统柔性一次设备及其关键技术: 应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 2-22.
- XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment power system and their key technologies: applications and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 2-22.
- [4] SHAH R, BARNESAND M, PREECE R. Modelling and dynamic analysis of a power system with VSC-HVDC radial plus strategy[C] // 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD2016), April 19-21, 2016, Glasgow, UK: 1-6.
- [5] FLOURENTZOUN, AGELIDISVG, DEMETRIADE-SGD. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [6] KIRAKOSYAN A, EL-SAADANY E F, EL MOURSIS M S, et al. DC voltage regulation and frequency support in pilot voltage droop-controlled multiterminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1153-1164.
- [7] 杜平, 万玉良, 项颂, 等. VSC 变流器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 44-49.
- DU Ping, WAN Yuliang, XIANG Song, et al. Study on key parameters of subsynchronous oscillation between VSC converter and weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 44-49.
- [8] 孙昕炜, 史华勃, 倪江, 等. 弱联系电网中 SVC 引起的次同步振荡分析及其抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 171-178.
- SUN Xinwei, SHI Huabo, NI Jiang, et al. Study of the sub-synchronous oscillation caused by SVC in weak-link power grids and its suppressing method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 171-178.
- [9] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.
- ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [10] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. DC-bus voltage control

- stability affected by AC-bus voltage control in VSCs connected to weak AC grid[J]. *IEEE Journal Emerging Selected Topics Power Electronics*, 2016, 4(2): 445-458.
- [11] 康勇, 林新春, 郑云, 等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(14): 4506-4515, 12.
KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(14): 4506-4515, 12.
- [12] 余昕越, 袁志昌, 田宝焯, 等. 混合双馈入高压直流系统最大传输功率控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(17): 109-120.
YU Xinyue, YUAN Zhichang, TIAN Baoye, et al. Control method of maximum transmission power for hybrid dual-infeed HVDC System[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(17): 109-120.
- [13] DIEDRICH V, BEEKMANN A, ADLOFF S. Loss of (angle) stability of wind power plants the under estimated phenomenon in case of very low short circuit ratio[C] // *Proceedings of the 10th International Work shop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, Aarhus, Denmark, 2011.
- [14] XIONG Liansong, ZHOU Fang, WANG Feng, et al. Static synchronous generator model: a new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(9): 6264-6280.
- [15] ZHOU J, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [16] EGEA-ALVAREZ A, FEKRIAS L S, HASSAN F, et al. Advanced vector control for voltage source converters connected to weak grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3071-3081.
- [17] ERLICH I, SHEWAREGA F, ENGELHARDT S, et al. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks[C] // *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-8.
- [18] 袁辉, 辛焕海, 王康, 等. 弱电网下远端严重电压跌落时逆变器并网失稳机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 38-43, 117.
YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Kang, et al. Instability mechanism analysis of inverters connected to weak grid during severe voltage sag on remote grid side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 38-43, 117.
- [19] 黄云辉, 周翩, 王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变换器功率控制稳定性[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(14): 93-99.
HUANG Yunhui, ZHOU Pian, WANG Longfei. Power control stability in vector control based voltage source converters connected to weak grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(14): 93-99.
- [20] 中国电力科学研究院. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
China Electric Power Research Institute. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 480—2010[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010.
- [21] HUANG Y, WANG D, SHANG L, et al. Modeling and stability analysis of DC-link voltage control in multi VSCs with integrated to weak grid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 1127-1138.
- [22] 毕天姝, 李景一. 基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险初筛[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 52-59.
BI Tianshu, LI Jingyi. Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 52-59.
- [23] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1061-1067.
WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [24] 齐江永. 汽轮机 DEH 系统延迟分析及其抑制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
QI Jiangyong. Research on DEH system delay analysis of turbine and its suppression method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

收稿日期: 2020-10-03; 修回日期: 2020-03-15

作者简介:

郑超航(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电稳定与控制; E-mail: 756104776@qq.com

李华(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电分析、稳定和控制。E-mail: lihua0806@qq.com

(编辑 姜新丽)