

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230948

基于变下垂系数的风电全直流输电系统一次调频 协调控制策略

苏嘉豪, 蔺红, 樊艳芳

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 风电场经直流汇集-直流送出的风电全直流输电系统中, 直流系统的存在会解耦风电场和受端电网的频率耦合, 在传统控制策略下对受端电网频率支撑能力弱。为此, 提出一种针对风电全直流输电系统的一次调频变下垂协调控制策略。首先, 提出基于 Logistic 函数的电压-频率变下垂频率传递策略, 以直流系统电压为媒介, 建立起电网频率与风电场功率的耦合关系。基于该频率传递策略, 构建了由受端换流站的变下垂虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制、直流升压站的改进双闭环控制及风力发电机的变下垂减载控制组成的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略, 实现系统无通信传递频率并参与电网一次调频。最后, 利用 Matlab/Simulink 软件搭建风电全直流输电系统仿真模型, 在不同工况下进行仿真验证。仿真结果表明, 所提控制策略能使风电场在不依赖远端通信的情况下实现对电网的一次调频, 同时, 有效减小了调频过程中直流电压的波动幅度。

关键词: 全直流输电系统; 一次调频; 变下垂控制; 虚拟同步发电机; 减载控制; 协调控制

Primary frequency regulation coordination control strategy of a wind power all-DC transmission system based on variable droop coefficient

SU Jiahao, LIN Hong, FAN Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China)

Abstract: In the wind power all-DC transmission system of wind farm DC collection-DC transmission, the existence of the DC system will decouple the frequency connection between the wind farm and the power grid, and the frequency support ability is weak using the traditional control strategy. Therefore, a primary frequency regulation coordinated control strategy of a wind power all-DC transmission system based on variable droop is proposed. First, a voltage-frequency variable droop frequency transfer strategy based on the Logistic function is proposed, and the coupling relationship between the power grid frequency and the wind farm power is established with the DC system voltage as the medium. Based on this strategy, a primary frequency regulation coordinated control strategy of the wind power all-DC transmission system is constructed. It consists of variable droop virtual synchronous generator (VSG) control of the receiving converter station, the improved double closed-loop control of the DC booster station and the variable droop de-loading control of the wind turbine. This can realize system frequency transmission without communication and participate in power grid primary frequency regulation. Finally, Matlab/Simulink is used to build a simulation model of the system, and simulation verification is carried out in various working conditions. The simulation results show that the proposed control strategy enables the wind farm to achieve primary frequency regulation of the power grid without relying on remote communication, and effectively reduces the fluctuation amplitude of DC voltage in the process of frequency regulation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507000).

Key words: all-DC transmission system; primary frequency regulation; variable droop control; virtual synchronous generator; de-loading control; coordinated control

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507000); 国家自然科学基金项目资助(52367012)

0 引言

风电直流汇集-直流送出的风电全直流输电系统能有效解决大规模风电交流汇集、传输产生的同步稳定问题和电压/无功问题,且与交流汇集、直流传输的风电经柔直并网系统相比,电能的变换环节少,电能的传输效率高,在大容量远距离输电工程中经济性明显,在未来大规模风电汇集及输送系统中具有广阔的应用前景^[1-5]。

然而,由于风电全直流输电系统出力的快速波动性以及系统惯量水平低等特点,导致其并网时不利于电网的频率稳定,且随着电网中风电等新能源占比的不断增大,电网调频能力进一步降低,因此,为提升大规模风电接入的电力系统频率的稳定性,风电全直流输电系统需要具备一定的频率支撑能力。与常规交流汇集、输送的风电系统调频策略不同,在风电全直流输电系统中,由于直流升压站及直流输电线路对频率的解耦效应^[6],风电机组难以感知电网频率的变化,不能直接提供调频功率。有学者提出在风电场和受端换流站之间架设通信线路的方法来实现系统的一次调频^[7],但在线路距离过长时,长距离的通信线路成本较高且会产生信号的延迟和失真^[8],导致该类方法经济性、可靠性较低。因此,亟需一种针对风电全直流输电系统的一次调频控制策略,使其在准确感知电网频率变化的前提下,完成对受端电网的频率支撑。

国内外关于风电经直流系统参与电网调频的研究大多集中在交流汇集-直流送出的风电经柔直系统上^[9]。文献[10-11]针对风电交流汇集-直流送出的风电经柔直系统提出了无通信的调频控制策略,该策略利用下垂控制原理以直流电压为媒介传递电网频率,但该方案中将直流线路视为理想线路,且未考虑线路故障对控制策略的影响。文献[12-13]提出利用风电场和超级电容协调配合完成调频,但该策略需在柔性直流系统中加装超级电容器,增加了工程成本且不易实现。以上针对柔直系统的文献为风电全直流输电系统的一次调频研究提供了部分思路,但目前鲜有针对该系统的一次调频控制策略,仅文献[14]针对风电全直流输电系统提出一种基于无通信的一次调频策略,通过下垂控制将电网频率偏差转换为直流汇集线路电压变化,系统各部分进行就地测量和控制,实现风场对电网的一次调频。然而该策略使用常规的下垂控制,直流电压的波动和偏差较大,可行性较低。

在此背景下,本文针对风电全直流输电系统参与电网一次调频的问题,提出了一种无通信的变下

垂协调控制策略。该策略利用 Logistic 变下垂函数建立电网频率与直流系统电压的关系,通过对系统各组成部分的控制策略进行改进,在保证直流系统电压在一定阈值内稳定的前提下,完成风电场对电网的一次调频。控制策略由3部分组成:1)受端换流站的变下垂虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制;2)直流升压站的改进电压电流双闭环控制;3)风电机组的变下垂减载控制。最后,利用 Matlab/Simulink 软件搭建了风电全直流输电系统仿真模型,通过多种工况验证了该调频策略的可行性和有效性。

1 风电全直流输电系统结构

风电全直流输电系统拓扑结构如图1所示^[15],风电场由多台直驱风力发电机组组成,与传统风力发电机组经过交直交变换输出电能的方式不同,采用直接经过一次整流来参与直流汇集的电能输出方式^[16],控制原理简单,且大大减少了风场侧的能量损耗;直流升压站采用多个变换器单元串联的多端口 DC/DC 变换器,有着对变换器变压及绝缘要求低及设计与实现难度小等优点^[17];受端换流站采用广泛应用的两电平电压源换流器。在该系统中,风电场所发功率经低压直流线路汇集后,由直流升压站升压送入高压直流输电线路,再由受端换流站逆变后送入交流电网,实现风能的直流汇集、直流送出过程。

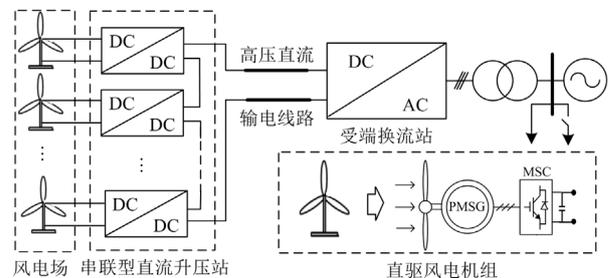


图1 风电全直流输电系统拓扑图

Fig. 1 Topology of wind power all-DC transmission system

2 引入 Logistic 函数的变下垂频率传递策略

针对风电全直流输电系统中存在的频率隔离问题,有学者提出利用直流线路电压作为频率传递媒介的无通信频率传递策略^[12],其电压与频率满足如式(1)所示的下垂关系。

$$U - U^* = k_f (f - f^*) \quad (1)$$

式中: U 、 U^* 分别为直流电压的实测值及参考值; k_f 为下垂控制系数; f 、 f^* 分别为受端电网的频率及参考频率。由式(1)可知,相同频率扰动下,当 k_f 较小时,直流电压稳定性较好,但频率响应效果

较差; 当 k_f 较大时, 频率响应灵敏, 但直流电压稳定性较差。此外, 直流系统线路阻抗压降的存在会使风电机组测量电压高于线路实际电压, 应用传统下垂控制会造成过频时的误动作和欠频时的不动作^[18]。

针对以上问题, 本文基于 Logistic 函数建立了电压-频率变下垂函数, 实现了换流站向直流系统的频率传递。 $U-f$ 的变下垂函数如式(2)所示。

$$U = \begin{cases} U^* + \frac{K_B K_0 e^{r(f-f_H)}}{K_B + K_0 (e^{r(f-f_H)} - 1)}, & f > f_H \\ U^*, & f_L \leq f \leq f_H \\ U^* + \frac{K_B K_0 e^{r(f-f_L)}}{K_B + K_0 (e^{r(f-f_L)} - 1)}, & f < f_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_0 为 Logistic 函数初始参考值; K_B 为边界系数, 能限制函数的上下限值; r 为变下垂系数, 能改变函数斜率进而影响电压对频率的响应程度; f_H 和 f_L 分别为调频死区的上下限, 分别设置为 50.1 Hz 和 49.9 Hz^[19]。采用式(2)所示变下垂函数后, 系统的电压-频率变下垂曲线如图 2 所示。

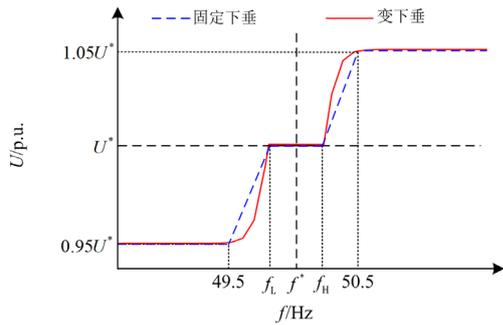


图 2 基于 Logistic 函数的电压-频率变下垂曲线图
Fig. 2 Voltage-frequency variable droop curve based on Logistic function

由图 2 可知, 基于 Logistic 函数的变下垂控制相与传统下垂控制相比, Logistic 函数两端斜率小、中间斜率大的特性符合直流系统的电压-频率下垂转换机理, 下垂系数能根据频率偏差自动调整, 当频率偏差远离限值时下垂系数较大, 当频率偏差接近限值时函数下垂系数接近 0, 在提高系统频率响应灵敏度的同时, 减小了直流电压波动幅度, 提高了系统的稳定性。

3 风电全直流输电系统一次调频协调控制策略

基于变下垂控制的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略的控制框图如图 3 所示, 图中部分物理量含义说明参见附录表 A1。该策略在图中黑线部分所示的传统控制回路的基础上, 利用第 2 节所提变下垂频率传递策略进行改进, 改进后的控制策略由受端换流站的变下垂 VSG 控制、直流升压站的改进双闭环控制以及直驱风电机组的变下垂减载控制共同组成。当交流系统的频率波动不越限时, 受端换流站在实现电流逆变并向交流系统传输电能的同时, 保证高压直流输电线路电压在一定阈值内稳定, 直流升压站的控制目标为维持低压直流汇集线路电压稳定, 风电机组工作在减载运行模式输出功率; 当交流系统的频率波动越限时, 受端换流站利用高压直流线路上的直流电压为媒介, 以变下垂的方式接收并传递交流电网的频率波动, 直流升压站接收并传递来自高压直流线路上的电压波动, 直驱风电机组机侧换流器(machine side converter, MSC)测量低压直流汇集线路上的电压偏差, 并转换为频

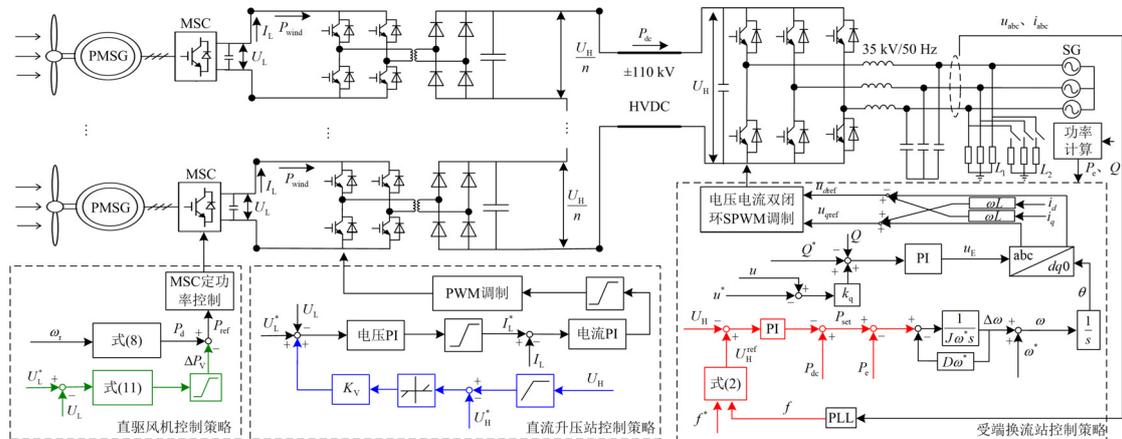


图 3 基于变下垂控制的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略

Fig. 3 Primary frequency regulation coordination control strategy of all-DC wind power system based on variable droop control

率偏差信号,配合直驱风电机组变下垂减载控制,实现对电网的一次调频。

3.1 引入 Logistic 函数的受端换流站变下垂 VSG 控制

受端换流站既要维持高压直流输电线路的电压在一定阈值内稳定,又要响应交流系统频率的波动实现频率波动向直流系统的传递。因此,本文在参与调频的换流站 VSG 控制的基础上,利用基于 Logistic 函数的变下垂频率传递策略对其进行改进。

换流站传统控制策略不具备交流电网中同步发电机的惯性和阻尼特性,且由于风电全直流输电系统并网调频时系统惯量特性差、响应速度过快,会加剧电网频率恶化^[20],因此在带有惯量支撑特性的换流站 VSG 控制基础上,引入第 2 节所提基于 Logistic 函数的变下垂控制策略,增加了基于式(2)的电压频率变下垂控制环,改进后的受端换流站控制策略如图 3 中右侧虚线框内所示。

换流站的传统 VSG 控制原理已在文献[21]中详细阐述,控制回路如图 3 右侧虚线框内黑色部分所示, VSG 控制的主要数学模型为

$$J\omega^* \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_{\text{set}} - P_c - D\omega^*(\omega - \omega^*) \quad (3)$$

式中: J 为 VSG 的转动惯量; D 为 VSG 的阻尼系数; P_{set} 和 P_c 分别为受端换流站的有功功率指令和输出的有功功率; ω 和 ω^* 分别为控制回路的模拟转子角速度和额定角速度。直流系统以直流电压为媒介传递频率波动的前提是实现输电线路上直流电压的稳定控制,因此本文在传统 VSG 控制的基础上增加了直流电压控制环,此时 P_{set} 为

$$P_{\text{set}} = P_{\text{dc}} - \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (U_{\text{H}}^{\text{ref}} - U_{\text{H}}) \quad (4)$$

式中: P_{dc} 为直流线路上的有功功率; k_p 和 k_i 分别为比例和积分系数; U_{H} 和 $U_{\text{H}}^{\text{ref}}$ 分别为高压直流母线的电压和指令电压。由式(4)可知,定直流电压控制的本质是给有功功率指令 P_{set} 添加一个附加量,通过修正功率指令实现直流母线电压恒定的效果。为了传递电网频率波动,将式(4)中的 $U_{\text{H}}^{\text{ref}}$ 用式(2)所示函数替换,得到式(5)。

$$P_{\text{set}} = P_{\text{dc}} - \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left(U_{\text{H}}^* + \frac{K_{\text{B}}K_0 e^{r_{\text{H}}(f-f^*)}}{K_{\text{B}} + K_0 (e^{r_{\text{H}}(f-f^*)} - 1)} - U_{\text{H}} \right) \quad (5)$$

式中: U_{H}^* 为高压直流母线的参考电压; r_{H} 为变下垂函数的变下垂系数。由式(5)可知,直流电压环中的 $U_{\text{H}}^{\text{ref}}$ 由固定值变为与频率成变下垂关系的动态指令值,将式(5)代入式(3),得到引入 Logistic 函数的受端换流站 VSG 控制表达式,如式(6)所示。

$$J\omega^* \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_{\text{dc}} - P_c - D\omega^*(\omega - \omega^*) - \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left(U_{\text{H}}^* + \frac{K_{\text{B}}K_0 e^{r_{\text{H}}(f-f^*)}}{K_{\text{B}} + K_0 (e^{r_{\text{H}}(f-f^*)} - 1)} - U_{\text{H}} \right) \quad (6)$$

式(6)在受端换流站 VSG 控制的基础上,利用如图 3 中红线所示电压-频率变下垂控制回路进行了改进,以受端电网频率下降超过死区范围为例,受端电网频率 f 作为输入量变下垂地降低 $U_{\text{H}}^{\text{ref}}$,此时 P_{set} 相应增大,即通过增大换流站功率输出的方式降低直流电压,实现了直流电压跟随频率波动。修正后的 P_{set} 经有功环路输出逆变器参考电压相角 θ ,与无功环路输出的逆变器参考电压幅值 u_{e} 依次经过电压电流双闭环控制和 SPWM 产生 IGBT 的驱动脉冲,实现电能的逆变。因此,换流站控制策略在保证 VSG 控制功能的同时完成了受端电网频率波动的传递。

3.2 直流升压站的改进电压电流双闭环控制策略

电压电流双闭环控制是单有源桥式 DC/DC 变换器常用的一种控制策略^[22],该策略下的低压汇集线路电压保持恒定,无法传递受端电网的频率波动。因此,本文在直流升压站双闭环控制原有电压控制外环和电流控制内环的基础上,增加电压下垂控制环,如图 3 中蓝线所示:高压直流母线电压 U_{H} 作为其输入量,通过下垂控制动态地改变各低压直流汇集端口的参考电压 U_{L}^* ,使高压侧的电压波动成比例地反映到各低压直流汇集端口上。此电压下垂控制环的表达式为

$$U_{\text{L}} = U_{\text{L}}^* + K_{\text{V}}(U_{\text{H}} - U_{\text{H}}^*) \quad (7)$$

式中: U_{L} 为低压直流汇集端口的电压; K_{V} 为下垂控制系数。

如图 3 中间虚线框内所示,电压控制外环经过 PI 控制器控制直流升压站中各低压汇集端口的电压之和与高压侧直流母线电压的比值恒定,并经过 PI 控制器得出内环电流的参考值 I_{L}^* ;电流控制内环通过将各子模块的 I_{L}^* 与实测值 I_{L} 进行 PI 计算,经 PWM 调制生成相应的占空比作用于直流升压站子模块。

可以看出, U_{L} 的幅值反映了受端电网频率信息,风电机组可通过感知 U_{L} 来检测受端电网频率偏差,根据 U_{L} 的变化来调整其输出功率,从而向受端电网提供所需的调频功率。

3.3 引入 Logistic 函数的风电机组变下垂减载控制

风电场需要响应 U_{L} 的变化,通过增减输出功率的方式完成对电网的一次调频,为了使风电机组具

备一次调频能力,采用变下垂系数的减载控制策略,即利用减载控制进行功率备用,同时变下垂地响应 U_L 的变化进行增减功率,控制框图如图3中左侧虚线框所示。

本文采用超速减载与变桨距角减载相协调的减载控制方法,以风电机组的转子转速 ω_r 为参考值,实现两者的协调配合^[23],风电机组进行减载控制后的运行功率 P_d 为

$$P_d = (1 - k_d) P_{\text{MPPT}} = \frac{1}{2} (1 - k_d) \pi \rho R^2 v^3 C_p^{\text{max}}(\lambda, \beta) \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (9)$$

式中: k_d 为风电机组的减载系数; P_{MPPT} 为最大功率点跟踪曲线上的最优功率; ρ 为空气密度; R 为风电机组叶片半径; v 为风速; $C_p^{\text{max}}(\lambda, \beta)$ 为最大风能利用系数; λ 为叶尖速比; β 为桨距角。风电机组的传统一次调频控制策略利用减载控制进行功率备用,利用下垂控制响应频率变化^[24],该下垂控制的表达式为

$$P_{\text{ref}} = P_d + \Delta P_V = P_d - K_d (f - f^*) \quad (10)$$

式中: P_{ref} 为风电机组一次调频功率的指令值; ΔP_V 为下垂控制的附加功率; K_d 为下垂系数。由于传统下垂控制自身特点,通过直流电压传递频率变化,通过下垂控制响应频率变化,进而提供附加功率的控制方法,容易造成调频过程中直流电压的越限。因此,采用与第2节中原理相同的Logistic变下垂函数对式(10)进行改进,利用Logistic函数直接建立直流汇集线路的电压 U_L 与附加功率 ΔP_V 的耦合关系,改进后的变下垂减载运行表达式为

$$P_{\text{ref}} = P_d + \Delta P_V = P_d - \frac{K'_B K'_0 e^{r_L (U_L - U'_L)}}{K'_B + K'_0 (e^{r_L (U_L - U'_L)} - 1)} \quad (11)$$

式中, K'_B 、 K'_0 和 r_L 分别为风电机组变下垂函数的边界系数、初始参考值和变下垂系数。改进的电压-功率变下垂控制回路如图3中的绿线所示,风电机组对低压直流汇集端口的电压进行就地测量,将 U_L 作为输入量代入式(11),直接生成附加功率 ΔP_V ,与此时的风电机组减载运行功率 P_d 作差,生成风电机组一次调频功率的指令值 P_{ref} ,参与系统的一次调频。

3.4 系统整体协调控制策略

综合上述分析可知,系统各组成部分通过相互协调配合完成一次调频过程,其整体控制流程如图4所示。

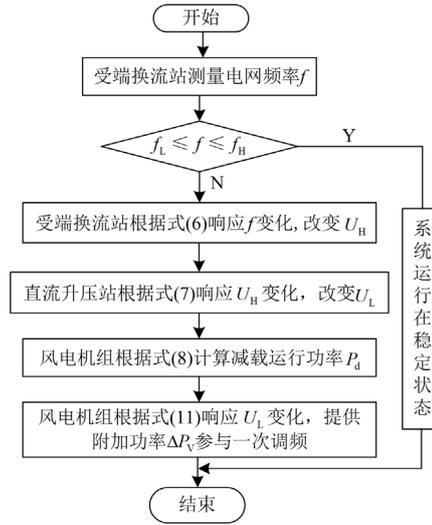


图4 系统整体协调控制流程图

Fig. 4 Flow chart of coordinated control for the whole system

4 仿真分析

为验证所提策略的可行性和有效性,本文基于Matlab/Simulink仿真平台建立了如图1所示的风电全直流输电系统仿真模型。其中,风电场额定容量 S_w 为50 MW,同步发电机组额定容量 S_{SG} 为300 MW,直流电压的波动设置在 $\pm 5\%$ 之内^[25-26]。为使受端交流电网频率发生波动,在受端电网加入大小为13 MW的可投切负载,占交流系统总负载的7.3%。选取恒风速下交流负荷突然增加、波动风速下交流负荷突然增加、受端电网故障以及控制参数变化4种工况进行仿真验证。分别采用策略1:系统不参与调频;策略2:系统经传统下垂频率传递策略参与调频;策略3:系统经本文所提变下垂策略参与调频3种策略进行对比分析。系统的主要仿真及控制参数如附录A表A2和表A3所示。

4.1 恒风速下负载突增时的仿真分析

为验证恒风速下交流系统负荷突增时,风电全直流输电系统对交流电网的频率支撑作用,在 $t = 3 \text{ s}$ 时投入大小为13 MW的交流负载 L_2 ,仿真结果如图5所示。

如图5所示,采取策略1时风电场不参与调频,此时一次调频功率全部由同步发电机承担,调频时的最大频率偏差为0.51 Hz,发生频率越限(频率波动下限为49.5 Hz),系统的高、低压侧直流电压及输出功率均不发生改变;与策略1相比,策略2、策略3均能提供调频功率,此时最大频率偏差分别为0.41 Hz和0.42 Hz,频率不越限,但由于策略2采用传统的定下垂频率传递策略,受端电网频率和

直流电压之间呈线性耦合关系,电压-频率下垂系数为固定值,使得调频过程中直流电压的变化幅度较大,如图 5(b)和图 5(c)所示,策略 2 低压侧和高压侧的最大电压偏差分别为额定值的 10.4%和 10.5%,超过直流电压安全稳定范围;同样地,使得有功功率输出在频率下降阶段的变化幅度较大,如图 5(d)中 $t=4\sim 7$ s 时所示,额外的有功出力加重了风电场的调频负担。

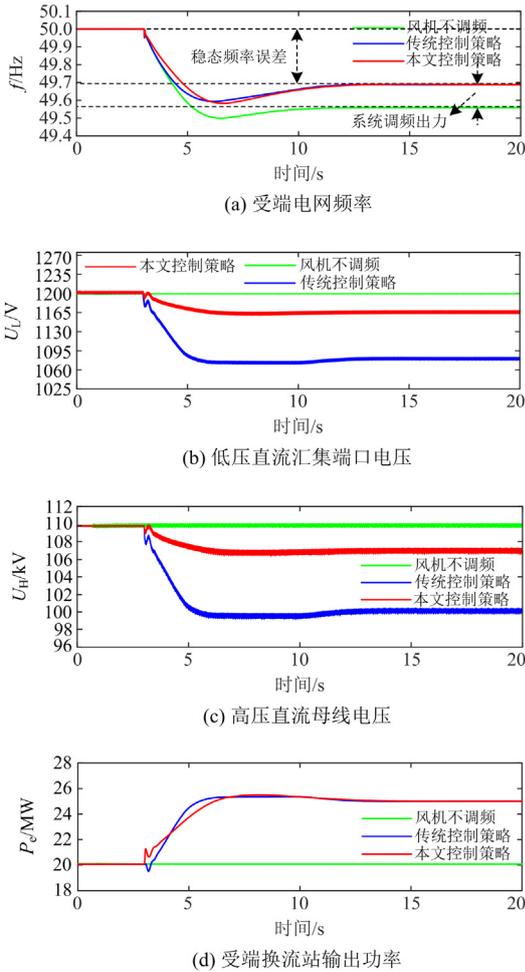


图 5 恒风速下负载突增时的仿真波形

Fig. 5 Simulated waveform during load surges at constant wind speed

策略 3 采用本文所提基于 Logistic 函数的变下垂协调控制策略参与电网的一次调频,如图 5(b)和图 5(c)所示,直流电压响应受端电网频率的波动,根据式(6),随着电压偏差的增大,系统 U_H-f 下垂系数不断减小,避免了由于过度响应频率变化造成的直流电压越限,此时低压侧和高压侧的最大电压偏差分别为额定值的 2.9%和 3.1%,小于电压波动限值 5%,提高了直流电压运行的稳定性。根据式(11),

$P_{ref}-U_L$ 下垂系数自适应变化,使得换流站有功功率输出曲线在频率下降阶段的变化率小,在频率恢复阶段的变化率大(见图 5(d))。这有利于直流电压的稳定,但会影响调频效果,如图 5(a)所示,与策略 2 相比,系统最大频率偏差增加了 0.01 Hz,但系统的频率下降速度较缓且恢复速度较快,最终在同一频率达到稳定。因此,恒风速下负荷发生突增时,本文所提策略使系统具有较好调频特性的同时,提高了系统直流电压的稳定性。

4.2 波动风速下负载突增时的仿真分析

引入平均风速为 10 m/s 的湍流风况,验证波动风速下本文所提控制策略的可行性和优越性,同样在 $t=3$ s 时投入大小为 13 MW 的交流负载 L_2 , 3 种策略下的仿真结果如图 6 所示。

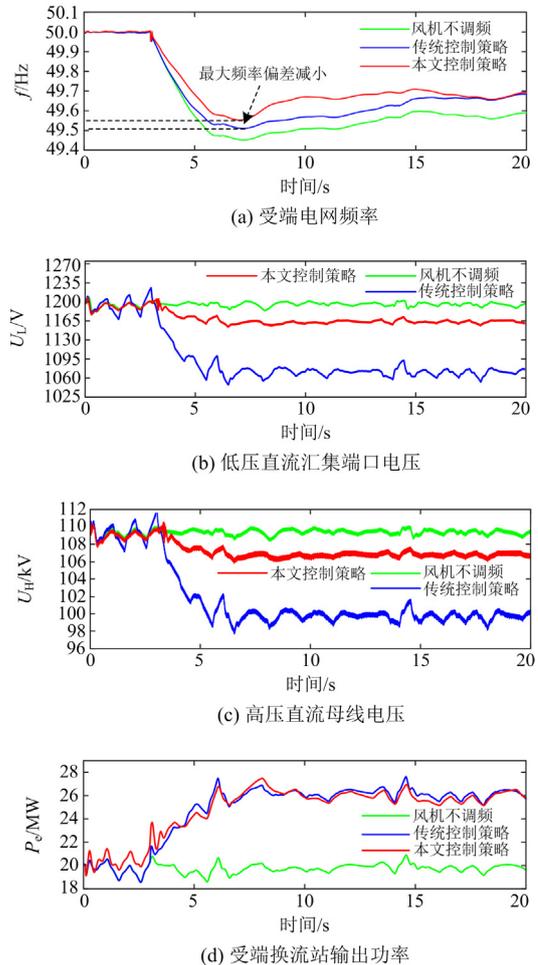


图 6 波动风速下负载突增时的仿真波形

Fig. 6 Simulated waveform during load surges at fluctuating wind speed

如图 6(a)所示,系统采用本文所提策略参与调频时的最大频率偏差更小且频率恢复速度更快,这

是因为在风速波动工况下, 根据式(11)所得的 $P_{ref}-U_L$ 下垂系数以及式(6)所得的 U_H-f 下垂系数, 能够在调频各阶段进行自适应变化, 最大限度地减少风速波动对系统调频效果的影响。同时, 如图 6(b) 和图 6(c) 所示, 由于直流电压偏差接近限值时下垂系数的取值较小, 此时直流电压对频率偏差的响应程度较低, 所以风速波动引起的系统频率波动在直流线路上产生的电压偏差量减小。如图 6(d) 所示, 由于调频过程中上述下垂系数先增大后减小, 所以与传统控制策略相比, 本文所提控制策略下 P_e 在调频初期 $t=3\sim 4.8$ s 时较大, 在直流电压偏差接近限值时较小, 这使系统调频的最大频率偏差减小, 同时避免了直流电压发生超调。因此, 本文所提基于变下垂频率传递策略的一次调频协调控制方法相较于传统下垂策略, 在风速波动情况下的一次调频效果更好, 直流电压的稳定性更高。

4.3 受端电网故障时的仿真分析

为验证所提基于变下垂的一次调频协调控制策略在受端交流电网故障工况时的可行性, 设置受端电网母线处在 $t=3$ s 时发生单相接地故障, 故障持续时间为 200 ms, 仿真结果如图 7 所示。

如图 7(a) 所示, 发生单相接地故障后受端电网频率快速跌落, 与传统控制策略相比, 本文所提控制策略减小了频率的跌落且提高了频率恢复的速度。如图 7(b) 和图 7(c) 所示, 本文所提控制策略在

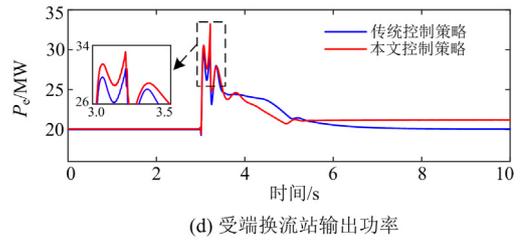
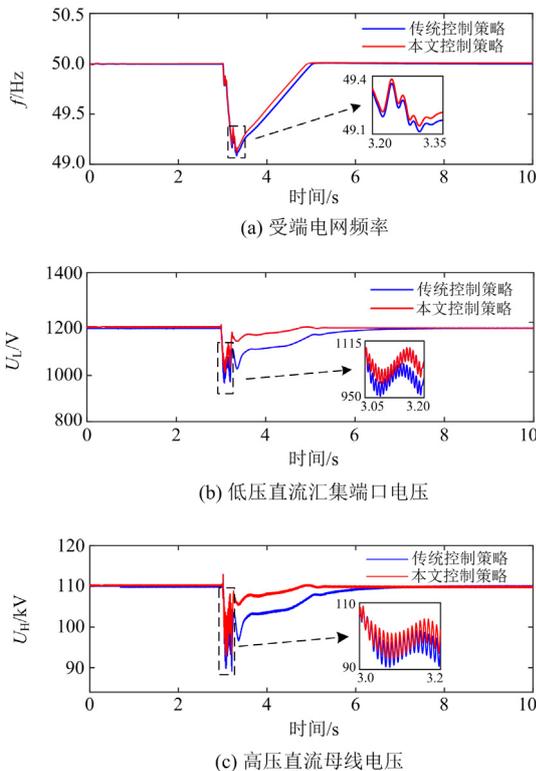


图 7 受端电网单相接地故障时的仿真波形

Fig. 7 Simulated waveform for single-phase ground fault in the receiving power grid

故障时低压侧和高压侧的直流电压下降更小, 故障切除后直流电压的恢复速度较传统控制策略更快。如图 7(d) 所示, 本文所提控制策略相较于传统控制策略, 故障发生后 P_e 在电压恢复初期更高, 在电压恢复末期更低, 保证了电压和频率的快速恢复, 同时避免了电压和频率发生超调。

4.4 控制参数对调频性能的影响

控制参数 r_H 和 r_L 分别为受端换流站和风电机组变下垂控制函数的变下垂系数, 能影响系统中下垂系数的变化快慢, 进而影响系统直流电压的波动幅度和调频出力。因此, 以 r_H 和 r_L 为变量, 验证所提控制策略在不同控制参数下的调频性能。

在恒风速下, 设置交流系统在 $t=3$ s 时投入大小为 13 MW 的交流负载 L_2 , 以受端换流站的变下垂控制参数 r_H 变化为例, 分析下垂系数变化对调频性能的影响, 此时默认风电机组的变下垂系数 r_L 为固定值 0.58, 仿真结果如图 8 所示。

如图 8 所示, 在相同负荷变化的情况下, 随着 r_H 的增大, 下垂系数变化曲线的变化率不断增大, 系统频率响应能力不断增大, 因此电网频率的跌落减小, 系统的调频性能不断提高。以图 8(a) 的 $r_H=0.234$ 曲线为例, 下垂系数曲线在 9~12 s 时的变化率较低, 此时系统的频率响应程度降低, 避免了直流电压因过度响应频率变化而超限。

同样设置恒风速下负荷突增的工况, 同时改变 r_H 和 r_L , 分析对系统低压侧和高压侧直流电压的波动幅度的影响, 仿真结果如图 9 所示。

如图 9 所示, 随着 r_H 的增大, 直流电压 U_L 和 U_H 的最大偏差量不断增大, 这是因为 r_H 的增大使相同条件下换流站的频率响应能力增大, 直流电压的波动幅度也因频率响应能力的增大而增大; 随着 r_L 的增大, U_L 和 U_H 的最大偏差量不断减小, 这是因为 r_L 的增大使相同条件下风电机组的电压响应能力增加, 提供的附加功率 ΔP_V 更多, 风电机组一次调

频率的增大，减缓了交流电网频率跌落的速度，进而减小了系统直流电压的波动幅度。

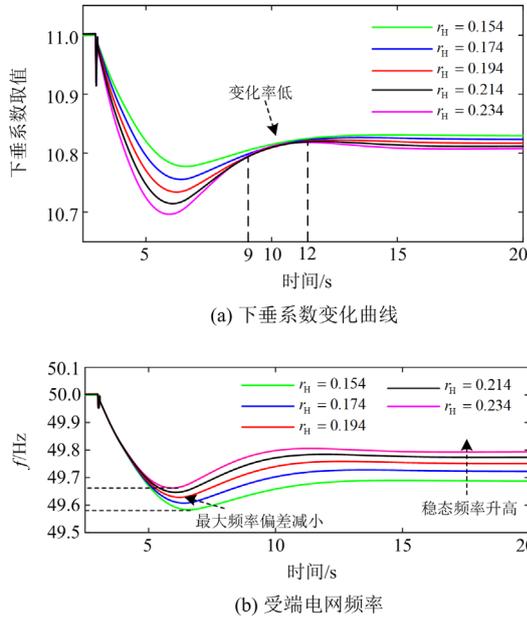


图 8 下垂系数对系统调频性能的影响

Fig. 8 Influence of the droop coefficient on the frequency modulation performance of the system

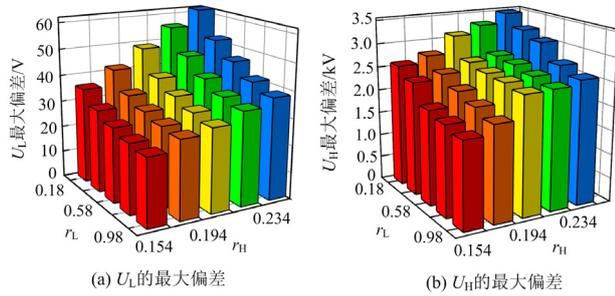


图 9 下垂系数对直流线路电压的影响

Fig. 9 Influence of the droop coefficient on the DC line voltage

5 结论

针对传统控制策略下风电全直流输电系统参与电网一次调频能力弱的问题，提出了一种基于 Logistic 变下垂的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略，利用 Logistic 变下垂频率传递策略对系统的控制策略进行改进，并通过各部分控制策略的协调配合完成频率的传递和对受端电网的一次调频。仿真结果表明：

1) 所提控制策略以直流系统电压为媒介，将受端电网频率准确还原至风场侧换流站，在恒定风速、波动风速和故障工况下电网频率发生突变时均能保证频率传递的准确性，减少了对远端通信系统的依赖。

2) 与传统下垂控制相比，所提控制策略根据受端频率的波动情况实时改变下垂系数，避免了直流电压对频率波动的过度响应，在增加了系统调频能力的同时，稳定了直流电压。

附录 A

表 A1 图 3 参数说明

Table A1 Definition of parameters in Fig. 3

参数	说明
P_{wind}	风电场输出功率
$Q、Q^*$	换流站无功功率实测值和指令值
$u、u^*$	受端电网的交流电压和参考交流电压
$u_{abc}、i_{abc}$	abc 坐标系下母线电压、电流
$u_{dref}、u_{qref}$	三相电压 $d-q$ 轴分量的参考值
$i_d、i_q$	三相电流的 $d-q$ 轴分量
$L_1、L_2$	受端电网固定负载和可投切负载
$\Delta\omega$	VSG 附加转子角速度
k_q	VSG 的电压环路下垂控制系数

表 A2 风电全直流输电系统主要仿真参数

Table A2 Main simulated parameters of all-DC wind power system

参数	数值
风电场额定容量 S_w /MW	50
同步发电机额定容量 S_{SG} /MW	300
高压直流母线的参考电压 U_H^* /kV	110
低压直流汇集端口的参考电压 U_L^* /V	1200
受端电网的参考交流电压 u^* /kV	35
受端电网的参考频率 f^* /Hz	50
高压直流输电线路长度 l_{dc} /km	100
高压直流输电线路电阻 $R_{dc}/(\Omega/km)$	0.02
直流电容 C_{dc} /mF	0.7

表 A3 风电全直流输电系统主要控制参数

Table A3 Main control parameters of all-DC wind power system

元件	控制参数	数值
受端换流站	VSG 的转动惯量 J	3
	VSG 的阻尼系数 D	10
	Logistic 函数的初始参考值 K_0	1000
直流升压站	Logistic 函数的变下垂系数 r_H	0.154
	Logistic 函数的边界系数 K_B	500
直流升压站	直流升压站下垂控制系数 K_V	0.025
	电压外环 PI 参数 k_{P1}, k_{I1}	50, 0.1
风电机组	电流内环 PI 参数 k_{P2}, k_{I2}	1, 0.1
	Logistic 函数的初始参考值 K_0'	0.25
	Logistic 函数的变下垂系数 r_L	0.58
	Logistic 函数的边界系数 K_B'	0.5

参考文献

- [1] 孙瑶, 樊艳芳, 卢俊龙, 等. 陆上风电直流汇集系统拓扑结构优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 142-152.
SUN Yao, FAN Yanfang, LU Junlong, et al. Optimal design method for topology of onshore wind power DC collection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 145-152.
- [2] 郭灵瑜, 姚钢, 周荔丹. 全直流海上风电场高升压比 DC/DC 变换技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 158-169.
GUO Lingyu, YAO Gang, ZHOU Lidan. Research review on high step-up ratio DC/DC converter for offshore DC wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 158-169.
- [3] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036-2048.
CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048.
- [4] 高树同, 许晶, 张刚, 等. 40 kV 两级升压型全直流海上风电场用直流断路器的技术参数与样机设计[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 115-123.
GAO Shutong, XU Jing, ZHANG Gang, et al. Technical parameters and prototype design of 40 kV two-stage boost DC circuit breaker for all-DC offshore wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 115-123.
- [5] 刘其辉, 樊双婕, 洪诚程, 等. 采用复合模块化结构的海上风电送出直流变换器[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 142-151.
LIU Qihui, FAN Shuangjie, HONG Chengcheng, et al. DC/DC converter for offshore wind power transmission using composite modular structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 142-151.
- [6] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [7] 唐程辉, 张凡, 张宁, 等. 基于风电场总功率条件分布的电力系统经济调度二次规划方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2069-2078.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Quadratic programming for power system economic dispatch based on the conditional probability distribution of wind farms sum power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2069-2078.
- [8] PHULPIN Y. Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-link[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1136-1137.
- [9] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [10] 朱介北, 史美琦, 张利, 等. 基于超级电容的海上风电柔直送出系统协调惯量支撑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2938-2952.
ZHU Jiebei, SHI Meiqi, ZHANG Li, et al. Supercapacitor-based coordinated inertia support strategy for offshore wind farms integration via VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2938-2952.
- [11] 郎燕生, 杨东冀, 杨晓楠, 等. 多风电场柔直并网调频的组合控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4468-4477.
LANG Yansheng, YANG Dongji, YANG Xiaonan, et al. Combined control strategy for frequency regulation of multi-wind farms connected to multi-terminal flexible DC[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4468-4477.
- [12] YAN Jiaming, LIU Fanglei, WANG Fan, et al. A coordinated frequency regulation method for offshore wind farms integrated by VSC-HVDC[C]// 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), June 4-7, 2020, Chengdu, China: 602-606.
- [13] ZHU Jiebei, HU Jiabing, 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.
- [14] KOU Peng, LIANG Deliang, WU Zihao, et al. Frequency support from a DC-grid offshore wind farm connected through an HVDC link: a communication-free approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1297-1310.
- [15] 李战龙, 王祥君, 王海云, 等. 基于直流风电机组的风电全直流输电系统综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 14-24.
LI Zhanlong, WANG Xiangjun, WANG Haiyun, et al. Review of wind power all-DC transmission system based

- on DC wind turbine[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(12): 14-24.
- [16] 王祥君, 李战龙, 王海云, 等. 基于新型直流风电机组的串联型全直流发电系统设计研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 178-187.
WANG Xiangjun, LI Zhanlong, WANG Haiyun, et al. Design and research of a series all-DC power generation system based on a new DC wind turbine[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 178-187.
- [17] 赵彪, 安峰, 屈鲁, 等. 多功能直流集电器概念及其全直流海上风电系统[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6169-6181.
ZHAO Biao, AN Feng, QU Lu, et al. Multi-function DC-collector concept and its all-DC offshore wind power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6169-6181.
- [18] 何廷一, 孙领, 王晨光, 等. 避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 12-20.
HE Tingyi, SUN Ling, WANG Chenguang, et al. A method of primary frequency regulation power distribution in a wind farm to avoid secondary frequency drop[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(11): 12-20.
- [19] 张健, 李文锋, 王晖, 等. 多电源梯级调频方案及风电场级调频时序优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 93-100.
ZHANG Jian, LI Wenfeng, WANG Hui, et al. Multi-source cascaded frequency modulation scheme and time-sequence optimization strategy of frequency modulation at level of wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 93-100.
- [20] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 30-44.
- [21] 倪泽龙, 林钰钧, 王治涛, 等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(14): 85-93.
NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(14): 85-93.
- [22] 李广林, 樊艳芳, 王一波, 等. IPOS 型光伏直流升压外送系统控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 166-176.
LI Guanglin, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research on control strategy of IPOS type photovoltaic boost delivery system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(8): 166-176.
- [23] 何廷一, 孙领, 李胜男, 等. 考虑风速差异的风电场卸载方案与一次调频策略[J]. *电力建设*, 2022, 43(7): 139-148.
HE Tingyi, SUN Ling, LI Shengnan, et al. Research on deloading scheme and primary frequency regulation strategy of wind farm considering wind speed difference[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(7): 139-148.
- [24] 曾雪洋, 张纯, 王顺亮, 等. 基于减载系数变化的风电机组一次调频控制[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(8): 119-125, 139.
ZENG Xueyang, ZHANG Chun, WANG Shunliang, et al. Primary frequency control of wind turbine based on deloading coefficient variation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(8): 119-125, 139.
- [25] CHUANGPISHET S, TABESH A. Matrix interconnected topology for dc collector systems of offshore wind farms[C]// IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), September 6-8, 2011, Edinburgh, UK: 1-4.
- [26] 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 Protection and Control*, 2020, 44(6): 2160-2168.

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-08-28

作者简介:

苏嘉豪(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统稳定运行控制; E-mail: 1297523117@qq.com

蔺红(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定运行控制及新能源并网发电技术; E-mail: xjuhl@163.com

樊艳芳(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源并网技术与电力系统保护与控制。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 周金梅)