

基于有限控制集模型预测控制的全直流风电系统电压稳定控制

马智, 蔺红, 樊艳芳
(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 为保证全直流风电系统安全并网运行, 系统直流电压稳定控制至关重要。全直流风电系统直流电压稳定控制采用比例积分(PI)控制时, PI参数较多且整定繁琐复杂, 在非正常运行工况下动态响应速度相对较慢, 控制精度不够高。针对以上问题, 文章提出一种基于有限控制集模型预测控制(Finite Control Set-Model Predictive Control, FCS-MPC)原理对系统换流器桥臂晶体管开关状态进行控制的系统直流电压稳定控制策略。该策略结合机侧整流器及并网逆变器的电流预测模型, 以换流器输出电流为控制变量构造代价函数, 以代价函数为优化目标, 为避免计算时延导致的控制延时, 引入延时补偿提高控制准确度, 并引入权重系数实现多目标优化, 通过遍历计算产生最优开关组合信号触发换流器。在 Matlab/Simulink 中建立全直流风电系统的仿真模型, 在不同工况下, 对所提策略与传统 PI 控制进行对比仿真分析, 仿真结果有效验证了所提控制策略的静态性能及动态性能。

关键词: 全直流风电系统; 有限控制集模型预测控制; 电压稳定控制; 换流器; 风电并网

中图分类号: TK81; TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)04-0534-08

0 引言

随着风电装机规模持续扩大以及直流输电技术不断革新, 采用直流汇集-直流传输模式的全直流风电系统成为研究焦点。相较于传统交流汇集-直流传输的风电系统, 全直流风电系统在建设成本与系统损耗等方面优势明显^[1]。其借助直流线路汇集电能, 有效规避了交流汇集系统中无功充电电流过大与过电压难题^[2], 且减少了多次换流升压环节, 极大提升了运行经济性^[3]。

在全直流风电系统中, 直流线路是能量传输与转换的核心。直流电压的稳定性对系统极为关键, 一旦电压波动, 将干扰换流器控制, 进而破坏系统稳定, 影响风电消纳及风电场安全运行。目前, 全直流风电系统的电压稳定控制大多依赖传统 PI 控制策略。文献[4]构建了一种整体协调控制方案, 旨在保障系统稳定运行。但该方案基于线性模型, 而实际中换流器状态变量随时间与外部输入动态变化, 使得精确数学模型难以建立, 导致 PI 控制等经典方法在电力电子系统应用时存在局限。

随着数字信号处理器技术的飞速发展, 模型预测控制(MPC)逐渐应用于电力电子系统控制领域。FCS-MPC 因直接利用换流器离散及开关状态有限特性, 直接控制桥臂晶体管开关状态, 运算量小, 无需调制器, 也无需复杂参数配合设计, 成为研究热点。

众多文献对 MPC 在风电系统的应用展开了研究。文献[5]对比分析了 FCS-MPC 与传统滞环、线性控制, 提出研究思路, 但未结合实际工程。文献[6]指出 MPC 更适用于复杂风电场模型, 在风功率预测与控制方面表现良好, 却未涉及电压稳定问题。文献[7]提出误差超阈值触发 FCS-MPC 的三相并网逆变器优化策略, 虽提升动态响应, 但参考误差大时控制灵敏度会降低。文献[8]对比 FCS-MPC 与 PI 电流控制, 发现 FCS-MPC 在共模电压和泄漏电流方面表现更优。文献[9]针对风速波动下的永磁同步发电机(PMSG)提出 EDMPC 技术, 增强了鲁棒性与稳态响应, 然而控制结构复杂, 可靠性欠佳。文献[10]提出针对 PMSG 机侧变流器(MSC)的快速 FCS-MPC, 减少了计算量与波形畸

收稿日期: 2023-09-05。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1507000); 新疆维吾尔自治区重点研发专项资助项目(2022B01020-3)。

通信作者: 蔺红(1969-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定控制与电力系统优化调度。E-mail: xjluh69@163.com

变,但仅考虑了机侧整流器优化,忽略了网侧逆变器。文献[11]针对基于PMSG的VSC-HVDC系统提出改进的FCS-MPC控制策略,实现了电网故障下的低电压穿越,与PI控制相比优势显著,但目标函数权重因子选定复杂。文献[12]提出基于FCS-MPC的海上风电VSC-HVDC并网控制策略,验证了对直流电压的控制与故障恢复能力。文献[13]提出应对双馈风力发电机高压穿越直流链过电压的控制方案,却不适用于永磁直驱风机为主的全直流风电系统。文献[14]总结了直流变换器拓扑,未涉及电压稳定控制。文献[15]针对单有源桥(SAB)直流风电机组串联风电场,提出基于PI控制的协调策略,动态响应较弱。文献[16]介绍了全直流海上风电场建模与仿真,采用传统线性控制,动态响应与鲁棒性差。总体而言,虽有文献探索MPC在风电系统的应用,但针对全直流风电系统电压稳定控制采用MPC优化的研究较少。

针对全直流风电系统电压稳定控制采用传统PI控制器动态响应速度相对较慢、PI参数难以整定、难以实现多目标优化等问题,本文结合FCS-MPC动态响应快、无须进行大量PI参数整定、可实现多目标优化的特点对全直流风电系统进行研究,建立全直流风电系统换流器的预测模型,进而提出一种针对全直流风电系统的FCS-MPC电压控制策略,并通过两步预测进行延时补偿来增强系统的控制精确度及抗扰动能力。最后在Matlab/Simulink上搭建全直流风电系统并网仿真模型,在不同工况下与传统PI控制进行对比仿真试验,验证所提控制策略的动态性能和静态性能。

1 全直流风电系统结构及换流器预测模型

1.1 系统结构

综合考虑容量、成本、可拓展性、控制难度、可靠性、工程实现难度等因素,选用并-串联型直流汇集风电场进行集中升压,拓扑结构如图1所示。考虑电压、容量及开关角频率等指标,选用双有源全桥隔离型升压变换器(Dual Active Brige, DAB)作为子模块进行输入端并联、输出端串联(Input Parallel Output Series, IPOS)的级联构成直流升压站,从而实现高电压变比^[14]。

全直流风电系统由永磁直驱发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)、机侧整流器(Machine Side Converter, MSC)、直流

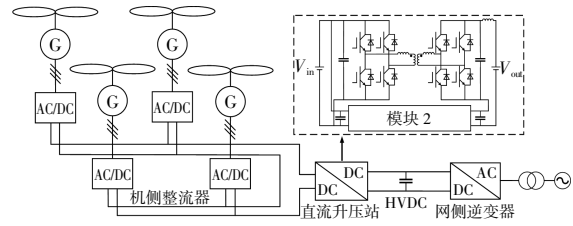


图1 全直流风电系统结构拓扑图

升压站、高压直流输电线路及网侧逆变器(Grid Side Converter, GSC)构成。系统中MSC控制必须确保系统在不同风速下的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)运行,即MSC主要控制风力发电有功功率和无功功率,控制目标是对风力发电进行最大功率跟踪控制。而GSC的主要控制目标是控制高压直流线路的电压稳定,其目的是保证系统输送电能质量,保证全直流风电系统的安全并网运行。直流升压站的主要作用为完成大容量电能传输的同时实现较高的升压比,使电压达到高压直流输电额定电压等级。

1.2 机侧整流器(MSC)离散化预测模型

根据系统拓扑结构可知,机侧整流器输出端口串联连接直流升压站低压侧,因此机侧整流器的控制是直流线路电压稳定控制的重要组成部分。为了获取机侧整流器预测模型,首先要对机侧整流器进行数学建模,机侧整流器端口电压可通过式(1)计算得到。

$$u_s = \frac{1}{3} u_{\text{vdc}} \mathbf{T}^{\text{abc}} \mathbf{S}_m^{\text{abc}} \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_m^{\text{abc}} = (\mathbf{S}_m^a, \mathbf{S}_m^b, \mathbf{S}_m^c)^T \in \{0, 1\}^3 \quad (2)$$

式中: u_{vdc} 为直流升压站低压侧直流电压; $\mathbf{S}_m^{\text{abc}}$ 为MSC各桥臂的开关状态; \mathbf{T}^{abc} 为变换矩阵,可将换流器输出电压与开关状态相关联^[17]。

$$\mathbf{T}^{\text{abc}} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将整流器输出电压Park变换至旋转dq坐标系,在旋转dq坐标系下MSC数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{sd} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sd} + \omega_r i_{sq} + \frac{1}{L_s} u_{sd} \\ \frac{d}{dt} i_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \omega_r i_{sd} - \frac{\omega_r}{L_s} \psi_{\text{pmsg}} + \frac{1}{L_s} u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_r 为 PMSG 转速, rad/s; ψ_{pmsg} 为 PMSG 磁链大小, Wb; R_s 为定子等效电阻, m Ω ; L_s 为定子等效电感, mH。

为构建离散的电流预测模型, 以 T_s 为采样周期进行采样, 当 $T_s \ll 1$ s 时, 可以表示为 $\frac{d}{dt}i(t) = \frac{i(k+1)-i(k)}{T_s}$, $t \in [kT_s, (k+1)T_s]$, 因此 MSC 离散化预测模型为

$$\begin{cases} i_{sd}^{k+1} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sd}^k + \omega_r T_s i_{sq}^k + \frac{T_s}{L_s} u_{sd}^k \\ i_{sq}^{k+1} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sq}^k + \omega_r T_s i_{sd}^k + \frac{\omega_r T_s}{L_s} \psi_{\text{pmsg}} + \frac{T_s}{L_s} u_{sq}^k \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_{sd}^{k+1} 为 $k+1$ 时刻 d 轴电流, A; i_{sq}^{k+1} 为 $k+1$ 时刻 q 轴电流, A。

1.3 网侧逆变器(GSC)离散化预测模型

网侧逆变器是全直流风电系统与电网相连的关键环节, 其稳定控制也是完成系统安全并网运行的关键。网侧逆变器输出电压可通过式(6)计算得到。

$$u_g = \frac{1}{3} u_{\text{hvd}} \mathbf{T}^{\text{abc}} S_g^{\text{abc}} \quad (6)$$

式中: u_{hvd} 为直流升压站高压侧电压; S_g^{abc} 为 GSC 桥臂开关状态, 将网侧逆变器输出电流进行 Park 变换至 dq 轴。

在旋转 dq 坐标系下 GSC 数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{gd} = -\frac{R_g}{L_g} i_{gd} + \omega_e i_{gq} + \frac{1}{L_g} (u_{od} - u_{gd}) \\ \frac{d}{dt} i_{gq} = -\frac{R_g}{L_g} i_{gq} - \omega_e i_{gd} + \frac{1}{L_g} (u_{oq} - u_{gq}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_e = 2\pi f_e$, 假设所接电网为理想交流电网, 频率稳定, ω_e 为定值; u_{od}, u_{oq} 分别为交流电网电压在 d, q 轴分量; R_g, L_g 分别为网侧电阻、电感。

以 T_s 为采样周期进行采样, MSC 离散化预测模型为

$$\begin{cases} i_{gd}^{k+1} = \left(1 - \frac{T_s R_g}{L_g}\right) i_{gd}^k + \omega_e T_s i_{gq}^k + \frac{T_s}{L_g} (u_{od}^k - u_{gd}^k) \\ i_{gq}^{k+1} = \left(1 - \frac{T_s R_g}{L_g}\right) i_{gq}^k - \omega_e T_s i_{gd}^k + \frac{T_s}{L_g} (u_{oq}^k - u_{gq}^k) \end{cases} \quad (8)$$

2 基于 FCS-MPC 的全直流风电系统电压稳定控制

2.1 有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)原理

FCS-MPC 是一种基于预测模型的闭环优化

控制方法, 通过换流器的离散预测模型, 得到下一时刻换流器电流的预测值。通过构造代价函数对控制参数进行跟踪控制, 循环遍历计算代价函数最小时所对应的开关状态 $S_m^{\text{abc}}, S_g^{\text{abc}}$ 作为换流器触发信号, 以此实现对换流器的优化控制^[18]。

基于 FCS-MPC 的换流器控制如图 2 所示, 换流器桥臂晶体管开关状态数量为 7 的两电平换流器计算量最小, 求解速度相对较快, MSC 与 GSC 换流器均具有如式(2)所示的 7 种有限数量开关状态组合。本文设计的 FCS-MPC 控制器将机侧转速、电压、电流及网侧电压、电流等参数输入预测模型进行电流预测, 将所得预测值代入代价函数, 最终求解代价函数最小时的换流器开关状态, 在每一个采样周期循环此过程, 以此实现换流器的优化控制。

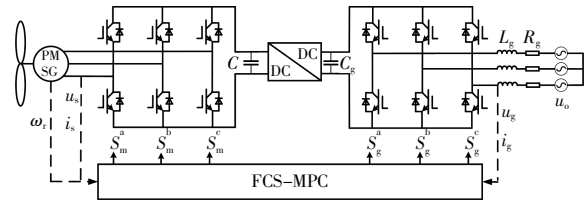


图 2 基于 FCS-MPC 的换流器控制

Fig.2 FCS-MPC based all DC wind power system

2.2 MSC 的有限控制集模型预测控制

MSC 的首要控制目标是通过控制 dq 轴电流分量来实时控制直驱风机输出的有功功率和无功功率, 通过遍历计算代价函数最小值时的开关状态函数 S_m^{abc} 来确定整流器各桥臂的开关状态, 从而控制直流风机有功功率及无功功率的稳定输出。

由于欧几里得范数具有更好的可跟踪性, 因此本文选择欧几里得范数作为代价函数。考虑 MSC 在 dq 坐标系下的定子电流偏差, 代价函数为

$$J_a = \left(i_{sd}^{k+1} - i_{sd}^*\right)^2 + \left(i_{sq}^{k+1} - i_{sq}^*\right)^2 + F_{\text{msc}} \quad (9)$$

$$i_{sq}^* = \frac{2T_e^*}{3P\psi_{\text{pmsg}}} \quad (10)$$

式中: i_{sd}^* 为 d 轴电流参考值, 一般设定为零; i_{sq}^* 为 q 轴电流参考值; T_e^* 为最优转矩, 由最大功率追踪模块得出; P 为风机输出功率; F_{msc} 为定子电流幅

值的有界非线性函数。

$$F_{msc} = \begin{cases} 0, & i_d < i_{s,M}, i_q < i_{s,M} \\ \infty, & i_d > i_{s,M}, i_q > i_{s,M} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i_{s,M}$ 为定子电流最大值。

当 dq 坐标系下的定子电流小于定子电流最大值时, F_{msc} 为 0; 当大于定子电流最大值时, F_{msc} 为无穷大, 对应代价函数为无穷大, 因此式(11)可视为 dq 坐标系下的定子电流幅值约束。MSC 的 FCS-MPC 结构如图 3 所示。

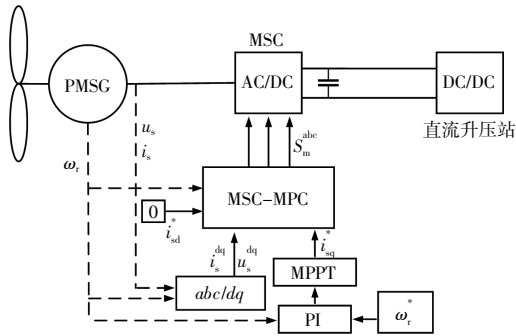


图 3 MSC 控制结构图

Fig.3 Control structure diagram of MSC

2.3 GSC 的有限控制集模型预测控制

GSC 是控制高压直流线路电压稳定, 完成风电并网消纳的关键环节, 与 MSC 控制模式相似, GSC 同样根据电流预测值与参考值进行代价函数滚动计算, 以此确定 GSC 的桥臂晶体管开关状态信号。设定 GSC 的代价函数为

$$J_b = (i_{gd}^{k+1} - i_{gd}^*)^2 + (i_{gq}^{k+1} - i_{gq}^*)^2 \quad (12)$$

式中: i_{gd}^* , i_{gq}^* 分别为 GSC 输出电流在 d, q 轴的参考值。

为实现多目标优化及高压直流电压稳定控制, 在代价函数中加入高压直流电压误差项, 更新后的代价函数可以表示为

$$J_b = (i_{gd}^{k+1} - i_{gd}^*)^2 + (i_{gq}^{k+1} - i_{gq}^*)^2 + \lambda (u_{hvdc}^* - u_{hvdc})^2 \quad (13)$$

式中: λ 为权重系数; u_{hvdc}^* 为升压站高压侧参考电压。

式(13)中加入高压直流电压偏差项能够对全直流风电系统的高压直流输电环节进行电压稳定控制, 提高风功率波动时直流电压的稳定性。

GSC 侧 FCS-MPC 结构如图 4 所示, 高压直流电压额定值 u_{hvdc}^* 与实际直流侧电压 u_{hvdc} 经 PI

环节生成 d 轴电流参考值 i_{gd}^* , q 轴参考电流 i_{gq}^* 设置为 0。将电压、电流实测值与电流参考值输入 FCS-MPC 控制中心, 滚动计算在不同开关状态函数 S_g^{abc} 下的代价函数, 寻找代价函数最小时的 GSC 桥臂晶体管开关状态作为下一周期控制信号, 实现对 GSC 的优化控制。

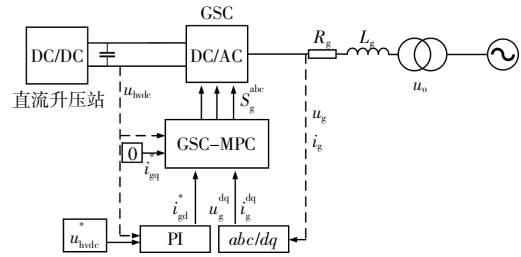


图 4 GSC 控制结构图

Fig.4 Control structure diagram of GSC

2.4 计及时延的全直流风电系统 FCS-MPC 改进

2.4.1 两步预测法

在 FCS-MPC 控制中有两项延时会产生控制时延, 影响控制精度和响应速度, 从而影响系统的控制效果, 一是系统采样后计算需要一定时间; 二是拥有数字信号控制系统的换流器不会将计算得到的最优开关状态立即作用于换流器, 而是在下一个采样时刻作用于换流器。为了减少时延引起的控制误差, 提高控制精度及响应速度, 本文采用两步预测法进行延时补偿, 解决系统延时问题^[9]。

两步预测法是指在第 k 个周期内计算 t_{k+1} 时刻变流器的最佳开关状态, 以减小控制误差的方法。其具体原理如图 5 所示, 假设在 $k-1$ 周期内已确定 t_k 时刻换流器的最优开关状态 S_2 并进行采样, 通过采样值计算在该开关状态下 t_{k+1} 时刻的控制变量预测值。基于预测值再进行一步预测, 预

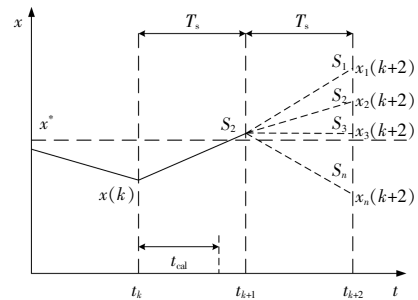


图 5 模型预测控制两步预测法原理图

Fig.5 Model predictive control two-step prediction method schematic

测在各种开关状态(\$S_1, S_2, \dots, S_n\$)下时刻的控制变量值\$[x_1(k+2), x_2(k+2), \dots, x_n(k+2)]\$, 通过评价函数对所有预测值进行评估, 选取使评价函数最小的预测值 \$x_3(k+2)\$ 对应的开关状态 \$S_3\$ 作为最优选择。最后在 \$t_{k+1}\$ 时刻应用于换流器, 实现了在第 \$k\$ 个周期内确定应在 \$t_{k+1}\$ 时刻作用执行的换流器最优开关状态。

2.4.2 MSC 侧延时补偿

根据式(5)可以得到 \$t_{k+2}\$ 时刻 MSC 的电流预测模型为

$$\begin{cases} i_{sd}^{k+2} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sd}^{k+1} + \omega_e T_s i_{sq}^{k+1} + \frac{T_s}{L_s} u_{sd}^{k+1} \\ i_{sq}^{k+2} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sq}^{k+1} - \omega_e T_s i_{sd}^{k+1} - \frac{\omega_e T_s}{L_s} \psi_{pmeg} + \frac{T_s}{L_s} u_{sq}^{k+1} \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)所得 \$t_{k+2}\$ 时刻 MSC 的预测电流代入原代价函数 \$J_a\$, 可更新代价函数为式(15), 以此实现了对机侧换流器的延时补偿。

$$J_a = \left(i_{sd}^{k+2} - i_{sd}^*\right)^2 + \left(i_{sq}^{k+2} - i_{sq}^*\right)^2 + F_{msc} \quad (15)$$

2.4.3 GSC 侧延时补偿

根据式(8)可以得到 \$t_{k+2}\$ 时刻 GSC 的电流预测模型为

$$\begin{cases} i_{gd}^{k+2} = \left(1 - \frac{T_s R_g}{L_g}\right) i_{gd}^{k+1} + \omega_e T_s i_{gq}^{k+1} + \frac{T_s}{L_g} (u_{od}^{k+1} - u_{gd}^{k+1}) \\ i_{gq}^{k+2} = \left(1 - \frac{T_s R_g}{L_g}\right) i_{gq}^{k+1} - \omega_e T_s i_{gd}^{k+1} + \frac{T_s}{L_g} (u_{oq}^{k+1} - u_{gq}^{k+1}) \end{cases} \quad (16)$$

通过构建 \$t_{k+2}\$ 时刻电流预测模型进行延时补偿后的 GSC 侧代价函数为

$$J_b = \left(i_{gd}^{k+2} - i_{gd}^*\right)^2 + \left(i_{gq}^{k+2} - i_{gq}^*\right)^2 + \lambda \left(u_{hvdc}^* - u_{hvdc}\right)^2 \quad (17)$$

相比于前文基于一阶预测模型的代价函数, 进行延时补偿后的换流器代价函数具有更好的控制精确度和响应速度。

3 仿真算例

在 Matlab/Simulink 中建立全直流风电系统仿真模型, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameter

参数	数值
风场额定功率 \$P\$/MW	2 MW×4
定子等效电阻 \$R_s\$/mΩ	0.8
定子等效电感 \$L_s\$/mH	1.57
机端整流直流电压 \$V_{dc}\$/kV	±1.15
升压站低压侧额定电压 \$u_{lvdc}^*/kV\$	±2.3

续表 1

参数	数值
升压站高压侧额定电压 \$u_{hvd}^*/kV\$	±35
直流电容 \$C\$/μF	50
网侧电阻 \$R_g\$/Ω	0.1
网侧电感 \$L_g\$/mH	0.003
采样周期 \$T_s\$/μs	10

为验证本文所提电压控制策略的有效性以及整体效果, 设计以下 3 种工况对所提控制策略与传统 PI 控制进行仿真对比分析。

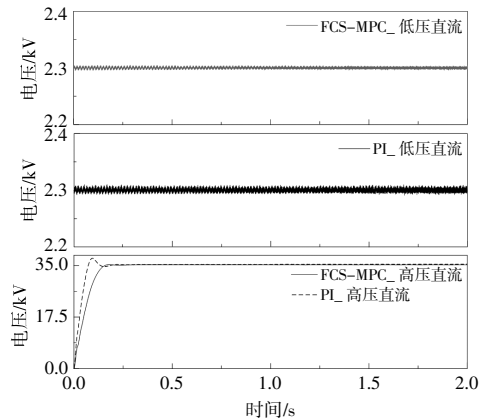
① 风速稳定工况, 用以验证所提控制策略的静态控制效果;

② 风速大幅波动工况, 用以验证所提控制策略的动态控制效果;

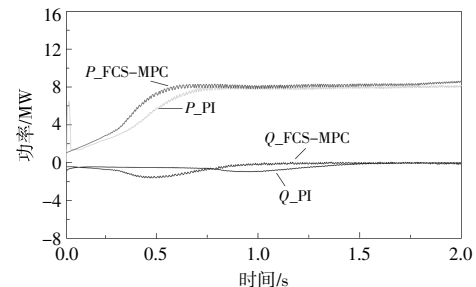
③ 并网点设置短时故障, 验证系统发生故障时所提策略的动态反应能力及故障恢复能力。

3.1 风速稳定工况

如图 6 所示, 设定仿真系统在 12 m/s 额定风速工况运行, 设定直流升压站低压侧电压为



(a) 升压站两端直流电压



(b) 风场输出功率

图 6 风速稳定时 FCS-MPC 和 PI 控制下升压站直流电压及风电场输出功率

Fig.6 DC voltage and wind farm output power of booster station under FCS-MPC and PI control during wind speed stabilization

±2.3 kV, 高压侧直流电压为±35 kV, 仿真对比分析所提 FCS-MPC 控制策略和传统 PI 控制在风速稳定即风功率稳定工况下的静态控制效果。

风电场直流升压站低压侧及高压侧电压如图 6(a)所示。从图 6(a)中可以看出,在稳定风速工况的两种控制策略下,直流升压站低压侧具有基本一致的稳定控制效果,但 FCS-MPC 能够更快速达到高压侧目标电压。对于直流线路电压稳定控制,两种控制策略均具有良好的控制效果。

FCS-MPC 与 PI 控制的风机输出功率波形对比如图 6(b)所示。从图 6(b)中可以看出,在风速稳定工况下,采用 FCS-MPC 的全直流风电系统可以更快达到额定功率输出,对额定功率具有更好的跟踪性,具有较好的静态性能。

3.2 风速大幅波动工况

设定如图 7 所示的风速大幅波动工况,对系统进行仿真分析。

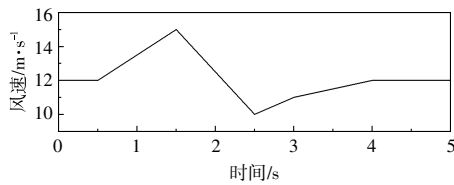
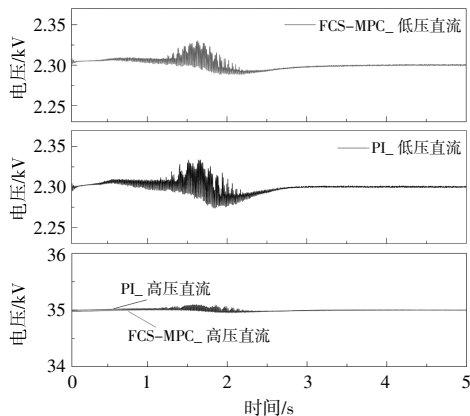
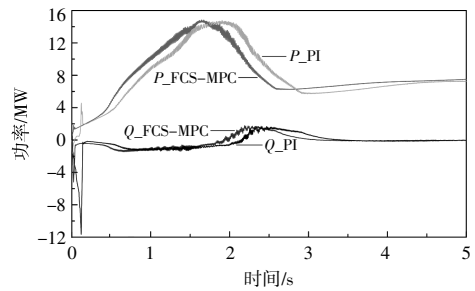


图 7 波动风速
Fig.7 Fluctuating wind speed

系统直流升压站两端电压如图 8(a)所示。从图 8(a)中可以看出,本文所提控制策略与传统 PI 控制均能够快速响应风速变化引起的风功率动态波动,但 FCS-MPC 相比于 PI 控制具有更快的响应速度、更小的电压波动以及更好的控制准确性。图 8(b)所示为风速波动工况下风电场输出功率动态特性,相比于 PI 控制,FCS-MPC 具有更快的



(a)升压站两端直流电压



(b)风场输出功率

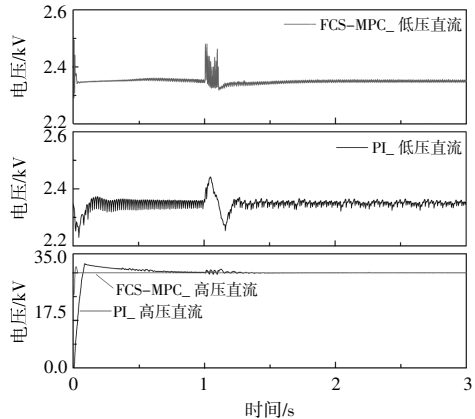
图 8 风速大幅波动时 FCS-MPC 和 PI 控制下升压站直流电压及风电场输出功率

Fig.8 DC voltage and wind farm output power of the booster station under FCS-MPC and PI control during large wind speed fluctuations

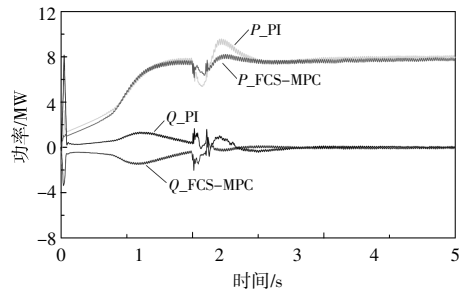
动态响应速度,能够快速进入稳态。

3.3 短时故障工况

为验证本文所提控制策略在故障工况下的电压稳定控制效果,在系统并网点处设置两相间短路故障,在 1.0 s 时发生,故障持续 100 ms 后切除,全直流风电系统的直流升压站电压响应特性如图 9 所示。



(a)升压站两端直流电压



(b)风场输出功率

图 9 短路故障时 FCS-MPC 和 PI 控制下升压站直流电压及风电场输出功率

Fig.9 DC voltage and wind farm output power of booster station under FCS-MPC and PI control during short-time failure

由图 9(a)可以看出,采用传统 PI 控制策略,系统直流升压站两端电压受故障影响较大,故障切除后经过较长时间才能够恢复至目标电压。而 FCS-MPC 控制策略能够在 0.2 s 左右恢复至目标电压,原因是本文所提控制策略中引入了直流电压偏差控制,采用 FCS-MPC 策略能够在故障时保持较小电压波动的同时有效提高直流电压的动态响应特性。因此本文所提控制策略在故障工况下对直流线路电压稳定控制具有更好的动态性能以及良好的故障恢复能力。

由图 9(b)可以看出,采用本文所提 FCS-MPC 策略,有功功率及无功功率能够在故障时产生较小幅度波动且当故障切除后能够快速恢复至额定功率输出,相比于传统 PI 控制,具有更好的动态响应速度。

4 结论

针对全直流风电系统采用传统 PI 控制存在的问题,本文提出了基于 FCS-MPC 的全直流风电系统电压稳定控制策略,相比于传统 PI 控制,减少了大量参数整定,在优化控制效果的同时,提高了系统动态响应速度。所提控制策略引入直流电压偏差项以提高对直流电压的控制稳定性,此外该策略还考虑了控制时延问题,对预测电流进行了两步预测,以达到更好的控制精确性。对风速稳定工况、风速大幅波动工况以及故障工况进行了仿真对比分析,结果显示所提控制策略具有良好的控制效果,且相比于传统 PI 控制,该控制策略具有更好的动态响应速度及控制精确度。能够改善全直流风电系统面对非正常运行工况时,风电场动态响应较慢的问题,并且能够提高系统在故障工况下的恢复能力。

参考文献:

- [1] 江道灼,谷泓杰,尹瑞,等.海上直流风电场研究现状及发展前景[J].电网技术,2015,39(9):2424-2431.
- [2] 杨光亚.欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望[J].电力系统自动化,2021,45(21):23-32.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 柳志飞,杜贵平,杜发达,等.有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J].电工技术学报,2017,32(22):58-69.
- [6] Bo Sun, Li Chenchang, Hu Jianqiang, et al. A review on the application of the mpc technology in wind power control of wind farms [J]. Journal of Energy and Power Technology, 2021, 3(3): 1-22.
- [7] 刘春喜,郑文帅,乔宇,等.三相并网逆变器事件触发有限集模型预测控制[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(2):137-143.
- [8] Babqi Abdulrahman J, Alamri Basem. A comprehensive comparison between finite control set model predictive control and classical proportional-integral control for grid-tied power electronics devices[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2021, 18(7): 67-87.
- [9] M Abdelrahem, C M Hackl, R Kennel, et al. Efficient direct-model predictive control with discrete-time integral action for PMSGs [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 34(2): 1063-1072.
- [10] Ghany AA, Shehata EG, Elsayed A-HM, et al. Novel switching frequency fcs-mpc of pmsg for grid-connected wind energy conversion system with coordinated low voltage ride through[J]. Electronics, 2021, 10(4): 492.
- [11] Ali SW, Verma AK, Terriche Y, et al. finite-control set model predictive control for low-voltage ride through enhancement of PMSG based wind energy grid connection systems[J]. Mathematics, 2022, 10: 4266.
- [12] Shen Yangwu, Yuan Jinrong, Shen Feifan, et al. Finite control set model predictive control for complex energy system with large-scale wind power[J]. Complexity, 2019 (5): 1-13.
- [13] Wei Juan, Wu Qiuwei, Xu Da, et al. MPC-based DC-link voltage control for enhanced high-voltage ride-through of offshore DFIG wind turbine[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106591.
- [14] 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.
- [15] Cheng Fan, Ding Chao, Lu Zhengang, et al. Control strategy of series-parallel DC wind farm with fault isolation[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1368-1376.
- [16] Shi Tianyu, Shi Libao, Yao Liangzhong. Detailed modelling and simulations of an all-DC PMSG-based offshore wind farm [J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 845-849.

- [17] Abdelrahem M, Hackl C, Kennel R. Model predictive control of permanent magnet synchronous generators in variable-speed wind turbine systems [J]. Proceedings of Power and Energy Student Summit, 2016, 19: 20-25.
- [18] 袁晋蓉. 模型预测控制方法在海上风电并网中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [19] 李昂. 基于有限控制集模型预测控制的 PWM 整流器研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.

Voltage stabilization control of all DC wind power systems based on finite control set-model predictive control

Ma Zhi, Lin Hong, Fan Yanfang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, China)

Abstract: In order to ensure the safe grid-connected operation of all DC wind power system, the system voltage stability control is crucial. At present, when the DC voltage stability control of all DC wind power system adopts the proportional-integral (PI) control, the dynamic response speed is relatively slow under the non-normal operation condition, the control accuracy is not high enough, and the PI parameter is more and more cumbersome and complicated to be calibrated. To address the above problems, this paper proposes a system DC voltage stabilization control strategy based on the principle of Finite Control Set-Model Predictive Control (FCS-MPC) to control the switching state of transistors of bridge arms of the system converter. The strategy combines the current prediction models of machine-side rectifiers and grid-connected inverters, constructs a cost function with the output current of the converter as the control variable, takes the cost function as the optimization objective, introduces the delay compensation to improve the control accuracy in order to avoid the control delay caused by the computational delay, and introduces the weight coefficients to realize the multi-objective optimization, and generates the optimal switching combinations of the signals to trigger the converter through the traversal calculation. In this paper, the simulation model of all DC wind power system is established in Matlab/Simulink, and the proposed strategy is compared with the traditional PI control in different working conditions, and the simulation results effectively verify the static and dynamic performance of the proposed control strategy.

Keywords: all-DC wind power system; finite control set-model predictive control; voltage stability control; converter; wind power grid connection