第 50 卷 第 1 期：117-126 高电压技术 Vol.50, No.1: 117-126
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230227

一种风电场经 VSC-HVDC 并网的 VSG 变参数负荷频率控制策略

赵熙临，龚楚峰，付　波
（湖北工业大学电气与电子工程学院，武汉 430068）

摘　要：风电的大规模并网导致系统等效惯量下降、不确定性增加，给电力系统的负荷频率控制(load frequency control，LFC)带来新的挑战。考虑到柔性直流输电系统(voltage source converter based high voltage DC，VSC-HVDC)具有的潜在调频能力，对此展开研究，针对风电场经 VSC-HVDC 并网的情形提出了一种虚拟同步发电机(virtual synchronous generator，VSG)变参数负荷频率控制策略。首先，在风电场经 VSC-HVDC 并网的 LFC 模型及拓扑结构分析基础上，为了提高 VSC-HVDC 的可控性，对换流器的控制环节进行了 VSG 控制方法的设计；然后，对 VSG 控制参数与频率变化的关联性进行分析，并基于分数阶梯度下降法(fractional-order gradient descent method，FOGDM)，利用频率的分数阶导数提取频率深层变化特征，以优化 VSG 控制参数；在此基础上，考虑到系统的不确定性，设计触发机制对 VSG 变参数优化模式进行调整，以降低 VSG 参数的变换频次，提高系统频率控制的针对性。仿真结果表明：所提控制方法能有效改善电网负荷频率控制效果，具有良好的适应性。

关键词：负荷频率控制；虚拟同步发电机；风电；柔性直流输电系统；分数阶；参数优化

A VSG Variable Parameter Load Frequency Control Strategy for Wind Farms Connected to the Grid by VSC-HVDC

ZHAO Xilin, GONG Chufeng, FU Bo
(School of Electrical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The large-scale grid integration of wind power reduces the equivalent inertia and increases the uncertainty of the power system, which brings challenges to load frequency control (LFC). The potential frequency regulation capability of the voltage source converter based high voltage DC (VSC-HVDC) was taken into consideration, and a load frequency control strategy for the virtual synchronous generator (VSG) with variable parameters was proposed when the wind farms was connected to the power grid by VSC-HVDC. Firstly, based on the analysis of the LFC model and the topological structure of the grid connection of wind farm connected by VSC-HVDC, the VSG control method was designed for the voltage control process of voltage source converter (VSC) in order to improve the controllability of VSC-HVDC. Then, the correlation relationship between VSG control parameters and frequency changes was analyzed. Based on the fractional-order gradient descent method (FOGDM), the deep frequency change characteristics were extracted by using the fractional-order derivative of frequency to optimize the control parameters of VSG. Based on the results above, the uncertainty of the system was taken into consideration, and a trigger mechanism was designed to adjust the VSG variable parameter optimization method, which could reduce the frequency of parameter transformation and improve the control pertinence. The simulation results show that the proposed method can be adopted to effectively improve the load frequency control effect of power grid and has good adaptability.

Key words: load frequency control; virtual synchronous generator; wind power; VSC-HVDC; fractional order; parameter optimization

0　引言

随着我国“30·60 碳达峰-碳中和”战略目标的提出，风电凭借其资源丰富、清洁低碳、配置灵活等优点，已经逐步规模化、产业化[1-2]。目前，东北、华北和西北等“三北”地区的风电开发规模占到了全国风电装机容量的 60%，根据国家能源战略的大局，需要通过“西电东输”工程将电能远距离传输到华中和华北等地区的负荷中心进行消纳[3-4]。

当风电远距离并网时，电能传输的方式主要有交流输电和直流输电两种[5]。其中，直流输电模式

基金资助项目：湖北省重点研发计划(2021BAA193)。
Project supported by Hubei Province Key R&D Program (2021BAA193).

由于传输损耗低，不用考虑频率和功角的问题，在电能远距离传输方面表现出高度的可控性和良好的适应性[6-7]。而基于电压源换流器(voltage source converter，VSC)的柔性直流输电系统还可以实现有功功率和无功功率的解耦控制，在技术方面较为成熟，得到广泛应用[8]。但是，风电场风速的不确定性会导致风电功率的随机波动，不可避免的会对系统的负荷频率控制造成较大的干扰，因此，利用柔性直流输电系统潜在的调频能力对传输功率进行调整，将有助于系统频率的稳定控制[9-10]。目前，基于直流电压/频率下垂的负荷频率控制方案，可实现风电场经 VSC-HVDC 进行电力传输时对调频的辅助支撑[11-12]。在利用柔性直流输电系统进行辅助调频的研究中，有的利用换流器中等效电容所储存的能量参与调频，通过直流电压控制、电流控制或虚拟惯量控制等方式释放能量，改善 VSC-HVDC 的调频性能[13-14]。但 VSC 中等效电容的储能容量有限，其调频效果有待提升。也有研究根据换流器中存在的高频电子开关器件，利用其开关状态对传输功率的影响，设计能快速响应系统频率变化的协同控制策略，扩展调频范围[15]。由于电子开关器件的存在，对换流器的控制和直流系统的稳定性有更高的要求[16]。因此，有研究在换流站的控制回路中设计响应系统频率变化的控制环节，以提高系统的可控性和稳定性，但该方式仍停留在换流站的控制层面，无法达到类似于同步发电机的调频效果[17]。

考虑到 VSG 的控制模式能够模拟同步发电机(synchronous generator，SG)的输出特性，便于对现有的控制方法进行拓展，在 VSC-HVDC 的输出控制中，VSG 控制技术引起了广泛关注[18-19]。基于 VSC-HVDC 的 VSG 控制技术是将 SG 的控制行为嵌入到 VSC-HVDC 的换流站控制过程中，以调整 VSC-HVDC 的有功输出[20]。当电力系统发生负荷波动时，要求 VSC-HVDC 具有类似于 SG 的频率响应特性，保障有功调节的快速性[21]。因此，对 VSC 实施合理的控制，以提供快速、恰当的功率支撑至关重要[22-23]。针对风电场经 VSC-HVDC 向电网供电的情况，现有研究大多基于 VSG 控制原理利用 *P*/*f* 下垂控制替代原有的双闭环矢量控制，以实现对有功输出的灵活调节[24]。在此基础上，基于 VSG 的分层控制策略，能够使传输功率快速跟踪负载变化，有效提升 VSC-HVDC 的频率响应能力[25]。但由于风速的不确定性及负荷扰动的随机性，在调频过程中需要根据调频需求的动态变化对 VSG 的控制参数进行优化，以灵活应对系统所表现的不确定性[26-27]。而传统 VSG 控制模式使用的固定参数，无法适应该需求，削弱了 VSC-HVDC 的潜在调频能力。诸如文献[28]所提出的多参数自适应协同 VSG 调频策略，在一定程度上能有效提升系统的暂态指标，但若需要更好地匹配系统当前的调频需求，在调频过程中还需要挖掘更多有效的信息以提升 VSG 对频率波动的响应敏感度。

本文针对上述问题设计了一种 VSG 变参数负荷频率控制策略，利用频率的分数阶梯度下降状态分析，拟在系统调频响应过程中能够提取更多隐含的控制信息，更好地匹配 VSG 控制参数的变化需求，使 VSG 的控制行为更具针对性。

1 风电场经 VSC-HVDC 并网的 LFC 模型

当大规模风电场接入电力系统时，为了最大化的利用风能，一般采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking，MPPT)的输出控制方式，通过 VSC-HVDC 与电力系统实现互联，其具体的拓扑结构如图 1 所示。其中，柔性直流输电系统的两个换流站分别控制，实现有功无功解耦、单向潮流控制等基本功能。换流站交流侧的滤波电抗和 RC 滤波器用来平滑高次谐波，直流侧的电容器用于维持输电线路直流电压的稳定。

为了验证和分析大型风电场经柔性直流输电系统参与电网负荷频率控制时的调频效果，构建如

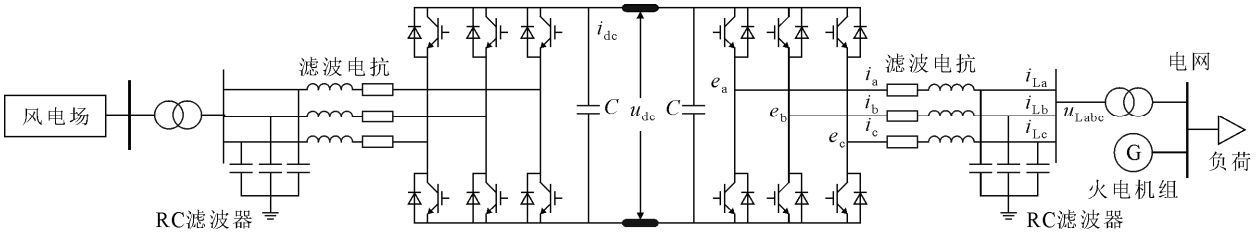


图 1 风电场经柔性直流输电系统并网拓扑图

Fig.1 Topology diagram of grid connection of wind farm connected by VSC-HVDC

图 2 所示的风电场经柔性直流输电系统远距离传输的电网负荷频率控制模型。

图 2 中相关变量的含义如表 1 所示。

2　基于 VSC-HVDC 的 VSG 控制方法

2.1　VSC-HVDC 功率传输模型

为了控制柔性直流输电系统的传输功率，构建如图 3 所示的受端 VSC 控制框图。

依据上述拓扑结构可得 VSC 数学模型如下：

$$L_{\mathrm{s}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{abc}}}{\mathrm{d}t}+R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{abc}}=e_{\mathrm{abc}}-u_{\mathrm{Labc}} \tag{1}$$

$$C\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{Labc}}}{\mathrm{d}t}=i_{\mathrm{abc}}-i_{\mathrm{Labc}} \tag{2}$$

式中：e_{abc} 和 i_{abc} 分别为来自换流站的三相输出电压和电流；u_{Labc} 和 i_{Labc} 分别为并网点处的三相电压和电流；R_{s} 和 L_{s} 分别为换流站到并网点间的电阻和电抗；C 为换流站内电容。

若忽略换流站和线路损耗，可得到 VSC-HVDC 流入电网的有功功率 P 和无功功率 Q 分别为[18]：

$$P=\frac{3U_{\mathrm{g}}E}{X}\sin\delta \tag{3}$$

$$Q=\frac{3E}{X}\left(U_{\mathrm{g}}-\cos\delta\right) \tag{4}$$

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 为换流站电抗；δ 为 U_{g} 和 E 的夹角。

由式(3)—式(4)可知，换流站有功和无功的输出控制均由 U_{g}、E 及其夹角 δ 决定。

2.2　基于 VSC 的 VSG 控制方法

为了使VSC-HVDC具有类似于SG的功率输出特性，对 VSC 的本体模型进行 VSG 等效建模，主要针对 SG 的转子运动方程进行类比设计。

同步发电机的转子运动方程为[18]：

$$\Delta T_{\mathrm{msg}}-\Delta T_{\mathrm{esg}}=K_{\mathrm{Jsg}}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}+K_{\mathrm{Dsg}}\left(\omega-\omega_{\mathrm{N}}\right) \tag{5}$$

式中：ΔT_{msg} 为 SG 的输入机械转矩增量；ΔT_{esg} 为 SG 的电磁转矩增量；K_{Jsg} 为惯量系数；K_{Dsg} 为阻尼系数；ω 为转子角频率；ω_{N} 为转子额定角频率。

类比式(5)可得 VSG 模型为：

$$\begin{cases}K_{\mathrm{Jvsg}}\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\Delta T_{\mathrm{m}}-\Delta T_{\mathrm{e}}+K_{\mathrm{Dvsg}}\left(\omega-\omega_{\mathrm{N}}\right)\\ \omega=\dfrac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}\\ \Delta T_{\mathrm{m}}=\dfrac{\Delta P_{\mathrm{m}}}{\omega}\\ \Delta T_{\mathrm{e}}=\dfrac{\Delta P_{\mathrm{e}}}{\omega}\end{cases} \tag{6}$$

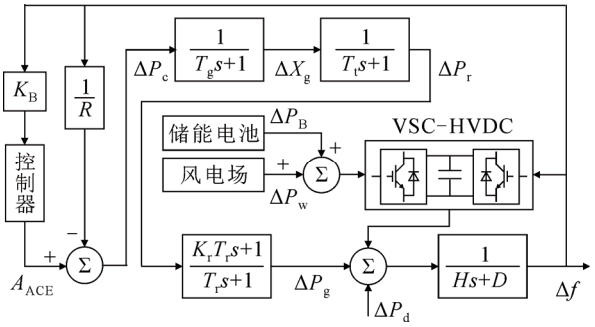


图 2　风电远距离传输的电网负荷频率控制模型

Fig.2　Load frequency control model of power system for long-distance transmission of wind power

表 1　电力系统参数或变量

Table 1　Parameters or variables of power system

参数/变量	含义	单位
K_{B}	频率偏差因子	标幺值/Hz
A_{ACE}	区域控制偏差	标幺值
R	机组调差系数	标幺值/Hz
ΔP_{c}	控制器输出控制量	标幺值
ΔX_{g}	调速器位置偏差	标幺值
ΔP_{r}	再热发电机组热功率增量	标幺值
ΔP_{g}	发电机功率偏差	标幺值
ΔP_{w}	风电场输出功率增量	标幺值
ΔP_{B}	储能电池输出功率增量	标幺值
ΔP_{d}	负荷扰动偏差	标幺值
Δf	频率偏差	Hz
T_{g}	调速器时间常数	s
K_{r}	再热系数	s
T_{r}	再热时间常数	s
T_{t}	气容时间常数	s
H	发电机转动惯量	kg·m^2
D	负荷阻尼系数	s

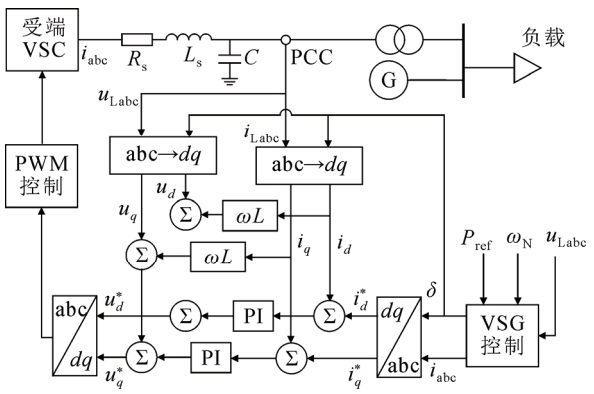


图 3　换流站控制框图

Fig.3　Control block diagram of VSC

式中：ΔT_{m} 和 ΔT_{e} 分别为 VSG 的机械转矩增量和电磁转矩增量；K_{Jvsg} 为 VSG 虚拟惯量系数；K_{Dvsg} 为 VSG 虚拟阻尼系数；δ 为 VSG 的功角；ΔP_{m} 为 VSG

的输入功率增量；ΔP_e 为 VSG 的电磁功率增量。则式(6)可被重新表示为：

$$\Delta P_m - \Delta P_e = K_{Jvsg}\omega_N \frac{d\omega}{dt} + K_{Dvsg}\omega_N(\omega - \omega_N) \quad (7)$$

结合式(7)并考虑电力系统角频率扰动 $\Delta\omega_d$ 的影响，可得到如图 4 所示的基于 VSC 的 VSG 等效模型。图中，K_S 为 VSG 的同步系数；$G_{GOV}(s)$为调速器传递函数。图 4 反映了 VSG 的输出特征与惯量系数 K_{Jvsg}、阻尼系数 K_{Dvsg} 之间的关系，而 K_{Jvsg} 和 K_{Dvsg} 的改变是调整 VSG 功率和频率暂态、稳态响应的关键。

在上述模型基础上，由于系统不确定性，模型表征与系统动态特征需匹配。因此，在控制基于 VSC-HVDC 的 VSG 有功输出时，需解决由功率需求动态特性所导致的问题。

3 VSG 的变参数负荷频率控制策略设计

3.1 VSG 的变参数必要性分析

基于 VSC-HVDC 的 VSG 参与系统调频的有功输出由虚拟惯量控制和虚拟阻尼控制两个部分共同控制，对式(7)进行变换可得 VSG 控制器的有功输出参考值为：

$$\Delta P_{ref} = \Delta P_m - \Delta P_e = K_J \frac{df}{dt} + K_D(f - f_N) \quad (8)$$

式中：f 为电网实时频率；f_N 为额定频率；K_J 和 K_D 分别为变换后 VSG 的虚拟惯量和虚拟下垂系数。

由式(8)可知，控制参数 K_J 和 K_D 反映了 VSG 虚拟惯量和虚拟阻尼的动态特征，是 VSG 控制的关键。对于传统的 SG，惯量系数 K_J 和阻尼系数 K_D 与转子转速和机械摩擦等具体的物理量相关，而对于虚拟同步发电机，K_J 和 K_D 是虚拟变量。

一般而言，根据 SG 的 P/f 下垂特性确定频率变化和系统有功变化的对应关系后，根据式(9)可获得具体的虚拟阻尼系数 K_D。

$$K_D = \frac{\Delta T}{\Delta\omega} = \frac{\Delta P_{ref}}{2\pi f_N \cdot 2\pi\Delta f} \quad (9)$$

式中：ΔT 为 VSG 转矩变化量。

由于风机采用 MPPT 的输出模式，无法提取转子旋转动能参与系统调频的过程，故 VSG 的虚拟转动惯量可忽略风机的影响，只与功率/频率的调节时间 T_p 有关，可按照式(10)进行计算[26]。

$$K_J = T_p K_D = T_p \frac{\Delta P_{ref}}{2\pi f_N \cdot 2\pi\Delta f} \quad (10)$$

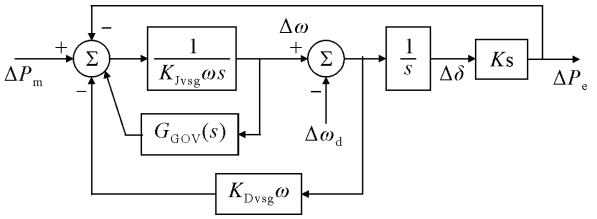


图 4 基于 VSC 的 VSG 建模框架

Fig.4 The VSG modeling frameworks based on VSC

当电网发生负荷扰动时，系统的频率偏差和输出功率参考值都将动态变化，则由式(9)和式(10)可知 VSG 的参数也应该实时变化才能与系统的实际状态匹配。

3.2 基于频率分数阶导数的变参数方法设计

VSG 参数的动态表现取决于频率变化特征的获取。考虑到梯度能够表示函数在某一方向上变化的快慢程度，而利用梯度下降法能够在迭代过程中对不同梯度下目标函数的最优值进行计算以寻求最适合当前工作状态的数值，适用于 VSG 参数最匹配状态的获取。

设目标函数为 $f(x)$，则梯度下降的迭代过程为：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{x}(k)+\mu\nabla f(\boldsymbol{x}(k)) \quad (k=0,1,2\cdots) \quad (11)$$

式中：$x(k)$为当前的自变量值；$x(k+1)$为待求的下一个位置；μ 为学习率，它决定了自变量从当前位置移动到最优位置的速度快慢；∇f $(x(k))$为当前位置的一阶梯度。

然而，式(11)仅利用了频率的一阶导数，无法获取不同维度下的频率变化特征，为解决该问题可将频率的分数阶导数引入到 VSG 的控制过程中。

采用 Caputo 分数阶导数：

$$F(x)=\frac{1}{\Gamma(n-r)}\cdot\frac{d}{dx}\int_a^b \frac{f^{(n)}(\tau)}{(b-\tau)^{r-n+1}}d\tau \quad (12)$$

式中：a 和 b 分别为微分的下限和上限；r 为微分的阶次，n-1<r<n；$\Gamma(n-r)$为伽玛函数。

将式(11)中的一阶梯度替换为分数阶梯度，可得分数阶梯度下降的迭代算法为：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{x}(k)+\mu\nabla^r f(\boldsymbol{x}(k)) \quad (13)$$

将式(12)进行泰勒变换并代入式(13)中可得：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{x}(k)+\mu\cdot\sum_{i=0}^{\infty}\frac{f^{(i+1)}}{\Gamma(i+2-r)}(\boldsymbol{x}(k)-a)^{i+1-r} \quad (14)$$

将式(14)中的微分下限由固定点 a 替换为上一步的自变量 $x(k-1)$，则式(14)可被重新表示为：

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{x}(k)+\mu\cdot\sum_{i=0}^{\infty}\frac{f^{(i)}\boldsymbol{x}(k-1)}{\Gamma(i+2-r)}\cdot\left(\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}(k-1)\right)^{i+1-r} \tag{15}$$

则基于 FOGDM 可知，VSG 控制参数的具体计算公式如下所示：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k)=\left[K_{\mathrm{J}}\ \ K_{\mathrm{D}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{x}(k)+\mu\boldsymbol{g}(k)\\ e(k)=f(k)-f_0(k)\\ J(k)=\dfrac{1}{2}e(k)^2\\ \boldsymbol{g}(k)=\left[\dfrac{\partial^r J(k)}{\partial K_{\mathrm{J}}^r}\ \dfrac{\partial^r J(k)}{\partial K_{\mathrm{D}}^r}\right]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$x(k)$、$e(k)$、$J(k)$和 $g(k)$分别是每一步需要进行更新的控制参数、频率误差、成本函数和搜索向量，其中 $g(k)$的推导可根据式(17)完成。

$$\frac{\partial^r f(x)}{\partial^r x}=\frac{\partial f(x)}{\partial t}\cdot\frac{\partial t^r}{\partial^r x} \tag{17}$$

根据式(16)可计算在每一个采样周期 Δt 下惯量系数 K_{J} 和阻尼系数 K_{D} 的变化量为：

$$\begin{cases}\Delta K_{\mathrm{J}}=-\mu e(k)\dfrac{\partial\Delta P_{\mathrm{ref}}}{\partial\Delta f}\cdot\dfrac{f(k)-f(k-1)}{\Delta t}\cdot 1\Big/\dfrac{\partial K_{\mathrm{J}}^r}{\partial^r t}\\ \Delta K_{\mathrm{D}}=-\mu e(k)\dfrac{\partial\Delta P_{\mathrm{ref}}}{\partial\Delta f}\cdot\dfrac{f(k)-f(k-1)}{\Delta t}\cdot 1\Big/\dfrac{\partial K_{\mathrm{D}}^r}{\partial^r t}\end{cases} \tag{18}$$

基于式(18)，即可获取在调频响应过程中 VSG 控制参数的变化情况。

3.3　VSG 的变参数负荷频率控制方法设计

VSG 控制参数的改变虽然能提高调频能力，使 VSG 更加匹配当前的调频需求，但风速的不确定性会导致系统频率和 VSG 控制参数的剧烈变化，增加 VSC 控制响应的难度，可能对 VSG 的调频实现产生负面影响。同时，在 VSG 控制参数的优化过程中，控制算法的设计和运行都比较复杂，不间断的参数调整无疑会增加系统的在线计算复杂度，占用大量系统资源。

考虑到调频控制的稳定性和可靠性，需要考核系统的最大频率变化率(rate of change of frequency max，$\mathrm{RoCoF_{max}}$)R_{oCoFmax} 和最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$ 约束。

定义最大频率变化率 $\mathrm{RoCoF_{max}}$：

$$R_{\mathrm{oCoFmax}}=\max_k\left(\min_{t\ge 0}\left|ff_k(t)\right|\right) \tag{19}$$

式中：$ff_k(t)$为第 k 个时间点的频率变化率。

最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$：

$$\Delta f_{\max}=\max_k\left(\max_{t\ge 0}\left|\Delta f_k(t)\right|\right) \tag{20}$$

式中：$\Delta f_k(t)$为第 k 个时间点的频率偏差。

基于最大频率变化率和最大频率偏差，可设计如式(21)所示的综合评价指标 T，用以评价电网频率控制的有效性。

$$T=\left|K_1R_{\mathrm{oCoFmax}}\right|+\left|K_2\Delta f_{\max}\right| \tag{21}$$

式中：K_1 和 K_2 为权重系数。

此外，由现有研究[29]可知，较大的虚拟惯量能有效减小最大频率变化率，较大虚拟阻尼系数能使系统频率更加接近额定值，但当其超过某一临界点时会引起系统的振荡，恶化系统的频率稳定性。

为了解决以上问题，在 VSG 变参数负荷频率控制策略设计过程中，可以根据风电场输出功率和负荷扰动的波动情况，获取系统当前综合评价指标 T 的量化指标参与调频控制。当综合评价指标 T 较小，即频率波动较稳定时，VSG 可聚焦于频率响应的快速性，不进行参数优化；当综合评价指标 T 较大，即频率剧烈波动时，则应关注 VSG 调频性能的提升，采用新的控制参数使 VSG 更加适应当前的调频需求。基于电力系统实际规模和动态特性根据式(21)所定义的综合评价指标可设计对应的驱动阈值 T_{set} 来决定以上两种控制模式之间的切换，切换过程由条件触发环节(conditional drive link，CDL)实现。

考虑到电力系统运行特征，建立如下约束条件以限制 VSG 参数调整的范围。

$$\begin{cases}K_{\mathrm{Jmin}}\le K_{\mathrm{J}}\le K_{\mathrm{Jmax}}\\ K_{\mathrm{Dmin}}\le K_{\mathrm{D}}\le K_{\mathrm{Dmax}}\end{cases} \tag{22}$$

式中：K_{Jmax} 和 K_{Jmin} 分别为 VSG 虚拟惯性系数的上下限；K_{Dmax} 和 K_{Dmin} 分别为 VSG 虚拟阻尼系数的上下限。至此，基于以上描述可得如图 5 所示 VSG 变参数负荷频率控制策略流程图。

图中，变参数环节(variable parameter link，VPL)基于 FOGDM 进行 VSG 参数的调整，包含变参数环节的条件触发环节则用于判断综合评价指标 T 是否达到 CDL 所设置的驱动阈值 T_{set}。当 T 达到驱动阈值 T_{set} 时，VSG 控制器启动变参数负荷频率控制策略，根据系统特性的动态变化对 VSG 的控制参数进行调整，提升 VSG 的综合调频能力；当 T 未达到驱动阈值 T_{set} 时，VSG 控制器仍应用上一步的控制参数。PWM 控制器则通过产生对应的 PWM 信号来控制 VSG 的输出功率响应系统的频率变化。

4 仿真分析

4.1 仿真系统设置

为了验证所提方法的调频性能，采用图 2 所示的电网负荷频率控制模型进行仿真研究。其中，常规机组采用 2 台 1000 MW 的火力发电机，并采用 300 台容量为 1.5 MW 的双馈风机与传统火电的调频任务进行协同。同时，考虑到风机 MPPT 运行模式所导致的风电功率不确定性，根据储能容量配置的原则[30]，配置 100 MW 初始 SOC 为 0.5 的储能电池来缓解极端情况下风电场输出功率的波动，并对柔性直流输电系统传输功率的变化进行补充。

在电力系统中，控制系统采用比例微分积分(proportional integral derivative，PID)控制器，相关控制参数设置为：比例系数 K_P=0.68；积分时间常数 T_I=0.51；微分时间常数 T_D=0.43。其它参数设置如表 2 所示。

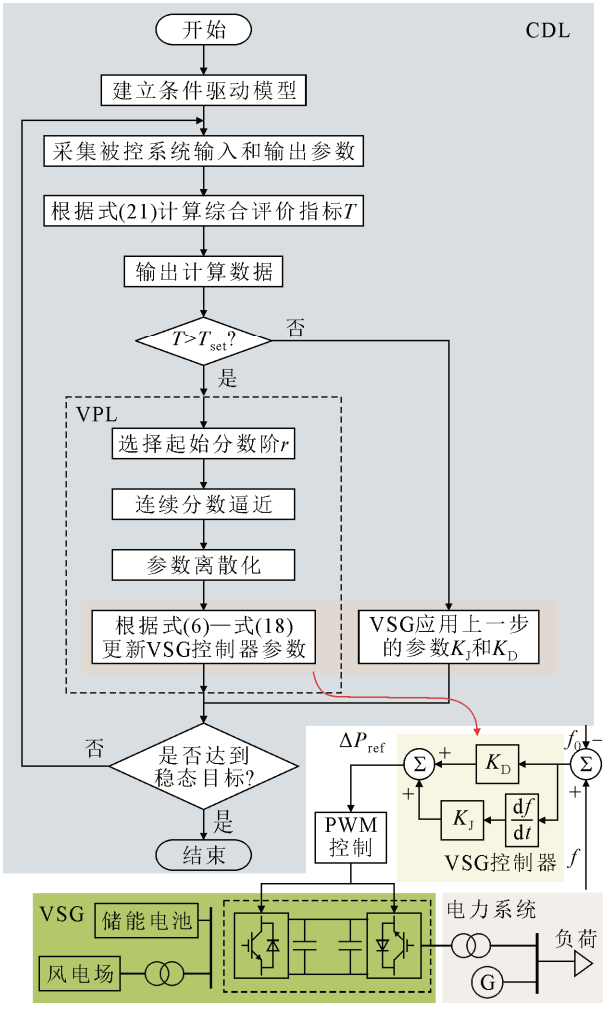


图 5 本文所提负荷频率控制策略流程图

Fig.5 Schematic diagram of load frequency control strategy presented in this paper

仿真过程中，为了验证所提方法的有效性和优越性，设置了 3 种运行场景对如下 4 种控制策略进行对比分析：

策略 1：风电场经 VSC-HVDC 直接并网。

策略 2：风电场经 VSC-HVDC 并网，并采用传统固定参数的 VSG 控制策略。

策略 3：风电场经 VSC-HVDC 并网，并采用文献[31]所述的 VSG 自适应控制策略。

策略 4：风电场经 VSC-HVDC 并网，并采用本文所提的 VSG 变参数负荷频率控制策略。

4.2 不同运行场景仿真分析

4.2.1 恒定风速场景分析

假设风电场的风速恒定为 10.5 m/s，且在 t=5 s 时，系统发生阶跃负荷扰动。当系统的负荷扰动分别为 0.05(标幺值)和 0.15(标幺值)时，在 CDL 中设定综合评价指标的驱动阈值 T_{set} 为 0.043，则系统的频率偏差和区域控制偏差的仿真结果分别如图 6—图 7 所示。

由图 6—图 7 的仿真结果可知，系统频率偏差和区域控制偏差随着负荷扰动的增大而增大。

表 2 电力系统参数或变量

Table 2 Parameters or variables of power system

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
M	10.5	D	2.75	T_g	0.12	T_t	0.6
T_r	10	K_r	0.43	K_B	35	R	0.036

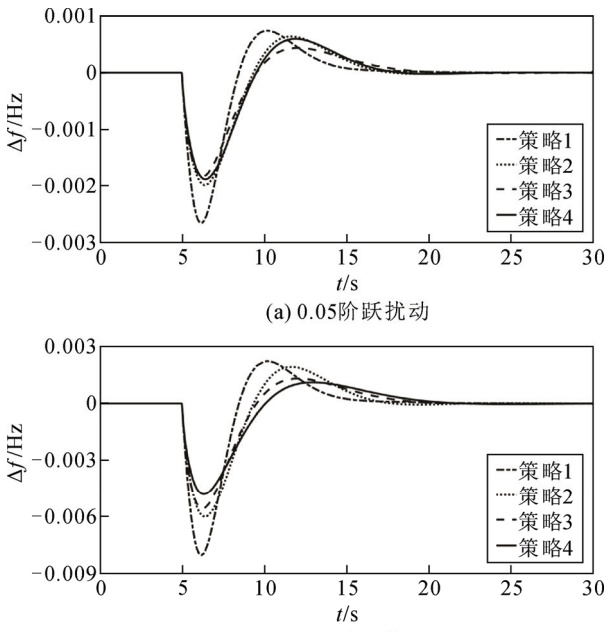
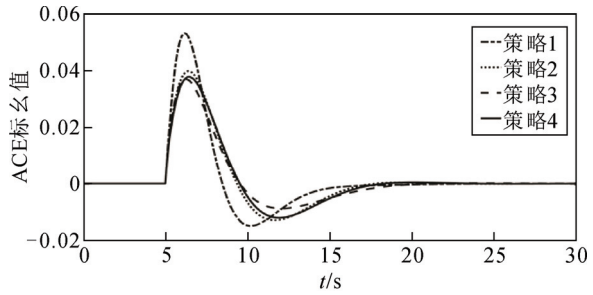
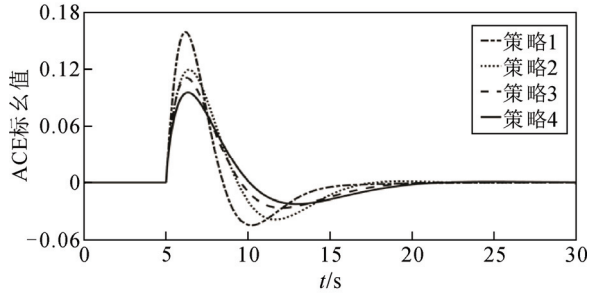


图 6 阶跃扰动时的系统频率偏差

Fig.6 Frequency deviation when step disturbance



(a) 0.05阶跃扰动



(b) 0.15阶跃扰动

图 7　阶跃扰动时的 ACE 响应曲线

Fig.7　ACE response curve when when step disturbance

如图 6(a)所示，当负荷扰动较小时，VSG 控制策略(策略 2、策略 3 和策略 4)相比于策略 1，调频性能得到了明显的提升。同时，在本文所提策略中，由于综合评价指标 T 未达到驱动阈值，即没有启动变参数机制，VSG 应用的是上一步的控制参数。此时，VSG 的输出特性与传统固定参数的 VSG 控制策略下的输出特性类似，且达到了与传统 VSG 自适应控制策略相同的控制效果。

如图 6(b)所示，当负荷扰动较大时，策略四的控制性能明显优于其他控制策略。在 0.15（标幺值）的阶跃扰动下，由于本文所提策略中的 VSG 的控制参数随着系统特性的变化动态调整，与传统固定参数的 VSG 控制策略和自适应控制策略相比，能有效提升系统 VSG 的调频性能，且系统频率偏差的上升时间更短，超调量更低，动态响应能力更强。

4.2.2　随机风速场景分析

假设风电场风速如图 8 所示进行随机变化。

在此风速场景下，当系统负荷扰动为零时，频率偏差和区域控制偏差的仿真结果如图 9 所示。

系统的负荷扰动为零时，风速波动所导致的风电场输出功率的随机变化可以等效为柔性直流输电系统输入机械功率的变化。因此，由图 9 的仿真结果可知，风电场风速的不确定性对控制策略的控制性能有一定的影响，风速变化量不同时系统的频率偏差和区域控制偏差也会有所不同。

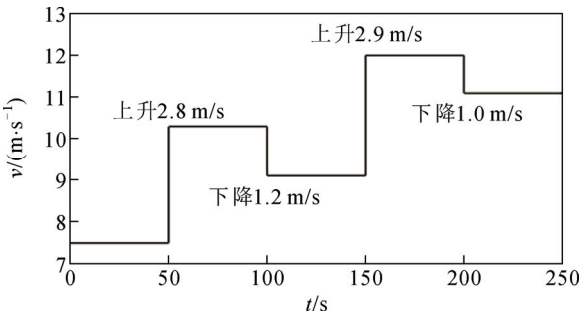
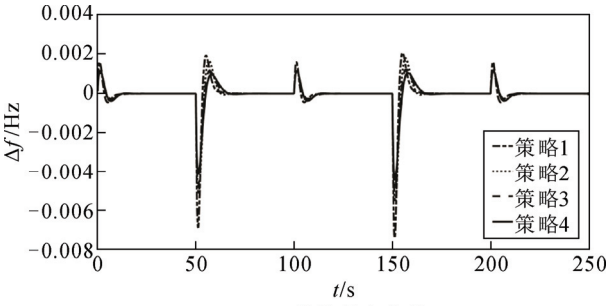
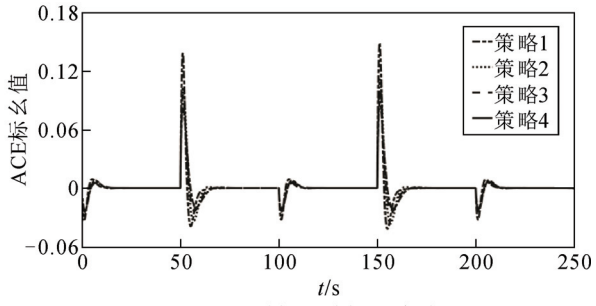


图 8　风电场随机风速

Fig.8　Random wind speed in a wind farm



(a) 系统频率偏差



(b) 系统区域控制偏差

图 9　风速随机变化时的仿真结果

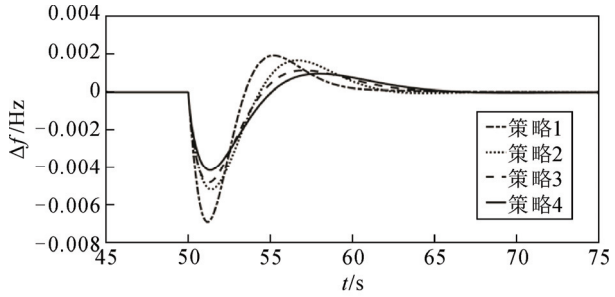
Fig.9　Simulation results when wind speed is random

如图 8 所示，在 50 s 时风速上升 2.8 m/s，在 100 s 时风速下降 1.2 m/s，此时系统的频率偏差和区域控制偏差的仿真结果分别如图 10 和图 11 所示。

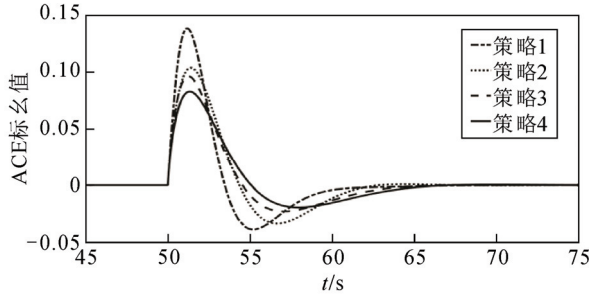
由图 10—图 11 的仿真结果可知，系统的频率偏差和区域控制偏差幅值随着风速变化幅度的增大而增大。

当风速上升 2.8 m/s 时，VSC-HVDC 输入功率的变化幅度较大，对系统调频性能的影响也更加明显。此时，4 种控制策略的控制性能与负荷扰动较大时的控制性能类似。本文所提控制策略与其他 3 种控制策略相比，控制性能得到了有效提升，极大的改善了 VSG 的动态响应能力和超调特性。

当风速下降 1.2 m/s 时，VSC-HVDC 输入功率的变化幅度较小，4 种控制策略的控制性能与负荷扰动较小时的控制性能类似，在此不再赘述。



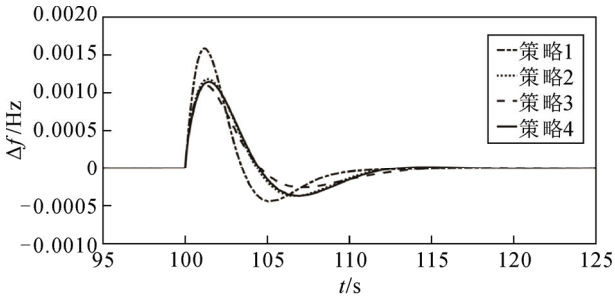
(a) 系统频率偏差



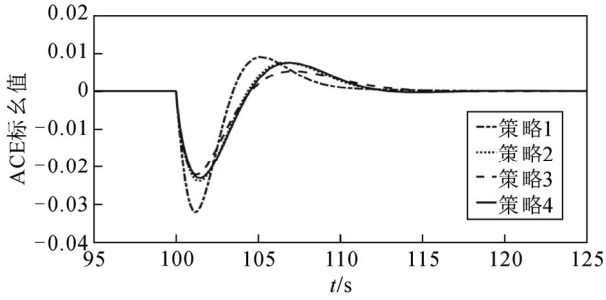
(b) 系统区域控制偏差

图 10 风速上升 2.8 m/s 时的仿真结果

Fig.10 Simulation results when wind speed rises 2.8 m/s



(a) 系统频率偏差



(b) 系统区域控制偏差

图 11 风速下降 1.2 m/s 时的仿真结果

Fig.11 Simulation results when wind speed decreases 1.2 m/s

4.2.3 随机风速+随机扰动场景分析

假设在风电场风速随机变化的同时，随机变化的负荷扰动作用于电力系统，且负荷扰动的波动情况如图 12 所示。

在此场景下，系统的频率偏差和区域控制偏差仿真结果如图 13—图 14 所示。

由图 13—图 14 的仿真结果可知，当风电场风速和系统所遭受的负荷扰动都随机变化时，本文所提控制策略能够灵活应对系统不确定性对 VSG 调频性能的影响，对 VSG 进行灵活控制，有效降低系统的频率偏差和区域控制偏差。

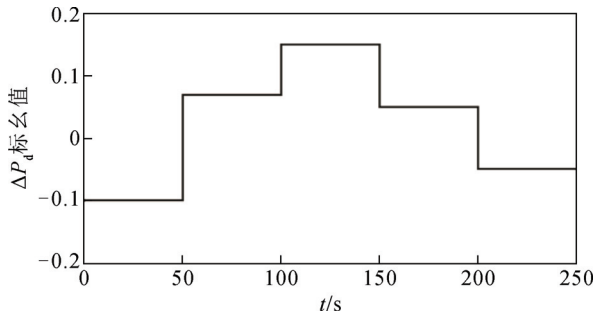
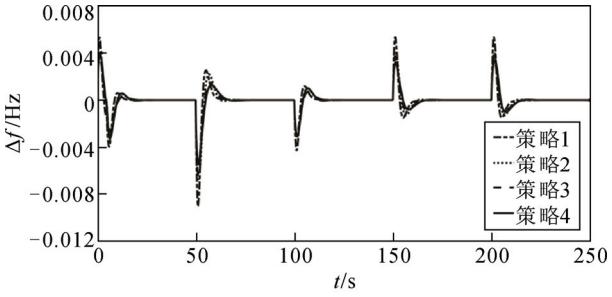
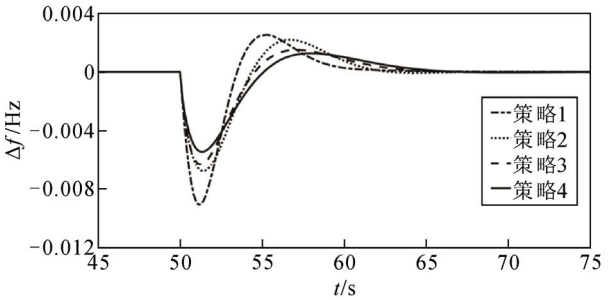


图 12 随机负荷扰动

Fig.12 Random load fluctuation



(a) 整体图



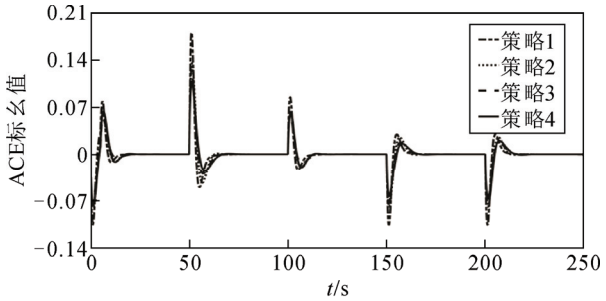
(b) 局部放大图

图 13 风速和负荷扰动随机时的频率偏差

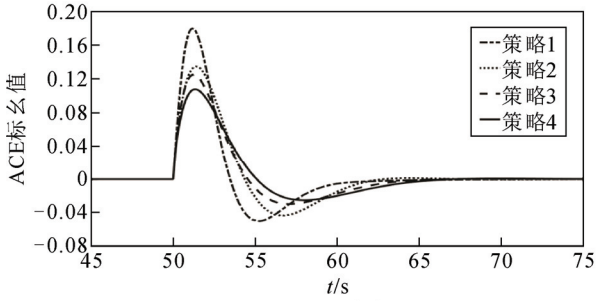
Fig.13 Frequency deviation when wind speed and load fluctuation are random

如图 13(b)所示，在相同的负荷扰动下，策略 1 系统频率偏差的峰值约为 9.03×10^{-3} Hz，策略 2 系统频率偏差的峰值约为 6.77×10^{-3} Hz，策略 3 系统频率偏差的峰值约为 6.28×10^{-3} Hz，而本文所提控制策略系统频率偏差的约为 5.12×10^{-3} Hz，其控制效果相对于其他 3 种控制策略得到了明显提升，且频率偏差的上升时间更短，超调量更低，说明本文所提控制方法在应对系统有功随机波动时具有更好的频率稳定性。

此外，考虑到电网参数不确定性对负荷频率控



(a) 整体图



(b) 局部放大图

图 14　风速和负荷扰动随机时的 ACE 响应曲线

Fig.14　ACE response curve when wind speed and load fluctuation are random

制性能的影响，在不同电网参数背景下对本文所提控制方法重新进行了仿真分析。仿真结果表明系统频率偏差和区域控制偏差的变化趋势与本文中的变化趋势类似，在此不再赘述。

5　结论

为了解决风电场经 VSC-HVDC 大规模并网所带来的负荷频率控制问题，本文提出了一种基于 VSC-HVDC 的 VSG 变参数负荷频率控制策略，通过理论分析和仿真验证，得到如下结论：

1）对 VSC-HVDC 进行虚拟同步发电机控制方法设计，可以提高系统传输功率的可控性，灵活应对因风速随机性和负荷扰动不确定性所带来的频率波动问题。

2）利用分数阶梯度下降法能提取更全面的频率变化信息，使 VSG 获取与频率变化特性相匹配的控制参数，改善 VSG 的输出特性，具有更好的性能表现。

3）当系统的有功变化较小时，根据对综合评价指标 T 的判断，VSG 的控制参数无需进行调整，在保证控制性能的同时，能有效维持控制策略执行的延续性，降低控制器的在线计算复杂度。

4）当系统的有功变化较大时，根据对综合评价指标 T 的判断，VSG 在参数调整后能有效改善有功输出特性，使其更具针对性，且与传统的 VSG 固定参数控制方法和自适应控制方法相比，能获取更优的控制性能表现。

参考文献　References

[1] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[2] MOHANDE S B, MOURSI MSE, HATZIARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3140-3155.

[3] 韩小齐，刘文颖，申自裕，等. “三北”地区热负荷参与风电消纳的日前市场交易机制[J]. 电力自动化设备，2023，43(5)：61-69.
HAN Xiaoqi, LIU Wenying, SHEN Ziyu, et al. Day-ahead market trading mechanism for heat load participating in wind power consumption in “Three Norths” Regions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 61-69.

[4] 樊　鑫，郭春义. 特高压混合级联直流输电系统逆变侧 MMC 的功率返送现象及有功调控策略[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5037-5046.
FAN Xin, GUO Chunyi. Power return phenomenon and active power control strategy of MMC on inverter side of the hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5037-5046.

[5] CHOU C J, WU Y K, HAN G Y, et al. Comparative evaluation of the HVDC and HVAC links integrated in a large offshore wind farm-an actual case study in Taiwan[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5): 1639-1648.

[6] 姚　伟，熊永新，姚雅涵，等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3397-3413.
YAO Wei, XIONG Yongxin, YAO Yahan, et al. Review of voltage source converter-based high voltage direct current integrated offshore wind farm on providing frequency support control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3397-3413.

[7] 李　岩，冯俊杰，卢毓欣，等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[8] 饶　宏，黄伟煌，郭知非，等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3347-3355.
RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.

[9] WU Z P, GAO W Z, GAO T Q, et al. State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 1-16.

[10] LIU H Z, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.

[11] LIU X D, LINDEMANN A. Control of VSC-HVDC connected off-

shore windfarms for providing synthetic inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1407-1417.

[12] ZHU J B, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.

[13] 申志鹏，朱介北，李 斌，等. 基于柔性直流输电系统的双边惯量和阻尼模拟控制方案[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3505-3518.
SHEN Zhipeng, ZHU Jiebei, LI Bin, et al. Bilateral inertia and damping emulation control scheme for VSC-HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3505-3518.

[14] ZHU J B, HU J B, HUNG W, et al. Synthetic inertia control strategy for doubly-fed induction generator wind turbine generators using lithium-ion supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 773-783.

[15] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.

[16] 宋伟宏，杨林刚，林 磊，等. 基于 MMC-HVDC 的海上风电柔直系统频率波动抑制技术[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2760-2768.
SONG Weihong, YANG Lingang, LIN Lei, et al. Frequency fluctuation suppression technology of offshore wind power generation plants based on MMC-HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2760-2768.

[17] 杨金刚，袁志昌，李顺昕，等. 经柔性直流输电并网的大型风电场频率控制策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(6)：109-114.
YANG Jingang, YUAN Zhichang, LI Shunxin, et al. Frequency control strategy for large-scale wind farm grid-connection through VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 109-114.

[18] LEON A E, MAURICIO J M. Virtual synchronous generator for VSC-HVDC stations with DC voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 728-738.

[19] JIANG B K, WANG Z X. Research on an improved virtual synchronous generator control strategy for VSC-HVDC supplying power to a passive network[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(9): 1328-1334.

[20] HIRASE Y, TAKEDA T, OHUCHI K. Virtual synchronous generator based pole control in high-voltage DC transmission systems[J]. Energy Reports, 2022, 8(S1): 1073-1084.

[21] 江斌开，王志新，包龙新，等. 连接无源网络的 VSC-HVDC 优化虚拟同步机控制及参数分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(22)：6542-6549.
JIANG Binkai, WANG Zhixin, BAO Longxin, et al. An improved virtual synchronous generator control strategy parameters analysis for VSC-HVDC connected to a passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6542-6549.

[22] 马为民，王 玲，李 明，等. 新型电力系统中的特高压直流输电 SLCC 换流技术[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4941-4948.
MA Weimin, WANG Ling, LI Ming, et al. SLCC converter technology of UHVDC transmission in new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4941-4948.

[23] GUAN M Y, CHENG J Z, WANG C, et al. The frequency regulation scheme of interconnected grids with VSC-HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 864-872.

[24] 管敏渊，张 静，刘 强，等. 柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J]. 电力系统自动化，2015，39(15)：103-109.
GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 103-109.

[25] 孟建辉，王 毅，石新春，等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报，2014，29(12)：1-10.
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.

[26] 陶 亮，程军照，王文玺，等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(12)：128-135.
TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135.

[27] RODRIGUEZ-CABERO A, ROLDAN-PEREZ J, PRODANOVIC M, et al. Coupling of AC grids via VSC-HVDC interconnections for oscillation damping based on differential and common power control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6548-6558.

[28] 王振浩，张 越，成 龙，等. 多参数协同自适应的改进虚拟同步控制策略[J]. 电网技术，2023，47(6)：2403-2413.
WANG Zhenhao, ZHANG Yue, CHENG Long, et al. Improved virtual synchronization control strategy with multi-parameter adaptive collaboration[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2403-2413.

[29] 王 淋，巨云涛，吴文传，等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. 中国电机工程学报，2021，41(13)：4479-4489.
WANG Lin, JU Yuntao, WU Wenchuan, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4479-4489.

[30] 王 骞，易传卓，张学广，等. 兼顾捕碳强度与可再生能源消纳的储能容量配置优化方法[J/OL]. 中国电机工程学报，2023：1-14[2022-12-21]. http：//kns. cnki. net/kcms/detail/11.2107. tm. 20220826.1614.010. html.
WANG Qian, YI Chuanzhuo, ZHANG Xueguang, et al. Optimization of energy storage capacity sizing considering carbon capture intensity and renewable energy consumption[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-14[2022-12-21]. http: //kns. cnki. net/kcms/detail/11.2107. tm. 2 02208 26.1614.010. html.

[31] 李志军，杨梦伟，张家安，等. VSG 惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(1)：36-43.
LI Zhijun, YANG Mengwei, ZHANG Jiaan, et al. Research on synergistical adaptive control of inertia and damping of VSG[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 36-43.



赵熙临(通信作者)
1969—，男，博士，教授，硕导
主要从事电力系统自动化和电力系统优化与控制方面的研究工作
E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn

ZHAO Xilin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-02-22 修回日期 2023-04-13 编辑 陈 蔓