

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.006

基于 RES-CCS 的串并联型风电直流汇集系统过电压控制策略

樊璐雯¹, 樊艳芳¹, 侯俊杰¹, 孙瑶¹, 王亚强²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网重庆市电力公司綦江供电分公司, 重庆 401420)

摘要: 风电直流汇集系统能有效解决交流汇集系统谐波谐振等问题, 且串并联型拓扑较其他结构可有效降低系统成本, 因此对串并联型风电直流汇集系统稳定运行控制进行研究至关重要。基于串联端口电压间的耦合性特点, 针对风机稳态运行时风速波动导致的风机串联端口过电压问题, 文中提出转子与储能协调控制策略(coordinated control strategy of rotor and energy storage, RES-CCS)。首先, 分析串并联型风电直流汇集系统运行特性和现有过电压控制策略存在的不足; 然后, 研究串联端口电压限定值, 利用 RES-CCS 钳制串联端口电压在限定值内, 并设计所需超级电容的储能容量; 最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建串并联型风电直流汇集系统模型, 对 RES-CCS 进行仿真验证。结果表明, 文中所提过电压控制策略可在减少弃风损耗的同时降低风机储能容量需求, 提高风机风能利用率与运行经济性。

关键词: 风电场; 直流汇集系统; 串并联拓扑; 过电压; 电压限定值; 协调控制

中图分类号: TM46; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0069-10

0 引言

风力发电现已成为可再生能源发电技术中最成熟、最具大规模开发潜力的发电方式之一^[1-4]。随着风电场规模的扩大, 每台风机须配置背靠背变流器和交流变压器, 且风电机组汇集距离变远, 交流汇集谐波谐振、无功传输等问题突出, 风电场成本较高。鉴于交流汇集存在的缺陷, 国内外学者对风电场汇集方式进行研究, 提出采用直流汇集代替交流汇集的方式^[5-7]。为适用于大规模风电场内直流汇集场景, 文献[8]提出改造永磁直驱风机(direct-driven permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)以获得直流输出。基于全功率变流器的 D-PMSG 具有损耗小、运行可靠性高等优势, 省去 DC/AC 逆变器和交流变压器, 即可改造成直流汇集方式的 D-PMSG^[9]。为满足直流汇集传输电压要求, D-PMSG 连接高功率密度的 DC/DC 变换器, 取代交流汇集场景中风机的逆变及升压设备, 减少了变电环节, 提高了电能转换效率, 有利于风电场的经济稳定运行^[10-11]。文献[12]提出风电直流汇集系统的拓扑主要为并联型和串并联型, 串并联型拓扑可利用串联结构升压, 较并联型节省了二级升压所需的大容量高变比 DC/DC 变换器。文献[13-14]对比各拓扑的经济性、可靠性和损耗成

本, 得出串并联型结构可减少风电场内电能传输距离、线路损耗与建设成本, 综合成本较低, 更适用于未来大容量风电直流汇集系统发展的结论。

串并联型拓扑具有串联风机间耦合性高的特点, 同一串联簇上风机的输入风速差异大时存在输出功率差异导致的过电压问题^[15]。为解决串联风机出力差异带来的过电压问题, 文献[16]提出变桨控制, 通过增大风机桨距角, 抑制发电机机械功率的上升, 减小串联风机间的出力差异, 以限制串联端口电压。但变桨距机构调节速度较慢, 该控制方法弃风率较高^[17]。可通过存储部分功率降低串联风机出力差异, 如利用转子储能和附加储能设备储能。文献[18]提出利用转子与变桨距机构协调作用的方法, 即转子变速控制。该控制利用转子增速限制风机输出功率, 进而限制串联端口电压进一步上升。但受转速可变范围限制, 转速达上限后为避免风机飞轮, 需要变桨距机构进行辅助控制, 该控制过程也明显增加了风机弃风。文献[19-20]提出在 D-PMSG 低压直流母线处并联储能单元, 弥补转子储能能力有限的缺点。但该控制需要考虑储能选型及成本问题。针对串并联型结构, 储能单元需要在数秒内快速充放电。实际工程中, 电化学储能技术成熟, 常作为传统交流风电场平滑功率的储能装置, 如钛酸锂电池、磷酸铁锂电池、三元锂电池等, 但其充放电倍率较小, 一般应用于储能时长 1~2 h 的场景^[21]。而超级电容储能具有单位功率高, 响

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-03-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022 D01C365); 2022 天山英才培养计划(2022TSYCLJ0019)

应速度快的特点,可以在瞬间释放大电流,充放电倍率不低于 65 C,可实现秒级快速储能^[22-23];电极和电解质不易老化,使用寿命长,安全性较电化学储能更好^[24];可直接存储释放能量,较锂电池环境污染小^[25-26];适用温度范围为-40~150 ℃,适用场景广泛^[27]。

文中以串并联型风电直流汇集系统为研究对象,改进其稳态运行控制策略。首先,基于串并联型风电直流汇集系统的运行特性与控制需求,研究串联端口电压限定范围,以改进控制策略触发条件;然后,针对现有存储型过电压控制的弃风问题和超级电容容量配置问题,改进已有的过电压控制,提出转子与储能协调控制策略(coordinated control strategy of rotor and energy storage, RES-CCS),并为风机储能容量设计提供思路;最后,与转子变速控制和储能单元控制就风机过电压工况进行仿真对比,验证所提控制策略的实用性和有效性。

1 串并联型风电直流汇集系统拓扑及其运行特性

1.1 串并联型风电直流汇集系统拓扑

直流汇集方式的 D-PMSG 由永磁直驱风力机与 AC/DC 整流器构成,其拓扑如图 1(a)所示,其中 U_{dc} 为风机单元直流母线电压。D-PMSG 的输出电压不足以进行中压汇集传输,故采用基于 Boost 全桥升压隔离变换器(boost full bridge isolated converter, BFBIC)模块的 DC/DC 变换器。为实现 DC/DC 变换器的大功率应用,应用并入串出(input parallel output series, IPOS)的模块化集成技术提高输送功率,满足 DC/DC 变换器容量要求^[28]。DC/DC 变换器拓扑如图 1(b)所示,其中 L_{Boost} 为升压电感; C_i 为低压直流母线电容; C_c 为钳位电容; S_0 — S_4 为绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT),其中 S_0 为有源钳位开关管; VD_1 — VD_4 为二极管; L_k 为隔离变换器漏感; C_o 为子模块输出电容; U_{wt} 为串联端口电压。风电直流汇集系统拓扑普遍应用串并联型和并联型,其中串并联型拓扑可经串联汇集抬升电压,使其直接达到合适的传输电压等级^[29]。相较并联型拓扑,串并联型拓扑省去了二级升压所需的超大容量 DC/DC 升压站,减少了风电场汇集传输线路,可有效降低建设成本和线路损耗^[30]。串并联型风电直流汇集系统拓扑如图 1(c)所示,1 台 D-PMSG 和其对应的 DC/DC 变换器组成 1 台风机单元,其中 $U_{wt(x,y)}$ 为第 x 列第 y 台风机单元的串联端口电压 ($x = 1, 2, \dots, X$; $y = 1, 2, \dots, Y$); U_{trans} 为风

电场直流汇集电压。 Y 台风机单元串联成一个串联簇, X 组串联簇间经并联进行连接, $X \times Y$ 台风机单元经直流汇集传输后通过逆变器接入交流电网。风机单元输出的有功功率为 P_{wt} , 其稳定由并网逆变器模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)控制^[31]。

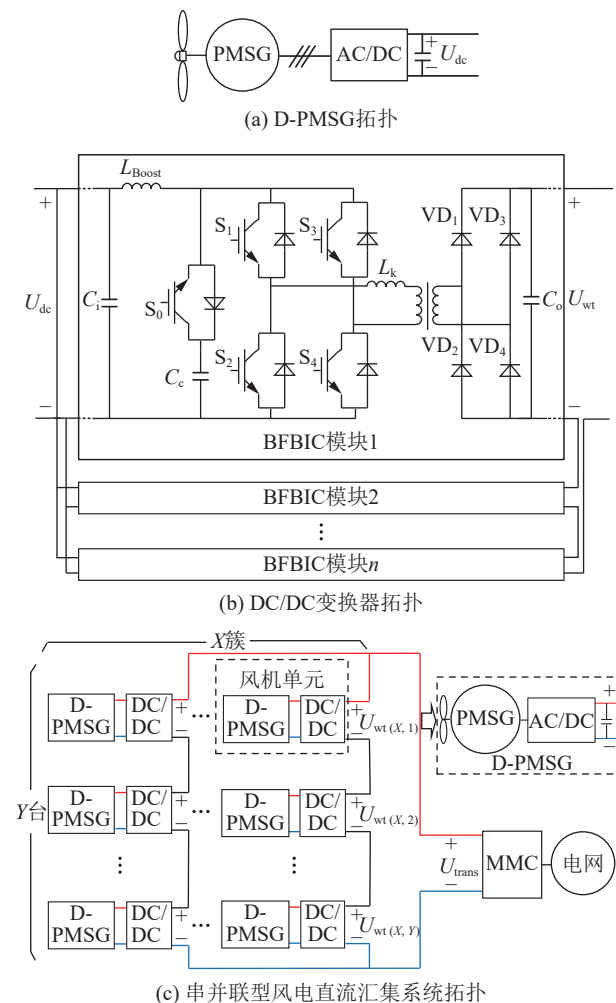


图 1 基于 D-PMSG 的串并联型风电直流汇集系统拓扑
Fig.1 Topology of the D-PMSG-based series-parallel wind power DC collection system

1.2 运行控制特性

串并联型拓扑中,受连接方式影响,同一串联簇上的风机单元间存在耦合性。设各风机单元参数相同,第 x 列串联簇上, Y 台风机单元总出力 P_s 为:

$$P_s = U_{trans} I_{wt,x} = \sum_{y=1}^Y P_{wt(x,y)} \quad (1)$$

式中: $I_{wt,x}$ 为风电场第 x 列串联簇支路电流; $P_{wt(x,y)}$ 为第 x 列第 y 台风机单元的输出功率。

第 x 列串联簇中第 y 台风机单元出力 $P_{wt(x,y)}$ 为:

$$P_{wt(x,y)} = U_{wt(x,y)} I_{wt,x} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)可得:

$$\frac{U_{wt(x,y)}}{P_{wt(x,y)}} = \frac{U_{wt(x,j)}}{P_{wt(x,j)}} = \frac{U_{trans}}{P_s} \quad (3)$$

由式(1)—式(3)可得直流汇集电流 I_{trans} 为:

$$I_{trans} = \frac{P_s}{U_{trans}} = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y P_{wt(x,y)}}{U_{trans}} = \frac{P_{wt(x,y)}}{U_{wt(x,y)}} \quad (4)$$

由于风机出力小于额定功率, I_{trans} 满足:

$$I_{trans} \leq \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y P_{wt(x,y),N}}{U_{trans}} \quad (5)$$

式中: $P_{wt(x,y),N}$ 为第 x 列第 y 台风机单元额定功率。

由式(3)可知, 同一串联簇上流经串联风机单元的电流相等, 风机单元输出功率与输出端口分担的电压成正比^[30]。

D-PMSG 输入功率 P_m 为:

$$P_m = \frac{\pi}{2} \rho R_l^2 v^3 C_p \quad (6)$$

式中: ρ 为空气密度; R_l 为叶片半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数。

$$\begin{cases} C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \\ \lambda = \frac{R_l \omega_i}{v} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_i 为叶片旋转角速度; β 为桨距角; λ 为叶尖速比。风机控制策略为最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)时, 其输出功率跟踪 P_m 变化。

如式(3)所示, 受风机单元间风速差异的影响, 每台 D-PMSG 输出功率不同, 同一串联簇上 D-PMSG 的 P_{wt} 相异时, 各风机单元的 U_{wt} 不同。串联簇风况具有波动性和不确定性, 风速波动情况影响同一串联支路上的 D-PMSG 功率差异程度。其中, 分钟级以上的风速差异可通过风电场内风机排布的合理规划进行削弱, 秒级以下的风速差异可通过风机惯性消除, 其他情况需要考虑改进风机运行模式, 优化风机控制策略。

串联风机单元间风功率差异过大时, 串联端口出现过电压情况。串并联型结构虽然可通过并网 MMC 控制 U_{trans} 稳定, 但无法统一调节各风机单元输出电压 U_{wt} , 且 U_{wt} 与风机单元出力 P_{wt} 成正比。串联簇中某台风机单元出力较大时, 其 U_{wt} 会出现较大偏差。设 5 台风机单元串联, 该串联簇的稳态运行特性曲线如图 2 所示。图中, $I_{wt,N}$ 为风机单元

出口处电流限定值; $I_{wt,x(0)}$ 为串联风机风速相近时的串联簇电流; $I_{wt,x(1)}$ 为串联风机风速有差异时的串联簇电流; $U_{wt(0)}$ 为串联端口电压初始值; $U_{wt,max}$ 为串联端口电压限定值; $P_{wt(0)}$ 为风机单元出力初始值; $P_{wt,N}$ 为风机单元额定功率。

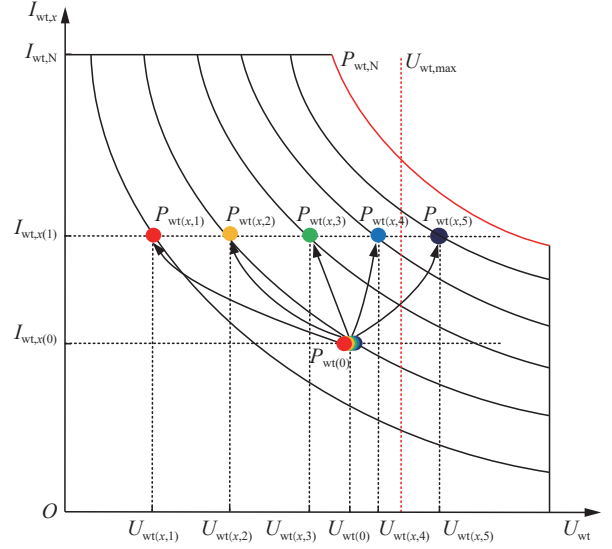


图 2 串联簇稳态特性

Fig.2 Steady-state characteristics of series clusters

图 2 中, 以第 x 列串联簇为例, 分析各串联风机单元的参数变化。设串联风机的风速相近, 各风机对应的串联端口电压初始值为 $U_{wt(0)}$, 串联簇电流为 $I_{wt,x(0)}$, 串联簇总出力为 $Y P_{wt(0)}$; 串联簇中风机风况相异时, 串联簇风机单元间的参数关系见式(3)。由图 2 可知, 若风机单元不增加过电压控制, 风速较高的风机单元输出电压可能过大。

在过电压问题中, 对于 U_{wt} 较高的风机单元, 增大了其 DC/DC 变换器的绝缘损害, 易造成 DC/DC 变换器出口电容击穿, 为降低风电场设备的设计难度和运行损耗, 需要将 U_{wt} 限制在一定范围内。 U_{wt} 较高的 D-PMSG 须运行在电压限幅控制模式, 保证串并联型风电直流汇集系统稳定可靠运行。

2 基于 RES-CCS 的过电压控制策略

根据串并联型风电直流汇集系统的运行特点, 为弱化风机单元间的耦合, 减少过电压的发生, 须对串联端口电压进行限幅控制, 通过调节 D-PMSG 输出的有功, 将串联端口电压稳定在电压限幅值以内, 保证串联簇上各风机单元正常运行^[32]。为调节 D-PMSG 输出功率, 并减少直流风电场运行中产生的弃风, 现今研究中多采用存储型电压限幅控制, 如利用转子储能或附加储能设备, 减小风机单元间的功率差异, 以稳定串联端口的电压在限定

值以内。2 种控制方法均存在优缺点, 具体见表 1。

表 1 过电压控制优缺点对比
Table 1 Advantages and disadvantages of overvoltage control measures

过电压 控制方法	控制流程	优点	缺点
转子变速 控制	转子增速、 变桨距角	无附加设备, 风机投资 成本小	转速可变范围有限, 调节速度慢, 弃风 损耗大
储能单元 控制	储能单元储能	储能容量较大, 调节 速度快, 弃风少	附加储能设备, 风机投资成本增大

综上所述, 转子变速控制无须增加辅助设备, 运行成本较低, 而储能单元控制不受转速上限约束, 控制灵活, 适用于剧烈变化的风况, 因此两者可进行综合优化。

2.1 电压限定值分析

根据串并联型全直流风电场的稳态运行特性分析可知, 串联的各风机单元出力影响 DC/DC 变换器高压侧电压大小, 现针对无过电压控制时 U_{wt} 的变化进行分析。以单列串联簇为例, 设串联风机单元数为 Y , U_{wt} 的基准值 U_b 为:

$$U_b = \frac{U_{trans}}{Y} \quad (8)$$

风机投入运行后, 其正常运行时的出力为 0.1~1 p.u., 其中 1 台风机单元出力达额定值, 其余风机单元出力为最小值时, 高出力风机单元的串联端口电压 U_{wt} 达到最大值; 1 台风机单元出力为最小值, 其余风机单元出力均为额定值时, 低出力风机单元的 U_{wt} 最小。设 U_{wt} 的标么值为 U_{wt}^* , 其变化范围如下:

$$\frac{0.1Y}{Y-0.9} \leq U_{wt}^* \leq \frac{Y}{0.1Y+0.9} \quad (9)$$

以 5 台风机单元串联为例, 若不增加过电压控制, DC/DC 变换器高压侧电压最大值达到 3.57 p.u., 最小值为 0.12 p.u.。为防止 DC/DC 变换器高压侧电容击穿, 同时降低变换器运行损耗与设计难度, 风机在运行过程中需要增加电压限幅运行模式。在每台风机单元中加入过电压控制策略, 通过控制串联簇中高出力风机单元的 U_{wt} 在上限值以内, 实现串联风机单元的解耦控制。

U_{wt} 电压上限值计算考虑 DC/DC 变换器高压侧电力二极管与电容的击穿电压: DC/DC 变换器高压侧承受电压过高时, 电力二极管承受的反向电压 U_R 过高, 电容上分担的电压可能达到极限电压, 电力二极管和电容容易受到损害。常见的硅二极管的耐受电压为 50~1 000 V, ZP 系列二极管的耐受电压为 200~2 000 V, PIN 结构的快恢复二极管的耐受电

压达到 1 200 V。DC/DC 变换器高压侧电容在承担过高电压时可能击穿, 因此需要考虑电容击穿电压值。电容生产时其承受电压留有一定余量, 击穿电压一般为额定电压的 1.5~2 倍。综上, DC/DC 变换器高压侧电压上限可设为 1.5 p.u.。

2.2 RES-CCS

现今有关串联风机单元过电压问题的研究中, 转子变速控制可利用风机自身元件进行储能, 无须外加储能设备, 经济性较好^[33], 但存在一定局限性。为防止风机飞轮, 减少元件运行损害, 风力发电机正常运行时转速须保持在一定范围内, 转子增速极限为额定转速的 15%^[34], 且转速达上限值时, 须启动变桨距控制降低风能利用率, 限制转速在一定范围内。其中, 变桨距机构桨距角最大调节速率不超过 5 (°)/s, 动作缓慢^[35-36]。转子变速控制还需要进行优化, 在充分利用转子储能优势的同时减少变桨控制产生的弃风, 加快过电压控制响应速率。

除转子变速控制外, 超级电容储能控制凭借响应快、容量大、污染小的优势成为研究热点, 但该方法增大了风电场设备投资成本^[37-38]。

基于转子储能与超级电容储能的优势, 文中提出 RES-CCS, 利用转子与超级电容的协调作用, 在降低弃风的同时提高风电场运行经济性。

转子转速未达上限值时, 转子储能无须投入辅助设备, 考虑在 RES-CCS 作用初期由转子进行增速储能, 转速达上限值时触发超级电容, 该控制流程在克服转速限制问题的同时, 可降低风机对超级电容的容量需求。

转子变速需要利用机侧 AC/DC 整流器加以控制, AC/DC 整流器动态方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_{sd} \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_{sq} i_q \\ u_q = R_s i_q + L_{sq} \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_{sd} i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子电压的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子绕组电阻; i_d 、 i_q 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量; L_{sd} 、 L_{sq} 分别为定子 d 、 q 轴电感; ω_r 为转子转速; ψ_f 为定子磁链。

串联簇中各风机单元所处风况相异时, 需要监测风机单元输出端口电压是否越限, 将电压越限信号反馈给风机控制环, 在原有转速环中加入电压限幅控制, 此时 AC/DC 整流器的交轴电流控制简化框图如图 3 所示。图中, PI 为比例积分控制器; $\omega_{r,ref}$ 为转子转速参考值; $i_{q,ref}$ 为定子电流 q 轴分量参考值。

如图 3 所示, 在交轴电流环中加入串联端口电

2.3 超级电容容量配置

为优化 RES-CCS 下的超级电容配置方法,设风机初始风速为 v_0 , $\omega_{r,0}$ 为 MPPT 控制下 v_0 对应的转子转速。1 台风机 t_1 时刻风速增大,则该风机单元较其余风机单元多输入的能量 E_{in} 为:

$$E_{in} = \int_{t_1}^{t_2} P_m(v_i, \omega_{r,i}) dt - P_m(v_0, \omega_{r,0})(t_2 - t_1) \quad (11)$$

式中: t_2 为风速变化结束时刻; v_i 为 t_1 — t_2 时段中时刻 i 的瞬时风速,且 v_i 小于风机切出风速; $\omega_{r,i}$ 为 MPPT 控制下 v_i 对应的转子转速,且 $\omega_{r,i} \leq \omega_{r,max}$ 。

U_{wt} 达上限值时,转子储能阶段中转子可通过增速进行风机单元部分能量的储存,转子最大可储存的能量 E_{ω} 为:

$$E_{\omega} = \frac{1}{2} J (\omega_{r,max}^2 - \omega_{r,i}^2) \quad (12)$$

式中: J 为发电机端等效传动链惯量。AC/DC 整流器输入到直流母线的能量 E_{dc} 为:

$$E_{dc} = E_{in} - E_{\omega} \quad (13)$$

为进一步保证 D-PMSG 瞬时功率平衡,转子转速达上限值时 RES-CCS 进入 SC-ESU 储能阶段。结合式(11)—式(13),该阶段中超级电容储存的能量 E_{sc} 为:

$$E_{sc} = \int_{t_1}^{t_2} P_m(v_i, \omega_{r,i}) dt - P_m(v_0, \omega_{r,0}) t_1 - \frac{1}{2} J (\omega_{r,max}^2 - \omega_{r,i}^2) \quad (14)$$

设超级电容的端电压在故障过程中由初始电压 $U_{sc,init}$ 上升到最大电压 $U_{sc,M}$,则超级电容的容量 C_{sc} 为:

$$C_{sc} = \frac{2E_{sc}}{U_{sc,M}^2 - U_{sc,init}^2} \quad (15)$$

基于式(12),若单独采用转子变速控制,受调速调节范围的限制,储存的能量十分有限;若单独采用超级电容储能控制,附加储能设备需要储存的能量如式(13)所示;采用 RES-CCS 时,超级电容需要储存的能量如式(14)所示。综上可知,文中所提新型过电压控制方法可减少超级电容持续工作时间,降低风机单元的储能容量需求。

3 仿真分析

为验证文中所提风电直流汇集系统稳态运行过电压控制的有效性,在 PSCAD/EMTDC 平台中,搭建 30 台 D-PMSG 构成的 5 串 6 并风电直流汇集系统及其控制仿真模型,如图 8 所示,系统主要参数见表 2。

以第一列串联簇为例,将各风机单元命名为风机 1—风机 5,改变各风机单元的风速。图 9 为串

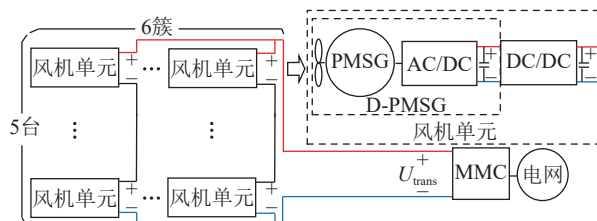


图 8 串并联型风电直流汇集系统仿真模型拓扑

Fig.8 Simulation model topology of series-parallel wind power DC convergence system

表 2 风电直流汇集系统主要参数

Table 2 Main parameters of wind power DC collection system

参数	数值
D-PMSG容量 P_{wt}/MW	5
串联簇数 X	6
串联风机单元台数 Y	5
AC/DC整流器输出电压/kV	1
ACDC整流器开关频率/kHz	3
超级电容最大电压 $U_{sc,M}/V$	750
DC/DC变换器输出电压/kV	12
DC/DC变换器开关频率/kHz	3
电网电压/kV	35

联簇上各风机单元的风速变化,前 2 s 风速均为 13 m/s; 2 s 时第一台风机单元的风速上升至 19 m/s,串联簇上其余风机单元风速降至 11 m/s; 3 s 时各风机单元风速恢复 13 m/s。

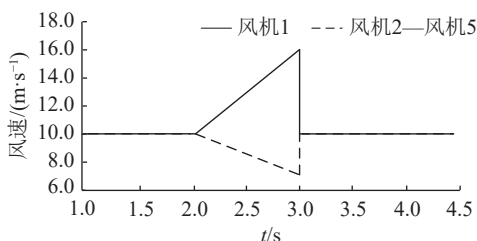


图 9 串联簇风速变化

Fig.9 Variation of wind speed in series clusters

由于风机 2—风机 5 风况相同,设备参数也相同,为便于分析,以风机 1 和风机 2 为例分析参数变化。图 10 和图 11 为风机 1 和风机 2 输出电压 U_{wt} 变化曲线,2 s 时串联风机单元所处风况产生变化,导致各风机单元出力差异,由式(3)可知,高出力风机单元的 U_{wt} 增大,在上升至 18 kV 时,过电压控制投入运行。

为便于研究过电压控制过程,针对高风速下风机 1 的转速、桨距角、风能利用率、超级电容端电压进行分析,具体参数变化如图 12 所示。

图 12(a)为各过电压控制下风机 1 的转速变化

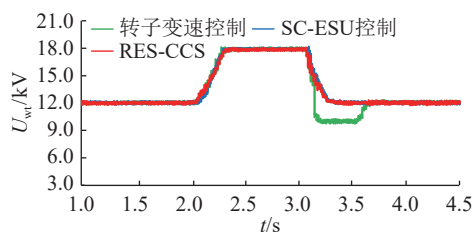
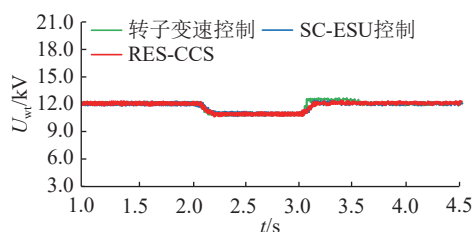
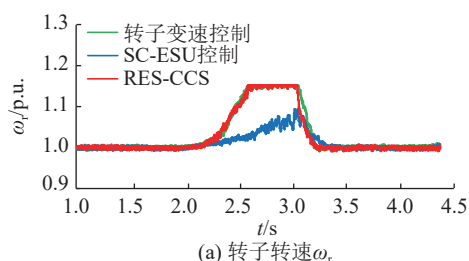
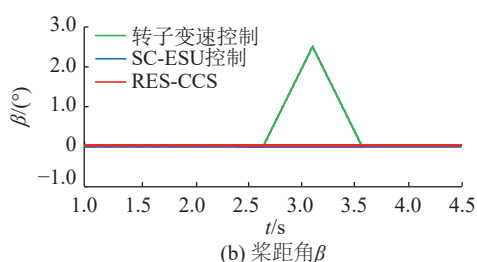
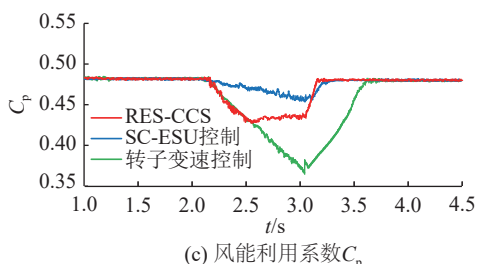
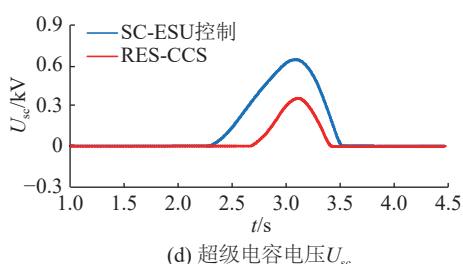
图 10 风机 1 U_{wt} 变化曲线Fig.10 Change curves of U_{wt} of wind turbine 1图 11 风机 2 U_{wt} 变化曲线Fig.11 Change curves of U_{wt} of wind turbine 2(a) 转子转速 ω_r (b) 桨距角 β (c) 风能利用系数 C_p (d) 超级电容电压 U_{sc}

图 12 风机 1 参数变化曲线

Fig.12 Parameter change curves of wind turbine 1

曲线。可知, 2.2 s 左右, 风机 1 的 U_{wt} 上升至限幅值时, 转子变速控制与 RES-CCS 控制首先依靠转子增速进行储能, SC-ESU 控制中, 转子不参与储能作用, 仅跟随风速变化。

图 12(b) 为各过电压控制下风机 1 的桨距角变化曲线。结合图 12(a) 可知, 转子变速控制受转速上限约束, 转子增速至上限后, 进一步依靠变桨机构增大桨距角以降低风机捕获的风能, 而 RES-CCS 控制与 SC-ESU 控制中变桨机构不参与过电压控制过程, 减小了变桨机构工作时间。

图 12(c) 为该风况下风机 1 风能利用率的变化曲线。结合图 12(a) 和图 12(b) 可知, 主要受桨距角变化的影响, 转子变速控制导致风机风能利用率明显降低, 风机弃风损耗较高。

图 12(d) 为风机 1 中超级电容两端电压变化曲线。可知, 由于超级电容全程参与限压, SC-ESU 控制中储能单元投入时长与两端升压明显高于 RES-CCS 控制, 这就要求储能单元的容量较大, 风机单元配置储能的投入成本较高。

由图 12(b) 和图 12(d) 可知, RES-CCS 可有效控制串联端口电压 U_{wt} 在限定值内, 较转子变速控制可减少变桨机构动作时间, 较 SC-ESU 控制可降低储能单元容量需求, 减小风电场的弃风损耗和附加储能的容量配置, 提高风电场运行经济性。

4 结论

为解决串并联型风电直流汇集系统中同一串联簇上风速差异导致的 D-PMSG 过电压问题、转子变速控制的转速限制问题和弃风问题, 且为了降低储能设备的容量需求, 文中提出基于 RES-CCS 的过电压控制策略。

基于 150 MW 串并联型风电直流汇集系统, 通过仿真串联簇中风机处于不同风速水平时串联端口过电压问题, 对比现有过电压控制策略与基于 RES-CCS 的过电压控制策略。结果表明: 所提控制可利用超级电容储能辅助转子变速, 克服因转子转速受限和储能能力不足产生的弃风问题, 应用 RES-CCS 过电压控制策略较转子变速控制降低风机变桨机构动作产生的能量损耗; RES-CCS 可通过转子变速分担超级电容所需配置的容量, 较储能控制降低容量需求。通过仿真分析, 验证了文中所提过电压控制策略的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] 傅春翔, 罗璇瑶, 酆洪柯, 等. 海上升压站大孤岛运行模式技术研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 74-80, 102.
- FU Chunxiang, LUO Xuanyao, LI Hongke, et al. Research on big island operation technology of offshore substation[J]. Elec-

- trical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 74-80,102.
- [2] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 1-12.
- YAN Xinrong, ZHANG Ningning, MA Kuichao, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 1-12.
- [3] 许帅, 杨羽霏, 刚傲, 等. 中欧漂浮式海上风电关键技术产业链合作路径研究[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 13-23.
- XU Shuai, YANG Yufei, GANG Ao, et al. Research on key technologies and industrial chain cooperation paths of floating offshore wind power between China and Europe[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 13-23.
- [4] 王诗超, 刘嘉畅, 刘展志, 等. 海上风电产业现状及未来发展分析[J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 103-112.
- WANG Shichao, LIU Jiachang, LIU Zhanzhi, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(4): 103-112.
- [5] 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 DC boost delivery system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(8): 166-176.
- [6] 张哲任, 徐政, 黄莹, 等. 藏东南光伏基地全直流汇集送出方案及其控制策略研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(6): 23-32.
- ZHANG Zheren, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Research on the full DC collection and transmission scheme for the photovoltaic base in Southeast Tibet and its control strategy[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 23-32.
- [7] 孙均磊, 贾科, 李再男, 等. 基于故障分量时频突变特征的海上风电直流升压送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 1-11.
- SUN Junlei, JIA Ke, LI Zainan, et al. Pilot protection for offshore wind power DC transmission lines based on the time-frequency mutation characteristics of fault components[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 1-11.
- [8] 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.
- [9] 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): 142-152.
- [10] GUAN M Y. A series-connected offshore wind farm based on modular dual-active-bridge (DAB) isolated DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1422-1431.
- [11] 夏冰清, 傅棚杰, 杨文斌, 等. 直驱式永磁同步风力发电系统的组合控制策略[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 57-64.
- XIA Bingqing, FU Xujie, YANG Wenbin, et al. An integrated control strategy for D-PMSG wind power generation systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 57-64.
- [12] 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.
- [13] WANG H, ZHANG J W, ZHU C H, et al. DC-link current optimal control of current source converter in DFIG[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(2): 127-135.
- [14] 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.
- [15] 杨仁炘, 施刚, 蔡旭, 等. 风电场柔性直流并网控制保护技术现状与展望[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 48-57.
- YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Present situation and prospect of the control and protection technology for flexible DC intergration of wind farm[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 48-57.
- [16] RONG F, WU G P, LI X, et al. ALL-DC offshore wind farm with series-connected wind turbines to overcome unequal wind speeds[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1370-1381.
- [17] 罗慧达. 海上双馈风力发电系统不同直流组网方式的控制策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- LUO Huida. Control strategies of different DC networking modes for offshore doubly-fed wind power generation systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [18] GUO G P, SONG Q, ZHAO B, et al. Series-connected-based offshore wind farms with full-bridge modular multilevel converter as grid- and generator-side converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2798-2809.
- [19] 吴超. 基于定子侧不控整流的双馈风力发电机直流并网控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- WU Chao. Investigation on control strategies of DFIG connected to DC grid based on uncontrolled rectifier on stator side[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [20] 张超. 直驱式永磁同步风机的低电压穿越控制策略研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.

- ZHANG Chao. Research on low voltage crossing control strategy of direct drive permanent magnet synchronous fan[D]. Chengdu: Xihua University, 2019.
- [21] 何颖源, 陈永翀, 刘勇, 等. 储能的度电成本和里程成本分析[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(9): 1-10.
- HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(9): 1-10.
- [22] 杨化超. 石墨烯超级电容储能纳米尺度数值模拟及定向实验调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- YANG Huachao. Nanoscale insights into mechanism of graphene based supercapacitor and experimental optimization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [23] 王雨欣, 王思怡, 杨黎晖, 等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J]. *高压电器*, 2023, 59(4): 177-185.
- WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(4): 177-185.
- [24] 杨帆, 任永峰, 云平平, 等. 双级锂电池-超级电容混合储能的协调控制及功率分配[J]. *可再生能源*, 2019, 37(3): 361-366.
- YANG Fan, REN Yongfeng, YUN Pingping, et al. Coordinated control and power distribution of double stage lithium battery-super capacitor hybrid energy storage system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(3): 361-366.
- [25] 杨航. 含超级电容的直驱永磁风电低电压穿越及频率调节研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- YANG Hang. Research on low voltage ride-through and frequency regulation of direct-drive permanent magnet wind power with super capacitor[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [26] 杨淇鸾, 肖晃庆, 朱琼海. 基于电容电压平衡的 MMC-SCES 荷电状态均衡控制方法[J]. *浙江电力*, 2024, 43(11): 36-46.
- YANG Qiluan, XIAO Huangqing, ZHU Qionghai. A SOC equilibrium control strategy for MMC-SCES based on capacitor voltage balancing[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(11): 36-46.
- [27] 杨晓宇. 基于虚拟同步发电机的永磁直驱风电机组主动支撑控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- YANG Xiaoyu. Research on active support control strategy of permanent magnet direct drive wind turbine based on virtual synchronous generator[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2019.
- [28] LU Y K, HU S L, DONG X L, et al. Stability analysis and collaborative optimization of all-DC offshore wind renewable energy[C]//2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE). Jinan, China. IEEE, 2021: 927-932.
- [29] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 163-174.
- REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 163-174.
- [30] GUO G P, ZHA K P, ZHANG J, et al. Grounding fault in series-connection-based offshore wind farms: fault clearance[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9357-9367.
- [31] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 63-74.
- SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 63-74.
- [32] KIM G H, KANG M H, AHN J H, et al. Operation of DC series connected offshore wind farm by using tap changing transformer with MMC-HVDC[C]//2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA). Al Ain, United Arab Emirates. IEEE, 2018: 291-295.
- [33] FU X F, AL-HADDAD K, DESSAINT L A, et al. Series connection of VSC modules for offshore wind farm application[C]//2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2019: 974-979.
- [34] 樊双婕. 海上风电场大容量直流汇集变换器拓扑与控制技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- FAN Shuangjie. Topology and control technology of large-capacity DC sink converter in offshore wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [35] PAPE M, KAZERANI M. On the efficiency of series-connected offshore DC wind farm configurations[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA. IEEE, 2019: 921-926.
- [36] ALMEIDA A O, ALMEIDA P M, BARBOSA P G. Design methodology for the DC link current controller of a series-connected offshore wind farm[C]//2022 14th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC). Santa Maria, Brazil. IEEE, 2022: 1-6.
- [37] 唐西胜. GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》解读[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 23-28.
- TANG Xisheng. Interpretation of GB/T 35727-2017 guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 23-28.

- [38] 蔡旭, 杨仁炘, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [39] 刘畅. 全直流型海上风电场故障条件下的协调控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
LIU Chang. Research on coordinated control technology under fault condition of all-DC offshore wind farm[D]. Jinan: Shandong University, 2020.

作者简介:



樊璐雯

樊璐雯(1999), 女, 硕士在读, 研究方向为电力系统及其自动化 (E-mail: 1633003249@qq.com);

樊艳芳(1971), 女, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源并网技术、电力系统继电保护;

侯俊杰(1993), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。

Overvoltage control strategy of series-parallel wind power DC collection system based on RES-CCS

FAN Luwen¹, FAN Yanfang¹, HOU Junjie¹, SUN Yao¹, WANG Yaqiang²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Qijiang Power Supply Branch, Chongqing 401420, China)

Abstract: Wind power DC collection system can effectively solve the harmonic resonance problems of AC collection system, and the series-parallel topology can effectively reduce the system cost compared with other structures, so it is very important to study the stable operation control of series-parallel wind power DC collection system. Based on the coupling characteristics of series port voltages, the rotor and energy storage coordinated control strategy (RES-CCS) is proposed to solve the overvoltage problem caused by wind speed fluctuation during steady operation of the wind turbine. Firstly, the operating characteristics of the series-parallel wind power DC collection system and the shortcomings of the existing overvoltage control strategy are analyzed. Then, the series port voltage limit is studied. The RES-CCS method is used to clamp the series port voltage within the limit value, and the energy storage capacity of the required super capacitor is designed. Finally, a series parallel wind power DC collection system model is built in the PSCAD/EMTDC simulation platform, and RES-CCS is simulated and verified. The results show that the overvoltage control method proposed in this paper can reduce the abandonment loss and the energy storage capacity of the wind turbine, and improve the wind energy utilization rate and operation economy of the wind turbine.

Keywords: wind farms; DC collection system; series-parallel topology; overvoltage; voltage limit; coordinated control

(编辑 方晶)