

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417201

基于随机激励的自适应 VSG 光伏逆变控制策略^{*}

张路锋 马家庆 陈昌盛 何志琴 吴钦木

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

摘要:为解决传统虚拟同步发电机控制下光伏并网时出现的功率和频率的波动和输出电压中谐波含量的问题,在并网中引入了 VSG 转动惯量自适应控制方法和一种随机激励的调制方案。在 VSG 控制中引入了带虚拟阻抗的电压控制环路,并结合基于准比例谐振控制器的电流控制环路,构建了一种适用于光伏发电系统并网逆变器的 VSG 控制策略。该策略下,仿真结果 A、B、C 三相电压的 THD 分别下降了 15.17%、15.37%、13.10%,有功功率超调量下降了 7.42%,实验结果 A、B、C 三相电压的 THD 分别降低了 1.92%、4.61%、2.44%,频率稳定在 50.07 Hz。仿真和实验结果表明了所提方法能有效抑制功率和频率的震荡和降低输出电压的 THD,验证了所提方法的可行性。

关键词:光伏发电;自适应控制;虚拟同步发电机;随机激励;准比例谐振控制器

中图分类号: TM464; TN713 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Adaptive VSG PV inverter control strategy based on stochastic excitation

Zhang Lufeng Ma Jiaqing Chen Changsheng He Zhiqin Wu Qinmu

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to solve the problems of power and frequency fluctuations and harmonic content in the output voltage occurring in the grid-connected PV under the traditional virtual synchronous generator control, a VSG rotational inertia adaptive control method and a modulation scheme with stochastic excitation are introduced in the grid-connected. A voltage control loop with virtual impedance is introduced in the VSG control and combined with a current control loop based on a quasi-proportional resonant controller to construct a VSG control strategy for grid-connected inverters of PV power systems. With this strategy, the THD of the three-phase voltages A, B and C decreased by 15.17%, 15.37% and 13.10%, respectively, and the active power overshoot decreased by 7.42% in simulation results, and the THD of the three-phase voltages A, B and C decreased by 1.92%, 4.61% and 2.44%, respectively, in experimental results, and the frequency was stabilized at 50.07 Hz. The simulation and experimental results demonstrated that the proposed method can effectively suppress the power and frequency oscillations and reduce the THD of output voltage, which verifies the feasibility of the proposed method.

Keywords: photovoltaic power generation; adaptive control; virtual synchronous generator; stochastic excitation; quasi-proportional resonant controller

0 引言

随着人类在光伏和风能利用技术方面的持续创新,各种新能源发电技术得到了快速发展^[1-2]。新能源发电经过逆变器并入电网存在低惯性、欠阻尼等不足。而虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术^[3-4],通过软件算法模拟 SG 的转子惯性、阻尼和同步电枢反应等动态特性使并网逆变器能够满足电力系统的虚拟惯性和阻尼,解决新能源并网引起的系统惯性缺失问题。然而传统

的恒参数 VSG 控制方法本身不具备动态参数调整的能力,以至于无法最大化发挥其稳定系统频率和功率的作用。

为提高系统运行的稳定性,自适应转动惯量和阻尼系数的 VSG 控制方式成为了目前研究的热点^[5-6]。朱作滨等^[7]分析了自适应参数的 VSG 控制方式在光伏储能并网发电系统中的应用,对比传统 VSG 控制,系统频率和输出功率响应曲线得到明显改善,但未深入研究自适应参数与系统动态特性之间的关系;刘鹏辉等^[8]利用负荷功率特征数据实时辨识负荷扰动并结合系统频率偏移量对 VSG 参

收稿日期:2024-10-24

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62163006,52267003)、贵州省科技厅支撑计划项目(QKHZ[2021]G442, QKHZ[2022]G264, QKHZ[2023]G096, QKHZ[2023]G179)资助

数进行自适应调整,克服了频率振荡的问题;杨赟等^[9]将自适应转动惯量和阻尼系数的VSG控制方式应用到逆变器并网过程中,改善了系统的动态调节能力和频率响应特性,但是在转动惯量自适应过程中会出现毛刺现象,导致控制器的调节可能会变得不精确,从而使系统的输出发生震荡或不稳定。

大规模使用电力电子器件会使系统输出电压中含有的多次谐波会产生严重的畸变,这会削弱系统的运行性能^[10-11]。目前抑制谐波的方法主要分为2类:一是采用先进的PWM调制方法和控制策略^[12-13]。Chen等^[14]提出了一种带有虚拟电阻的改进型VSG控制方案,很好地解决了虚拟电阻引起的小干扰稳定与暂态稳定之间的矛盾;Kenta等^[15]针对电压控制型VSG提出了一种简单有效的方法来抑制对称和非对称电压跌落和恢复引起的过电流。二是增加电容、电感等滤波装置^[16-17]。王业等^[18]提出了一种双调谐滤波器,虽然能同时过滤3、5次谐波,但是会增大电网的波动,从而降低电能的利用率。然而,上述方法实现谐波抑制需要使用复杂的控制算法或者数字控制器,可能会导致系统不稳定。

根据帕斯伐尔定理,在没有直流分量的情况下,一个周期信号的能量为基波以及各次谐波的能量之和,而传统滤波的方法是去除信号中的不需要的频率成分,在无源滤波的方法中电流谐波分量虽有一定程度的衰减但是还是有一部分能量在滤波设备上损耗。即传统滤波的方法不论滤波的效果如何,电源的能量已经被分走一部分。而本文引入随机激励的方法是通过引入一个功率信号达到逆变器上没有谐波电流产生的效果,从而可以直接减少直流电源中谐波分走的能量,且不需要复杂的控制算法或者数字控制器。此外,参考SG的静态稳定调节原理,引入转动惯量自适应控制,利用系统输出角频率变化率来设计自适应控制函数,可以避免出现毛刺现象。

1 虚拟同步发电机控制

1.1 VSG外环控制

图1(a)为LC并网逆变器主电路结构,图1(b)为等效电路。图1中, U_{dc} 为直流电压源, L_i 和 C_i 分别为滤波电感

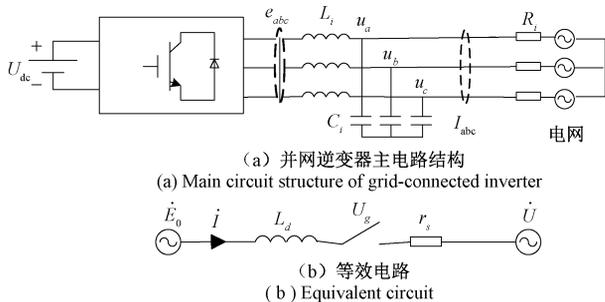


图1 主电路与其等效电路

Fig. 1 Main circuit with its equivalent circuit

和电容, R_i 为电网侧线路电阻, e_{abc} 为并网逆变器三相桥电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为滤波电容电压。

图1(b)为SG稳态运行时的等效电路。由图1可知,二者存在一定的对应关系: e_{abc} 模拟SG的电势 \dot{E}_0 ; L_i 模拟SG的同步电感 L_d ; u_a 、 u_b 、 u_c 模拟SG端电压 U_g 。

VSG的机械运动特性如式(1)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D_p(\omega_{ref} - \omega_0) \\ \frac{d\sigma}{dt} = \omega_{ref} - \omega_0 \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_{ref} \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为同步发电机的转动惯量; P_{ref} 为额定功率; P_e 为电磁功率; ω_{ref} 为转子实际角速度; ω_0 为额定角速度; D_p 为阻尼系数; σ 为功角; θ 为电角度。

为更精确模拟SG的有功-频率下垂特性,引入调节,如式(2)所示。

$$P_e = P_{ref} + k_\omega(\omega_{ref} - \omega_0) \quad (2)$$

式中: k_ω 为功频调差系数。

VSG模拟SG的无功-电压下垂特性如式(3)所示。

$$k \frac{du}{dt} = Q_{ref} - Q - D_q(U - U_n) \quad (3)$$

式中: D_q 为无功下垂系数; U 为输出电压; U_n 为额定电压。

由此VSG生成的电压参考值表示为:

$$\begin{cases} e_a = E \sin\theta \\ e_b = E \sin(\theta - 120^\circ) \\ e_c = E \sin(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为虚拟相位角; E 为虚拟电势。式(1)~(4)即构成VSG的外环控制策略。

1.2 引入准谐振控制器的电流环控制

引入比例谐振(proportional resonance, PR)控制会使谐振频率附近的频带宽度变窄,且在谐振频率处的增益过大,这会导致系统的稳定性受到影响。且PR控制器对于电网参数过于敏感,所以通常不在实际中运用。而准PR控制不仅继承了传统PR控制的优势,还在带宽管理和频率偏移适应能力上实现了进一步的改进。其传递函数如式(5)所示。

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (5)$$

式中: k_p 为比例系数; k_r 为谐振系数; ω_0 为谐振频率; ω_c 为部分带宽。基于准PR控制器的电流环控制框图如图2所示。

图2中, $K_{pwm} = U_{dc}/(2U_{tri})$ 为逆变器增益, U_{tri} 为正弦脉宽调制三角载波幅值,本文取 $U_{tri} = U_{dc}/2$,即 $K_{pwm} = 1$ 。对于LC滤波器,其传递函数 $G_F(s)$ 为 $\frac{1}{L_i s}$ 。因此电流环传递函数 $T_i(s)$ 为:

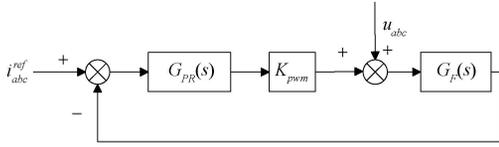
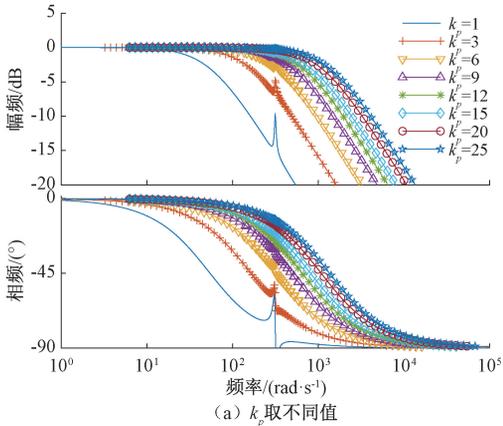


图 2 引入准 PR 控制器的电流环控制框图

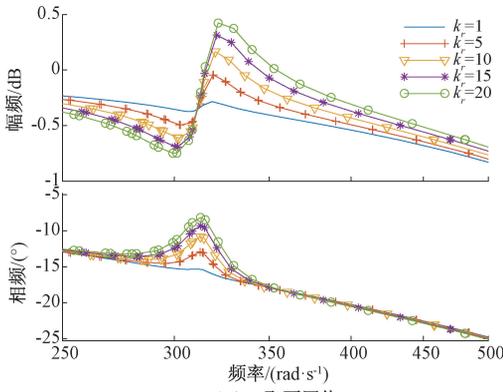
Fig. 2 Block diagram of current loop control with introduction of quasi-PR controller

$$T_I(s) = \frac{G_{RP}(s)G_F(s)}{1 + G_{RP}(s)G_F(s)} \quad (6)$$

通过绘制电流闭环传递函数 $T_I(s)$ 的波特图确定 k_p 、 k_r 的取值,不同 k_p 、 k_r 下电流闭环伯德图分别如图 3 所示。



(a) k_p take different values



(b) k_r take different values

图 3 不同 k_p 、 k_r 下电流环伯德图

Fig. 3 Current loop Bode plot at different k_p 、 k_r

从图 3(a)可以发现,随着 k_p 的增大,电流环的截止频率提升确实能够提高系统响应速度,但同时也会降低对高次谐波的过滤效果。综合权衡电流环的响应速度与其抗谐波干扰的能力,取 $k_p = 9$ 。由图 3(b)可知,在一定范围内,随着 k_r 的增大,低次谐波电压的放大效应变得更加明显。综合考虑取 $k_r = 1$ 。可得 VSG 整体控制框图,如图 4 所示。

2 VSG 惯量和阻尼自适应控制策略

2.1 VSG 的工频特性

VSG 外特性主要受 J 和 D 的影响,为了优化其运行性

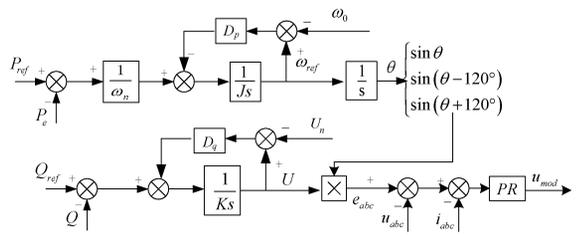


图 4 VSG 整体控制框图

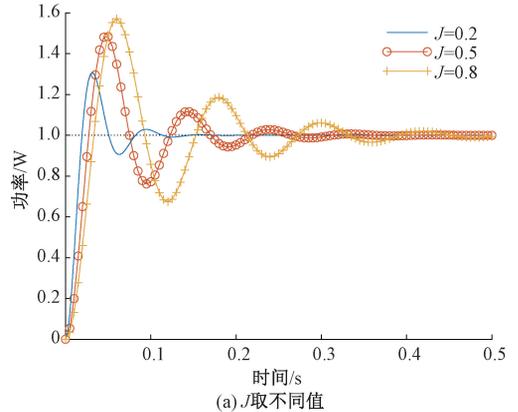
Fig. 4 Block diagram of overall VSG control

能,需要对这两个参数进行深入的分析。

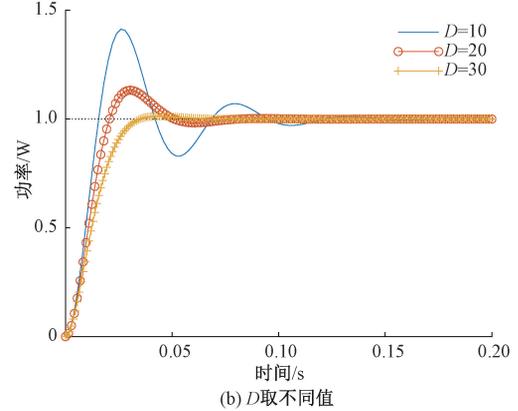
根据图 1 和 4 可得 VSG 有功环的闭环传递函数:

$$G_P(s) = \frac{3UU_g/X}{J\omega_0 s^2 + D\omega_0 s + 3UU_g/X} \quad (7)$$

式中: X 为系统等效阻抗。图 5 为在单位阶跃输入下 VSG 有功功率的输出响应曲线。



(a) J take different values



(b) D take different values

图 5 有功功率阶跃响应曲线

Fig. 5 Active power step response curve

由图 5 可知,当 J 变大时,有功功率的超调量也增大,调节时间增长,动态响应变慢,出现振荡,系统稳定性下降。当 D 变大时,超调量减小,动态响应变慢,震荡现象得到了抑制,稳定性提高。可以发现 J 和 D 这两个参数且对输出功率和相互制约。因此,应综合考虑各项性能指标来选择 J 和 D ,以解决系统特性之间的矛盾。

2.2 VSG的自适应控制策略

参考SG的静态稳定调节原理,可以采用自适应的 J 和 D 控制,从而达到对有功功率和角频率的震荡进行抑制效果。由式(1)变换得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\frac{P_{ref}}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega_{ref} - \omega_0)}{J} = \frac{\Delta T - D\Delta\omega}{J} \quad (8)$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta T - J \frac{d\omega}{dt}}{D}, \Delta T - D\Delta\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

由式(8)可知,当 $\Delta T - D\Delta\omega$ 恒定时,随着 J 的增大, $|\frac{d\omega}{dt}|$ 越小,VSG的惯性越大;由式(9)可知,当 $\Delta T - J(\frac{d\omega}{dt})$ 恒定时,随着 D 的增大, $|\Delta\omega|$ 越小;根据 $\Delta\omega$ 和 $\frac{d\omega}{dt}$ 符号的不同, D 的变化也影响了 $\frac{d\omega}{dt}$ 。为了方便分析,将SG的功角特性划分为4个区间,如图6所示。

1)在区间①, $P_0 < P_1, \frac{d\omega}{dt}$ 先突增后减小为0,因此为了抑制 $\frac{d\omega}{dt}$ 的过快变化,可以增大 J 。频率的偏移峰值随着 D 的增大而减小, $\frac{d\omega}{dt}$ 的初值却增大,故在 $\frac{d\omega}{dt}$ 变化前期保持 D 为稳态值。此外,在区间①中,当 $\Delta\omega > 0$ 时, $\Delta\omega$ 随着 D 的增加而减小。与此同时, $(\frac{d\omega}{dt}) > 0$,当 $\Delta T - D\Delta\omega = J(\frac{d\omega}{dt}) > 0$ 时, J 随着 D 的增大而减小。因此在区间①后期应增大 D 来减小 $\frac{d\omega}{dt}$ 和 $\Delta\omega$ 以此抑制 ω 的增加,从而达到抑制超调的效果。

2)在区间②, $P_1 < P_2, \Delta\omega > 0, |\frac{d\omega}{dt}|$ 先增后减而且 $(\frac{d\omega}{dt}) < 0, \omega$ 减小,当 $\Delta T - D\Delta\omega = J(\frac{d\omega}{dt}) < 0$ 时,增大 D 会增大 $|\frac{d\omega}{dt}|$ 。故在减小 J 时,需要同时增大 D 来增大 $|\frac{d\omega}{dt}|$,使 ω 加速上升至 ω_{ref} 。

3)在区间③, $P_2 > P_1, \frac{d\omega}{dt} < 0, \Delta\omega < 0, \Delta T - D\Delta\omega = J(\frac{d\omega}{dt}) < 0$,故可以同时增大 J 和 D 来抑制 ω 偏离 ω_{ref} 。同理,在区间④, $P_1 > P_0, (\frac{d\omega}{dt}) > 0, \Delta\omega <$

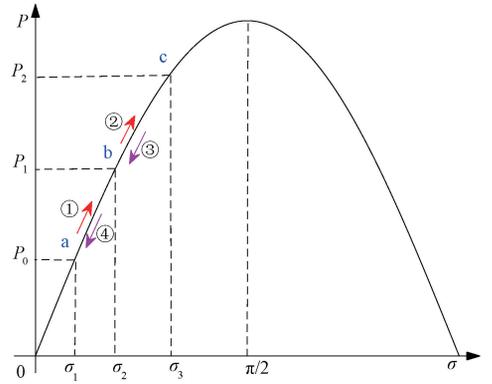
$$J = \begin{cases} J_0, & |\Delta\omega| \leq K_{J_0} \\ J_0 + \alpha \frac{1}{T_1 s + 1} \left| \frac{d\omega}{dt} \right| + \beta |\Delta\omega|, & |\Delta\omega| \geq K_{J_0}, \left(\frac{d\omega}{dt} \right) \Delta\omega > 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > K_{J_1} \\ J_0 + \gamma \frac{1}{T_2 s + 1} \left| \frac{d\omega}{dt} \right|, & |\Delta\omega| \geq K_{J_0}, \left(\frac{d\omega}{dt} \right) \Delta\omega \leq 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > K_{J_1} \\ J_0, & |\Delta\omega| \geq K_{J_0}, \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq K_{J_1} \end{cases} \quad (10)$$

$$D = \begin{cases} D_0, & \Delta\omega \leq K_d \\ D_0 + \lambda |\Delta\omega|, & |\Delta\omega| > K_d, \frac{d\omega}{dt} > 0 \cap (-\Delta\omega) \leq K_d \\ D_0 + \theta |\Delta\omega| + \eta \left| \frac{d\omega}{dt} \right|, & \frac{d\omega}{dt} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

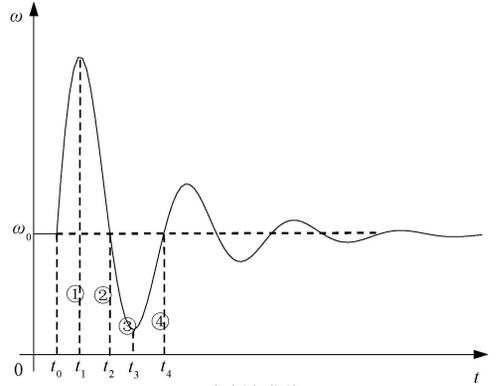
式中: J_0 和 D_0 为VSG稳定运行时候的转动惯量和阻尼系数; K_{J_0} 和 K_d 为 $\Delta\omega$ 变化的阈值; K_{J_1} 为 $\frac{d\omega}{dt}$ 变化的阈值; $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \theta, \eta$ 为调节系数。

3 引入随机激励的VSG控制

对于随机信号,由于其傅里叶变换不收敛,因此不能



(a) 功角特性曲线
(a) Power angle characteristic curve



(b) 角频率曲线
(b) Angular frequency curve

图6 SG的功角特性和转子角频率曲线

Fig. 6 Power angle characteristics of SG and angular frequency curve of rotor

0, $\Delta T - D\Delta\omega = J(\frac{d\omega}{dt}) > 0$,故可以在减小 J 时,同时使增大 D 来加速 ω 上升至 ω_{ref} 。

综上, J 和 D 的自适应控制规则为:

用频谱来描述,而应使用功率谱密度来进行描述。设随机变量为 $x(t)$,其功率谱密度函数为:

$$G_X(\omega) = \int_{-T}^T R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (12)$$

则,自相关函数为:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau) dt \quad (13)$$

假设 $x(t)$ 为有界的平稳过程,由样本函数的截取函数表达式可得系统输出的均值:

$$E[Y(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)E[X(t-\tau)]d\tau \quad (14)$$

根据 $x(t)$ 为平稳过程,则系统输出的自相关函数为:

$$R_Y(t, t+\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_X(t+\tau_1-\tau_2)h(\tau_1)h(\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (15)$$

对平稳过程的自相关函数取傅里叶变换即可得到它的功率谱密度。线性时不变系统输出的功率谱密度 $G_Y(\omega)$ 与输入功率谱 $G_X(\omega)$ 关系如下:

$$G_Y(\omega) = G_X(\omega) |H(\omega)|^2 \quad (16)$$

式中: $H(\omega)$ 为系统的传输函数, $|H(\omega)|^2$ 为系统的功率谱传输函数。式(16)表明,线性时不变系统的输出功率谱等于输入功率谱与系统的功率谱传递函数的乘积。由于经典谱估计物理概念明确、计算方法简单,所以本文采用非参数化方法(经典谱分析法)直接对采样序列进行傅里叶变化,并给出其平均功率谱密度。如式(17)所示。

$$R_Y(0) = E[Y^2(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_Y(\omega)d\omega \quad (17)$$

一个通过中心频率为 ω_0 、传递函数为 $H(\omega)$ 的随机过程的输出功率如式(18)所示。

$$E[|Y_{\omega_0}(t)|^2] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_Y(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega \quad (18)$$

随机激励信号是直接施加在驱动信号的输入端,从而达到抵消或抑制系统噪声的效果。可以得到引入随机激励信号后的 VSG 控制结构如图 7 所示。

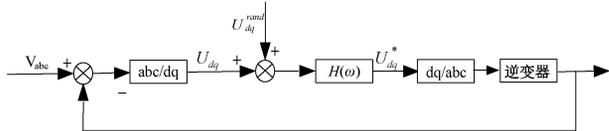


图 7 引入随机激励信号的 VSG 控制结构

Fig. 7 VSG control structure with introduction of random excitation signal

式中: U_{dq}^{rand} 为随机激励信号, $H(\omega)$ 为系统的传递函数。

为了减少输出电压中不可忽视的白噪声,引入了一个随机激励信号,可以表示为:

$$\begin{cases} U_d^* = U_d + U_d^{rand} = U_d + A_d N(\mu_d, 1) \\ U_q^* = U_q + U_q^{rand} = U_q + A_q N(\mu_q, 1) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $N(\mu, 1)$ 为平均值为 μ ,幅值为 1 的高斯白噪声; A_d 、 μ_d 、 A_q 、 μ_q 为随机噪声参数。

为了确定式(19)中 4 个因子对系统输出的主要影响因子,设计了正交试验。首先通过在 MATLAB/Simulink 平台上对引入随机激励信号的风力发电逆变系统在 VSG 控制时的模型进行仿真。

图 8 为 VSG 输出 A 相电压波形的功率谱密度函数

图,对图 8 中一些数据处理如下:将直流分量的电压折算为控制器中的 μ_d 、 μ_q 偏移量为 0.005 8 V,并将其取值范围定为 $[-2, 0.4]$;将图 8 中的高频部分折算成控制器的电压为 1.479 V,将 A_d 、 A_q 取值范围定为 $[1, 3]$ 。并采用六因子五水平的正交试验方法得到 25 组不同参数组合对应下的 VSG 电压输出总谐波失真 (total harmonic distortion, THD) 值。各因子取值如表 1 所示。

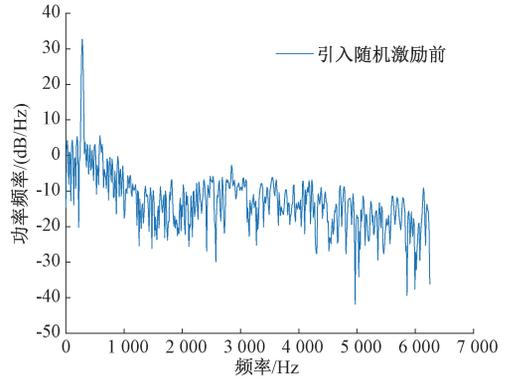


图 8 引入随机激励前 A 相电压仿真波形功率谱密度图
Fig. 8 Power spectral density plot of simulated waveform of phase A voltage before introducing random excitation

表 1 随机噪声参数取值

Table 1 Random noise parameter values

A_d	μ_d	A_q	μ_q
1.0	-2.0	1.0	-2.0
1.5	-1.4	1.5	-1.4
2.0	-0.8	2.0	-0.8
2.5	-0.2	2.5	-0.2
3.0	0.4	3.0	0.4

根据仿真系统输出数据画出各参数因子的水平均值如图 9 所示。

从图 9 可知:当 μ_d 、 μ_q 、 A_d 和 A_q 这 4 个随机噪声参数取值分别为 1、5、3 和 2 水平时,三相电压的 THD 值最小。

本文引入随机激励法对虚拟同步发电机输出电压谐波进行优化处理,可将其归结为不等式的非线性约束规划问题,VSG 的设计参数决定了目标函数值,即优化设计中需要确定的变量。采用实验设计 (design of experiments, DOE) 方法中的响应面法 (response surface method, RSM) 实现多目标优化的参数优化设计,将引入随机激励信号的 VSG 三相逆变系统随机参数设为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。

为简化目标函数,将主要影响因子 μ_d 、 μ_q (即 x_1 、 x_2) 作为目标函数的自变量, A_d 、 A_q (即 x_3 、 x_4) 设置为其取值范围内的一个恒定值(这里取 $x_3 = 2$ 、 $x_4 = 1.5$) 此时,根据 DOE 响应面法可确定系统目标函数为:

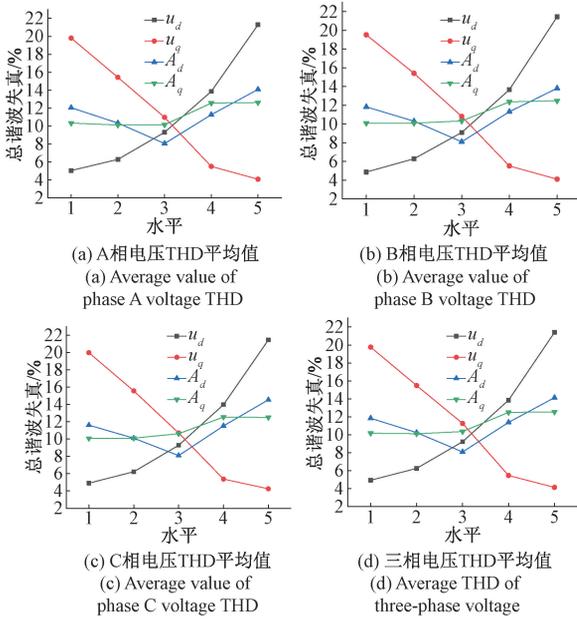


图9 正交试验的4因子对THD的影响

Fig. 9 Effect of 4 factors of orthogonal test on THD

$$\min f(x_1, x_2) = 2.802 0x_1^2 + 1.034 5x_2^2 + 11.230 8x_1 - 5.217 1x_2 + 7.893 075 \quad (20)$$

图10为采用DOE响应面法的共轭梯度算法的参数优化流程。

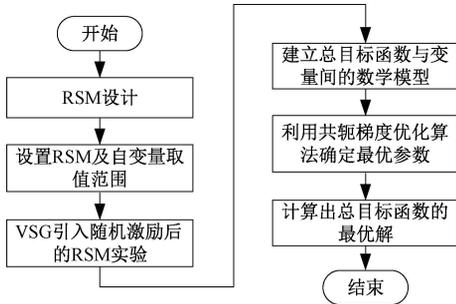


图10 基于响应面法的共轭梯度算法的结构参数优化流程

Fig. 10 Flowchart of structural parameter optimization for conjugate gradient algorithm based on response surface methodology

经共轭梯度算法优化,当 x_1, x_2 分别取值为-2和2.5时,系统目标函数可得极小值,即优化后系统输出的最小电压THD值。

综上,系统整体结构框图如图11所示。

4 仿真和实验验证

4.1 仿真验证

为验证上述理论分析的正确性,在Matlab/simulink仿真平台搭建了模型,主要参数为: $U_{dc} = 800 \text{ V}$, $L = 18.4 \text{ mH}$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $R_a = 24.07 \text{ }\Omega$, $R_b = 36.1 \text{ }\Omega$, $R_c = 72.2 \text{ }\Omega$, $\omega_{ref} = 314 \text{ rad/s}$, $\omega_c = 2\pi\text{rad/s}$, $\alpha = 0.4, \beta = 0.5$, $\gamma = -0.01, \lambda = 0.5, \theta = 0.5, \eta = 0.1, T_1 = 0.5, T_2 =$

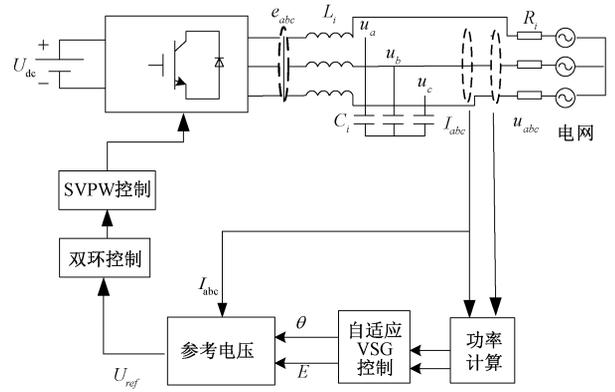


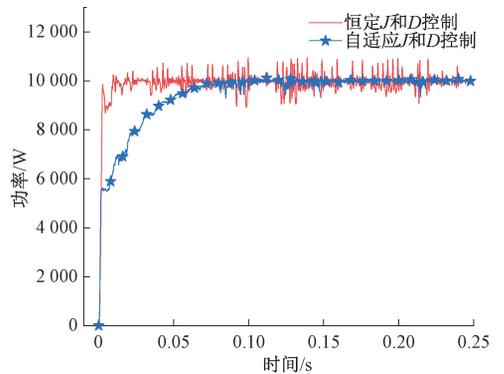
图11 系统整体结构框图

Fig. 11 Block diagram of the overall system structure

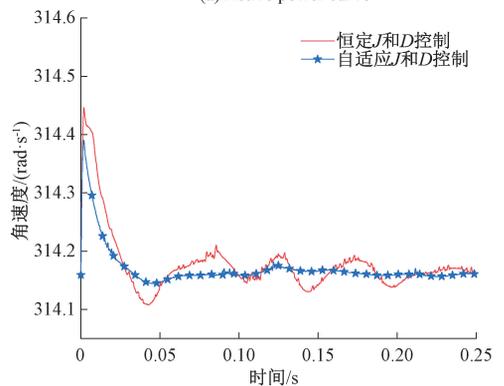
$0.8, K_{J_0} = 0.04, K_{J_1} = 0.5, K_d = 0.04$ 。

图12(a)为仿真时的VSG输出的有功功率曲线,图12(b)为角频率曲线,图12(c)为频率曲线。从图12可知,恒定 J 和 D 控制时,有功功率曲线和频率曲线超调较大,系统波动较大,而自适应控制策略时,得到的有功功率曲线没有超调,且角频率曲线和频率曲线更加平缓,系统波动较小。

图13为自适应控制时 J 和 D 的变化情况。从图中可以看出,当系统发生振荡时,可以通过增加 J 和 D 来减小小波动的影响;而在频率恢复时,则应减小 J 和 D 以加快这个过程。



(a) 有功功率曲线



(b) Angular frequency curve

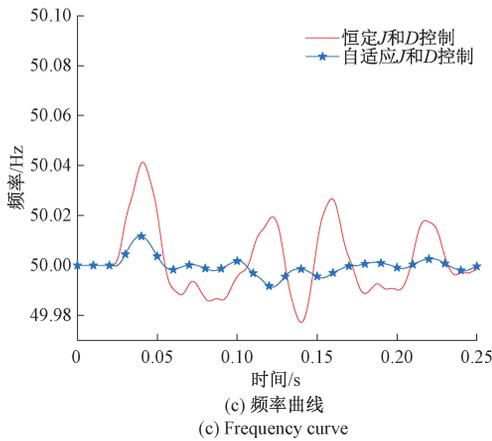


图 12 不同控制方法下的曲线对比

Fig. 12 Comparison of curves under different control methods

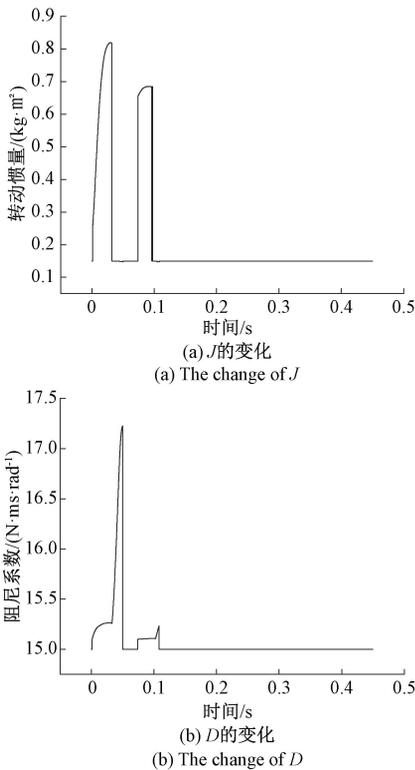


图 13 自适应控制时 J 和 D 的变化

Fig. 13 Variation of adaptive parameters J and D

图 14 为系统输出 A 相电压引入随机激励前后使用 Welch 功率谱估计结果,从图 14 可知,相比于引入随机激励信号前,采用随机激励方法后对系统输出电压波形功率谱估计曲线的尖峰位置有着较明显的抑制效果,减小了系统运行过程中的谐波污染,也说明了在随机激励下高次谐波得到了很好的抑制,系统的能量传递效率得到了提高。

通过 powergui 功能对系统输出三相电压仿真结果进行 FFT 分析,如表 2 所示。

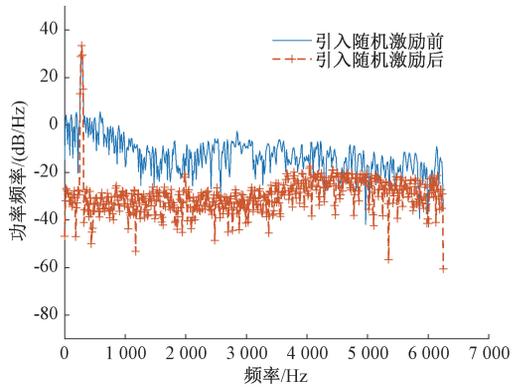


图 14 引入随机激励前后 A 相功率谱估计结果

Fig. 14 A-phase power spectrum estimation results before and after introducing random excitation

表 2 系统输出三相电压仿真结果

Table 2 Simulation results of system output

three-phase voltage			%
三相电压	随机激励前	随机激励后	
A 相	16.04	0.87	
B 相	16.13	0.76	
C 相	13.84	0.74	

由表 2 可知,随机激励前后 A、B、C 三相电压 THD 分别下降了 15.17%、15.37%、13.10%,这表明引入随机激励的方法能够很好地改善电力系统输出的电能质量,从而提高光伏发电逆变系统从直流侧到交流侧的能量传递效率。

从图 15 可以看出,随机激励前系统输出电压仿真波形正弦稳定性较差,波形不平滑,峰谷处有较大波动,而随机激励后系统输出电压仿真波形正弦稳定性大大提高,波形平滑,并且在峰谷处没有波动。

4.2 实验验证

为了验证所提出的谐波抑制方案的有效性,建立了一个控制系统。运行主程序、VSG 子程序等代码均在 code composer studio(CCS)中编译调试;硬件部分主要由系统电源、AD 模块、DSP28335 控制芯片、逆变桥等组成,其中逆变桥采用集成 IPM 芯片,采集输出电压和模拟电网电压的功能模块由 DSP28335 芯片自带的片上 AD 提供,系统采用最大阻值为 200 Ω 的滑动变阻器提供模拟电网连接所需的电阻阻值、10 mH 电感和 1 000 μF 电容。使用 Gwinstek GDS-3254 示波器观察连接相电流波形。控制系统的整体框图如图 16 所示。

图 17 是根据上述实验获得的不同控制方法下的角速度曲线和频率曲线,图 18 是自适应控制时 J 和 D 的变化情况。可知,恒定 J 和 D 控制下的角速度和频率稳定在 307.87 rad/s 和 51.23 Hz,而自适应 J 和 D 控制下角速度

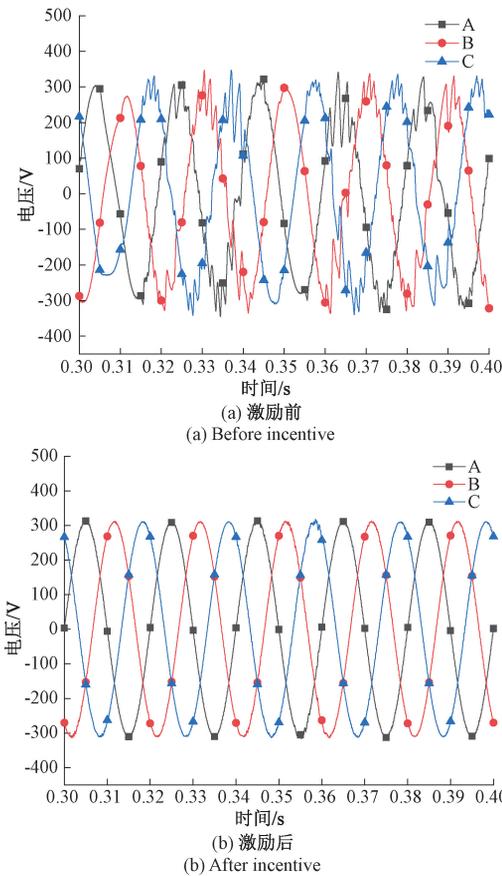


图 15 引入随机激励前后 A、B、C 三相电压

Fig. 15 Three-phase voltages of A, B and C before and after introducing random excitation

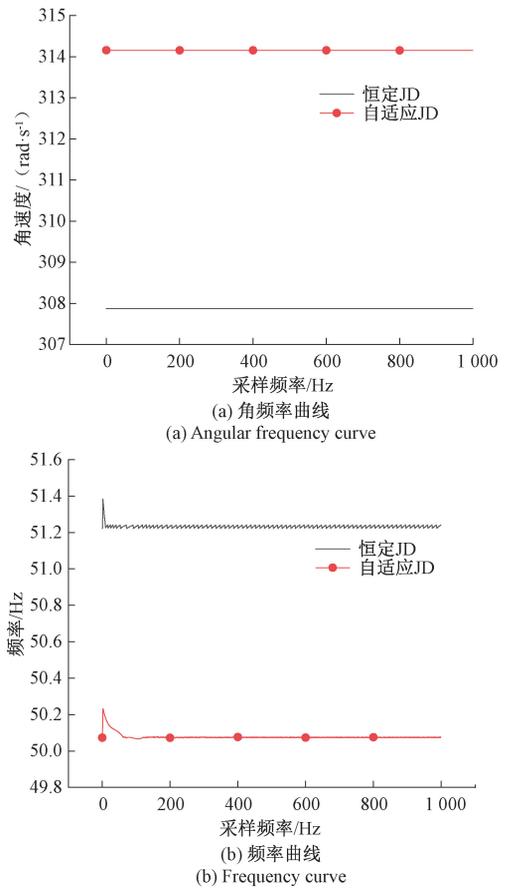


图 17 不同控制方法下的曲线对比

Fig. 17 Curve comparison under different control methods

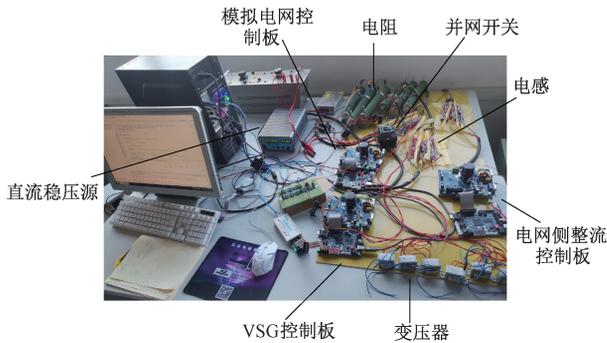


图 16 基于 DSP28335 的控制系统

Fig. 16 Control system based on DSP28335

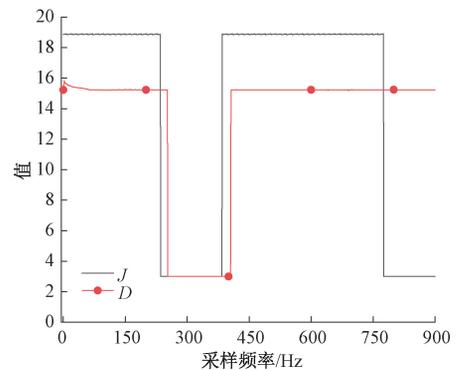


图 18 自适应控制时 J 和 D 的变化

Fig. 18 Variation of adaptive parameters J and D

和频率稳定在 314.15 rad/s 和 50.07 Hz,更接近给定值。验证了所提方法的参数自适应控制策略的有效性。

从图 19 可知,采用随机激励方法后对系统输出电压波形功率谱估计曲线的尖峰位置有抑制效果。

从图 20 中可以发现,在相应的实验结果中,示波器观察到的波形并没有得到很大改善。这是因为引入的励磁信号经过系统滤波处理后,本身就是一个高频信号。因

此,实验后观察到的输出三相电压波形并没有达到预期的改善效果,但仍可以从表 3 中看到随机励磁方法对降低电压 THD 值有一定的作用。

由表 3 可知,引入随机激励后,A、B、C 三相电压的 THD 分别降低了 1.92%、4.61%、2.44%。这说明随机励磁信号的引入在一定程度上降低了三相输出电压的 THD 值,对谐波污染有一定的抑制作用。

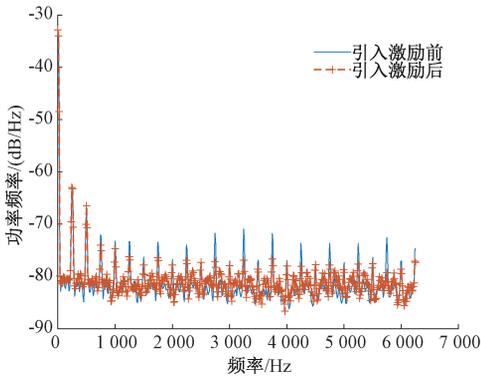


图 19 引入随机激励前后 A 相功率谱估计结果

Fig. 19 The A-phase power spectrum estimation results before and after random excitation are introduced

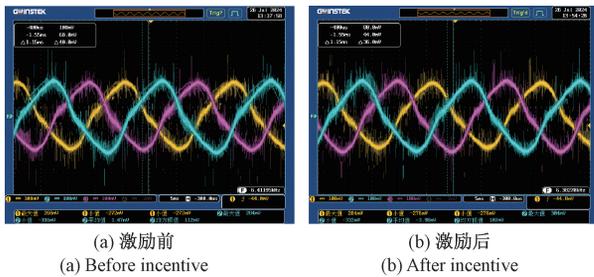


图 20 引入随机激励前后 A、B、C 三相电压

Fig. 20 A, B, C three-phase voltage before and after the introduction of random excitation

表 3 系统输出三相电压实验结果

Table 3 Simulation results of system output three-phase voltage

三相电压	随机激励前	随机激励后	%
A 相	14.96	13.04	
B 相	16.12	11.51	
C 相	15.38	12.94	

5 结 论

针对传统虚 VSG 在并网时出现的功率振荡和频率波动的问题,提出了一种 VSG 的惯量阻尼自适应控制策略,而针对光伏发电在并网时电压谐波抑制的问题,提出了一种基于随机激励的光伏发电并网电压谐波抑制方案。将激励信号加至系统的 d 轴与 q 轴上,从而降低和抑制输出电压的大部分谐波,以降低电压的总谐波畸变率 THD 值。仿真和实验结果表明,自适应 J 和 D 控制能兼顾系统动态调节的快速性和稳定性。而引入随机激励后能有效地抑制系统电压中存在的高次谐波,降低电压的 THD 值,改善了输出的电能质量,表明了所提方法的合理性及有效性。

参考文献

[1] 白隆,俞斌,高峰,等. 基于 ICEEMDAN 和 TCN-

AM-BiGRU 的短期光伏功率预测[J]. 电子测量技术, 2024, 47(9): 61-69.

BAI L, YU B, GAO F, et al. Short-term photovoltaic power prediction based on ICEEMDAN and TCN-AM-BiGRU [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(9): 61-69.

[2] 代云中,唐浩,刘铭焯,等. 一种 Z 源光伏并网逆变器及其共模漏电流抑制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 517-522.

DAI Y ZH, TANG H, LIU M X, et al. Z-source photovoltaic grid-connected inverter with common-mode leakage current inhibition [J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(3): 571-522.

[3] 席隆兴,敖邦乾,马家庆,等. PMSM 自适应分数阶滑模控制器设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(16): 58-64.

XING L X, AO B Q, MA J Q, et al. Design of a PMSM adaptive fractional order sliding mode controller [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(16): 58-64.

[4] 马也,史丽萍,李衡,等. 基于 VSG 控制的微网逆变器工频振荡现象研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 107-115.

MA Y, SHI L P, LI H, et al. Power frequency oscillation of a microgrid inverter based on VSG control [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 107-115.

[5] 吴舟,邹晓松,袁旭峰,等. 计及储能动态的 VSG 惯量阻尼自适应控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 83-91.

WU ZH, ZOU X S, YUAN X F, et al. Research on VSG rotational inertia and damping adaptive control considering energy storage dynamics [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 83-91.

[6] 张赞宁,孙想亮,付文龙,等. 参数协调模糊自适应 VSG 控制策略[J]. 电子测量技术, 2022, 45(21): 1-7.

ZHANG Y N, SUN X L, FU W L, et al. Parameter coordination fuzzy adaptive VSG control strategy [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(21): 1-7.

[7] 朱作滨,张常友,曾小斌. 基于自适应旋转惯量 VSG 控制策略光储微网系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 67-72.

ZHU Z B, ZHANG CH Y, ZENG X B, et al. Photovoltaic energy storage microgrid system based on adaptive rotating inertia VSG control strategy [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2021, 33(3): 67-72.

- [8] 刘鹏辉, 郑克影, 朱军, 等. 考虑负荷动态变化的孤岛微电网二次频率控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 213-224.
LIU P H, ZHENG K Y, ZHU J, et al. Secondary frequency control of isolated microgrid with consideration of dynamic varying loads[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 213-224.
- [9] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
YANG Y, MEI F, ZHANG CH Y, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [10] SHUAI L, SHI J, LONG S. Research on control strategy of grid-connected brushless doubly-fed wind power system based on virtual synchronous generator control[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2022, 6(4): 404-412.
- [11] 王庆杰, 尚磊, 陈双印, 等. 分布式光伏电站接入配电网继电保护整定优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4): 84-91.
WANG Q J, SHANG L, CHEN SH Y, et al. Optimization of relay protection settings for distributed photovoltaic power stations connected to distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 84-91.
- [12] 刘洋, 马家庆, 吴钦木, 等. 同步BUCK电路中的新型非奇异终端滑模控制性能研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15): 1-7.
LIU Y, MA J Q, WU Q M, et al. Performance study of a new non-singular terminal sliding mode control in synchronous BUCK circuits [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15): 1-7.
- [13] ZHOU L, LIU S Y, CHEN Y D, et al. Harmonic current and inrush fault current coordinated suppression method for VSG under non-ideal grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1030-1042.
- [14] CHEN S M, SUN Y, HAN H, et al. A modified VSG control scheme with virtual resistance to enhance both small-signal stability and transient synchronization stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6005-6014.
- [15] KENTA K, KOYO I, TADANA O Z, et al. Virtual voltage control of VSG for overcurrent suppression under symmetrical and asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11177-11186.
- [16] 田莞菘, 李建国, 张雅静, 等. 基于无源控制的并网逆变器特定次谐波电流抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 215-222.
TIAN Y S, LI J G, ZHANG Y J, et al. Selective harmonic current suppression method for grid-connected inverters based on passivity-based control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 215-222.
- [17] 余斌, 李辉, 赖锦木, 等. 基于桥臂电流控制的模块化多电平储能系统谐波抑制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 82-92.
YU B, LI H, LAI J M, et al. Harmonic suppression strategy of MMC-BESS based on arm current control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 82-92.
- [18] 王业, 袁宇波, 陆于平, 等. 涌流引起的变压器三角形侧不平衡三次谐波影响及抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 145-151.
WANG Y, YUAN Y B, LU Y P, et al. Effects and suppression methods for inrush-caused unbalanced third harmonic on transformer delta-side [J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(22): 145-151.

作者简介

张路锋, 硕士研究生, 主要研究方向为整流器和逆变器。

E-mail: 932684365@qq.com

马家庆(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为交流电机矢量控制及电力电子器件能量传递效率等。

E-mail: 357287962@qq.com