

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240610

功率控制型静止同步机设计及稳定性分析

马燕君¹, 李歆蔚¹, 马凯¹, 薛翼程², 张哲任², 徐政²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 双碳战略下, 新能源电源渗透率的不断提升导致电力系统转动惯量降低, 具备同步机的惯量和电压支撑能力成为并网变流器的重要运行需求。为此, 首先提出了一种基于跟网型框架的功率控制型静止同步机控制策略。该策略通过参考功率点跟踪环和电压电流双闭环实现对同步机电压频率支撑特性的模拟。然后, 建立了功率控制型静止同步机并网系统的状态空间模型, 分析了控制参数对系统稳定性的影响, 比较了所提控制与经典跟网型、构网型以及基于测量频率微分值(rate of change of frequency, RoCoF)的惯量控制的运行特性及适用场景。最后, 基于PSCAD/EMTDC搭建的电磁暂态仿真模型验证了所提静止同步机控制策略的有效性。

关键词: 静止同步机; 模块化多电平变流器; 频率控制; 电压控制; 小信号分析

Design and stability analysis of a power-controlled static synchronous machine

MA Yanjun¹, LI Xinwei¹, MA Kai¹, XUE Yicheng², ZHANG Zheren², XU Zheng²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the dual-carbon strategy, the increasing penetration of renewable energy has led to a reduction in the rotational inertia of power systems. Synchronous machine characteristics such as inertia and voltage support capabilities have become important requirements for grid-connected converters. To address this, a power-controlled static synchronous machine control strategy based on a grid-following framework is proposed. This strategy simulates the voltage and frequency support characteristics of a synchronous machine through a reference power point tracking loop combined with a dual-loop control of voltage and current. A state-space model of the power-controlled static synchronous machine system is then established to analyze the influence of control parameters on system stability. The operational characteristics and application scenarios of the proposed control strategy are compared with classic grid-following, grid-forming, and virtual inertia control based on measuring the rate of change of frequency (RoCoF). Finally, an electromagnetic transient simulation model based on PSCAD/EMTDC is developed to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20222092(036100KK52222023)).

Key words: static synchronous machine; modular multilevel converter; frequency control; voltage control; small-signal analysis

0 引言

近年来, 以风电、光伏为代表的可再生能源发电技术不断发展^[1-3]。预计到2030年, 中国的风电和光伏发电装机容量将达到37%, 而2050年将进

一步增长到68%^[4]。随着可再生能源装机容量和渗透率的不断提高, 新能源大规模接入挤占了常规机组开机空间, 新型电力系统的动态特性相比传统同步机电源主导的电力系统发生了深刻变化^[5-8]。新能源大多通过电力电子设备并网, 缺乏旋转电机具备的惯量支撑能力, 大量新能源电源接入会使系统惯量水平呈现不同程度的降低, 传统电力系统将逐渐演变为新能源高渗透的低惯量电力系统。低惯量电力系统惯量支撑能力弱、出力不确定性强、频率调

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJXM20222092(036100KK52222023)): “全能型静止同步机原理及关键技术”

节能力和阻尼特性差,致使频率稳定问题日益凸显^[9-10]。另一方面,由于风电和光伏发电具有随机性和波动性特点,且并网时多采用最大功率跟踪控制策略,通常不参与系统的频率电压调节,因而具有弱抗扰性。因此,为保障新型电力系统的安全稳定运行,通过改进并网变流器的控制策略使其具备同步机的惯性响应、电压支撑等运行特性,作为系统中的“静止同步机”提高新型电力系统的频率和电压支撑能力^[11-12],具有重要意义。

新能源并网变流器的控制策略主要分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)^[13]。其中构网型变流器直接控制并网点电压的幅值和相位,能够模拟同步发电机的有功-频率下垂和无功-电压控制,具备惯性响应特性和电压支撑能力,属于电压源型控制模式,最典型的控制是虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)^[14]。文献[15]提出了基于短期储能装置的VSG的基本设计框架;文献[16]提出了一种基于电流控制的VSG技术方案;文献[17]则提出了采用单层控制环的功率同步控制(power-synchronization control, PSC)策略。从数学模型上看,功率同步控制与有功-频率下垂控制^[18]具有等效性。文献[19]提出了基于电压-电流双闭环的VSG控制策略,能够限制故障期间VSG的电流。文献[20]提出了同步逆变器的概念,其在变流器控制设计中进一步考虑了同步机电磁暂态过程。由此可见,构网型变流器呈现类似同步发电机的独立电压源运行特性,尤其适用于孤岛运行模式和弱电网情况,能够在高比例甚至是全电力电子变流器集群组网系统中稳定运行。然而,构网型变流器直接控制并网点电压,也导致在与强电网连接时系统稳定性较差,容易出现机电振荡现象^[21-23],而多台构网型变流器并列运行的功率分配不均、内部环流以及同步失稳风险也是需要考虑的问题^[24]。实际上,目前主流的新能源并网方式为基于锁相环(phase-locked loop, PLL)的跟网型控制模式^[25]。跟网型变流器直接控制输出电流,属于电流源型控制,但其本身并不具备电压频率支撑能力^[13]。因此,如何改进跟网型变流器的控制策略,使其同样具备电压频率支撑能力,对于大规模新能源并网和组网是极其重要且迫切的需求。

与构网型变流器不同,跟网型变流器通过PLL与系统保持同步,其对电网频率支撑主要采用附加频率控制,例如利用频率微分和偏差信号实现新能源虚拟惯量支撑和一次调频控制。这些附加控制在满足新能源具备频率支撑能力的同时,也对系统动态特性产生了一定的影响^[26-28]。跟网型控制通常需

要测量频率微分值(rate of change of frequency, RoCoF)从而改变变流器电磁转矩或功率参考点实现惯性响应。然而,RoCoF的测量容易受到电网扰动的影响,并且当前尚未形成标准的测试方法^[29]。此外,由于频率微分的测量对系统动态的依赖性,可能导致弱电网工况下的控制失稳。文献[30]引入一阶滞后环节以过滤基于RoCoF惯性控制器引入的振荡,但却削弱了惯性响应速度^[31]。

综上,在能源转型阶段传统机组占比依然可观的电力系统中,构建基于跟网型框架、具备电压频率支撑能力的变流器控制策略有利于提升系统运行的灵活性和稳定性。相比两电平、三电平等拓扑结构,模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)功率因数可控,谐波含量低,在大容量、远距离供电的柔性直流输电系统中应用广泛^[13]。为此,本文提出了一种基于跟网型MMC的功率控制型静止同步机控制策略,在电压电流双闭环外附加参考功率点跟踪回路,实现对同步机电压频率支撑特性的动态模拟。在此基础上,建立了功率控制型静止同步机并网系统状态空间模型,讨论了静止同步机控制参数对系统稳定性的影响。最后,基于PSCAD/EMTDC搭建的电磁暂态仿真模型验证了所提静止同步机控制策略的有效性。

1 功率控制型静止同步机控制策略

并网变流器通常采用电压电流双闭环控制。其中,外环为定功率控制器,内环为定电流控制器,并通过外环电流矢量控制跟踪功率参考值实现给定功率输出。此处首先给出电压电流双闭环控制公式,其外环动态特性方程为

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = \left(K_o + \frac{1}{T_o s} \right) \begin{bmatrix} P_{ref} - P_s \\ -Q_{ref} + Q_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_{dref} 、 i_{qref} 分别为内环控制器的 d 、 q 轴电流参考值; P_s 、 Q_s 分别为MMC输出的有功、无功功率; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为MMC输出的有功、无功功率指令值; K_o 、 T_o 分别为外环控制器的比例增益及积分时间常数; s 为Laplace算子。若非特别说明,文中含 abc 或 dq 下标的变量分别表示相应物理量在 abc 或 dq 坐标系下的分量,含 ref 下标的变量表示相应物理量的参考值, Δ 表示增量,各量均为标幺值。

内环动态特性方程为

$$\begin{bmatrix} m_d \\ m_q \end{bmatrix} = \left(K_i + \frac{1}{T_i s} \right) \begin{bmatrix} i_{dref} - i_{sd} \\ i_{qref} - i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} + X \begin{bmatrix} -i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m_d 、 m_q 分别为 d 、 q 轴调制电压; K_i 、 T_i 分别为内环控制器的比例增益及积分时间常数; u_s 和

i_s 分别为 MMC 的并网点(point of common coupling, PCC)交流母线电压和 MMC 的输出电流; X 为 MMC 的桥臂电抗和变压器漏抗之和。跟网型控制还需考虑 PLL 控制环节跟踪系统频率完成与电网的同步, PLL 控制方程为

$$\begin{cases} s x_{\text{pll}} = u_{sq} \\ s \theta_s = K_{\text{pll}} x_{\text{pll}} + \frac{1}{T_{\text{pll}}} u_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_{pll} 为锁相环的状态变量; K_{pll} 、 T_{pll} 分别为锁

相环的比例增益和积分时间常数; θ_s 为 PCC 电压相位。

至此, 并网变流器能够按照给定功率参考点运行, 但该控制策略下无法模拟同步机的调频和调压特性。为了实现同步发电机运行特性的模拟, 本文基于文献[12]的基本框架, 在双闭环控制的基础上再引入第三层控制环, 通过参考功率点跟踪第三层虚拟同步发电机输出功率的方式, 实现对同步发电机外特性的模拟, 并给出更为简单易行的控制方程。鉴于 MMC 的优势, 以其为例展开分析, 所提出的静止同步机控制方案及并网系统拓扑如图 1 所示。

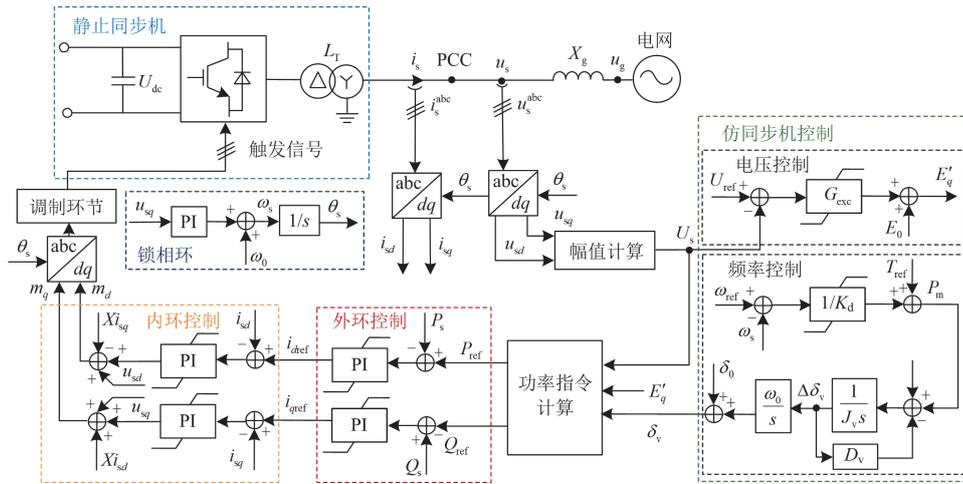


图 1 基于 MMC 的静止同步机控制策略

Fig. 1 Control strategy of the MMC-based static synchronous machine

图 1 中, 静止同步机的直流电压 U_{dc} 由其余变流器或储能装置控制。 L_T 与 X_g 分别表示 MMC 的联结变压器漏电感和系统电抗; u_g 为电网电压。

MMC 利用仿同步机控制环调节虚拟内电势相量 E'_q , 并根据式(4)和式(5)计算 P_{ref} 、 Q_{ref} , 作为双闭环控制的参考功率输入。

$$P_{\text{ref}} = \frac{E'_q U_s}{X_v} \sin \delta_v \quad (4)$$

$$Q_{\text{ref}} = \frac{U_s (E'_q \cos \delta_v - U_s)}{X_v} \quad (5)$$

式中: δ_v 为仿同步机的转子角; U_s 为 PCC 电压幅值; X_v 为仿同步机的内阻抗, 且 $X_v = X + X_d$, 其中 X_d 为仿同步机的同步电抗。MMC 的仿同步机控制环的主要功能是通过调节虚拟内电势的幅值和频率, 生成仿同步机输出的功率, 作为 MMC 的功率指令值。MMC 通过跟踪功率指令值实现模拟同步机运行的功能, 因此称为功率控制型静止同步机。式中 E'_q 、 δ_v 则来自最外层虚拟同步发电机控制环的输出。

最外层仿同步机控制环内部包含电压控制和频率控制两部分, 以模拟同步机的频率、电压控制原理。其中, 电压控制方程为

$$E'_q = E_0 + G_{\text{exc}}(s)(U_{\text{ref}} - U_s) \quad (6)$$

$$G_{\text{exc}}(s) = \frac{K_A}{1 + sT_A}, U_s = \frac{1}{1 + sT_{\text{del}}} \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \quad (7)$$

式中: E_0 为 E'_q 的稳态值; U_{ref} 为 PCC 电压的参考值; $G_{\text{exc}}(s)$ 为电压调节器传递函数, 本文选取一阶惯性环节以模拟同步机的快速励磁系统动态特性; K_A 、 T_A 分别为增益系数和时间常数; T_{del} 为电压滤波环节的时间常数。

频率控制部分包含调频环节和转子运动环节, 其中调频环节控制方程为

$$P_m = T_{\text{ref}} + \frac{1}{K_d} (\omega_{\text{ref}} - \omega_s) \quad (8)$$

式中: P_m 为仿同步机的机械功率; ω_{ref} 和 ω_s 分别为频率参考值和 PCC 电压的频率; T_{ref} 为原动机输入转矩参考值; K_d 为调差系数。转子运动环节的控制方程为

$$\Delta\omega_v = \frac{1}{J_v s + D_v} (P_m - P_s) \quad (9)$$

$$\delta_v = \delta_0 + \frac{\omega_0}{s} \Delta\omega_v \quad (10)$$

式中： ω_0 和 ω_v 分别为额定角频率(有名值)和仿同步机的转子角频率； δ_0 为 δ_v 的稳态值； J_v 和 D_v 分别为惯性时间常数和阻尼系数。

分析上述控制设计，功率控制型静止同步机模仿同步机运行的原理为：当系统发生电压、频率波动时，静止同步机能够对系统状态做出响应，表现为动态调整虚拟内电势并生成功率指令值控制信号。与此同时，其通过内层控制实现功率指令值的跟踪。本文中选取双闭环控制旨在提升变流器功率的无差跟踪，并且故障期间有效限制故障电流，提升运行稳定性。在双闭环控制器性能设计良好的情况下，静止同步机能够通过功率跟踪功能，模拟同步机的输出外特性。

需要注意的是，为了便于小信号分析，本文中仿同步机控制环选取快速励磁系统(如式(8))和有功频率下垂调频模型(如式(9))，并且同步机采取经典模型，即忽略了定、转子绕组电磁暂态过程和转子绕组的不对称性^[32]。根据电网运行需求，电压控制特性、频率控制特性以及同步机运行特性的精细化模拟均可以通过修改仿同步机控制环的算法实现优化。

2 功率控制型静止同步机小信号稳定性分析

2.1 系统小信号模型建立

为了研究本文所提出的功率控制型静止同步机的小信号稳定性，需要建立包含控制系统和电路方程的闭环系统线性化模型。第1节中建立了静止同步机的仿同步机控制系统模型。MMC 的电路方程状态变量 X_{cc} 为

$$X_{cc} = [u_{cpd2}, u_{cpq2}, u_{cpd}, u_{cpq}, u_{cp0}, i_{diff0}, i_{diffd2}, i_{diffq2}]^T \quad (11)$$

式中： $d2$ - $q2$ 表示二倍频 dq 旋转坐标系； u_{cpd2} (u_{cpd})、 u_{cpq2} (u_{cpq}) 分别为 MMC 上桥臂电容电压的 $d2$ (d)、 $q2$ (q) 分量； u_{cp0} 为 MMC 上桥臂电容电压的直流分量； i_{diff0} 、 i_{diffd2} 和 i_{diffq2} 分别为 MMC 桥臂环流的直流分量、 $d2$ 和 $q2$ 分量。MMC 主电路方程建模方法可参考文献[23]。此外，为了抑制 MMC 的内部环流，环流抑制控制的动态特性为

$$\begin{bmatrix} m_{d2} \\ m_{q2} \end{bmatrix} = \left(K_{ccsc} + \frac{1}{T_{ccsc}s} \right) \begin{bmatrix} -i_{diffd2} \\ -i_{diffq2} \end{bmatrix} + 2X_{arm} \begin{bmatrix} i_{diffq2} \\ -i_{diffd2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： m_{d2} 、 m_{q2} 分别为 $d2$ 、 $q2$ 轴调制电压； X_{arm}

为 MMC 的桥臂电抗； K_{ccsc} 、 T_{ccsc} 分别为环流抑制控制器的比例增益及积分时间常数。因此，控制系统的状态变量 X_{ctrl} 为

$$X_{ctrl} = [M_{od}, M_{oq}, M_{id}, M_{iq}, M_{ccd}, M_{ccq}, u_{sd}, u_{sq}, E'_q, \omega_v, \delta_v, x_{pll}, \theta_s]^T \quad (13)$$

式中： M_{od} 、 M_{oq} 表示与外环控制器相关的状态变量； M_{id} 、 M_{iq} 表示与内环控制器相关的状态变量； M_{ccd} 、 M_{ccq} 表示与环流抑制控制器相关的状态变量。因此，系统的状态变量为 $X = [X_{cc} \ X_{ctrl}]^T$ 。设系统的输入变量 $U = [T_{ref} \ \omega_{ref} \ U_{ref}]^T$ ，则对上述系统的状态方程和代数方程进行线性化，可得系统的小信号状态空间模型为

$$\Delta\dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (14)$$

式中： A 、 B 分别为系统矩阵和输入矩阵。

2.2 特征值分析

为了分析仿同步机控制策略对系统小信号稳定性的影响，基于所建立的系统状态空间模型开展特征值分析，其中系统参数如表1所示。

表1 静止同步机系统参数

Table 1 System parameters of static synchronous machine

物理量	数值
MMC 额定容量	400 MVA
MMC 输出功率	(0.8 + j0) p.u.
MMC 直流电压	400 kV
MMC 子模块个数	200
MMC 子模块电容	8400 μ F
MMC 桥臂电感	75 mH
MMC 阀侧交流电压	210 kV
系统频率	60 Hz
连接变压器漏电感	24.4 mH
短路比(short circuit ratio, SCR)	3
K_o 、 T_o	0.8、0.02
K_i 、 T_i	1.1、0.05
K_{ccsc} 、 T_{ccsc}	0.2、0.01
K_{pll} 、 T_{pll}	100、0.0045
J_v 、 D_v	10、50
K_A 、 T_A	0.083、0.0138
K_d	0、1
T_{del}	0.0045 s
U_{ref} 、 ω_{ref}	0.965、1.0 p.u.

根据李雅普诺夫第一法，系统在稳定平衡点处渐进稳定的充分必要条件是 A 的所有特征值实部为负。若系统存在实部为 0 的特征值，系统处于临界稳定状态，表现为等幅振荡，工程上通常认为该状

态是不稳定的;若系统存在正实部的特征值,系统不稳定,表现为增幅振荡(成对共轭特征值)或非周期失步(实根)。值得注意的是,距离虚轴较近的负实部共轭根对应着弱阻尼振荡模态,此时虽然系统是稳定的,但这种情况在工程中通常应当避免。

特征值的实部和虚部能够揭示系统的振荡模态。对于表征振荡模态的特征值 λ , 其振荡频率 f 和阻尼比 ζ 分别为

$$f = \frac{\text{Im}[\lambda]}{2\pi}, \zeta = \frac{-\text{Re}[\lambda]}{|\lambda|} \quad (15)$$

对状态空间模型开展特征值分析,能够建立状态变量与模态之间的关联程度。定义第 i 个状态变量 λ_i 对于第 j 个模态的参与因子为 $p_{ij} = u_{ij}v_{ij}$, 其中 u^T 和 v 分别为 λ_i 对应的左、右特征向量。特征值分析中,利用 p_{ij} 能够衡量状态变量在模态中的参与程度。因此,在小信号稳定性分析中,首先分析初始状态下的参与因子,并获得参与因子较高的状态变量 ΔX 与特征值 $\Delta \lambda$, 如表 2 所示。表 2 中,对于成对出现的状态变量和特征值,给出状态变量 d 轴分量与虚部为正的实部特征值之间的参与因子以显示规律。

表 2 参与因子分析

Table 2 Participation factor analysis

状态变量 ΔX	参与因子值(特征值 $\Delta \lambda$)
M_{od}	$0.70 - j1.61(\lambda_{16})$ 、 $1.23(\lambda_{18})$
M_{id}	$0.43 - j0.04(\lambda_{21})$
u_{sd}	$1.51(\lambda_{15})$ 、 $-0.26 + j0.03(\lambda_{16})$
E'_q	$-1.08(\lambda_{15})$
δ_v	$0.47 + j0.11(\lambda_{19})$
θ_v	$0.48 + j0.15(\lambda_{19})$
x_{pll}	$1.012(\lambda_{23})$

表 2 表明,静止同步机的 E'_q 与 u_s 均与特征值 λ_{15} 相关,表明二者关系较为紧密,原因在于仿同步机控制通过改变 E'_q 调节端电压。频率控制方面, δ_v 和 ω_v 均在特征值 λ_{19} 中参与程度较高。而频率控制与电压控制均与不同的状态变量关系紧密,表明仿同步机控制策略能够实现频率和电压的解耦控制。此外, u_s 与外环控制器通过特征值 λ_{16} 存在耦合关系,而其与内环控制器、锁相环动态耦合程度较低。从而说明,仿同步机控制不会破坏变流器本身与电网的同步特性。

首先研究仿同步机控制的电压控制环节对小信号稳定性的影响。改变 K_A , 使其从 1 增大至 15, 系统的根轨迹变化如图 2 所示。本文分析中,仅作出对该参数变化较为灵敏的根轨迹曲线。图 2 表明,

随着 K_A 增大,特征值 λ_{15} 右移,由于 λ_{15} 为单根,对应一个非振荡模态,与之相关的失稳现象表现为非周期单调失稳。而随着 K_A 增大,特征值 λ_{16} 、 λ_{17} 实部先减小后增大,系统阻尼先增强后减弱。并且虚部增大,表明振荡频率提高。但总体来说, K_A 增大对振荡模态的影响较小。结合表 2 的分析结果,系统潜在的失稳现象与 PCC 电压相关。

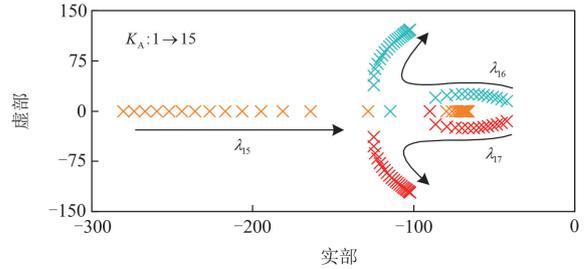


图 2 电压控制环节参数分析

Fig. 2 Analysis of voltage control parameters

为了研究频率控制对系统小信号稳定性的影响,改变调差系数 K_d , 使之由 0.005 增大至 0.15, 系统根轨迹变化如图 3(a)所示。当 K_d 增大时,特征值 λ_{19} 、 λ_{20} 向右半平面移动,系统阻尼减弱。而特征值虚部变化不大,证明其对振荡频率影响较小, f 保持在 1.5 Hz 附近。改变惯性时间常数 J_v , 使之由 1 增大至 10, 系统根轨迹变化如图 3(b)所示。图 3(b)表明,当 J_v 增大时,特征值 λ_{19} 、 λ_{20} 向右半平面移动,系统阻尼减弱;特征值虚部减小,振荡频率降低。上述分析表明,增大参数 K_d 和 J_v 均会减小系统阻尼,而 J_v 同样会影响系统振荡频率。改变阻尼系数 D_v , 使之由 50 减小至 10, 系统根轨迹变化如图 3(c)所示。当 D_v 增大时,特征值 λ_{19} 、 λ_{20} 向右半平面移动。当 D_v 接近 10 时,系统出现负阻尼,会发生振荡失稳。而在这个过程中,系统振荡频率维持在 1.5 Hz 附近。对比图 3(a)、图 3(c)结果, K_d 和 D_v 对小信号稳定性的影响规律有相似之处,增大 K_d 与减小 D_v 具有等效性。并且,图 2、图 3 的分析结果表明,仿同步机控制参数的变化与同步机中对应环节参数变化对系统小信号稳定性的影响规律相似。

为了研究系统参数的影响,使系统短路比 SCR 由 2 增大至 5, 系统根轨迹如图 4 所示。

图 4 表明,当短路比增大时,特征值 λ_{19} 、 λ_{20} 阻尼略微减小,表明频率控制的动态特性受到 SCR 的影响。而在 SCR 增大,系统强度不断提升的过程中,变流器本身的同步特性不受影响,表明所提出的功率控制型静止同步机在电网强度较高(SCR 为 5)的情况下依然能够保持稳定运行。

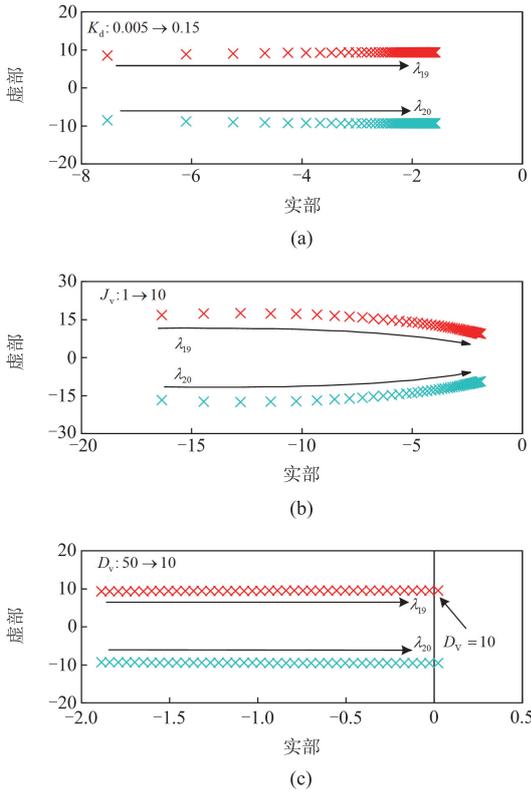


图3 频率控制环节参数分析

Fig. 3 Analysis of frequency control parameters

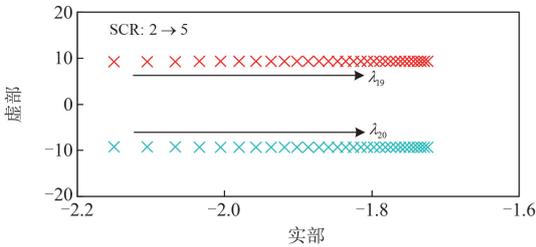


图4 并网强度参数分析

Fig. 4 Analysis of grid-connection strength parameters

2.3 与经典控制策略的对比分析

经典的跟网型控制通常以恒定功率为目标，并且响应速度快，不提供机电尺度下的惯量支撑^[33]。虽然所提功率控制型静止同步机基于跟网型框架，但相比跟网型控制，其最大优势是具备机电尺度下的惯量、阻尼响应特性，并且在电网频率、电压发生波动时能够做出响应，即通过改变输出功率的参考值，主动支撑系统的频率和电压。

近年来，对 PLL 采用附加频率控制来模拟同步机的虚拟惯量和调频特性成为研究热点，经典方法为基于测量 RoCoF 的惯量控制^[30]。其基本原理是：故障期间根据 PLL 监测的 PCC 电网电压频率的微分值调整功率指令值，实现变流器对电网频率的响

应。其附加频率控制部分如图 5 所示，其中，有功功率参考值生成环节方程如式(16)所示。

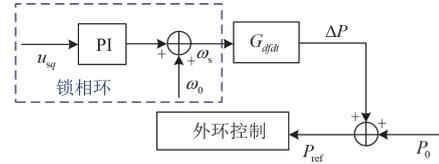


图5 测量 RoCoF 的虚拟惯量控制

Fig. 5 Virtual inertia control based on measuring RoCoF

$$\begin{cases} P_{ref} = P_0 + G_{dfdt}(s)\omega_s \\ G_{dfdt}(s) = \frac{-T_{AI}s}{\omega_0(T_{RI}s + 1)(T_{HF}s + 1)} \end{cases} \quad (16)$$

式中： G_{dfdt} 为 RoCoF 测量环节的传递函数； T_{AI} 为表征虚拟惯量的时间常数； T_{RI} 、 T_{HF} 为低通滤波器的时间常数； P_0 为稳态功率指令值。

相比基于测量 RoCoF 的惯量控制，所提控制策略的优势在于：1) 由于 RoCoF 仅在变流器测量的频率持续变化时起到调频作用，考虑电网频率出现严重的持续性偏差并且短时间内无法恢复时，RoCoF 在经过一段暂态过程后会回到 0，此时其不再具有调频能力。而所提控制为偏差控制，其在系统出现稳定的频率偏移时调频效果依然存在。2) 测量 RoCoF 的惯量控制仅考虑了变流器的调频特性，其不具备调压能力，而所提控制弥补了这一点。3) 控制层面，由于微分环节的不稳定性，测量 RoCoF 的惯量控制能够稳定运行的必要条件之一是保证足够的滤波环节时间常数，即 T_{RI} 、 T_{HF} 过小会破坏控制系统稳定性，但惯性环节会对响应速度产生影响。而所提控制策略仅需要保证一定的电压滤波环节时间常数 T_{del} 便能实现控制系统的稳定，并且该环节不影响控制系统的响应速度。

现有研究表明，经典的构网型变流器(如 PSC 或 VSG)在 SCR 略大于 1 时依然能够实现故障穿越^[22]，说明构网型控制通常在极弱电网下运行良好，而在 SCR 大于 1.4 的情况下难以稳定运行^[23]。而特征值分析证明本文所提功率控制型静止同步机在 SCR 较大时能够稳定运行，适用于并网强度较高的工况。其原因在于，构网型控制本质上属于电压源，而功率跟踪型控制属于电流源。因此本文所提出的控制策略能够克服构网型变流器的不足，在强电网下依然能够稳定运行并模拟同步机的运行特性。

值得注意的是，虽然所提仿同步机控制能够模仿作为电压源的同步机的运行特性，但功率控制型变流器在物理上未改变电流源的属性，原因在于其 PCC 电压为参与控制过程的输入量而非被控量，属

于电压跟随型控制^[34]。而这也是其能够弥补强电网下电压控制型策略(如构网型)的不足的根本原因^[23]。并且, 本文所提出的控制策略也证明了电流源型控制同样能够模拟典型电压源, 即同步机的运行特性。实际工程中, 仿同步机控制参数的选择原则通常为: 在保证控制系统稳定性的前提下, 可以按照与同步机相同的原则选择各环节的参数, 并且根据系统调频、调压等需求进行灵活调整。

3 仿真验证

为了验证所提仿同步机控制策略的有效性, 在PSCAD/EMTDC平台上搭建如图1所示的静止同步机并网系统的电磁暂态仿真模型, 系统参数如表1所示。

3.1 小信号模型准确性验证

利用小信号模型分析稳定性时, 首先需要验证所建立的小信号模型的准确性。考虑两种工况:

1) $t = 3\text{ s}$ 时, 静止同步机的输入转矩指令值 T_{ref} 由 0.8 p.u. 向上阶跃 0.05 p.u. 。

2) $t = 3\text{ s}$ 时, U_{ref} 由 0.965 p.u. 向下阶跃 0.02 p.u. 。

在上述工况下, P_s 分别如图6(a)、图6(b)所示。图6的仿真结果显示, 本文所建立的小信号状态空间模型与详细的非线性模型在小干扰下的响应特性误差很小。从而证明, 其能够在运行点附近小范围内作为系统动态特性分析的有效工具。

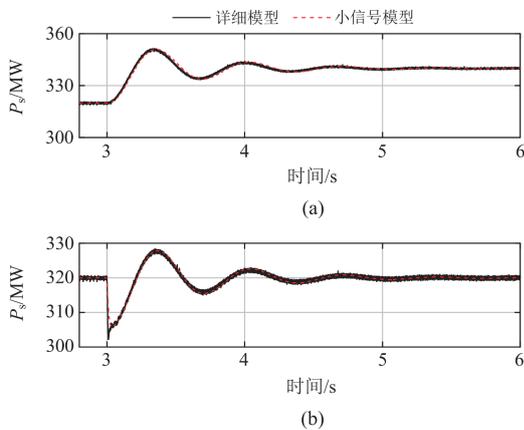


图6 小信号模型准确性验证

Fig. 6 Verifications of the small-signal model

3.2 静止同步机的运行特性验证

首先, 通过仿真研究控制参数对静止同步机动态特性的影响。在 $t = 3\text{ s}$ 时, 将 T_{ref} 由 0.8 p.u. 增大至 0.85 p.u. , 在参数 K_d 、 J_v 、 D_v 不同的情况下, P_s 的仿真结果如图7(a)~图7(c)所示。

从仿真结果看出, 当 K_d 和 J_v 增大、 D_v 减小时, 控制指令值变化时振荡现象明显, 表明系统阻尼减

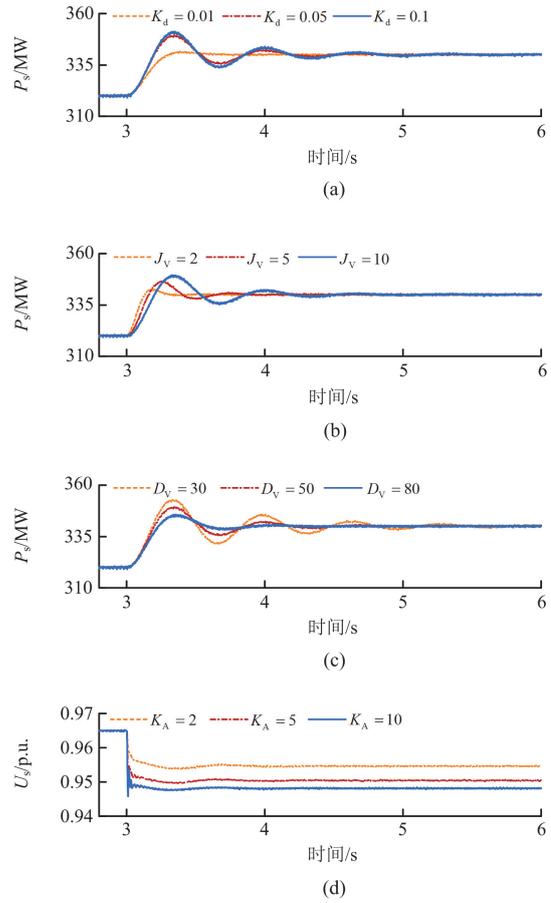


图7 控制参数仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of control parameters

弱。同时, K_d 和 D_v 变化时对振荡频率影响较小, J_v 增大则会导致振荡频率降低。在 $t = 3\text{ s}$ 时, 将 U_{ref} 由 0.965 p.u. 降低至 0.945 p.u. , 在参数 K_A 不同的情况下, U_s 的仿真结果如图7(d)所示。图7(d)表明, 相同端电压指令值阶跃的情况下, 当 K_A 增大时, 静止同步机端电压变化更明显, 表明电压调节能力增强。并且 K_A 的变化对系统机电振荡特性影响较小。图7的分析结果与理论分析结果一致。

通过仿真研究静止同步机在系统频率、电压发生变化时的响应特性。在 $t = 3\text{ s}$ 时, 设电网频率 f_g 突然变化 0.2 Hz , 不同 K_d 下 P_s 的变化如图8(a)所示。仿真结果表明, $\Delta f_g < 0$ 时, 表明系统功率存在缺额, 此时静止同步机输出功率增大, 为系统提供有功功率支撑; $\Delta f_g > 0$ 时, 表明系统功率过剩, 静止同步机输出功率减小以缓解该问题。因此, 静止同步机的调频环节有助于系统频率恢复额定值, 并且在 K_d 较小时调频作用更明显。在 $t = 3\text{ s}$ 时, 设电网电压

幅值 U_g 突然变化 0.05 p.u., 不同 K_A 下 Q_s 的变化如图 8(b)所示。仿真结果表明, $\Delta U_g < 0$ 时, 由于调压环节的存在, 静止同步机输出无功功率增大, 为系统提供电压支撑; $\Delta U_g > 0$ 时, 静止同步机输出无功功率减小, 甚至吸收无功功率, 以降低系统电压。因此, 静止同步机的调压环节有助于系统电压恢复至额定值, 并且在 K_A 较大时调压作用更明显。

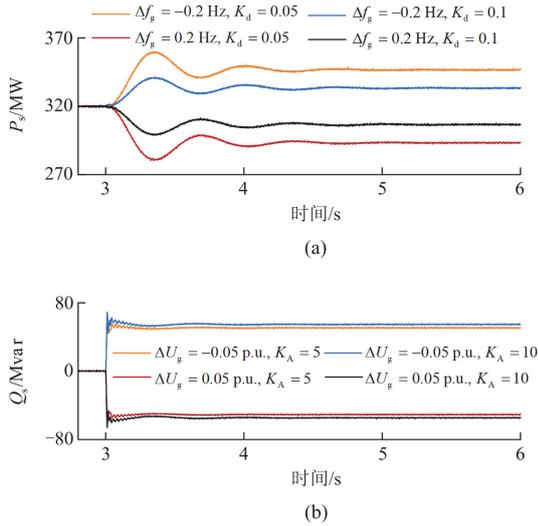


图 8 系统状态变化时仿真分析

Fig. 8 Simulation analysis when system condition changes

3.3 静止同步机与经典控制策略的对比验证

通过仿真研究将控制策略与跟网型(GFL)、基于测量RoCoF的惯量控制和构网型(GFM)开展对比分析, 并讨论不同控制策略的适用场景。其中, 变流器主电路参数相同且如表 1 所示。GFL 的控制框图如图 9 所示, 其内、外环控制参数与表 1 中相同, 测量 RoCoF 的惯量控制和 GFM 控制策略参数如表 3 所示。

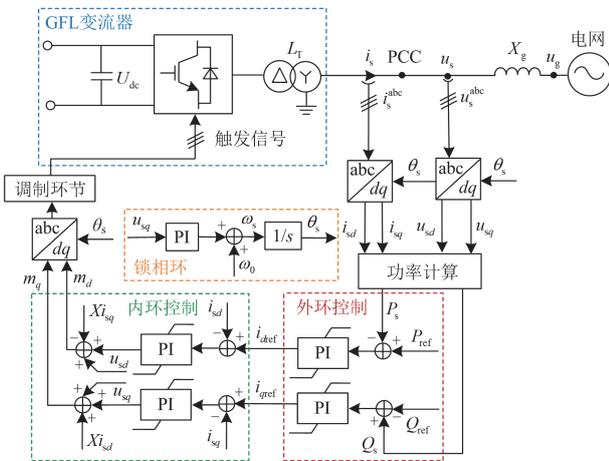


图 9 跟网型控制框图

Fig. 9 Grid-following control block diagram

表 3 对照组控制系统参数

Table 3 Control system parameters for comparison		
	物理量	数值
测量 RoCoF 的	T_{AI}	10
惯量控制	T_{RI}, T_{HF}	0.01、1
GFM 控制	J_v, D_v	10、50
	电压控制参数 K_E, T_E	2、0.02
	K_d	0.1
	U_{ref}, ω_{ref}	0.965、1.0 p.u.

对比分析所提控制与 GFL 的特性。在 $t = 5$ s 时, 分别设 f_g 突降 0.2 Hz、 U_g 突降 0.05 p.u., P_s 的仿真结果如图 10 所示。

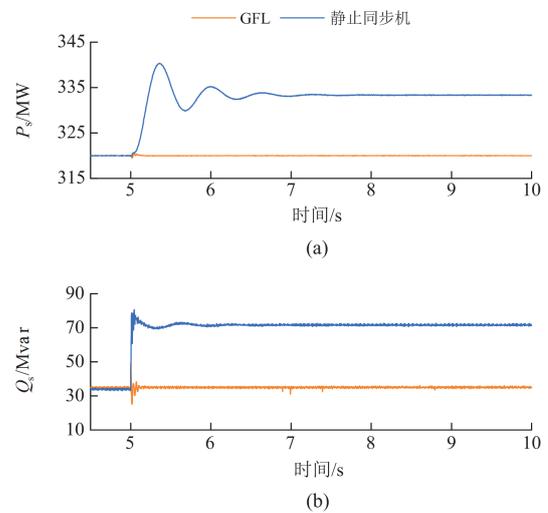


图 10 所提控制与跟网型控制的对比

Fig.10 Comparison between the proposed control and GFL

仿真结果表明, 当电网运行状态突变时, GFL 通过控制系统快速调整指令值并保证输出恒定有功、无功功率, 不具备调频、调压能力; 而采用所提控制后, 静止同步机能够增大有功支撑频率缺额、增大无功提升系统电压水平, 并且具备惯性、阻尼响应特性, 这也是所提控制策略相比传统 GFL 的优势所在。

在对比研究基于测量 RoCoF 的虚拟惯量控制前, 首先分析其控制特性。在 $t = 5$ s 时, 设 f_g 突增 0.2 Hz, 参数 T_{AI} 、 T_{RI} 不同的情况下 P_s 的仿真结果如图 11(a)所示。仿真结果表明, T_{AI} 增大后, 变流器的调频能力增强, 但响应速度略有减慢; T_{RI} 由 0.01 增大至 0.1 后, 变流器的响应速度减慢, 因此说明 G_{dfdt} 中滤波环节的存在会减缓控制器的频率调节速度, 产生不利影响。然而, 当参数 T_{HF} 由 1 减小至 0.1 时, 图 11(b)的仿真结果表明, 系统出现振

荡失稳, 证明滤波环节时间常数过小会导致控制系统失稳。上述矛盾是微分控制的主要弊端, 也是制约该类型控制策略大范围应用的主要障碍。

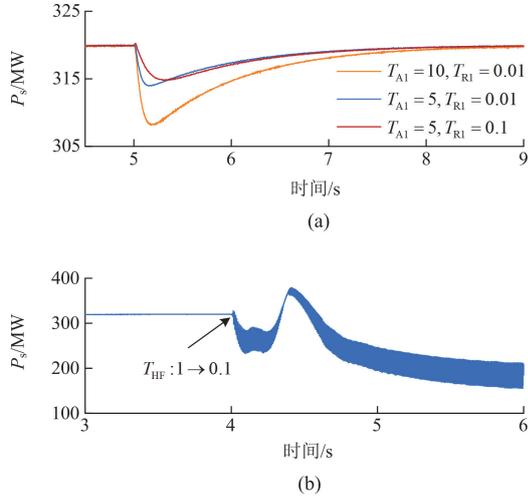


图 11 测量 RoCoF 的虚拟惯量控制特性分析
Fig. 11 Analysis of virtual inertia control based on measuring RoCoF

对比分析所提控制与基于测量 RoCoF 的虚拟惯量控制的特性。当二者等效惯量相同, 即 $T_{Ai} = J_v = 10$, 在 $t = 5$ s 时, 分别设 f_g 突降 0.2 Hz、突增 0.2 Hz, P_s 的仿真结果如图 12 所示。

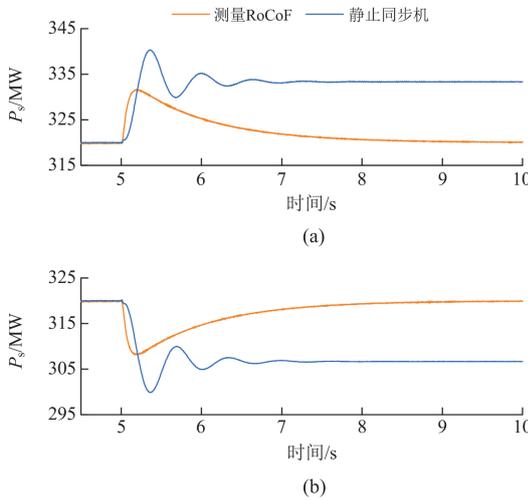


图 12 所提控制与测量 RoCoF 的惯量控制对比
Fig. 12 Comparison between the proposed control and virtual inertia control based on measuring RoCoF

仿真结果表明, 当电网发生持续性的频率缺额时, 基于测量 RoCoF 的虚拟惯量控制的变流器在频率变化最大时、即扰动发生初期调频效果最好, 但最终会因 P_s 回到初始状态而失去调频效果; 而采用

所提控制后, 静止同步机会通过有功偏差持续调节系统频率, 并且在惯量等效的情况下, 其响应速度更快。上述仿真结果验证了所提控制策略在调频效果、调频速度方面的优势。

由于 GFM 控制同样具备模仿同步机外特性的效果, 选取功率同步控制(PSC)作为常规构网型控制的代表, 与本文所提静止同步机的运行特性展开对比分析, 其详细控制策略及控制框图与文献[23]中保持一致。其中二者在稳态下的有功功率、电压指令值相同。在 $t = 3$ s 时, 设 SCR 从 2 增大至 3, P_s 的仿真结果如图 13(a)所示。仿真结果表明, 在 SCR 增大的过程中, 静止同步机采用所提控制策略时能够保持稳定运行, 而采用 PSC 时, 变流器与系统会发生失步现象。保持 SCR 为 2, 在 $t = 2.5$ s 时, 设三相金属性接地短路故障发生在 PCC 处并且持续时间为 100 ms, P_s 的仿真结果如图 13(b)所示。仿真结果表明, 故障清除后, 静止同步机采用所提控制策略时在经历暂态过程后能够恢复稳定运行, 而采用 PSC 时则会发生暂态失稳。这是由于 PSC 通常用于极弱电网或无源网络等运行工况。因此, 图 13 的仿真结果说明, 在 SCR 大于 2 时, 即电网强度较高时, 所提仿同步机控制策略能够改善 PSC 运行稳定性较弱的缺点, 在保持稳定运行的同时模拟同步机的外特性。

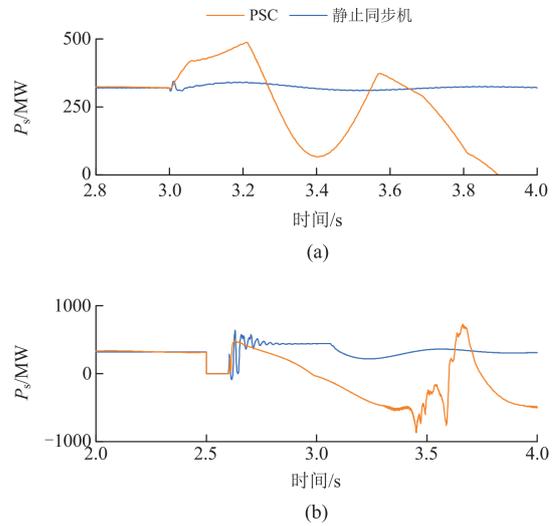


图 13 所提控制与功率同步控制的对比
Fig. 13 Comparison between the proposed control and PSC

4 结论

本文提出了一种功率控制型静止同步机控制策略设计方法, 并且在小信号视角下分析了所提控制策略的运行稳定性。主要结论总结如下:

- 1) 相比传统采用单环或双闭环控制的变流器,

所提出的静止同步机控制策略包含 3 层控制环, 其中外层控制环生成功率指令值, 内部双闭环控制通过跟踪功率指令值, 最终实现同步机特性的模拟。

2) 根据功率控制型静止同步机并网系统小信号模型的特征值轨迹分析, 增大频率控制的惯性时间常数和调差系数、减小阻尼系数均会减弱系统阻尼, 增大电压控制环的比例增益能够提升电压调节能力, 且对系统机电振荡影响较小, 但过大的比例增益可能导致电压控制器失稳。这与同步发电机的参数影响趋势一致, 证明所提控制策略能够有效模拟同步机的运行特性。此外, 仿同步机控制环的动态特性不会影响双闭环控制的稳定性。

3) 所提功率跟踪型静止同步机能够模拟同步发电机的调频、调压特性, 在风火打捆、常规同步机组和新能源组网等场景具有广阔的应用前景。相比电压源型构网控制, 该控制策略在系统强度较高时运行稳定性更高, 具有更强的适用性, 二者在不同并网强度下具备良好的互补特性。

参考文献

- [1] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [2] 薛翼程, 张哲任, 徐政. 适用于短路故障分析的风电场动态等值建模方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 327-335.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng. Dynamic equivalent model of wind farm for short-circuit analysis[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(5): 327-335.
- [3] 李红, 粟时平, 唐铭泽, 等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 21-32.
LI Hong, SU Shiping, TANG Mingze, et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 21-32.
- [4] 谈竹奎, 文贤旭, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [5] 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.
- [6] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [7] 邱晓燕, 闫幸, 周毅, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微网系统无功功率均分控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 22-32.
QIU Xiaoyan, YAN Xing, ZHOU Yi, et al. Reactive power sharing control strategy for microgrids dominated by grid-forming and grid-following inverters based on adaptive virtual impedance[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 22-32.
- [8] SHAIR Jan, LI Haozhi, and HU Jiabing, et al. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 145: 1-16.
- [9] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [10] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.
- [11] XIONG Liansong, ZHUO 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.
- [12] 徐政, 张哲任, 薛翼程. 全能型静止同步机及其实现[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 1-10.
XU Zheng, ZHANG Zheren, XUE Yicheng. Versatile static synchronous machine and its realization[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 1-10.
- [13] 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.
- [14] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [15] DIRESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous

- generators[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-3.
- [16] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [17] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [18] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383. GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [19] GUAN Minyuan, PAN Wulue, ZHANG Jing, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3093-3101.
- [20] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [21] 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.
- [22] 陆韶琦, 徐政. 采用功率同步控制的 MMC-HVDC 功率极限分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1868-1876. LU Shaoqi, XU Zheng. Analysis of the maximum power flow in power synchronization control based MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1868-1876.
- [23] 薛翼程, 张哲任, 徐政, 等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 103-113. XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converters on low-frequency oscillations of AC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103-113.
- [24] 黄萌, 凌扬坚, 耿华, 等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4571-4583. HUANG Meng, LING Yangjian, GENG Hua, et al. An overview on multi-VSCs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4571-4583.
- [25] XIAO Huangqing, HE Hongliang, ZHANG Lidong, et al. Adaptive grid-synchronization based grid-forming control for voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4763-4766.
- [26] 谢震, 许可宝, 秦世耀, 等. 基于电压源型和电流源型双馈风电机组稳定性对比分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1724-1733. XIE Zhen, XU Kebao, QIN Shiyao, et al. Comparative analysis of doubly-fed wind turbine stability based on voltage source and current source[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1724-1733.
- [27] YANG Qi, DENG Han, LIU Xiong, et al. Synthetic inertia control of grid-connected inverter considering the synchronization dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1411-1421.
- [28] COLLADOS-RODRIGUEZ C, CHEAH-MANE M, PRIETO-ARAUJO E, et al. Stability analysis of systems with high VSC penetration: where is the limit?[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2021-2031.
- [29] FU Ruiqing, WANG Xiaoru, ZHANG Yu, et al. Inertial and primary frequency response of PLL synchronized VSC interfaced energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2998-3013.
- [30] DUCKWITZ D, FISCHER B. Modeling and design of d/dt -based inertia control for power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1553-1564.
- [31] FRADLEY J, PREECE R, BARNES M. Adaptive fast frequency response for power electronic interfaced energy sources[C]//2019 IEEE Milan PowerTech, June 23-27, 2019, Milan, Italy: 1-6.
- [32] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [33] 罗魁, 郭剑波, 王伟胜, 等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1262-1281. LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1262-1281.
- [34] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-07-28

作者简介:

马燕君(1990—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电系统故障分析与控制保护、新能源并网控制等; E-mail: yanjun_ma@163.com

李歆蔚(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: 455712619@qq.com

薛翼程(1995—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为新能源并网系统建模、稳定性分析及控制等。E-mail: xyc995@zju.edu.cn

(编辑 魏小丽)