

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240785

计及电压控制的柔直系统参数解耦 VSG 频率支撑方法

赵熙临, 王成伟

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 利用柔性直流输电系统潜在的调频能力, 可实现对电网频率的有效支撑。但在传统调频过程中, 由于虚拟惯量的增加降低了系统对参考功率的跟踪速度, 同时带来电压控制稳定裕度的降低, 弱化了系统的频率支撑能力。因此, 提出一种计及电压的参数解耦虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)策略。首先, 对换流站辅助频率控制模型及常规 VSG 控制方式进行分析, 引入直流母线电压, 并采用带下垂的 PI 控制器对电压偏差进行调节。然后, 对部分有功功率控制回路(active power loop, APL)进行改进, 引入低通滤波器及前馈回路消除 VSG 固有的振荡极点, 将 APL 的参考功率跟踪速度和 VSG 可提供的虚拟惯量支撑能力进行解耦。最后, 利用 Matlab/Simulink 仿真对所提策略进行仿真实验。结果表明, 所提策略能将虚拟惯量的调节和参考功率的跟踪由两参数独立控制, 使控制方式更加灵活, 并有效提高换流站的频率支撑能力, 同时也保证了对电压的良好控制效果。
关键词: VSC 辅助调频; 虚拟同步发电机; 解耦控制; 电压闭环调节

Decoupled VSG frequency support method considering voltage control in flexible HVDC systems

ZHAO Xilin, WANG Chengwei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Utilizing the potential frequency regulation capability of flexible HVDC systems can effectively support grid frequency stability. However, conventional frequency regulation methods reduce the tracking speed of reference power changes because of increased virtual inertia, and decrease voltage control stability margins, thereby weakening the system's frequency support capability. To address this issue, a parameter decoupled virtual synchronous generator (VSG) strategy based on voltage control is proposed. First, the auxiliary frequency control of the converter station and conventional VSG control method are analyzed. A DC bus voltage is introduced, and a droop-based PI controller is used to regulate voltage deviations. Then, an improved active power loop (APL) control is proposed. It incorporates a low-pass filter and a feedforward loop to eliminate the inherent oscillation poles of the VSG, thereby decoupling the reference power tracking speed of the APL from the virtual inertia support capability provided by the VSG. Finally, the proposed strategy is simulated and validated using Matlab/Simulink. The results show that the proposed strategy enables independent control of virtual inertia and reference power tracking through two separate parameters, rendering the control approach more flexible. Additionally, it effectively enhances the frequency support capability of the converter station while ensuring excellent voltage control performance.

This work is supported by the Collaborative Fund of Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2023AFD186).

Key words: VSC auxiliary frequency regulation; VSG; decoupling control; voltage closed-loop regulation

0 引言

随着“双碳”目标的提出与实施, 中国将加快构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-3]。柔直技术的使用, 导致新型电力系统呈现高比例可再生能源

和高比例电力电子设备的“双高”特征, 使其面临惯量低、频率支撑弱等问题^[4-6]。

为降低大规模新能源经柔直系统接入造成的失稳风险, 在传统频率调控的基础上, 国内外学者利用柔直系统潜在的调频能力, 提出多种应对措施^[7]。针对换流站, 主要可归结为频率下垂控制和虚拟同步控制两种策略。频率下垂控制是在换流站(voltage source converter station, VSC)的控制中引入频率偏

基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目资助 (2023AFD186)

差信号 Δf 和频率变化率信号 df/dt ，通过闭环反馈修正有功功率基准，从而参与电网频率的调节。考虑系统频率和有功功率之间的关系，有研究将 Δf 通过下垂系数叠加到换流站有功功率参考值上，使柔直系统可响应频率的变化^[8-9]。但针对负荷或供电功率的波动，固定系数的下垂控制可能无法适应系统的动态变化从而导致控制性能的下降，于是动态调整下垂系数成为一种处理手段。文献[10]在保证系统直流电压偏差满足要求的前提下，通过自适应调整下垂系数，为频率扰动侧电网提供功率支援，达到较好的控制效果。在弱电网中，由于此类控制策略是通过调节直流系统的电压和功角来保证系统间的协调运行，故换流站下垂特性会表现出调频和调压的互异性^[11]，即调频效果变好时，会引起直流电压的较大波动，甚至可能导致电压的崩溃。虚拟同步控制是模拟传统发电机(synchronous generator, SG)的运行特性，通过响应频率的变化调整其输出功率实现对系统频率的控制，在此过程中，由于 VSG 采用的控制算法可调整输出电压的幅值、相位^[12]，故也能实现对电压的支撑。

在利用 VSG 进行频率控制的研究中，文献[13]将储能与虚拟惯量相结合，有效提高调频过程中的惯量响应；文献[14]提出惯量及阻尼的协同自适应策略，当 VSG 角频率变化率变大时增加惯量值，当角频率偏差量变大时增加阻尼值，改善系统频率的动态调节性能；文献[15]提出一种虚拟直流功率控制和自适应惯量、阻尼相结合的控制方法，以实现较好的电压和频率调节效果。然而，VSG 的虚拟摆动方程在提高换流站频率支撑的同时，也表明系统对参考功率变化的响应将由模拟惯量的动力学方程决定。故当惯量参数增大时，基于 VSG 的控制方法对参考功率变化的响应将变慢，进而抑制了惯量提供频率支撑的效果。文献[16-17]对此问题进行了详细讨论，并得出扰动抑制传递函数和参考跟踪传递函数的闭环极点相同的结论，因此，难以同时满足对电网频率扰动的高虚拟惯量支撑和对参考功率变化的快速跟踪两个要求。虽然近年来研究中提出了多种策略，如非线性自适应控制^[18]、配置自然下垂控制器^[19]和状态反馈^[20]等来解决此问题，但由于有功功率控制回路(active power loop, APL)闭环极点与抗扰传递函数极点相同，改善效果有限，均未达到理想的控制效果。

另一方面，由于考虑到系统虚拟惯量的增加导致 VSG 有功控制回路响应滞后，直流电压的调节速度也将变慢、波动幅度变大。故需要在利用 VSG 进行频率调节的同时，兼顾直流电压的控制。文献

[21]提出了 VSG 的电压下垂控制策略，建立直流电压与实际功率的下垂关系，并采用瞬时减小的虚拟惯量，以提高 VSG 的响应速度，稳定直流电压；文献[22]通过分析安装同步电源控制器的光伏电站对智利北部电力系统稳定性的影响，得出虚拟惯量的增加降低了直流电压控制回路的稳定裕度的结论，故在文献[22-23]中使用了具有低虚拟惯量的 VSG 控制以保证直流电压的稳定调节。这些策略虽然提高了电压的稳定性，但均在一定程度上限制 VSG 提供的频率支撑能力，故在目前研究中，快速跟踪参考功率和提供较高的虚拟惯量两者的矛盾性问题依然存在，需要进一步研究。

综上所述，在常规 VSG 的有功控制回路中，通过引入直流电压并对部分控制回路进行改进设计，可实现系统在跟踪参考功率的速度和提供虚拟惯量支撑的能力两者之间的解耦，提高 VSG 的性能及柔直系统对频率支撑的能力。

1 换流站辅助调频控制模型

新能源经柔性直流输电系统并网过程中，可通过控制换流站的输出功率达到对系统频率支撑的目的。在图 1 所示的新能源经柔性直流输电系统并网拓扑图中，左侧是新能源发电机组，右侧是交流网络，两者通过由换流站组成的柔性直流输电系统进行电能的传输。在对受端换流站的控制中，首先在网侧公共耦合点(point of common coupling, PCC)采集三相电压、电流，经 Park 变换后进入内、外环控制器，再经调制得到 PWM 控制信号，进而对换流站的输出功率进行控制。

依据图 1，受端 VSC 的拓扑结构为

$$L_s \frac{di_{abc}}{dt} + R_s i_{abc} = e_{abc} - u_{Labc} \quad (1)$$

$$C_{in} \frac{du_{Labc}}{dt} = i_{abc} - i_{Labc} \quad (2)$$

式中： L_s 、 R_s 分别为换流站到 PCC 的电感、电阻； e_{abc} 、 i_{abc} 分别为来自换流站的三相电压、电流； u_{Labc} 、 i_{Labc} 分别为 PCC 处的三相电压、电流； C_{in} 为换流站内的电容。若忽略换流站和线路的损耗，可得到新能源经柔性直流输电系统流入电网的有功功率 P 和无功功率 Q ，分别为

$$P = \frac{3U_g E}{X_g} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{3E}{X_g} (U_g - \cos \delta) \quad (4)$$

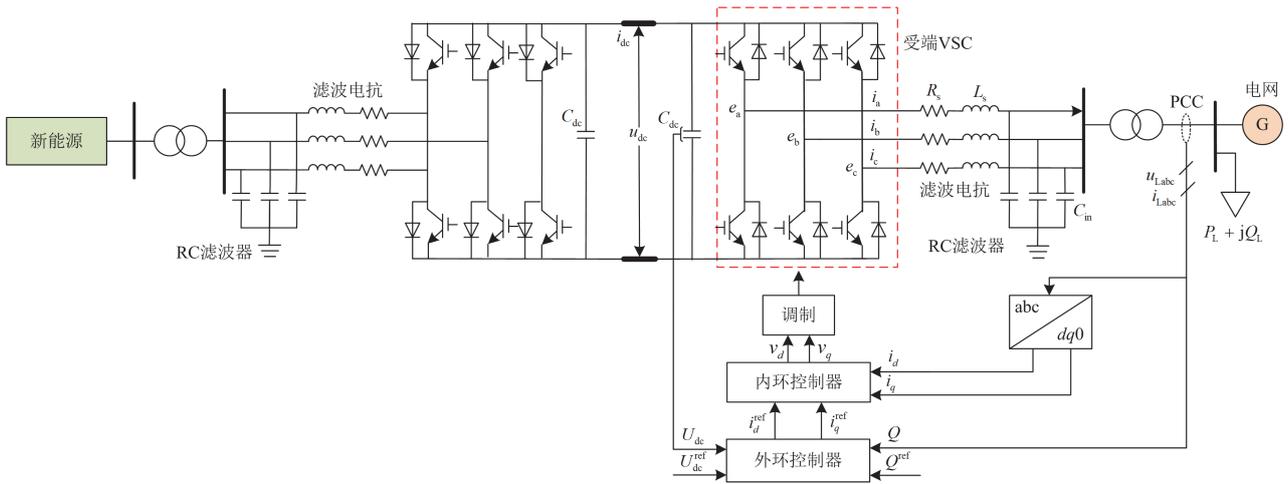


图1 新能源经柔性直流输电系统并网拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of grid connection of new energy through flexible DC transmission system

式中： U_g 为并网点输出的相电压有效值； E 为换流站交流侧输出的相电压有效值； X_g 为换流站电抗； δ 为 U_g 和 E 的夹角。由式(3)和式(4)可知，对换流站有功功率和无功功率输出的控制均由 U_g 、 E 及其夹角 δ 决定。

为了分析和验证柔直系统参与电网负荷频率调节的效果，构建如图2所示的新能源经柔直系统调频模型，主要包括：新能源发电机组、火电机组、换流站及负荷扰动等效模型。

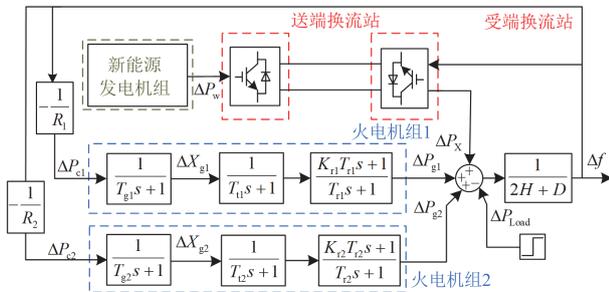


图2 新能源经柔直系统调频模型

Fig. 2 Frequency modulation model of new energy through flexible and DC system

图2中，火电机组主要由调速器及再热式汽轮机组成，调速器的传递函数 $G_t(s)$ 为

$$G_t(s) = \frac{1}{T_g s + 1} \quad (5)$$

式中， T_g 为调速器时间常数。再热式汽轮机的传递函数 $G_w(s)$ 分为两部分，如式(6)所示。

$$G_w(s) = G_{w1}(s) \cdot G_{w2}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{K_r T_r s + 1}{T_r s + 1} \quad (6)$$

式中： $G_{w1}(s)$ 、 $G_{w2}(s)$ 分别为再热式汽轮机传递函数的第一、第二部分； T_1 为气容时间常数； K_r 为再热系数； T_r 为再热时间常数。图2中剩余相关变量的含义如表1所示。

表1 电力系统参数或变量

Table 1 Parameters or variables of power system

参数	含义	参数	含义
$\Delta P_c/p.u.$	控制器输出控制量	$\Delta P_g/p.u.$	发电机功率偏差
$\Delta X_g/p.u.$	调速器位置偏差	$\Delta f/p.u.$	频率偏差
$\Delta P_w/p.u.$	新能源输出功率增量	$R/(p.u./Hz)$	机组调差系数
$\Delta P_{load}/p.u.$	负荷扰动功率偏差	$H/(kg \cdot m^2)$	发电机转动惯量
$\Delta P_x/p.u.$	换流站调整后输出功率增量	D	负荷阻尼系数

2 常规 VSG 控制

2.1 VSG 控制机理

在基于换流站辅助调频模型的基础上，可以利用 VSG 技术控制换流站的输出功率，达到对电网频率进行支撑的目的。作为换流站的一种附加控制方式，VSG 模拟了传统同步发电机的转矩惯量和阻尼特性，使换流站具备与同步发电机相似的特性，VSC 和 SG 比较图如图3所示。

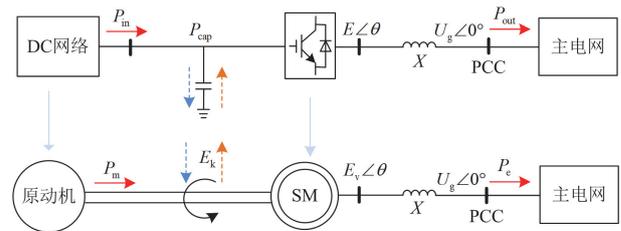


图3 VSC 和 SG 比较图

Fig. 3 VSC and SG comparison chart

图 3 中, E_k 为存储在发电机转子中的旋转动能; P_{cap} 为换流站直流侧电容输出的能量。VSG 控制系统的机械方程和电磁方程分别为

$$P_m - P_e = J_g \cdot \omega_0 \cdot \frac{d\omega}{dt} + D_p \cdot \omega_0 \cdot (\omega - \omega_0) \quad (7)$$

$$u_{vabc} = e_{v\phi} - R_v \cdot i_{vabc} - L_v \cdot \frac{di_{vabc}}{dt} \quad (8)$$

式中: P_m 为电磁功率; P_e 为机械功率; J_g 为等效虚拟转动惯量系数; ω_0 、 ω 分别为初始角频率和角频率; D_p 为等效虚拟阻尼系数; u_{vabc} 、 i_{vabc} 分别为虚拟同步机的三相输出电压、电流; $e_{v\phi}$ 为虚拟电动势, $\Phi = \{a, b, c\}$; R_v 、 L_v 为虚拟电气参数。值得注意的是, 在进行 VSG 设计中, 受端换流站的等效阻尼系数可能会有所增加, 增加后阻尼值的确定应根据系统的实际运行频率要求进行设计。

根据瞬时功率理论, 机械功率 P_e 计算如式(9)所示。

$$P_e = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c \quad (9)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 分别为 VSG 的三相输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相输出电流。此外, 虚拟电动势 $e_{v\phi}$ 的表达式为

$$\begin{bmatrix} e_{va} \\ e_{vb} \\ e_{vc} \end{bmatrix} = E_v \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: E_v 为虚拟同步机的输入电势; θ 为虚拟转子相位角。由于 VSG 应具有与传统发电机相同的功频特性, 故虚拟调速器需能够自主调节输入的机械功率 P_m , 其关系表达式为

$$P_m = p^* + k_\omega (\omega_0 - \omega) \quad (11)$$

式中: p^* 为参考功率; k_ω 为调节系数。由文献[24]可知, 励磁调节器表达式为

$$E_v = [E_0 + k_q \cdot (Q_{ref} - Q_{ve}) - U_m] \cdot (k_{up} + \frac{k_{ui}}{s}) \quad (12)$$

式中: E_0 为虚拟同步机的初始输入电势; k_q 为 VSG 的无功调压系数; Q_{ref} 、 Q_{ve} 分别为系统额定无功功率和实际无功功率; U_m 为系统的实际电压有效值; k_{up} 为比例系数; k_{ui} 为积分系数。

结合式(7)~式(12), 得到如图 4 所示的常规 VSG 的控制框图, 该框图主要由本体模型、虚拟调速器和励磁调节器模型构成。

2.2 VSG 的响应特性及存在问题分析

由式(7)可知, 有功控制回路的动态响应特性可

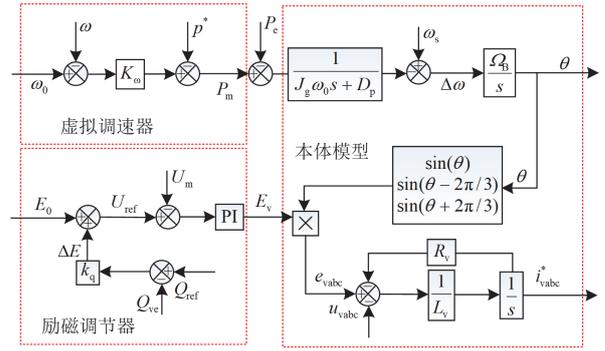


图 4 常规 VSG 的控制框图

Fig. 4 Control block diagram of conventional VSG

以通过改变等效惯量系数 J_g 和等效阻尼系数 D_p 来调整。其中, 增大 J_g 可为系统提供较高的虚拟惯量, 但同时会使系统的响应速度变慢^[25-26]; 增大 D_p 会使换流站输有功功率的稳态偏差变大^[27]。由于主要讨论 J_g 的变化对频率支撑效果的影响, 暂不考虑稳态偏差问题, 因此对阻尼系数 D_p 取定值。

根据式(3)、式(7)及上述分析, 常规 VSG 有功回路控制图如图 5 所示。

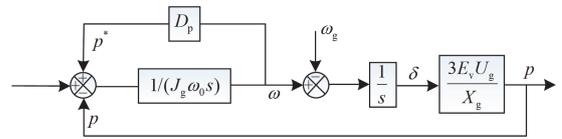


图 5 常规 VSG 有功功率控制回路控制图

Fig. 5 Normal VSG active circuit control diagram

图 5 中, Δp^* 为有功控制回路中参考功率的变化量, $\Delta \omega_g$ 为系统频率的变化量。基于这些定义, 对图 5 有功控制部分进行线性化得

$$\Delta p = G_1(s) \cdot \Delta p^* + G_2(s) \cdot \Delta \omega_g \quad (13)$$

式中: $G_1(s)$ 为输出功率到参考功率的传递函数, 反映了输出功率 Δp 相对参考功率变化 Δp^* 的动态响应; $G_2(s)$ 为输出功率到输出频率的传递函数, 反映了输出功率 Δp 相对于频率变化 $\Delta \omega_g$ 的动态响应。具体表达式分别为

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{3E_v U_g}{J_g \omega_0 X_g s^2 + D_p X_g s + 3E_v U_g} \\ G_2(s) = -\frac{3E_v U_g (J_g \omega_0 s + D_p)}{J_g \omega_0 X_g s^2 + D_p X_g s + 3E_v U_g} \end{cases} \quad (14)$$

观察式(14)可知, 传递函数 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 具有相同的极点, 其阻尼比 ζ 和自然振荡频率 ω_n 分别为

$$\begin{cases} \zeta = \sqrt{\frac{X_g}{12\omega_0 E_v U_g}} \cdot \frac{D_p}{\sqrt{J_g}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{3E_v U_g}{\omega_0 X_g}} \cdot \frac{1}{\sqrt{J_g}} \end{cases} \quad (15)$$

分析式(15)可知, 阻尼比 ζ 和自然振荡频率 ω_n 均与惯量参数 J_g 成反比。增大 J_g 会导致阻尼比 ζ 减小, 降低系统稳定性; 同时惯量 J_g 的增大也使自然振荡频率 ω_n 减小, 限制系统的带宽, 使有功控制回路的响应速度变慢。故虽然 J_g 的增大可提高系统的调频性能, 但同时也带来了 VSG 在 APL 回路中响应速度降低的缺点, 即参数 J_g 的增大在上述两个指标方面表现出一定的耦合性、互斥性。

常规 VSG 的主要电力系统参数如表 2 所示。将表 2 中的参数代入式(14), 当阻尼 D_p 保持恒定时, 虚拟惯量 J_g 以步长 0.1 从 0.5 增大至 10 时, 常规 VSG 闭环控制系统的极点变化规律图, 如图 6 所示。

表 2 电力系统参数

Table 2 Parameters or variables of power system			
参数	取值	参数	取值
U_{dc}/V	800	$J_g/(kg \cdot m^2)$	0.5~10
E_0/V	310	D	0
$K_\omega/(W \cdot s \cdot rad^{-1})$	2000	L/H	0.02
$\omega_0/(rad/s)$	100π	R/Ω	0.1

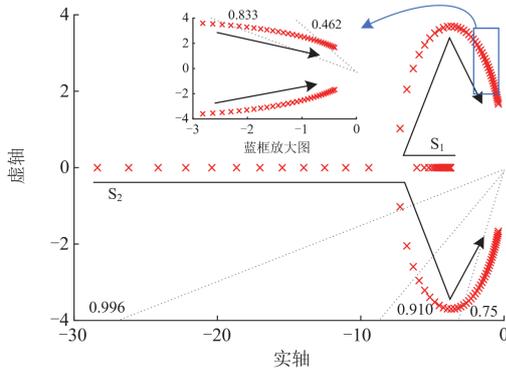


图 6 APL 瞬态响应图

Fig. 6 APL transient response diagram

图 6 中, 随着虚拟惯量 J_g 的增大, 主导极点 S_1 先略微远离虚轴, 后同 S_2 向虚轴靠近; 为更好体现 J_g 的改变对系统极点的影响, 将图 6 中 J_g 从 1 至 5 变化的曲线用蓝框标出并进行放大, 观察放大图可知, 随 J_g 的增大极点 S_1 、 S_2 逐渐向虚轴靠近。根据控制理论, 极点越靠近虚轴, 系统振荡越明显,

稳定性越差, 与式(15)分析一致。

为进一步分析惯量 J_g 的变化对系统提供频率支撑能力和对参考功率跟踪速度之间的影响, 在图 1、图 2、图 5、式(13)等的基础上, 对常规 VSG 控制策略取不同的惯量参数 J_g , 设定 $t=1.0$ s 时, 系统增加 0.14 p.u.的参考功率扰动; $t=5.0$ s 时, 频率增加 0.003 p.u.的扰动, 得到有功控制回路瞬态响应曲线, 如图 7 所示。

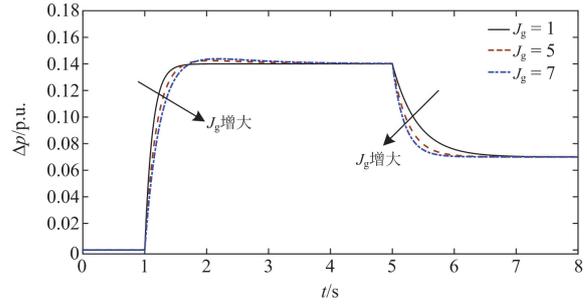


图 7 APL 瞬态响应图

Fig. 7 APL transient response diagram

由图 7 可知:

1) 在 $t=1.0$ s 时刻参考功率发生阶跃变化后, 随着惯量参数 J_g 的增加, 输出功率 Δp 响应曲线斜率变缓, 超调略微增加, 表明输出功率 p 对参考功率 p^* 的跟踪速度逐渐变慢, 即常规 VSG 控制的系统在应对参考功率变化时, 惯量参数 J_g 的增大降低了实际输出功率对参考功率的跟踪速度。

2) 在 $t=5.0$ s 时刻引入频率扰动阶跃变化后, 随着惯量参数 J_g 的增加, Δp 响应曲线斜率变陡峭, 表明系统输出功率 p 对频率扰动 $\Delta\omega_g$ 的响应速度增加, 相同时间内换流站输出功率增多, 即常规 VSG 控制的系统在应对频率扰动时, 惯量参数 J_g 的增大提高了系统的频率支撑性能。

通过以上分析可知, 在常规 VSG 控制中, 通过对惯量参数 J_g 的调整, 难以使系统同时满足较高的惯量支撑和更快的参考功率跟踪速度, 为达到更好的调频效果, 需要将两者进行解耦, 使其可以进行独立控制。

同时, 在换流站通过 VSG 控制的直流电压调控方面, 利用直流侧电容为换流站提供调频能力时, 电压和两侧功率的关系如式(16)所示。

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

式中: C 为直流侧电容; U_{dc} 为直流侧电压; P_{in} 、 P_{out} 分别为换流站的输入、输出功率。为建立换流站的

直流侧电压 U_{dc} 和交流侧频率 ω 之间的关系, 对比式(7)、式(16), 得

$$C \cdot U_{dc} \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = J_g \cdot \omega_0 \cdot \frac{d\omega}{dt} + D_p \cdot \omega_0 \cdot (\omega - \omega_0) \quad (17)$$

对式(17)两端同时积分并代入初始电压 U_{dc0} 和初始频率 ω_0 , 得

$$U_{dc} = \sqrt{\left[\frac{2\omega_0}{C} J_g (\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{C} D_p (\omega - \omega_0) \right]^2} + U_{dc0}^2 \quad (18)$$

考虑等效惯量系数 J_g 对系统调节效果的影响, 而忽略等效阻尼参数 D_p 时, 整理式(18), 得

$$U_{dc}^2 - U_{dc0}^2 = \frac{2\omega_0}{C} J_g (\omega - \omega_0) \quad (19)$$

由式(19)可知, 直流电压偏差与虚拟惯量 J_g 呈正相关, J_g 越大, 柔直系统对扰动侧的频率支撑作用越强, 但同时直流电压偏差也将越大。

综上所述, 传统 VSG 存在随着虚拟惯量 J_g 的增加, 系统对参考功率的跟踪速度会降低, 同时电压调节效果会变差。故当系统需要更高的虚拟惯量 J_g 以进行更好的频率支撑时, 传统 VSG 控制因存在严重的耦合性问题, 故限制了其应用范围。

3 解耦 VSG 控制方法设计

为了解决上述问题, 在常规 VSG 设计的基础上, 针对有功控制回路进行改进。在实现对直流电压稳定控制的前提下, 达到将 VSG 的参考功率跟踪速度和提供虚拟惯量支撑两者解耦的目的。

3.1 解耦 VSG 控制方法设计

首先, 在换流站控制的外环引入直流电压信号, 使 VSG 的功率指令由外部电压控制回路产生。采用带下垂的 PI 控制器对直流电压进行调节^[20], 根据由负荷扰动引起的直流电压偏差进行自适应地调整参考功率 p^* , 进而在闭环响应中达到改善电压的目的, 引入直流电压的结构图如图 8(a)所示。

图 8(a)中, U_{dc}^* 、 p^{set} 分别为直流电压参考值和 VSG 功率设定值; p^* 为实际的参考功率跟踪值; X_c 为交流线路电抗; R_q 为 P - U 下垂系数。图 8(b)是在图 8(a)的基础上, 搭建的直流电压闭环控制系统模型, 主要由直流电压控制、VSG 控制及直流电容构成。 $F_{VSG}(s)$ 为 VSG 控制的传递函数; Ω_B 为系统的常规角频率; C_{dc} 为直流电容的容量值。

其次, 利用图 8 中引入直流电压产生的实际参考功率跟踪值 p^* , 选择对图 5 所示的常规 VSG 有功功率控制回路进行改进。设计如图 9 所示解耦

VSG 有功功率回路图, 改进部分以红框标出, 由截止频率为 ω_r 的低通滤波器和一条前馈通道组成。

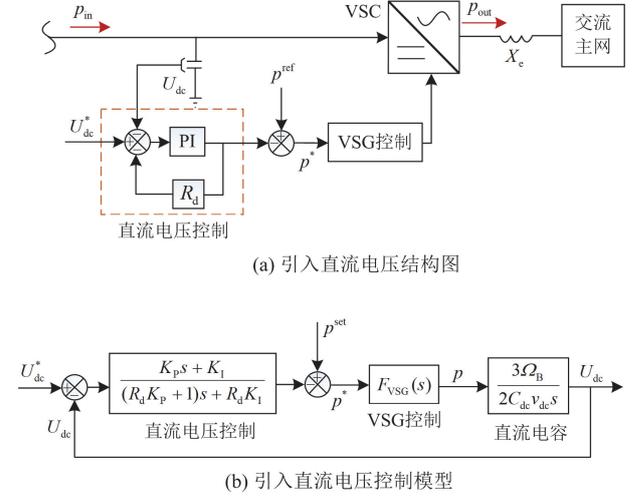


图 8 引入直流电压的 VSC 框图

Fig. 8 VSC block diagram of introducing DC voltage

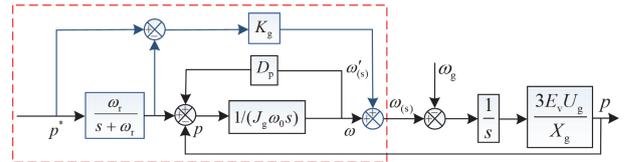


图 9 解耦 VSG 有功功率回路图

Fig. 9 Decoupled VSG active power loop diagram

图 9 中 $\omega_{(s)}$ 、 $\omega'_{(s)}$ 分别为改进策略后的角频率值和增加的角频率值。由图 9 可知, 改进后系统的闭环传递函数 $G'_1(s)$ 和扰动传递函数 $G'_2(s)$ 分别为

$$\begin{cases} G'_1(s) = \frac{3E_v U_g (J_g \omega_0 K_g s^2 + D_p K_g s + \omega_r)}{(s + \omega_r)(J_g \omega_0 X_g s^2 + D_p X_g s + 3E_v U_g)} \\ G'_2(s) = -\frac{3E_v U_g (J_g \omega_0 s + D_p)}{J_g \omega_0 X_g s^2 + D_p X_g s + 3E_v U_g} \end{cases} \quad (20)$$

将式(14)与式(20)对比可知, 改进后, 扰动传递函数 $G'_2(s)$ 与常规 VSG 保持一致, 表明在改进控制策略下, 抗电网频率干扰的能力保持不变; 但闭环传递函数 $G'_1(s)$ 则与常规 VSG 不同, 它是一个三阶系统, 有 3 个闭环极点, 分别为

$$\begin{cases} t_1 = -\omega_r \\ t_{2,3} = \frac{-D_p X_g \pm \sqrt{D_p^2 X_g^2 - 12J_g \omega_0 X_g E_v U_g}}{2J_g \omega_0 X_g} \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可以看出, 极点 t_1 只与低通滤波器的截止频率有关, 极点 t_2 、 t_3 是一对决定系统振荡的共

特征根, 与线路阻抗、虚拟惯量等参数有关。

当设计一个合理的增益系数 K_g 值来匹配并网点相电压、线阻抗等参数时, 引入的新零点可以消除 VSG 中代表振荡的原共轭极点, 使系统的传递函数降至一阶, 进而 t_1 成为主导极点, 则系统将表现出与扰动传递函数 $G'_2(s)$ 不同的功率响应特性, 从而达到预期的目的。

当前馈通道增益系数 K_g 满足式(22)条件时, 可实现解耦设计的预期效果。

$$K_g = \frac{X_g \omega_r}{3E_v U_g} \quad (22)$$

将解耦 VSG 控制的系统传递函数 $G'_1(s)$ 的原共轭极点 t_2 、 t_3 用所设计支路中新增的零点相抵消, 简化后为

$$G'_1(s) = \frac{p}{p^*} = \frac{\omega_r}{s + \omega_r} \quad (23)$$

式中, $G'_1(s)$ 为改进后的系统闭环传递函数。

新结构实现了极点-零点相位的对消, 从而使系统的功率响应特性降至一阶, APL 的传递函数 $G'_1(s)$ 被降阶为低通滤波器形式, 进而功率传递函数 $G'_1(s)$ 的极点可以重置为低通滤波器的截止频率 ω_r , 与控制器参数和功率传递模型参数均无关。这使得输出功率对参考功率的跟踪速度仅由参数 ω_r 决定, 而不受参数 J_g 的影响。因此, 改进的 VSG 策略中 $G'_1(s)$ 与 $G'_2(s)$ 特征方程不同, 允许系统设计同时具有快速参考跟踪和高虚拟惯量的特性, 即实现两者解耦。

基于上述分析, 受端换流站总体控制框图如图 10 所示。

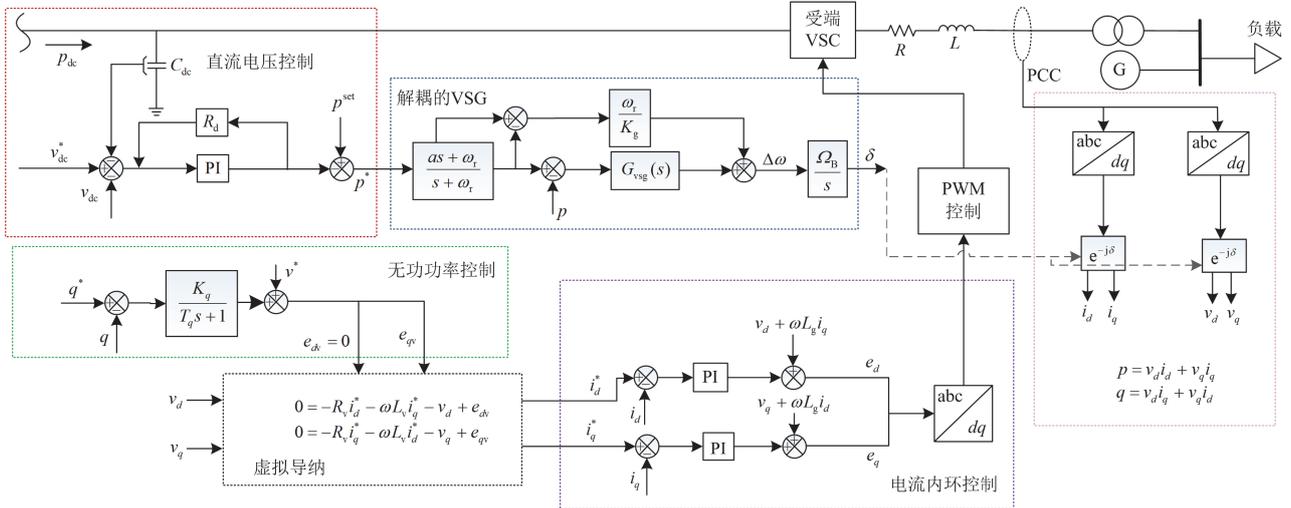


图 10 受端换流站总体控制框图

Fig. 10 Overall control block diagram of receiving converter station

3.2 参数解耦验证

为验证上述设计的有效性, 下面将解耦 VSG 与常规 VSG 的控制性能进行比较。首先, 设定在 0.1~1.3 s 期间, 系统频率以 0.5 Hz/s 的速率降低, 以模拟频率扰动; 然后, 在 $t=1.8$ s 时, 设定系统突增 0.1 p.u. 的参考功率。其中, 解耦 VSG 控制中, 为保持一定的功率跟踪速度, 参数 ω_r 取 50 rad/s 且保持不变。仿真得到如图 11、图 12 所示两种 VSG 策略在不同参数 J_g 下, 换流站输出功率对参考功率和电网频率变化的响应图。

由图 11 和图 12 可知, 在 0.1~1.3 s 期间, 在常规 VSG 和解耦 VSG 控制中惯量参数 J_g 相同时, 两策略输出率曲线变化相同; 随着参数 J_g 的增大, 功

率 p 的输出速度变快, 数值变大, 表明参数 J_g 越大, 向电网输送的功率越多, 提供的频率支撑能力越强。在 1.8 s 后, 常规 VSG 在跟踪过程中存在明显

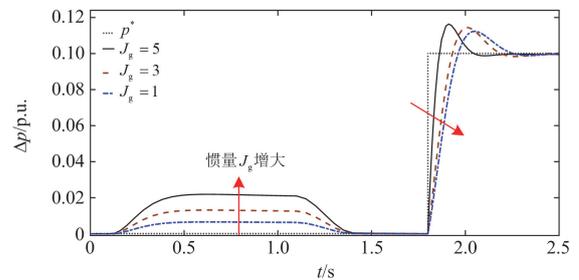


图 11 常规 VSG 对不同 J_g 的功率响应图

Fig. 11 Power response diagram of conventional VSG to different J_g

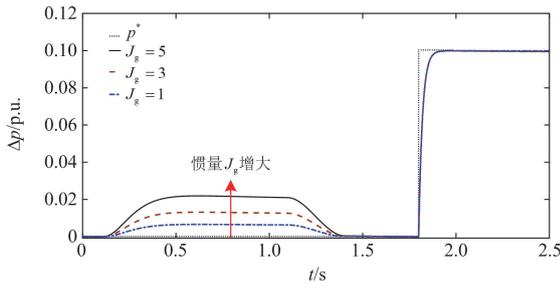


图 12 解耦 VSG 对不同 J_g 的功率响应图
Fig. 12 Decoupled VSG power response diagram for different J_g

的超调,且随着参数 J_g 的增加,输出功率的超调峰值降低、沉降时间变长、跟踪速度变慢。而解耦 VSG 控制则未观察到超调现象且跟踪速度不随着惯量参数的 J_g 变化而变化。这是因为式(14)中的传递函数 $G_1(s)$ 为二阶系统,为了保持整体系统的稳定性,一般会取欠阻尼状态,故跟踪过程中存在超调现象。而式(23)的 $G_1^*(s)$ 为一阶系统,动态特性简单,通常不存在超调现象。且在图 12 所示的解耦 VSG 控制中,随着参数 J_g 的增大, p 对 p^* 的跟踪速度不变,表明改进策略下参数 J_g 的变化不影响系统对参考功率的跟踪速度。

根据设计目标及以上分析,在模拟频率对系统的干扰响应方面,传统 VSG 和解耦 VSG 具有相同的行为,即参数 J_g 不同时,VSC 对电网传输的功率不同,参数 J_g 越大,传输功率越大,提供的频率支撑能力越大。在模拟对参考功率的跟踪方面,传统 VSG 和解耦 VSG 表现出不同特性,前者的控制中,参数 J_g 越大跟踪速度越慢;后者的控制中,参数 J_g 的变化不影响对参考功率的跟踪速度。

为了进一步检验所提解耦 VSG 的参数 ω_r 对系统调节效果的影响,在参数 J_g 取值相同的前提下,取不同的 ω_r 值,仿真结果如图 13 所示。

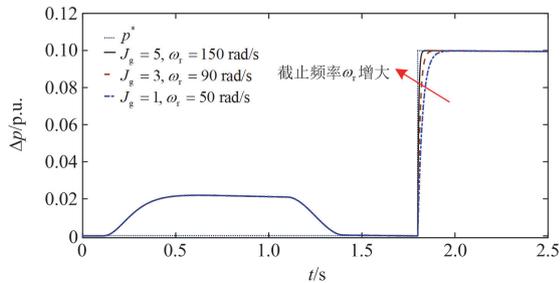


图 13 解耦 VSG 对不同 ω_r 的功率响应图
Fig. 13 Decoupled VSG power response for different ω_r

由图 13 可知,在 0.1~1.3 s 期间,输出功率在不同参数 ω_r 下保持不变,且与常规 VSG 控制基本相同,这表明参数 ω_r 不影响系统对频率扰动的响应;1.8 s 后,随着参数 ω_r 的增大,输出功率 p 对 p^* 的跟踪速度明显变快,表明参数 ω_r 会影响 APL 中输出功率 p 对参考功率 p^* 的跟踪速度,且 ω_r 取值越大,对参考功率的跟踪速度越快。

综上,所提策略可实现将虚拟惯量的调节和参考功率的跟踪两者解耦的目的,使两者可分别由参数 ω_r 、 J_g 独立控制,进而提高 VSG 的频率调节性能。

4 解耦参数对系统响应关联性分析

在解耦 VSG 的控制过程中,主要参数分别为 J_g 、 ω_r ,其中,参数 J_g 的取值反映 VSC 为系统提供惯量支撑的多少,参数 ω_r 的取值反映 VSG 输出功率对参考功率 p^* 的跟踪速度。基于图 10 的控制策略,即受端换流站采用解耦 VSG 控制,在 $t = 5$ s 时,设定系统突增 0.06 p.u. 的负荷。为了使验证结果更具代表性,根据文献[28],在电压控制回路中, R_d 取 0.05, K_p 和 K_i 值的设计是为获得 70 rad/s 的带宽和 0.707 的最佳阻尼比; Ω_b 取 314 rad/s, C_{dc} 取 0.2 p.u., v_{dc} 取 1 p.u. 进行系统的设置,下面进行分析论证。

4.1 参数 J_g 对频率电压的影响

在图 1 和图 2 系统结构及所搭建模型基础上,对受端换流站采用如图 10 所示的解耦 VSG 控制策略,保持参数 $\omega_r = 100$ rad/s 不变,取不同参数 J_g ,得到图 14、图 15 所示系统对不同 J_g 的频率和电压的响应图。

由图 14 可知,当参数 ω_r 保持不变时,面对相同负荷扰动,随着参数 J_g 的增大,频率变化率逐渐变得平缓,下降最低点后逐渐增高,表明随着参数 J_g 的增大,惯量效应增强,调频效果变好。由图 15

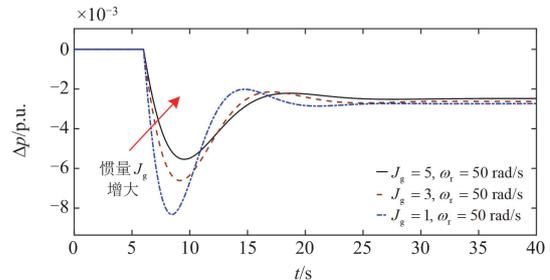
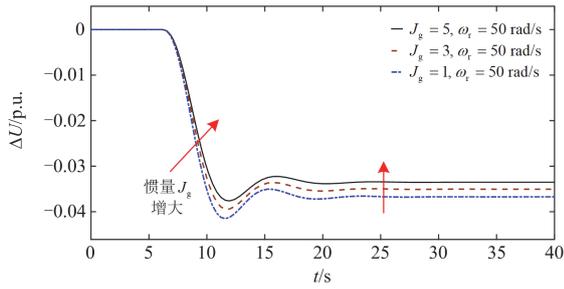


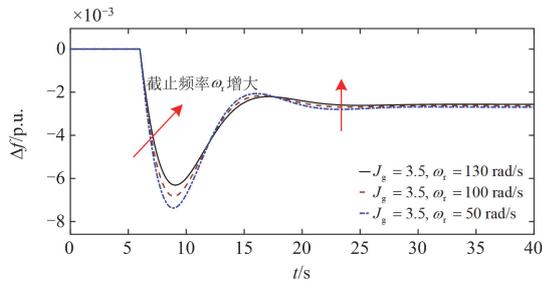
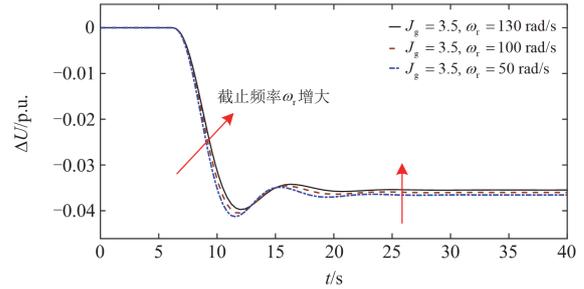
图 14 ω_r 不变,不同 J_g 下的频率响应图
Fig. 14 Frequency response graph for different J_g and constant ω_r

图 15 ω_t 不变, 不同 J_g 下的电压响应图Fig. 15 Voltage response graph for different J_g and constant ω_t

可知, 随着参数 J_g 的增大, 系统电压响应逐渐变慢, 电压变化更加陡峭, 且直流电压稳态偏差值变大, 表明随着参数 J_g 的增大, 需要释放更多高压侧直流母线的电容 C_{dc} 的能量来提供惯量支撑, 所以对应的高压侧直流母线电压 U_{dc} 的幅值跌落增大。仿真结果与式(19)的分析结论保持一致, 即参数 J_g 越大, 频率调节效果越好, 但调压效果越差。

4.2 参数 ω_t 对频率电压的影响

同理, 在图 1 和图 2 系统结构及所搭建模型基础上, 采用本文所提解耦 VSG 控制策略, 保持参数 $J_g = 3.5$ 不变, 取不同的参数 ω_t , 得到如图 16、图 17 所示的系统在不同参数 ω_t 下的频率和电压的响应图。由图 16 可知, 当参数 J_g 保持不变时, 面对相同负荷扰动, 随着参数 ω_t 的增大, 频率变化率 (rate of change of frequency, ROCOF) 逐渐变得平缓, 且频率的最低点逐渐升高, 表明随着参数 ω_t 的增大, 惯量效应增强, 调频效果变好。但相较于图 14, 频率调节效果不如参数 J_g 变化时明显。由图 17 可知, 随着参数 ω_t 的增大, 电压变化变得平缓, 稳态电压偏差值基本保持不变, 表明随着参数 ω_t 的增大, 电压调节效果变好, 波动幅值变小, 且参数 ω_t 的改变, 仅影响 APL 回路的响应速度, 而对稳态电压基本无影响。由此得出, 参数 ω_t 越大, 调频效果

图 16 J_g 不变, 不同 ω_t 下的频率响应图Fig. 16 Frequency response graph for different ω_t and constant J_g 图 17 J_g 不变, 不同 ω_t 下的电压响应图Fig. 17 Voltage response graph for different ω_t and constant J_g

越好, 但不如参数 J_g 的影响效果明显; 参数 ω_t 越大, 调压效果越好, 且不会影响稳态的终值。

因此, 在系统对频率响应的要求、负载特性及控制策略等约束下, 选择较大的参数 ω_t 、参数 J_g 作为解耦 VSG 的控制参数进行柔直系统的负荷频率控制, 可以达到更好的调节效果。

5 仿真分析

5.1 仿真环境设置

为验证所提策略的可行性和有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真实验。在图 1 所示的新能源经柔直系统并网模型基础上, 采用解耦 VSG 与常规 VSG 控制策略进行对比。电网侧常规机组采用 2 台 800 MW 的火力发电机, 新能源侧采用 100 台 1.5 MW 的双馈风电机组, 其他主要参数设置参考文献[29]进行取值并进行标么化, 如表 3 所示。

仿真过程中, 为了验证所提方法的有效性和优越性, 设置不同运行环境, 对以下 3 种控制策略进行对比分析: 1) 新能源经柔性直流系统直接并网, 即无 VSG 控制; 2) 并网过程中, 换流站采用常规 VSG 控制策略; 3) 换流站采用所提的解耦 VSG 控制策略。

表 3 电力系统参数

Table 3 Power system parameters

参数/p.u.	取值	参数/p.u.	取值
M	10.5	T_{g2}	0.1
T_{r1}	10	K_b	35
T_{r2}	10	T_{i1}	0.6
K_{r1}	0.43	T_{i2}	0.2
K_{r2}	0.25	R_1	0.036
R_d	0.05	R_2	0.03
v_{dc}	1	C_{dc}	0.2
K_p	0.68	Ω_B	314
D	2.75	K_i	0.51
T_{el}	0.12	—	—

5.2 恒定负荷扰动的验证

假设初始柔性直流系统运行在稳定状态，仿真时间设置为 40 s，在 $t = 6.0$ s 时，分别设定系统突增 0.05 p.u. 和 0.15 p.u. 的负荷，系统的频率、功率和电压动态响应曲线的仿真结果分别如图 18—图 20 所示。

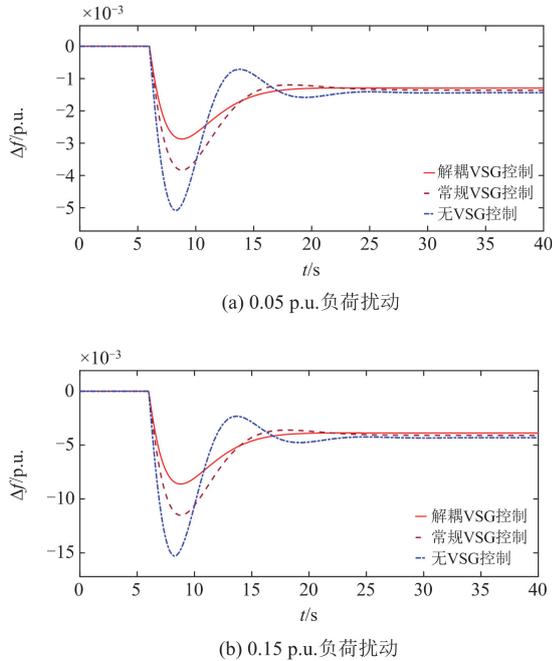


图 18 固定扰动下频率动态响应曲线

Fig. 18 Frequency dynamic response curve under fixed disturbance

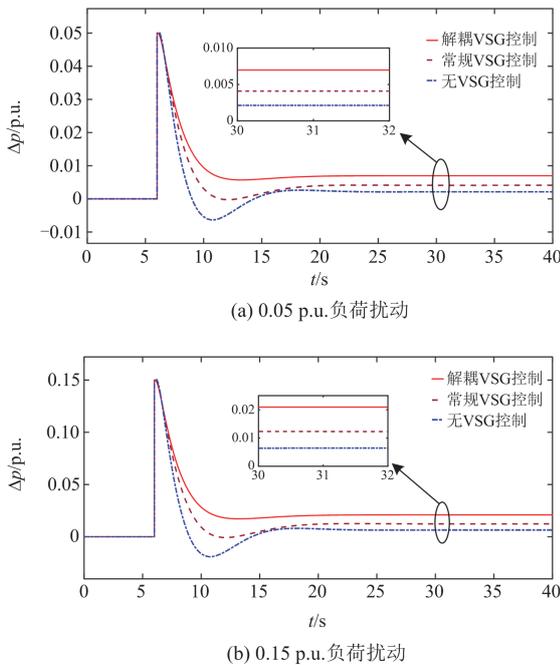


图 19 固定扰动下功率动态响应曲线

Fig. 19 Power dynamic response curve under fixed disturbance

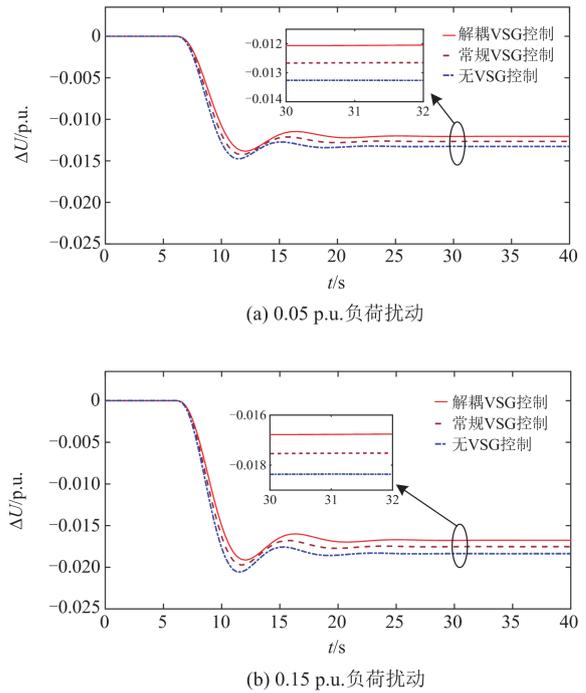


图 20 固定扰动下电压动态响应曲线

Fig. 20 Voltage dynamic response curve under fixed disturbance

由图 18 可知，6 s 时刻发生负荷突增扰动后，系统频率降低，而后经不同时间波动后恢复稳态值。由图 18(a)可知，当负荷扰动较小时，解耦 VSG 策略相较于其他两种控制策略，频率偏差的最低点较高，振荡较小，调频效果略好。由图 18(b)可知，当负荷扰动较大时，整体系统频率偏差增大，解耦 VSG 控制策略对系统频率偏差的调节效果明显优于其他两种控制策略。这是因为当负荷扰动增大时，所提策略中的 VSG 可实现参考跟踪速度和高虚拟惯量支撑的解耦，当系统取相同的惯量时，有功功率的跟踪速度不受虚拟惯量的约束，故与常规 VSG 控制策略和无 VSG 控制相比，解耦 VSG 控制能有效提升系统换流站的调频性能，且系统频率偏差更小，超调量更小，动态响应能力更强。

由图 19 可知，6 s 时刻发生负荷突增扰动后，系统输出功率增多，相较另外两种控制策略，解耦 VSG 控制策略中的输出功率跟踪参考功率的速度较快。对比图 19(a)、图 19(b)可知，当负荷扰动增大时，输出功率明显增多，表明换流站为应对大负荷扰动，输出更多的功率以参与系统频率支撑；且随负荷扰动的增大，解耦 VSG 控制下输出功率的响应速度明显快于其他两种控制策略，且波动较小，原因在于所提策略实现了参数 J_g 、 ω_r 的解耦，可取较大的截止频率 ω_r 以提高 APL 的响应速度，故在相同的时间下可以更快地为系统提供功率支持。

由图 20 可知, 6 s 时刻发生负荷突增扰动后, 系统电压降低, 而后各控制策略以不同的速度恢复到稳态值。经对比, 解耦 VSG 控制的电压调节效果优于常规 VSG 控制及无 VSG 控制。这是由于解耦 VSG 在有功控制回路中引入了直流电压, 形成闭环反馈控制回路, 故有效地减小了电压波动, 保证了直流电压的稳定性。

5.3 随机负荷扰动的验证

假设系统负荷扰动如图 21 所示进行随机变化, 新能源侧输出功率保持不变。在此随机负荷扰动情况下, 各指标的动态响应曲线的仿真结果如图 22—图 24 所示。

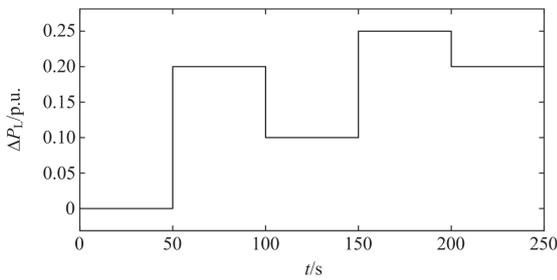


图 21 随机负荷扰动变化图

Fig. 21 Random load disturbance variation diagram

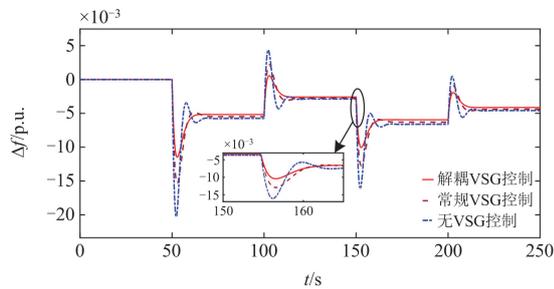


图 22 随机扰动下频率动态响应曲线

Fig. 22 Frequency dynamic response curve under random disturbance

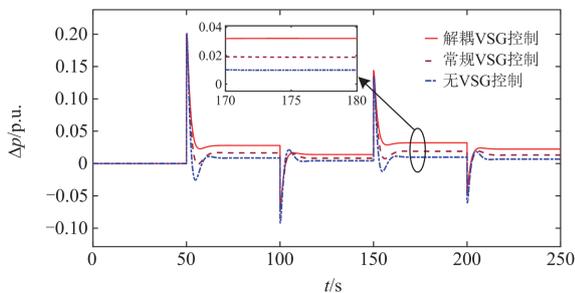


图 23 随机扰动下功率动态响应曲线

Fig. 23 Power dynamic response curve under random disturbance

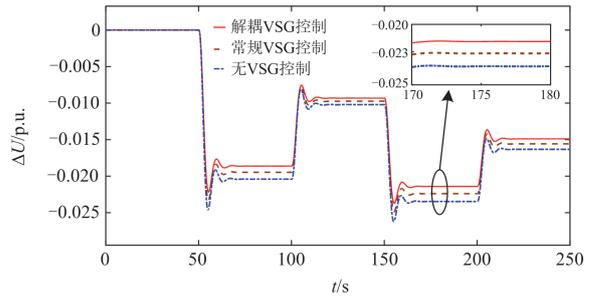


图 24 随机扰动下电压动态响应曲线

Fig. 24 Voltage transient response curve under random disturbance

由图 22—图 24 可知, 当扰动负荷的功率随机变化时, 3 种控制策略均可以对扰动进行响应。随着负荷扰动的增大, 频率偏差将会变大, 输出的功率增多, 电压偏差变大; 当负荷扰动减小时, 频率偏差将会变小, 输出的功率减少, 电压偏差变小。同时, 相较于常规 VSG 控制和由其他控制策略的响应, 所提解耦的 VSG 控制在应对负荷随机变化时, 各项指标效果均表现更优。

6 结论

为了解决高比例新能源经柔性直流输电系统并网所导致的系统稳定性降低的问题, 提出了一种计及电压控制的参数解耦 VSG 频率支撑策略, 通过理论分析和仿真验证, 得到如下结论。

1) 在柔直系统参与调频过程中, 针对换流站的 VSG 控制策略, 通过引入低通滤波器和前馈通路, 可达到将虚拟惯量的调节和参考功率的跟踪两者解耦的目的。

2) 对 VSG 采用解耦控制后, 得到两个控制参数 J_g 、 ω_r , 使系统同时满足对电网频率扰动的高虚拟惯量支撑和对参考功率变化的快速跟踪, 达到更好的频率支撑效果。

3) 在对换流站的控制中, 将直流电压引入 VSG 控制的外环, 形成电压闭环回路, 并采用带下垂的 PI 控制器进行控制, 可达到对系统进行频率支撑的同时实现对直流电压的良好控制。

参考文献

- [1] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
- HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System

- Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [2] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [3] 沈豫, 韩钟宽, 曾振松, 等. 基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 102-111, 128.
SHEN Yu, HAN Zhongkuan, ZENG Zhensong, et al. Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 102-111, 128.
- [4] 王雪, 刘林, 卓庆东, 等. 基于虚拟惯量控制的新型电力系统功率差前馈振荡抑制方法[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 68-76.
WANG Xue, LIU Lin, ZHUO Qingdong, et al. Power difference feed-forward oscillation suppression method for new power system based on virtual inertial control[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 68-76.
- [5] 钟祖浩, 文云峰, 叶希, 等. 多类型资源协调的“双高”送端电网频率紧急控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3801-3811.
ZHONG Zuhao, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Emergency frequency control strategy for double-high sending-end grids with coordination of multiple resources[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3801-3811.
- [6] 汝冬, 蔺红. 改善惯性响应与一次调频的风电全直流系统协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 52-62.
RU Dong, LIN Hong. Coordinated control strategy for improving inertial response and primary frequency modulation in wind power full DC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 52-62.
- [7] 朱子民, 张锦芳, 常清, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑柔直系统的送端自适应 VSG 控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 211-221.
ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 211-221.
- [8] WANG W, LI Y, CAO Y, et al. Adaptive droop control of VSC-MTDC system for frequency support and power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 1264-1274.
- [9] EL-BAHAY M H, LOTFY M E, EL-HAMEED M A. Effective participation of wind turbines in frequency control of a two-area power system using coot optimization[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-15.
- [10] MI Y, CHEN B, CAI P, et al. Frequency control of a wind-diesel system based on hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 1-13.
- [11] 刘英培, 崔汉阳, 梁海平, 等. 考虑直流电压稳定的 VSC-MTDC 附加频率自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2160-2168.
LIU Yingpei, CUI Hanyang, LIANG Haiping, et al. Additional frequency adaptive droop control strategy considering DC voltage stability for VSC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2160-2168.
- [12] LONG B, LIAO Y, CHONG K T, et al. Enhancement of frequency regulation in AC microgrid: a fuzzy-MPC controlled virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3138-3149.
- [13] 刘青, 徐宏璐, 李权. 基于 STATCOM/BESS 强化风机 VSG 虚拟惯性的协同控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 74-81.
LIU Qing, XU Honglu, LI Quan. Cooperative control strategy of wind turbine-VSG with enhanced virtual inertia based on STATCOM/BES[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 74-81.
- [14] 温春雪, 陈丹, 胡长斌, 等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 120-126, 183.
WEN Chunxue, CHEN Dan, HU Changbin, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 120-126, 183.
- [15] 邹蕴韬, 张海涛, 刘春阳, 等. 新型虚拟同步发电机控制方法及其暂态过程自适应控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 933-943.
ZOU Yuntao, ZHANG Haitao, LIU Chunyang, et al. A control approach of novel virtual synchronous generator and an adaptive control strategy for its transient process[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 933-943.
- [16] WANG W, JIANG L, CAO Y, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low frequency oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4609-4621.
- [17] REMON D, CAÑIZARES C A, RODRIGUEZ P. Impact of 100-MW-scale PV plants with synchronous power controllers on power system stability in northern Chile[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017,

- 11(11): 2958-2964.
- [18] LI M, HUANG W, TAI N, et al. A dual-adaptivity inertia control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 594-604.
- [19] DONG S, CHEN Y C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 32(2): 608-619.
- [20] LIU J, MIURA Y, ISE T. Fixed-parameter damping methods of virtual synchronous generator control using state feedback[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99177-99190.
- [21] 刘昊宇, 刘崇茹, 蒋思雯. 多端柔性直流输电系统动态附加频率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 164-170.
- LIU Haoyu, LIU Chongru, JIANG Siwen. Dynamic additional frequency control strategy for VSC-MTDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 164-170.
- [22] WANG R, CHEN L, ZHENG T, et al. VSG-based adaptive droop control for frequency and active power regulation in the MTDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 260-268.
- [23] GUAN M, CHENG J, WANG C, et al. The frequency regulation scheme of interconnected grids with VSC-HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 864-872.
- [24] 杜建鹏, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟功角功率控制的 VSG 增强功率解耦策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8808-8819.
- DU Jianpeng, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG enhanced power rate decoupling strategy based on virtual power angle power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8808-8819.
- [25] 郭磊磊, 贾凯阳, 朱虹, 等. 基于有功微分补偿与虚拟惯量自适应的光储 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 21-31.
- GUO Leilei, JIA Kaiyang, ZHU Hong, et al. Control strategy for a PV energy storage VSG based on active power differential compensation and virtual inertia adaptive strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 21-31.
- [26] TIAN Y, WANG H, FANG J, et al. DC voltage regulation bandwidth enhancement control in VSG based bi-directional EV charger[C] // 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC), August 24-26, 2023, Shanghai, China: 479-485.
- [27] 兰征, 龙阳, 曾进辉, 等. 引入暂态电磁功率补偿的 VSG 控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1421-1429.
- LAN Zheng, LONG Yang, ZENG Jinhui, et al. VSG control strategy with transient electromagnetic power compensation[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1421-1429.
- [28] ZHANG W, CANTARELLAS A M, ROCABERT J, et al. Synchronous power controller with flexible droop characteristics for renewable power generation systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1572-1582.
- [29] 赵熙临, 龚楚峰, 付波. 一种风电场经 VSC-HVDC 并网的 VSG 变参数负荷频率控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 117-126.
- ZHAO Xilin, GONG Chufeng, FU Bo. A VSG variable parameter load frequency control strategy for wind farms connected to the grid by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 117-126.

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-11-19

作者简介:

赵熙临(1969—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向电力系统自动化和电力系统优化与控制; E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn

王成伟(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: 13222515045@163.com

(编辑 张颖)